



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**Ασύρματα Συστήματα Πολλαπλών Κεραιών για Επικοινωνίες με
Επίκεντρο το Ανθρώπινο Σώμα (Body-centric Communications):
Ανάπτυξη, Αξιολόγηση Επιδόσεων και Μοντελοποίηση**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ασημίνα Π. Μιχαλοπούλου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ασύρματα Συστήματα Πολλαπλών Κεραιών για Επικοινωνίες με
Επίκεντρο το Ανθρώπινο Σώμα (Body-centric Communications):
Ανάπτυξη, Αξιολόγηση Επιδόσεων και Μοντελοποίηση**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ασημίνα Π. Μιχαλοπούλου

Συμβουλευτική Επιτροπή : Δήμητρα-Θεοδώρα Ι. Κακλαμάνη
Αντώνιος Α. Αλεξανδρίδης
Ιάκωβος Στ. Βενιέρης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την/..../2013 .

.....
Δ. Κακλαμάνη
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....
Ι. Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Α. Αλεξανδρίδης
Ερευνητής Α', ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Α. Κανάτας
Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιά

.....
Α. Παναγόπουλος
Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2013

.....
Ασημίνα Π. Μιχαλοπούλου
Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ασημίνα Π. Μιχαλοπούλου, 2013.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στην οικογένειά μου και τον Παύλο

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ασύρματων Επικοινωνιών του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» σε συνεργασία με το Εργαστήριο Ευφών Επικοινωνιών και Δικτύων Ευρείας Ζώνης καθώς και το Εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ολοκλήρωσή της δεν θα ήταν εφικτή χωρίς τη συνεισφορά ορισμένων ανθρώπων, των οποίων η ηθική, πνευματική και επιστημονική συμβολή ήταν καθοριστική κατά τη διάρκειά της. Σε αυτό το σημείο αισθάνομαι την ηθική υποχρέωση να τους ευχαριστήσω θερμά.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου Δήμητρα Κακλαμάνη, για την ευκαιρία που μου έδωσε να αναλάβω την παρούσα διδακτορική διατριβή και να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και σύγχρονο ερευνητικό θέμα, για την υποστήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της αλλά και για την άριστη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια.

Σημαντική για το περιεχόμενο της διατριβής ήταν και η συμβολή των μελών του Εργαστηρίου Ασύρματων Επικοινωνιών του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Πρωτίστως ευχαριστώ τον συνεπιβλέποντά μου Ερευνητή Α' Αντώνη Αλεξανδρίδη για τη συνεργασία μας. Η ερευνητική του καθοδήγηση, η εμπιστοσύνη του και η συστηματική υποστήριξη που μου προσέφερε, συνέβαλαν ουσιαστικά στην επιστημονική μου κατάρτιση και στο ερευνητικό μου έργο. Τον ευχαριστώ για την αμέριστη ηθική συμπαράστασή του και για τη δημιουργία των κατάλληλων προϋποθέσεων για την ανάπτυξη των δραστηριοτήτων και την εκπόνηση της διατριβής αυτής. Επίσης ευχαριστώ τους Ερευνητές Α' Κώστα Δαγκάκη και Φώτη Λαζαράκη για τις καίριες επισημάνσεις, παρεμβάσεις και διορθώσεις τους καθώς και για τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις περί επιστημονικών και εν γένει ευρύτερων θεμάτων. Επίσης ευχαριστώ τους Διδάκτορες Μηχανικούς Κώστα Πέππα και Θεόδωρο Ζερβό για την άριστη επικοινωνία και συνεργασία που είχαμε και την πολύτιμη βοήθεια τους. Ακόμα ευχαριστώ θερμά τον

ηλεκτρονικό κ. Ελευθέριο Αδειλίνη για το ενδιαφέρον του, τη βοήθεια και την πολύτιμη τεχνική υποστήριξη οποτεδήποτε κι αν χρειάστηκε.

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής ήρθα σε επαφή με αξιόλογους συναδέλφους, με τους οποίους μοιραστήκαμε τους κοινούς μας προβληματισμούς όλα αυτά τα χρόνια. Τους ευχαριστώ θερμά για τη δημιουργία αρμονικού κλίματος εργασίας και για όλες τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις πάνω σε ερευνητικά και όχι μόνο ζητήματα.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Ιωάννη Βολάκη, τον ερευνητή Δημήτριο Ψυχουδάκη και τον Gil-Young Lee από το Electrosience Lab του Ohio State University για τις επιστημονικές μας συζητήσεις, την άριστη συνεργασία και την πολύτιμη βοήθεια τους κατά τη διάρκεια της εξάμηνης παραμονής μου στο εργαστήριο.

Ακόμη ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, για τις χρήσιμες παρατηρήσεις και υποδείξεις τους.

Τέλος, ιδιαίτερα θερμές ευχαριστίες θέλω να εκφράσω στους γονείς μου, Παναγιώτη και Ευαγγελία, την αδερφή μου Βάλια και τον Παύλο για την αμέριστη ηθική τους συμπαράσταση, την εμπιστοσύνη τους και τη συνεχή στήριξή τους σε όλες μου τις επιλογές.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, με την εξάπλωση των φορητών συσκευών και τη συνεχή μείωση του μεγέθους τους, πληθαίνουν οι εφαρμογές που περιλαμβάνουν φορητά συστήματα επικοινωνιών. Εξαιτίας της ανάπτυξης αυτής, έχουν δημιουργηθεί νέες τάσεις στις επικοινωνίες που οδήγησαν σε μια νέα και ενδιαφέρουσα περιοχή έρευνας, τις επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα (body-centric wireless communications). Οι επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα χρησιμοποιούν το σώμα του χρήστη ως περιβάλλον επικοινωνίας μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών που λειτουργούν κοντά σε αυτό και επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ασύρματων τεχνολογιών. Τα φορητά συστήματα λειτουργούν σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον, γεγονός που προκαλεί διαλείψεις. Πιο συγκεκριμένα, οι διαλείψεις συμβαίνουν εξαιτίας της παρουσίας του σώματος του χρήστη και της κίνησής του, καθώς και του γύρω περιβάλλοντος. Επιπλέον, σε αντίθεση με τις κινητές επικοινωνίες, στα κανάλια πάνω στο σώμα (on-body channels), τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης κινούνται και αλλάζουν θέσεις σε σχέση με το περιβάλλον διάδοσης αλλά και μεταξύ τους. Εκτός από τις διαλείψεις, άλλο ένα πολύ σημαντικό θέμα, που αφορά στις ασύρματες συσκευές πάνω στο σώμα, είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, η οποία πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν χαμηλότερη, για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας και ταυτόχρονα να μειωθεί η τιμή της απορροφώμενης από το σώμα του χρήστη Η/Μ ισχύος, ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης (Specific Absorption Rate - SAR).

Εκτός από τα προαναφερθέντα θέματα, η συνεχώς αυξανόμενη χρήση των ασύρματων συσκευών στους τομείς της υγείας, της διασκέδασης, της ασφάλειας, της ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων κ.α. οδηγεί την έρευνα στο να υλοποιήσει πιο αξιόπιστες και αποδοτικές ζεύξεις μεταξύ των ασύρματων συσκευών που βρίσκονται πάνω στο σώμα. Για το λόγο αυτό, παρατηρείται ραγδαία αύξηση των εφαρμογών που περιλαμβάνουν πολλαπλές κεραίες σε συστήματα που λειτουργούν με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα.

Κατά συνέπεια, είναι πολύ σημαντικό για τα κανάλια πάνω στο σώμα να περιοριστούν οι διαλείψεις όσο το δυνατόν περισσότερο, καθώς επηρεάζουν την αξιοπιστία και την ποιότητα των υπηρεσιών και να αυξηθεί ο σηματοθορυβικός λόγος (SNR), χωρίς να αυξηθεί αντίστοιχα η ισχύς εκπομπής. Ο διαφορισμός χώρου (spatial

diversity) είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνική για την αντιμετώπιση των διαλείψεων και την επίτευξη μιας αποδοτικής ζεύξης στις κινητές επικοινωνίες. Από την άλλη, τα συστήματα πολλαπλών-εισόδων πολλαπλών-εξόδων (MIMO) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Για τους λόγους αυτούς, η μελέτη των ασύρματων δικτύων με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα και η μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού, στην περίπτωση όπου και οι κεραιές του πομπού, αλλά και οι κεραιές του δέκτη βρίσκονται πάνω στο σώμα του χρήστη (on-body channel), παρουσιάζουν τεράστιο ερευνητικό ενδιαφέρον.

Η διατριβή αυτή, έχοντας ως κύριο άξονα τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών πολλαπλών κεραιών που λειτουργούν με επίκεντρο το σώμα του χρήστη, πραγματεύεται την αξιολόγηση και τη μοντελοποίηση των συστημάτων αυτών.

Αρχικά, μελετά την αξιολόγηση επιδόσεων συστημάτων που περιλαμβάνουν πολλαπλές κεραιές και στα δύο άκρα της ζεύξης, εστιάζοντας στην επίδραση του ανθρώπινου σώματος στην απόδοση του συστήματος. Η αξιολόγηση αυτή είναι πολύ σημαντική από την άποψη του σχεδιασμού και της μοντελοποίησης τέτοιων συστημάτων. Ειδικότερα, πραγματοποιείται μελέτη επιδόσεων ενός συστήματος MIMO που είναι εξοπλισμένο με ένα ασύρματο τερματικό στην πλευρά του χρήστη, για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις επίδρασης του ανθρώπινου σώματος στην απόδοση του συστήματος. Η πρώτη περίπτωση αφορά στην επίδραση του χεριού καθώς ο χρήστης κρατάει το τερματικό MIMO, ενώ στη δεύτερη περίπτωση μελετάται η επίδραση του ανθρώπινου σώματος, καθώς το τερματικό βρίσκεται στην τσέπη του χρήστη σε κατάσταση αναμονής. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι η απόδοση του συστήματος μπορεί να υποβιβαστεί από 10% μέχρι 60% εξαιτίας του ανθρώπινου σώματος. Επιπλέον, πραγματοποιείται μελέτη των επιδόσεων ενός συστήματος MIMO που περιλαμβάνει πολλαπλές κεραιές ενσωματωμένες στο ρουχισμό του χρήστη (φορετές κεραιές – bodyworn antennas). Τέλος, πραγματοποιείται μια συγκριτική μελέτη επιδόσεων των προαναφερθέντων συστημάτων.

Στη συνέχεια, μελετά τη μοντελοποίηση του καναλιού ενός ασύρματου συστήματος επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, εξετάζοντας αφενός το απλό κανάλι και αφετέρου μελετώντας τις επιδόσεις και τη μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού. Στα πλαίσια αυτά, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες σειρές μετρήσεων στα 2.45 GHz, για διάφορα σενάρια, χρησιμοποιώντας φορετές κεραιές. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε φορητή

κεραία με υφασμάτινο υπόστρωμα από τσόχα, η οποία λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων ISM 2.45 GHz. Τα περιβάλλοντα διεξαγωγής των μετρήσεων είναι ένα ρεαλιστικό περιβάλλον λειτουργίας, όπου είναι έντονο το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών (περιβάλλον γραφείου) και ένα περιβάλλον χωρίς εξωτερικές ανακλάσεις και πολλαπλές διαδρομές, όπου οι διαλείψεις παράγονται αποκλειστικά από τις κινήσεις του σώματος (ανηχικός θάλαμος). Μέσω διεξοδικής στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων των μετρήσεων, εξετάστηκε η επίδραση της θέσης των κεραιών και της κίνησης του χρήστη στα χαρακτηριστικά της διάδοσης του απλού καναλιού και του καναλιού διαφορισμού του σώματος. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η απόδοση του καναλιού διαφορισμού του σώματος. Όπως προκύπτει από τη μελέτη, το θεωρητικό μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα, τόσο το απλό κανάλι, όσο και το κανάλι διαφορισμού σε περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις είναι η κατανομή lognormal. Από την άλλη, σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών, η καλύτερη κατανομή είναι η Weibull για το απλό κανάλι και η α - μ για το κανάλι διαφορισμού.

Λέξεις Κλειδιά

Συστήματα MIMO, Συστήματα επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, φορητές κεραιές, διαφορισμός, μοντελοποίηση καναλιού πάνω στο σώμα, ανάλυση απόδοσης διαφορισμού

Abstract

Recently, due to the proliferation of wearable devices and the reduction of their size, there is a large number of applications including wearable communication systems. Due to this development, new trends have emerged in communications that led to a new and interesting research area, *body-centric wireless communications*. Body-centric wireless communications use the human body as the propagation environment between two or more devices that operate in proximity to the body and communicate with each other through wireless technologies. Wearable systems operate in a constantly varying environment, thus causing fading. More specifically, fading occurs because of the presence and the movement of the user and the surrounding environment. Moreover, in contrast to mobile communications, in on-body channels both the transmitter and the receiver are moving and changing positions in the propagation environment as well as relative to each other. Besides fading, another important issue that concerns the devices on-body is the transmitted power, which should be kept as low as possible in order to increase the life of the battery and at the same time reduce the value of the specific absorption rate (SAR).

Apart from the above mentioned issues, the ever increasing use of wireless devices in health, recreation, safety, personal identification etc. drives research to implement more efficient and reliable links between devices located on-body. For this reason, a significant increase in applications that include multiple antennas in body-centric systems is observed lately. This increase is followed by significant scientific interest in this research area.

As results from the previous analysis, it is very important for on-body channels to mitigate fading as much as possible since they affect the reliability and the quality of services and to increase the signal-to-noise ratio (SNR) without increasing the transmitting power. Spatial diversity is a very popular technique to overcome fading and achieve an efficient link in mobile communications. On the other side, MIMO systems could be used to increase the data rate. For these reasons, the study of wireless body-centric networks and the modeling of the wireless channel when the antennas of both the transmitter and the receiver are on the user's body, presents a huge research interest.

This doctoral thesis, having as a main subject the wireless body-centric communication systems including multiple antennas, addresses two relating issues, the evaluation and modeling of these systems.

At first, studies the performance evaluation of MIMO antenna systems focusing on the impact of the human body on the channel performance. This evaluation is very important from the antenna design and system modeling point of view. Particularly, we perform a performance study of a MIMO system which is equipped with a wireless terminal at the user's side, for two typical cases of showing the impact of the human body on the system performance. The first case regards the impact of the user's hand in "multimedia viewing position" while the user holds the MIMO terminal, whereas in the second case the impact of the full human body is studied, while the terminal is in the user's pocket in operating mode. The analysis of the results shows that the human body can cause degradation of the system performance that ranges between 10% and 60%. Moreover the performance of a MIMO system that includes multiple wearable antennas at the user's side is investigated. Finally a comparative study is performed between the previously mentioned systems.

Secondly, the modeling of the on-body channel of a wireless body-centric communication system is studied, in terms of the single branch channel modeling and the performance analysis and modeling of the on-body diversity channel. In this context, an extensive measurement campaign has been conducted at 2.45 GHz, for various scenarios using wearable antennas. In order to perform measurements, a textile substrate wearable antenna was designed and manufactured, that operates in the ISM frequency band of 2.45 GHz. The measurement environments were a realistic propagation environment that includes the multipath effect (office) and a reflectionless environment where fading are caused alone by the body movements (anechoic chamber). Through extensive statistical analysis of the measurements data the impact of the antenna position and the user movement on the propagation characteristics of the on-body channel and the on-body diversity channel was investigated. Moreover the on-body channel diversity performance was evaluated. As resulted, the theoretical model that best fits, both the single branch and the diversity channels, in a reflectionless environment is lognormal distribution. On the other side, in a multipath environment, best fit is provided by Weibull distribution for single branch channel and α - μ for the diversity channel.

Key Words

MIMO systems, Body-centric communication systems, wearable antennas, on-body diversity, on-body channel modeling, diversity performance analysis

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	xvii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	xxiii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xxxi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ	xxxiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	1
1.1 Κίνητρο	1
1.2 Στόχοι και γενική μεθοδολογία της διατριβής	5
1.3 Δομή της διατριβής	8
1.4 Δημοσιεύσεις.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ασύρματα συστήματα πολλαπλών κεραιών	13
2.1 Βασικές έννοιες (συστήματα MIMO και διαφορισμός χώρου)	13
2.2 Διαλείψεις καναλιού.....	14
2.3 Εισαγωγή στην έννοια του διαφορισμού (diversity).....	18
2.3.1 Διατάξεις διαφορισμού σημάτων.....	22
2.3.2 Συσχέτιση (correlation) των σημάτων των κλάδων.....	26
2.3.3 Κέρδος διαφορισμού (diversity gain)	27
2.3.4 Είδη διαφορισμού	29
2.3.4.1 Διαφορισμός χρόνου.....	30
2.3.4.2 Διαφορισμός συχνότητας.....	30
2.3.4.3 Διαφορισμός χώρου	30
2.3.4.4 Διαφορισμός διαγράμματος.....	32
2.3.4.5 Διαφορισμός πόλωσης.....	33
2.4 Ασύρματα συστήματα επικοινωνιών MIMO	33
2.4.1 Διατάξεις καναλιών MIMO	34
2.4.1.1 Κανάλι SISO (Απλής Εισόδου – Απλής Εξόδου).....	34
2.4.1.2 Κανάλι SIMO (Απλής Εισόδου – Πολλαπλών Εξόδων).....	35
2.4.1.3 Κανάλι MISO (Πολλαπλών Εισόδων – Απλής Εξόδου).....	35

2.4.1.4	Κανάλι MIMO (Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων).....	36
2.5	Χωρητικότητα καναλιού συστημάτων MIMO.....	37
2.5.1	Χωρητικότητα συστημάτων MIMO χωρίς γνώση του καναλιού στον πομπό.....	39
2.5.2	Στοχαστικά κανάλια.....	41
2.5.2.1	Εργοδική χωρητικότητα και χωρητικότητα διακοπής.....	41
2.5.3	Κανονικοποίηση του πίνακα του καναλιού.....	42
2.6	Μεθοδολογίες αξιολόγησης συστημάτων MIMO.....	44
2.6.1	Μέθοδοι αξιολόγησης της χωρητικότητας συστημάτων MIMO.....	44
2.6.1.1	Υπολογισμός της χωρητικότητας από μετρήσεις σε ένα θάλαμο αντήχησης.....	46
2.6.1.2	Υπολογισμός της χωρητικότητας από προσομοιώσεις με χρήση μοντέλων καναλιού και διαγραμμάτων ακτινοβολίας.....	47
2.6.1.3	Υπολογισμός της χωρητικότητας από την πραγματοποίηση μετρήσεων σε πραγματικά περιβάλλοντα.....	47
2.7	Μοντελοποίηση καναλιών MIMO.....	58
2.7.1	Φυσικά μοντέλα.....	59
2.7.1.1	Ντετερμινιστικά μοντέλα.....	59
2.7.1.2	Στοχαστικά Μοντέλα.....	60
2.8	Η επίδραση του σώματος στην απόδοση συστημάτων MIMO.....	62
2.8.1	Μοντέλα καναλιών MIMO που περιλαμβάνουν την επίδραση της κεραίας και του σώματος του χρήστη.....	65
2.9	Ανοιχτά θέματα.....	66
2.10	Ορολογία διατριβής.....	68

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ασύρματες επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα (body-centric communications) 69

3.1	Εισαγωγή στις ασύρματες επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα.....	69
3.2	Μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος.....	78
3.2.1	Φυσικά ομοιώματα.....	84
3.2.2	Αριθμητικά ομοιώματα.....	86
3.3	Φορετές κεραίες για τα κανάλια πάνω στο σώμα.....	88
3.3.1	Φορετές κεραίες: πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	89
3.3.2	Αλληλεπίδραση ανθρώπινου σώματος και φορετών συστημάτων.....	90
3.3.3	Θέματα σχεδιασμού των φορετών κεραιών.....	91
3.3.4	Εξέλιξη των φορετών κεραιών.....	92
3.3.5	Κεραίες μικροταινίας.....	97
3.3.5.1	Χαρακτηριστικά κεραίας.....	98
3.3.6	Υλικά κατασκευής φορετών κεραιών.....	104

3.3.6.1	Κεραίες με υφασμάτινο υπόστρωμα.....	104
3.3.6.2	Κεραίες με υφασμάτινα αγώγιμα μέρη.....	106
3.3.6.3	Αγώγιμα υφάσματα στο εμπόριο.....	108
3.3.6.4	Τεχνικές τροφοδοσίας φορετών κεραιών.....	111
3.4	Χαρακτηρισμός του καναλιού διάδοσης πάνω στο σώμα.....	115
3.4.1	Μηχανισμός διάδοσης πάνω στο ανθρώπινο σώμα.....	115
3.4.2	Χαρακτηρισμός του καναλιού διάδοσης πάνω στο σώμα.....	118
3.4.3	Μοντελοποίηση του καναλιού on-body και κατανομές.....	121
3.5	Εφαρμογές συστημάτων BAN.....	124
3.6	Ασύρματα συστήματα πολλαπλών κεραιών παρουσία του ανθρώπινου σώματος.....	125
3.6.1	Κυριότερες σειρές μετρήσεων για συστήματα διαφορισμού πάνω στο σώμα ...	126
3.6.2	Μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού του σώματος.....	129
3.7	Ανοιχτά θέματα και συνεισφορά διατριβής.....	130

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Συστήματα MIMO και επικοινωνία κοντά στο ανθρώπινο σώμα 133

4.1	Εισαγωγή.....	133
4.2	MIMO τερματικό και κεραιοσυστοιχία.....	135
4.3	Χωρητικότητα με χρήση ενός μοντέλου καναλιού που βασίζεται σε πίνακες συνδιακύμανσης.....	136
4.3.1	Μοντέλο καναλιού.....	136
4.3.2	Υπολογισμός χωρητικότητας.....	139
4.4	Σενάρια αξιολόγησης συστημάτων MIMO.....	140
4.4.1	Η επίδραση της θέσης του χεριού στην απόδοση ενός ασυρμάτου τερματικού MIMO.....	140
4.4.1.1	Μοντέλα χεριού.....	141
4.4.2	Η επίδραση του σώματος του χρήστη στην απόδοση ενός ασυρμάτου τερματικού MIMO.....	143
4.4.2.1	Μοντέλα του σώματος.....	143
4.5	Αποτελέσματα για το τερματικό στο χέρι.....	144
4.5.1	Προσομοίωση των S-παραμέτρων και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας.....	145
4.5.2	Αποτελέσματα χωρητικότητας για το μοντέλο καναλιού που βασίζεται στους πίνακες συνδιακύμανσης.....	147
4.6	Αποτελέσματα για το τερματικό στο σώμα.....	151
4.6.1	Προσομοίωση των S-παραμέτρων και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας.....	151

4.6.2	Αποτελέσματα χωρητικότητας για το μοντέλο καναλιού που βασίζεται στους πίνακες συνδιακύμανσης	154
4.7	Συγκριτική μελέτη της απόδοσης συστημάτων MIMO	157
4.7.1	Μοντέλο του σώματος	158
4.7.2	Προσομοίωση διαγραμμάτων ακτινοβολίας και των S-παραμέτρων	159
4.7.3	Συντελεστής συσχέτισης και απόδοση ακτινοβολίας	161
4.7.3.1	Συντελεστής συσχέτισης.....	162
4.7.3.2	Απόδοση ακτινοβολίας.....	162
4.7.3.3	Αποτελέσματα του συντελεστή συσχέτισης και της απόδοσης ακτινοβολίας.....	163
4.7.4	Αποτελέσματα χωρητικότητας	164
4.7.5	Η επίδραση του αριθμού των κεραιών στη χωρητικότητα του καναλιού.....	165
4.7.6	Σύνοψη και συμπεράσματα της συγκριτικής μελέτης	166
4.8	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	167
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σχεδιασμός και υλοποίηση φορετών κεραιών		169
5.1	Εισαγωγή.....	169
5.2	Σχεδιασμός κεραίας.....	170
5.3	Χαρακτηρισμός του υφασμάτινου υλικού του υποστρώματος.....	173
5.3.1	Πάχος	174
5.3.2	Επιτρεπτότητα και συντελεστής απωλειών	174
5.3.3	Χαρακτηριστικά του υλικού του υφασμάτινου υποστρώματος.....	179
5.4	Σχεδιασμός φορετής κεραίας με υφασμάτινο υπόστρωμα στα 2.45 GHz	179
5.5	Υλοποίηση φορετής κεραίας με ομοαξονική τροφοδοσία (CC).....	183
5.5.1	Υλοποίηση κεραίας.....	183
5.5.2	Μέτρηση κεραίας.....	184
5.6	Υλοποίηση υφασμάτινης φορετής κεραίας με τροφοδοσία μέσω γραμμής μικροταινίας	191
5.6.1	Σχεδιασμός κεραίας	191
5.6.2	Κεραία με υφασμάτινα αγωγίμα μέρη (TM)	195
5.6.2.1	Προσομοίωση	195
5.6.2.2	Υλοποίηση κεραίας.....	196
5.6.2.3	Μέτρηση κεραίας.....	196
5.6.3	Κεραία με μεταλλικά αγωγίμα μέρη (CM).....	200
5.6.3.1	Υλοποίηση κεραίας.....	200
5.6.3.2	Μέτρηση κεραίας.....	201
5.6.4	Συμπεράσματα	203
5.7	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	204

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συστήματα φορητών κεραιών και επικοινωνία πάνω στο ανθρώπινο σώμα	207
6.1 Εισαγωγή.....	207
6.2 Μοντελοποίηση του καναλιού του σώματος (on-body channel)	208
6.2.1 Επιλογή και τοποθέτηση φορητών κεραιών πάνω στο σώμα	209
6.2.2 Περιβάλλον μετρήσεων	213
6.2.3 Εξοπλισμός μετρήσεων.....	214
6.2.4 Διάταξη και μεθοδολογία μετρήσεων στα 2.45 GHz	215
6.2.5 Σενάρια κινήσεων του χρήστη στον ανηχωικό θάλαμο.....	216
6.2.6 Σενάρια κινήσεων του χρήστη στο χώρο του εργαστηρίου.....	217
6.2.7 Ανάλυση δεδομένων	219
6.2.7.1 Εκτίμηση στατιστικών παραμέτρων	219
6.2.7.2 Έλεγχος καλής προσαρμογής των κατανομών	221
6.2.8 Αποτελέσματα σε περιβάλλον ανηχωικού θαλάμου.....	222
6.2.9 Αποτελέσματα σε περιβάλλον εργαστηρίου.....	226
6.2.9.1 Προσαρμογή κατανομής και στατιστική ανάλυση πρώτης τάξης.....	226
6.2.9.2 Στατιστική ανάλυση δεύτερης τάξης.....	234
6.2.9.3 Σύνοψη και συμπεράσματα	242
6.3 Χωρικός διαφορισμός για επικοινωνίες πάνω στο ανθρώπινο σώμα	243
6.3.1 Επιλογή και τοποθέτηση φορητών κεραιών πάνω στο σώμα	245
6.3.2 Διάταξη και μεθοδολογία μετρήσεων διαφορισμού στα 2.45 GHz.....	246
6.3.3 Μεθοδολογία αξιολόγησης επιδόσεων του καναλιού διαφορισμού του σώματος 249	
6.3.3.1 Συσχέτιση σημάτων.....	250
6.3.3.2 Κέρδος διαφορισμού.....	251
6.3.4 Μεθοδολογία μοντελοποίησης του καναλιού διαφορισμού του σώματος.....	253
6.3.4.1 Προσαρμογή κατανομής και στατιστική ανάλυση πρώτης τάξης.....	255
6.3.4.2 Στατιστική ανάλυση δεύτερης τάξης.....	260
6.3.4.3 Σύνοψη και συμπεράσματα	264
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	265
7.1 Συμπεράσματα	265
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	267
Βιβλιογραφία	273

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Ασύρματες εφαρμογές διαδικτύου και πολυμέσων	4
Σχήμα 2.1: Διαλείψεις καναλιού.	14
Σχήμα 2.2: Παράδειγμα της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με τις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας (η διάστικτη γραμμή ακολουθεί τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας). ..	16
Σχήμα 2.3: Λήψη διαφορισμού.	19
Σχήμα 2.4: Ταξινόμηση συστημάτων επικοινωνίας με βάση τον αριθμό των κεραιών.	20
Σχήμα 2.5: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα ενός συνδυαστή διαφορισμού στο στάδιο RF [21].	23
Σχήμα 2.6: Κύκλωμα εξισωτή φάσης για ένα δέκτη διαφορισμού δύο κλάδων [21].	24
Σχήμα 2.7: Υπολογισμός κέρδους διαφορισμού.	28
Σχήμα 2.8: Διακύμανση συντελεστή συσχέτισης με την απόσταση των κεραιών.	31
Σχήμα 2.9: Διαφορισμός χώρου, διαγράμματος και πόλωσης.	32
Σχήμα 2.10: Ένα $N_T \times N_R$ σύστημα MIMO με N_T Tx και N_R Rx κεραιές.	37
Σχήμα 2.11: Γενική αρχιτεκτονική μιας πλατφόρμας δοκιμών για ένα σύστημα MIMO 4x4 [56].	50
Σχήμα 2.12: Διάταξη μετρήσεων με πλατφόρμα μετρήσεων MIMO στο UPM.	53
Σχήμα 2.13: Διάταξη μετρήσεων με εικονικές στοιχειοκεραίες, όπου ο μηχανισμός μετακίνησης των κεραιών και ο αναλυτής δικτυωμάτων ελέγχονται από έναν H/Y [72].	54
Σχήμα 2.14: Διάταξη για μετρήσεις MIMO.	57
Σχήμα 2.15: Λειτουργία ομιλίας και λειτουργία επισκόπησης δεδομένων.	63
Σχήμα 3.1: Έξυπνος χώρος επιβηθούμενης διαβίωσης, εξοπλισμένος με αισθητήρες και συσκευές.	70
Σχήμα 3.2: Φορετός υπολογιστής με α) ενσύρματες και β) ασύρματες συνδέσεις.	71
Σχήμα 3.3: Δίκτυο ιατρικής υποστήριξης με φορετές συσκευές.	71
Σχήμα 3.4: Μέτρηση της λειτουργίας των παλμών της καρδιάς με διάταξη δικτύου PAN. ...	72
Σχήμα 3.5: Δίκτυο επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα.	73
Σχήμα 3.6: Δίκτυο body-to-body [136].	74
Σχήμα 3.7: Sony Ericsson ρολόι με Bluetooth.	75
Σχήμα 3.8: Το παπούτσι Nike συνδέεται ασύρματα με το ipod [138].	76
Σχήμα 3.9: Ασύρματα ακουστικά Bluetooth με ενσωματωμένο μικρόφωνο [139].	76
Σχήμα 3.10: Ψηφιακή ζυγαριά της iHealth [140].	77

Σχήμα 3.11: Διακύμανση των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του μυϊκού και του λιπώδους ιστού συναρτήσει της συχνότητας. α) Σχετική επιτρεπτότητα, β) αγωγιμότητα, γ) συντελεστής απωλειών και δ) βάθος διείσδυσης.	80
Σχήμα 3.12: Διηλεκτρικές ιδιότητες του ανθρώπινου χεριού, α) μέση σχετική επιτρεπτότητα και β) μέση αγωγιμότητα.	81
Σχήμα 3.13: Διηλεκτρικές ιδιότητες του ανθρώπινου σώματος, α) μέση σχετική επιτρεπτότητα και β) μέση αγωγιμότητα.	82
Σχήμα 3.14 Συμπαγή ομοιώματα α) χεριού, β) κεφαλιού και γ) ολόκληρου σώματος σε καθιστική θέση.....	85
Σχήμα 3.15 α) Ημι-συμπαγές ομοίωμα ανθρώπινου κορμού με σύσταση βασισμένη σε άγαρ και β) ομοίωμα ανθρώπινου κεφαλιού από υαλονήματα γεμάτο με υγρό τοποθετημένο σε διάταξη πειραματικών μετρήσεων στις εγκαταστάσεις του ΙΙΤ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».	85
Σχήμα 3.16 Παραδείγματα μοντέλων ογκοστοιχείων α) NORMAN, β) HUGO, γ) Nagaoka άντρας και γυναίκα και δ) Zubal Voxel man.	87
Σχήμα 3.17: Εφαρμογές φορετών συσκευών	89
Σχήμα 3.18: Μια κεραία μικροταινίας.	97
Σχήμα 3.19: Εύρος ζώνης κεραίας.	99
Σχήμα 3.20: Ένα μέρος του προσπίπτοντος κύματος a_1 ανακλάται (b_1), ενώ ένα μέρος του ακτινοβολείται (b_2).	100
Σχήμα 3.21: Τριδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας.	102
Σχήμα 3.22: Δύο επίπεδα στα οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις διάδοσης.	103
Σχήμα 3.23: Διδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας στα xz- και yz- επίπεδα.	103
Σχήμα 3.24: Το ακτινοβόλο patch της φορετής κεραίας αποτελείται από το συνδυασμό αγωγίων μεταλλικών ινών και επιφάνειας ενός μη-αγωγίμου υφάσματος.	106
Σχήμα 3.25: Αγωγήμη ίνα α-δ) από πολλές στρώσεις νημάτων και ε) από μία στρώση νήματος.	107
Σχήμα 3.26: α) Πλεκτό αγωγίμο ύφασμα P130 [207] και β) υφαντό αγωγίμο ύφασμα Nora [208].	108
Σχήμα 3.27: Δείγματα αγωγίμων υφασμάτων.	108
Σχήμα 3.28: Τέσσερα ευρέως χρησιμοποιούμενα αγωγίμα υφάσματα από την LessEMF... ..	110
Σχήμα 3.29: Αγωγίμο ύφασμα με προστατευτικό κάλυμμα αλουμινίου της Plug and Wear [210].	111
Σχήμα 3.30: Δομή της ομοαξονικής τροφοδοσίας.	112
Σχήμα 3.31: Τροφοδοσία κεραίας γραμμής μικροταινίας στην άκρη της πλευράς του patch.	113

Σχήμα 3.32: Τροφοδοσία κεραίας γραμμής μικροταινίας εισερχόμενη στην πλευρά του patch	113
Σχήμα 3.33: Σύνδεσμος SMA.	113
Σχήμα 3.34: Σύνδεση των SMA με τις κεραίες.	114
Σχήμα 3.35: Τροφοδοσία μέσω σουστών για το κούμπωμα των ρούχων.	115
Σχήμα 3.36: Σύγκριση του αναλυτικού κύματος Norton με τη μέτρηση στενής ζώνης του κέρδους διαδρομής πάνω στο σώμα, στα 2.45 GHz [218].	117
Σχήμα 3.37: Σχηματικό διάγραμμα της υλοποιημένης μονάδας διαφορισμού και η διάταξη μετρήσεων διαφορισμού.	128
Σχήμα 4.1: Το μοντέλο προσομοίωσης του PDA.	136
Σχήμα 4.2: Το τερματικό σε θέση «επισκόπησης δεδομένων».	140
Σχήμα 4.3: Γεωμετρικό μοντέλο του PDA και του χεριού.	141
Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστικές θέσεις του χεριού ως προς το PDA (περιπτώσεις Α, Β, Γ) και τα αντίστοιχα μοντέλα (άποψη από την πλευρά του επιπέδου γείωσης).	142
Σχήμα 4.5: Τρεις διαφορετικές τοποθετήσεις του χεριού.	142
Σχήμα 4.6: Το τερματικό σε «θέση τσέπης».	143
Σχήμα 4.7: (α) Το μοντέλο του Salty man, και (β) το γεωμετρικό απλοποιημένο μοντέλο του σώματος του χρήστη και το τερματικό MIMO σε θέση τσέπης.	144
Σχήμα 4.8: Διαγράμματα S_{ii} των στοιχείων της κεραίας του PDA, στον ελεύθερο χώρο και ενώ είναι τοποθετημένο στο χέρι του χρήστη (Μοντέλο 2).	145
Σχήμα 4.9: Απόδοση ακτινοβολίας των στοιχείων της κεραίας του PDA, στον ελεύθερο χώρο και τοποθετημένο στο χέρι του χρήστη (Μοντέλο 1 και Μοντέλο 2-Θέση 3).	146
Σχήμα 4.10: Διαγράμματα ακτινοβολίας των στοιχείων της κεραίας του PDA, στον ελεύθερο χώρο και ενώ είναι τοποθετημένο στο χέρι του χρήστη (Μοντέλο 1 και Μοντέλο 2-Θέση 3).	147
Σχήμα 4.11: Η χωρητικότητα του καναλιού MIMO ως συνάρτηση του SNR για τέσσερα χαρακτηριστικά μοντέλα χεριού (Σχ. 4.4).	148
Σχήμα 4.12: Η χωρητικότητα του καναλιού MIMO ως συνάρτηση του SNR για τρεις διαφορετικές θέσεις του χεριού (Σχ. 4.4).	149
Σχήμα 4.13: Η χωρητικότητα του καναλιού MIMO ως συνάρτηση του SNR για το "Μοντέλο 2- Θέση 3" με 2 ή με 4 στοιχεία να βρίσκονται σε λειτουργία.	151
Σχήμα 4.14: Διαγράμματα κέρδους σε dB _i για τα 4 στοιχεία για το PDA στον ελεύθερο χώρο και για το PDA με το σώμα.	152
Σχήμα 4.15: Οι παράμετροι απωλειών επιστροφής (S_{ii}) με και χωρίς την παρουσία του σώματος για τα 4 στοιχεία της κεραίας.	153
Σχήμα 4.16: Θέσεις Α και Β για το μοντέλο σώματος Α1.	154

Σχήμα 4.17: Συντελεστές διακύμανσης για την περίπτωση του α) PDA και β) του PDA με το σώμα	155
155	
Σχήμα 4.18: Η χωρητικότητα του καναλιού συναρτήσει του SNR α) για τις διαφορετικές θέσεις του PDA και β) για το PDA με το σώμα και το PDA με το χέρι	156
Σχήμα 4.19: Γεωμετρικό μοντέλο του σώματος και οι κεραίες που είναι τοποθετημένες πάνω στο σώμα.....	159
Σχήμα 4.20: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης των περιπτώσεων D και E.	160
Σχήμα 4.21: Η προβολή στο οριζόντιο επίπεδο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας του άνω ημισφαιρίου.	161
Σχήμα 4.22: Συντελεστές συσχέτισης των στοιχείων της κεραίας για τις διατάξεις B και D.	163
Σχήμα 4.23: Απόδοση ακτινοβολίας των κεραιών για τις διατάξεις B και D.	164
Σχήμα 4.24: CDF της χωρητικότητας για SNR=20 dB.....	165
Σχήμα 5.1: Ενεργό μήκος L_{eff} του patch.	170
Σχήμα 5.2: Παράθυρο σχεδιασμού του προγράμματος CST Microwave Studio	173
Σχήμα 5.3: Διατομή μιας MPA με πεδία άκρων ενός ηλεκτρικού πεδίου	175
Σχήμα 5.4: Διακύμανση της διηλεκτρικής σταθεράς με τη συχνότητα (Hz) για διάφορα υλικά υποστρώματος και για 65 % σχετική υγρασία.....	175
Σχήμα 5.5: Μια κεραία ορθογωνικού patch.	176
Σχήμα 5.6: Προσομοίωση με βάση μια εκτίμηση για την ϵ_r και σύγκριση συντελεστή ανάκλασης από προσομοίωση και μετρήσεις.	177
Σχήμα 5.7: Σύγκριση των μετρήσεων του πρωτότυπου με δύο προσομοιώσεις, η πρώτη με τις αρχικές τιμές για τα χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού και η δεύτερη με τις νέες τιμές, μέχρι να ταυτιστούν οι συντελεστές ανάκλασης.	178
Σχήμα 5.8: Κεραία ορθογώνιου patch.	180
Σχήμα 5.9: Επίδραση των αλλαγών των διαστάσεων της κεραίας στην προσαρμογή της αντίστασης εισόδου (S_{11}).	181
Σχήμα 5.10: Πρωτότυπο αρχικής κεραίας.....	182
Σχήμα 5.11: Πρωτότυπο τελικής κεραίας.	184
Σχήμα 5.12: Διάταξη μετρήσεων στον ανηχικό θάλαμο.	185
Σχήμα 5.13: Προσομοίωση και μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης της τελικής κεραίας.	186
Σχήμα 5.14: Διαγράμματα κέρδους τελικής κεραίας στα επίπεδα xy και xz.	187
Σχήμα 5.15: Μοντέλο ανθρώπινου σώματος.	188

Σχήμα 5.16: Πραγματικό (ϵ_r') και φανταστικό μέρος (ϵ_r'') της επιτρεπτότητας του σώματος	189
Σχήμα 5.17: Σύγκριση συντελεστή ανάκλασης στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα. .	189
Σχήμα 5.18: Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας πάνω στο σώμα και στον ελεύθερο χώρο	190
Σχήμα 5.20: Γραμμή μικροταινίας που δεν εισχωρεί στο patch [202]......	192
Σχήμα 5.21: Κάτοψη της patch κεραίας.....	193
Σχήμα 5.22: Προσομοίωση patch κεραίας TM.	195
Σχήμα 5.23: Πρωτότυπο φορετής κεραίας TM με χρήση φύλλων χαλκού σε α) πρόσοψη και β) πίσω όψη.....	196
Σχήμα 5.24: Διάταξη μετρήσεων στον ανηχικό θάλαμο.	197
Σχήμα 5.25: Τρίποδο στήριξης και τράπεζα περιστροφής.....	197
Σχήμα 5.26: Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης S_{11} της κεραίας TM όπως προέκυψε από την προσομοίωση και τις μετρήσεις.	198
Σχήμα 5.27: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραίας TM από προσομοίωση και μετρήσεις στο επίπεδο α) xy για $\theta=90^\circ$ και β) yz για $\varphi=90^\circ$	199
Σχήμα 5.28: Τριδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για την patch κεραία TM.	199
Σχήμα 5.29: Πρωτότυπο φορετής κεραίας CM με χρήση φύλλων χαλκού στα 2.45 GHz α) πρόσοψη και β) πίσω όψη.....	200
Σχήμα 5.30: Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας CM όπως προέκυψε από τις μετρήσεις και την προσομοίωση.....	201
Σχήμα 5.31: Διάγραμμα ακτινοβολίας στον χώρο για την κεραία CM.....	202
Σχήμα 5.32: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραίας CM από προσομοίωση και μετρήσεις στο επίπεδο α) xy για $\theta=90^\circ$ και β) yz για $\varphi=90^\circ$	202
Σχήμα 5.33: Σύνδεση μιας κεραίας με καλώδιο τροφοδοσίας.	203
Σχήμα 5.34: Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης των δύο εκδοχών της κεραίας όπως προέκυψε από τις μετρήσεις.	204
Σχήμα 6.1: α) Πρωτότυπο της φορετής κεραίας, β) συντελεστής ανάκλασης S_{11} από προσομοίωση και από μετρήσεις, γ) διαγράμματα κέρδους στα 2.45 GHz από μετρήσεις και προσομοίωση στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα	210
Σχήμα 6.2: α) Θέση κεραίας εκπομπής και πολλαπλές θέσεις κεραίας λήψης και β) φωτογραφία κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων στο χώρο του εργαστηρίου.	212
Σχήμα 6.3: Σχηματικό διάγραμμα α) του ανηχικού θαλάμου και β) του εργαστηρίου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.....	213

Σχήμα 6.4: Διάταξη μετρήσεων στα 2.45 GHz.....	214
Σχήμα 6.5: Φωτογραφία του χρήστη με τις κεραιές α) στο χώρο του γραφείου και β) στον ανηχωικό θάλαμο.....	215
Σχήμα 6.6: Σενάρια κινήσεων του χρήστη στον ανηχωικό θάλαμο.....	217
Σχήμα 6.7: Συνθήκες κινητικότητας καναλιού για κάθε σενάριο κίνησης.....	218
Σχήμα 6.8: Σενάρια κινήσεων του χρήστη στο γραφείο.....	219
Σχήμα 6.9: Πειραματικές και θεωρητικές CDF α) της θέσης ΔΘ (δεξιός θώρακας) και β) της θέσης ΑΘ (αριστερός θώρακας), για όλες τις κινήσεις του χρήστη.....	224
Σχήμα 6.10: Πειραματικές και θεωρητικές CDF (lognormal, Nakagami- <i>m</i> , Rice) για το κανονικό περπάτημα (Π) και όλες τις θέσεις της κεραιάς.....	225
Σχήμα 6.11: Εμπειρικές CDF για όλα τα κανάλια ενώ ο χρήστης περπατάει κανονικά και οι θεωρητικές CDF για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα.....	232
Σχήμα 6.12: Εμπειρικές CDF για όλα τα κανάλια ενώ ο χρήστης περπατάει σημειωτόν και οι θεωρητικές CDF για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα.....	233
Σχήμα 6.13: Εμπειρικές CDF για όλα τα κανάλια ενώ ο χρήστης περπατάει χωρίς κίνηση των χειριών και οι θεωρητικές CDF για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα.....	233
Σχήμα 6.14: Σχηματική αναπαράσταση διαλείψεων.....	234
Σχήμα 6.15: Υπολογισμός του εμπειρικού LCR.....	235
Σχήμα 6.16: Υπολογισμός του εμπειρικού AFD.....	237
Σχήμα 6.17: Εμπειρικές καμπύλες των LCR μαζί με τις θεωρητικές για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα για όλα τα κανάλια και τις κινήσεις του χρήστη.....	240
Σχήμα 6.18: Εμπειρικές καμπύλες των AFD μαζί με τις θεωρητικές για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα για όλα τα κανάλια και τις κινήσεις του χρήστη.....	241
Σχήμα 6.19: Ζεύγη κεραιών που επιλέχθηκαν.....	245
Σχήμα 6.20: Διάταξη μετρήσεων διαφορισμού στα 2.45 GHz.....	247
Σχήμα 6.21: Διάταξη μετρήσεων διαφορισμού σε περιβάλλον εργαστηρίου.....	247
Σχήμα 6.22: Λαμβανόμενο πλάτος για τους δύο κλάδους διαφορισμού και το σήμα διαφορισμού MRC για το σενάριο ΔΘ-ΑΘ/ΠΣ.....	249
Σχήμα 6.23: Πειραματικές CDF των συντελεστών διασυσχέτισης για όλα τα ζεύγη κεραιών Rx ανά κατηγορία κίνησης του χρήστη (Π, ΠΣ, ΠΚΧ).....	251
Σχήμα 6.24: Υπολογισμός κέρδους διαφορισμού για το σενάριο μετρήσεων ΔΘ-ΑΘ / ΠΣ (Δεξιός Θώρακας-Αριστερός Θώρακας/ Περπάτημα Σημειωτόν).....	252

Σχήμα 6.25: Ποσοστό των περιπτώσεων που κάθε θεωρητική κατανομή (α) προσέγγιζε τις CDF των σημάτων διαφορισμού με p-value μεγαλύτερο του 5% και (β) παρείχε την καλύτερη προσαρμογή μεταξύ των κατανομών που ελέγχθηκαν για κάθε θέση του ζεύγους κεραιών διαφορισμού για το περπάτημα (Π), χρησιμοποιώντας την τεχνική MRC.....	256
Σχήμα 6.26: Ποσοστό των περιπτώσεων που κάθε θεωρητική κατανομή (α) προσέγγιζε τις CDF των σημάτων διαφορισμού με p-value μεγαλύτερο του 5% και (β) παρείχε την καλύτερη προσαρμογή μεταξύ των κατανομών που ελέγχθηκαν για κάθε θέση του ζεύγους κεραιών διαφορισμού για το περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών, χρησιμοποιώντας την τεχνική MRC.	257
Σχήμα 6.27: Εμπειρικές και αντίστοιχες θεωρητικές α - μ CDF για τα συνδυασμένα σήματα (MRC) ανά θέση του ζεύγους κεραιών διαφορισμού για όλες τις κινήσεις του χρήστη.	259
Σχήμα 6.28: Εμπειρικές και οι αντίστοιχες θεωρητικές α - μ LCR καμπύλες, για τα ζεύγη κεραιών διαφορισμού ΔΘ-ΑΘ, ΔΘ-ΔΠ, και ΔΘ-ΔΚ για όλες τις κινήσεις του χρήστη χρησιμοποιώντας MRC.....	261
Σχήμα 6.29: Εμπειρικές και οι αντίστοιχες θεωρητικές α - μ AFD καμπύλες, για τα ζεύγη κεραιών διαφορισμού ΔΘ-ΑΘ, ΔΘ-ΔΠ, και ΔΘ-ΔΚ για όλες τις κινήσεις του χρήστη χρησιμοποιώντας MRC.....	262

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Σειρές μετρήσεων για συστήματα MIMO BAN.....	58
Πίνακας 3.1: Ηλεκτρομαγνητικές ιδιοτητες των ιστων του ανθρωπινου σώματος στα 2.45 GHz.....	83
Πίνακας 3.2: Υλικά για υπόστρωμα σε φορητή κεραία για συχνότητα 2.45 GHz.....	105
Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά αγώγιμων υφασμάτων.....	109
Πίνακας 3.4: Σειρές Μετρήσεων για Συστήματα BAN.....	121
Πίνακας 3.5: Σειρές μετρήσεων για συστήματα διαφορισμού BAN.....	128
Πίνακας 4.1 Απόδοση ακτινοβολίας των στοιχειων της κεραίας του PDA, στον ελεύθερο χώρο και τοποθετημένο στο σώμα του χρήστη.....	154
Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά του Υφασματος της Τσοχασ.....	179
Πίνακας 5.2 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά της αρχικής κεραίας.....	180
Πίνακας 5.3 Μεταβαλλόμενες Διαστάσεις του patch.....	181
Πίνακας 5.4 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά της τελικής κεραίας.....	183
Πίνακας 5.5 Εύρος ζώνης και κέρδος κεραίας.....	186
Πίνακας 5.6 Σύγκριση κέρδους της κεραίας στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα.....	190
Πίνακας 5.7 Διαστάσεις και χαρακτηριστικά της κεραίας.....	194
Πίνακας 5.8: Συνοπτικός πίνακας των παραμέτρων για όλες τις κεραίες που υλοποιήθηκαν.....	205
Πίνακας 6.1 Σενάρια Μετρήσεων.....	216
Πίνακας 6.2 Κατανομή με την καλύτερη προσαρμογή και αντίστοιχες παράμετροι για κάθε σενάριο μετρήσεων.....	223
Πίνακας 6.3 Τα ks-statistic για τις πέντε κατανομές (weibull, rice, gamma, κ-μ, nakagami-m) τις οποίες ακολουθεί η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος στις περισσότερες περιπτώσεις.....	227
Πίνακας 6.4 Κατανομή με την καλύτερη προσαρμογή και παράμετροι για κάθε σενάριο... ..	227
Πίνακας 6.5 Εκφράσεις κλειστής μορφής για τα I_{ef} και a_{fd}	238
Πίνακας 6.6 Μέγιστη συχνότητα doppler f_m και οι εμπειρικές κανονικοποιημένες τιμές των I_{ef} και a_{fd} για επίπεδο σήματος $-10dB$ για κάθε σενάριο.....	238
Πίνακας 6.7 Μέσοι συντελεστές διασυσχέτισης ($\bar{\rho}$), μέσες διαφορές περιβάλλουσας σήματος (D_R) και κέρδος διαφορισμού για όλες τις κινήσεις του χρήστη.....	253
Πίνακας 6.8 Εκτιμήτριες παράμετροι της κατανομής $\alpha - \mu$ (α, μ, \hat{r}) για κάθε σενάριο διαφορισμού.....	260

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

3GPP	: 3 rd Generation Partnership Project
ACE	: Antenna Centre of Excellence
AFD	: Average Fade Duration (Μέση Διάρκεια Διαλείψεων)
BAN	: Body Area Network (Δίκτυο Σώματος)
BER	: Bit Error Rate (Ρυθμός Δυφιακών Σφαλμάτων)
bps	: bit per second
BPSK	: Binary Phase-Shift Keying
CDF	: Cumulative Distribution Function (Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής)
CSI	: Channel State Information (Πληροφορία Κατάστασης Καναλιού)
CSIR	: Channel State Information at Receiver (CSI
CSIT	: Channel State Information at Transmitter (CSI
CW	: Continuous Wave (Συνεχές Σήμα)
DAQ	: Data Acquisition (Επίκτηση δεδομένων)
DG	: Diversity Gain (Κέρδος διαφορισμού)
DOA	: Direction of Arrival (Κατεύθυνση άφιξης)
DOD	: Direction of Departure (Κατεύθυνση αναχώρησης)
DSP	: Digital Singal Processing (Ψηφιακή επεξεργασία σήματος)
DVB-H	: Digital Video Broadcasting - Handheld
EBG	: Electromagnetic Band Gap
EMC	: Electromagnetic Compatibility (Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα)
EGC	: Equal Gain Combining (Διαφορισμός Ίσης Απολαβής)
EVA	: Extravehicular Activity (Δραστηριότητα εκτός οχήματος)
FM	: Frequency Modulation (Διαμόρφωση συχνότητας)
FDTD	: Finite-Difference Time Domain
FPGA	: Field Programmable Gate Array
GPS	: Global Positioning System
GSM	: Global System for Mobile communications

IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	: Intermediate Frequency (Ενδιάμεση συχνότητα)
IID	: Independent Identically Distributed (ανεξάρτητα και πανομοιότυπα κατανομημένο)
ISM	: Industrial, Scientific and Medical
LCR	: Level Crossing Rate (Ρυθμός διέλευσης στάθμης)
LOS	: Line-of-sight (Οπτική επαφή)
MEMS	: Micro ElectroMechanical Systems
MIMO	: Multiple-Input Multiple-Output (Πολλαπλών-Εισόδων Πολλαπλών-Εξόδων)
MISO	: Multiple-Input Single-Output (Πολλαπλών-Εισόδων Απλής-Εξόδου)
ML	: Maximum Likelihood (Μέγιστη Πιθανοφάνεια)
MPA	: Microstrip Patch Antenna (Κεραία μικροταινιακού patch)
MRC	: Maximal Ratio Combining (Διαφορισμός Μεγίστου Λόγου)
NLOS	: Non Line-Of-Sight (Μη οπτική επαφή)
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAN	: Personal Area Network (Προσωπικό δίκτυο)
PAS	: Power Azimuth Spectrum (Φάσμα ισχύος ως προς το αζιμούθιο)
PDA	: Personal Digital Assistant (Προσωπικός Ψηφιακός Βοηθός)
PDF	: Probability Density Function (Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας)
PDP	: Power Delay Profile (Προφίλ καθυστέρησης ισχύος)
PIFA	: Planar Inverted-F Antenna (Επίπεδη κεραία ανεστραμμένου-F)
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation
QoS	: Quality of Service (Ποιότητα Υπηρεσιών)
RF	: Radio Frequency (Ραδιοσυχνότητα)
RFID	: Radio Frequency Identification (Ταυτοποίηση ραδιοσυχνοτήτων)
RMS	: Root Mean Square
RSSI	: Receive Signal Strength Indicator
SAR	: Specific Absorption Rate (Ειδικός ρυθμός απορρόφησης)
SC	: Selection Combining (Διαφορισμός Επιλογής)
SIMO	: Single-Input Multiple-Output (Απλής-Εισόδου Πολλαπλών-Εξόδων)
SISO	: Single-Input Single-Output (Απλής-Εισόδου Απλής Εξόδου)

- SMA** : SubMiniature version A
- SNR** : Σηματοθορυβικός λόγος (Signal-to-Noise Ratio)
- UWB** : Ultra Wideband
- VNA** : Διανυσματικός Αναλυτής Δικτυωμάτων (Vector Network Analyzer)
- WBAN** : Wireless Body Area Network (Ασύρματο Δίκτυο Σώματος)
- WLAN** : Wireless Local Area Network (Ασύρματο Τοπικό Δίκτυο)
- WPAN** : Wireless Personal Area Network (Ασύρματο Προσωπικό Δίκτυο)
- XPD** : Crosspolarization Discrimination

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί την εισαγωγή της παρούσας διδακτορικής διατριβής και έχει ως σκοπό να παρουσιάσει συνοπτικά το κίνητρο, τους στόχους και τη γενικότερη μεθοδολογία της. Το βασικό θέμα που πραγματεύεται η διατριβή είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών σε συστήματα με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα. Το ζήτημα εξετάζεται από την οπτική της μοντελοποίησης και της αξιολόγησης τέτοιων συστημάτων. Αρχικά μελετάται η επίδραση του σώματος του χρήστη στην απόδοση συστημάτων πολλαπλών κεραιών και στη συνέχεια πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του καναλιού που βρίσκεται πάνω στο σώμα του χρήστη, τόσο του απλού καναλιού όσο και του καναλιού διαφορισμού. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζεται η διάρθρωση της διατριβής και οι δημοσιεύσεις που προέκυψαν κατά τη διάρκειά της.

1.1 Κίνητρο

Τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών της επόμενης γενιάς αναμένεται να παρέχουν αξιόπιστες υπηρεσίες υψηλού ρυθμού δεδομένων, με σκοπό να υποστηρίξουν εφαρμογές διαδικτύου και πολυμέσων για ένα ταχύτατα αυξανόμενο πλήθος τελικών χρηστών. Το γεγονός αυτό έχει ωθήσει την έρευνα στη διερεύνηση νέων δυνατοτήτων που μπορούν να προσφέρουν βελτιωμένη και αξιόπιστη απόδοση συστήματος, χωρίς να απαιτείται η εκχώρηση επιπλέον φάσματος. Τα συστήματα Πολλαπλών-Εισόδων Πολλαπλών-Εξόδων (Multipl-Input Multiple-Output - MIMO) έχουν δείξει την ικανότητά τους να προσφέρουν σημαντική βελτίωση στην απόδοση του συστήματος, παρέχοντας αυξημένη ποιότητα ζεύξης και εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Η χρήση τεχνικών MIMO μπορεί να προσφέρει σημαντική αύξηση στη χωρητικότητα του καναλιού για εφαρμογές υψηλού ρυθμού δεδομένων.

Γι' αυτό το λόγο, οι τεχνικές MIMO, ήδη παίζουν ουσιαστικό ρόλο στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

Παράλληλα, με την εξάπλωση των φορητών συσκευών και τη συνεχή μείωση του μεγέθους τους, πληθαίνουν οι εφαρμογές φορητών επικοινωνιακών συστημάτων [1]. Εξαιτίας της ανάπτυξης αυτής, δημιουργούνται νέες τάσεις στις επικοινωνίες που οδηγούν σε μια νέα και ενδιαφέρουσα περιοχή έρευνας, στις *ασύρματες επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα* (body-centric wireless communications). Οι επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα χρησιμοποιούν το σώμα του χρήστη ως περιβάλλον επικοινωνίας μεταξύ δύο ή περισσότερων ασύρματων συσκευών πάνω στο σώμα [2] και, συνεπώς, λειτουργούν σε ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Η εξέλιξη των δικτύων σώματος (Body Area Network - BAN) έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των φορητών κεραιών, που δίνει τη δυνατότητα της τοποθέτησης των κεραιών πάνω στο σώμα, ενσωματώνοντάς τες στο ρουχισμό του χρήστη. Οι φορητές κεραιές σε συνδυασμό με την τεχνολογία MIMO μπορούν να βελτιώσουν εξαιρετικά τις δυνατότητες των συστημάτων επόμενης γενιάς.

Παράλληλα, τα τελευταία χρόνια τα κινητά τερματικά έχουν μετατραπεί, από απλές συσκευές επικοινωνίας, σε σύνθετες συσκευές που υποστηρίζουν εφαρμογές πολυμέσων και διαδικτύου. Ένα θέμα που προκύπτει από τη χρήση των κεραιών σε τόσο κοντινή απόσταση από το σώμα είναι η αλληλεπίδραση του σώματος του χρήστη και των κεραιών, τόσο από την πλευρά της προστασίας του χρήστη από την έκθεση σε Η/Μ ακτινοβολία, όσο και από την πλευρά της απόδοσης του συστήματος. Πολλές μελέτες που έγιναν υπό το πρίσμα του συστήματος, έχουν δείξει ότι η παρουσία του ανθρώπινου σώματος στην κοντινή περιοχή ενός ασύρματου τερματικού επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της κεραίας και έχει ως αποτέλεσμα την υποβάθμιση της απόδοσης του τερματικού. Το γεγονός αυτό οδήγησε στη σημαντική αύξηση του ενδιαφέροντος της ερευνητικής κοινότητας για την τεχνολογία των φορητών κεραιών, αλλά και για τη μελέτη και την αντιμετώπιση της επίδρασης του σώματος. Οι αρχικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν εστίαζαν στη μελέτη της αλληλεπίδρασης του κινητού τερματικού με το κεφάλι του χρήστη, θεωρώντας ότι το τερματικό βρίσκεται σε θέση ομιλίας [3], [4], [5]. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια, με την εξέλιξη των έξυπνων τερματικών, η μελέτη έχει επεκταθεί και σε άλλες θέσεις του τερματικού, όπως όταν το κρατάει ο χρήστης στο χέρι, δηλαδή σε λειτουργία επισκόπησης δεδομένων [6]. Η διατριβή αυτή θα εστιάσει στη

μελέτη της επίδρασης του σώματος στην απόδοση συστημάτων MIMO όταν ο χρήστης βρίσκεται σε θέση επισκόπησης δεδομένων, αλλά και όταν έχει το ασύρματο τερματικό στην τσέπη του, μελετώντας δηλαδή την επίδραση του χεριού, αλλά και ολόκληρου του σώματος.

Ένα είδος καναλιού, που θα μας απασχολήσει στη διατριβή αυτή, είναι τα κανάλια πάνω στο σώμα (on-body). Στα κανάλια αυτά, τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης τοποθετούνται πάνω στο σώμα του χρήστη. Αρκετή έρευνα έχει γίνει για τη διερεύνηση των καναλιών on-body στις συχνότητες ISM (Industrial, Scientific and Medical), όπως είναι τα 2.45 GHz. Σε αυτή τη συχνότητα, η διάδοση περιλαμβάνει δύο μορφές. Αρχικά, η διάδοση πραγματοποιείται πάνω στην επιφάνεια του σώματος με τη μορφή ερπόντων κυμάτων [2]. Αυτή η διάδοση μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την κίνηση του σώματος. Δεύτερη είναι η διάδοση πολλαπλών διαδρομών, εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών διάδοσης γύρω από το σώμα και εξαιτίας των ανακλάσεων από το γύρω περιβάλλον και τα μέλη του σώματος. Η διάδοση διαμέσου του σώματος είναι αμελητέα σε αυτή και σε υψηλότερες συχνότητες.

Στις κινητές επικοινωνίες, οι κεραίες του σταθμού βάσης, είναι σταθερές και η κινητή μονάδα κινείται γύρω στο περιβάλλον διάδοσης. Σε αντίθεση με τις κινητές επικοινωνίες, στα κανάλια πάνω στο σώμα, τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης κινούνται και αλλάζουν τη θέση τους στο περιβάλλον σκέδασης, αλλά και τη σχετική τους θέση. Παρατηρούνται διαλείψεις εξαιτίας της μεγάλης σχετικής κίνησης των μελών του σώματος και της σκέδασης από το σώμα. Το σώμα από μόνο του προκαλεί διαλείψεις, εξαιτίας της σκίασης των ζευξίων και εξαιτίας των ανακλάσεων από τα μέλη του σώματος. Το γύρω περιβάλλον είναι επίσης υπεύθυνο για τις διαλείψεις. Οι διαλείψεις εξαιτίας του πατώματος ή του εδάφους, που υπάρχει στις περισσότερες περιπτώσεις και οι διαλείψεις εξαιτίας των τοπικών σκεδαστών, όπως είναι τα έπιπλα, οι τοίχοι του δωματίου, η καμπίνα του αυτοκινήτου κ.α. αποτελούν σχετικά παραδείγματα. Πέρα από τις διαλείψεις, ένα ακόμα σημαντικό θέμα για τις συσκευές που τοποθετούνται πάνω στο σώμα είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, η οποία πρέπει να διατηρείται σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα. Ήδη η ισχύς των 0 dBm θεωρείται υψηλή για τα δίκτυα BAN. Είναι επιθυμητό να μειώσουμε τα επίπεδα της ισχύος, για να αυξήσουμε τη διάρκεια της μπαταρίας και να μειώσουμε την τιμή του

ειδικού ρυθμού απορρόφησης (Specific Absorption Rate - SAR) από το σώμα του χρήστη.

Εκτός από τα θέματα που αναφέραμε πιο πάνω, η συνεχώς αυξανόμενη χρήση ασύρματων συσκευών στους τομείς της υγειονομικής περίθαλψης, της ψυχαγωγίας, της ασφάλειας, της ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων και των προσωπικών επικοινωνιών κ.α. οδηγεί την έρευνα στο να υλοποιήσει πιο αξιόπιστες και αποδοτικές ζεύξεις μεταξύ των συσκευών που βρίσκονται πάνω στο σώμα. Τα πρότυπα για τις ασύρματες επικοινωνίες, όπως είναι τα Bluetooth [7], Zigbee [8], και BodyLAN [9] κ.α., ήδη βρίσκονται σε λειτουργία, αλλά υπάρχει ακόμα μεγάλο περιθώριο βελτίωσης. Οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων και η αξιόπιστη μετάδοση μεταξύ των φορετών ασύρματων συσκευών και αισθητήρων, όπως στις στρατιωτικές εφαρμογές, τον αθλητισμό, την ψυχαγωγία, τα συστήματα παρακολούθησης ασθενών κ.α., απαιτούν τη χρήση πολλαπλών κεραιών για τα δίκτυα BAN. Για το λόγο αυτό, παρατηρείται τελευταία ραγδαία εξάπλωση των εφαρμογών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα που περιλαμβάνουν συστήματα πολλαπλών κεραιών, η οποία συνοδεύεται από πληθώρα ανοιχτών ερευνητικών θεμάτων σε αυτή την περιοχή.



Σχήμα 1.1: Ασύρματες εφαρμογές διαδικτύου και πολυμέσων

Είναι συνεπώς πολύ σημαντικό να περιορίσουμε τις διαλείψεις όσο το δυνατόν περισσότερο και να αυξήσουμε το σηματοθορυβικό λόγο (SNR), χωρίς να αυξήσουμε την εκπεμπόμενη ισχύ. Ο διαφορισμός κεραιάς είναι μια πολύ διαδεδομένη τεχνική για την αντιμετώπιση των διαλείψεων και την επίτευξη μιας ζεύξης αποδοτικής ως προς την ισχύ στις κινητές επικοινωνίες. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, δύο ή περισσότερα σήματα από διάφορους ασυσχέτιστους κλάδους διαφορισμού συνδυάζονται με διαφορετικούς τρόπους για να προκύψει το συνδυασμένο σήμα

διαφορισμού. Αυτή η περιοχή των πολλαπλών κεραιών για επικοινωνίες πάνω στο σώμα δεν έχει μελετηθεί αρκετά, καθώς οι περισσότερες μελέτες στις επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα εστιάζουν στο σχεδιασμό κεραίας [10], στο χαρακτηρισμό του καναλιού [11], [12], και την επίδραση του ανθρώπινου σώματος στην απόδοση της ζεύξης. Κάποιες προκαταρκτικές μετρήσεις καταγράφονται με δύο μονόπολα στο δέκτη για κανάλια πάνω στο σώμα [13], [14]. Οι Cotton και Scanlon [15], [16] παρουσίασαν στατιστικά πρώτης και δεύτερης τάξης και κάποια αποτελέσματα διαφορισμού για κανάλια με φορετές κεραίες λήψης και τον πομπό σε σταθερό σημείο στο δωμάτιο, χαρακτηρίζοντας έτσι κανάλια εκτός σώματος, αλλά επίσης και κάποια κανάλια πάνω στο σώμα. Ο Khan στο [17] διερευνά την απόδοση ενός συστήματος διαφορισμού on-body για τρεις διαφορετικούς τύπους κεραίας, ενώ στο [18] πραγματοποιεί μια στατιστική ανάλυση των διαλείψεων του απλού καναλιού και του καναλιού διαφορισμού on-body για τρεις διαφορετικούς τύπους κεραίας και για δύο διαφορετικά κανάλια on-body στα 2.45, 5.8 και 10 GHz.

Προηγουμένως κάναμε μια επισκόπηση των κυριότερων ερευνητικών προκλήσεων που αποτέλεσαν το κίνητρο για αυτή τη διατριβή. Το γενικότερο κίνητρο είναι τα ανοιχτά θέματα που έχουν προκύψει από τη ραγδαία αύξηση των εφαρμογών που περιλαμβάνουν ασύρματες φορετές συσκευές και χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραίες. Πιο συγκεκριμένα, η διατριβή αυτή εστιάζει στη χρήση πολλαπλών κεραιών, τόσο στον πομπό, όσο και στο δέκτη, με σκοπό να μελετήσει την επίδραση του σώματος του χρήστη στη απόδοση των συστημάτων MIMO, και στη χρήση πολλαπλών κεραιών μόνο στο δέκτη για να αντιμετωπίσει τις διαλείψεις και να συνεισφέρει στο σωστό σχεδιασμό φορετών συστημάτων, μέσω της μοντελοποίησης των καναλιών ενός δικτύου επικοινωνιών πάνω στο σώμα.

1.2 Στόχοι και γενική μεθοδολογία της διατριβής

Η διατριβή αυτή, έχοντας ως κύριο άξονα τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών πολλαπλών κεραιών που λειτουργούν με επίκεντρο το σώμα του χρήστη, πραγματεύεται την αξιολόγηση και τη μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων. Το ένα θέμα αφορά στην αξιολόγηση επιδόσεων συστημάτων που περιλαμβάνουν πολλαπλές κεραίες και στα δύο άκρα της ζεύξης, εστιάζοντας στην επίδραση του ανθρώπινου

σώματος στην απόδοση του συστήματος. Η αξιολόγηση αυτή είναι πολύ σημαντική από την άποψη του σχεδιασμού και της μοντελοποίησης τέτοιων συστημάτων. Ειδικότερα, πραγματοποιείται μελέτη επιδόσεων ενός συστήματος MIMO που είναι εξοπλισμένο με ένα ασύρματο τερματικό στην πλευρά του χρήστη, για χαρακτηριστικές περιπτώσεις επίδρασης του ανθρώπινου σώματος στην απόδοση του συστήματος. Επιπλέον, πραγματοποιείται μελέτη των επιδόσεων ενός συστήματος MIMO που περιλαμβάνει πολλαπλές φορητές κεραίες στην πλευρά του χρήστη (bodyworn antennas). Τέλος, πραγματοποιείται μια συγκριτική μελέτη των προαναφερθέντων συστημάτων.

Το δεύτερο θέμα αφορά στη μοντελοποίηση του καναλιού ενός ασύρματου συστήματος επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, εξετάζοντας αφενός το απλό κανάλι και αφετέρου μελετώντας τις επιδόσεις και τη μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού. Στα πλαίσια αυτά, πραγματοποιήθηκαν εκτεταμένες σειρές μετρήσεων στα 2.45 GHz σε διαφορετικά περιβάλλοντα, για διαφορετικά σενάρια τοποθέτησης των φορητών κεραιών. Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε φορητή κεραία με υφασμάτινο υπόστρωμα από τσόχα. Μέσω διεξοδικής στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων των μετρήσεων, εξετάστηκε η επίδραση της θέσης της κεραίας και της κίνησης του χρήστη στα χαρακτηριστικά διάδοσης των καναλιών. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η απόδοση του καναλιού διαφορισμού του σώματος για τις τρεις βασικές τεχνικές διαφορισμού: Διαφορισμός Επιλογής (Selection Combining – SC), Διαφορισμός Ίσης Απολαβής (Equal Gain Combining – EGC) και Διαφορισμός Μεγίστου Λόγου (Maximal Ratio Combining – MRC).

Οι κύριοι στόχοι της διατριβής, συνοψίζονται παρακάτω:

Στόχος 1: Επίδραση σώματος στην απόδοση συστημάτων MIMO.

Η εργασία αυτή θα δώσει ιδιαίτερη έμφαση στην παρουσία του ανθρώπινου σώματος και θα μελετήσει την επίδραση του στην απόδοση ενός συστήματος τερματικού MIMO. Για το σκοπό αυτό, διαφορετικά σενάρια διάδοσης και διατάξεις κεραιών πάνω ή κοντά στο σώμα του χρήστη θα μελετηθούν και τα αποτελέσματα θα παραμετροποιηθούν και θα αναλυθούν.

Στόχος 2: Φορετές κεραιές.

Η εργασία αυτή θα μελετήσει το σχεδιασμό φορετών κεραιών με χρήση υφασμάτων υλικών, με σκοπό την επίτευξη μιας πρακτικής κεραιάς για εύκολη ενσωμάτωση στο ρουχισμό του χρήστη. Θα υλοποιηθούν δύο διαφορετικά είδη κεραιών με υφασμάτινο υπόστρωμα για λειτουργία στα 2.45 GHz και, στη συνέχεια, θα μετρηθούν στον ανηχωτικό θάλαμο.

Στόχος 3: Μοντελοποίηση απλού καναλιού δικτύου επικοινωνιών πάνω στο σώμα.

Στην εργασία αυτή, θα ασχοληθούμε με το χαρακτηρισμό του καναλιού του σώματος. Στα πλαίσια αυτά, θα σχεδιαστεί και θα πραγματοποιηθεί μια σειρά μετρήσεων σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα, ένα χωρίς ανακλάσεις και ένα πολλαπλών διαδρομών, για διαφορετικά σενάρια τοποθέτησης των κεραιών και κινήσεων του χρήστη. Τα αποτελέσματα θα αναλυθούν διεξοδικά και θα πραγματοποιηθεί στατιστική ανάλυση του καναλιού για τα σενάρια που έχουμε θεωρήσει.

Στόχος 4: Αξιολόγηση απόδοσης και μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού πάνω στο σώμα.

Στην εργασία αυτή, θα σχεδιαστεί και πραγματοποιηθεί εκτεταμένη σειρά μετρήσεων διαφορισμού για το κανάλι πάνω στο ανθρώπινο σώμα σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών και για διαφορετικά σενάρια τοποθέτησης των κεραιών πάνω στο σώμα και κίνησης του χρήστη. Με βάση τις μετρήσεις αυτές, θα αναλυθεί η απόδοση του χωρικού διαφορισμού πάνω στο σώμα. Επιπλέον, θα πραγματοποιηθεί στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων και θα γίνει μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού πάνω στο σώμα για τα σενάρια που μελετήσαμε.

Ο απώτερος σκοπός της διατριβής είναι η συμβολή στην ανάπτυξη ασύρματων τερματικών και φορετών συστημάτων πολλαπλών κεραιών, που θα είναι πιο αποδοτικά στη λειτουργία τους και ταυτόχρονα ασφαλή, καθώς και στη μοντελοποίηση συστημάτων πολλαπλών κεραιών για επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα.

Για την επίτευξη των στόχων αυτών, αρχικά πραγματοποιείται μια εκτενής μελέτη της υφιστάμενης κατάστασης (state-of-the-art) στην ερευνητική περιοχή ενδιαφέροντος, με σκοπό να γνωρίσουμε την ακριβή κατάσταση της έρευνας σε καθεμία από τις θεματικές ενότητες. Στη συνέχεια, αναγνωρίζονται τα ανοιχτά θέματα, πραγματοποιούνται οι απαραίτητες θεωρητικές μελέτες, καθώς και η οργάνωση και η υλοποίηση των πειραματικών διατάξεων και μετρήσεων που προτείνονται, ώστε να ερευνηθεί καθένα από τα ανοιχτά θέματα. Τελικά, πραγματοποιείται λεπτομερής επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων που έχουν προκύψει και δίνονται τα βασικά συμπεράσματα σε καθεμία από τις περιοχές μελέτης.

1.3 Δομή της διατριβής

Η παρουσίαση του ερευνητικού έργου με σχετικές αναφορές στις δημοσιεύσεις (περιοδικά [Π] και συνέδρια [Σ]) οργανώνεται στο κείμενο της διατριβής ως εξής:

Κεφάλαιο 2: Στο κεφάλαιο 2 επιχειρείται η αναλυτική βιβλιογραφική παρουσίαση της ερευνητικής περιοχής των συστημάτων MIMO και του χωρικού διαφορισμού. Η συγκεκριμένη ερευνητική περιοχή αντιμετωπίζεται και προσεγγίζεται από δύο απόψεις: τόσο από την άποψη της μελέτης των μεθόδων αξιολόγησης συστημάτων MIMO, όσο και από την άποψη της υποβάθμισης της απόδοσης των συστημάτων MIMO, που προκαλείται από την παρουσία του σώματος του χρήστη. Κατά την μελέτη αυτή εντοπίζονται τα *ανοιχτά θέματα* στα οποία επικεντρώνεται η ερευνητική δραστηριότητα και αναδεικνύεται η ανάγκη για τη ρεαλιστική αξιολόγηση συστημάτων MIMO, παρουσία του ανθρώπινου σώματος.

Κεφάλαιο 3: Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται μια επισκόπηση των ασύρματων επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα. Ακολούθως, επιχειρείται μια εκτενής βιβλιογραφική παρουσίαση της μοντελοποίησης του καναλιού διάδοσης πάνω στο σώμα και παράλληλα γίνεται μια εισαγωγή στην τεχνολογία των φορητών κεραιών. Επιπλέον, επισημαίνονται τα *ανοιχτά θέματα* στην περιοχή μελέτης: ο σχεδιασμός φορητών κεραιών, ο χαρακτηρισμός και η μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού

σώματος, αλλά και η αξιολόγηση της απόδοσης και η στατιστική ανάλυση του καναλιού χωρικού διαφορισμού για επικοινωνίες πάνω στο σώμα.

Κεφάλαιο 4: Στο κεφάλαιο 4 η μελέτη επικεντρώνεται στην αξιολόγηση επιδόσεων διαφορετικών συστημάτων MIMO που λειτουργούν κοντά ή πάνω στο σώμα του χρήστη, μέσω προσομοιώσεων. Εξετάζονται διαφορετικά σενάρια MIMO και δίνεται έμφαση στην επίδραση του σώματος του χρήστη στην απόδοση των συστημάτων [Σ1], [Σ2]. Τέλος πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη μεταξύ των επιδόσεων των προαναφερθέντων συστημάτων [Σ3]. Ως κριτήριο αξιολόγησης της απόδοσης του συστήματος επιλέγεται η χωρητικότητα του καναλιού.

Κεφάλαιο 5: Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται ερευνητική εργασία που αφορά στο σχεδιασμό και την υλοποίηση φορετών κεραιών για επικοινωνία πάνω στο σώμα του χρήστη. Διερευνάται η χρήση υφασμάτινων υλικών, τόσο για χρήση στο υπόστρωμα, όσο και στα αγώγιμα μέρη της κεραίας. Τέλος υλοποιούνται δύο διαφορετικά είδη κεραιών και αξιολογείται η απόδοσή τους, μέσω μετρήσεων στον ανηχικό θάλαμο. Η μία από τις κεραίες αυτές χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση των μετρήσεων στα πλαίσια της μελέτης που περιγράφεται στο κεφάλαιο 6.

Κεφάλαιο 6: Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται ερευνητική εργασία που αφορά στη μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού συστημάτων προορισμένων για επικοινωνίες πάνω στο ανθρώπινο σώμα. Η μελέτη αυτή βασίζεται σε εκτεταμένες σειρές μετρήσεων για διαφορετικά σενάρια τοποθέτησης των κεραιών, κίνησης του χρήστη και περιβάλλοντος. Αρχικά, πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα [Σ4], [Σ6], [Π1]. Τέλος, παρουσιάζεται η αξιολόγηση επιδόσεων και η μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού του σώματος [Σ5], [Π2].

Κεφάλαιο 7: Η διδακτορική διατριβή ολοκληρώνεται με το κεφάλαιο 7. Εκεί παρατίθενται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διεξαχθείσα έρευνα ενώ παράλληλα παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο.

Η συμβολή της παρούσας διδακτορική διατριβής έγκειται, κυρίως, στους παρακάτω τομείς:

- Στη διερεύνηση της επίδρασης της παρουσίας του χρήστη στην απόδοση συστημάτων MIMO.
- Στο σχεδιασμό και την κατασκευή φορητών κεραιών με σκοπό την πραγματοποίηση μετρήσεων για εφαρμογές επικοινωνιών με επίκεντρο το σώμα του χρήστη, με σκοπό την πραγματοποίηση μετρήσεων.
- Στη μοντελοποίηση του ασύρματου καναλιού του σώματος μέσω μετρήσεων και στατιστικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων.
- Στην αξιολόγηση της βελτίωσης του SNR από τη χρήση χωρικού διαφορισμού στο δέκτη (spatial receive diversity) και τη στατιστική ανάλυση των διαλείψεων που υφίσταται το κανάλι διαφορισμού του σώματος.

1.4 Δημοσιεύσεις

Η έρευνα για την πραγματοποίηση της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ασύρματων Επικοινωνιών του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Επικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Τα κυριότερα ερευνητικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διατριβή έχουν δημοσιευτεί σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και στα πρακτικά διεθνών επιστημονικών συνεδρίων. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής έγιναν οι ακόλουθες δημοσιεύσεις:

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά

- [Π1] **A. Michalopoulou**, A. A. Alexandridis, K. Peppas, T. Zervos, F. Lazarakis, K. Dangakis, D. I. Kaklamani, “On-body channel statistical analysis based on measurements in an indoor environment at 2.45 GHz,” *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol.6, no.6, pp.636-645, April 2012
- [Π2] **A. Michalopoulou**, A. A. Alexandridis, K. Peppas, T. Zervos, F. Lazarakis, K. Dangakis, D. I. Kaklamani, “Statistical Analysis for On-Body Spatial Diversity Communications at 2.45 GHz,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.60, no.8, pp.4014-4019, August 2012

Άρθρα σε διεθνή επιστημονικά συνέδρια

- [Σ1] **A. Michalopoulou**, T. Zervos, K. Peppas, A. A. Alexandridis, F. Lazarakis, K. Dangakis, and D. I. Kaklamani, “The impact of the position of MIMO terminal user’s hand on channel capacity”, *18th IEEE Annual International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007)*, 3-7 Sept. 2007, Athens, Greece
- [Σ2] **A. Michalopoulou**, T. Zervos, A. A. Alexandridis, K. Peppas, F. Lazarakis, K. Dangakis, and D. I. Kaklamani, “The impact of the user’s body on the performance of a MIMO terminal in “pocket position”, *2nd European*

Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), 11 - 16 Nov. 2007, EICC, Edinburgh, UK

- [Σ3] **A. Michalopoulou**, A. A. Alexandridis, T. Zervos, K. Peppas, F. Lazarakis, and D. I. Kaklamani, “Handheld Terminal vs. Bodyworn Antenna Systems: A comparative Study of MIMO Systems Performance”, *IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID (IMWS 2009)*, 24 - 25 September 2009, Cavtat, Croatia
- [Σ4] **A. Michalopoulou**, A. A. Alexandridis, K. Peppas, T. Zervos, F. Lazarakis, K. Dangakis, D. I. Kaklamani, “On-body channel modelling: Measurements and statistical analysis,” *2010 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC 2010)*, pp.201-204, 8-9 Nov. 2010, UK
- [Σ5] **A. Michalopoulou**, T. Zervos, K. Peppas, F. Lazarakis, A. A. Alexandridis, K. Dangakis, D. I. Kaklamani, “On-body diversity channels at 2.45 GHz: Measurements and statistical analysis,” *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2011)*, pp.2982-2986, 11-15 April 2011, Rome, Italy
- [Σ6] **A. Michalopoulou**, T. Zervos, K. Peppas, F. Lazarakis, A. A. Alexandridis, K. Dangakis, D. I. Kaklamani, “Impact of Channel Modeling on Accurate Estimation of On-Body Channel Capacity,” *Proceedings of the 6th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2012)*, pp.3125-3129, 26-30 March 2012, Prague, Czech Republic
- [Σ7] **A. Michalopoulou**, T. Zervos, K. Peppas, F. Lazarakis, A. A. Alexandridis, K. Dangakis, D. I. Kaklamani, “The Influence of the Wearable Antenna Type on the On-Body Channel Modeling At 2.45 GHz”, *7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2013)*, accepted

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Ασύρματα συστήματα πολλαπλών κεραιών

Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι διττός. Ο πρώτος στόχος είναι να συνοψίσει τις βασικές ιδέες που σχετίζονται με τα ασύρματα συστήματα πολλαπλών κεραιών, τις τεχνικές MIMO και το διαφορισμό χώρου, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στα θέματα που θα αναλυθούν ακολούθως σε αυτή τη διατριβή. Συνεπώς, παρουσιάζει το γενικό θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για να γίνει κατανοητή η υπόλοιπη διατριβή. Ένας δεύτερος στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να δώσει στον αναγνώστη μια ιδέα της υφιστάμενης κατάστασης (state-of-the-art) στην ερευνητική περιοχή ενδιαφέροντος, αλλά και να τονίσει τα κύρια *ανοιχτά θέματα*, που αποτέλεσαν και το κίνητρο γι' αυτή τη διατριβή. Η μελέτη πάνω στα συστήματα πολλαπλών κεραιών, θα εστιάσει στην αξιολόγηση των συστημάτων MIMO και των συστημάτων διαφορισμού.

2.1 Βασικές έννοιες (συστήματα MIMO και διαφορισμός χώρου)

Η τεχνολογία MIMO μπορεί να προσφέρει αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και της απόδοσης των ασύρματων ζεύξεων, καθιστώντας τα συστήματα MIMO ως την τεχνολογία που μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων.

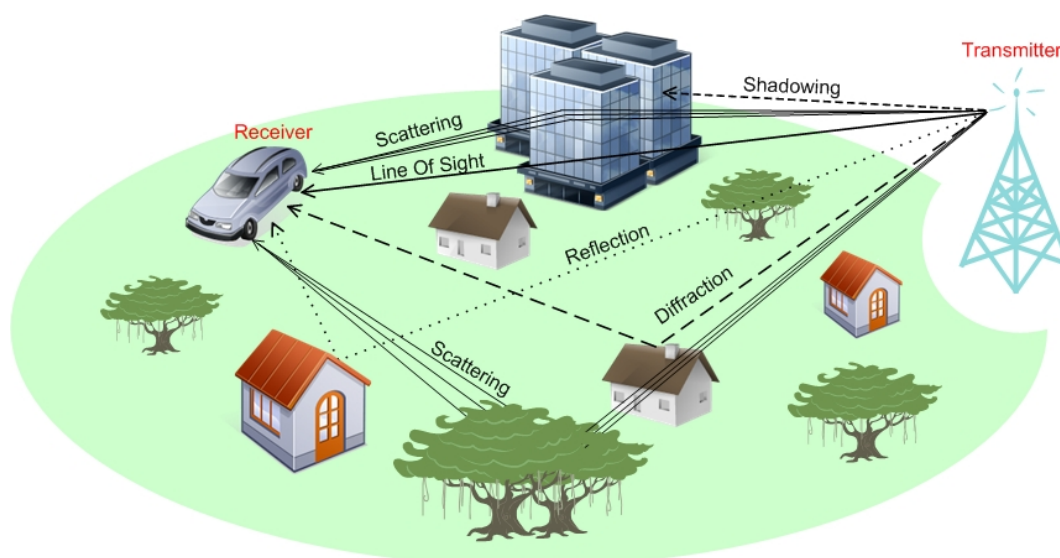
Τα συστήματα MIMO με την αυστηρή έννοια του όρου, αποτελούν συστήματα με πολλαπλές κεραιές στον πομπό και το δέκτη, ανεξαρτήτως από τον τύπο του σχήματος ψηφιακής επεξεργασίας που χρησιμοποιείται πίσω από τις κεραιές. Σε γενικές γραμμές, τα συστήματα με πολλαπλές κεραιές μόνο στον πομπό (MISO) ή μόνο στο δέκτη (SIMO) θεωρούνται ως ειδικές περιπτώσεις των συστημάτων MIMO. Σε αυτή τη βασική ιδέα αναφερόμαστε όταν μιλάμε για συστήματα MIMO σε αυτή τη διατριβή. Η χρήση πολλαπλών κεραιών και στα δύο άκρα του συστήματος, βέβαια,

εμπλέκει την εισαγωγή περισσότερων εννοιών. Η τεχνολογία MIMO δίνει τη δυνατότητα για ασύρματες υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας και αυξημένης αξιοπιστίας, μέσω της χρήσης τεχνικών επεξεργασίας του σήματος, όπως είναι η χωρική πολυπλεξία και ο διαφορισμός χώρου.

Ο διαφορισμός χώρου ή χωρικός διαφορισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξομάλυνση των διαλείψεων και τη βελτίωση του SNR λήψης, με τη χρήση πολλαπλών κεραιών, είτε στο ένα άκρο της ζεύξης, είτε και στα δύο. Παρόλα αυτά, οι περισσότερες τεχνικές χωρικού διαφορισμού έχουν σχεδιαστεί για χρήση πολλαπλών κεραιών, όχι μόνο στο ένα άκρο της ζεύξης, αλλά και στα δύο, όπως είναι ο αλγόριθμος Alamouti.

Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου αυτού, αναλύονται λεπτομερώς οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με τα συστήματα MIMO και το χωρικό διαφορισμό και παρουσιάζεται μια πλήρης μελέτη του state-of-the-art για τα βασικά θέματα με τα οποία θα ασχοληθούμε στη συνέχεια.

2.2 Διαλείψεις καναλιού



Σχήμα 2.1: Διαλείψεις καναλιού.

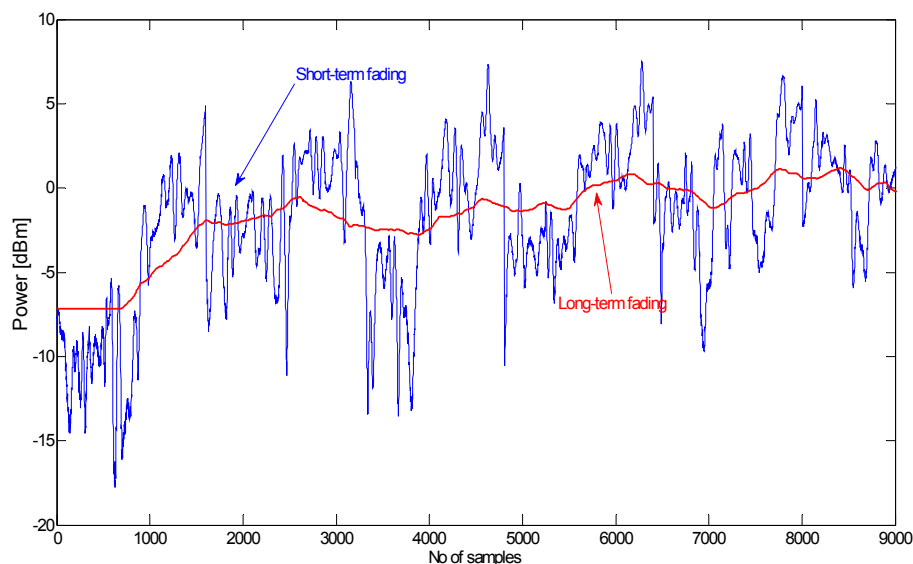
Οι διαλείψεις είναι η χρονική μεταβολή της ισχύος του σήματος στο δέκτη εξαιτίας των αλλαγών της διαδρομής μετάδοσης, όπως φαίνονται στο Σχ. 2.1. Οι

διαλείψεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως μικρής κλίμακας ή μεγάλης κλίμακας [19].

- Οι μακροχρόνιες ή αργές διαλείψεις (long-term ή slow fading) εκφράζουν τις αργές μεταβολές στην ισχύ του σήματος για μια μεγάλη απόσταση μετακίνησης ή ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (για κινητές επικοινωνίες). Προκαλούνται από την αλλαγή στο μήκος της διαδρομής εξαιτίας της κίνησης του πομπού ή/και του δέκτη σε σχέση με τον άλλο ή εξαιτίας ενός εμποδίου ή σκίασης της διαδρομής διάδοσης. Σε γενικές γραμμές θα μπορούσε να χαρακτηριστεί στατιστικά ως μια κατανομή lognormal.

- Οι βραχυχρόνιες ή ταχείες διαλείψεις (short-term ή fast fading) είναι γρήγορες μεταβολές στην ισχύ του σήματος για μια μικρή απόσταση μετακίνησης ή μικρό χρονικό διάστημα. Σε αντίθεση με τις μακροχρόνιες διαλείψεις, προκαλούνται από την υπέρθεση των πολλαπλών αντιγράφων του λαμβανόμενου σήματος, που διαφέρουν στο πλάτος, τη φάση ή το χρόνο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του πολύ κοινού φαινομένου στις ασύρματες επικοινωνίες που ονομάζεται διάδοση πολλαπλών διαδρομών, δηλαδή το σήμα από τον πομπό προς το δέκτη ταξιδεύει μέσω περισσοτέρων από μία διαδρομών, κάθε μια από τις οποίες έχει διαφορετική χρονική καθυστέρηση και παράγοντα εξασθένησης. Οι λόγοι για τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών είναι η σκέδαση του σήματος από κτίρια, δέντρα ή άλλα εμπόδια. Στο άκρο του δέκτη, λαμβάνονται πολλαπλά αντίγραφα του σήματος, που φθάνουν από διαφορετικές κατευθύνσεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, δηλαδή το σήμα εξαπλώνεται στο πεδίο το χρόνου. Αυτή η εξάπλωση ονομάζεται εξάπλωση καθυστέρησης. Αυτά τα χρονοκαθυστερημένα αντίγραφα του σήματος έχουν μια σχετική διαφορά φάσης. Τα πολλαπλά αντίγραφα του σήματος, με τυχαία μετατόπιση φάσης, υπερτίθενται για να παράγουν ένα σήμα ενισχυμένης ή υποβιβασμένης ενέργειας στο δέκτη. Αν τα σήματα έχουν την ίδια φάση, θα εντείνουν το προκύπτον σήμα, αλλιώς το προκύπτον σήμα θα εξασθενήσει/αποδυναμωθεί εξαιτίας της διαφοράς φάσης. Αυτό προκαλεί γρήγορες διακυμάνσεις στο πλάτος του σήματος κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.2. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας που προκαλούνται από τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών ονομάζονται επίσης και διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών. Στις κινητές επικοινωνίες, η κατανομή Ricean αναπαριστά τα στατιστικά των ταχέων διαλείψεων, για μια γενική περίπτωση, όπου συναντάμε διαδρομές οπτικής επαφής (LOS) αλλά και μη οπτικής επαφής

(NLOS) που συνεισφέρουν στο λαμβανόμενο σήμα. Για την ειδική περίπτωση που έχουμε μόνο συνεισφορές NLOS, η κατανομή πλάτους των ταχέων διαλείψεων απλοποιείται σε μια κατανομή Rayleigh.



Σχήμα 2.2: Παράδειγμα της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με τις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας (η διάστικτη γραμμή ακολουθεί τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας).

Όταν όλες οι φασματικές συνιστώσες του μεταδιδόμενου σήματος επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο από το κανάλι, οι διαλείψεις αναφέρονται ως επίπεδες, ενώ αν διαφορετικές φασματικές συνιστώσες υφίστανται διαφορετικές διακυμάνσεις πλάτους και φάσης, οι διαλείψεις δεν είναι οι ίδιες για όλες τις φασματικές συνιστώσες και ονομάζονται διαλείψεις επιλεκτικής συχνότητας [19]. Αν το σήμα αποτελείται από διάφορες φασματικές συνιστώσες (που έχουν συγκεκριμένο εύρος ζώνης όπως στην περίπτωση από πραγματικά διαμορφωμένα φέροντα που μεταδίδονται από τον πομπό), η σχετική μετατόπιση φάσης είναι διαφορετική για διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του σήματος και ως αποτέλεσμα, το σήμα παραμορφώνεται. Αν οι συνιστώσες συχνότητας είναι αρκετά κοντά, η ηλεκτρική διαδρομή για τις διαφορετικές συνιστώσες συχνότητας είναι σχεδόν η ίδια και το πλάτος και η φάση των συνιστωσών συχνότητας υφίστανται παρόμοιες διαλείψεις. Το εύρος ζώνης για το οποίο οι φασματικές συνιστώσες επηρεάζονται σχεδόν το ίδιο ονομάζεται εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού [19]. Αν το εύρος ζώνης του σήματος είναι μικρότερο

από το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού, η επίδραση των διαλείψεων επιλεκτικής συχνότητας είναι αμελητέα.

Οι διαλείψεις επιλεκτικής συχνότητας δεν είναι θέμα συζήτησης σε αυτή τη διατριβή, καθώς όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον ενός μικρού εργαστηρίου ή ανηχωικού θαλάμου με πολύ μικρή εξάπλωση καθυστέρησης και, άρα, μεγάλο εύρος ζώνης συνοχής. Επίσης τα σήματα εκπομπής και λήψης ήταν στενής ζώνης, συνεπώς η παρούσα εργασία αφορά τα συστήματα στενής ζώνης ή μικρής εξάπλωσης καθυστέρησης. Ο όρος «διαλείψεις» αναφέρεται σε επίπεδες διαλείψεις σε όλο το περιεχόμενο της διατριβής εκτός αν δηλώνεται διαφορετικά.

Σε μια κατάσταση όπου ο πομπός και/ή ο δέκτης κινούνται ο ένας σε σχέση με τον άλλο, η συχνότητα του λαμβανόμενου σήματος αυξάνεται ή μειώνεται εξαιτίας του ρυθμού της αλλαγής φάσης με την κίνηση. Αυτή η αλλαγή στη συχνότητα ονομάζεται μετατόπιση Doppler (Doppler shift), η οποία παράγει μια εξάπλωση συχνότητας στο φάσμα του σήματος που ονομάζεται εξάπλωση Doppler (Doppler spread). Η μέγιστη μετατόπιση Doppler (f_m) μπορεί να υπολογιστεί ως [19]:

$$f_m = \frac{v}{\lambda} \quad (Hz) \quad (2.1)$$

όπου v είναι η ταχύτητα της σχετικής κίνησης σε m/s και λ είναι το μήκος κύματος ελευθέρου χώρου του μεταδιδόμενου σήματος σε μέτρα. Το αντίστροφο της μέγιστης εξάπλωσης Doppler είναι ανάλογο του χρόνου συνοχής, ο οποίος αποτελεί το χρονικό διάστημα στο οποίο δύο χρονικές συνιστώσες του σήματος υφίστανται ανεξάρτητη εξασθένηση. Ορίζεται ως [19], [20]:

$$t_c \geq \sqrt{\frac{9}{16\pi f_m^2}} \quad (s) \quad (2.2)$$

Οι διαλείψεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως «ταχείες» ή «αργές» με βάση τη διακύμανση του σήματος ή τη διάρκεια συμβόλου. Αν το σήμα μεταβάλλεται πιο γρήγορα από το χρόνο συνοχής του καναλιού ή η διάρκεια συμβόλου είναι μικρότερη από το χρόνο συνοχής, η επίδραση των διαλείψεων είναι αμελητέα για τη διάρκεια συμβόλου και οι διαλείψεις ονομάζονται αργές διαλείψεις [19]. Από την άλλη, αν η

διακύμανση του σήματος είναι πιο αργή από το χρόνο συνοχής του καναλιού ή η διάρκεια συμβόλου είναι μεγαλύτερη από το χρόνο συνοχής, η παραμόρφωση εξαιτίας της εξάπλωσης Doppler είναι αξιοσημείωτη και οι διαλείψεις ονομάζονται ταχείες διαλείψεις [19].

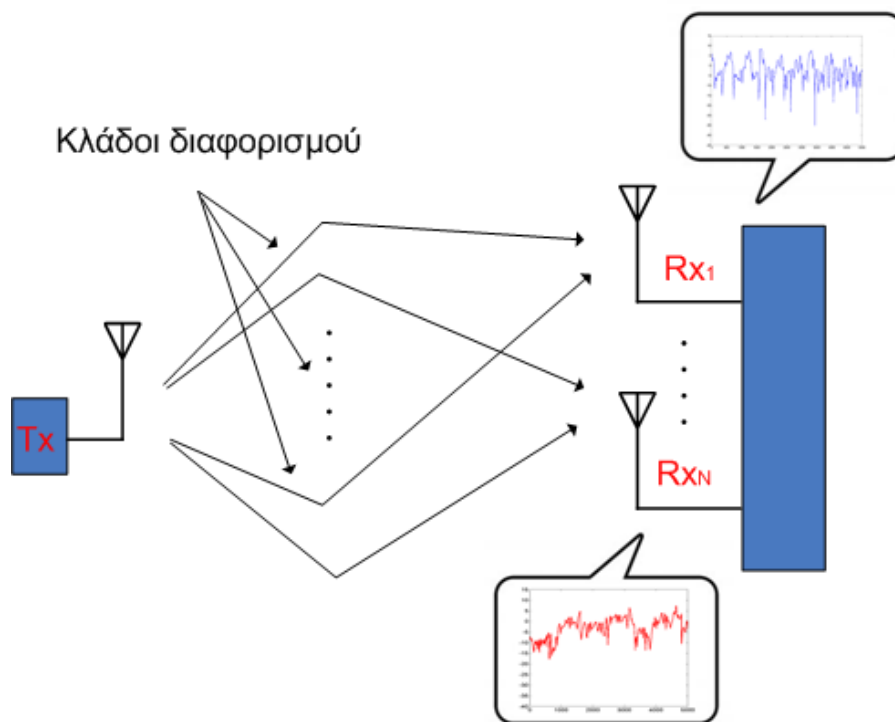
Εξαιτίας των γρήγορων μεταβολών του σήματος και του βάθους των διαλείψεων, οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών μειώνουν το SNR του συστήματος και ο λόγος δυφιακών σφαλμάτων (Bit Error Rate – BER) αυξάνεται. Αυτό υποβαθμίζει την ποιότητα υπηρεσιών. Εκτός από τις διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών, το εκπεμπόμενο σήμα στη διαδρομή προς το δέκτη υφίσταται διάφορες εξασθενήσεις που επηρεάζουν την ποιότητα λήψης. Αυτές περιλαμβάνουν την υποβάθμιση της ισχύος του σήματος με την απόσταση, την προσθήκη θορύβου στο κανάλι, το θόρυβο που παράγεται από τα κυκλώματα του πομπού/δέκτη, παρεμβολές κ.τ.λ. Αυτές οι εξασθενήσεις βάζουν ένα όριο στην αυξανόμενη ζήτηση για ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ποιότητα υπηρεσιών και αξιοπιστία.

2.3 Εισαγωγή στην έννοια του διαφορισμού (diversity)

Στα πλαίσια των ασύρματων επικοινωνιών, είναι κοινώς γνωστό ότι ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης, ένα εκπεμπόμενο σήμα συνήθως διαδίδεται μέσω αρκετών διαφορετικών διαδρομών μέχρι να φτάσει στο δέκτη, κάτι που συνήθως αναφέρεται ως διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Το σήμα που λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη υφίσταται διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών. Συνεπώς το κέρδος καναλιού μπορεί μερικές φορές να γίνει πολύ μικρό, έτσι ώστε να μην είναι δυνατή πάντα μια αξιόπιστη μετάδοση. Για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα των διαλείψεων και να βελτιώσουν την απόδοση, οι επικοινωνιακοί μηχανικοί χρησιμοποιούν το διαφορισμό ως ένα πολύ αποτελεσματικό εργαλείο.

Χρησιμοποιώντας περισσότερα από ένα κανάλια επικοινωνίας, οι διαλείψεις του ασύρματου καναλιού μπορούν να ελαχιστοποιηθούν, και έτσι μπορεί να επιτευχθεί μια αξιόπιστη και αποδοτική μετάδοση (Σχ. 2.3). Η αρχή πίσω από το διαφορισμό είναι η χρήση δύο ή περισσότερων ασυσχέτιστων κλάδων με ανεξάρτητα στατιστικά διαλείψεων. Αν δύο ή περισσότερα κανάλια είναι επαρκώς διαχωρισμένα στο χρόνο, τη συχνότητα, το χώρο, το διάγραμμα ακτινοβολίας και/ή την πόλωση, οι διαλείψεις

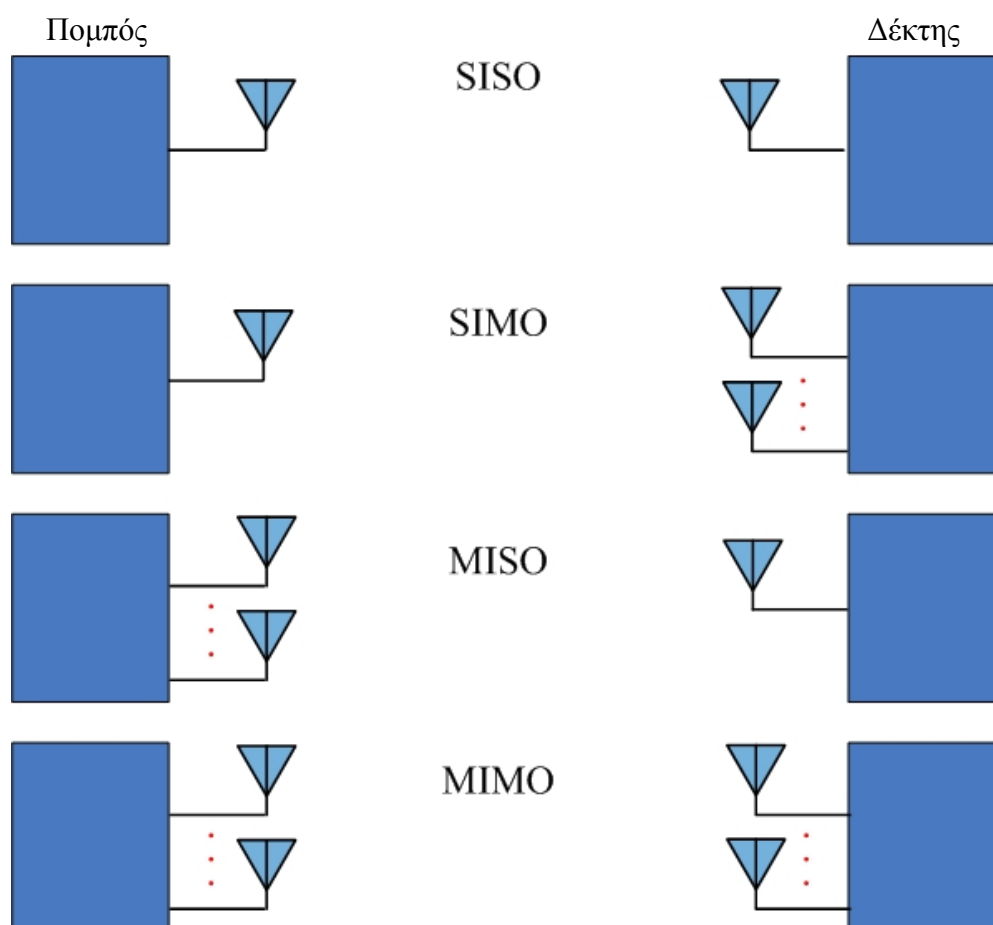
των ξεχωριστών καναλιών είναι ανεξάρτητες εξαιτίας των διαφορετικών συνθηκών των καναλιών [21]. Είναι εξαιρετικά απίθανο όλα τα σήματα των κλάδων να είναι στο ίδιο επίπεδο διαλείψεων μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Συνεπώς, αν τα σήματα των κλάδων συνδυαστούν κατάλληλα, οι βαθιές διαλείψεις μπορούν να ελαχιστοποιηθούν προσφέροντας μια ολική βελτίωση στο SNR. Καταρχήν, ο διαφορισμός δουλεύει καλύτερα αν οι διαλείψεις στους κλάδους είναι ασυσχέτιστες και τα σήματα στους κλάδους έχουν το ίδιο μέσο επίπεδο ισχύος [22].



Σχήμα 2.3: Λήψη διαφορισμού.

Ο διαφορισμός μπορεί να εφαρμοστεί με πολλούς τρόπους. Οι διάφορες μορφές διαφορισμού θα παρουσιαστούν συνοπτικά στη συνέχεια σε αυτό το κεφάλαιο. Ο διαφορισμός κεραίας γενικά αναφέρεται στην υλοποίηση ενός συστήματος διαφορισμού όπου δύο ή περισσότερες κεραίες χρησιμοποιούνται για να επιτύχουμε τους κλάδους διαφορισμού. Ο διαφορισμός κεραίας μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 2.4. Ένα σύστημα με μία κεραία στον πομπό και το δέκτη ορίζεται ως σύστημα Απλής-Εισόδου Απλής-Εξόδου (Single-Input Single-Output - SISO). Στο διαφορισμό λήψης, που ορίζεται ως

Απλής-Εισόδου Πολλαπλών-Εξόδων (Single-Input Multiple-Output - SIMO), χρησιμοποιούνται μια κεραία εκπομπής και πολλαπλές κεραιές λήψης. Ο διαφορισμός εκπομπής ή Πολλαπλών-Εισόδων Απλής-Εξόδου (Multiple-Input Single-Output - MISO) από την άλλη, αναφέρεται σε πολλαπλές κεραιές στην πλευρά του πομπού και μια κεραία στην πλευρά του δέκτη. Στα συστήματα Πολλαπλών-Εισόδων Πολλαπλών-Εξόδων (Multiple-Input Multiple-Output - MIMO), τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης είναι εξοπλισμένοι με περισσότερες από μια κεραιές.



Σχήμα 2.4: Ταξινόμηση συστημάτων επικοινωνίας με βάση τον αριθμό των κεραιών.

Με το διαφορισμό λήψης ή αλλιώς SIMO, το κόστος και η πολυπλοκότητα του δέκτη αυξάνεται αν εξοπλιστεί με πολλαπλές κεραιές. Στην περίπτωση του MISO, το κόστος αυτό και η πολυπλοκότητα προστίθεται στον πομπό, ενώ ο δέκτης έχει μια μόνο κεραία. Αλλά όσον αφορά τη βελτίωση της χωρητικότητας καναλιού, το σχήμα SIMO υπερτερεί του MISO [23]. Σε ένα σύστημα κινητών κυψελωτών επικοινωνιών,

ο σταθμός βάσης είναι γενικά εξοπλισμένος με πολλαπλές κεραιές και οι κινητές συσκευές έχουν μια κεραία επειδή η εφαρμογή του διαφορισμού στο δέκτη της συσκευής μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος και το μέγεθος των κινητών, κάτι που είναι ανεπιθύμητο. Σε αντίθεση με τα κινητά κυψελωτά συστήματα, όπου ένας σταθμός βάσης μεταδίδει σε ένα μεγάλο αριθμό δεκτών, η επικοινωνία πάνω στο ανθρώπινο σώμα γενικά λαμβάνει χώρα μεταξύ ενός ζεύγους πομπού-δέκτη. Έτσι το κόστος της εφαρμογής του διαφορισμού είτε στον πομπό είτε στο δέκτη είναι το ίδιο. Μπορεί να υπάρχουν κάποιες εφαρμογές όπου ένας πομπός επικοινωνεί με πολλαπλές συσκευές τοποθετημένες πάνω στο σώμα. Ακόμα και τότε, ο αριθμός των δεκτών είναι μικρός. Συνεπώς, ο διαφορισμός λήψης (SIMO) είναι μια πολύ καλύτερη επιλογή για τα κανάλια πάνω στο σώμα σε σύγκριση με το διαφορισμό εκπομπής (MISO), εξαιτίας της καλύτερης απόδοσης. Ο όρος διαφορισμός από εδώ και πέρα, θα αφορά το διαφορισμό λήψης κεραιάς, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά.

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες πάνω στη χρήση του διαφορισμού στις κινητές συσκευές χειρός και το σταθμό βάσης. Τα πλεονεκτήματα απόδοσης του διαφορισμού για φορητά ασύρματα συστήματα έχουν καταγραφεί στο [24]. Η αναφορά [25] δείχνει μια πειραματική διερεύνηση διαφόρων διατάξεων διαφορισμού και ένα κέρδος διαφορισμού μέχρι 10 dB για 1% πιθανότητα έχει καταγραφεί για σενάριο μη οπτικής επαφής (NLOS). Η αναφορά [26] παρουσιάζει την πειραματική μελέτη ενός συστήματος διαφορισμού τριών κλάδων με διάφορες κεραιές. Οι συντελεστές συσχέτισης και το φαινόμενο της αμοιβαίας σύζευξης συζητούνται επίσης εκεί. Ο Colburn [27] έχει παρουσιάσει την απόδοση διαφορισμού με πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας PIFA, μονόπολο και άλλους συνδυασμούς κεραιών για κινητά τερματικά χειρός σε περιβάλλοντα διαλείψεων Rayleigh και Rician. Η επίδραση του ανθρώπινου σώματος, ειδικότερα του κεφαλιού και του χεριού, στην απόδοση της κεραιάς διαφορισμού στο κινητό τερματικό συζητιέται στο [28] παρουσιάζοντας την αλλαγή στο κέρδος διαφορισμού και στη συσχέτιση περιβάλλουσας με τη γωνία κλίσης της κεραιάς και της απόστασης από το κεφάλι. Μια εμπειριστωμένη μελέτη όσον αφορά την επίδραση του χεριού στην απόδοση ενός τερματικού MIMO και ειδικότερα στη χωρητικότητα του καναλιού παρουσιάζεται στο [6]. Πολύ περιορισμένη είναι η δουλειά που έχει γίνει μέχρι στιγμής για τη διερεύνηση και την ποσοτικοποίηση της απόδοσης διαφορισμού για

ασύρματα κανάλια επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα και ειδικότερα για κανάλια πάνω στο σώμα. Τα άρθρα [14] και [29] καταγράφουν κάποιες προκαταρκτικές μετρήσεις διαφορισμού για κανάλια πάνω στο σώμα και στο [30] μελετάται ο διαφορισμός για συσκευές Bluetooth. Οι Cotton και Scanlon [15], [16], [31], [32] και ο Khan [17], [18], [33], έχουν καταγράψει κάποιες μετρήσεις διαφορισμού με φορητές κεραιές.

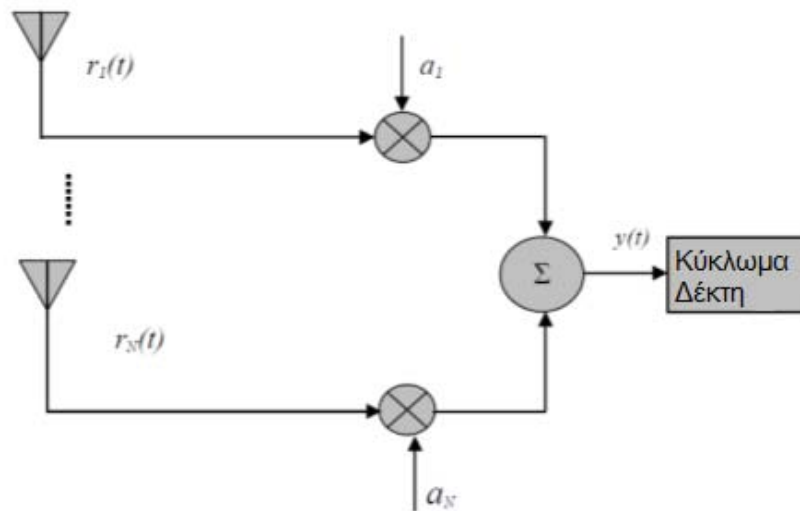
2.3.1 Διατάξεις διαφορισμού σημάτων

Σε ένα δέκτη διαφορισμού N κλάδων, τα σήματα από τους N κλάδους διαφορισμού, συνδυάζονται για την επίτευξη ενός σήματος με βελτιωμένο σηματοθορυβικό λόγο. Ο διαφορισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με τέσσερις τρόπους [21], το Διαφορισμό Μεταγωγής (Switched Combining - SWC), το Διαφορισμό Επιλογής (SC), το Διαφορισμό Ίσης Απολαβής (EGC), και το Διαφορισμό Μεγίστου Λόγου (MRC). Μια σύντομη περιγραφή κάθε διάταξης δίνεται στη συνέχεια. Ο συνδυασμός μπορεί να γίνει είτε πριν είτε μετά το στάδιο της φώρασης και έτσι αναφέρεται ως προφωρατικός ή μεταφωρατικός συνδυασμός αντίστοιχα [21]. Ένας συνδυαστικό κύκλωμα RF (Radio frequency) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο στάδιο RF για να αποφευχθεί η χρήση ξεχωριστού δέκτη για κάθε κλάδο διαφορισμού ελαχιστοποιώντας έτσι το κόστος και το μέγεθος του δέκτη διαφορισμού [26]. Σε αντίθετη περίπτωση, ένα ξεχωριστό κύκλωμα δέκτη είναι απαραίτητο για κάθε κλάδο.

Στα περισσότερα επικοινωνιακά συστήματα, χρησιμοποιούνται γραμμικοί συνδυαστές, όπου τα σήματα από τους διάφορους κλάδους πολλαπλασιάζονται ξεχωριστά με βάρη και μετά προστίθενται [21], [22]. Υποθέτουμε ένα δέκτη διαφορισμού N κλάδων, που είναι δηλαδή εξοπλισμένος με N κεραιές. Το απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα του συνδυαστή διαφορισμού φαίνεται στο Σχ. 2.5. Γενικά, το συνδυασμένο σήμα, $y(t)$, που προκύπτει από την υπέρθεση των N κλάδων είναι [21]:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N a_i r_i(t) \quad (2.3)$$

όπου $r_i(t)$ είναι το λαμβανόμενο σήμα στην κεραία i , $y(t)$ είναι το συνδυασμένο σήμα διαφορισμού στην έξοδο του συνδυαστή και a_i είναι ο παράγοντας πολλαπλασιασμού ή το βάρος του σήματος στον κλάδο i .



Σχήμα 2.5: Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα ενός συνδυαστή διαφορισμού στο στάδιο RF [21].

Στο Διαφορισμό Μεταγωγής, ο κλάδος που έχει SNR υψηλότερο από μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου επιλέγεται ως η έξοδος του συνδυαστή. Το σήμα αυτού του κλάδου χρησιμοποιείται μέχρι το SNR να πέσει κάτω από το κατώφλι. Σε πρακτικά συστήματα, είναι δύσκολο να μετρήσουμε το SNR κι έτσι ο κλάδος με την υψηλότερη ισχύ σήματος συν ισχύ θορύβου επιλέγεται [21]. Έτσι στην (2.3), μόνο μια τιμή του βάρους a_i ανάμεσα στις N τιμές είναι 1 και οι υπόλοιπες είναι 0. Όλοι οι κλάδοι εξετάζονται με μια συγκεκριμένη σειρά μέχρι να ανιχνευθεί ο κλάδος με τιμή σήματος συν θόρυβο υψηλότερη από το κατώφλι. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται. Στο πλαίσιο της (2.3) το βάρος a_i ορίζεται ως:

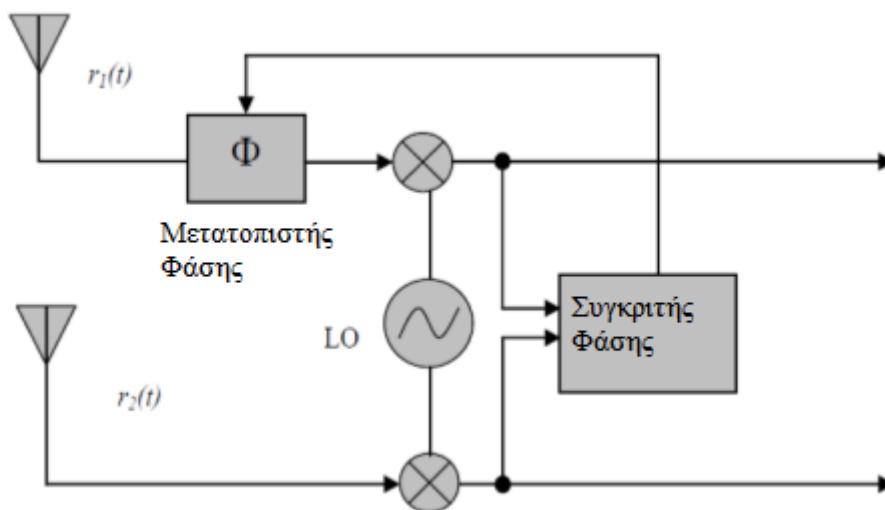
$$a_i = \begin{cases} 1, & SNR_i \geq T \\ 0, & SNR_i < T \end{cases} \quad (2.4)$$

όπου SNR_i είναι το SNR του κλάδου i και T είναι η προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου.

Ο Διαφορισμός Επιλογής εφαρμόζει την ίδια ιδέα με τη μεταγωγή αλλά με έναν πιο εκλεπτυσμένο τρόπο. Αντίθετα με την ιδέα της «μεταγωγής και παραμονή σε σύνδεση με ένα κλάδο», όλα τα σήματα των κλάδων εξετάζονται ταυτόχρονα και επιλέγεται ο κλάδος με το υψηλότερο SNR. Η απόφαση επιλογής λαμβάνεται ακαριαία και δεν βασίζεται σε κάποια τιμή κατωφλίου. Αν σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή, ο κλάδος j έχει το υψηλότερο SNR, το βάρος a_i σε αυτή την περίπτωση μπορεί να οριστεί ως [34]:

$$a_i = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2.5)$$

Οι τεχνικές MRC και EGC χρησιμοποιούν το συνδυασμό όλων των σημάτων. Σε αυτές τις δύο τεχνικές, τα σήματα πολλαπλασιάζονται με βάρη και μετά προστίθενται. Πριν το συνδυασμό, πρέπει να εξισωθούν οι φάσεις των σημάτων στους κλάδους. Η διαδικασία αυτή σε ένα δέκτη διαφορισμού δύο κλάδων μπορεί να γίνει προσαρμόζοντας τη φάση του σήματος του ενός κλάδου σύμφωνα με τη σχετική διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων των δύο κλάδων, όπως φαίνεται στο Σχ. 2.6 [21]. Περισσότερες μέθοδοι εξίσωσης φάσης δίνονται επίσης στο [21].



Σχήμα 2.6: Κύκλωμα εξισωτή φάσης για ένα δέκτη διαφορισμού δύο κλάδων [21].

Η τεχνική EGC είναι απλή με την έννοια ότι το βάρος για όλους τους κλάδους τίθεται ίσο με 1, δηλαδή όλα τα σήματα στους κλάδους απλά προστίθενται μαζί. Υποθέτοντας ότι έχει πραγματοποιηθεί η εξίσωση φάσης, το βάρος για το EGC είναι $a_i = 1$ στην (2.3).

Στην τεχνική MRC, που προτάθηκε πρώτα από τον Kahn [35], τα σήματα στους κλάδους πολλαπλασιάζονται με βάρος ανάλογο με το λόγο τάσης σήματος προς ισχύ θορύβου τους έτσι ώστε το αποτέλεσμα να είναι το άθροισμα των SNR τους. Το βάρος a_i στην (2.3) είναι έτσι ευθέως ανάλογο της RMS (root mean square) τιμής του σήματος του κλάδου και αντιστρόφως ανάλογο της μέσης ισχύος του θορύβου στον κλάδο i [22], [34]:

$$a_i = \frac{r_{i(RMS)}}{\langle n_i^2 \rangle} \quad (2.6)$$

όπου $r_{i(RMS)} = \sqrt{\langle r_i^2 \rangle}$ είναι η RMS τιμή του σήματος και $\langle n_i^2 \rangle$ είναι η μέση ισχύς θορύβου στον κλάδο i .

Οι απλοποιημένες εκφράσεις για την εξαγωγή του συνδυασμένου σήματος διαφορισμού με τις τεχνικές SC, EGC και MRC για ένα συνδυαστή διαφορισμού N κλάδων δίνονται στο [17] ως:

$$SC(t) = \max(r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t)) \quad (2.7)$$

$$EGC(t) = \frac{(r_1(t) + r_2(t) + \dots + r_N(t))}{\sqrt{N}} \quad (2.8)$$

$$MRC(t) = \sqrt{(r_1^2(t) + r_2^2(t) + \dots + r_N^2(t))} \quad (2.9)$$

όπου $r_i(t)$ είναι η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος στον κλάδο i . Περισσότερες πληροφορίες όπως και οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των συνδυαστικών τεχνικών διαφορισμού δίνονται στα [21], [34]. Η εξαγωγή των εξισώσεων (2.8) και (2.9) βρίσκεται στο [17].

Ανάμεσα σε όλες τις συνδυαστικές διατάξεις, ο Διαφορισμός Επιλογής και ο Διαφορισμός Μεταγωγής είναι οι απλούστερες και φθηνότερες μέθοδοι. Δεν

βασίζονται στην πληροφορία φάσης των λαμβανόμενων σημάτων και έτσι είναι ευκολότερο να υλοποιηθούν. Βέβαια η απόδοσή τους δεν είναι τόσο καλή όσο των διατάξεων EGC και MRC. Η τεχνική MRC είναι η βέλτιστη συνδυαστική τεχνική όσον αφορά τη βελτίωση του διαφορισμού [22] αλλά είναι πολύπλοκη και ακριβή.

2.3.2 Συσχέτιση (correlation) των σημάτων των κλάδων

Η απόδοση ενός δέκτη διαφορισμού εξαρτάται σημαντικά από τη συσχέτιση μεταξύ των λαμβανόμενων σημάτων στους κλάδους διαφορισμού. Η συσχέτιση είναι επιθυμητό να είναι μικρή καθώς διασφαλίζει ότι τα σήματα στους κλάδους υφίστανται ανεξάρτητες διαλείψεις. Όσο πιο ασυσχέτιστα στατιστικά είναι τα σήματα στις θέσεις του πομπού και του δέκτη, τόσο υψηλότερη θα είναι η μέση χωρητικότητα του καναλιού καθώς και το κέρδος διαφορισμού. Ένας συντελεστής συσχέτισης μικρότερος ή ίσος με 0.7 θεωρείται κατάλληλος για τα περισσότερα σενάρια κινητών επικοινωνιών [22]. Ο συντελεστής συσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε τρεις διαφορετικές μορφές, το συντελεστή συσχέτισης ισχύος, ρ_p , το συντελεστή συσχέτισης πλάτους/περιβάλλουσας, ρ_e , και το μιγαδικό συντελεστή συσχέτισης ρ_s . Ο μιγαδικός συντελεστής συσχέτισης είναι χρήσιμος στο σχεδιασμό συστήματος καθώς περιέχει τόσο τη συσχέτιση φάσης όσο και πλάτους, ενώ ο συντελεστής συσχέτισης ισχύος προσφέρει την πληροφορία της συσχετισμένης ισχύος στους κλάδους διαφορισμού. Για ένα σύστημα διαφορισμού δύο κλάδων, οι συντελεστές συσχέτισης μπορούν να υπολογιστούν ως [36]:

$$\rho_s = \frac{\sum_{k=1}^N V_1(k)V_2^*(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N V_1(k)V_1^*(k)}\sqrt{\sum_{k=1}^N V_2(k)V_2^*(k)}} \quad (2.10)$$

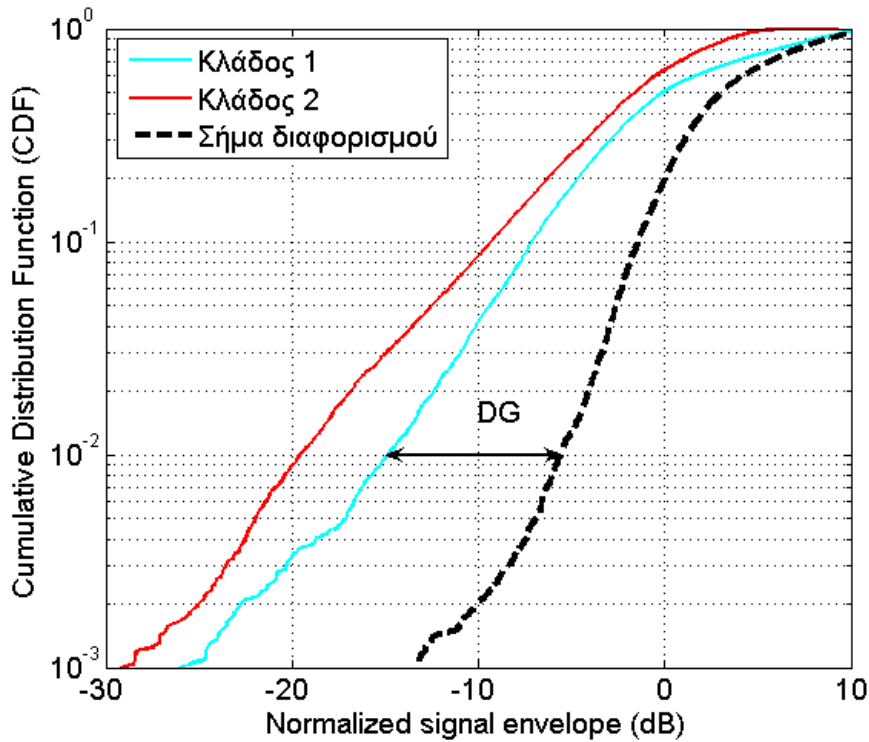
$$\rho_p = \frac{\sum_{k=1}^N S_1(k)S_2(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N S_1(k)S_1(k)}\sqrt{\sum_{k=1}^N S_2(k)S_2(k)}} \quad (2.11)$$

$$\rho_e = \frac{\sum_{k=1}^N (r_1(k) - \bar{r}_1)(r_2(k) - \bar{r}_2)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (r_1(k) - \bar{r}_1)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^N (r_2(k) - \bar{r}_2)^2}} \quad (2.12)$$

όπου S_1, S_2 εκφράζουν τα σήματα λαμβανόμενης ισχύος, τα V_1, V_2 συμβολίζουν τα σήματα μιγαδικής τάσης και τα r_1, r_2 είναι οι περιβάλλουσες των λαμβανομένων σημάτων βραχυχρόνιων διαλείψεων. Με \bar{r}_i συμβολίζεται η μέση τιμή της περιβάλλουσας του σήματος στον κλάδο i και με $*$ συμβολίζεται ο μιγαδικός συζυγής. Σε περιβάλλοντα με διαλείψεις Rayleigh, $|\rho_s|^2 = \rho_e$ και $\rho_e \approx \rho_p$ [22] αλλά αυτή η υπόθεση μπορεί να μην ισχύει για κανάλια πάνω στο ανθρώπινο σώμα με κατανομή διαλείψεων διαφορετική από Rayleigh.

2.3.3 Κέρδος διαφορισμού (diversity gain)

Το κέρδος διαφορισμού (Diversity gain - DG) είναι ένα μέγεθος που ποσοτικοποιεί τη βελτίωση που προσφέρει η χρήση του διαφορισμού. Είναι μια βελτίωση στην ισχύ του σήματος, ή το SNR, ή το BER, σε σχέση με τη λειτουργία χωρίς διαφορισμό σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας διακοπής [22], [27], [37]. Είναι κοινή πρακτική να υπολογίζουμε το κέρδος διαφορισμού ως τη διαφορά στα επίπεδα του σήματος (ή το SNR) του συνδυασμένου σήματος διαφορισμού και του σήματος του ισχυρότερου κλάδου (που λαμβάνεται ως αναφορά) μεταξύ των κλάδων διαφορισμού για κάποια πιθανότητα διακοπής, όπως απεικονίζεται στις (2.13) και (2.14). Ως πιθανότητα διακοπής χρησιμοποιούνται συνήθως τα επίπεδα πιθανότητας 10% και 1%. Το Σχ. 2.7 δείχνει τη Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής (Cumulative Distribution Function - CDF) των σημάτων των δύο κλάδων και του συνδυασμένου σήματος διαφορισμού με το κέρδος διαφορισμού να έχει υπολογιστεί για 1% πιθανότητα.



Σχήμα 2.7: Υπολογισμός κέρδους διαφορισμού.

$$DG = \frac{P_{div}}{P_{ref}} \quad (2.13)$$

$$DG = P_{div} (dB) - P_{ref} (dB) \quad (dB) \quad (2.14)$$

όπου P_{div} είναι το επίπεδο περιβάλλουσας του σήματος διαφορισμού και P_{ref} είναι το επίπεδο της περιβάλλουσας του σήματος αναφοράς (το οποίο είναι το ισχυρότερο ανάμεσα στα σήματα κλάδων) σε συγκεκριμένο επίπεδο πιθανότητας. Στην (2.14) είναι τα ίδια μεγέθη αλλά έχουν εκφραστεί σε dB. Αυτές οι εκφράσεις μπορούν επίσης να παρουσιαστούν για το SNR ή το BER. Το κέρδος διαφορισμού εξαρτάται σημαντικά από τη συσχέτιση μεταξύ των σημάτων των κλάδων. Είναι, ίσως κοινώς γνωστό ότι όσο πιο ασυσχέτιστα είναι τα σήματα στους κλάδους, τόσο υψηλότερο είναι το κέρδος διαφορισμού. Αλλά ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει το κέρδος διαφορισμού είναι η ανισοσταθμία ισχύος (power imbalance) μεταξύ των λαμβανομένων σημάτων στους κλάδους. Αν η διαφορά ισχύος μεταξύ των σημάτων των κλάδων είναι μεγάλη, ο συνδυαστής διαφορισμού θα ευνοήσει το ισχυρότερο σήμα για τον περισσότερο χρόνο και έτσι, το κέρδος διαφορισμού που θα επιτευχθεί

θα είναι είτε πολύ μικρό ή ανύπαρκτο. Αν η ανισοσταθμία ισχύος είναι πολύ υψηλή, η απόδοση του EGC γίνεται χειρότερη από του SC γιατί ο κλάδος με το πολύ χαμηλό επίπεδο ισχύος εισάγει πρόσθετο θόρυβο και επιτυγχάνεται πολύ μικρή βελτίωση στο επιθυμητό σήμα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη συνολική μείωση του SNR εξόδου [36]. Η διακύμανση του κέρδους διαφορισμού με τη συσχέτιση και την ανισοσταθμία ισχύος έχει απεικονιστεί στα [25], [36] και [37]. Ο Turkmani έχει εξάγει μια εμπειρική σχέση μεταξύ του κέρδους διαφορισμού, του συντελεστή συσχέτισης και της ανισοσταθμίας ισχύος στο [36]. Το μέγιστο επιτεύξιμο κέρδος διαφορισμού για 1% πιθανότητα για ένα σύστημα διαφορισμού δύο κλάδων είναι 10 dB χρησιμοποιώντας την τεχνική SC και 11.5 dB χρησιμοποιώντας MRC, για μηδενική ανισοσταθμία ισχύος και καμία συσχέτιση μεταξύ των κλάδων σε ένα ανεξάρτητα και πανομοιότυπα κατανεμημένο (Independent Identically Distributed - IID) κανάλι Rayleigh [21].

2.3.4 Είδη διαφορισμού

Με σκοπό τη βελτιστοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρει το ασύρματο κανάλι, τα ασύρματα συστήματα προσπαθούν να εκμεταλλευτούν το διαφορισμό σε όλες του τις μορφές: διαφορισμό χρόνου, διαφορισμό συχνότητας, διαφορισμό κώδικα κ.α. [21]. Παρόλα αυτά, η εξέλιξη των νέων εφαρμογών και οι ανάγκες του χρήστη έχουν οδηγήσει σε μια συνεχόμενη αύξηση στην απαιτούμενη χωρητικότητα και τους ρυθμούς δεδομένων για τις ασύρματες επικοινωνίες. Αυτό το γεγονός έχει ωθήσει την έρευνα σε άλλες δυνατότητες διαφορισμού που μπορεί να προσφέρουν ένα σύστημα με βελτιωμένη απόδοση, χωρίς να χρειάζεται εκχώρηση επιπλέον εύρους ζώνης (που είναι ένας περιορισμένος πόρος). Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες επιλογές είναι η εκμετάλλευση του διαφορισμού χώρου, χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραιές στο σύστημα. Ένα πρώτο βήμα αποτελεί η χρήση πολλαπλών κεραιών στο ένα άκρο της ζεύξης (συνήθως στο σταθμό βάσης ή το σημείο πρόσβασης, εξαιτίας των λιγότερο περιοριστικών συνθηκών για το μέγεθος και την ισχύ σε σύγκριση με τον εξοπλισμό του χρήστη). Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των ειδών διαφορισμού, ενώ μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στο διαφορισμό χώρου.

2.3.4.1 Διαφορισμός χρόνου

Σε αυτό το είδος διαφορισμού, τα δείγματα του σήματος εκπέμπονται σε διαφορετικές χρονικές σχισμές. Αν η απόσταση μεταξύ των χρονικών σχισμών είναι επαρκής, τα διαδοχικά δείγματα του σήματος θα είναι ασυσχέτιστα [21]. Η χρονική απόσταση πρέπει να είναι τουλάχιστον το αντίστροφο του εύρους ζώνης διαλείψεων [21].

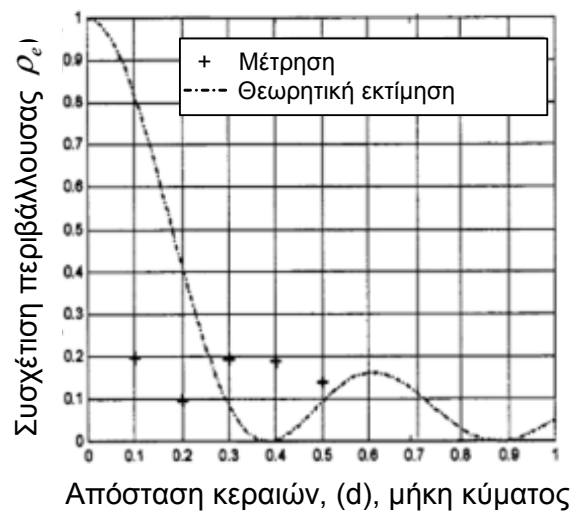
2.3.4.2 Διαφορισμός συχνότητας

Όπως παρουσιάστηκε στην παράγραφο 2.3, αν η απόσταση μεταξύ δύο συνιστωσών συχνότητας ενός σήματος είναι μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης συνοχής, οι δύο συνιστώσες υφίστανται ασυσχέτιστες διαλείψεις. Με δεδομένο αυτό, αν διαφορετικές συχνότητες χρησιμοποιούνται για τους κλάδους διαφορισμού, ένα άλλο είδος διαφορισμού, ο διαφορισμός συχνότητας μπορεί να επιτευχθεί. Η απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης συνοχής [21]. Ο διαφορισμός συχνότητας χρησιμοποιεί πολύ περισσότερο εύρος ζώνης από τις άλλες διατάξεις διαφορισμού και ένα διαφορετικό ζεύγος πομπού-δέκτη απαιτείται για κάθε κλάδο.

2.3.4.3 Διαφορισμός χώρου

Αυτή η διάταξη διαφορισμού χρησιμοποιεί πολλαπλές κεραιές στην πλευρά του πομπού ή/και του δέκτη για να δημιουργήσει κλάδους διαφορισμού κατανεμημένους στο χώρο. Ο σκοπός του διαφορισμού κεραιάς είναι να εκμεταλλευτούμε τα διαφορετικά μονοπάτια ενός κύματος που διαδίδεται σε ένα ανακλαστικό περιβάλλον με σκοπό να βελτιώσουμε την ολική απόδοση του συστήματος. Δύο ή περισσότερες πανομοιότυπες κεραιές διαχωρίζονται με συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους για τη δημιουργία μιας στοιχειοκεραίας διαφορισμού χώρου, ώστε οι απολαβές του καναλιού μεταξύ διαφορετικών ζευγών κεραιών να παρουσιάζουν ανεξάρτητες διαλείψεις, και να δημιουργούνται και ανεξάρτητες διαδρομές σήματος. Η απαιτούμενη απόσταση των κεραιών εξαρτάται από το περιβάλλον σκέδασης και από τη συχνότητα φέροντος. Ο χωρικός διαφορισμός μπορεί να μας προσφέρει κέρδος διαφορισμού το οποίο ορίζεται ως η διαφορά της λαμβανόμενης ισχύος του

συνδυασμένου σήματος στο δέκτη από τη λαμβανόμενη ισχύ ενός απλού κλάδου του συστήματος. Η τεχνική αυτή δεν καταναλώνει επιπλέον φάσμα [21], [22] και το βασικό θέμα είναι η απόσταση των κεραιών, που καθορίζει το βαθμό της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των γειτονικών κεραιών και τη συσχέτιση μεταξύ των σημάτων στους κλάδους. Η απόσταση των κεραιών πρέπει να είναι τέτοια ώστε η αμοιβαία σύζευξη και η συσχέτιση να ελαχιστοποιούνται και τα λαμβανόμενα σήματα στις κεραιές να υφίστανται ανεξάρτητες διαλείψεις. Μια απόσταση $\lambda/2$ είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές [21], [22]. Η συσχέτιση μεταξύ των σημάτων σε δύο κλάδους μεταβάλλεται με την απόσταση μεταξύ των κεραιών σε ένα δέκτη διαφορισμού χώρου. Ο Clarke [38] έχει εξάγει τη σχέση μεταξύ της συσχέτισης και της απόστασης των κεραιών.

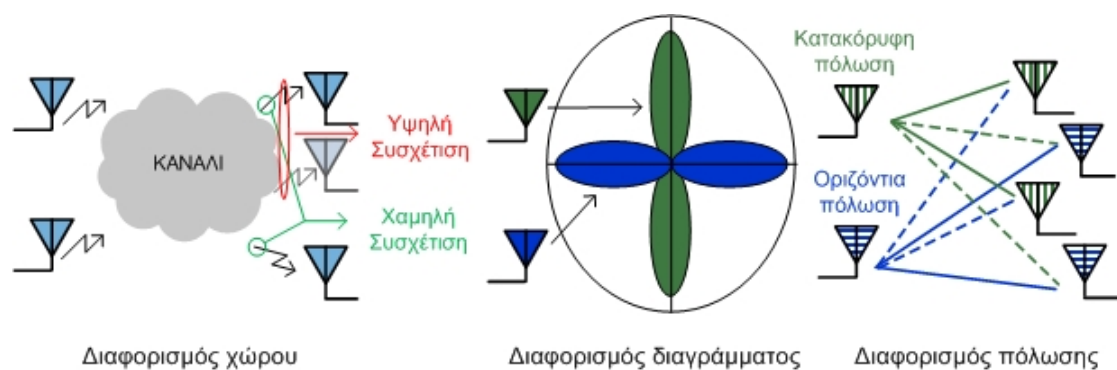


Σχήμα 2.8: Διακύμανση συντελεστή συσχέτισης με την απόσταση των κεραιών.

Για δύο ομοιοκατευθυντικές κεραιές που έχουν απόσταση μεταξύ τους, d , ο συντελεστής συσχέτισης των περιβάλλουσών των σημάτων μεταβάλλεται με την απόσταση των κεραιών ως [25], [38]:

$$\rho_e = J_o^2\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (2.15)$$

όπου J_0 είναι η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους μηδενικής τάξης και λ είναι το μήκος κύματος. Η βασική υπόθεση για αυτή την έκφραση είναι ότι η γωνία άφιξης είναι ομοιόμορφη στο αζιμούθιο και δεν υπάρχει γωνία ανύψωσης. Παρόλα αυτά αν οι κεραιές είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, τα διαγράμματα των κεραιών παραμορφώνονται εξαιτίας της αμοιβαίας σύζευξης και η συσχέτιση μειώνεται [25]. Το Σχ. 2.8 δείχνει τη σχέση του συντελεστή συσχέτισης και της απόστασης των κεραιών για τη θεωρητική και για την πειραματική περίπτωση αντίστοιχα [25].



Σχήμα 2.9: Διαφορισμός χώρου, διαγράμματος και πόλωσης.

2.3.4.4 Διαφορισμός διαγράμματος

Αν χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραιές είτε στον πομπό είτε στο δέκτη, προκύπτει ένα ακόμα είδος διαφορισμού, ο διαφορισμός διαγράμματος ακτινοβολίας ή γωνίας (Σχ. 2.9). Οι κλάδοι διαφορισμού παράγονται κατευθύνοντας το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραιάς σε διαφορετικές γωνίες. Η πιο επιθυμητή περίπτωση είναι όταν η επικάλυψη μεταξύ των γειτονικών διαγραμμάτων ακτινοβολίας είναι η ελάχιστη και ο συνδυασμός τους δίνει ένα ομοιοκατευθυντικό διάγραμμα. Τα σήματα που εκπέμπονται σε διαφορετικές κατευθύνσεις υφίστανται διαφορετικές διαλείψεις και έτσι είναι ασυσχέτιστα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, χρησιμοποιείται μια στοιχειοκεραία με κατάλληλη μεταγωγή λοβού σε κάθε πομπό, δέκτη ή στους δύο. Ο διαφορισμός διαγράμματος είναι πιο αποτελεσματικός στην περίπτωση που η γωνία άφιξης έχει μεγαλύτερη διασπορά και διακύμανση [24].

2.3.4.5 Διαφορισμός πόλωσης

Αυτή η διάταξη διαφορισμού εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι αν δύο σήματα εκπέμπονται ή λαμβάνονται με ορθογωνική πόλωση, οι διαλείψεις των σημάτων είναι ανεξάρτητες [21], [22] (Σχ. 2.9). Έτσι, δύο κεραιές με διαφορετική πόλωση ή μια κεραιά με διπλή πόλωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποτελέσουν ένα σύστημα διαφορισμού δύο κλάδων. Έχει ένα πλεονέκτημα έναντι του διαφορισμού χώρου, καθώς δεν απαιτεί πάντα δύο κεραιές διαχωρισμένες με κάποια απόσταση μεταξύ τους, καθώς και μια κεραιά διπλής πόλωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υλοποιηθεί και έτσι προσφέρει μείωση μεγέθους και κόστους σε σύγκριση με ένα δέκτη διαφορισμού χώρου [36]. Στην περίπτωση που εκπέμπεται μια πόλωση, η διαφορά μεταξύ των συμπολωσικών (co-polar) και ορθοπολωσικών (cross-polar) συνιστωσών που λαμβάνονται στο δέκτη αναμένεται να είναι πολύ υψηλή αν το περιβάλλον δεν παράγει σημαντική αποπόλωση (depolarization). Αυτή η διαφορά, που συχνά αποκαλείται διευκρίνιση ορθοπόλωσης (crosspolarization discrimination - XPD), απαιτείται να είναι μικρή για να λειτουργήσει αποδοτικά ο διαφορισμός πόλωσης. Αλλιώς, η ανισοσταθμία ισχύος μεταξύ των δύο κλάδων διαφορισμού θα είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα το χαμηλό κέρδος διαφορισμού. Τα πλεονεκτήματα του διαφορισμού πόλωσης μπορούν να επιτευχθούν πλήρως σε ένα σενάριο όπου το περιβάλλον σκέδασης προκαλεί σημαντική αποπόλωση του εκπεμπόμενου σήματος και έτσι το XPD στο δέκτη είναι χαμηλό. Διαφορετικά, οι κεραιές μπορούν να αποκτήσουν κλίση έτσι ώστε το επίπεδο και των δύο λαμβανόμενων πολώσεων να είναι συγκρίσιμο. Ο Turkmani [36] έχει διερευνήσει την επίδραση της γωνίας κλίσης των κεραιών στη συσχέτιση και το κέρδος διαφορισμού για το διαφορισμό πόλωσης και επίσης πραγματοποιείται η σύγκριση του διαφορισμού χώρου και πόλωσης.

2.4 Ασύρματα συστήματα επικοινωνιών MIMO

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για υψηλούς ρυθμούς δεδομένων στις σύγχρονες και στις μελλοντικές ασύρματες συσκευές επικοινωνίας απαιτεί τη διασύνδεση των συσκευών εκπομπής και λήψης μέσω ζεύξεων υψηλής χωρητικότητας. Η χρήση

πολλαπλών κεραιών και στα δύο άκρα του συστήματος, δηλαδή στον πομπό και το δέκτη, γνωστό ως σύστημα MIMO, έχει δείξει ότι αυξάνει τη χωρητικότητα του συστήματος σε ένα περιβάλλον ανακλάσεων που προκαλεί πολλαπλές διαδρομές του σήματος. Τα συστήματα MIMO μπορούν να προσφέρουν από κοινού διαφορισμό εκπομπής-λήψης σε σύγκριση με τον απλό διαφορισμό μόνο εκπομπής ή μόνο λήψης. Για ένα σύστημα με N_T κεραιές εκπομπής και N_R κεραιές λήψης, το $N_T \times N_R$ σύστημα MIMO μπορεί να προσφέρει διαφορισμό τάξης $N_R \cdot N_T$. Αυτή η πλευρά των συστημάτων MIMO, βέβαια, δεν προσεγγίζεται σε αυτή τη διατριβή και αφήνεται για μελλοντική μελέτη. Η μελέτη των συστημάτων MIMO σε αυτή τη διατριβή δίνει έμφαση στη χωρητικότητα του καναλιού και στην επίδραση του σώματος του χρήστη σε αυτή. Ένα σύστημα MIMO εκμεταλλεύεται τις πολλαπλές διαδρομές του σήματος για να επιτύχει αύξηση στη χωρητικότητα του καναλιού δημιουργώντας πολλαπλά παράλληλα κανάλια. Ο αριθμός των παράλληλων καναλιών είναι ίσος με το ελάχιστο των N_R, N_T , κι έτσι προσφέρει κέρδος χωρικής πολυπλεξίας ίσο με $\min(N_R, N_T)$ σε σχέση με ένα σύστημα SISO [39] χωρίς να χρειάζεται πρόσθετη ισχύ RF ή εύρος ζώνης.

2.4.1 Διατάξεις καναλιών MIMO

2.4.1.1 Κανάλι SISO (Απλής Εισόδου – Απλής Εξόδου)

Τα κανάλια SISO αποτελούν την απλούστερη μορφή καναλιών και περιλαμβάνουν μια κεραία στον πομπό και μια κεραία στο δέκτη όπως στο Σχ. 2.4. Η απόκριση του καναλιού τη χρονική στιγμή t σε κρουστικό παλμό που αποστέλλεται τη χρονική στιγμή $t-\tau$ συμβολίζεται ως $h(\tau, t)$. Αν $x(t)$ είναι το εκπεμπόμενο σήμα, το λαμβανόμενο σήμα δίδεται από τη σχέση:

$$y(t) = h(\tau, t) * x(t), \quad (2.16)$$

όπου με $*$ συμβολίζεται ο τελεστής της συνέλιξης.

2.4.1.2 Κανάλι SIMO (Απλής Εισόδου – Πολλαπλών Εξόδων)

Τα κανάλια SIMO αποτελούνται από μια κεραία στον πομπό και πολλαπλές κεραίες στο δέκτη όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4. Ο πομπός αποστέλλει το σήμα μέσω της μοναδικής κεραίας του, ενώ ο δέκτης λαμβάνει το ίδιο σήμα κατά N_R εκδοχές. Στην περίπτωση αυτή το κανάλι SIMO περιγράφεται από το διάνυσμα διαστάσεων $N_R \times 1$:

$$h(\tau, t) = [h_1(\tau, t) h_2(\tau, t) \dots h_{N_R}(\tau, t)]^T \quad (2.17)$$

Αν $x(t)$ είναι το εκπεμπόμενο σήμα, ο δέκτης των N_R κεραίων λαμβάνει διάνυσμα της μορφής:

$$y(t) = [y_1(t) y_2(t) \dots y_{N_R}(t)] \quad (2.18)$$

όπου $y_i(t)$ το σήμα που λαμβάνεται από την i -οστή κεραία του δέκτη.

2.4.1.3 Κανάλι MISO (Πολλαπλών Εισόδων – Απλής Εξόδου)

Τα κανάλια MISO αποτελούνται από πολλαπλές κεραίες στον πομπό και μια κεραία στο δέκτη όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4. Στην περίπτωση αυτή το σήμα εκπέμπεται ταυτόχρονα και από τις N_T κεραίες του πομπού, ενώ ο δέκτης λαμβάνει μια υπέρθεση αυτών. Τότε το κανάλι MISO περιγράφεται από το διάνυσμα διαστάσεων $1 \times N_T$:

$$h(\tau, t) = [h_1(\tau, t) h_2(\tau, t) \dots h_{N_T}(\tau, t)] \quad (2.19)$$

Αν $x_j(t)$ είναι το εκπεμπόμενο σήμα από την j -οστή κεραία του πομπού, το λαμβανόμενο σήμα από το δέκτη είναι:

$$y(t) = \sum_{j=1}^{N_T} h_j(\tau, t) * x_j(t) \quad (2.20)$$

2.4.1.4 Κανάλι MIMO (Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων)

Τα κανάλια MIMO αποτελούνται από πολλαπλές κεραιές στον πομπό και πολλαπλές κεραιές στο δέκτη όπως φαίνεται στο Σχ. 2.4. Στην περίπτωση αυτή ο πομπός εκπέμπει ταυτόχρονα N_T σήματα τα οποία λαμβάνονται από κάθε κεραιά του δέκτη. Άρα ο δέκτης λαμβάνει συνολικά $N_T \times N_R$ σήματα προς περαιτέρω επεξεργασία. Το κανάλι στην περίπτωση αυτή χαρακτηρίζεται από τον πίνακα $H(\tau, t)$ διαστάσεων $N_R \times N_T$:

$$\mathbf{H}(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(\tau, t) & h_{1,2}(\tau, t) & \cdots & h_{1,N_T}(\tau, t) \\ h_{2,1}(\tau, t) & h_{2,2}(\tau, t) & \cdots & h_{2,N_T}(\tau, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1}(\tau, t) & h_{N_R,2}(\tau, t) & \cdots & h_{N_R,N_T}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

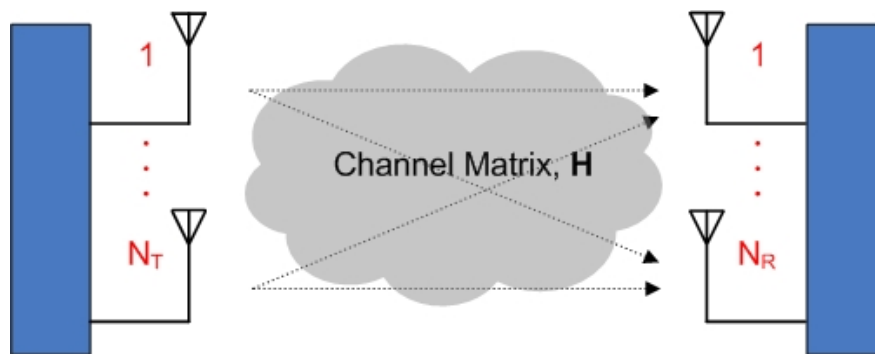
Τα στοιχεία του πίνακα $H(\tau, t)$ είναι μιγαδικοί αριθμοί που εκφράζουν την εξασθένιση και την ολίσθηση φάσης που εισάγει το κανάλι στο σήμα που φθάνει στο δέκτη με καθυστέρηση τ . Το στοιχείο $h_{i,j}$ του πίνακα αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς από το j -οστό στοιχείο του πομπού στο i -οστό στοιχείο του δέκτη, ενώ ταυτόχρονα θεωρείται και ως ένα υποκανάλι (subchannel) διάδοσης από τα $N_R \times N_T$ υποκανάλια που υπάρχουν συνολικά.

Αν υποθέσουμε ότι το εύρος ζώνης του σήματος είναι αρκετά στενό ώστε το κανάλι να θεωρηθεί σχεδόν σταθερό ως προς τη συχνότητα (frequency flat fading), τότε απαλείφεται η χρονική εξάρτηση του καναλιού από την καθυστέρηση τ . Με βάση τη θεώρηση αυτή, ο πίνακας \mathbf{H} δεν περιέχει χρονική εξάρτηση και γράφεται υπό την μορφή:

$$\mathbf{H}(t) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(t) & h_{1,2}(t) & \cdots & h_{1,N}(t) \\ h_{2,1}(t) & h_{2,2}(t) & \cdots & h_{2,N}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1}(t) & h_{M,2}(t) & \cdots & h_{M,N}(t) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

2.5 Χωρητικότητα καναλιού συστημάτων MIMO

Για να σχεδιαστεί και να αναπτυχθεί ένα σύστημα MIMO, είναι μεγάλης σημασίας ο όσο το δυνατόν πιο ακριβής χαρακτηρισμός του καναλιού MIMO. Στη συνέχεια θα γίνει μια εισαγωγή στη μαθηματική αναπαράσταση ενός τέτοιου συστήματος και θα δοθεί η σχέση της χωρητικότητας για ένα σύστημα MIMO.



Σχήμα 2.10: Ένα $N_T \times N_R$ σύστημα MIMO με N_T Tx και N_R Rx κεραίες.

Στο Σχήμα 2.10 απεικονίζεται ένα σύστημα MIMO με N_T κεραίες στον πομπό και N_R κεραίες στο δέκτη. Η γενική έκφραση για το σήμα βασικής ζώνης σε αυτή την περίπτωση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$y(t) = \mathbf{H}(\tau, t) * x(t) + n(t), \quad (2.23)$$

όπου $x(t)$ είναι ένα $N_T \times 1$ διάνυσμα που συμβολίζει τα N_T εκπεμπόμενα σήματα, $y(t)$ είναι ένα $N_R \times 1$ διάνυσμα που αντιστοιχεί στα N_R λαμβανόμενα σήματα και $n(t)$ είναι το διάνυσμα του θορύβου. Αν υποθέσουμε ότι το εύρος ζώνης των εκπεμπόμενων σημάτων είναι αρκετά στενό, έτσι ώστε η απόκριση του καναλιού να θεωρηθεί επίπεδη ως προς τη συχνότητα, τότε η μαθηματική έκφραση για τα σήματα εισόδου-εξόδου δίνεται από:

$$y(t) = \mathbf{H}(t)x(t) + n(t) \quad (2.24)$$

Ο χρόνος στην εξίσωση (2.24) αναπαριστά τη μεταβολή του χρόνου ή της στιγμής παρατήρησης, που αποκαλείται επίσης και στιγμιότυπο.

Τα συστήματα MIMO τα συναντάμε σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Σε ένα σύστημα με πολλαπλές κεραιές στον πομπό και το δέκτη (Σχ. 2.10), το κανάλι παρουσιάζει πολλαπλές εισόδους και πολλαπλές εξόδους. Σε αυτή την ενότητα θα εξάγουμε τη βασική αρχή υπολογισμού της στιγμιαίας χωρητικότητας ενός γενικού συστήματος που περιγράφεται από ένα πίνακα \mathbf{H} που δεν προσδιορίζεται περισσότερο. Στη συνέχεια περιορίζουμε την ανάλυση σε κανάλια μη επιλεκτικών διαλείψεων. Από τη στιγμή που εστιάζουμε στη στιγμιαία χωρητικότητα, δηλαδή η έξοδος κάθε χρονική στιγμή είναι ανεξάρτητη από τις αντίστοιχες των προηγούμενων χρονικών στιγμών, μπορούμε να αμελήσουμε τον χρονικό δείκτη. Το γενικό μοντέλο συστήματος με N_T εισόδους και N_R εξόδους σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$y = \mathbf{H} s + n \quad (2.25)$$

Ο πίνακας \mathbf{H} έχει ως στοιχεία τους συντελεστές h_{ij} που περιγράφουν το μιγαδικό κέρδος του καναλιού μεταξύ της κεραιάς λήψης i και της κεραιάς εκπομπής j .

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Το βασικότερο μέγεθος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απόδοσης ενός MIMO συστήματος είναι η χωρητικότητά του. Για τη μελέτη της χωρητικότητας των συστημάτων MIMO γίνεται διάκριση με βάση τη διαθεσιμότητα ή μη γνώσης του καναλιού στον πομπό (CSIT). Από την άλλη θεωρούμε δεδομένη τη γνώση του καναλιού στο δέκτη (CSIR). Η γενική έκφραση της χωρητικότητας ενός καναλιού MIMO, με N_T κεραιές εκπομπής και N_R κεραιές λήψης σε εύρος ζώνης B μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση, όπως αποδείχτηκε από τον Telatar [40]:

$$C_{MIMO} = \max_{Tr(Q) \leq P_T} \left\{ \log_2 \left[\det \left(I + \frac{P_T}{N_T B N_0} H Q H^H \right) \right] \right\}, \quad (2.27)$$

όπου I είναι ο $N_R \times N_R$ μοναδιαίος πίνακας, H είναι ο $N_R \times N_T$ πίνακας του καναλιού MIMO, H^H είναι ο αναστροφοσυζυγής του πίνακα H και Q είναι ο $N_T \times N_T$ πίνακας συνδιακύμανσης των εκπεμπόμενων σημάτων s . Ο περιορισμός εκπεμπόμενης ισχύος $Tr(Q) \leq P_T$, εξασφαλίζει ότι η συνολική ισχύς εκπομπής από τις N_T κεραίες του πομπού δεν υπερβαίνει την ισχύ P_T που εκπέμπει το αντίστοιχο σύστημα SISO με το οποίο πρέπει να γίνει η σύγκριση του συστήματος MIMO. Επίσης τροποποιείται ο ορισμός $\rho = P_T / (N_0 B)$ που αντιστοιχεί στο SNR λήψης αν θεωρήσουμε κανάλι χωρίς διαλείψεις.

Ανάλογα με τη μέθοδο κατανομής ισχύος που χρησιμοποιείται, προκύπτουν διαφορετικοί πίνακες συνδιακύμανσης Q . Η μέθοδος κατανομής ισχύος εξαρτάται από το αν ο πομπός έχει γνώση της κατάστασης του καναλιού (Channel State Information – CSI). Συνήθως, θεωρούνται δύο εκ διαμέτρου αντίθετες περιπτώσεις: καμία γνώση της κατάστασης του καναλιού στον πομπό και πλήρης γνώση της κατάστασης του καναλιού στον πομπό και ανάλογα διαφοροποιείται η κατανομή της ισχύος. Στην παρούσα διατριβή θεωρούμε ότι ο πομπός δεν έχει καμία γνώση του καναλιού και άρα η ισχύς εκπομπής κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλες τις κεραίες. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί μια επισκόπηση της μεθόδου αυτής και της αντίστοιχης έκφρασης της χωρητικότητας.

2.5.1 Χωρητικότητα συστημάτων MIMO χωρίς γνώση του καναλιού στον πομπό

Παρατηρώντας την (2.27) διαπιστώνουμε ότι η χωρητικότητα εξαρτάται από τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για την κατανομή της ισχύος σε κάθε υποκανάλι. Η θεωρητική ανάλυση υποθέτει ότι η κατάσταση του καναλιού είναι γνωστή στο δέκτη. Η υπόθεση αυτή είναι σωστή από τη στιγμή που ο δέκτης συνήθως εφαρμόζει μεθόδους ανίχνευσης με σκοπό να εκτιμήσει το κανάλι, παρόλα αυτά δεν μπορούμε να θεωρήσουμε το ίδιο για τον πομπό.

Όταν ο πομπός δεν έχει γνώση του καναλιού, είναι λογικό η ισχύς να εκχωρηθεί ως μια χωρικά ομοιόμορφη κατανομή, καθώς δεν μπορεί να βελτιστοποιήσει την κατανομή της ισχύος μεταξύ των N_T κεραιών εκπομπής. Συνεπώς, ίση ισχύς κατανέμεται σε καθεμία από τις N_T κεραιές και ο πίνακας συνδιακύμανσης είναι ο N_T πίνακας $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_{N_T}$. Η σχέση που δίνει τη χωρητικότητα, (2.27), απλοποιείται στην πολύ γνωστή σχέση [39], [41], [42]:

$$C_{MIMO} = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (2.28)$$

όπου \mathbf{I}_{N_R} είναι ο $N_R \times N_R$ μοναδιαίος πίνακας, ρ είναι το μέσο SNR ανά κεραία λήψης, \mathbf{H} είναι ο $N_R \times N_T$ κανονικοποιημένος πίνακας του καναλιού MIMO και \mathbf{H}^H είναι ο αναστροφοσυζυγής του πίνακα \mathbf{H} . Ένα παράδειγμα διάταξης MIMO που χρησιμοποιεί ομοιόμορφη κατανομή ισχύος είναι η χρήση block κωδίκων χώρου-χρόνου (space-time block codes), όπως είναι το πολύ γνωστό σχήμα Alamouti [43].

Ο πίνακας του MIMO καναλιού \mathbf{H} μπορεί να υπολογιστεί από το κατάλληλο μοντέλο καναλιού που θα επιλεγεί. Τα επικρατέστερα μοντέλα καναλιών που χρησιμοποιούνται στην πράξη χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: ντετερμινιστικά και στοχαστικά. Τα ντετερμινιστικά μοντέλα βασίζονται σε λεπτομερή αναπαράσταση των φαινομένων διάδοσης ενώ τα στοχαστικά δίνουν μία στατιστική περιγραφή του καναλιού. Στη συνέχεια της διατριβής θα χρησιμοποιηθεί ένα στοχαστικό μοντέλο, βασισμένο σε πίνακες συνδιακύμανσης μεταξύ των κεραιοστοιχείων, τόσο στην εκπομπή όσο και στη λήψη. Η αναλυτική μαθηματική περιγραφή του συγκεκριμένου μοντέλου θα δοθεί στην παράγραφο 4.3.1.

Η χωρητικότητα μετράται σε bits/sec (bps). Στη συνέχεια της διατριβής θα χρησιμοποιείται η ανηγμένη χωρητικότητα κανονικοποιημένη ως προς το εύρος ζώνης του καναλιού B (C/B), που μετράται σε bps/Hz.

2.5.2 Στοχαστικά κανάλια

Σε ένα πραγματικό σενάριο, αντί για ντετερμινιστικά γνωστά κανάλια θεωρούμε στοχαστικά κανάλια, με μια συγκεκριμένη τυχαία κατανομή. Συνήθως θεωρούμε μεταβλητές διαλείψεις, που μπορούν να μοντελοποιηθούν ως τυχαία μεταβλητή με συγκεκριμένη κατανομή. Συνεπώς, υπό τη θεώρηση ενός στοχαστικού καναλιού, η χωρητικότητα γίνεται μια τυχαία μεταβλητή και για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της, χρησιμοποιούμε στοχαστικές ποσότητες, όπως περιγράφεται ακολούθως. Σε αυτή την περίπτωση δύο έννοιες της χωρητικότητας εμφανίζονται: η εργοδική χωρητικότητα και η χωρητικότητα διακοπής [44].

2.5.2.1 Εργοδική χωρητικότητα και χωρητικότητα διακοπής

Σε γενικές γραμμές, η εργοδική χωρητικότητα ενός καναλιού MIMO μπορεί να θεωρηθεί ως μια «μέση» χωρητικότητα του καναλιού και δίνεται από:

$$\bar{C} = E[C_{inst}] \quad (2.29)$$

Όταν δεν υπάρχει CSI στον πομπό, μπορούμε να αντικαταστήσουμε την (2.28) στην (2.29), συνεπώς η εργοδική χωρητικότητα δίνεται από:

$$\bar{C} = E \left[\log_2 \det \left(I_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] \quad (2.30)$$

Η χωρητικότητα διακοπής ποσοτικοποιεί το επίπεδο της εγγυημένης απόδοσης της χωρητικότητας για συγκεκριμένο επίπεδο αξιοπιστίας. Η $q\%$ χωρητικότητα διακοπής $C^{out,q}$ δείχνει το ελάχιστο επίπεδο χωρητικότητας που μπορεί να επιτευχθεί από το σύστημα με πιθανότητα $(100-q)\%$:

$$\begin{aligned} \Pr ob(C < C^{out,q}) &= q\% \quad \text{ή} \\ \Pr ob(C > C^{out,q}) &= (100 - q)\% \end{aligned} \quad (2.31)$$

Η χωρητικότητα διακοπής είναι μια παράμετρος που έχει ενδιαφέρον για την ανάπτυξη και τη λειτουργία συστημάτων, καθώς εγγυάται μια συγκεκριμένη απόδοση του συστήματος με συγκεκριμένη πιθανότητα. Συνήθως οι τιμές πιθανότητας που χρησιμοποιούνται στα συστήματα επικοινωνιών είναι 1 % με 10 %.

2.5.3 Κανονικοποίηση του πίνακα του καναλιού

Στη σχέση (2.28), το ρ συμβολίζει το σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη που περιλαμβάνει τις απώλειες διαδρομής. Συνεπώς ο πίνακας του καναλιού H πρέπει να κανονικοποιηθεί κατάλληλα έτσι ώστε να μην περιλαμβάνει απώλειες διαδρομής ή κέρδος. Παρόλα αυτά στα πραγματικά σενάρια, οι απώλειες διαδρομής διαφέρουν για διαφορετικά περιβάλλοντα, διαφορετικές συνθήκες καναλιού αλλά και διαφορετικές διατάξεις κεραιών (διαφορετικός αριθμός κεραιών, διαφορετικές θέσεις πάνω στο σώμα, διαφορετικά κέρδη κεραίας). Συνεπώς, μια λογική ερώτηση που προκύπτει είναι πώς πρέπει να υπολογίζεται ο παράγοντας κανονικοποίησης του πίνακα H .

Σε αρκετά άρθρα [45], [46], [47], θεωρείται μια στιγμιαία κανονικοποίηση του πίνακα H του καναλιού για τον υπολογισμό της χωρητικότητας, μια μέθοδος που πρώτη φορά παρουσιάστηκε στο [42]. Έτσι, η επίδραση των απωλειών διαδρομής, και των αργών και ταχέων διαλείψεων απομακρύνονται από τον πίνακα του καναλιού. Με αυτή την υπόθεση, ο λόγος της λαμβανόμενης προς την εκπεμπόμενη ισχύ υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή ή στιγμιότυπο, κατά μέσο όρο για όλες τις ζεύξεις Tx – Rx. Αυτό είναι ισοδύναμο με τη χρήση της νόρμας Frobenius. Ο κανονικοποιημένος πίνακας H για το n -ιοστό στιγμιότυπο του καναλιού, σε αυτή την περίπτωση δίνεται από τη μαθηματική έκφραση:

$$H^{norm}(n) = \frac{H(n)}{\frac{1}{\sqrt{N_T N_R}} \|H(n)\|_F} = \frac{H(n)}{\frac{1}{\sqrt{N_T N_R}} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_T} (|h_{ij}|^2)_n}} \quad (2.32)$$

Η μέθοδος αυτή είναι ισοδύναμη με τη θεώρηση ενός σταθερού μέσου SNR στο δέκτη (υπολογισμένος κατά μέσο όρο για όλες τις κεραίες του δέκτη) κάθε χρονική στιγμή. Δεδομένου ότι οι συνθήκες του καναλιού και οι απώλειες διαδρομής μεταβάλλονται κάθε χρονική στιγμή, το σταθερό μέσο SNR στο δέκτη είναι το ίδιο με το να θεωρήσουμε τέλει έλεγχο της εκπεμπόμενης ισχύος για κάθε χρήστη στο

σύστημα, αλλά και απεριόριστη ισχύ στον πομπό (η ισχύς στον πομπό μεταβάλλεται κάθε στιγμή ανάλογα με τις συνθήκες του καναλιού για να διατηρείται σταθερό το SNR στο δέκτη). Είναι φανερό ότι οι υποθέσεις αυτές αποτελούν μια ιδανική περίπτωση, αλλά είναι αποδεκτή και χρησιμοποιείται ευρέως για τον υπολογισμό της χωρητικότητας με έναν εύκολο αλλά όχι ρεαλιστικό τρόπο.

Μια τροποποιημένη μέθοδος για την κανονικοποίηση του πίνακα H που έχει προκύψει από μετρήσεις καναλιών MIMO χρησιμοποιείται στο [48]. Σε αυτή την περίπτωση ο παράγοντας κανονικοποίησης υπολογίζεται ως ο μέσος όρος της νόρμας Frobenius σε ένα μετακινούμενο «παράθυρο» μήκους περίπου 1m (που στη συγκεκριμένη μέτρηση στα 2.1 GHz αντιστοιχούσε σε 7 λ). Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ένας πιο ρεαλιστικός έλεγχος της ισχύος, καθώς ο έλεγχος λαμβάνει υπόψη του μια συγκεκριμένη χρονοσχισμή, αντί για ένα στιγμιαία λαμβανόμενο στιγμιότυπο.

Οι προηγούμενες μέθοδοι για την κανονικοποίηση του πίνακα H του καναλιού σε συστήματα MIMO, πηγάζουν από την οπτική γωνία του συστήματος, όπου ο έλεγχος της ισχύος είναι μια φυσική υπόθεση. Παρόλα αυτά όμως, από την οπτική των κεραιών και της διάδοσης, είναι πολύ ενδιαφέρον να λάβουμε υπόψη μας τις διαλείψεις και τη σκίαση, ειδικότερα όταν θέλουμε να συγκρίνουμε διαφορετικά περιβάλλοντα. Είναι επίσης ενδιαφέρον και από σχεδιαστική άποψη, καθώς οι κεραιές μπορεί να έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ισχύος και κέρδους για διαφορετικές απώλειες διαδρομής και διαλείψεις. Σε αυτή τη λογική, κάποιοι συγγραφείς [49] έχουν προτείνει την κανονικοποίηση του καναλιού MIMO με βάση το μέσο λαμβανόμενο SNR. Η εκπεμπόμενη ισχύς είναι σταθερή σε μια τιμή, κι έτσι ώστε να προκύπτει ένα συγκεκριμένο μέσο SNR. Η ιδέα πίσω από την κανονικοποίηση αυτή είναι να προέλθει μια δίκαιη σύγκριση μεταξύ ενός i.i.d. καναλιού SISO και του ρεαλιστικού καναλιού MIMO που έχει προέλθει από προσομοίωση ή μέτρηση. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να αξιολογηθεί η πραγματική βελτίωση από τη χρήση πολλαπλών κεραιών όταν συγκρίνονται με συμβατικά συστήματα SISO και συμπεριλαμβάνεται η επίδραση των απωλειών διαδρομής και των διαλείψεων.

Στην παρούσα διατριβή, που θα συγκρίνουμε σενάρια μετρήσεων και προσομοιώσεων σε διαφορετικά περιβάλλοντα και για διαφορετικές διατάξεις

κεραιών, όπως θα δούμε σε επόμενες παραγράφους, είναι πολύ σημαντικό να συμπεριλάβουμε την επίδραση της κεραιάς και την επίδραση του σώματος του χρήστη στα αποτελέσματα της χωρητικότητας. Συνεπώς θεωρούμε ένα μέσο λαμβανόμενο SNR για όλες τις διαφορετικές διατάξεις με σκοπό να συγκρίνουμε με δίκαιο τρόπο τη χωρητικότητα του καναλιού. Η μαθηματική έκφραση που υπολογίζει τον παράγοντα κανονικοποίησης, g , δίνεται από:

$$g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{cases}} \sum_{j=1}^{N_{samp}} \left(\frac{1}{(n_T n_R)_i} \|H_j\|_F^2 \right)}{N_{cases} \times N_{samples}}}, \quad (2.33)$$

όπου $\|H_j\|_F = \left(\sqrt{\sum_{k=1}^{n_T} \sum_{l=1}^{n_R} |h_{kl}|^2} \right)_j$ είναι η νόρμα Frobenius για το j -οστό στιγμιότυπο του

καναλιού, N_{cases} είναι ο αριθμός των διαφορετικών διατάξεων/σεναρίων που μελετάμε και N_{samp} είναι ο αριθμός των δειγμάτων για κάθε διαφορετική διάταξη. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να αξιολογηθεί η πραγματική βελτίωση που προκύπτει από τη χρήση πολλαπλών κεραιών, όταν συγκρίνεται με συμβατικά συστήματα SISO. Επιπλέον μπορεί να συμπεριληφθεί στα αποτελέσματα της χωρητικότητας η επίδραση της κεραιάς, ακόμα κι αν συγκρίνουμε διατάξεις που έχουν την ίδια μορφή διαγραμμάτων αλλά διαφορετικό κέρδος, αλλά και η επίδραση της παρουσίας του σώματος του χρήστη σε ένα φορητό σύστημα κεραιών.

2.6 Μεθοδολογίες αξιολόγησης συστημάτων MIMO

Η ενότητα αυτή παρέχει μια λεπτομερή περιγραφή των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων MIMO με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 4.

2.6.1 Μέθοδοι αξιολόγησης της χωρητικότητας συστημάτων MIMO

Τα συστήματα MIMO χαρακτηρίζονται από τη μέγιστη διαθέσιμη χωρητικότητα του καναλιού. Στο κεφάλαιο 4, η μελέτη μας εστιάζει στην αξιολόγηση της

χωρητικότητας του καναλιού MIMO διερευνώντας την επίδραση του σώματος του χρήστη, θεωρώντας τη χωρητικότητα ως την πιο αντιπροσωπευτική και ευρέως χρησιμοποιούμενη παράμετρο αξιολόγησης.

Η χωρητικότητα του καναλιού MIMO, όπως προκύπτει και από την (2.28), μπορεί να υπολογιστεί από τον πίνακα H του καναλιού. Για τον υπολογισμό του πίνακα H του καναλιού MIMO, παρουσιάζονται τρεις ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι, ανάλογα με το είδος του καναλιού που θέλουμε να μελετήσουμε:

1. Για την περίπτωση ενός καναλιού που εμφανίζει διαλείψεις τύπου Rayleigh, ο πίνακας H του καναλιού μπορεί να υπολογιστεί με τη χρήση ενός θαλάμου αντήχησης (reverberation chamber) που είναι μια μεταλλική κοιλότητα που μπορεί να παράγει τεχνητά ένα ομοιόμορφο περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών (multipath), το οποίο είναι ένα στατιστικά επαναλήψιμο περιβάλλον για το χαρακτηρισμό κεραιών. Ο θάλαμος αντήχησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει το κέρδος διαφορισμού όπως περιγράφεται στο [50], καθώς και τη χωρητικότητα του καναλιού κεραιών MIMO.
2. Για την περίπτωση που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ένα ήδη υπάρχον μοντέλο καναλιού, ο πίνακας H μπορεί να υπολογιστεί από την προσομοίωση του καναλιού χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μοντέλο καναλιού και τα διαγράμματα ακτινοβολίας των στοιχείων της στοιχειοκεραίας. Τα μοντέλα καναλιού, όπως θα δούμε στην παράγραφο 2.7, μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες: τα ντετερμινιστικά και τα στοχαστικά μοντέλα. Ένα στοχαστικό μοντέλο που χρησιμοποιείται ευρέως για την ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι ένα στοχαστικό μοντέλο καναλιού που βασίζεται στη συνδιακύμανση μεταξύ των κεραιοστοιχείων του πομπού και του δέκτη. Τα χαρακτηριστικά της κεραίας μπορούν να ενσωματωθούν στην αναπαράσταση του καναλιού, χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας κάθε στοιχείου της στοιχειοκεραίας που θα προκύψουν είτε από μετρήσεις στον ανηχικό θάλαμο ή από προσομοίωση.
3. Για την περίπτωση της μελέτης ενός καναλιού σε πραγματικό περιβάλλον, πραγματοποιούνται μετρήσεις καναλιού MIMO. Σε αυτή την περίπτωση το κανάλι αντιστοιχεί σε ένα πραγματικό αλλά συγκεκριμένο περιβάλλον (εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου). Η κεραία τοποθετείται πάνω στην πλατφόρμα

μετρήσεων, η οποία χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πίνακα του καναλιού H .

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι, η μέθοδος που χρησιμοποιείται κάθε φορά για τον υπολογισμό του πίνακα H διαμορφώνεται σε κάθε περίπτωση ανάλογα με τις απαιτήσεις που υπάρχουν και το είδος του καναλιού που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε. Στη συνέχεια, περιγράφονται επιγραμματικά οι τρεις αυτές μέθοδοι, ενώ αναλύεται λεπτομερώς η δεύτερη μέθοδος, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή.

2.6.1.1 Υπολογισμός της χωρητικότητας από μετρήσεις σε ένα θάλαμο αντήχησης

Ο θάλαμος αντήχησης [51] χρησιμοποιείται πάνω από δυο δεκαετίες για κάποια είδη μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC). Είναι μια μεταλλική κοιλότητα που αντιπροσωπεύει ένα ιστροπικό περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών παρόμοιου τύπου με αυτά που συναντούμε σε αστικά και εσωτερικά περιβάλλοντα [52].

Ένας θάλαμος αντήχησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον γρήγορο και ακριβή υπολογισμό της απόδοσης ακτινοβολίας μιας κεραιάς [37] αλλά και του κέρδους διαφορισμού [50], [53]. Οι θάλαμοι αντήχησης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για το χαρακτηρισμό της μέγιστης διαθέσιμης χωρητικότητας σε ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών [54], [53].

Οι μετρήσεις με ένα θάλαμο αντήχησης πλεονεκτούν έναντι εναλλακτικών μεθόδων μέτρησης, που περιλαμβάνουν μετακίνηση του εξοπλισμού μέτρησης σε αστικά περιβάλλοντα ή σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον είναι επαναλήψιμες και συγκριτικά γρήγορες. Η επαναληψιμότητα μας επιτρέπει να πραγματοποιούμε μετρήσεις χρησιμοποιώντας μόνο ένα δέκτη καναλιού, επειδή μπορούμε να επαναλάβουμε ακριβώς το ίδιο περιβάλλον στο θάλαμο, όσες φορές θέλουμε. Έτσι, αν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σύστημα διαφορισμού με δύο κλάδους στο δέκτη, δε χρειάζεται να μετρήσουμε ταυτόχρονα τα δύο κανάλια αλλά και τη μεμονωμένη κεραιά αναφοράς. Σε ένα πραγματικό περιβάλλον χρειαζόμαστε τρεις δέκτες για να κάνουμε μετρήσεις διαφορισμού, ένα για κάθε κλάδο και ένα για αναφορά, ή ένα γρήγορο μεταγωγέα που θα επιλέγει τα τρία σήματα, το ένα μετά το άλλο. Αυτά τα

πλεονεκτήματα είναι ακόμα μεγαλύτερα όταν μετράμε συστήματα MIMO, επειδή η κεραία MIMO έχει πολλές θύρες στις οποίες πρέπει να μετρηθούν τα σήματα ταυτοχρόνως ή αλλιώς κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

2.6.1.2 Υπολογισμός της χωρητικότητας από προσομοιώσεις με χρήση μοντέλων καναλιού και διαγραμμάτων ακτινοβολίας

Η μέθοδος αυτή μπορεί να αναλυθεί σε δύο μέρη: το ένα είναι το μοντέλο του καναλιού που περιγράφει (στατιστικά ή γεωμετρικά) το περιβάλλον διάδοσης πολλαπλών διαδρομών και δεν περιλαμβάνει την επίδραση των κεραιών και του χρήστη και το άλλο είναι το πραγματικό τερματικό (κεραίες και θήκη) και ο χρήστης που χαρακτηρίζονται από το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας MIMO. Για αυτή τη μέθοδο υπολογισμού της χωρητικότητας, χρησιμοποιούνται μοντέλα καναλιού για τον υπολογισμό του πίνακα H , στον οποίο στη συνέχεια ενσωματώνονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών και προκύπτει ο σύνθετος πίνακας H από τον οποίο στη συνέχεια υπολογίζουμε τη χωρητικότητα μέσω της σχέσης (2.28).

2.6.1.3 Υπολογισμός της χωρητικότητας από την πραγματοποίηση μετρήσεων σε πραγματικά περιβάλλοντα

Παρόλο που οι θεωρητικές μελέτες αποτελούν ενδιαφέρουσα μέθοδο για το χαρακτηρισμό του καναλιού και το σχεδιασμό ενός συστήματος, για το σωστό χαρακτηρισμό ενός καναλιού MIMO και την αξιολόγηση των προτεινόμενων μοντέλων καναλιού απαιτούνται μετρήσεις σε πραγματικά σενάρια. Στις μετρήσεις του ασύρματου καναλιού διάδοσης, βασίζονται όλα τα μοντέλα καναλιού, είτε άμεσα είτε έμμεσα. Για τα στοχαστικά μοντέλα καναλιού, οι παράμετροι του μοντέλου πρέπει να εξαχθούν από τα δεδομένα των μετρήσεων, αλλά και τα γεωμετρικά μοντέλα καναλιού ή τα μοντέλα παρακολούθησης ακτίνας (ray tracing) πρέπει να επαληθεύονται με βάση την πραγματικότητα. Οι μετρήσεις των ιδιοτήτων του ασύρματου καναλιού είναι επίσης γνωστές ως ήχηση καναλιού (channel sounding), ένας όρος που παράγεται από ένα πομπό που ηχοβολεί (διεγείρει) το κανάλι, ενώ ο δέκτης καταγράφει την έξοδο του καναλιού. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί η μέθοδος υπολογισμού της χωρητικότητας μέσω μετρήσεων σε πραγματικά σενάρια,

και θα παρουσιαστούν επιγραμματικά οι διαφορετικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται στη βιβλιογραφία, με σκοπό την αξιολόγηση και τη μέτρηση συστημάτων MIMO, και ειδικότερα, επικοινωνιακών συστημάτων με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα.

Ο χαρακτηρισμός των ασυρμάτων καναλιών MIMO ξεκίνησε κάποιες δεκαετίες πριν, αλλά ακόμα προσελκύει αρκετό ενδιαφέρον. Σχετικά με τα συστήματα MIMO, έχει πραγματοποιηθεί ένας μεγάλος αριθμός μετρήσεων τα τελευταία χρόνια. Οι σειρές μετρήσεων εξυπηρετούν διαφορετικούς σκοπούς, καθένας από τους οποίους ορίζει και το είδος του συστήματος μετρήσεων ή της πλατφόρμας δοκιμών που θα χρησιμοποιηθεί. Οι αρχικές μετρήσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία για συστήματα MIMO είχαν ως σκοπό να χαρακτηρίσουν το ασύρματο κανάλι (π.χ. τον Rician παράγοντα K για περιπτώσεις LOS, χαρακτηρισμό περιβάλλοντος πολλαπλών διαδρομών, προφίλ καθυστέρησης ισχύος PDP), περιλαμβάνοντας χαρακτηριστικά πολλαπλών κεραιών και διπλής κατεύθυνσης (π.χ. χωρική συσχέτιση και φάσμα ισχύος ως προς το αζιμούθιο PAS) για περιπτώσεις στενής ζώνης και ευρείας ζώνης. Κάποιες μετρήσεις χρησιμοποιούνταν για να αξιολογήσουν προτεινόμενα μοντέλα καναλιού. Μια επιπλέον χρήση των μετρήσεων MIMO είναι η αξιολόγηση προτεινόμενων αλγορίθμων και διατάξεων πομποδεκτών, όταν η πλατφόρμα δοκιμών βρίσκεται είτε σε off-line λειτουργία είτε σε λειτουργία πραγματικού χρόνου. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί ή είναι υπό ανάπτυξη αρκετά συστήματα που περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά MIMO. Η αξιολόγηση αυτών των συστημάτων παρέχει τον πιο πλήρη αλλά και πιο πολύπλοκο χαρακτηρισμό συστήματος και παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον από την οπτική των κατασκευαστών και των σχεδιαστών συστημάτων.

Χρήση κεραιών για μετρήσεις MIMO

Για τα κανάλια MIMO, πρέπει να μετρηθούν οι αποκρίσεις του καναλιού μεταξύ όλων των πιθανών συνδυασμών των στοιχείων των κεραιών των Tx και Rx. Οι μετρήσεις καναλιού μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε στο πεδίο του χρόνου είτε της συχνότητας, αποθηκεύοντας είτε την κρουστική απόκριση του καναλιού $h(\tau, t)$

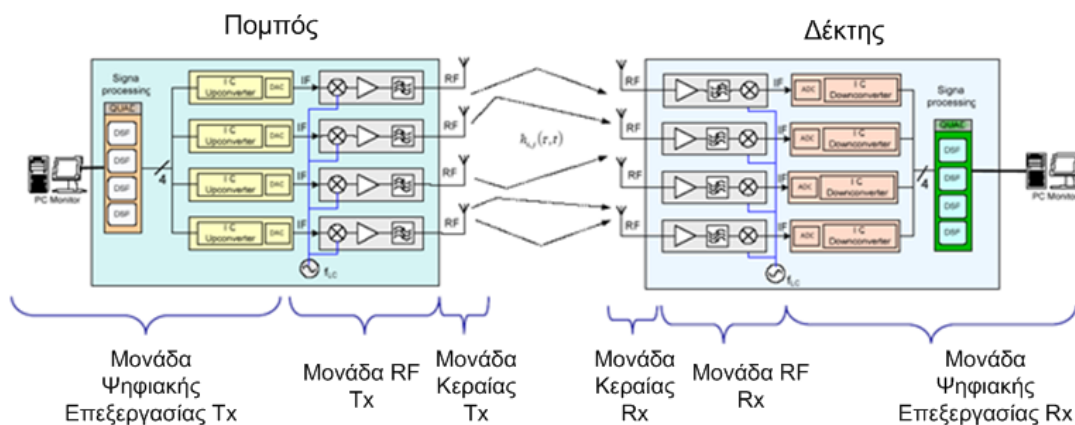
είτε τη συνάρτηση μεταφοράς $H(f, t)$ αντίστοιχα. Όσον αφορά τις κεραίες και τις αντίστοιχες αλυσίδες RF, εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι:

- Χρησιμοποιούνται πραγματικές κεραίες, καθεμία με τη δικιά της αλυσίδα RF κι έτσι το κανάλι μπορεί να μετρηθεί άμεσα στα διαφορετικά στοιχεία του δέκτη. Η μέθοδος αυτή είναι δαπανηρή και αρκετά απαιτητική όσον αφορά στη διαδικασία διακρίβωσης (calibration), αλλά προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα.
- Η χρήση στοιχειοκεραιών με μεταγωγή (switched arrays) απαιτεί μόνο μια αλυσίδα RF στο δέκτη [55]. Χρησιμοποιούνται γρήγοροι μεταγωγείς RF, ή πολυπλέκτες που ελέγχουν τη μεταγωγή μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων των Tx και Rx, έτσι ώστε να μετριέται ένα μόνο ζευγάρι κεραιών κάθε φορά.
- Η χρήση εικονικών στοιχειοκεραιών αποτελεί την απλούστερη μέθοδο, όπου π.χ. μόνο ένα στοιχείο της κεραίας είναι διαθέσιμο σε κάθε πλευρά της ζεύξης και οι μετρήσεις MIMO πραγματοποιούνται μετακινώντας τα στοιχεία σε προκαθορισμένες θέσεις πριν από κάθε ήχηση του καναλιού. Το πλεονέκτημα των εικονικών κεραιών βρίσκεται στην απλότητα, όμως υπάρχει το μεγάλο μειονέκτημα, ότι δεν είναι σίγουρο ότι το κανάλι θα είναι στατικό καθ'όλη τη διάρκεια της μέτρησης. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε θαλάμους αντήχησης, όπου το περιβάλλον είναι πλήρως ελεγχόμενο. Κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα είναι η ακρίβεια της τοποθέτησης των κεραιών, όπως επίσης και η αποφυγή του φαινομένου της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων της κεραίας.

Μετρήσεις με τη χρήση πλατφόρμας μετρήσεων MIMO

Ένας τρόπος που χρησιμοποιείται για την πραγματοποίηση μετρήσεων MIMO είναι η χρήση μιας πλατφόρμας μετρήσεων MIMO [56]. Με τη χρήση μιας πλατφόρμας μετρήσεων, μπορούμε να προσεγγίσουμε πραγματικά σενάρια και θέματα υλοποίησης για συστήματα MIMO, κάτι που δε λαμβάνεται υπόψη σε θεωρητικές μελέτες ή προσομοιώσεις. Επιπλέον, οι πλατφόρμες μετρήσεων MIMO μας επιτρέπουν να μελετήσουμε την επίδραση της κεραίας στους αλγόριθμους MIMO, αλλά και να μετρήσουμε την απόδοση στοιχειοκεραιών κάτω από πραγματικές συνθήκες.

Οι πλατφόρμες αυτές είναι ευέλικτα συστήματα που μέσω κατάλληλου λογισμικού δίνουν τη δυνατότητα επιλογής κάποιων παραμέτρων του συστήματος όπως η συχνότητα δειγματοληψίας και η απολαβή ισχύος και προορίζονται για διατάξεις πολλαπλών κεραιών. Περιλαμβάνουν μια διεπαφή χρήστη για να είναι πιο φιλικές προς το χρήστη και να απλοποιούν τη διαδικασία του ελέγχου διαφορετικών αλγορίθμων. Χρησιμοποιώντας τις πλατφόρμες μετρήσεων MIMO είναι δυνατό να μελετήσουμε θέματα τόσο της του RF υποσυστήματος όσο και της κωδικοποίησης MIMO. Από τη μια, μπορεί να γίνει σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών διατάξεων στοιχειοκεραιών σε πραγματικά περιβάλλοντα με σκοπό να υπολογιστεί ο πίνακας H για συγκεκριμένα σενάρια. Επιπλέον, μπορεί να αξιολογηθεί μια τυπική διάταξη MIMO, αλλά και να γίνει δοκιμή αλγορίθμων με έναν ακριβή τρόπο.



Σχήμα 2.11: Γενική αρχιτεκτονική μιας πλατφόρμας δοκιμών για ένα σύστημα MIMO 4x4 [56].

Στο Σχ. 2.11 φαίνεται η γενική αρχιτεκτονική μιας πλατφόρμας μετρήσεων που χρησιμοποιεί μονάδες ψηφιακής επεξεργασίας σήματος DSP [56]. Αποτελείται από μια διάταξη MIMO $N_T \times N_R$, όπου τα N_T , N_R εκφράζουν τον αριθμό των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα. Η γενική αρχιτεκτονική μιας πλατφόρμας MIMO μπορεί να χωριστεί σε τρεις βασικές μονάδες: μονάδα επεξεργασία σήματος, μονάδα RF-IF (Intermediate frequency) και κεραιές. Οι μονάδες της επεξεργασίας σήματος χρησιμοποιούνται για να χειριστούν τη ροή δεδομένων από/προς τους υπολογιστές, να πραγματοποιήσουν αναβίβαση και υποβίβαση συχνότητας από/προς IF, και να πραγματοποιήσουν ανάκτηση δεδομένων. Η μονάδα RF του πομπού ή του δέκτη

αποτελείται από N_T ή N_R αλυσίδες αντίστοιχα. Τα σήματα λαμβάνονται σε IF από τη μονάδα επεξεργασίας και αναβιβάζονται στην συχνότητα RF. Στη λήψη το σήμα RF λαμβάνεται και ενισχύεται με σκοπό την αύξηση του επιπέδου ισχύος που λαμβάνεται στη μονάδα επεξεργασίας.

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε μια επισκόπηση των κυριότερων από τις πλατφόρμες δοκιμών και μετρήσεων MIMO που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα. Μια γενική επισκόπηση του θέματος παρουσιάζεται στο [57].

Ένα από τα πρώτα πειράματα MIMO που υπάρχει στη βιβλιογραφία βρίσκεται στο [58]. Η συχνότητα λειτουργίας ήταν στα 3.65 GHz, και δεν χρησιμοποιούσε κάποιο συγκεκριμένο σχήμα διαμόρφωσης (υλοποιήθηκε από BPSK μέχρι 64-QAM). Παρόλο που το σύστημα ήταν ευρείας ζώνης, αποτελούσε ένα σημαντικό επίτευγμα καθώς έδειξε ότι η ιδέα του MIMO μπορούσε να αυξήσει την απόδοση του συστήματος. Μετά από αυτό το πρώτο βήμα, αναπτύχθηκαν αρκετές πλατφόρμες για τη μελέτη και την αξιολόγηση συστημάτων MIMO για διαφορετικά σενάρια.

Ένα σημαντικό θέμα είναι η αξιολόγηση αλγορίθμων MIMO σε πραγματικά συστήματα. Στο [59] αναφέρεται ένα 2×2 σύστημα MIMO βασισμένο στην ιδέα της υλοποίησης αλγορίθμων MIMO και του μεγαλύτερου μέρους της ψηφιακής επεξεργασίας βασικής ζώνης σε ένα υπολογιστικό περιβάλλον offline. Παρόλο που δεν είναι ειδικά σχεδιασμένο για το πρότυπο WLAN, εκπέμπει ένα σήμα 20 MHz OFDM. Το σήμα υπολογίζεται από πριν, φορτώνεται στη μνήμη του πομπού και μετά αποστέλλεται offline στη μονάδα του πομπού. Ο δέκτης συγκεντρώνει τα δεδομένα τα οποία στη συνέχεια επεξεργάζονται, αφού σταλούν σε έναν υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος στη μονάδα του δέκτη. Αυτή η μέθοδος λειτουργίας απλοποιεί την υλοποίηση του συστήματος και προσφέρει έναν εύκολο τρόπο για τον έλεγχο αλγορίθμων. Η πλατφόρμα αυτή βέβαια δεν λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο ούτε έχει τη δυνατότητα ανατροφοδότησης. Έχουν παρουσιαστεί αρκετές εργασίες που ακολουθούν την ίδια ιδέα [60], [61], [62], [63], με διαφορετικό επίπεδο πολυπλοκότητας και διαφορετικά χαρακτηριστικά.

Ένα βήμα παραπέρα για τα συστήματα MIMO είναι αυτό που αναπτύχθηκε στο Georgia Tech [64]. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για τα πρότυπα 802.11a και 802.16 (WLAN και WiMAX), με έως 4 κεραίες στην πλευρά του πομπού και του δέκτη. Παρόλο που το σύστημα δε λειτουργεί πλήρως σε πραγματικό χρόνο, κάποιες από τις

μονάδες ψηφιακής επεξεργασίας σήματος έχουν υλοποιηθεί με τη χρήση FPGA και επεξεργάζονται τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.

Ως εξέλιξη των offline συστημάτων, αναπτύχθηκαν κάποιες υλοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο. Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση με το [58], αναφέρεται ένα 2×2 σύστημα πραγματικού χρόνου MIMO που ονομάζεται VT-STAR, βασισμένο σε επεξεργασία DSP [65]. Λίγα συστήματα MIMO έχουν τη δυνατότητα ανατροφοδότησης. Σε αυτά τα συστήματα η πληροφορία της κατάστασης του καναλιού παρέχεται στον πομπό μέσω ενός αποκλειστικού καναλιού ανατροφοδότησης. Ένα παράδειγμα αποτελεί το [66], όπου παρουσιάζεται μια υλοποίηση πραγματικού χρόνου για ένα σχήμα χώρου-χρόνου με ανατροφοδότηση μέσω καλωδίου, ενώ αναπτύσσονται και κάποιες πλατφόρμες πραγματικού χρόνου για εφαρμογές WLAN [67], [68], [69]. Λίγα είναι τα διαθέσιμα εμπορικά συστήματα και μπορούν να θεωρηθούν ως πλατφόρμες γενικής χρήσης για δοκιμές, μετρήσεις MIMO και για ανάπτυξη αλγορίθμων. Ένα ενδιαφέρον παράδειγμα είναι η πλατφόρμα HaLo από την Signalion [70].

Υπάρχουν πολλά θέματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν χαρακτηρίζουμε και κατηγοριοποιούμε πλατφόρμες μετρήσεων MIMO, τα βασικά εκ των οποίων συνοψίζονται παρακάτω:

- Τύπος περιβάλλοντος για το οποίο προορίζεται η πλατφόρμα: εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου, στατικό ή δυναμικό.
- Πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας, που απαιτεί συγκεκριμένη συχνότητα φέροντος, εύρος ζώνης, διαμόρφωση κ.τ.λ.
- Λειτουργική βάση: πραγματικού ή μη χρόνου,.
- Επίπεδο υλοποίησης: συσκευή μετρήσεων, εμπορική χρήση, πειραματική χρήση.
- Hardware: DSP, FPGA, κ.α.
- Αριθμός κεραιών εκπομπής και λήψης.
- Αλγόριθμοι MIMO, και αν υπάρχει πληροφορία ανατροφοδότησης στον πομπό ή όχι.
- Μονόδρομη ή αμφίδρομη κίνηση δεδομένων (simplex, semiduplex ή full duplex).

Ανάλογα με το σκοπό και την εφαρμογή για τα οποία προορίζεται η πλατφόρμα MIMO, θα παρουσιάζει και διαφορετικά χαρακτηριστικά. Στο Σχ. 2.12 απεικονίζεται η διάταξη μετρήσεων με πλατφόρμα μετρήσεων MIMO, η οποία αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο UPM της Μαδρίτης [71].



Πομπός

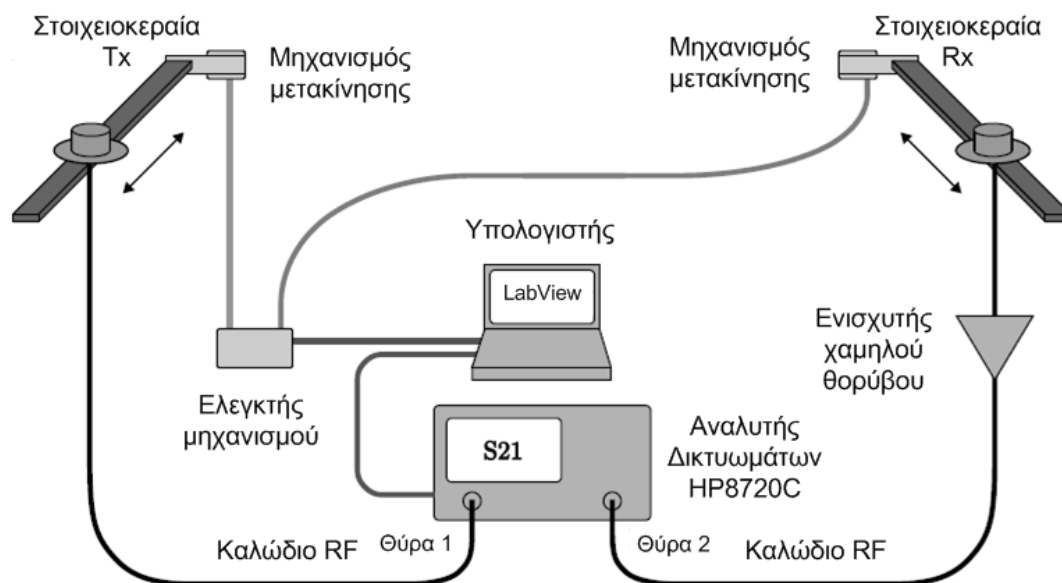


Δέκτης

Σχήμα 2.12: Διάταξη μετρήσεων με πλατφόρμα μετρήσεων MIMO στο UPM.

Μετρήσεις με τη χρήση *Vector Network Analyzer*

Οι μετρήσεις ενός καναλιού μπορούν να πραγματοποιηθούν με τη χρήση ενός διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων (Vector Network Analyzer - VNA). Ο VNA ηχοβολεί το κανάλι σαρώνοντας αργά το εύρος συχνότητας ενδιαφέροντος και εκτιμά τη συνάρτηση μεταφοράς μεταξύ των δύο θυρών του (S_{21}). Από τη στιγμή που οι κεραιές δεν αποτελούν μέρος της διαδικασίας διακρίβωσης (calibration) του VNA, για την εξαγωγή του καθαρού καναλιού από τις μετρήσεις του VNA, απαιτείται μια ξεχωριστή διαδικασία διακρίβωσης (calibration) των κεραιών, η επίδραση των οποίων μπορεί να απομακρυνθεί τελείως μόνο αν είναι γνωστές οι κατευθύνσεις όλων των συντελεστών πολλαπλής διαδρομής (στη γωνία ανύψωσης αλλά και στο αζιμούθιο). Στο Σχ. 2.13 παρουσιάζεται η διάταξη μέτρησης του καναλιού MIMO με τη χρήση εικονικών στοιχειοκεραιών [72]. Το βασικό μειονέκτημα των μετρήσεων με τη χρήση του VNA είναι ότι η πιθανή περιοχή μετρήσεων περιορίζεται καθώς ο πομπός και ο δέκτης συνδέονται μέσω καλωδίων με τον VNA. Στη βιβλιογραφία, είναι πολύ συχνή η χρήση VNA για την πραγματοποίηση μετρήσεων του καναλιού MIMO πάνω στο σώμα [33], [73], [74], [75].



Σχήμα 2.13: Διάταξη μετρήσεων με εικονικές στοιχειοκεραίες, όπου ο μηχανισμός μετακίνησης των κεραιών και ο αναλυτής δικτυωμάτων ελέγχονται από έναν Η/Υ [72].

Σειρές μετρήσεων για συστήματα MIMO

Τα ασύρματα κανάλια MIMO έχουν μελετηθεί ενδελεχώς για περιβάλλοντα εσωτερικού και εξωτερικού χώρου. Για παράδειγμα στα [41], [76] η χωρητικότητα και η συσχέτιση MIMO μελετώνται μέσω μετρήσεων για Δίκτυα Προσωπικής Επικοινωνίας (PAN) και Δίκτυα Σώματος (BAN). Η ανάλυση της χωρητικότητας καναλιού MIMO για εσωτερικό περιβάλλον LOS για εφαρμογές WLAN παρουσιάζεται στο [77]. Το άρθρο [78] παρουσιάζει μια παρόμοια ανάλυση για εφαρμογές WLAN με μετρήσεις στα 2.4 GHz σε ένα εσωτερικό περιβάλλον. Η σημασία του MIMO για εσωτερικά περιβάλλοντα στα 1800 MHz με εσωτερικούς και εξωτερικούς σταθμούς βάσης συζητιέται στο [79] μέσω εκτεταμένων σειρών μετρήσεων, ενώ το [80] δίνει μια ανάλυση βασισμένη σε μοντέλο προσομοίωσης για το 3GPP-3GPP2 χωρικό μοντέλο καναλιού. Οι Foschini και Gans έδωσαν μια θεωρητική προσέγγιση και τα βασικά θέματα που σχετίζονται με πολλαπλές κεραιές στο [42].

Σε αντίθεση με τις θεωρητικές φασματικές αποδόσεις που περιγράφονται για τα συστήματα MIMO στα [39], [42], η μέγιστη ρυθμαπόδοση ενός ασύρματου καναλιού

MIMO για πρακτικά συστήματα περιορίζεται από πολλούς παράγοντες όπως τα στατιστικά καναλιού, η συσχέτιση, το SNR, η απόδοση των κεραιών, ο αριθμός των κεραιών σε κάθε πλευρά κ.τ.λ. Για ένα σταθερό αριθμό κεραιών εκπομπής και λήψης, οι δύο σημαντικοί παράγοντες είναι το μέσο λαμβανόμενο SNR και η συσχέτιση μεταξύ των υποκαναλιών. Όσο υψηλότερο είναι το λαμβανόμενο SNR, τόσο υψηλότερη θα είναι και η χωρητικότητα του καναλιού. Οι ζεύξεις LOS συνήθως παρουσιάζουν υψηλό SNR αλλά από την άλλη, η χωρική συσχέτιση μεταξύ των υποκαναλιών είναι υψηλή εξαιτίας της χαμηλής σκέδασης. Μια κοινή αντίληψη είναι ότι το MIMO δεν είναι χρήσιμο για ζεύξεις LOS ή για κανάλια με διαλείψεις Rician εξαιτίας των ισχυρών συσχετίσεων. Έχειδειχτεί στα [81], [82], [83], [84] ότι για σταθερό SNR λήψης, η χωρητικότητα του καναλιού MIMO μειώνεται με αύξηση του Rician παράγοντα K . Παρόλα αυτά, κάποιες μελέτες [41], [76], [77] έχουν δείξει ότι παρόλη της ζεύξης LOS, η αύξηση της χωρητικότητας χρησιμοποιώντας MIMO είναι σημαντική σε ένα περιβάλλον με διαλείψεις Rician.

Μετρήσεις MIMO για συστήματα με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα

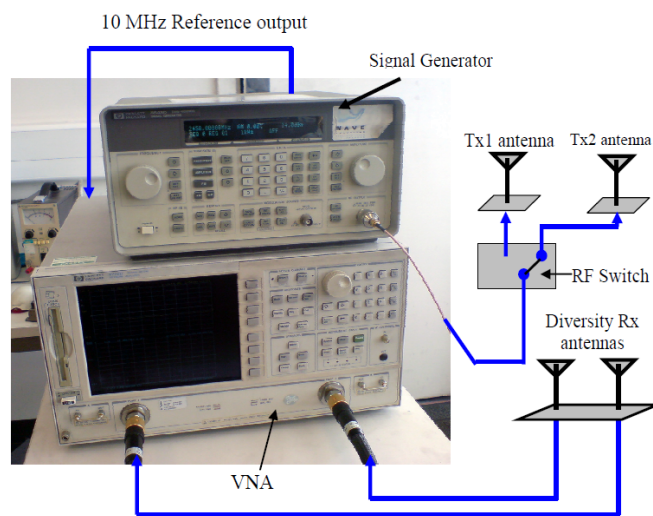
Εξαιτίας του υψηλού κόστους των ηχητών MIMO, η πιο δημοφιλής τεχνική ήχησης για MIMO, είναι η χρήση ενός διαδοχικού ηχητή που στην ουσία είναι ένας απλός ηχητής σε συνδυασμό με μια στοιχειοκεραία μεταγωγής (switched array). Το σύστημα αυτό μετράει διαδοχικά τις μιγαδικές αποκρίσεις των καναλιών SISO και ο συνδυασμός αυτών των αποκρίσεων δίνει τον πίνακα μιγαδικών αποκρίσεων MIMO, υποθέτοντας ότι η μεταγωγή μεταξύ των καναλιών πραγματοποιείται μέσα στο χρόνο συνοχής του καναλιού.

Ο πιο εύκολος τρόπος για να πραγματοποιηθούν μετρήσεις MIMO με τη χρήση VNA, είναι η χρήση ενός VNA με 4 τουλάχιστον θύρες. Με ένα τέτοιο VNA μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις για ένα 2×2 σύστημα MIMO, συνδέοντας στις δύο θύρες εξόδου τις κεραίες του πομπού και στις δύο θύρες εισόδου, τις κεραίες του δέκτη. Επειδή όμως ο τρόπος αυτός δεν είναι πάντα εφικτός, καθώς είναι πιο σύνηθες να χρησιμοποιούνται VNA με δύο θύρες, εφαρμόζονται κάποιοι εναλλακτικοί τρόποι.

Στο [75] πραγματοποιείται μια ανάλυση ενός off-body 4x4 συστήματος MIMO με βάση τις μετρήσεις της απόκρισης του καναλιού. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε ένα περιβάλλον μικρού γραφείου. Η στοιχειοκεραία λήψης αποτελείται από τέσσερις υφασμάτινες patch κεραιές. Δύο από αυτές είναι ενσωματωμένες στο μπροστινό μέρος του γιλέκου του χρήστη και οι άλλες δύο βρίσκονται στο πίσω μέρος του γιλέκου. Για να μετρηθεί ο πίνακας των αποκρίσεων του καναλιού μεταξύ κάθε ζεύγους κεραιών πομπού και δέκτη, χρησιμοποιείται ένας VNA σε συνδυασμό με δύο ηλεκτρομηχανικούς μεταγωγείς (electromechanical switches), οι οποίοι επιλέγουν την κεραία του πομπού που θα συνδέεται στη θύρα εξόδου του VNA και την κεραία του δέκτη που θα συνδέεται στη θύρα εισόδου του VNA κάθε φορά. Οι ηλεκτρομηχανικοί μεταγωγείς επιλέχθηκαν για την εξαιρετική και αξιόπιστη απόδοση που παρουσιάζουν (0.2 dB μέγιστες απώλειες παρεμβολής (insertion loss) και 80 dB ελάχιστη απομόνωση μέχρι και τα 3GHz). Η μέτρηση της απόκρισης του καναλιού μεταξύ κάθε ζεύγους κεραιών πομπού και δέκτη διαρκεί 0.5 s, που περιλαμβάνει το χρόνο μεταγωγής 15 ms, το χρόνο μέτρησης του VNA 25 ms, το χρόνο μεταφοράς δεδομένων και άλλες καθυστερήσεις. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δεν μπορούν να γίνουν ταυτόχρονες μετρήσεις στις 4 κεραιές του δέκτη, καθώς η κάθε μέτρηση γίνεται για ένα ζεύγος κεραιών Tx-Rx κάθε φορά, οπότε δεν μπορούν να γίνουν μετρήσεις για κινητό χρήστη και θα πρέπει να εξασφαλίζεται κάθε φορά η στατικότητα του περιβάλλοντος.

Από την άλλη, στα [73], [74], [33] ερευνάται η χωρητικότητα ενός 2x2 on-body συστήματος MIMO για διαφορετικά κανάλια πάνω στο σώμα. Οι μετρήσεις διεξάγονται σε ένα περιβάλλον εργαστηρίου που προσφέρει συνθήκες πολλαπλών διαδρομών. Οι στοιχειοκεραίες που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από δύο επίπεδες κεραιές ανεστραμμένου F (PIFA) που τροφοδοτούνται μέσω γραμμής μικροταινίας και είναι ίδιες για τον πομπό και το δέκτη. Η μέτρηση του 2x2 καναλιού MIMO στενής ζώνης έγινε χρησιμοποιώντας ένα σύστημα RF (Σχ. 2.14) που αποτελείται από μια γεννήτρια σήματος, ένα VNA HP8753ES και ένα μεταγωγέα στην πλευρά του δέκτη. Από την άλλη στην πλευρά του δέκτη η λήψη των δύο καναλιών επιτυγχάνεται με την κατάλληλη ρύθμιση του VNA σε λειτουργία 2 καναλιών λήψης (2 channel tuned received mode). Ο VNA πραγματοποιεί απλή σάρωση συχνότητας (single frequency sweep) στα 2.45 GHz και ο συγχρονισμός με τη γεννήτρια σήματος γίνεται τροφοδοτώντας την έξοδο αναφοράς των 10 MHz της γεννήτριας στο VNA. Τα δύο

στοιχεία της κεραίας Tx συνδέονται μέσω του μεταγωγέα RF στη γεννήτρια σήματος που επίσης λειτουργεί στα 2.45 GHz ενώ τα στοιχεία Rx συνδέονται στις δύο θύρες του VNA. Η ισχύς εισόδου στις κεραίες του πομπού μετά τη διαδικασία του calibration ήταν 0 dBm. Ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν 15 ms. Το μειονέκτημα και σε αυτή την περίπτωση, παρόλο που η μέτρηση στο δέκτη γίνεται ταυτόχρονα για τις δύο κεραίες, είναι ότι στην πλευρά του πομπού χρησιμοποιείται μεταγωγέας, ενώ το περιβάλλον δεν είναι στατικό.



Σχήμα 2.14: Διάταξη για μετρήσεις MIMO.

Εκτός από τη χρήση του VNA, έχουν πραγματοποιηθεί μετρήσεις με το σχεδιασμό και τη χρήση φορετών μονάδων, κάτι που προσδίδει μεγαλύτερη ευελιξία στις κινήσεις. Στο [85] παρουσιάζεται ένας φορετός ηχητής καναλιού ευρείας ζώνης που έχει αναπτυχθεί με σκοπό το χαρακτηρισμό UWB off-body φορετών συστημάτων κεραίων MIMO. Ο πομπός αποτελείται από μια πηγή PulsON-P210 UWB, έναν αναλογικό RF/οπτικό μετατροπέα, έναν οπτικό μεταγωγέα και τέσσερις κεραίες Fractus UM-FR05-S1-P-0-107. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για χρήση πάνω στο σώμα και ενώ ο χρήστης είναι σε κίνηση, γι'αυτό είναι σημαντικό ο χρόνος κάθε εκπομπής να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να διασφαλίζεται η καταγραφή των δεδομένων αλλά και σχετικά σύντομος ώστε το κανάλι να θεωρείται στατικό, λόγω της μεταγωγής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο χρόνος εκπομπής για κάθε κεραία είναι 1.25 ms, κάτι που επιτρέπει ένα πλήρη κύκλο μέτρησης των τεσσάρων κεραίων

σε 5 ms. Η ταχύτητα μεταγωγής του μεταγωγέα είναι 0.2 ms, και έτσι μεγιστοποιείται ο χρόνος μετάδοσης ανά κεραία.

Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι κυριότερες σειρές μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα για κανάλια MIMO με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα. Να επισημάνουμε σε αυτό το σημείο ότι ενώ είναι αρκετές οι μελέτες που αφορούν σε συστήματα πάνω στο σώμα ή εκτός σώματος, δεν υπάρχουν εργασίες που να μελετούν το συνδυασμό των δύο καναλιών, κάτι που θα είχε μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον π.χ. στην περίπτωση ενός δικτύου αισθητήρων που είναι τοποθετημένοι πάνω στο σώμα του χρήστη και επικοινωνούν με μια κεντρική συσκευή (κανάλι πάνω στο σώμα) η οποία επικοινωνεί με τη σειρά της με ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης (κανάλι εκτός σώματος).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1: ΣΕΙΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MIMO BAN

	$N_T \times N_R$	Συχνότητα φέροντος	Κανάλι	Περιβάλλον
[75]	4x4	2.45 GHz	off-body	NLOS indoor, rich multipath, mobility
[73], [74], [33]	2x2	2.45 GHz	on-body	LOS indoor, rich multipath, mobility
[86]	διάφορες διατάξεις	890-3000 MHz	off-body	Indoor, stationary
[87]	8x4	UWB	off-body	Indoor, stationary

2.7 Μοντελοποίηση καναλιών MIMO

Μέχρι σήμερα, έχει προταθεί ένας τεράστιος αριθμός από μοντέλα καναλιού για συστήματα MIMO, ανάλογα με την εφαρμογή και την πολυπλοκότητα που μπορούμε να διαχειριστούμε. Οι παράμετροι που πρέπει να συμπεριληφθούν σε ένα μοντέλο καναλιού εξαρτώνται από το σκοπό του μοντέλου: για ανάπτυξη και σχεδιασμό δικτύου ενός συστήματος MIMO, χρειαζόμαστε μοντέλα ακριβή για συγκεκριμένο περιβάλλον, ενώ για ανάπτυξη αλγορίθμων MIMO και σχεδιασμό και έλεγχο συστήματος, προτιμώνται μοντέλα ανεξάρτητα από το συγκεκριμένο περιβάλλον. Η πιο ευρέως αποδεκτή κατηγοριοποίηση των μοντέλων καναλιού MIMO θεωρεί δύο κατηγορίες μοντέλων: τα ντετερμινιστικά μοντέλα και τα στοχαστικά μοντέλα. Τα πρώτα βασίζονται σε μια ακριβή περιγραφή ενός συγκεκριμένου περιβάλλοντος διάδοσης. Από την άλλη, τα στοχαστικά μοντέλα δεν βασίζονται σε μια περιγραφή

που εξαρτάται από το εκάστοτε περιβάλλον, αλλά έχουν ως σκοπό να αναπαράγουν με στατιστικό τρόπο φαινόμενα που έχουν παρατηρηθεί. Μεταξύ των καθαρά ντετερμινιστικών και καθαρά στοχαστικών μοντέλων, υπάρχουν υβριδικά μοντέλα βασισμένα σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά ή φυσικά μοντέλα με στατιστικές παραμέτρους, που συνδυάζουν κάποια γεωμετρικά στοιχεία του περιβάλλοντος με τη στατιστική πληροφορία. Τα περισσότερα μοντέλα καναλιού αναφέρονται σε 2D μοντελοποίηση του καναλιού. Από την άλλη όμως, η 3D μοντελοποίηση του καναλιού είναι εξαιρετικής σημασίας για τις επικοινωνίες εσωτερικού χώρου, όπου οι μικρές αποστάσεις και η πληθώρα σκεδαστών μπορεί να έχουν σημασία για τις συνιστώσες της γωνίας ανύψωσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μελετών πάνω σε αυτό το αντικείμενο είναι οι [88], [89]. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά κάποια από τα πιο αντιπροσωπευτικά μοντέλα καναλιού. Μια λεπτομερής περιγραφή των μοντέλων καναλιού MIMO είναι εκτός του σκοπού αυτής της εργασίας, και οι αναγνώστες που ενδιαφέρονται θα πρέπει να αποταθούν στις αναφορές που παρουσιάζονται εδώ και σε κάποιες καλές έρευνες σχετικά με μοντέλα καναλιού όπως είναι τα [90], [91], [92].

2.7.1 Φυσικά μοντέλα

2.7.1.1 Ντετερμινιστικά μοντέλα

Τα ντετερμινιστικά μοντέλα καναλιού βασίζονται σε λεπτομερείς αναπαραστάσεις των συνθηκών και του περιβάλλοντος διάδοσης. Συνεπώς εξαρτώνται από το εκάστοτε περιβάλλον και τα αποτελέσματα σκιαγραφούν άμεσα τα συγκεκριμένα φυσικά χαρακτηριστικά. Ανάλογα με το σκοπό του μοντέλου καναλιού, αυτή η ακρίβεια μπορεί να αντιμετωπιστεί ως πλεονέκτημα (αν απαιτείται η γνώση της ακριβούς απόδοσης σε ένα συγκεκριμένο σενάριο) ή μειονέκτημα (αν χρειάζεται να σχεδιάσουμε τις παραμέτρους του συστήματος για ένα τυπικό σενάριο ή σενάριο αναφοράς). Ένα επιπλέον εμπόδιο αυτών των μοντέλων καναλιού είναι η πολυπλοκότητά τους και ο τεράστιος χρόνος επεξεργασίας που απαιτούν. Οι δύο κύριες ντετερμινιστικές προσεγγίσεις για τον χαρακτηρισμό των καναλιών MIMO είναι οι καταγραφή των κρουστικών αποκρίσεων και οι τεχνικές παρακολούθησης ακτίνας (ray-tracing). Οι κρουστικές αποκρίσεις καταγράφονται και προκύπτουν από

σειρές μετρήσεων. Παρόλο το μεγάλο αριθμό μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι τώρα, είναι πολύ σπάνιο να χρησιμοποιηθούν οι καταγεγραμμένες κρουστικές αποκρίσεις για να προσομοιώσουν ασύρματα κανάλια, καθώς η μέθοδος αυτή απαιτεί σημαντικούς πόρους μνήμης και οι αποκρίσεις καναλιού εξαρτώνται από το συγκεκριμένο περιβάλλον. Περισσότερο χρησιμεύουν στην ανάλυση ή την εξαγωγή παραμέτρων καναλιού που χρησιμοποιούνται στα στοχαστικά μοντέλα. Οι τεχνικές παρακολούθησης ακτίνας από την άλλη, βασίζονται στη γεωμετρική οπτική, και προβλέπουν τη διάδοση πολλαπλών διαδρομών σε δεδομένο περιβάλλον από την γεωμετρική περιγραφή του (π.χ. κατόψεις ορόφων, βάσεις δεδομένων κτιρίων) και τις ηλεκτρομαγνητικές του ιδιότητες. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει τον υπολογισμό όχι μόνο του λαμβανόμενου σήματος ως άθροισμα των λαμβανόμενων σημάτων πολλαπλών διαδρομών, αλλά επίσης μπορούν εύκολα να αναλυθούν και οι κατευθύνσεις αναχώρησης και άφιξης (DOD, DOA). Παρόλα αυτά, οι ρεαλιστικές προσομοιώσεις λαμβάνουν υπόψη πολλαπλές ακτίνες και πολλαπλές αναπηδήσεις, κάτι που καθιστά αυτού του είδους το μοντέλο καναλιού το πιο απαιτητικό υπολογιστικά. Επιπλέον, εξαρτώνται από το περιβάλλον που έχει θεωρηθεί στην προσομοίωση. Παρόλα αυτά, η τεχνική αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη για τη μοντελοποίηση καναλιών και πολλά παραδείγματα μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία, όπως [93], [49]. Παρόμοια με τις καταγεγραμμένες κρουστικές αποκρίσεις, τα δεδομένα που προκύπτουν από τη μοντελοποίηση του ray-tracing μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη στοχαστικών μοντέλων [75], [94].

2.7.1.2 Στοχαστικά Μοντέλα

Τα στοχαστικά μοντέλα έχουν ως σκοπό την προσομοίωση των χαρακτηριστικών του καναλιού για τυπικά σενάρια, αντί για συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Συνεπώς αντανakλούν το περιβάλλον διάδοσης με έμμεσο τρόπο. Τα μοντέλα αυτά συχνά εξυπηρετούν την αποτίμηση της απόδοσης αλγορίθμων και διατάξεων πομποδεκτών. Θα μπορούσαμε να κατατάξουμε τα στοχαστικά μοντέλα σε φυσικά (γεωμετρικά) και μη φυσικά. Τα πρώτα βασίζονται σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά (π.χ. θέσεις των συστάδων, σκεδαστές, απόσταση Tx-Rx) αλλά αυτή η πληροφορία παράγεται στατιστικά, με βάση κάποια στατιστική κατανομή. Από την άλλη, τα μη-φυσικά

μοντέλα χρησιμοποιούν άλλους τύπους πληροφορίας ή χαρακτηριστικών καναλιού, όπως η χωρική συσχέτιση. Από τα μη φυσικά μοντέλα πρέπει να αναφέρουμε τα ακόλουθα:

- Μοντέλο καναλιού MIMO i.i.d.: Αυτό είναι το απλούστερο μοντέλο καναλιού MIMO, καθώς απλά υποθέτει ότι τα στοιχεία του πίνακα του καναλιού MIMO, είναι IID μιγαδικές γκαουσιανές τυχαίες μεταβλητές μηδενικής μέσης τιμής. Χρησιμοποιείται ευρύτατα, ειδικά για τον έλεγχο αλγορίθμων και σχεδιασμού, εξαιτίας της απλότητάς του και της ευελιξίας του (χαμηλές απαιτήσεις σε υπολογιστικό χρόνο και μνήμη). Παρόλα αυτά, παραβλέπει τη συσχέτιση μεταξύ των σημάτων Tx και Rx, που δεν είναι ρεαλιστικό στις περισσότερες περιπτώσεις.
- Μοντέλο Kronecker EU-IST METRA βασισμένο στη συσχέτιση: Βασίζεται στον πίνακα συσχέτισης ισχύος ή συνδιακύμανσης του ασύρματου καναλιού MIMO. Η έκφραση του πλήρους πίνακα συσχέτισης απλοποιείται αν υποθέσουμε πλήρη ανεξαρτησία μεταξύ των περιβαλλόντων διάδοσης Tx και Rx, ώστε ο πλήρης πίνακας συνδιακύμανσης να εκφράζεται ως ένα γινόμενο Kronecker των πινάκων συσχέτισης στον πομπό και το δέκτη (εξ ου και ο όρος Kronecker). Είχε προταθεί για σενάρια εσωτερικών χώρων NLOS, για κανάλια στενής ζώνης [95], και επίσης για κανάλια ευρείας ζώνης [96] εισάγοντας μια γραμμή καθυστέρησης ενδιάμεσης λήψης (tap-delay line) για τη μοντελοποίηση του φαινομένου πολλαπλών διαδρομών (αλλά διατηρώντας την ιδέα των ανεξάρτητων συσχετίσεων Tx και Rx). Παρόλο που το μοντέλο Kronecker είναι αρκετά δημοφιλές, δεν επιτυγχάνει την αναμενόμενη χωρητικότητα καναλιού σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, ειδικά για το φαινόμενο του key-hole: το γεγονός ότι υποθέτουμε ανεξαρτησία μεταξύ της συσχέτισης των Tx και Rx είναι ισοδύναμο με το να υποθέσουμε ότι οι συντελεστές πολλαπλών διαδρομών που φτάνουν στο Rx δεν έχουν πληροφορία για τις φυσικές συνθήκες στον Tx. Συνεπώς, αυτή η προσέγγιση παραβλέπει τους όρους συσχέτισης κατά μήκος της ζεύξης (“διασυσχέτιση” ή “από κοινού συσχέτιση”), που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, τουλάχιστον σε συγκεκριμένα σενάρια, όπως φαίνεται στο [97].
- Μοντέλο Kronecker EU-IST SATURN βασισμένο στη συσχέτιση: Είναι ένα μοντέλο που επίσης βασίζεται στο γινόμενο Kronecker και τους ανεξάρτητους πίνακες συσχέτισης σε Tx και Rx, και προτάθηκε επίσης για κανάλια NLOS εσωτερικού χώρου. Βασίζεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά των δεδομένων των

μετρήσεων, στενής ζώνης [46] και ευρείας ζώνης [98]. Όπως και στο πρόγραμμα IST METRA, το μεγαλύτερο μειονέκτημα είναι η βασική υπόθεση: ανεξάρτητοι πίνακες συσχέτισης σε Tx και Rx μπορούν να μοντελοποιήσουν μόνο φάσματα γωνιακής ισχύος που μπορούν να διαχωριστούν. Το μοντέλο αυτό υποτιμά τη χωρητικότητα καναλιού, ειδικά για περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου και μεγάλες συστοιχίες κεραιών. Παρόλα αυτά, όπως και το μοντέλο IST METRA είναι σχετικά δημοφιλές επειδή επιτρέπει την ανεξάρτητη βελτιστοποίηση κεραιών και ψηφιακής επεξεργασίας σε Tx και Rx.

2.8 Η επίδραση του σώματος στην απόδοση συστημάτων MIMO

Είναι ευρέως γνωστό ότι μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που εκπέμπονται από τις κεραιές των ασύρματων συστημάτων και των βιολογικών ιστών υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση, εξαιτίας της κοντινής απόστασης από το σώμα. Τα τελευταία χρόνια, έχει αφιερωθεί σημαντική προσπάθεια στην ποσοτικοποίηση αυτής της αλληλεπίδρασης. Πέρα από τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία, είναι εμφανές ότι η εγγύτητα της κεραίας στο ανθρώπινο σώμα έχει επιζήμια επίδραση στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραιών και κατ' επέκταση στην απόδοση της επικοινωνίας του τερματικού. Η κοντινή απόσταση του σώματος του χρήστη από το τερματικό έχει αρκετές συνέπειες, όπως είναι η παραμόρφωση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας [99], η μεταβολή της προσαρμογής εισόδου, η μείωση του κέρδους, ο αποσυντονισμός της συχνότητα λειτουργίας και η αύξηση των απωλειών απορρόφησης [3].

Τα βιολογικά συστήματα του ανθρώπινου σώματος αποτελούν ασύμμετρα διηλεκτρικά μέσα με επιτρεπτότητα και αγωγιμότητα που επηρεάζονται από την τιμή της συχνότητας. Η κατανομή του εσωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και η διασκορπιζόμενη ενέργεια εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσιολογικές παραμέτρους του σώματος και τη γεωμετρία του, αλλά και τη συχνότητα και την πόλωση του προσπίπτοντος κύματος. Η κύρια διαφορά που παρατηρείται άμεσα κατά την τοποθέτηση της κεραίας σε μέσο με απώλειες είναι η απόκλιση της τιμής του μήκους κύματος από την τιμή που έχει στον ελεύθερο χώρο.



Ομιλία

Επισκόπηση δεδομένων

Σχήμα 2.15: Λειτουργία ομιλίας και λειτουργία επισκόπησης δεδομένων.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων 15-20 χρόνων έχει γίνει γνωστό ότι η ισχύς που εκπέμπεται και λαμβάνεται από μια κινητή συσκευή (ή τηλέφωνο) μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Η σημασία αυτού του γεγονότος έχει συχνά καταγραφεί με διαφορές αρκετών dB μεταξύ διαφορετικών συσκευών [100], και σε κάποιες περιπτώσεις έχουν βρεθεί διακυμάνσεις μεγαλύτερες από 10 dB για διαφορετικούς χρήστες της ίδιας συσκευής [101], [102], [103], [104]. Οι μεγάλες αυτές διακυμάνσεις αναδεικνύουν την ανάγκη να συμπεριληφθεί ο χρήστης στο σχεδιασμό και τον έλεγχο των μελλοντικών συσκευών. Καθώς αυτό έχει αντίκτυπο στην απόδοση του δικτύου, τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και γενικά την εμπειρία του χρήστη.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα οι κινητές συσκευές ουσιαστικά χρησιμοποιούνταν για λειτουργία ομιλίας, π.χ. την περίπτωση όπου ο χρήστης κρατάει το κινητό δίπλα στο κεφάλι του για φωνητική χρήση. Η τρέχουσα εξέλιξη της τεχνολογίας είναι η μετάβαση από συσκευές με επίκεντρο την ομιλία σε συσκευές όπου τα δεδομένα και οι εφαρμογές είναι εξίσου ή περισσότερο σημαντικά, όπως είναι οι έξυπνες κινητές πλατφόρμες ή τα έξυπνα κινητά (Σχ. 2.15). Με αυτή την τάση, η λειτουργία επισκόπησης δεδομένων, όταν δηλαδή ο χρήστης κρατάει με το ένα ή και τα δύο χέρια το κινητό μπροστά του, γίνεται πιο σημαντική. Οι θέσεις των χεριών και των δαχτύλων του χρήστη μπορεί να διαφέρουν σε σχέση με τις αντίστοιχες θέσεις που

χρησιμοποιούσε σε λειτουργία ομιλίας. Είναι γνωστό ότι το χέρι του χρήστη είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας που ευθύνεται για τη διακύμανση στην απόδοση, δηλαδή την ισχύ που λαμβάνεται από διαφορετικούς χρήστες. Συνεπώς πρέπει να αναμένουμε μεγάλες διακυμάνσεις στην απόδοση και στη λειτουργία επισκόπησης δεδομένων, καθώς τα δάχτυλα του χρήστη ακόμα μπορεί να αλληλεπιδρούν με τις κεραιές.

Ενώ η συνεισφορά του κεφαλιού είναι πλήρως κατανοητή, η επίδραση του χεριού είναι πιο πολύπλοκο να αναγνωριστεί και να απομονωθεί [105]. Η παρουσία του ανθρώπινου χεριού έχει δείχτει ότι μειώνει την τιμή του SAR στο κεφάλι, καθώς μέρος της ισχύος διασκορπίζεται στο χέρι [106], [107]. Ιστορικά, το χέρι του χρήστη αρχικά αναπαρίστατο από απλά ομογενή μοντέλα [99]. Μοντέλα με πολλαπλές στρώσεις [3], [106], που αποτελούνταν από μυϊκό και οστίτη ιστό χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια. Απλοποιημένα ομοιώματα χεριού ακολούθησαν, συμπεριλαμβάνοντας την παρουσία αντίχειρα [108] ή δείκτη [109], [110]. Στο [111], ετερογενή ομοιώματα χεριού με αρκετούς ιστούς προέκυψαν από τα αποτελέσματα μαγνητικής τομογραφίας. Αποτελεί έκπληξη στις μέρες μας που τα πρότυπα δεν λαμβάνουν υπόψη ακόμα ένα συγκεκριμένο ομοίωμα χεριού, κυρίως επειδή υπάρχει μεγάλος αριθμός τρόπων να κρατάς το τερματικό αλλά και πρακτικά θέματα [112]. Παρόλο που κάποιες προσπάθειες προτυποποίησης [113] είναι σε προχωρημένο στάδιο στην προσπάθεια επιλογής των κατάλληλων ομοιωμάτων χεριού, αυτές δεν στηρίζονται σε μελέτες του τρόπου που κρατά ο χρήστης το κινητό [114].

Τα σημερινά κινητά τηλέφωνα περιλαμβάνουν μπαταρία, ηλεκτρονικά κυκλώματα και κεραιές για διαφορετικά συστήματα σε έναν περιορισμένο χώρο. Από τη στιγμή που οι χρήστες γενικά προτιμούν τα κινητά μικρού μεγέθους, η προσθήκη περισσότερων κεραιών για MIMO είναι δύσκολη και απαιτεί συμβιβασμούς ανάμεσα στην απόδοση και το σχεδιασμό και την τοποθέτηση των κεραιών στο τηλέφωνο. Η επίδραση του χεριού του χρήστη στην απόδοση του συστήματος MIMO θα είναι καίριας σημασίας.

Είναι ευρέως γνωστό ότι η απόδοση ενός συστήματος MIMO εξαρτάται σημαντικά από τις ιδιότητες του ραδιοκαναλιού μεταξύ των Tx και Rx [115], και έτσι πρέπει να περιλαμβάνονται στην αξιολόγηση. Δεδομένου ότι ο χρήστης αλληλεπιδρά με τις κεραιές του τερματικού στο κοντινό πεδίο, είναι δύσκολο να μην συμπεριλάβουμε όλες τις πλευρές του περιβάλλοντος του τερματικού και της επίδρασης του χρήστη σε μια μέτρηση απόδοσης του συστήματος.

Η μελέτη στο [116] καταγράφει κάποια από τα πρώτα αποτελέσματα σχετικά με την απόδοση MIMO για συσκευές χειρός με βάση μετρήσεις διάδοσης με ένα τερματικό και διάφορους χρήστες. Μπορεί να είναι πιθανό να απλοποιήσουμε την αξιολόγηση, π.χ. χρησιμοποιώντας μετρήσεις διαγραμμάτων ακτινοβολίας συμπεριλαμβάνοντας το χρήστη, παρόμοιο με τη μελέτη που έγινε για την αξιολόγηση της απόδοσης τερματικών SISO [117], [118].

Μια άλλη προσέγγιση της αξιολόγησης της απόδοσης παρουσιάζεται στο [119]. Εδώ χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός μετρήσεων διαγραμμάτων ακτινοβολίας που περιλαμβάνουν το ομοίωμα του χρήστη, και μοντέλων του καναλιού διάδοσης, όπου το μοντέλο περιγράφει όλα τα ξεχωριστά επίπεδα κύματα στο κανάλι. Υποθέτοντας συνθήκες μακρινού πεδίου, αυτή η μέθοδος επιτρέπει έναν πρακτικό διαχωρισμό των μετρήσεων της κεραίας και των μετρήσεων διάδοσης. Η μελέτη στο [119] λαμβάνει υπόψη της μόνο τη λειτουργία ομιλίας. Στο [48] μελετάται η απόδοση διαφορετικών βασικών τύπων κεραίας με βάση μετρήσεις διάδοσης αλλά χωρίς την επίδραση του χρήστη.

2.8.1 Μοντέλα καναλιών MIMO που περιλαμβάνουν την επίδραση της κεραίας και του σώματος του χρήστη

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες προσπάθειες που έχουν γίνει για να συμπεριληφθεί η επίδραση του σώματος του χρήστη στο μοντέλο καναλιού.

- Ο Harrysson στο [87] παρουσιάζει τη μέθοδο του σύνθετου καναλιού. Η φιλοσοφία αυτής της μεθόδου είναι η δημιουργία ενός μοντέλου που προκύπτει από την ξεχωριστή περιγραφή του καναλιού MIMO και της κεραίας μαζί με το ανθρώπινο σώμα. Η περιγραφή του ασύρματου καναλιού διάδοσης πραγματοποιείται με τη διεξαγωγή μιας σειράς μετρήσεων MIMO και με τη χρήση του double-directional μοντέλου καναλιού. Η περιγραφή της κεραίας και του σώματος πραγματοποιείται με τα διαγράμματα ακτινοβολίας της «υπερκεραίας» που θεωρεί την κεραία και το σώμα ως ένα σύστημα. Οι μετρήσεις MIMO γίνονται με βάση τη μέθοδο ήχησης καναλιού με εικονικές κεραίες και επιτυγχάνουν τον double-directional χαρακτηρισμό του καναλιού διάδοσης. Η συνάρτηση μεταφοράς του καναλιού μεταφράζεται ως ο

συνδυασμός του αθροίσματος των συνεισφορών των συνιστωσών πολλαπλής διαδρομής (DoA, DoD, delays) με το διάγραμμα ακτινοβολίας της «υπερκεραίας».

- Το μοντέλο του πίνακα συνδιακύμανσης [120], βασίζεται στον πίνακα συσχέτισης ισχύος ή συνδιακύμανσης του ασύρματου καναλιού MIMO. Ο σύνθετος πίνακας H του καναλιού προκύπτει ως το γινόμενο του πίνακα συνδιακύμανσης στον πομπό και το δέκτη και του πίνακα του καναλιού διάδοσης H . Τα χαρακτηριστικά των κεραιών και η επίδραση του σώματος του χρήστη ενσωματώνονται στην αναπαράσταση του καναλιού μέσω των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών που προκύπτουν είτε από μέτρηση είτε από προσομοίωση και στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των πινάκων συνδιακύμανσης.

- Ο Nawsariwala στο [121] παρουσιάζει ένα μοντέλο που αποτελεί συνδυασμό της ακριβούς ηλεκτρομαγνητικής αναπαράστασης των κεραιών και της ανάλυσης επιπέδου κύματος (plane wave decomposition) για το περιβάλλον διάδοσης. Το περιβάλλον διάδοσης μοντελοποιείται ως συστάδες ακτινών (clusters of rays) που αναχωρούν από τον πομπό και προσπίπτουν στο δέκτη με ιδιότητες που βασίζονται σε κάποιο στατιστικό μοντέλο. Τα διαγράμματα των κεραιών προσομοιώνονται με τη χρήση κάποιου HM πακέτου λογισμικού και περιλαμβάνουν και την επίδραση του χρήστη.

- Ο Volakis στο [122] περιγράφει μια μέθοδο, η οποία στηρίζεται στην ιδέα της μελέτης της επίδρασης του σώματος ξεχωριστά από το περιβάλλον διάδοσης. Κατά αυτή τη λογική η επίδραση του σώματος χαρακτηρίζεται είτε μέσω HM προσομοιώσεων είτε μέσω μετρήσεων και το κανάλι διάδοσης περιλαμβάνεται ξεχωριστά ως ένα βήμα μετα-επεξεργασίας, κάτι που προσθέτει κάποια ευελιξία στον υπολογισμό της χωρητικότητας.

2.9 Ανοιχτά θέματα

Μετά την προηγούμενη περιγραφή των υπάρχοντων μοντέλων καναλιού, μπορεί να καταλήξουμε στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι η ερευνητική δουλειά της μοντελοποίησης του καναλιού MIMO έχει σχεδόν τελειώσει. Αντιθέτως, υπάρχουν ακόμα *ανοιχτά θέματα*, κάτι που εξηγεί την ένταση της έρευνας προς αυτή την κατεύθυνση. Ένα από τα θέματα που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, είναι η προοπτική

των κεραιών στα συστήματα MIMO που εισάγει το φαινόμενο της κεραίας στα μοντέλα καναλιού MIMO, αλλά λίγα είναι αυτά που περιλαμβάνουν τις παραμέτρους των κεραιών (π.χ. [123], [124]) και συνήθως απλοποιούν τα στοιχεία της κεραίας επιτρέποντας την προσομοίωση μόνο γραμμικών κεραιών, ιδανικών διαγραμμμάτων ακτινοβολίας ή δε λαμβάνουν υπόψη το φαινόμενο της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων. Μια πιο πολύπλοκη μελέτη στην επίδραση της κεραίας και η εισαγωγή της στα μοντέλα καναλιού MIMO που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι ένα ανοιχτό θέμα.

Επιπλέον, ένα ακόμα ανοιχτό θέμα που θα μας απασχολήσει στην παρούσα διατριβή είναι η επίδραση της παρουσίας του σώματος στην απόδοση των συστημάτων MIMO και πώς μπορεί να συμπεριληφθεί στα μοντέλα καναλιού MIMO. Οι περισσότερες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης των ασύρματων συσκευών, θεωρούσαν ότι οι κινητές συσκευές ουσιαστικά χρησιμοποιούνταν για λειτουργία ομιλίας, π.χ. την περίπτωση όπου ο χρήστης κρατάει το κινητό δίπλα στο κεφάλι του για φωνητική χρήση. Η τρέχουσα εξέλιξη της τεχνολογίας, βέβαια, μας οδηγεί στη μετάβαση από συσκευές με επίκεντρο την ομιλία σε συσκευές όπου τα δεδομένα και οι εφαρμογές είναι εξίσου ή περισσότερο σημαντικά, όπως είναι οι έξυπνες κινητές πλατφόρμες ή τα έξυπνα κινητά. Είναι, λοιπόν, ένα ανοιχτό θέμα η μελέτη της επίδρασης του σώματος του χρήστη στη λειτουργία του κινητού τερματικού, όταν αυτό βρίσκεται σε λειτουργία επισκόπησης δεδομένων, όταν δηλαδή ο χρήστης κρατάει με το ένα ή και τα δύο χέρια το κινητό μπροστά του. Οι θέσεις των χεριών και των δαχτύλων του χρήστη μπορεί να διαφέρουν, σε σχέση με τις αντίστοιχες θέσεις που χρησιμοποιούσε σε λειτουργία ομιλίας. Η παρούσα διατριβή συνεισφέρει στη μελέτη της επίδρασης του σώματος, όταν το κινητό MIMO βρίσκεται σε θέση επισκόπησης δεδομένων και σε θέση τσέπης, ενώ συγκρίνει τα συστήματα αυτά με ένα σύστημα φορετών κεραιών MIMO.

2.10 Ορολογία διατριβής

Όπως επισημάναμε στην παράγραφο 2.1, ο όρος «συστήματα MIMO» αναφέρεται σε συστήματα που χρησιμοποιούν πολλαπλές κεραιές τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, ανεξάρτητα από το είδος της τεχνικής που χρησιμοποιείται (π.χ. διαμόρφωση λοβού, χωρικός διαφορισμός, χωρική πολυπλεξία). Με αυτή την έννοια, τα συστήματα MIMO αποτελούν ένα γενικό όρο, που χρησιμοποιείται για να αναφερθούμε στην τεχνολογία πολλαπλών κεραιών συνολικά (περισσότερο υπονοεί τη χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό και το δέκτη). Η ερμηνεία αυτή χρησιμοποιείται αρκετά στη βιβλιογραφία, για παράδειγμα στο [125]. Όταν αναφερόμαστε σε «συστήματα διαφορισμού», θα εννοούμε συστήματα που περιλαμβάνουν πολλαπλές κεραιές στο ένα άκρο του συστήματος. Στην περίπτωση του διαφορισμού δέκτη, θεωρούμε ότι τα λαμβανόμενα σήματα στις πολλαπλές κεραιές του δέκτη συνδυάζονται με βάση κάποιο σχήμα συνδυασμού σημάτων, με σκοπό να προκύψει ένα πιο ισχυρό συνδυασμένο σήμα (π.χ. SC, EGC, MRC). Στη συνέχεια, θα αναφερόμαστε σε αυτή την σημασία όταν ασχολούμαστε με «συστήματα MIMO» και «συστήματα διαφορισμού».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

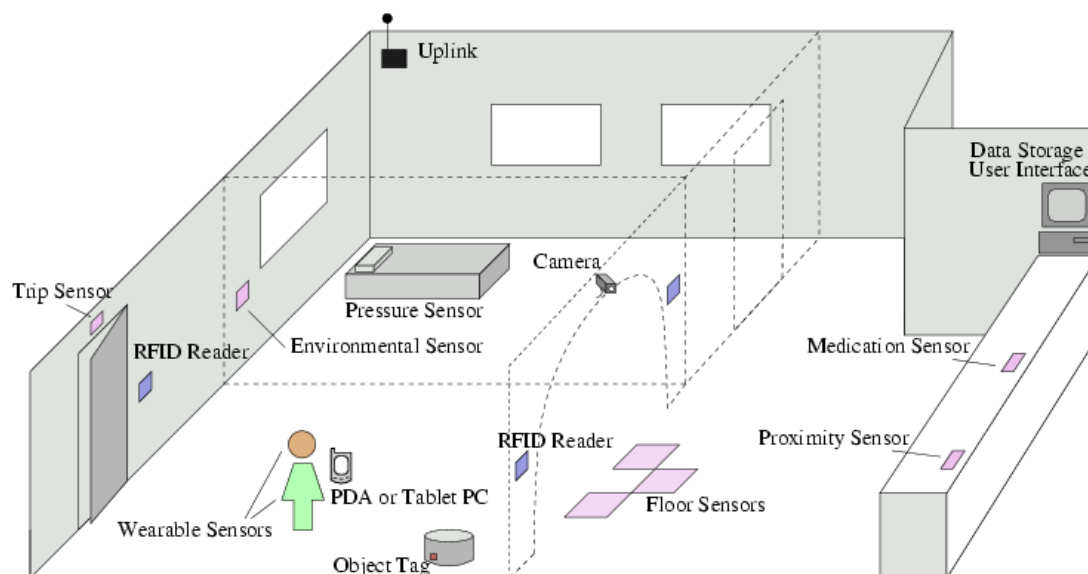
Ασύρματες επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα (body-centric communications)

Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιάσει το γενικό θεωρητικό υπόβαθρο των ασύρματων επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, που απαιτείται για να γίνει κατανοητή η υπόλοιπη διατριβή. Πιο συγκεκριμένα, επιχειρείται μια εκτενής βιβλιογραφική παρουσίαση του σχεδιασμού φορητών κεραιών, του χαρακτηρισμού και της μοντελοποίησης του ασύρματου καναλιού με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, αλλά και της αξιολόγησης της απόδοσης και της στατιστικής ανάλυσης του χωρικού διαφορισμού για επικοινωνίες πάνω στο σώμα. Επιπλέον, επισημαίνονται τα *ανοιχτά θέματα* στην περιοχή μελέτης που αποτέλεσαν και το κίνητρο για αυτήν τη διατριβή.

3.1 Εισαγωγή στις ασύρματες επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα

Τα τελευταία χρόνια, η εξέλιξη των ηλεκτρονικών συσκευών πληροφοριών και επικοινωνίας, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα, οι προσωπικοί ψηφιακοί βοηθοί (personal digital assistants - PDAs), οι υπολογιστές ταμπλέτες, οι ψηφιακές βιντεοκάμερες και οι φορητές παιχνιδομηχανές, είναι ταχύτατη. Η εξέλιξη αυτή προσφέρει μεγάλες ευκολίες στην καθημερινότητά μας. Στο κοντινό μέλλον, οι συσκευές αυτές θα μπορούν να τοποθετούνται πάνω στο σώμα μας, με τη μορφή φορητών συσκευών που θα ενσωματώνονται στο ρουχισμό του χρήστη και θα μπορούν να συνεισφέρουν στην βελτίωση της καθημερινότητάς μας (Σχ. 3.1). Οι φορητές αυτές συσκευές οδηγούν σε μια σχετικά καινούρια και ενδιαφέρουσα

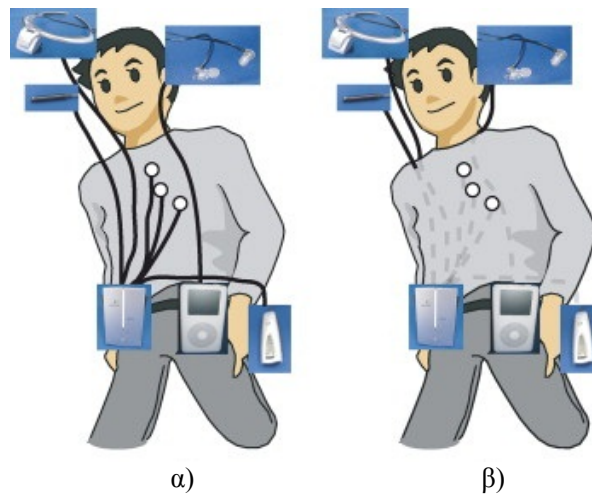
περιοχή, τις Επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα (Body-Centric Communications) [2].



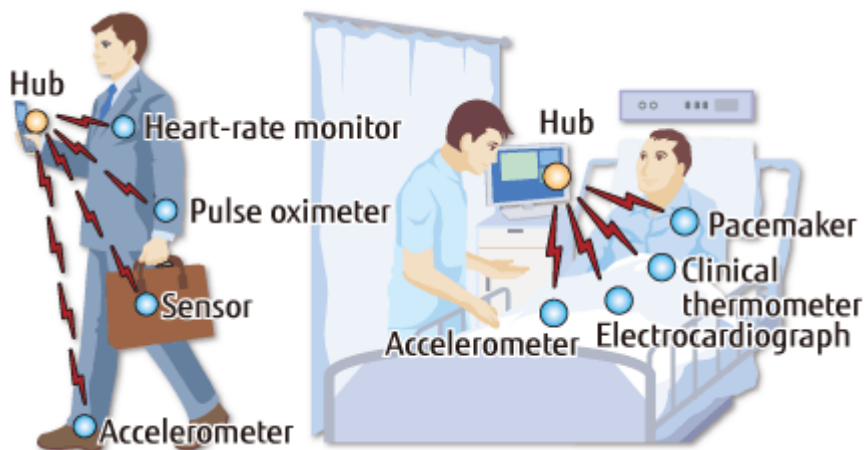
Σχήμα 3.1: Έξυπνος χώρος επιβηθούμενης διαβίωσης, εξοπλισμένος με αισθητήρες και συσκευές.

Σε αυτού του τύπου τις επικοινωνίες, ένας αριθμός κόμβων τοποθετείται πάνω στο σώμα ή σε κοντινή απόσταση από αυτό, και επικοινωνούν μεταξύ τους ή με τους κόμβους που είναι τοποθετημένοι μακριά από το σώμα όπως είναι οι σταθμοί βάσης, οι κεντρικές συσκευές αποθήκευσης δεδομένων, οι κεντρικές μονάδες επεξεργασίας κ.α.. Ένα πολύ σημαντικό θέμα όσον αφορά τις φορητές συσκευές είναι η διασύνδεσή τους. Η σύνδεσή τους μέσω καλωδίων δεν είναι μια εφικτή επιλογή, καθώς μπορεί να δημιουργήσει δυσκολίες και να εμποδίσει την κίνηση των μελών του σώματος. Υπάρχουν βέβαια κι άλλες επιλογές, όπως είναι η χρήση ειδικών υφασμάτων και κλωστών, αλλά καθώς αυτό υπονοεί τη δημιουργία εξειδικευμένων ενδυμάτων, η συνεχής χρήση των ειδικών αυτών ρούχων μπορεί να μη συμφωνεί με τις προσωπικές επιλογές του χρήστη. Έχουν προταθεί και κάποιες άλλες μέθοδοι, π.χ. ο μηχανισμός ρεύματος του σώματος (body current mechanism) και η επικοινωνία κοντινού πεδίου. Η μέθοδος ρεύματος του σώματος εκμεταλλεύεται τη δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια του σώματος για να το χρησιμοποιήσει ως κανάλι διάδοσης [126], [127], [128]. Η επικοινωνία κοντινού πεδίου χρησιμοποιεί την επαγωγή μαγνητικού πεδίου για επικοινωνία πολύ μικρής εμβέλειας [129], [130]. Και

Οι δύο αυτές τεχνικές έχουν τους περιορισμούς τους και δεν είναι κατάλληλες για εφαρμογές υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων όπως είναι η μετάδοση βίντεο και πολυμέσων. Η καλύτερη διαθέσιμη επιλογή σε αυτή την περίπτωση είναι η ασύρματη σύνδεση των συσκευών μέσω κεραιών (Σχ. 3.2).



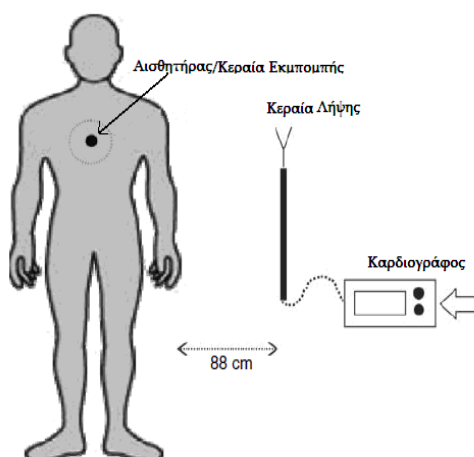
Σχήμα 3.2: Φορετός υπολογιστής με α) ενσύρματες και β) ασύρματες συνδέσεις.



Σχήμα 3.3: Δίκτυο ιατρικής υποστήριξης με φορετές συσκευές.

Στα Σχ. 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται δίκτυα ιατρικής υποστήριξης με φορετές συσκευές. Στο παράδειγμα του Σχ. 3.4, παρουσιάζεται ένα δίκτυο για την παρακολούθηση της λειτουργίας της καρδιάς, χρησιμοποιώντας ένα φορητό σύστημα με αισθητήρα. Ο αισθητήρας συνδέεται (ή έχει ενσωματωθεί) με μια κεραία εκπομπής και στέλνει τα δεδομένα σε μια κεραία λήψης που βρίσκεται σε απόσταση

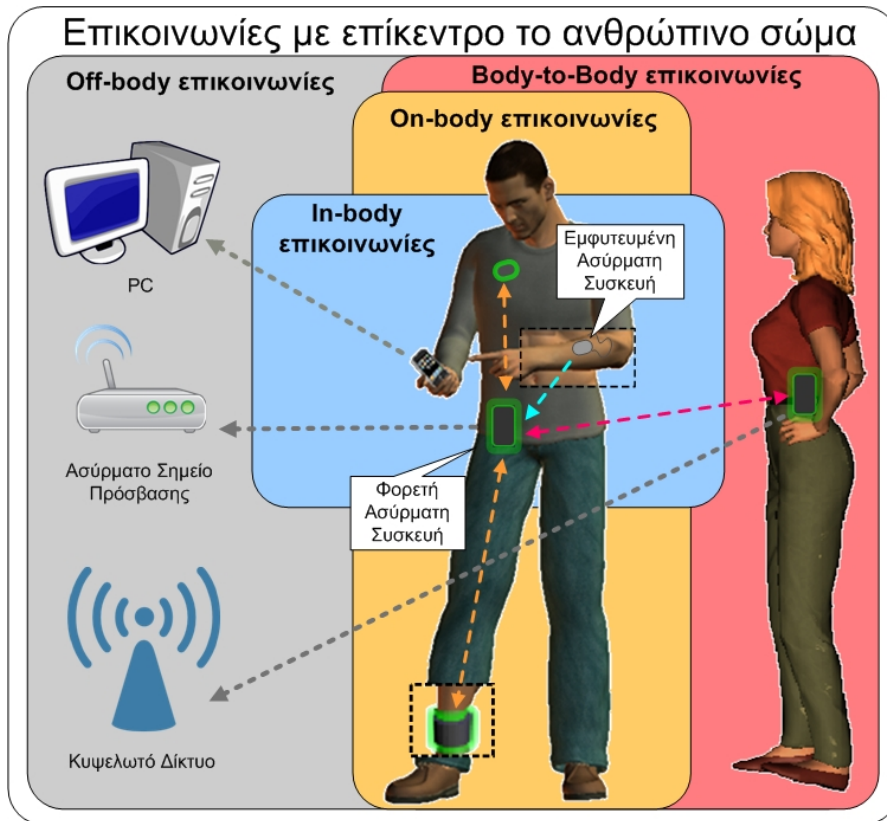
88 cm από το χρήστη. Αυτή με την σειρά της συνδέεται μέσω ενός καλωδίου 5 m με τον δέκτη του κατάλληλου οργάνου που συλλέγει τα δεδομένα των μετρήσεων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση του Σχ. 3.4, το όργανο μέτρησης είναι ένας καρδιογράφος. Η συχνότητα λειτουργίας για τη συγκεκριμένη εφαρμογή είναι 2.45 GHz.



Σχήμα 3.4: Μέτρηση της λειτουργίας των παλμών της καρδιάς με διάταξη δικτύου PAN.

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, χρησιμοποιούν το σώμα του χρήστη, ως το περιβάλλον που υποστηρίζει την επικοινωνία μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών πάνω στο σώμα [2]. Διάφορα πρότυπα έχουν αναπτυχθεί για τις ασύρματες συνδέσεις, όπως τα πρότυπα WiFi [131], WLAN [132], UWB [133], Bluetooth [7], BodyLAN [9] και Zigbee [8]. Το πρότυπο Bluetooth έχει γίνει πολύ δημοφιλές τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των εφαρμογών των κινητών τηλεφώνων, αλλά ένα μεγάλο μειονέκτημά του είναι η κατανάλωση πολύ μεγάλης ποσότητας ισχύος της μπαταρίας. Η μελέτη των ασύρματων BAN, περιλαμβάνει αρκετά θέματα μεταξύ των οποίων είναι ο σχεδιασμός και η απόδοση της κεραίας, ο χαρακτηρισμός του καναλιού, η επίδραση της παρουσίας και της κίνησης του ανθρώπινου σώματος και η ισχύς εκπομπής. Οι φορητές συσκευές απαιτείται να είναι μικρές και ελαφριές και να υποστηρίζουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Η κατανάλωση ισχύος αυτών των συσκευών πρέπει να είναι μικρή. Συνεπώς απαιτείται η χρήση υψηλών συχνοτήτων και αποδοτικών ζεύξεων [2]. Η γνώση των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του ανθρώπινου σώματος είναι ουσιαστική για τον αποδοτικό σχεδιασμό και την κατανόηση των καναλιών. Μια

λεπτομερής μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων και της μοντελοποίησης του ανθρώπινου σώματος δίνεται στο κεφάλαιο 2 του [2] και περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στην παράγραφο 3.2.



Σχήμα 3.5: Δίκτυο επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα.

Οι επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες, όπως φαίνεται παρακάτω (Σχ. 3.5). Η κατηγοριοποίηση αυτή, που δίνεται στο [134], βασίζεται στο είδος του καναλιού που χρησιμοποιείται για τη διάδοση των σημάτων:

Εκτός σώματος (off-body): Αυτή είναι η επικοινωνία μεταξύ συσκευών που βρίσκονται πάνω στο σώμα του χρήστη (on-body) με άλλες συσκευές που βρίσκονται εκτός του σώματος (off-body). Κάποια παραδείγματα αυτού του τύπου της επικοινωνίας είναι η επικοινωνία άνω και κάτω ζεύξης μεταξύ του κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης, οι φορητές ετικέτες RFID (Radio Frequency Identification) και οι φορητοί αισθητήρες από και προς το σύστημα λήψης δεδομένων

ή τον εξυπηρετητή, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.5 με τις γκρι διακεκομμένες γραμμές. Οι κεραιές πρέπει να έχουν διαγράμματα ακτινοβολίας που κατευθύνονται εκτός του σώματος για να παρέχουν σφαιρική κάλυψη. Επίσης πρέπει να περιλαμβάνουν επίπεδο γείωσης για να μην επηρεάζεται η απόδοση της κεραιάς από το ανθρώπινο σώμα [2]. Η ζεύξη off-body έχει μελετηθεί αρκετά για κινητά κυψελωτά συστήματα και ιατρικά δίκτυα αισθητήρων. Διάφορα είδη φορητών κεραιών έχουν σχεδιαστεί και προταθεί για αυτό το είδος επικοινωνίας. Μια ειδική περίπτωση αυτής της επικοινωνίας είναι η επικοινωνία από σώμα σε σώμα (body-to-body) που διαφέρει από την κλασσική επικοινωνία off-body, καθώς τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης μπορεί να βρίσκονται σε κίνηση. Παράδειγμα μπορεί να αποτελεί η επικοινωνία μέσω φορητών συσκευών μεταξύ πυροσβεστών ή μελών διασωστικών ομάδων σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης [135], αλλά και όπως φαίνεται στο Σχ. 3.6, η μετάδοση πολυμέσων μεταξύ των θεατών που δημιουργούν ένα δίκτυο body-to-body σε μια συναυλία εξωτερικού χώρου [136].



Σχήμα 3.6: Δίκτυο body-to-body [136].

Πάνω στο σώμα (on-body): Αυτή είναι η επικοινωνία μεταξύ δύο ή περισσότερων συσκευών που είναι τοποθετημένες πάνω στο ίδιο ανθρώπινο σώμα. Κάποια παραδείγματα αποτελούν ο φορητός υπολογιστής που φαίνεται στο Σχ. 3.2β, αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι σε διάφορες θέσεις του σώματος (που

επικοινωνούν μεταξύ τους και με μια κεντρική συσκευή που είναι τοποθετημένη πάνω στο σώμα), και η επικοινωνία μεταξύ ενός κινητού τηλεφώνου τοποθετημένου στην τσέπη του χρήστη και του ακουστικού Bluetooth ή ενός ρολογιού Bluetooth (Σχ. 3.7) [137].



Σχήμα 3.7: Sony Ericsson ρολόι με Bluetooth.

Το ρολόι επικοινωνεί με το κινητό τηλέφωνο για ειδοποίηση εισερχομένων μηνυμάτων και κλήσεων, εμφανίζει τον αριθμό που καλεί και παρέχει και τη δυνατότητα για αποδοχή/απόρριψη της κλήσης. Επιπλέον δίνει τη δυνατότητα εμφάνισης ενημερώσεων για τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης (Twitter, Facebook) και ελέγχει και τη μουσική του κινητού. Μία ακόμα ενδιαφέρουσα συσκευή είναι το παπούτσι της Nike με ενσωματωμένο ρυθμιστή έντασης για τη συσκευή ipod της Apple [138], όπως φαίνεται στο Σχ. 3.8, που ρυθμίζει την ένταση του ipod σύμφωνα με την ταχύτητα που τρέχει ο χρήστης.



Σχήμα 3.8: Το παπούτσι Nike συνδέεται ασύρματα με το ipod [138].

Στο Σχ. 3.9 παρουσιάζονται τα ασύρματα ακουστικά Bluetooth BHP-003S/B της Gembird τα οποία είναι συμβατά με συσκευές Bluetooth (κινητά, smartphones, iPad, laptop, PC κ.α.) [139]. Διαθέτουν τεχνολογία DSP για υψηλής ποιότητας ήχο και ασύρματα εμβέλεια έως 10 μέτρα, ενώ περιλαμβάνουν και ενσωματωμένο μικρόφωνο.



Σχήμα 3.9: Ασύρματα ακουστικά Bluetooth με ενσωματωμένο μικρόφωνο [139].

Τέλος, στο Σχ. 3.10 παρουσιάζεται μια ακόμα εφαρμογή συστημάτων on-body που είναι συμβατή με τις συσκευές iPhone και iPad. Είναι η ψηφιακή ζυγαριά της iHealth, που λειτουργεί μαζί με την εφαρμογή iHealth Digital Scale, η οποία διατίθεται δωρεάν [140]. Καταγράφει τις μετρήσεις του βάρους στο κινητό τηλέφωνο του χρήστη μέσω ασύρματης σύνδεσης Bluetooth. Οι κεραίες για τις εφαρμογές on-body

πρέπει ιδανικά να έχουν διαγράμματα ακτινοβολίας παράλληλα προς την επιφάνεια του σώματος. Γενικότερα βέβαια αυτό εξαρτάται από το είδος της κάθε εφαρμογής και τις θέσεις των κεραίων πάνω στο σώμα. Και σε αυτή την περίπτωση πάντως είναι σημαντικό τόσο για την ασφάλεια του χρήστη όσο και για την αξιόπιστη λειτουργία της κεραίας, να υπάρχει επίπεδο γείωσης.



Σχήμα 3.10: Ψηφιακή ζυγαριά της iHealth [140].

Μέσα από το σώμα (in-body): Αναφέρεται στην επικοινωνία μεταξύ δύο ή περισσοτέρων συσκευών μέσα από το ανθρώπινο σώμα. Ένα σημαντικό κομμάτι του καναλιού είναι μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Η κυριότερη περιοχή εφαρμογών για αυτού του τύπου την επικοινωνία είναι η διαγνωστική ιατρική και παρακολούθηση ασθενών, όπου εμφυτεύσιμες ιατρικές συσκευές, που επικοινωνούν με τον έξω κόσμο, τοποθετούνται μέσα στο ανθρώπινο σώμα. Αυτές μπορεί να είναι από βηματοδότες καρδιάς, εμφυτεύματα κοχλίας, αισθητήρες γλαυκώματος μέχρι και συσκευές απελευθέρωσης φαρμάκων. Η εμφάνιση τεχνολογιών, όπως είναι η υπο-μικροτεχνολογία, η νανοτεχνολογία, και τα Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα (Micro-Electromechanical Systems - MEMS), υπόσχονται ένα τεράστιο αντίκτυπο στην ανάπτυξη εμφυτεύσιμων συσκευών που θα βελτιώνουν το επίπεδο και την ποιότητα των ιατρικών δικτύων αισθητήρων και τον τρόπο ζωής των ασθενών [2].

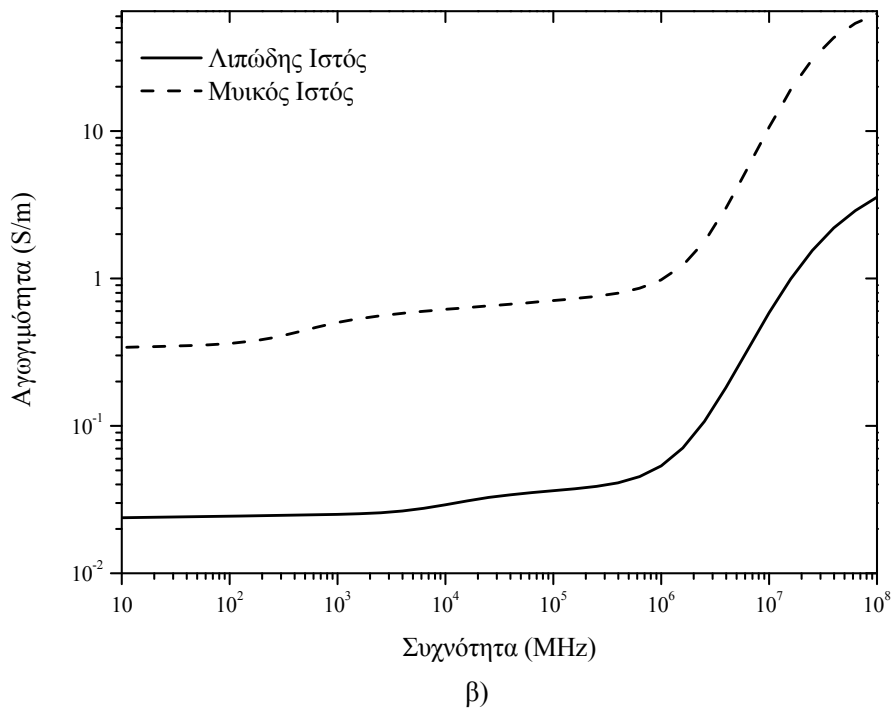
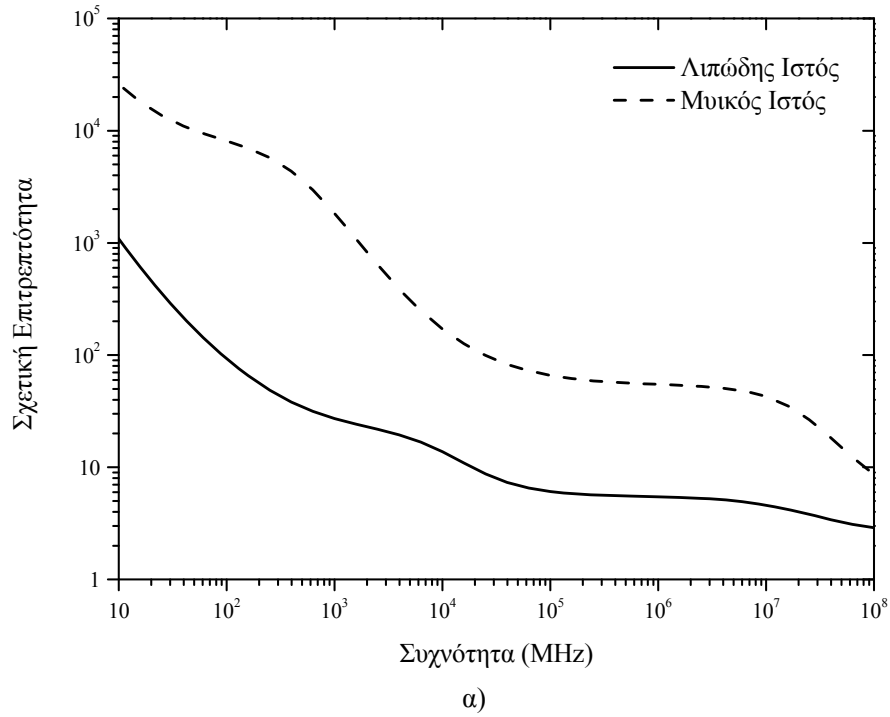
Η έννοια του δικτύου BAN χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στη διαγνωστική ιατρική, στην οποία διάφοροι αισθητήρες, όπως αισθητήρες θερμοκρασίας, εγκεφαλογραφήματος (ECG), παρακολούθησης της πίεσης του αίματος, μέτρησης του ζάχαρου στο αίμα κ.α. τοποθετούνται μέσα στο σώμα του ασθενή και

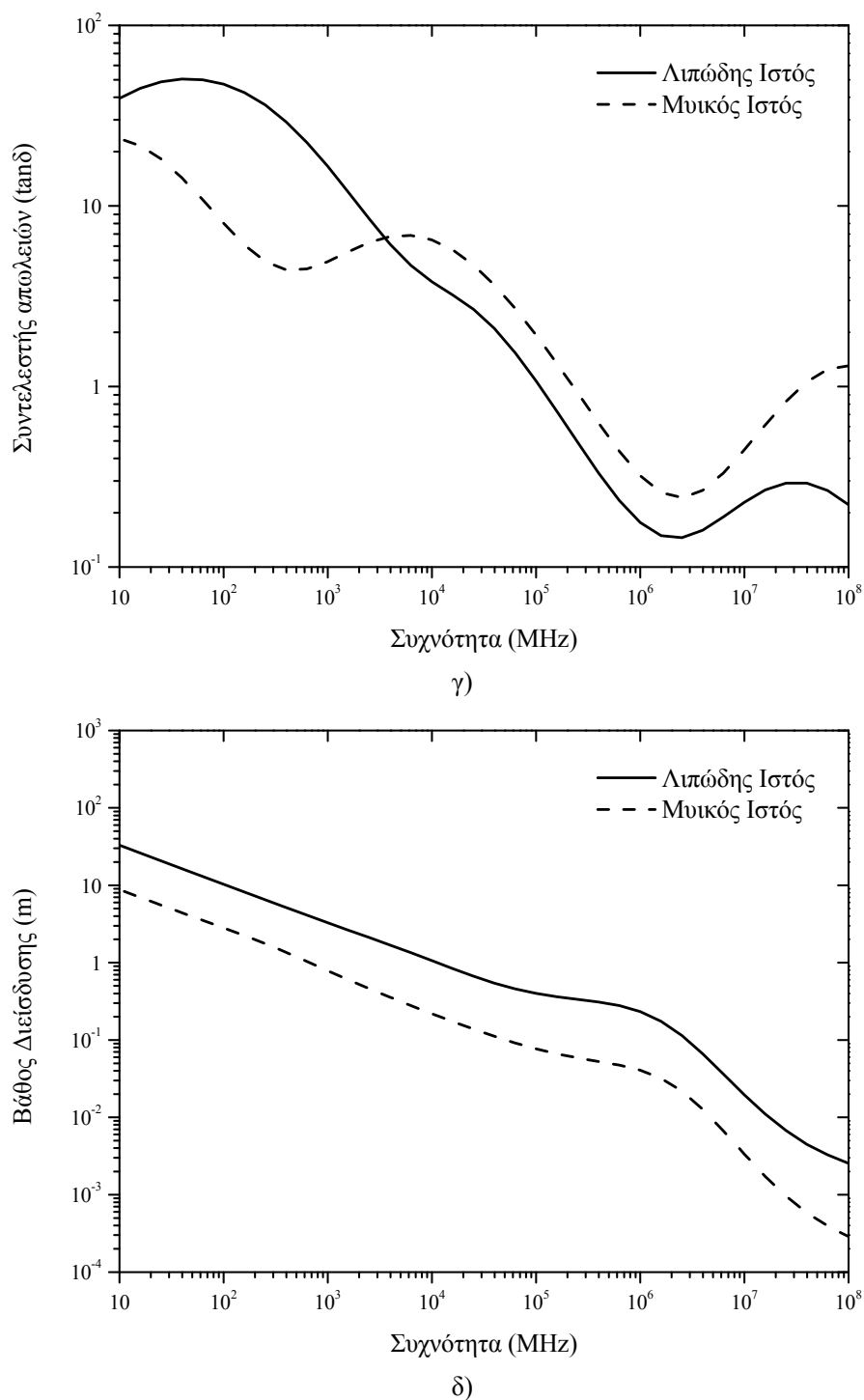
αλληλεπιδρούν με μια μονάδα βάσης πάνω ή εκτός του σώματος. Ο όρος BAN χρησιμοποιείται στις μέρες μας σε ένα ευρύτερο φάσμα για να συμπεριλάβει όλους τους τύπους των επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα. Παρόμοια, ο όρος επικοινωνία on-body έχει χρησιμοποιηθεί από κάποιους ερευνητές με την έννοια της επικοινωνίας που περιλαμβάνει κεραιές τοποθετημένες στο σώμα του χρήστη είτε αναφέρονται σε επικοινωνία on-body είτε off-body. Στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιούμε τον ορισμό που αναφέραμε πιο πάνω, σύμφωνα με τον οποίο επικοινωνία on-body σημαίνει επικοινωνία μεταξύ συσκευών που βρίσκονται πάνω στο σώμα μόνο και όχι εκτός του σώματος. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες για την ανάπτυξη προτύπων για BAN και μια ομάδα εργασίας του οργανισμού IEEE, η IEEE 802.15.6 (IEEE 802.15.BAN), έχει συσταθεί για το σκοπό αυτό από το Νοέμβριο του 2007. Αυτή η ομάδα εργασίας είναι η έκτη ομάδα του IEEE 802.15 και ο στόχος της είναι να αντιμετωπίσει τις βασικές προκλήσεις και τους περιορισμούς που σχετίζονται με τα δίκτυα WBAN, όπως είναι η κατανάλωση ισχύος και η ποιότητα υπηρεσιών (QoS). Το πρότυπο IEEE 802.15 αφορά τις Ασύρματες Προσωπικές Επικοινωνίες (Wireless Personal Area Networks - WPAN) [141] και έχει μέχρι στιγμής 7 ομάδες εργασίας. Η ομάδα εργασίας 802.15.6 ολοκλήρωσε τη διαδικασία ανάπτυξης του προτύπου για τα Ασύρματα Δίκτυα Σώματος (WBAN) το Φεβρουάριο του 2012. Το IEEE 802.15.1 [7], που δημοσιεύτηκε πρώτη φορά τον Ιούνιο του 2002, είναι ένα πρότυπο για WPAN που βασίζεται στο Bluetooth, ενώ το IEEE 802.15.2 παρέχει προτάσεις για την συνύπαρξη των Ασύρματων Προσωπικών Δικτύων (WPAN) και των Ασύρματων Τοπικών Δικτύων (Wireless Local Area Networks - WLAN). Περισσότερες λεπτομέρειες για τις υπόλοιπες ομάδες του IEEE 802.15 δίνονται στην ιστοσελίδα του [141].

3.2 Μοντελοποίηση του ανθρώπινου σώματος

Για να κατανοήσουμε πλήρως το μηχανισμό διάδοσης μέσα και πάνω στο ανθρώπινο σώμα, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τις διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών του ανθρώπινου σώματος και το πώς αυτές εξαρτώνται από τη συχνότητα. Το βάθος διείσδυσης των χαμηλότερων συχνοτήτων είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με τις υψηλότερες συχνότητες. Το βάθος διείσδυσης, ο συντελεστής απωλειών, η σχετική

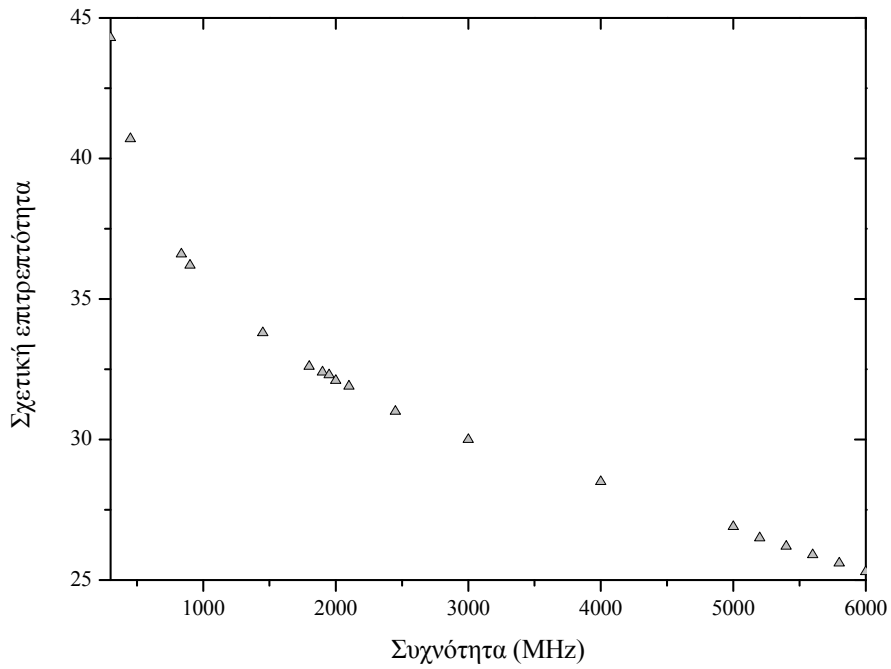
επιτρεπτότητα και η αγωγιμότητα για το μυϊκό και το λιπώδη ιστό φαίνονται στο Σχ. 3.11, για ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων.



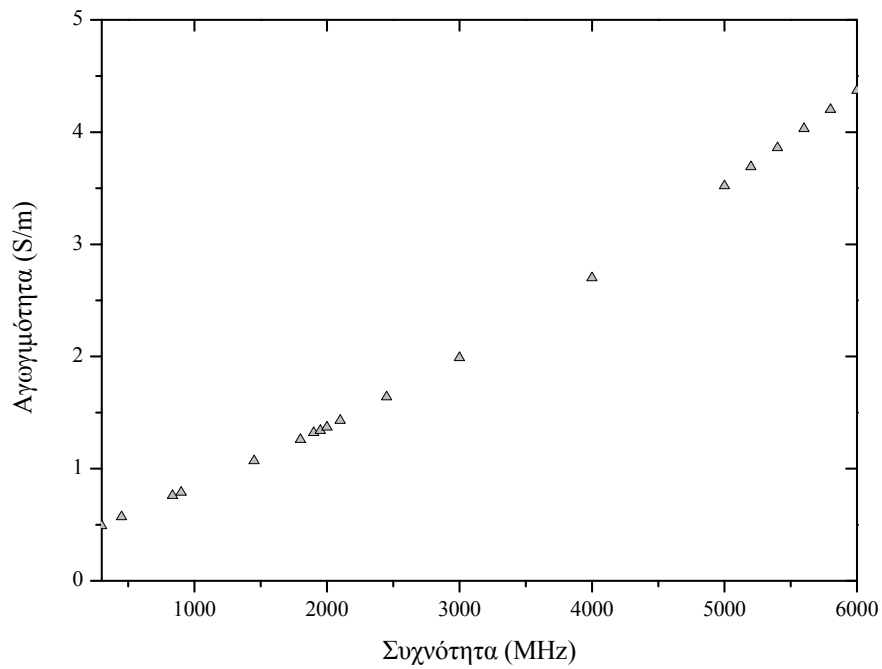


Σχήμα 3.11: Διακύμανση των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων του μυϊκού και του λιπώδους ιστού συναρτήσει της συχνότητας. α) Σχετική επιτρεπτότητα, β) αγωγιμότητα, γ) συντελεστής απωλειών και δ) βάθος διείσδυσης.

Στα Σχ. 3.12 και 3.13 απεικονίζονται τα διαγράμματα των διηλεκτρικών ιδιοτήτων του ανθρώπινου χεριού [142] και του ανθρώπινου σώματος αντίστοιχα [143], [144], συναρτήσει της συχνότητας.

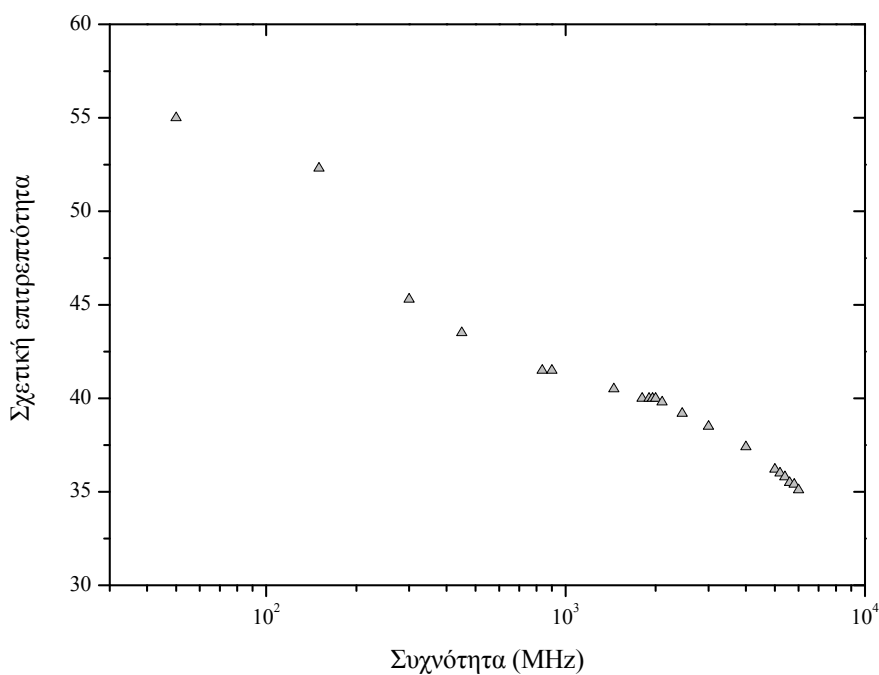


α)

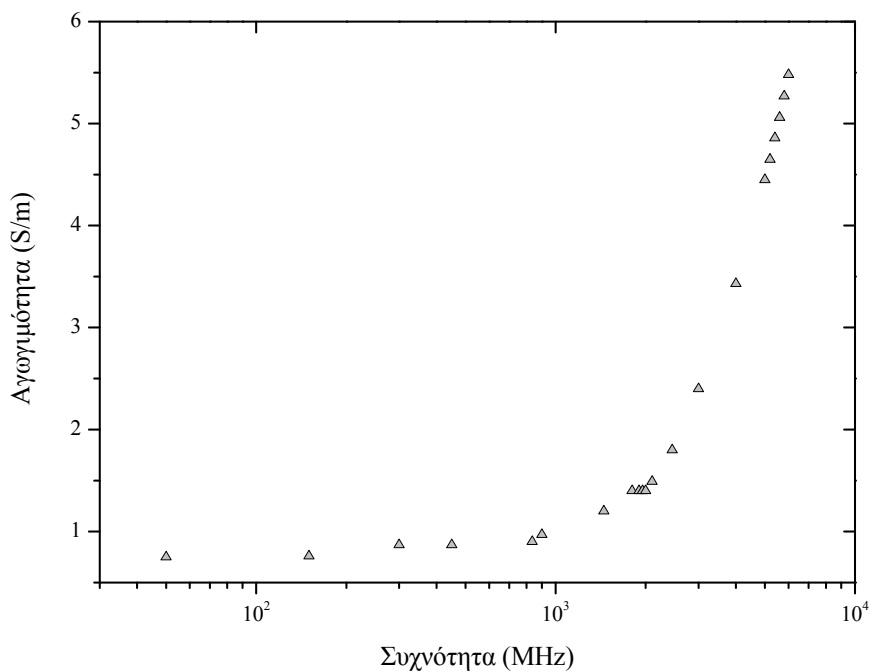


β)

Σχήμα 3.12: Διηλεκτρικές ιδιότητες του ανθρώπινου χεριού, α) μέση σχετική επιτρεπτότητα και β) μέση αγωγιμότητα.



α)



β)

Σχήμα 3.13: Διηλεκτρικές ιδιότητες του ανθρώπινου σώματος, α) μέση σχετική επιτρεπτότητα και β) μέση αγωγιμότητα.

Οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των ιστών του ανθρώπινου σώματος στη συχνότητα των 2.45 GHz καταγράφονται στον πίνακα 3.1 [145]. Ο πίνακας 3.1 δείχνει ότι κάθε ιστός του σώματος έχει διαφορετικές ιδιότητες στη συγκεκριμένη

συχνότητα. Το βάθος διείσδυσης για το μυϊκό και τον οστίτη ιστό δεν είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με τις χαμηλότερες συχνότητες και, συνεπώς, η διάδοση θα περιορίζεται στην επιφάνεια του σώματος σε αυτή και σε υψηλότερες συχνότητες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1: ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΙΣΤΩΝ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ ΣΤΑ 2.45 GHz

Όνομα	Αγωγιμότητα (S/m)	Σχετική επιτρεπτότητα	Συντελεστής απωλειών	Βάθος διείσδυσης (m)
Αίμα	2.5448	58.264	0.32046	0.016122
Αορτή	1.4353	42.531	0.2476	0.024303
Γλώσσα	1.8026	52.628	0.25131	0.02153
Δέρμα (στεγνό)	1.464	38.007	0.28262	0.022573
Δέρμα (βρεμένο)	1.5919	42.853	0.27255	0.022029
Εγκεφαλονωτιαίο υγρό	3.4578	66.243	0.38298	0.012715
Καρδιά	2.2561	54.814	0.30199	0.017614
Κερατοειδής	2.2954	51.615	0.32629	0.01683
Κύστη	0.68532	18.001	0.27933	0.033179
Λεπτό έντερο	3.1731	54.425	0.42777	0.01261
Λευκή ουσία εγκεφάλου	1.215	36.167	0.24647	0.026473
Λίπος	0.10452	5.280	0.14524	0.11702
Μυελός των οστών	0.095037	5.297	0.13164	0.12884
Μυς	1.7388	52.729	0.24194	0.02233
Νεύρα	1.0886	30.145	0.26494	0.027006
Νεφρά	2.4295	52.742	0.33797	0.016088
Οισοφάγος	2.2105	62.158	0.26092	0.019092
Οστεΐνη	0.39431	11.381	0.2542	0.045779
Πνεύμονας	0.80416	20.477	0.28813	0.030175
Σπογγώδες οστό	0.80517	18.548	0.31849	0.028745
Στομάχι	2.2105	62.158	0.26092	0.019092
Συκώτι	1.6864	43.035	0.28751	0.020859
Τένοντας	1.6847	43.121	0.28665	0.0209
Φαία ουσία εγκεφάλου	1.8077	48.911	0.27117	0.020723
Χόνδρος	1.7559	38.770	0.33228	0.019077

Γνωρίζοντας τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των ιστών του ανθρώπινου σώματος, είναι δυνατό να μοντελοποιήσουμε το ανθρώπινο σώμα, είτε με φυσικό τρόπο, χρησιμοποιώντας στερεά ή υγρά υλικά που έχουν παρόμοιες ιδιότητες με τους ιστούς, είτε αριθμητικά, χρησιμοποιώντας αριθμητικούς ηλεκτρομαγνητικούς υπολογισμούς [2]. Αυτό το φυσικό ή αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει το ανθρώπινο σώμα, ονομάζεται ανθρώπινο ομοίωμα (phantom). Έτσι, το ομοίωμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει το ανθρώπινο σώμα σε μετρήσεις και δοκιμές φορετών κεραιών. Τα ομοιώματα αυτά παρέχουν ένα ελεγχόμενο και

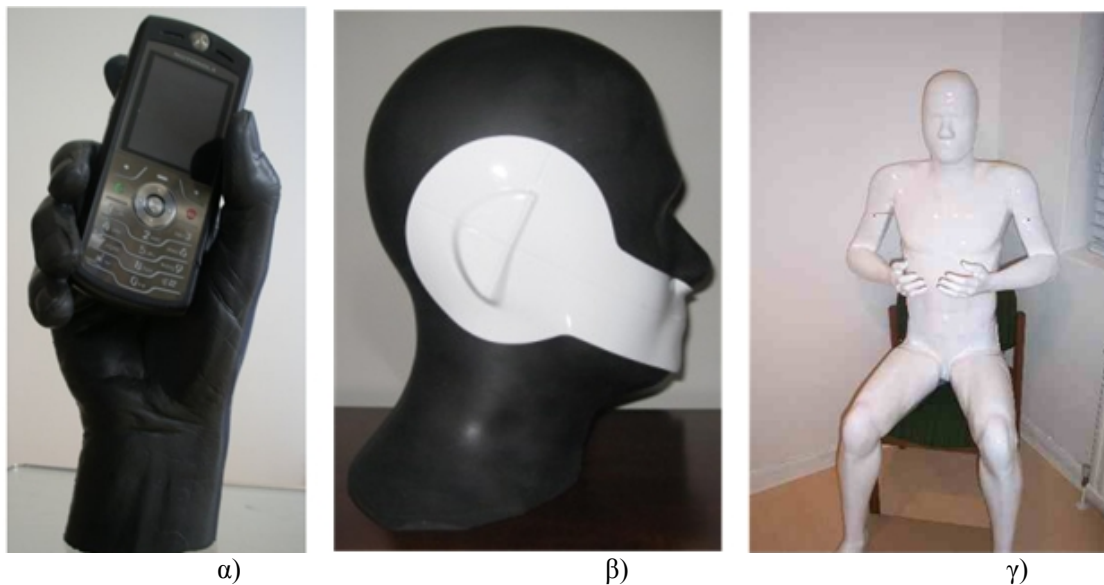
σταθερό περιβάλλον διάδοσης, αλλά είναι μόνο μια προσέγγιση του ανθρώπινου σώματος. Η ακρίβεια αυτής της προσέγγισης εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του μοντέλου. Σύνθετα και μη ομογενή ομοιώματα δίνουν καλύτερη προσέγγιση, αλλά είναι πολύ απαιτητικά υπολογιστικά στην περίπτωση αριθμητικών προσομοιώσεων και πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν στην περίπτωση των φυσικών μοντέλων.

3.2.1 Φυσικά ομοιώματα

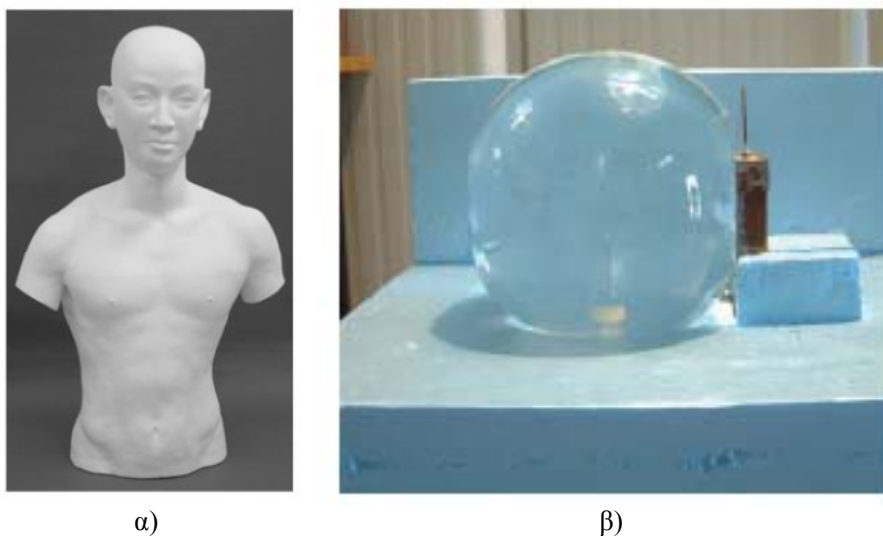
Τα φυσικά ομοιώματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε στερεά/συμπαγή, ημιστερεά/ημι-συμπαγή (gel) και αποτελούμενα από υγρό. Τα ομογενή συμπαγή ομοιώματα, όπως αυτά που απεικονίζονται στο Σχ. 3.14 [146], είναι φτιαγμένα από διηλεκτρικό υλικό που έχει παρόμοιες διηλεκτρικές ιδιότητες με κάποιο ανθρώπινο ιστό, όπως είναι τα οστά, και είναι χρήσιμα στην προσομοίωση της διάδοσης μέσα και γύρω από το ανθρώπινο σώμα [2]. Είναι εφικτό να κατασκευάσουμε μη ομογενή ομοιώματα με αρκετά διαφορετικά στρώματα που θα αντιπροσωπεύουν τους διαφορετικούς ιστούς. Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ομοιωμάτων περιλαμβάνουν τη μίξη κεραμικής σκόνης και σκόνης γραφίτη [147], λάστιχο σιλικόνης με ανθρακονήματα [148], και αγώγιμο πλαστικό με αιθάλη (carbon black) [2]. Τα συμπαγή ομοιώματα έχουν το πλεονέκτημα ότι διατηρούν το σχήμα τους για μεγάλο χρονικό διάστημα και έχουν σταθερά χαρακτηριστικά. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να κατασκευάσουμε από ομοίωμα ενός απλού οργάνου μέχρι ολόκληρου του σώματος, ανάλογα με την εφαρμογή.

Τα ημι-συμπαγή ή ομοιώματα από τζελ μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν στο σχήμα αλλά δεν είναι τόσο ανθεκτικά όπως τα συμπαγή ομοιώματα καθώς έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό, το οποίο με τον καιρό χάνεται (Σχ. 3.15α). Είναι χρήσιμα για την προσομοίωση οργάνων με μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό όπως οι μύες, ο εγκέφαλος κ.τ.λ. [2]. Μία από τις αρχικές μεθόδους προσομοίωσης ενός ιστού του ανθρώπινου σώματος ήταν η χρήση κάποιου υγρού, που γέμιζε ένα δοχείο και είχε τις ίδιες διηλεκτρικές ιδιότητες όπως ο ιστός [2]. Συνήθως, το υγρό γεμίζει ένα δοχείο από υαλονήματα (fibreglass) που έχει χαμηλή επιτρεπτότητα και αγωγιμότητα. Το δοχείο μπορεί να πάρει σχήμα που αναπαριστά κάποιο όργανο του ανθρώπινου σώματος, π.χ. χέρι, κεφάλι κ.α., ή και όλο το σώμα (Σχ. 3.15β). Για πιο απλές εφαρμογές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα βασικό σχήμα, όπως ένα ορθογώνιο κουτί.

Το δοχείο πρέπει να έχει μια τρύπα, για να εισάγουμε το εργαλείο της μέτρησης για τη μέτρηση της κατανομής του πεδίου μέσα στον ιστό (που αναπαριστάται από το ομοίωμα) [2]. Αυτού του τύπου τα ομοιώματα είναι ομογενή και συνεπώς η αναπαράσταση του ανθρώπινου σώματος δεν είναι τόσο ακριβής όσο των προηγούμενων, αλλά είναι ένας εύκολος και βολικός τρόπος να προσομοιώσουμε το σώμα. Το εύρος των συχνοτήτων για το οποίο το υγρό έχει τις επιθυμητές διηλεκτρικές ιδιότητες μπορεί να είναι περιορισμένο [2].



Σχήμα 3.14 Συμπαγή ομοιώματα α) χεριού, β) κεφαλιού και γ) ολόκληρου σώματος σε καθιστική θέση.



Σχήμα 3.15 α) Ημι-συμπαγές ομοίωμα ανθρώπινου κορμού με σύσταση βασισμένη σε άγαρ και β) ομοίωμα ανθρώπινου κεφαλιού από υαλονήματα γεμάτο με υγρό τοποθετημένο σε διάταξη πειραματικών μετρήσεων στις εγκαταστάσεις του ΙΙΤ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

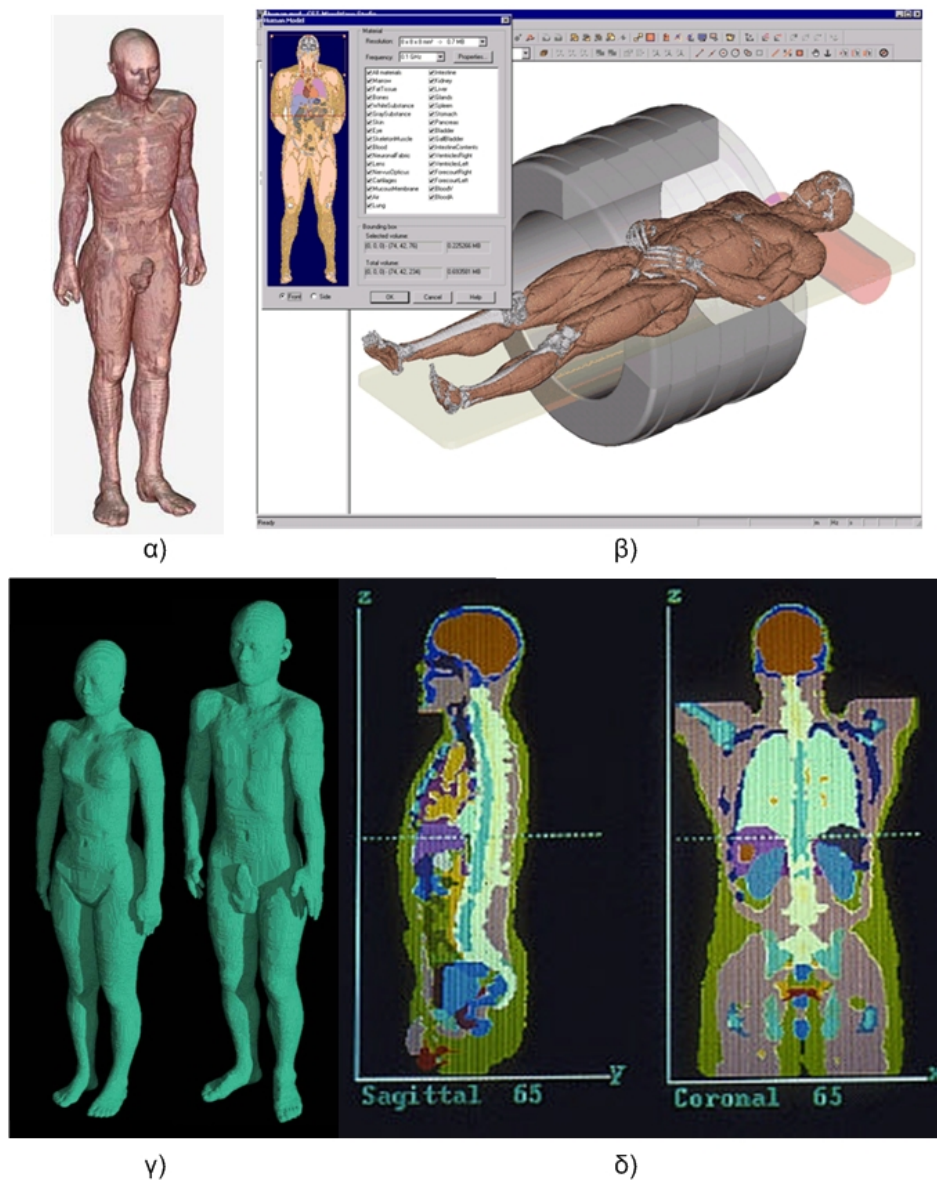
Τέλος, όπως αναφέραμε και προηγουμένως τα απλά ομοιώματα υστερούν σε ακρίβεια, ενώ τα πιο πολύπλοκα είναι δύσκολο να κατασκευαστούν. Είναι λοιπόν μια συνήθης πρακτική σε πολλές σειρές μετρήσεων για κανάλια BAN, οι φορετές κεραίες και τα φορετά συστήματα να ενσωματώνονται στο ρουχισμό πραγματικού χρήστη για την πραγματοποίηση των μετρήσεων [18], [149], [150].

3.2.2 Αριθμητικά ομοιώματα

Μερικές φορές, αντί για μετρήσεις πραγματικού χρόνου με ανθρώπους ή φυσικά ομοιώματα, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούμε υπολογιστικές προσομοιώσεις. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται ένα αριθμητικό μοντέλο που θα μοντελοποιεί το ανθρώπινο σώμα. Τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε θεωρητικά μοντέλα ή μοντέλα ογκοστοιχείων (voxel) [2]. Τα θεωρητικά μοντέλα είναι πολύ απλά στο σχήμα ομογενή αριθμητικά μοντέλα, όπως σφαίρες ή κύλινδροι, που μπορούν να προσεγγίσουν το ανθρώπινο σώμα μέχρι μια λογική ακρίβεια. Για πιο ακριβή μοντελοποίηση, απαιτούνται πιο πολύπλοκα και ρεαλιστικά αριθμητικά μοντέλα. Τα μοντέλα αυτά αποτελούνται από αρκετά ογκοστοιχεία και ονομάζονται μοντέλα ογκοστοιχείων (voxel models) [2]. Το Σχ. 3.16 απεικονίζει κάποια παραδείγματα από μοντέλα ογκοστοιχείων π.χ. το μοντέλο NORMAN (NORmalized MAN) [151], το HUGO [152], το αρσενικό και θηλυκό Ιαπωνικό μοντέλο της Nagaoka [153] και το μοντέλο Voxel man του Zubal [154].

Τα μοντέλα ογκοστοιχείων είναι πολύ λεπτομερή αλλά δεν είναι ευέλικτα, καθώς έχουν εξαχθεί για συγκεκριμένη ανθρώπινη γεωμετρία και δε μας δίνουν τη δυνατότητα να μελετήσουμε διαφορετικές στάσεις του σώματος. Για το λόγο αυτό, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται κι άλλες μέθοδοι για την προσομοίωση του ανθρώπινου σώματος, που είναι πιο ευέλικτοι και πολύ χρήσιμοι για τη μελέτη συστημάτων BAN. Πιο συγκεκριμένα, το ανθρώπινο σώμα μπορεί αρχικά να μοντελοποιηθεί με κάποιο σχεδιαστικό πρόγραμμα (π.χ. Autodesk Inventor [155]). Κάποια από τα σχεδιαστικά αυτά προγράμματα παρέχουν έτοιμες φιγούρες ανθρώπων, σε διάφορες στάσεις όπως είναι το Smith Micro Poser [156]. Στη συνέχεια, το ομοίωμα αυτό μπορεί να προσομοιωθεί ηλεκτρομαγνητικά με κάποιο από τα προγράμματα ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης. Στην εργασία [157], που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διαδακτορικής διατριβής, το μοντέλο

ενός άντρα, που σχεδιάστηκε στο Autodesk Inventor, προσομοιώθηκε με τη βοήθεια του CST Microwave Studio, με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του ανθρώπινου σώματος στη χωρητικότητα ενός συστήματος φορετών κεραιών MIMO. Επιπλέον, στο [158] παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση ενός ανθρώπου που βρίσκεται σε κίνηση. Για να επιτευχθεί αυτό, με τη βοήθεια του Smith Micro Poser εξάγονται στιγμιότυπα της κίνησης διαφόρων μοντέλων ανθρώπου και, στη συνέχεια, εισάγονται στο πρόγραμμα ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης XFDTD από την REMCOM, όπου και προσομοιώνονται.



Σχήμα 3.16 Παραδείγματα μοντέλων ογκοστοιχείων α) NORMAN, β) HUGO, γ) Nagaoka άντρας και γυναίκα και δ) Zubal Voxel man.

3.3 Φορετές κεραίες για τα κανάλια πάνω στο σώμα

Τα τελευταία χρόνια, οι φορετές κεραίες γνωρίζουν μεγάλη εξάπλωση και, κατά συνέπεια, συγκεντρώνουν πολύ μεγάλο ενδιαφέρον από την ερευνητική κοινότητα. Ο σχεδιασμός των φορετών κεραιών αποτελεί θέμα εκτεταμένης έρευνας καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πλήθος ιατρικών, στρατιωτικών αλλά και πιο εξειδικευμένων εφαρμογών. Παραδείγματα αυτών των εφαρμογών αποτελούν τα συστήματα επικοινωνιών πάνω στο σώμα για πυροσβέστες ή μέλη διασωστικών ομάδων [159], αλλά και τα συστήματα αισθητήρων για παρακολούθηση ασθενών και αθλητών (Σχ. 3.17). Η ομάδα εργασίας IEEE 802.15.6 (BAN) [160], όπως έχουμε ήδη προαναφέρει, το Φεβρουάριο του 2012 ολοκλήρωσε τη διαδικασία ανάπτυξης ενός προτύπου επικοινωνιών βελτιστοποιημένου για λειτουργία πάνω, μέσα και εκτός σώματος [134]. Παράλληλα, υπάρχει μια ώθηση στην έρευνα σε τεχνολογίες όπως Bluetooth, RFID, UWB, ψηφιακή τηλεόραση κ.α., όπου μπορούν να ενσωματωθούν οι φορετές κεραίες, ως τμήμα του συστήματος. Οι εξελίξεις αυτές, έχουν ως αποτέλεσμα το αυξημένο ενδιαφέρον για τη μελέτη και το σχεδιασμό φορετών κεραιών.

Με τη χρήση των φορετών συστημάτων και κεραιών να αυξάνει και σε κάποιες περιπτώσεις να αντικαθιστά τη χρήση των πιο οικείων συσκευών χειρός, υπάρχουν πολλά θέματα που πρέπει να μελετηθούν. Μέσα σε αυτά τα πλαίσια, είναι πολύ σημαντικό να αξιολογήσουμε την απόδοση των φορετών κεραιών και τα πλεονεκτήματα που μπορούν να μας προσφέρουν, ειδικότερα στην περίπτωση των MIMO συστημάτων. Κάποια από τα θέματα που πρέπει να μελετηθούν είναι το πώς αλληλεπιδρά το σώμα με τις φορετές κεραίες, πώς επηρεάζονται η σύζευξη των κεραιών, η συσχέτιση σημάτων και η απόδοση ακτινοβολίας από την παρουσία του ανθρώπινου σώματος, και πώς επιδρούν όλοι αυτοί οι παράγοντες στη χωρητικότητα του συστήματος.



Σχήμα 3.17: Εφαρμογές φορετών συσκευών

3.3.1 Φορετές κεραιές: πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα

Η τεχνολογία των φορετών κεραιών εισάγει νέες προοπτικές στο σχεδιασμό κεραιών. Ο αριθμός, η θέση, το μέγεθος των κεραιών και η απόσταση μεταξύ τους δεν επηρεάζονται πια από τον περιορισμένο χώρο που διαθέτουν τα τερματικά κι έτσι εκμεταλλευόμαστε όλη την επιφάνεια του ανθρώπινου σώματος για να αυξήσουμε την απόδοση της κεραίας. Το πλεονέκτημα των φορετών κεραιών είναι ότι εκμεταλλεύονται το χώρο που τους παρέχει το ανθρώπινο σώμα για να βελτιώσουν την κάλυψη και την αξιοπιστία του συστήματος αλλά και να μειώσουν τη συσχέτιση μεταξύ των κεραιών, στην περίπτωση συστημάτων πολλαπλών κεραιών. Το μειονέκτημα, βέβαια, είναι ότι, η εγγύτητα της κεραίας με το ανθρώπινο σώμα επιφέρει μείωση του κέρδους, αποσυντονισμό και αλλαγή του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας.

3.3.2 Αλληλεπίδραση ανθρώπινου σώματος και φορετών συστημάτων

Είναι ευρέως γνωστό ότι μεταξύ των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που εκπέμπονται από τις κεραιές των ασυρμάτων συστημάτων και των βιολογικών ιστών υπάρχει σημαντική αλληλεπίδραση, εξαιτίας της κοντινής απόστασης από το σώμα. Τα βιολογικά συστήματα του ανθρώπινου σώματος αποτελούν ασύμμετρα διηλεκτρικά μέσα με επιτρεπτότητα και αγωγιμότητα που επηρεάζονται από τη τιμή της συχνότητας λειτουργίας των κεραιών, όπως είδαμε στην παράγραφο 3.2.

Το ένα θέμα που μας απασχολεί είναι ο πιθανός κίνδυνος της υγείας που συνδέεται με την απορρόφηση ενέργειας από τους ιστούς του ανθρώπινου σώματος, εξαιτίας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται πολύ κοντά στο ανθρώπινο σώμα. Η κατανομή του εσωτερικού ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και η διασκορπιζόμενη ενέργεια εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις φυσιολογικές παραμέτρους του σώματος και τη γεωμετρία του, αλλά και από τη συχνότητα και την πόλωση του προσπίπτοντος κύματος. Η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται συνήθως μετρείται με τον Ειδικό Ρυθμό Απορρόφησης (Specific Absorption Rate - SAR), που είναι η μέγιστη ισχύς που απορροφάται ανά μονάδα μάζας του σώματος. Για την Ευρωπαϊκή Ένωση το όριο SAR για ασφαλή έκθεση του χρήστη σε Η/Μ ακτινοβολία που υιοθετείται είναι στα 2 W/kg [161], [162]. Απαιτείται προσεκτική μελέτη κατά το σχεδιασμό φορετών κεραιών και κυκλωμάτων, καθώς υπάρχουν περιορισμοί για τη μέγιστη ισχύ στην οποία το ανθρώπινο σώμα μπορεί να εκτεθεί. Γι' αυτό είναι πολύ σημαντικό να διατηρούμε την εκπεμπόμενη ισχύ σε όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα για τις φορετές συσκευές και να χρησιμοποιούμε κεραιές με πολύ μικρή έως καθόλου οπίσθια ακτινοβολία.

Πέρα από το θέμα της ασφάλειας και των κινδύνων για την υγεία, το σώμα επιδρά στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραιών και το γεγονός αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό κεραιών. Η κύρια διαφορά που παρατηρείται άμεσα κατά την τοποθέτηση της κεραίας σε μέσο με απώλειες είναι η απόκλιση της τιμής του μήκους κύματος από τη τιμή που έχει στον ελεύθερο χώρο. Η παρουσία του ανθρώπινου σώματος παραμορφώνει τα διαγράμματα ακτινοβολίας, μειώνει το κέρδος της κεραίας και προκαλεί αποσυντονισμό της συχνότητας, όπως έχει παρουσιαστεί σε προηγούμενες μελέτες [120], [163].

3.3.3 Θέματα σχεδιασμού των φορητών κεραιών

Ο κατάλληλος σχεδιασμός της κεραίας για εφαρμογές δικτύων BAN, είναι ένα πολύ βασικό στάδιο. Τα φορετά συστήματα είναι απαιτητικά ως προς το σχεδιασμό των κεραιών γιατί το μέγεθος και το είδος της κεραίας περιορίζεται από το μέρος του σώματος που θα τοποθετηθεί. Οι απαιτήσεις που πρέπει να πληροί μια φορητή κεραία είναι να είναι ελαφριά, όσο το δυνατόν μικρών διαστάσεων, ενώ πρέπει να έχει τροφοδοσία κατάλληλη για σωστή ενσωμάτωση στις μικρού μεγέθους συσκευές. Ο πιο κατάλληλος τύπος κεραιών για φορητές εφαρμογές είναι οι κεραίες χαμηλού προφίλ π.χ. μικροταινιακές ή επίπεδες κεραίες.

Επιπλέον, όπως προαναφέραμε, κάποιες από τις παραμέτρους απόδοσης των κεραιών, όπως είναι η προσαρμογή, το διάγραμμα ακτινοβολίας, ο συντελεστής απόδοσης και το κέρδος, αλλάζουν σημαντικά συγκρίνοντας τη λειτουργία στον ελεύθερο χώρο με τη λειτουργία της κεραίας πάνω ή σε κοντινή απόσταση από ένα μέσο με απώλειες, όπως είναι το ανθρώπινο σώμα. Οι κεραίες μπορεί να αποσυντονιστούν όταν τοποθετούνται πάνω στο σώμα. Το μέγεθος του αποσυντονισμού εξαρτάται από τον τύπο της κεραίας και από το είδος του ιστού. Η χρήση επιπέδου γείωσης που απομονώνει την κεραία από το σώμα μπορεί να αποδειχτεί χρήσιμη για την αποφυγή του προβλήματος σε κάποιες περιπτώσεις, αλλά για κεραίες που έχουν μικρό ή καθόλου επίπεδο γείωσης ο σχεδιασμός πρέπει να στοχεύει σε μεγάλο εύρος ζώνης για να αντιμετωπίσει το φαινόμενο του αποσυντονισμού. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας είναι μια ακόμα σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Για επικοινωνίες off-body, το διάγραμμα πρέπει να κατευθύνεται εκτός του σώματος. Για εφαρμογές on-body, το διάγραμμα ακτινοβολίας πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η κατεύθυνση του μέγιστου λοβού ακτινοβολίας να είναι παράλληλη με την επιφάνεια του σώματος. Αυτό σημαίνει ότι η κεραία πρέπει να έχει την ικανότητα να παράγει κύματα τα οποία να μπορούν να ταξιδεύουν παράλληλα με την επιφάνεια του σώματος. Τα κύματα αυτά διαδίδονται κατά μήκος της επιφάνειας του σώματος ως έρποντα κύματα [2]. Σε γενικές γραμμές, οι κεραίες με ομοιοκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας στο επίπεδο που είναι εφαπτόμενο στην επιφάνεια του σώματος, θεωρούνται κατάλληλες για εφαρμογές on-body. Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας αλλάζει επίσης όταν η κεραία τοποθετηθεί πάνω στο σώμα σε σύγκριση με το διάγραμμα ακτινοβολίας στον

ελεύθερο χώρο. Σε κάποιες περιπτώσεις, το κέρδος της κεραίας πάνω στο σώμα, μειώνεται σημαντικά σε σύγκριση με το κέρδος του ελεύθερου χώρου. Έτσι, ο σχεδιασμός κεραίας απαιτεί πολύ προσεκτική μελέτη.

Με σκοπό τη μελέτη και κατανόηση αυτών των θεμάτων, διάφορες κεραίες, όπως κεραίες τετραγωνικού patch, μονόπολα, PIFA και κυκλικά πολωμένες κεραίες patch, χαρακτηρίζονται και οι παράμετροί τους, όπως το διάγραμμα ακτινοβολίας, οι απώλειες επιστροφής και ο συντελεστής απόδοσης συγκρίνονται μέσα από μια σειρά προσομοιώσεων [127], [164]. Παρόμοια σύγκριση γίνεται μεταξύ διαφόρων τύπων κεραιών μέσω μετρήσεων πραγματικού χρόνου στο [165]. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι κάποιες κεραίες είναι καλύτερες από άλλες σε κάποια θέματα, αλλά χειρότερες σε κάποια άλλα. Για παράδειγμα, τα μονόπολα είναι τα καλύτερα όσον αφορά το κέρδος διαδρομής αλλά έχουν ένα βασικό μειονέκτημα στο σχήμα τους. Οι κεραίες patch και άλλες επίπεδες κεραίες είναι χαμηλού προφίλ και ελαφριές και προσφέρουν πιο σταθερή απόδοση όσον αφορά την προσαρμογή, αλλά η απόδοση ζεύξης τους δεν είναι ικανοποιητική.

Τα τελευταία χρόνια, νέα εύκαμπτα υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υπόστρωμα στο σχεδιασμό κεραιών. Τα υλικά αυτά θα αντικαταστήσουν τα άκαμπτα υλικά των διηλεκτρικών υποστρωμάτων ειδικά στις φορητές εφαρμογές. Αυτό θα επιτρέψει το σχεδιασμό πιο διακριτικών κεραιών. Κάποιες φορητές κεραίες είναι κατασκευασμένες πάνω σε ύφασμα και ονομάζονται υφασμάτινες κεραίες. Εκτός από τα σχεδιαστικά θέματα που αναφέραμε παραπάνω, οι υφασμάτινες κεραίες πρέπει να είναι ευλύγιστες και ιδανικά επίπεδες. Η κεραία θα πρέπει να μην επηρεάζεται από τις αλλαγές που συμβαίνουν όταν λυγίζει ή τσαλακώνεται, όπως επίσης και όταν μεταβάλλεται το περιβάλλον λειτουργίας της, π.χ. λόγω υγρασίας. Οι φορητές και υφασμάτινες κεραίες είναι μια περιοχή έρευνας που έχει συγκεντρώσει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια και μια ποικιλία από φορητές κεραίες έχουν προταθεί.

3.3.4 Εξέλιξη των φορητών κεραιών

Τη δεκαετία του '90 ξεκίνησε η εξέλιξη των φορητών υπολογιστικών συστημάτων. Είναι προφανές ότι μια συσκευή είναι πλήρως φορητή αν είναι ενσωματωμένη στα καθημερινά μας ρούχα, κάτι το οποίο προϋποθέτει ότι θα περιλαμβάνονται εύκαμπτα

ή υφασμάτινα υλικά στη σχεδιαστική διαδικασία των φορετών συσκευών. Το 1999, ο Salonen [166], [167] παρουσίασε μια κεραία PIFA σχεδιασμένη για εφαρμογές GSM (διπλής ζώνης 900 MHz και 2.45 GHz) η οποία προοριζόταν για ενσωμάτωση στο μανίκι ενός ενδύματος. Τα αγωγία μέρη της κεραίας ήταν από χαλκό. Οι λόγοι για την επιλογή της κεραίας PIFA ήταν τρεις: σε σύγκριση με τις κεραίες patch, η κεραία PIFA είναι μικρότερη σε μέγεθος, είναι πιο ευαίσθητη στα αδύναμα σήματα εξαιτίας του υψηλότερου κέρδους και πιο σημαντικό, η ακτινοβολία προς το σώμα είναι μειωμένη καθώς μια κεραία PIFA έχει επίπεδο γείωσης.

Κατά τα τέλη της δεκαετίας του '90, η εταιρεία Philips [168] εξέλιξε την ιδέα για κεραίες κινητού τηλεφώνου φτιαγμένες από υφασμάτινα υλικά που θα ενσωματώνονταν στο μπουφάν του χρήστη. Δούλεψαν πάνω στην ιδέα που παρουσίασε ο Salonen και την πήγαν ένα ουσιαστικό βήμα παραπέρα, στην κατασκευή της κεραίας του κινητού τηλεφώνου από υφασμάτινα υλικά. Οι υφασμάτινες κεραίες γεννιούνται αυτή την περίοδο και έχουν από τότε γίνει το αντικείμενο περεταίρω έρευνας.

Ο Massey [168] (από τα εργαστήρια Philips Research Laboratories) χρησιμοποίησε επιχαλωμένο νάιλον για την κεραία και το επίπεδο γείωσης της κεραίας GSM στα 900 MHz. Ένα αφρώδες υλικό, πάχους 12.5 mm, χρησιμοποιήθηκε για να διαχωρίσει το patch από το επίπεδο γείωσης και ένα λεπτό ομοαξονικό καλώδιο κολλήθηκε στο patch.

Το 2002, ο Salonen [169] παρουσίασε την FlexIFA, που είναι μια ευλύγιστη κεραία ανεστραμμένου-F υλοποιημένη πάνω σε ένα εύκαμπτο υπόστρωμα πάχους 0.236 mm. Η αυξημένη ευλυγισία κάνει την κεραία πιο κατάλληλη για ενσωμάτωση στο μανίκι ενδύματος.

Την επόμενη χρονιά, ο Salonen ξεκίνησε να χρησιμοποιεί υφασμάτινα υλικά και η πρώτη υφασμάτινη κεραία για λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων 2.45 GHz ISM παρουσιάστηκε στο [170]. Εφαρμόστηκε ένα υπόστρωμα από ύφασμα φλις πάχους 3 mm, το ορθογώνιο patch και το επίπεδο γείωσης κατασκευάστηκαν από ύφασμα πλεγμένο με χαλκό, χωρίς να διευκρινίζονται περισσότερες λεπτομέρειες. Το κέρδος της κεραίας ήταν 6.82 dBi και ο συντελεστής απόδοσης 90 %.

Το 2004, στο συνέδριο IEEE AP-S (IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium), ο Salonen παρουσίασε τρεις υφασμάτινες για φορετές

εφαρμογές: μια κεραία GPS (1.575 GHz) [171], μια κεραία διπλής ζώνης (1900 MHz και 2.45 GHz) [172] και την WEGBA [173], η οποία είναι μια φορητή κεραία ηλεκτρομαγνητικού διάκενου ζώνης (band-gap). Όλες οι κεραίες είχαν υφασμάτινο υπόστρωμα, παρόλα αυτά τα μεταλλικά μέρη ήταν φτιαγμένα από ταινία χαλκού.

Το 2004, ο Locher παρουσιάζει τις πρώτες κυκλικά πολωμένες υφασμάτινες κεραίες στα 2.45 GHz για φορητές εφαρμογές. Η κεραία τοποθετείται πάνω σε ένα υπόστρωμα από ύφασμα spacer από πολυαμίδη πάχους 6 mm, ενώ το patch και το επίπεδο γείωσης είναι φτιαγμένα από επινικελωμένο υφαντό ύφασμα (woven textile). Αργότερα, μελετήθηκαν τρεις αμιγώς υφασμάτινες κεραίες [174], δύο από τις οποίες ήταν γραμμικά πολωμένες. Όλες οι κεραίες ελέγχθηκαν εργαστηριακά τόσο σε επίπεδη κατάσταση όσο και σε κατάσταση κάμψης. Το συμπέρασμα που εξήχθη είναι ότι οι κυκλικά πολωμένες κεραίες χάνουν την ιδιότητα της πόλωσης όταν λυγίζουν.

Ο Kellomäkki κατέληξε σε παρόμοιο συμπέρασμα [175], όταν μελέτησε την κάμψη μια κεραίας GPS (Global positioning system). Το συμπέρασμα από την έρευνα αυτή είναι ότι η πόλωση των κεραίων patch αλλάζει από κυκλική σε γραμμική όταν η κεραία καμφθεί με συγκεκριμένο τρόπο. Συνεπώς, συμπέραναν ότι από τη στιγμή που οι δέκτες GPS απαιτούν κυκλική πόλωση, το υπόστρωμα της κεραίας δεν πρέπει να μπορεί να παραμορφώνεται.

Παράλληλα το 2006, ο Tronquo, παρουσίασε μια κυκλικά πολωμένη υφασμάτινη κεραία [176]. Έχει υπόστρωμα από fleece, ενώ το patch και το επίπεδο γείωσης είναι φτιαγμένα από ύφασμα επιχαλκωμένου νάιλον. Ο αποδοτικός σχεδιασμός της κεραίας την καθιστά κατάλληλη για ενσωμάτωση στο ρουχισμό για ασύρματες επικοινωνίες off-body στα 2.45 GHz. Η κεραία παρουσιάζει εξαιρετική απόδοση ακόμα και κάτω από συνθήκες κάμψης αλλά και κοντά στο ανθρώπινο σώμα. Οι Vallogi και Hartleer, εστίασαν την έρευνα σε κεραίες για ενσωμάτωση σε προστατευτικά ρούχα και αυτό είχε ως αποτέλεσμα μια υφασμάτινη κεραία διπλής πόλωσης [177], μια κυκλικά πολωμένη κεραία [178] και μια κεραία GPS [179].

Κατά τη διάρκεια του δεύτερου μισού της δεκαετίας, περισσότερες ομάδες ξεκίνησαν να δείχνουν το ενδιαφέρον τους στις υφασμάτινες κεραίες και η έρευνα εντάθηκε. Όλα τα είδη επιδράσεων στην απόδοση της κεραίας μελετήθηκαν. Η Ouyang, μελετά την επίδραση του τύπου του υφάσματος στην απόδοση μιας υφασμάτινης κεραίας στο [180]. Οι Zhu και Langley σχεδιάζουν και δοκιμάζουν μια φορητή υφασμάτινη κεραία διπλής ζώνης (2.45 και 5 GHz) πάνω σε ένα υπόστρωμα

ηλεκτρομαγνητικού διακένου ζώνης (electromagnetic band gap - EBG) [181]. Εκτός από τις μετρήσεις πάνω στο σώμα και υπό συνθήκες κάμψης, η κεραία επίσης πλύθηκε. Αναφέρεται ότι η κεραία από τσόχα και Zelt συμπεριφερόταν το ίδιο μετά το πλύσιμο και το στέγνωμα της κεραίας. Παρόλα αυτά, υπό συνθήκες υγρασίας, παρατηρήθηκε μια μετατόπιση προς τα κάτω της συχνότητας συντονισμού, μαζί με μια μείωση του κέρδους κεραίας και στις δύο ζώνες συχνοτήτων. Οι Bai και Langley [182] όχι μόνο έκαμψαν, αλλά επίσης έκαναν πτυχώσεις στις κεραίες, επειδή τα ενδύματα κάνουν πτυχώσεις όταν φοριούνται.

Πέρα από τις φορητές κεραίες για GPS και στα 2.45 GHz, έχουν μελετηθεί επίσης φορητές κεραίες για λήψη FM (100 MHz) [183], κεραίες Ultra Wide Band (UWB) (3.1- 10.6 GHz) [184], [185], καθώς και κεραίες για λήψη ψηφιακής τηλεόρασης DVB-H (470-702 MHz) [186], [187], αλλά και πολυζωνικές κεραίες που καλύπτουν τόσο ζώνες συχνοτήτων ασύρματων επικοινωνιών όσο και ψηφιακής τηλεόρασης [188]. Στο [189] αναπτύχθηκε μία εύκαμπτη φορητή επίπεδη κεραία ανεστραμμένου-E, που λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 360-460 MHz, ανεξαρτήτως των συνθηκών που επικρατούν στον χώρο με απώτερο στόχο να είναι άνετη προς τον χρήστη, ενώ παρουσιάζει κέρδος μεγαλύτερο κατά 15 dB από το αντίστοιχο της φορητής κεραίας δίπολου $\lambda / 2$. Στα [190], [191], ο Kennedy από τη NASA συζητά τη χρήση υφασμάτων κεραιών για να ενσωματωθούν σε στολή δραστηριότητας εκτός οχήματος (extravehicular activity - EVA). Η πρόσθετη ευλυγισία των υφασμάτων κεραιών, τις καθιστά ιδανικές για διαστημικές εφαρμογές όπου είναι απαραίτητο τα συστήματα να είναι ελαφριά και εύρωστα. Επιπλέον, στις υλοποιήσεις φορητών κεραιών, δεν είναι μόνο σημαντικό να έχουμε υψηλό κέρδος κεραίας, αλλά και να έχουμε καλή κάλυψη γύρω από το σώμα. Η υφασμάτινη συστοιχία κεραιών με 8 στοιχεία βασίζεται στη χρήση υποστρώματος τσόχας Nomex με το ύφασμα Nora (ένα ύφασμα από επάργυρο, επιχαλκωμένο και επινικελωμένο νάιλον) ως αγώγιμο ύφασμα. Έξι από αυτές τις κεραίες ενώνονται σε ένα σύστημα πολλαπλών κεραιών που ενσωματώνεται στη στολή, και το οποίο οδηγεί σε καλή απόδοση στις περισσότερες παρατηρούμενες σφαίρες που περιβάλλουν το χρήστη.

Θεμελιώδεις στην εξέλιξη των φορητών κεραιών υπήρξαν και οι εργασίες που προορίζονταν για στρατιωτικούς σκοπούς. Κοινός στόχος όλων αυτών των εργασιών ήταν η δημιουργία εύκαμπτων κεραιών που θα μπορούσαν να ενσωματωθούν στον

στρατιωτικό ρουχισμό και θα παρέχουν αξιοπιστία και ασφάλεια στις επικοινωνίες, αλλά θα ικανοποιούν και την απαίτηση για περιορισμένη εκπομπή ακτινοβολίας προς τον χρήστη. Μια φορητή κεραία διπόλου ευρείας ζώνης (30-108 MHz), που δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του εδάφους, παρουσιάζεται στο [192], με ομοκατευθυντικό διάγραμμα ακτινοβολίας και κάθετη πόλωση, έχοντας έτσι τη δυνατότητα να λειτουργεί σε οποιαδήποτε θέση.

Το 2008, στη δημοσίευση [193], ο Salonen εισάγει την ιδέα της κεραίας SoftWear, υπονοώντας τα μαλακά υφασμάτινα υλικά που κάνουν την κεραία ευλύγιστη και φορητή. Η επίδραση της κάμψης στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας και στο συντελεστή απόδοσης μελετάται στο [194] και συνάγεται το συμπέρασμα ότι το διάγραμμα ακτινοβολίας μιας λυγισμένης κεραίας διευρύνεται και ο συντελεστής απόδοσης μειώνεται.

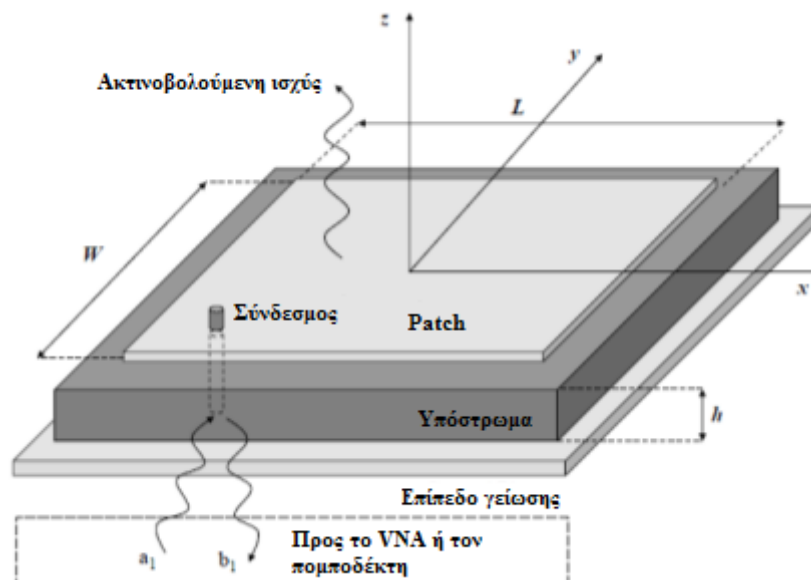
Η εμφάνιση των φορητών υφασμάτινων κεραιών αποκάλυψε την ανάγκη για προσεκτικό χαρακτηρισμό των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων των υφασμάτινων υλικών. Στο [195], παρουσιάζεται μια μέθοδος καθορισμού της επιτρεπτότητας και του συντελεστή απωλειών (loss tangent) συμβατικών, μη αγώγιμων υφασμάτων. Η γνώση αυτών των χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη όταν τα υφασμάτινα υλικά εφαρμόζονται π.χ. ως υλικό για το υπόστρωμα της κεραίας. Στο [196] καθορίζεται η διηλεκτρική σταθερά υφασμάτων που προορίζονται για υπόστρωμα κεραίας, μέσω προσομοιώσεων και μετρήσεων.

Από την άλλη, οι ιδιότητες υψηλών συχνοτήτων των αγώγιμων υφασμάτων απαιτούν επίσης διερεύνηση. Αυτό πραγματοποιείται από την Ouyang [197], όπου όχι μόνο μελετάται το αγώγιμο νήμα, αλλά επίσης γίνεται και μια σύγκριση μεταξύ πλεκτών και υφαντών αγώγιμων υφασμάτων. Συνάγεται το συμπέρασμα ότι τα υφαντά γενικά έχουν καλύτερες ηλεκτρικές ιδιότητες και ότι μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμπαγή μεταλλικά φύλλα στις φορητές εφαρμογές.

Ένα επιπλέον μέτρο καταλληλότητας μιας κεραίας για χρήση της ως φορητή είναι το ποσό ακτινοβολίας που εκπέμπει. Τα επίπεδα του ρυθμού SAR πρέπει να μελετηθούν ιδιαίτερα προσεκτικά όταν πρόκειται μια κεραία να τοποθετηθεί τόσο κοντά στο ανθρώπινο σώμα [176]. Η σύγκριση του SAR κατά την προσομοίωση λειτουργίας υφασμάτινων patch και διπολικών κεραιών, δίπλα σε ψηφιακό ομοίωμα ανθρώπινου σώματος και για διάφορες θέσεις λειτουργίας, έδειξε πως η υφασμάτινη patch κεραία εκπέμπει την λιγότερη ακτινοβολία [198], [199], [200], [185].

3.3.5 Κεραίες μικροταινίας

Οι κεραίες μικροταινίας είναι επίπεδες και εξαιτίας του χαμηλού τους προφίλ, είναι οι πιο κατάλληλες για ενσωμάτωση στο ρουχισμό του χρήστη. Οι κεραίες που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής και θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο, όλες ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. Οι πιο πολλές υφασμάτινες κεραίες που έχουν μελετηθεί τα τελευταία χρόνια, είναι κεραίες μικροταινίας [174], [171], [199]. Στην πιο απλή τους μορφή, οι κεραίες μικροταινίας αποτελούνται από ένα ακτινοβολόν patch που είναι τοποθετημένο πάνω σε ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα. Το πίσω μέρος του υποστρώματος της κεραίας καλύπτεται από ένα αγωγίμο επίπεδο γείωσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.18.



Σχήμα 3.18: Μια κεραία μικροταινίας.

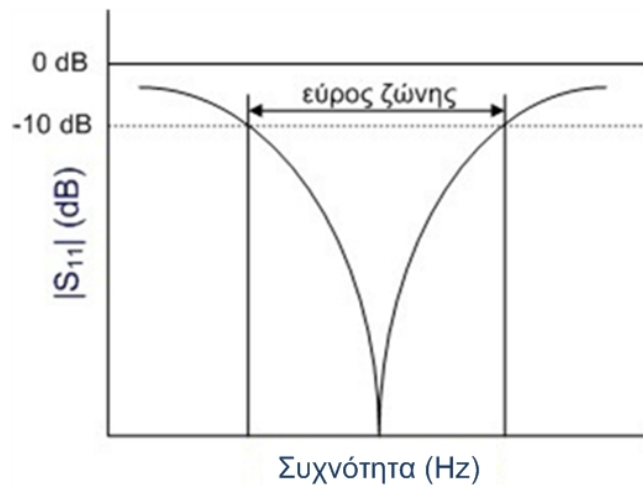
Στη συμβατική υλοποίηση κεραιών, το ακτινοβολόν patch είναι συνήθως φτιαγμένο από χαλκό που τυπώνεται πάνω στο υπόστρωμα της κεραίας με την τεχνική της φωτοέκθεσης και μπορεί να πάρει κάθε πιθανό σχήμα. Παρόλα αυτά, για να απλοποιήσουμε το σχεδιασμό και την ανάλυση απόδοσης, συνήθως τα patch έχουν τετράγωνο, ορθογώνιο, κυκλικό, τριγωνικό ή κάποιο άλλο απλό σχήμα. Το υπόστρωμα της κεραίας είναι ένα μη αγωγίμο, συνήθως ασυμπίεστο υλικό που χαρακτηρίζεται ηλεκτρομαγνητικά στο εύρος συχνοτήτων που λειτουργεί η κεραία. Η κύρια κατεύθυνση ακτινοβολίας μιας κεραίας μικροταινίας είναι κάθετη ως προς το

patch της κεραίας, συνεπώς έχει την κατεύθυνση του άξονα-z, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.18. Το αγώγιμο επίπεδο γείωσης ενισχύει την ακτινοβολία προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Όσον αφορά τις φορητές κεραίες, το επίπεδο γείωσης προσφέρει το όφελος ότι η κεραία ακτινοβολεί μακριά από το σώμα και μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό ακτινοβολεί προς το σώμα. Οι κεραίες μικροταινίας έχουν μια σύμπακτη μορφή, είναι ελαφριές, χαμηλού προφίλ και κόστους, που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν εύθραυστα ή προεξέχοντα μέρη. Τα τελευταία χρόνια, οι κεραίες μικροταινίας ενσωματώνονται σε όλα τα είδη των ασύρματων συσκευών χειρός, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι δέκτες τηλεειδοποίησης. Με αποτέλεσμα, η πιο πρόσφατη γενιά κινητών τηλεφώνων δεν έχει πια κεραία εύθραυστη που να προεξέχει. Επιπρόσθετα, οι κεραίες μικροταινίας προσφέρουν μεγάλη ευελιξία στο σχεδιασμό, όπως στο σχήμα, τη δομή της τροφοδοσίας και τη θέση του σημείου τροφοδοσίας.

3.3.5.1 Χαρακτηριστικά κεραίας

Εύρος ζώνης προσαρμογής

Τυπικά μια κεραία σχεδιάζεται για να ακτινοβολεί σε μια συγκεκριμένη συχνότητα, που ονομάζεται συχνότητα συντονισμού f_r . Παρόλα αυτά, η κεραία θα ακτινοβολεί σε ένα ελαφρώς ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων, συνήθως επικεντρωμένο γύρω από τη συχνότητα συντονισμού. Αυτό το εύρος συχνοτήτων ονομάζεται εύρος ζώνης προσαρμογής όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.19. Στη συνέχεια αυτής της διατριβής θα ονομάζεται απλά ως εύρος ζώνης κεραίας. Η πιο σημαντική απόφαση όταν ξεκινάμε να σχεδιάζουμε μια κεραία, είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας της. Για φορητά υφασμάτινα συστήματα, πολύ συχνά επιλέγεται η μη αδειοδοτημένη ζώνη 2.45 GHz ISM. Αυτό το εύρος συχνοτήτων αρχικά είχε δεσμευτεί για μη εμπορική χρήση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων για βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές εφαρμογές (Industrial, Scientific and Medical - ISM). Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται επίσης και για εφαρμογές επικοινωνίας χωρίς άδεια όπως είναι για παράδειγμα τα δίκτυα WLAN και το Bluetooth [201].



Σχήμα 3.19: Εύρος ζώνης κεραίας.

Αν μια κεραία σχεδιάζεται για τη ζώνη 2.45 GHz ISM, πρέπει να ακτινοβολεί την ισχύ της στο εύρος συχνοτήτων 2.4 - 2.4835 GHz, πρέπει να έχει λοιπόν ένα ελάχιστο εύρος ζώνης ίσο με 83.5 MHz. Το πάχος του υποστρώματος της κεραίας επηρεάζει το εύρος ζώνης μιας επίπεδης κεραίας μικροταινίας, που μπορεί να εξηγηθεί με βάση τον παράγοντα Q που ορίζεται από τη σχέση:

$$Q = \omega_r \frac{\text{Αποθηκευμένη ενέργεια}}{\text{Ακτινοβολούμενη ισχύς} + \text{Ισχύς απωλειών}} \quad (3.1)$$

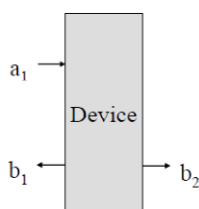
Από τη στιγμή που μελετάμε κεραίες, ενδιαφερόμαστε για μέγιστη ακτινοβολούμενη ισχύ και συνεπώς χαμηλό παράγοντα Q. Χαμηλώνοντας τον παράγοντα Q αυξάνει το εύρος ζώνης της κεραίας καθώς:

$$BW \sim \frac{1}{Q} \quad (3.2)$$

Ο παράγοντας Q μειώνεται όταν το μέγεθος των ανοιγμάτων μεταξύ του patch της κεραίας και του επιπέδου γείωσης αυξάνει. Συνεπώς ένα πιο παχύ υπόστρωμα μειώνει τον παράγοντα Q και συνεπάζεται μεγαλύτερο εύρος ζώνης της κεραίας.

Συντελεστής ανάκλασης

Το εύρος ζώνης συχνοτήτων στο οποίο η κεραία λειτουργεί μπορεί να μετρηθεί μέσω του συντελεστή ανάκλασης εισόδου $|S_{11}|$ (ή απλά συντελεστής ανάκλασης). Ο συντελεστής αυτός παρέχει πληροφορία σχετικά με τη συμπεριφορά μιας συσκευής (εδώ μιας κεραίας) όταν αυτή συνδέεται σε μια πηγή RF μέσω μιας γραμμής μεταφοράς με χαρακτηριστική αντίσταση 50Ω . Μέρος του προσπίπτοντος κύματος τάσης (a_1) θα ανακλαστεί (b_1) και ένα μέρος θα ακτινοβοληθεί (b_2), όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.20.



Σχήμα 3.20: Ένα μέρος του προσπίπτοντος κύματος a_1 ανακλάται (b_1), ενώ ένα μέρος του ακτινοβολείται (b_2).

Ο συντελεστής ανάκλασης εισόδου $|S_{11}|$ λοιπόν ορίζεται ως ο λόγος του $|b_1|$ προς $|a_1|$:

$$|S_{11}| = \frac{|b_1|}{|a_1|} \quad (3.3)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης εισόδου εκφράζεται σε μονάδες dB, συνεπώς ως $20 \log |S_{11}|$. Το αποτέλεσμα παρέχει πληροφορία για την απόδοση της κεραίας και ο περιορισμός που τίθεται για τον συντελεστή ανάκλασης είναι: $20 \log |S_{11}| < -10 \text{ dB}$. Μια κεραία με αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να θεωρηθεί καλής ποιότητας κι αυτή είναι η απαίτηση που τίθεται για τις κεραίες που σχεδιάστηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Ο συντελεστής ανάκλασης μιας κεραίας μετριέται χρησιμοποιώντας έναν αναλυτή δικτυωμάτων (VNA).

Κέρδος κεραίας

Το κέρδος κεραίας είναι πολύ σημαντικό μέγεθος, τόσο για κεραιές που χρησιμοποιούνται ως πομποί όσο και ως δέκτες. Εκφράζει τη σχέση μεταξύ της λαμβανόμενης ισχύος και της ισχύος που θα λαμβανόταν σε ένα σενάριο αναφοράς στο οποίο η κεραία εκπομπής αντικαθίσταται από μια ισοτροπική κεραία που ακτινοβολεί εξίσου προς όλες τις διευθύνσεις του χώρου. Το κέρδος κεραίας συχνά εκφράζεται σε dBi, που σημαίνει ότι η κεραία αναφοράς είναι ισοτροπική. Όταν μια κεραία που εκπέμπει με συγκεκριμένο κέρδος χρησιμοποιείται ως κεραία δέκτη, θα έχει το ίδιο κέρδος και για τη λήψη. Το κέρδος κεραίας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση του Friis, που δίνεται από την (2.119) του [202]. Σε μια διάταξη μετρήσεων μετάδοσης μεταξύ δύο κεραιών, ως πομπός χρησιμοποιείται μια χοανοειδής κεραία, συγκεκριμένου κέρδους που είναι εκ των προτέρων γνωστό. Η κεραία, της οποίας το κέρδος θέλουμε να προσδιορίσουμε, χρησιμοποιείται ως δέκτης.

Απόδοση ακτινοβολίας

Η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας εκφράζει το λόγο της συνολικής ισχύος που ακτινοβολείται από την κεραία P_{rad} προς την ισχύ που είναι διαθέσιμη για ακτινοβολία στην είσοδο της κεραίας P_i . Δεν ακτινοβολείται όλη η ισχύς που φθάνει στην κεραία, καθώς μέρος αυτής θα χαθεί εξαιτίας των απωλειών. Οι απώλειες μπορεί να είναι απώλειες αγωγής στα μεταλλικά μέρη της κεραίας ή διηλεκτρικές απώλειες στα διηλεκτρικά μέρη της κεραίας. Παρόλα αυτά, είναι δύσκολο να ξεχωρίσουμε αυτές τις δύο επιδράσεις σε μια πραγματική κεραία. Η απόδοση ακτινοβολίας που λαμβάνει υπόψη αυτές τις απώλειες εκφράζεται επί % ως εξής:

$$e_{cd} = \frac{P_{rad}}{P_i} 100 \quad (3.4)$$

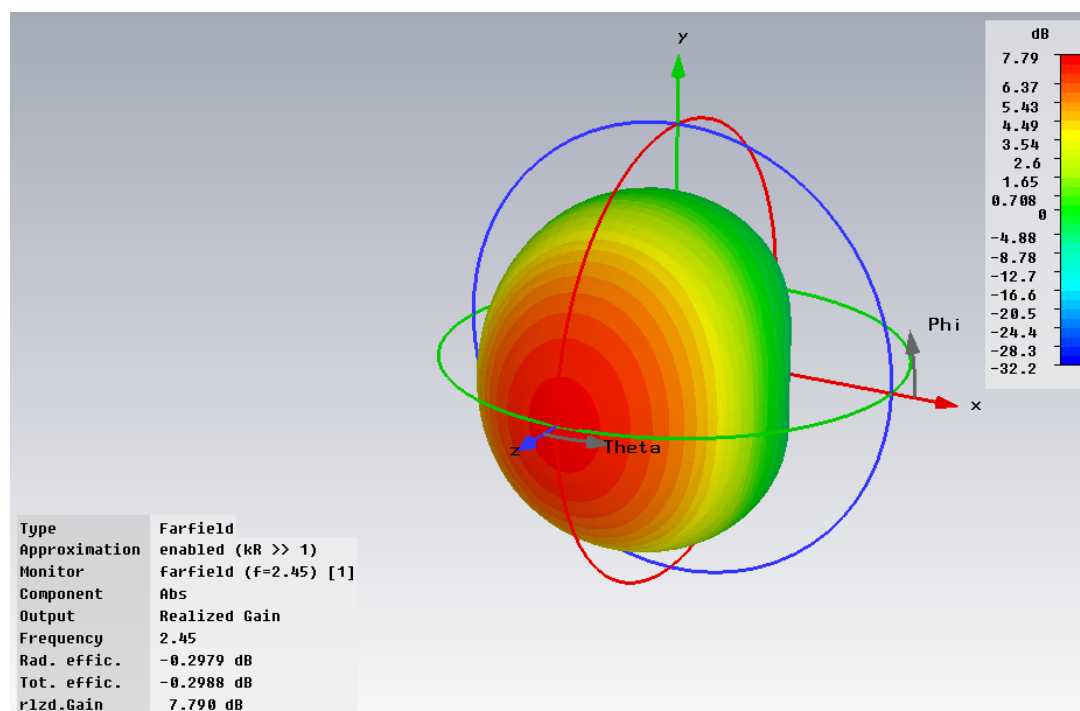
Επίσης μπορεί να οριστεί η συνολική απόδοση ακτινοβολίας e_t . Σχετίζει την ακτινοβολούμενη ισχύ με τη μέγιστη ισχύ που η γεννήτρια τροφοδοτεί την κεραία. Συνεπώς, ο e_t συμπεριλαμβάνει και την επίδραση των ανακλάσεων της ισχύος

(εξαιτίας της κακής προσαρμογής ισχύος) και τις απώλειες της κεραίας (εξαιτίας των απωλειών αγωγής και διηλεκτρικού):

$$e_t = \frac{P_{rad}}{P_{t,max}} 100 = M \cdot e_{cd} \quad (3.5)$$

Παρά τη δυσκολία του να υπολογίσεις και να προσομοιώσεις την απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας, είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος στο σχεδιασμό κεραιών.

Διάγραμμα ακτινοβολίας

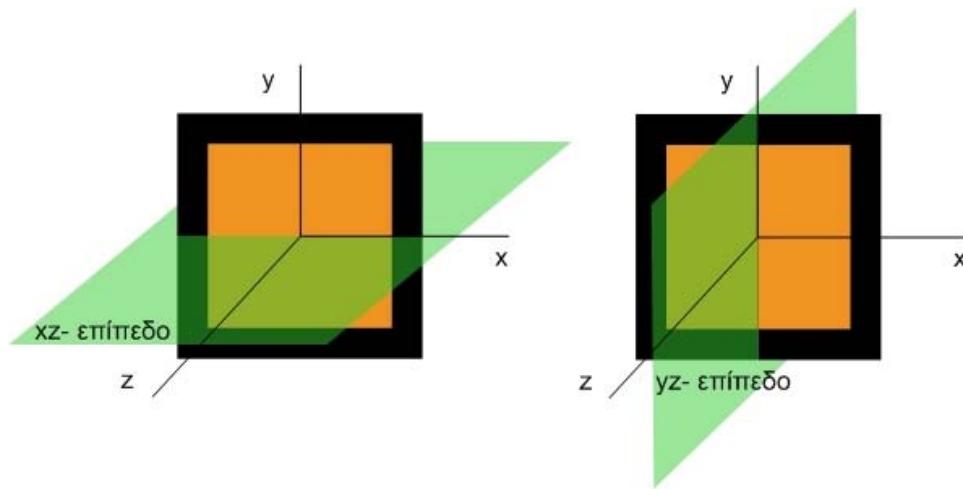


Σχήμα 3.21: Τριδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας.

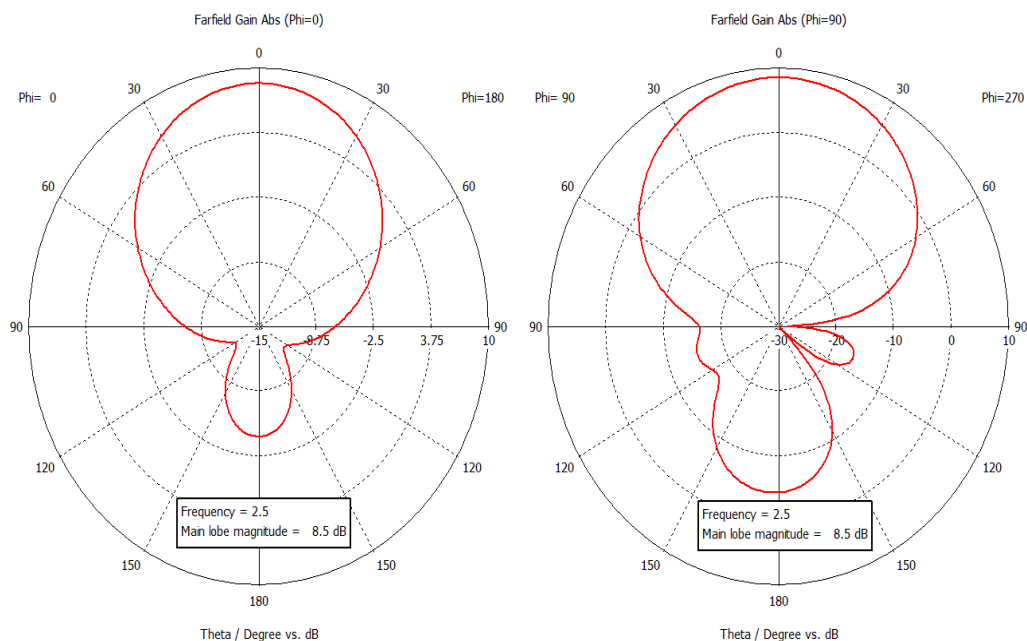
Για δεδομένη συχνότητα, οι περισσότερες κεραίες ακτινοβολούν ισχυρότερα σε κάποια κατεύθυνση από ότι σε κάποια άλλη. Σε αυτή την περίπτωση οι κεραίες αναφέρονται ως ανισοτροπικές. Η ακτινοβολουμένη ενέργεια σχηματίζει ένα πεδίο με συγκεκριμένο διάγραμμα γύρω από την κεραία. Η ενέργεια αυτή μετράται σε διάφορες γωνίες ανύψωσης και αζιμούθιου σε σταθερή απόσταση από την κεραία. Το

διάγραμμα ακτινοβολίας που προκύπτει μπορεί να απεικονιστεί σε ένα τρισδιάστατο γράφημα, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.21

Παρόλα αυτά, συνήθως παρουσιάζεται μια διδιάστατη τομή, στο xz- ή το yz- επίπεδο (Σχ. 3.22) όπως φαίνεται στο Σχ. 3.23. Τα διαγράμματα κέρδους που προκύπτουν από τα διαγράμματα ακτινοβολίας, είναι τομές στα xz- και yz-επίπεδα για γωνία ανύψωσης που κυμαίνεται από 0° μέχρι 360° .



Σχήμα 3.22: Δύο επίπεδα στα οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις διάδοσης.



Σχήμα 3.23: Διδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας στα xz- και yz- επίπεδα.

Από τα γραφήματα αυτά, μπορεί να εξαχθεί η κύρια κατεύθυνση ακτινοβολίας. Για κεραιές μικροταινίας, η ακτινοβολία κυρίως κατευθύνεται κάθετα στο επίπεδο του patch ή στην κατεύθυνση του άξονα-z αν το patch βρίσκεται στο xy-επίπεδο. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας μπορούν να προσομοιωθούν με έναν προσομοιωτή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, ή μπορούν να μετρηθούν και σε έναν ανηχικό θάλαμο.

3.3.6 Υλικά κατασκευής φορετών κεραιών

Η επιλογή των κατάλληλων υλικών κατά την σχεδίαση μιας φορετής κεραιάς αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία. Το γεγονός πως μια κεραία μικροταινίας αποτελείται από τρία διαφορετικά τμήματα (επίπεδο γείωσης, μεταλλικό ακτινοβόλο patch και υπόστρωμα) σε συνδυασμό με την μεγάλη ποικιλία υλικών από τα οποία μπορεί να κατασκευαστεί το κάθε τμήμα της, καθιστούν αναγκαία την προσεκτική επιλογή τους. Οι διαφορετικοί συνδυασμοί των διαφόρων υλικών επηρεάζουν διαφορετικά την λειτουργία της κεραιάς και τη συνολική της απόδοση. Πολλές φορές η κατάλληλη επιλογή υλικών μπορεί να συνεισφέρει θετικά στη βελτίωση της λειτουργίας της κεραιάς όταν αλλαγές στη γεωμετρία της δεν μπορούν να προσφέρουν βελτίωση ή δεν είναι εφικτές.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των φορετών κεραιών πρέπει να έχουν κάποια χαρακτηριστικά και ιδιότητες ώστε να μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στο ρουχισμό του χρήστη. Εκτός από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των υλικών, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι φυσικές τους ιδιότητες. Δεδομένου ότι η κεραία προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως φορετή, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί σχετικά με τις διαστάσεις της, το βάρος της αλλά και το σχήμα της ώστε να μην εμποδίζει τον χρήστη. Για να είναι ένα υλικό κατάλληλο για χρήση σε μια φορετή κεραία πρέπει γενικά να μπορούμε εύκολα να το επεξεργαστούμε, να μπορεί να κοπεί στο επιθυμητό σχήμα, να είναι εύκαμπτο και να είναι ελαφρύ.

3.3.6.1 Κεραιές με υφασμάτινο υπόστρωμα

Για το διηλεκτρικό υπόστρωμα της κεραιάς οι επιλογές για το υλικό κατασκευής είναι περισσότερες. Σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του διηλεκτρικού είναι φυσικά το πάχος του, ανάλογα με το σχεδιασμό της εκάστοτε κεραιάς. Για δεδομένη

γεωμετρία κεραίας μικροταινίας, η αύξηση της τιμής της διηλεκτρικής σταθεράς του υποστρώματος προκαλεί μείωση της συχνότητας συντονισμού της κεραίας. Για την ζώνη συχνοτήτων UHF (300 MHz – 3 GHz), χρησιμοποιούνται συνήθως υλικά με τιμή διηλεκτρικής σταθεράς στο διάστημα $2.2 \leq \epsilon_r \leq 12$. Ωστόσο η επιλογή υφάσματος τσόχας, με τιμές διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r < 2$, για την κατασκευή του υποστρώματος μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή και συναντάται ευρέως στη βιβλιογραφία [203], [204].

Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται διάφορα υλικά τα οποία έχουν τοποθετηθεί σαν υπόστρωμα σε κεραίες διαφορετικών διαστάσεων. Η επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας των κεραιών αυτών είναι τα 2.45 GHz. Το υπόστρωμα και το επίπεδο γείωσης έχουν διαστάσεις 120x120 mm. Το επίπεδο γείωσης έχει πάχος 0.5 mm ενώ το ακτινοβόλο patch 0.1 mm [196].

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2: ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΣΕ ΦΟΡΕΤΗ ΚΕΡΑΙΑ ΓΙΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ 2.45 GHz

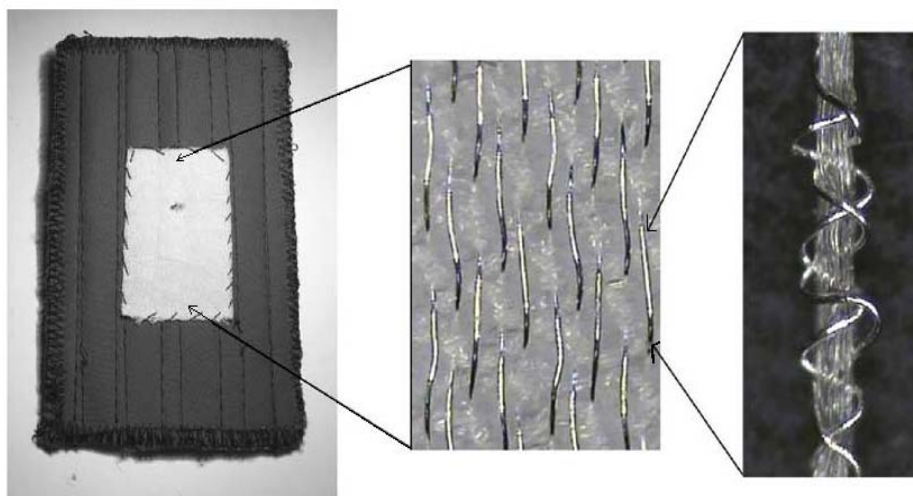
Υφασμάτινα υλικά	Βαμβακερό	Τζιν	Polycot	Πολυεστέρας	Σεντόνι
Πάχος υποστρώματος (mm)	3.0	2.84	3.0	2.85	3.0
Πλάτος patch (mm)	53.67	53.67	57.47	55.89	51.74
Μήκος patch (mm)	45.98	45.98	50.7	48.7	43.0
Συχνότητα συντονισμού (GHz) (μετρήσεις)	2.519	2.403	2.247	2.42	2.7
Συντελεστής ανάκλασης S_{11} (dB)	-17.5	-15.4	-19.1	-25.4	-15.6
Διηλεκτρική σταθερά (μετρήσεις)	1.51	1.67	1.56	1.44	1.46

Κατά καιρούς πολλά είναι τα υφασμάτινα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα για φορετές κεραίες. Χαρακτηριστικά έχουν χρησιμοποιηθεί τσόχα, φλιν [170], βαμβακερό, τζιν, πολυεστέρας, νάιλον [196] κ.α.

3.3.6.2 Κεραίες με υφασμάτινα αγώγιμα μέρη

Στις αρχικές μελέτες σχεδιασμού φορητών κεραιών, ως αγώγιμο υλικό του ακτινοβόλου patch και του επιπέδου γείωσης χρησιμοποιούνταν ευρέως το φύλλο χαλκού γιατί είναι μια φτηνή και αποδοτική επιλογή. Βέβαια κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλα μέταλλα ως αγώγιμα υλικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τους στόχους του σχεδιαστή της κεραίας.

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση μετάλλων για την κατασκευή των αγώγιμων τμημάτων των φορητών κεραιών, έχει αντικατασταθεί σε πολλές περιπτώσεις από τη χρήση αγώγιμων υφασμάτων (electro-textile materials) [197], [174], [205], [206]. Αυτά τα υφάσματα κατασκευάζονται από το συνδυασμό αγώγιμων μεταλλικών/πολυμερών ινών με επιφάνειες από υφασμάτινες μη-αγώγιμες ίνες (Σχ. 3.24) ή από τον συνδυασμό μεταξύ μεταλλικών/πολυμερών ινών με επιφάνειες από άλλες αγώγιμες ίνες (υφασμάτινες ή μη).



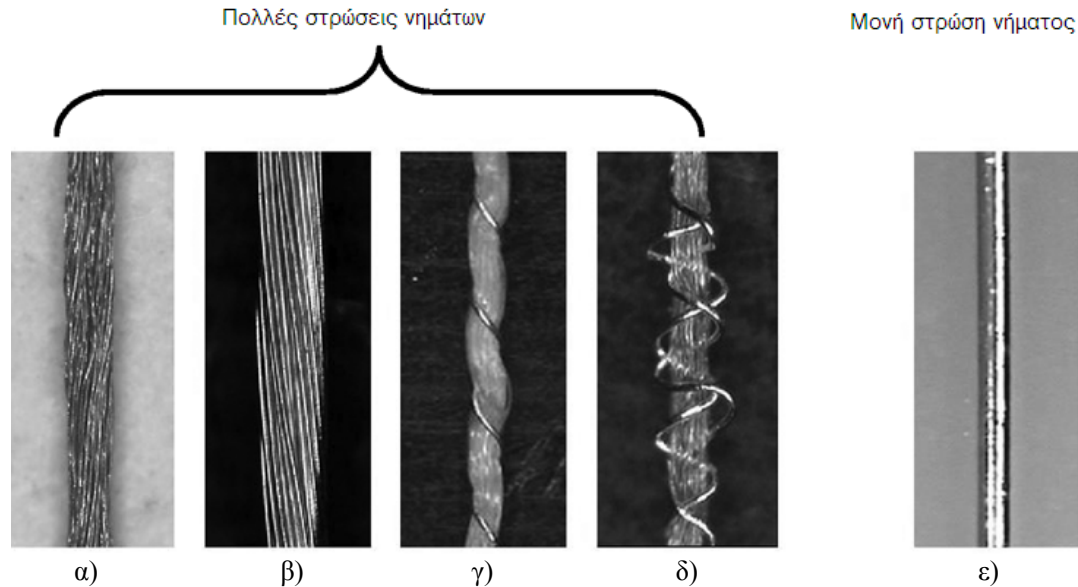
Σχήμα 3.24: Το ακτινοβόλο patch της φορητής κεραίας αποτελείται από το συνδυασμό αγώγιμων μεταλλικών ινών και επιφάνειας ενός μη-αγώγιμου υφάσματος.

Οι αγώγιμες ίνες μπορούν να κατασκευαστούν με τρεις μεθόδους:

- Γέμισμα του εσωτερικού μιας ίνας (αγώγιμης ή μη) με μέταλλο ή άνθρακα.
- Επίστρωση μιας ίνας (αγώγιμης ή μη) με μέταλλο ή πολυμερές.
- Χρήση μιας ίνας που είναι κατασκευασμένη από αγώγιμο υλικό.

Για την κατασκευή μιας αγώγιμης ίνας μπορεί να χρειαστούν πολλές στρώσεις νημάτων από αγώγιμα και μη υλικά (multi-filament threads) ή μόνο μια στρώση

νήματος του επιθυμητού υλικού (mono-filament threads), όπως απεικονίζεται στο Σχ. 3.25.

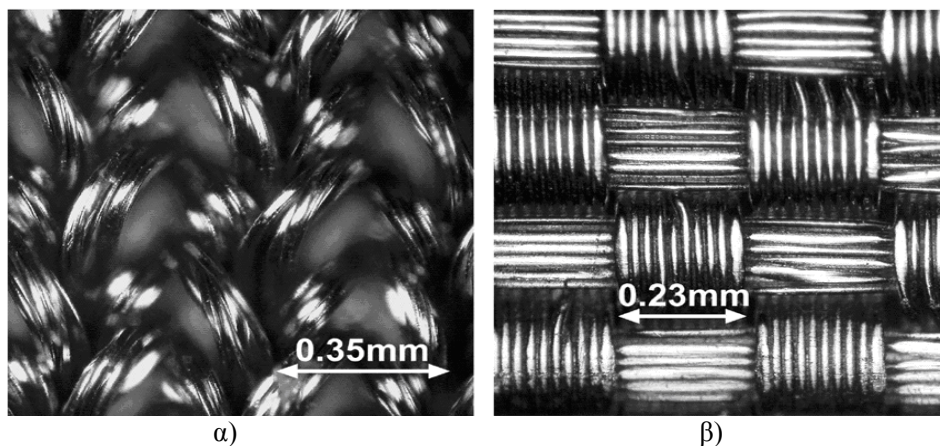


Σχήμα 3.25: Αγωγή ινα α-δ) από πολλές στρώσεις νημάτων και ε) από μία στρώση νήματος.

Πιο συγκεκριμένα η αγωγή ινα στο Σχ. 3.25ε αποτελείται από χαλκό που είναι επικαλυμμένος από ασήμι και όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε είναι μια μονή ινα. Η διάμετρος της είναι 0.04 mm. Η αγωγή ινα στο Σχ. 3.25α αποτελείται από τον συνδυασμό πολλών ελαστικών ινών από νάιλον που είναι επικαλυμμένες από ασήμι και η καθεμία είναι τυλιγμένη γύρω από την άλλη. Αντίστοιχα και η αγωγή ινα στο Σχ. 3.25β είναι κατασκευασμένη με τον ίδιο τρόπο και αποτελείται από 60 ίνες χαλκού διαμέτρου 0.04 mm η καθεμία. Οι ίνες στο Σχ. 3.25γ και δ αποτελούνται από συνδυασμό αγωγικών νημάτων με μη-αγωγή νήματα. Μια ινα από χαλκό επικαλυμμένη από ασήμι (διαμέτρου 0.04 mm) είναι τυλιγμένη γύρω από μια ινα ενός μη-αγωγικού υλικού (διαφορετικά υλικά στα γ και δ).

Οι αγωγικές ίνες μπορούν να κατασκευαστούν από διάφορα μέταλλα, όπως χρυσό, ασήμι, τιτάνιο, κασσίτερο, μπρούτζο κ.α., αν και αυτό που χρησιμοποιείται συνήθως είναι ο χαλκός. Για να κατασκευαστούν τα αγωγή υφάσματα πρέπει να ενσωματωθούν οι αγωγικές ίνες μέσα σε υφάσματα και αυτό μπορεί να γίνει με δυο τρόπους. Ο πρώτος είναι με το πλέξιμο άρα να έχουμε ένα τελικό αγωγή υφάσμα που να είναι πλεκτό (knitted fabric). Στον τρόπο αυτό κατασκευής οι αγωγικές ίνες τυλίγονται γύρω από τις ίνες του υφάσματος (Σχ. 3.26α). Με τον δεύτερο τρόπο οι

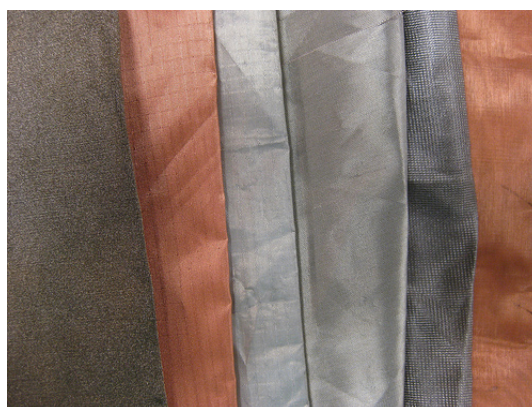
αγωγίμες ίνες υφαίνονται σε ευθείες οριζόντιες και κάθετες πάνω στο ύφασμα (Σχ. 3.26β), οπότε έχουμε ένα υφαντό ύφασμα (woven fabric) [174].



Σχήμα 3.26: α) Πλεκτό αγωγίμο ύφασμα P130 [207] και β) υφαντό αγωγίμο ύφασμα Nora [208].

Κυριότερο πλεονέκτημα της χρήσης υφάσματος στην κατασκευή της κεραίας είναι η σημαντική μείωση του όγκου, χωρίς να περιορίζεται ιδιαίτερα η απόδοση της και το γεγονός φυσικά ότι το ύφασμα ενσωματώνεται πιο εύκολα στην ρουχισμό του χρήστη. Θα πρέπει οι κεραίες από αγωγίμο ύφασμα να μπορούν εύκολα να πλένονται στο πλυντήριο χωρίς να καταστρέφονται και γενικά είναι πολύ εύκαμπτες σε τυχόν κάμψεις που μπορεί να υποστούν.

3.3.6.3 Αγωγίμα υφάσματα στο εμπόριο



Σχήμα 3.27: Δείγματα αγωγίμων υφασμάτων.

Για την κατασκευή του αγωγίμου patch και του επιπέδου γείωσης της κεραίας χρησιμοποιούνται κυρίως τυποποιημένα υφάσματα που μπορούμε να προμηθευτούμε

στο εμπόριο (Σχ. 3.27). Ανάμεσα στα αγώγιμα αυτά υφάσματα του εμπορίου, είναι κάποια που ξεχωρίζουν εξαιτίας της πολύ χαμηλής τους επιφανειακής ειδικής αντίστασης ($\leq 0.10 \Omega / sq$).

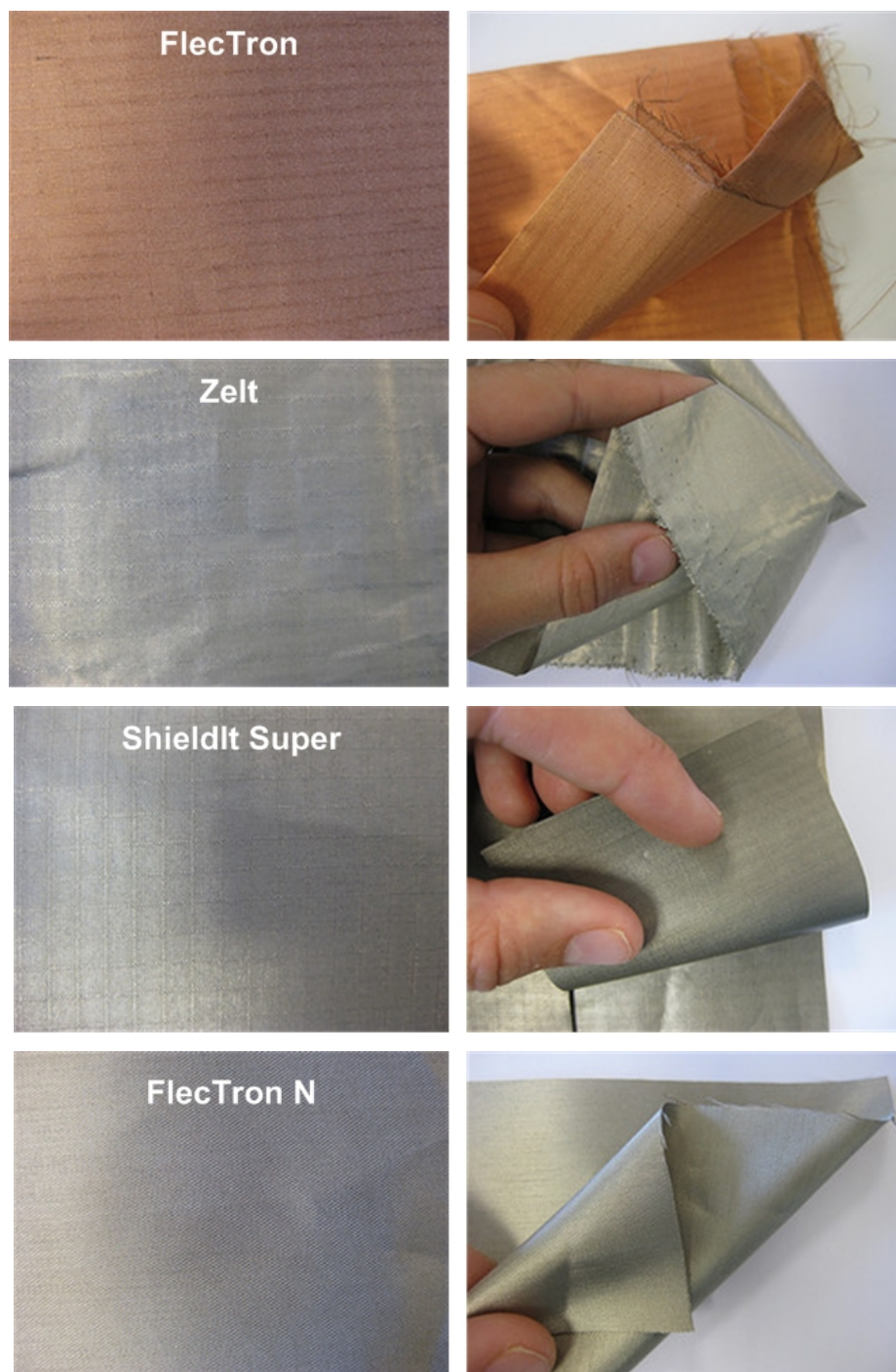
Ανάμεσα σε αυτά είναι τα *Flectron*[®], *Zelt* και *ShieldIt*[™]. Κατασκευάζονται από την Laird Technologies, τα εμπορεύεται η εταιρεία LessEMF [209] και χρησιμοποιούνται κυρίως για εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης. Τα χαρακτηριστικά των υφασμάτων αυτών είναι:

- Το *Flectron*[®] είναι ένα λεπτό επιχάλκωμένο νάιλον ύφασμα με ενίσχυση ripstop. Μπορεί να διπλωθεί και μπορεί εύκολα να κοπεί και να ραφτεί.
- Το *Zelt* είναι επιμεταλλωμένο με χαλκό και κασσίτερο υφαντό νάιλον ύφασμα.
- Το *ShieldIt*[™] είναι ανθεκτικό, επιμεταλλωμένο με νικέλιο και χαλκό πολυεστερικό ύφασμα με ενίσχυση ripstop. Επιπλέον, αυτό το ύφασμα έχει στην πίσω πλευρά του κολλώδες υλικό που λιώνει σε υψηλές θερμοκρασίες, με το οποίο μπορεί εύκολα να σιδερωθεί πάνω σε κάποιο υπόστρωμα, παρέχοντάς μας το τέλειο εργαλείο για να εξασφαλίσουμε τη βέλτιστη επαφή μεταξύ του patch και του υποστρώματος.
- Το *Flectron*[®] N είναι επιμεταλλωμένο με νικέλιο και χαλκό ανθεκτικό πολυεστερικό ύφασμα με ενίσχυση ripstop. Το ύφασμα αυτό υπερέχει από το *Flectron*[®] καθώς είναι περισσότερο αδιαπέραστο από τη λιπαρότητα του δέρματος.

Τα υλικά αυτά παρουσιάζονται στο Σχ. 3.28 και τα χαρακτηριστικά τους καταγράφονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΓΩΓΙΜΩΝ ΥΦΑΣΜΑΤΩΝ

Υλικό	Επιμετάλλωση	Βασικό υλικό	Τύπος ύφανσης	Αντίσταση φύλλου (Ω / sq)
<i>Flectron</i> [®]	χαλκός	νάιλον	ripstop	< 0.10
<i>Zelt</i>	κασσίτερος/χαλκός	νάιλον	απλή	< 0.03
<i>ShieldIt</i> [™]	νικέλιο/χαλκός	πολυεστέρας	ripstop	< 0.10
<i>Flectron</i> [®] N	νικέλιο/χαλκός	πολυεστέρας	ripstop	< 0.03



Σχήμα 3.28: Τέσσερα ευρέως χρησιμοποιούμενα αγωγή υφάσματα από την LessEMF.

Εκτός από τη LessEMF, υπάρχουν κι άλλες εταιρείες που εμπορεύονται αγωγή υφάσματα. Μια από αυτές είναι η ιταλική εταιρεία υφασμάτων Plug and Wear [210], που κατασκευάζει αγωγή υφάσματα από λεπτά μεταλλικά σύρματα, και εμπορεύεται και κάποια από τα αγωγή υφάσματα της LessEMF. Η αμερικανική Shieldex [211] ειδικεύεται στην επιμετάλλωση νημάτων και υφασμάτων ενώ η επίσης

αμερικανική Sparkfun [212] εμπορεύεται μικρές ποσότητες από δύο διαφορετικά είδη αγωγίμου υφάσματος. Η αγγλική Heathcoat [213] περιλαμβάνει λωρίδες από αγωγή κλωστή στα πλεκτά υφάσματά της, ενώ η Toray [214] ενσωματώνει κλωστές X-Static στα υφαντά υφάσματά της.

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ένα αγωγίμο υφάσμα της Plug and Wear για την κατασκευή φορητής κεραίας, και πιο συγκεκριμένα ένα αγωγίμο ύφασμα με προστατευτικό κάλυμμα αλουμινίου (Σχ. 3.29). Το ύφασμα αυτό είναι αγωγίμο από τη μια πλευρά, φτιαγμένο από φύλλο αλουμινίου και ταινία πολυπροπυλενίου ενισχυμένη με υαλονήματα. Επιπλέον είναι πολύ ευλύγιστο, μπορεί εύκολα να κοπεί με το ψαλίδι και να ραφτεί με μια συμβατική ραπτομηχανή.



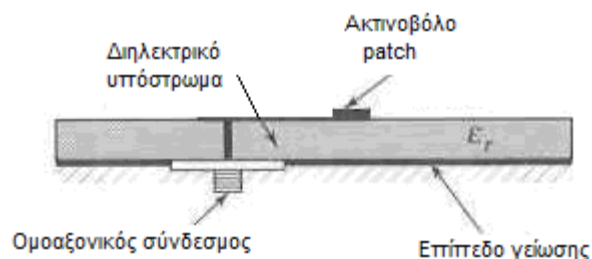
Σχήμα 3.29: Αγωγίμο ύφασμα με προστατευτικό κάλυμμα αλουμινίου της Plug and Wear [210].

3.3.6.4 Τεχνικές τροφοδοσίας φορητών κεραιών

Μια κεραία ακτινοβολεί γιατί τροφοδοτείται με ισχύ. Η διαδικασία αυτής της τροφοδοσίας μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους. Κυρίως κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, τις τεχνικές τροφοδοσίας μέσω επαφής και χωρίς επαφή. Στη μέθοδο μέσω επαφής, η ισχύς τροφοδοτείται απευθείας στο ακτινοβόλο patch από ένα συνδεδεμένο στοιχείο όπως ένα ομοαξονικό σύνδεσμο ή μια γραμμή μικροταινίας. Στη μέθοδο χωρίς επαφή, εφαρμόζεται σύζευξη του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για να μεταφερθεί ισχύς ασύρματα μεταξύ μιας γραμμής μικροταινίας και του

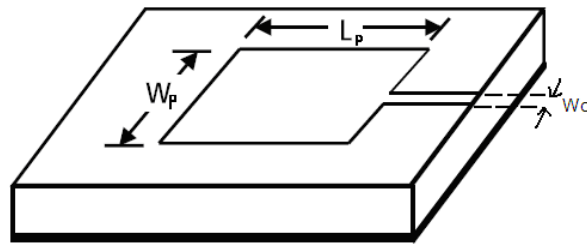
ακτινοβόλου patch της κεραίας. Οι τεχνικές τροφοδοσίας που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διατριβή εξηγούνται συνοπτικά στη συνέχεια και είναι όλες τεχνικές τροφοδοσίας μέσω επαφής.

Ομοαξονική τροφοδοσία (Σχ. 3.30): Αυτή η τεχνική τροφοδοσίας με επαφή είναι η πιο συνηθισμένη για την τροφοδοσία κεραιών μικροταινίας. Ο εσωτερικός αγωγός του ομοαξονικού συνδέσμου εκτείνεται μέχρι το διηλεκτρικό υπόστρωμα και συνδέεται στο patch της κεραίας, ενώ ο εξωτερικός αγωγός συνδέεται στο επίπεδο γείωσης. Μια σχισμή στο επίπεδο γείωσης αποτρέπει το βραχυκύκλωμα μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού αγωγού. Οι συνδέσεις συνήθως γίνονται με κόλληση. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι πως ο σύνδεσμος μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε θέση στο ακτινοβόλο patch, διευκολύνοντας έτσι την προσαρμογή με την αντίσταση εισόδου της κεραίας. Μειονεκτήματα αυτής της μορφής τροφοδοσίας είναι ότι χρειάζεται να ανοιχτεί τρύπα στο υπόστρωμα και ο ρευματοδότης προεξέχει από το επίπεδο γείωσης, με αποτέλεσμα αυτό να μην είναι εντελώς επίπεδο.



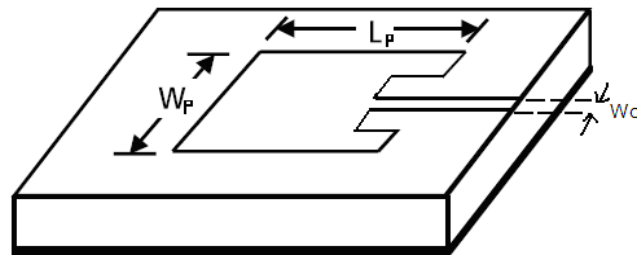
Σχήμα 3.30: Δομή της ομοαξονικής τροφοδοσίας.

Τροφοδοσία μέσω γραμμής μικροταινίας: Η τροφοδοσία γίνεται με μία λεπτή αγωγίμη γραμμή, αρκετά μικρότερου πλάτους (W_o) σε σύγκριση με το πλάτος του ακτινοβόλου patch (W_p), η οποία μπορεί να χαραχτεί στο ίδιο υπόστρωμα με αυτό, επιτρέποντας στην όλη διάταξη να παραμείνει επίπεδη (Σχ. 3.31). Μειονέκτημα όμως αποτελεί το γεγονός πως και η γραμμή τροφοδοσίας ακτινοβολεί, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της ανεπιθύμητης ακτινοβολίας και μείωση της ακτινοβολίας της κεραίας.



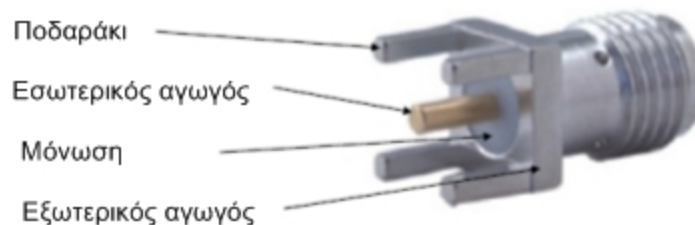
Σχήμα 3.31: Τροφοδοσία κεραίας γραμμής μικροταινίας στην άκρη της πλευράς του patch.

Τροφοδοσία με γραμμή μικροταινίας εισερχόμενη στην πλευρά του patch:
Ένας βελτιωμένος τρόπος τροφοδοσίας είναι αυτός που φαίνεται στο Σχ. 3.32, όπου η γραμμή μικροταινίας εισέρχεται μέσα στο ακτινοβόλο patch. Το μήκος της γραμμής που εισέρχεται επιλέγεται έτσι ώστε η αντίσταση εισόδου της κεραίας να είναι 50Ω . Θα αναφέρουμε περισσότερα για αυτή τη μέθοδο τροφοδοσίας στη συνέχεια.



Σχήμα 3.32: Τροφοδοσία κεραίας γραμμής μικροταινίας εισερχόμενη στην πλευρά του patch

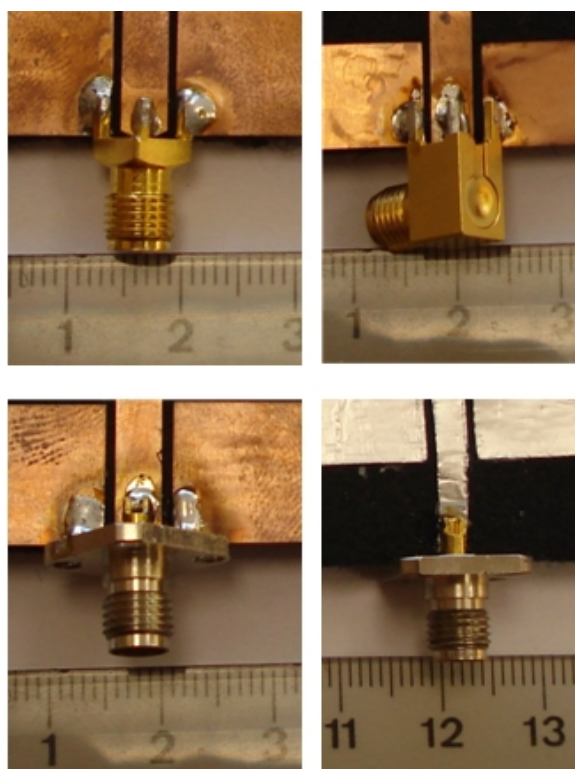
Τροφοδότηση κεραίας



Σχήμα 3.33: Σύνδεσμος SMA.

Όλες οι υφασμάτινες κεραίες που παρουσιάζονται σε αυτή τη διατριβή τροφοδοτούνται είτε απευθείας με σύνδεσμο SMA είτε μέσω μικροταινιακής γραμμής τροφοδοσίας. Ένας σύνδεσμος SMA (SubMiniature Version A) είναι ένας άκαμπτος τύπος ομοαξονικού συνδέσμου (Σχ. 3.33).

Στη διατριβή αυτή χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι συνδέσμου SMA (Σχ. 3.34). Το SMA αποτελείται από μπρούντζο, ενώ στο εσωτερικό του έχει ένα εσωτερικό κύλινδρο από διηλεκτρικό υλικό Teflon ($\epsilon_r = 2.08$, $\tan \delta = 0.0004$). Ο εσωτερικός αγωγός του SMA έχει διάμετρο 1.28 mm. Για τις εφαρμογές στην παρούσα διατριβή, σε κάποιες περιπτώσεις αφαιρέθηκαν κάποια από τα γωνιακά «ποδαράκια». Στην περίπτωση της ομοαξονικής τροφοδοσίας ο εσωτερικός αγωγός εισήχθη μέσω μιας σχισμής στο επίπεδο γείωσης και μέσω του υποστρώματος για να συνδεθεί με το patch της κεραίας. Ο εξωτερικός αγωγός του συνδέσμου συνδέθηκε με το επίπεδο γείωσης της κεραίας, ενώ οι ενώσεις έγιναν με κολλήσεις (Σχ. 3.34).



Σχήμα 3.34: Σύνδεση των SMA με τις κεραίες.

Η παρουσία αυτού του συνδέσμου επιτρέπει την εύκολη σύνδεση με τις συσκευές μέτρησης (VNA) ή με τον πομποδέκτη, παρόλα αυτά είναι μια άκαμπτη συσκευή.

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για την αποφυγή της χρήσης του άκαμπτου SMA με ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τη χρήση σούστας για το κούμπωμα των ρούχων για μετάβαση ομοαξονικού σε μικροταινία [215]. Οι σούστες αρσενικού τύπου περνάνε μέσω τρύπας μέσα από την ταινία φύλλου χαλκού, ενώ οι σούστες θηλυκού τύπου συνδέονται περνώντας τις μεταλλικές ίνες του ομοαξονικού καλωδίου μέσα από τις τρύπες τους (Σχ. 3.35).



Σχήμα 3.35: Τροφοδοσία μέσω σουστών για το κούμπωμα των ρούχων.

3.4 Χαρακτηρισμός του καναλιού διάδοσης πάνω στο σώμα

3.4.1 Μηχανισμός διάδοσης πάνω στο ανθρώπινο σώμα

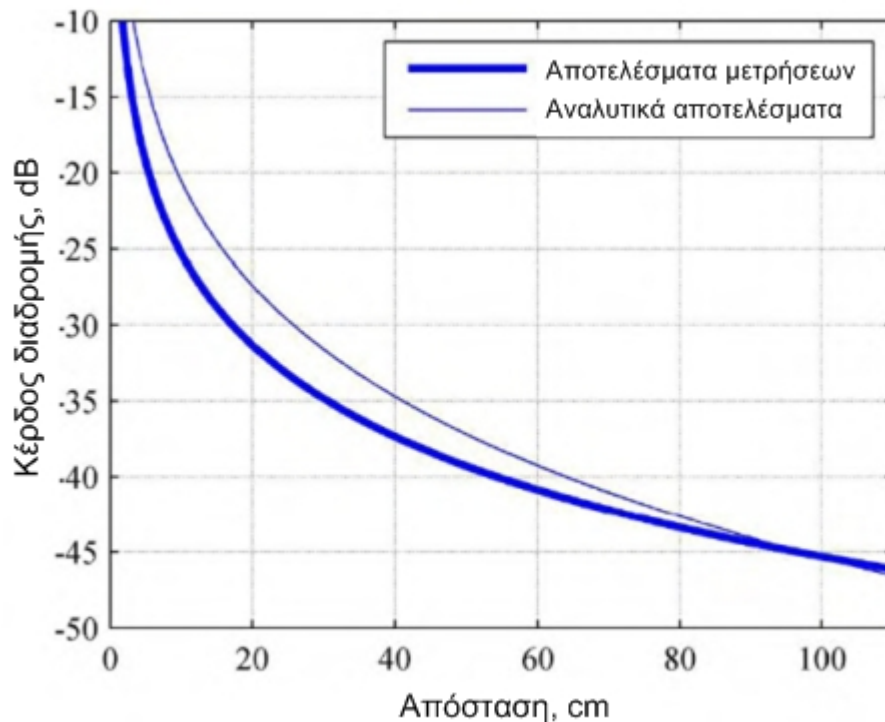
Στις ασύρματες επικοινωνίες, συναντάμε πολλούς μηχανισμούς μετάδοσης. Για παράδειγμα, στα συστήματα κινητών επικοινωνιών, η οπτική επαφή (LOS), οι ανακλάσεις, η περίθλαση και η σκέδαση είναι οι κυριότεροι μηχανισμοί διάδοσης. Η διάδοση των κυμάτων γύρω από το ανθρώπινο σώμα είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα, παρόλο που λαμβάνει χώρα κατά μήκος μικρών διαδρομών. Το εκπεμπόμενο σήμα μεταξύ δύο φορετών ασύρματων συσκευών φθάνει στον προορισμό του με διάδοση μέσω οπτικής επαφής, διείσδυσης μέσα από το σώμα (οι απώλειες μεταβάλλονται με τη συχνότητα), περίθλασης γύρω από το σώμα και ανακλάσεων από την επιφάνεια

του σώματος ή γειτονικούς σκεδαστές στο περιβάλλον ασύρματης επικοινωνίας, όπως τους τοίχους ή το πάτωμα και επίσης μέσω επιφανειακού κύματος πάνω στο σώμα. Συνεπώς ο μηχανισμός διάδοσης γύρω από το ανθρώπινο σώμα εξαρτάται από το μέγεθος του σώματος, τη μορφολογία, τη στάση, το διάγραμμα ακτινοβολίας σε κάθε άκρο του καναλιού, τη συχνότητα και τις παραμέτρους του ανθρώπινου ιστού [216]. Στα δίκτυα BAN, το σώμα πραγματοποιεί ούτως ή άλλως πολλές μικρές κινήσεις, οι οποίες κατά τη διάρκεια των κανονικών δραστηριοτήτων γίνονται πιο έντονες. Συνεπώς, ο χαρακτηρισμός της διάδοσης των κυμάτων πρέπει να λάβει υπόψη του τόσο τη μεταβλητή θέση των συσκευών επικοινωνίας πάνω στο σώμα όσο και τις δραματικές αλλαγές στη γεωμετρία του τοπικού περιβάλλοντος.

Στα περισσότερα κανάλια γύρω από το ανθρώπινο σώμα, οι πολλαπλές διαδρομές παίζουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο μαζί με το κύμα χώρου (space wave), που περιλαμβάνει το απευθείας κύμα, το κύμα που ανακλάται από το σώμα και το επιφανειακό κύμα. Σε κανάλια χωρίς οπτική επαφή (NLOS) μεταξύ πομπού και δέκτη, που δεν υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές, το επιφανειακό κύμα, μπορεί να είναι ο κύριος μηχανισμός διάδοσης. Τα επιφανειακά κύματα ακολουθούν την καμπυλότητα του σώματος. Η διάδοση κυμάτων UWB γύρω από το σώμα, εξετάζεται τόσο αριθμητικά όσο και πειραματικά στα [216], [217] με σκοπό την εξαγωγή ενός μοντέλου καναλιού για εφαρμογές BAN. Το εκπεμπόμενο σήμα περισσότερο περιθλάται γύρω από τον κορμό του σώματος, παρά το διαπερνά, και η απόσταση γύρω από την περίμετρο του σώματος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής. Παρόλα αυτά, η επίδραση των διαφορετικών τύπων και παραμέτρων των κεραιών στο κανάλι δεν εξετάζεται ενδελεχώς, θεωρώντας ότι η κεραία είναι ένα ουσιαστικό κομμάτι του συνολικού συστήματος επικοινωνίας.

Ο Lea στο [218], εξετάζει τα κύματα Zenneck και Norton για κατακόρυφη πηγή σε ένα επίπεδο μοντέλο σώματος. Αυτοί οι δύο τύποι επιφανειακών κυμάτων είχαν αρχικά προταθεί για την κυματική διάδοση πάνω από επίπεδη γη που γενικά αποτελείται από διηλεκτρικό με απώλειες [219], [220]. Καθώς οι ιστοί του σώματος έχουν τις ιδιότητες διηλεκτρικού υλικού με απώλειες, η ύπαρξη των επιφανειακών κυμάτων στην επιφάνεια του σώματος είναι φυσικό επακόλουθο. Έχει δειχθεί ότι το κύμα Norton για το μοντέλο σώματος με στρώματα ιστών προσεγγίζει καλά τις μετρήσεις γύρω από τον κορμό του σώματος, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.36. Οι μετρήσεις έχουν διεξαχθεί στα 2.45 GHz, μέσα σε ανηχικό θάλαμο με δύο

μονόπολα $\lambda/4$ με μικρό επίπεδο γείωσης. Παρόλα αυτά, ο Edwards, [221], δείχνει ότι παρόλη την πιθανότητα ύπαρξης επιφανειακού κύματος στην επιφάνεια του σώματος, εξασθενεί πολύ γρήγορα εξαιτίας της απορρόφησης της ενέργειας από τους ιστούς του σώματος στις μικροκυματικές συχνότητες, π.χ. στα 2.45 GHz.



Σχήμα 3.36: Σύγκριση του αναλυτικού κύματος Norton με τη μέτρηση στενής ζώνης του κέρδους διαδρομής πάνω στο σώμα, στα 2.45 GHz [218].

Ο Rehman, [222], εξετάζει το ρόλο του επιφανειακού κύματος στο κανάλι μεταξύ μέσης και κεφαλιού προσομοιώνοντας την κατανομή ρεύματος που συνδέεται με το επιφανειακό κύμα πάνω σε ένα ανθρώπινο ομοίωμα, τοποθετώντας ένα μεταλλικό εμπόδιο μεταξύ των κεραιών του πομπού και του δέκτη. Έδειξε ότι όταν δεν υπάρχει κενό μεταξύ του σώματος και του εμποδίου, δεν υπάρχει ροή ρεύματος πάνω στο σώμα. Παρόλα αυτά, οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι αυξάνοντας το κενό μεταξύ του εμποδίου και του σώματος στα 20 mm, το κύμα χώρου εμποδίζεται, ενώ το επιφανειακό κύμα διαδίδεται πάνω στο σώμα. Αυτό το έδειξαν, παρουσιάζοντας την κατανομή του ρεύματος πάνω στο σώμα. Το κέρδος διαδρομής σε αυτό το σενάριο είναι σχεδόν 13 dB μικρότερο από το κέρδος στην περίπτωση χωρίς το εμπόδιο.

Η μελέτη [223] περιγράφει μια αναλυτική μέθοδο υπολογισμού της διάδοσης του επιφανειακού κύματος κατά μήκος ενός ομογενούς κυλίνδρου, του μοντέλου ενός χεριού, στο εύρος συχνοτήτων 10-150 MHz και τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν από προσομοιώσεις FDTD. Η συμπεριφορά των συνιστωσών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος και κάθετα στην επιφάνεια του κυλίνδρου εξάχθηκαν και συζητήθηκαν. Ο συγγραφέας του άρθρου υποστηρίζει ότι τα κύματα που διαδίδονται κατά μήκος του μοντέλου του χεριού έχουν τα χαρακτηριστικά της διάδοσης επιφανειακού κύματος. Η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου από την προσομοίωση ενός διπόλου $\lambda/2$ στην επιφάνεια ενός επίπεδου κι ενός κυλινδρικού ομοιώματος δίνεται στην αναφορά [224]. Εξάγεται το συμπέρασμα ότι το επιφανειακό κύμα είναι ο πιο πιθανός μηχανισμός διάδοσης στο περιβάλλον προσομοίωσης στο οποίο δεν υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές. Επίσης, η κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα ομοίωμα με διάφορες στρώσεις ιστών και ένα ομογενές ομοίωμα έχουν συγκριθεί και προέκυψε ότι η χρήση του ομοιώματος στρώσεων μπορεί να διακόψει το επιφανειακό κύμα εξαιτίας της μείωσης των ανακλάσεων από την επιφάνεια του ομοιώματος κάτι που είναι απαραίτητο για τη δημιουργία επιφανειακού κύματος.

Ο Ryckaert, [225], υποστηρίζει ότι ο κύριος μηχανισμός διάδοσης γύρω από το ανθρώπινο σώμα είναι το επιφανειακό κύμα, ακόμα και στην περίπτωση πολλαπλών διαδρομών. Επισημαίνεται ότι το επίπεδο απωλειών διαδρομής του κύματος γύρω από το σώμα, είναι της τάξης των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών για ένα δωμάτιο μεσαίου μεγέθους. Η διασπορά καθυστέρησης (delay spread) για το επιφανειακό κύμα έχει υπολογιστεί και έχει δειχτεί ότι το επιφανειακό κύμα φτάνει στο δέκτη με μια πολύ μικρότερη καθυστέρηση από την πρώτη συνιστώσα πολλαπλών διαδρομών, με αποτέλεσμα μια αύξηση της διασποράς καθυστέρησης.

3.4.2 Χαρακτηρισμός του καναλιού διάδοσης πάνω στο σώμα

Σε αντίθεση με τα συστήματα κινητών επικοινωνιών, όπου η ζεύξη μεταξύ του κινητού και του σταθμού βάσης επηρεάζεται κυρίως από τη σκέδαση εξαιτίας των αντικειμένων στο περιβάλλον διάδοσης και τις παρεμβολές μεταξύ των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών, τα κανάλια on-body επηρεάζονται από την κίνηση του σώματος γύρω από τις κεραιές όπως και από τη θέση των κεραιών στο σώμα.

Υπάρχουν πολλά θέματα που πρέπει να λάβουμε υπόψη μας έτσι ώστε να επιτύχουμε τη βέλτιστη απόδοση για τα κανάλια on-body. Αυτά περιλαμβάνουν την επιλογή της καλύτερης κεραίας, την καλύτερη θέση των κεραιών πάνω στο σώμα, την επιλογή της κατάλληλης συχνότητας, την επίδραση των κινήσεων του σώματος και την επίδραση της σκέδασης εξαιτίας του περιβάλλοντος και του σώματος.

Η καλύτερη θέση για την κεραία πάνω στο ανθρώπινο σώμα είναι μια απαιτητική εργασία καθώς οι διηλεκτρικές ιδιότητες των διαφόρων ιστών του ανθρώπινου σώματος είναι διαφορετικές και επιπλέον το σχήμα και το μέγεθος του σώματος διαφέρει από άνθρωπο σε άνθρωπο. Στο [226] έγινε μια αναλυτική μελέτη μέσω προσομοιώσεων για την καλύτερη θέση τοποθέτησης των κεραιών για ένα σύστημα διαφορισμού καθώς και για το βέλτιστο αριθμό κεραιών που θα χρησιμοποιούνταν. Προέκυψε ότι η καλύτερη θέση των κεραιών είναι στους ώμους, ενώ ο βέλτιστος αριθμός κεραιών είναι τέσσερις, καθώς τα οφέλη για μεγαλύτερο αριθμό κεραιών δεν είναι τόσο σημαντικά ώστε να δικαιολογούν μια πιο ακριβή διάταξη με περισσότερες κεραίες.

Για να προσεγγιστούν τέτοιου είδους θέματα που συνδέονται με τα κανάλια διάδοσης, ο χαρακτηρισμός του καναλιού on-body έχει γίνει τα τελευταία χρόνια το αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητών, είτε μέσω προσομοιώσεων είτε μέσω πραγματικών μετρήσεων. Για την οργάνωση μιας σειράς μετρήσεων για το χαρακτηρισμό ασύρματων συστημάτων BAN, πρέπει να καθοριστούν αρκετά χαρακτηριστικά, όπως το είδος του καναλιού (on-body, off-body ή body-to-body), το είδος και ο αριθμός των φορετών κεραιών, η συχνότητα λειτουργίας, το εύρος ζώνης, το περιβάλλον, η χρήση ομοιώματος ανθρώπου ή όχι κ.α. Το εύρος ζώνης της μέτρησης καθορίζει αν οι μετρήσεις που προέκυψαν είναι στενής ζώνης ή ευρείας ζώνης.

Τα τελευταία χρόνια εξαιτίας της ζήτησης για συστήματα επικοινωνίας με επίκεντρο το χρήστη, πολλές εργασίες ασχολούνται με το χαρακτηρισμό και τη μοντελοποίηση των καναλιών διάδοσης σε δίκτυα WBAN και πραγματοποιούν σειρές μετρήσεων για το σκοπό αυτό. Οι μετρήσεις αφορούν είτε την περίπτωση όπου και οι κεραίες του πομπού αλλά και οι κεραίες του δέκτη βρίσκονται πάνω στο σώμα του χρήστη, δηλαδή το κανάλι είναι το σώμα του χρήστη, είτε την περίπτωση που οι κεραίες του πομπού βρίσκονται εκτός του σώματος και οι κεραίες του δέκτη πάνω

στο σώμα (και αντίστροφα), δηλαδή το σύνθετο κανάλι σώματος - περιβάλλοντος διάδοσης. Για τόσο μικρά δίκτυα, είναι σχετικά δύσκολο να απομονώσουμε τη συμπεριφορά της κεραίας από το κανάλι διάδοσης.

Το κέρδος διαδρομής για διάφορες διαδρομές και στάσεις του σώματος μελετάται στο [227]. Στο [228] παρουσιάζεται ο χαρακτηρισμός και η μοντελοποίηση ενός καναλιού φορετού δέκτη στα 5.2 GHz. Ένα μοντέλο καναλιού, για ασύρματα BAN, στα 400 MHz, 900 MHz και 2.4 GHz με αριθμητικές προσομοιώσεις για τη διάδοση γύρω από το σώμα, παρουσιάζεται από τον Ryckaert [225]. Ο χαρακτηρισμός του καναλιού on-body για σήμα στενής ζώνης στα 2.45 GHz έχει πραγματοποιηθεί στο [227]. Με τον πομπό τοποθετημένο στη ζώνη, χαρακτηρίστηκαν δεκατρία κανάλια, και για το καθένα δόθηκαν οι απώλειες διαδρομής. Στις εργασίες [11], [10], [229] διάφορα είδη κεραιών χαρακτηρίζονται και συγκρίνονται για κανάλια on-body μετρώντας την απόδοση του καναλιού μέσω των απωλειών διαδρομής για διάφορα κανάλια και στάσεις του σώματος. Στην εργασία [230] οι συγγραφείς πραγματοποιούν μετρήσεις UWB στην περιοχή συχνοτήτων 3 – 6 GHz. Οι Cotton και Scanlon έχουν χαρακτηρίσει και παρουσιάσει τα στατιστικά του καναλιού για κανάλια on-body και off-body τόσο στα 846 MHz όσο και στα 2.45 GHz σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου [231], [15]. Παρατήρησαν ότι τα δύο τρίτα των εξεταζόμενων διαδρομών ήταν κατανεμημένα κατά Nakagami- m , και το άλλο ένα τρίτο κατά Rice.

Μετά από ενδελεχή μελέτη της βιβλιογραφίας, παρατηρούμε ότι οι περισσότερες εργασίες επικεντρώνονται στις μη αδειοδοτημένες μπάντες συχνοτήτων ISM των 868 MHz [15], [31], [232], [233] και 2.45 GHz, [234], [235], [236], [237], [238], [239], [240], [241]. Λίγες εργασίες αφορούν άλλες συχνότητες όπως τα 4.5 GHz [242], [243], ενώ μετρήσεις UWB έχουν πραγματοποιηθεί επίσης και στις εργασίες [244], [245].

Στον πίνακα 3.4 περιγράφονται συνοπτικά οι κυριότερες σειρές μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια για απλά κανάλια, για περιπτώσεις on-body, off-body και body-to-body. Η περιγραφή περιλαμβάνει πληροφορίες για το είδος του καναλιού, τη συχνότητα λειτουργίας, τις συνθήκες, το περιβάλλον και την κινητικότητα του χρήστη.

Ο χαρακτηρισμός του καναλιού on-body είναι αυτή τη στιγμή ένα πολύ επίκαιρο θέμα που απασχολεί την έρευνα στην περιοχή των ασύρματων BAN και χρειάζεται αρκετή μελέτη.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4: ΣΕΙΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ BAN

	Συχνότητα φέροντος	Κανάλι	LOS	NLOS	Περιβάλλον	Κινητικότητα
[230]	UWB	on-body	√	√	ανηχωικός	στατικός/ κίνηση χεριών
[31]	868 MHz	off-body	√	√	διάδρομος	κίνηση
[232]	868 MHz	on-body	√	√	ανηχωικός/multipath	κίνηση
[237]	2.45 GHz	on-body	√	-	ανηχωικός/ multipath/αμάξι/υπαίθρια	κίνηση
[15]	868 MHz	off-body	√	√	ανηχωικός/multipath	κίνηση
[246]	2.45 GHz	on-body	√	√	ανηχωικός/multipath	στατικός/ κίνηση
[240]	2.45 GHz	on-body	√	√	υπαίθρια	κίνηση
[135]	2.45 GHz	body-to-body	√	√	multipath	κίνηση
[231]	2.45 GHz	on-body	√	√	ανηχωικός/ multipath/ υπαίθρια	κίνηση
[233]	0.868/2.45 GHz	on-body	√	√	multipath	στατικός/ επιτόπια κίνηση
[238] [235]	2.45 GHz	on-body	-	√	ανηχωικός/multipath	στατικός
[149]	2.45 GHz	on-body	√	√	ανηχωικός/multipath	κίνηση
[243] [242]	4.5 GHz	on-body	√	-	ανηχωικός	κίνηση
[244]	UWB	on-body	√	√	ανηχωικός/multipath	στατικός/ κίνηση
[239]	2.45 GHz	on-body	√	-	multipath/αμάξι/υπαίθρια	κίνηση
[245]	UWB	on-body	√	-	ανηχωικός/multipath	στατικός
[241]	2.45 GHz	on-body	√	√	multipath	κίνηση

3.4.3 Μοντελοποίηση του καναλιού on-body και κατανομές

Η μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα πρέπει να βασίζεται σε ένα συγκεκριμένο σενάριο με σκοπό να αποκτήσουμε αξιόπιστα αποτελέσματα. Επιπλέον, το βασικό θέμα σε σχέση με τη μοντελοποίηση του καναλιού on-body, δεν είναι η χρήση μιας τυχαίας κατανομής για να μοντελοποιήσουμε το κανάλι, αλλά η επιλογή της πιο ικανοποιητικής κατανομής για το σκοπό αυτό, μέσα από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια πολλές κατανομές έχουν

χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν και να μοντελοποιήσουν τα κανάλια πάνω στο σώμα και οι συγγραφείς τους πολύ σωστά έχουν δικαιολογήσει την επιλογή τους με ποσοτική εκτίμηση μέσω ελέγχων καλής προσαρμογής των δεδομένων. Τα άρθρα [12], [149], [230], [232], [233], [237], [239], [240], [241], [242], ασχολούνται με διαφορετικά σενάρια και καθένα από αυτά εξετάζει διαφορετικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα. Όλες αυτές οι μελέτες σχετικά με τη μοντελοποίηση του on-body καναλιού οδηγούν σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά τις κατανομές με μια πρώτη ματιά. Αν ψάξουμε σε βάθος όμως το θέμα αυτό υπάρχει εξήγηση γιατί υπάρχουν διαφορές μεταξύ φαινομενικά παρόμοιων αναλύσεων που σχετίζονται με τα κανάλια on-body και γιατί οδηγούν σε τόσο διαφορετικά αποτελέσματα.

Καταρχάς να τονίσουμε ότι ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στη σωστή διεξαγωγή της ανάλυσης των δεδομένων σε κάθε περίπτωση. Από εκεί και πέρα υπάρχουν πολλοί λόγοι που οι μελέτες που αφορούν τη μοντελοποίηση του καναλιού on-body οδηγούν σε τόσο διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά τις κατανομές. Η γεωμετρία του ανθρώπινου σώματος και το γύρω περιβάλλον, το φύλλο του χρήστη και οι κινήσεις του, όπως και η θέση της κεραίας και η αλληλεπίδραση της με το σώμα είναι οι κυριότεροι παράγοντες που προσδιορίζουν τις συνθήκες που καθορίζουν το χαρακτηρισμό και τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα. Είναι ξεκάθαρο ότι τα αποτελέσματα θα εξαρτώνται από αυτούς τους παράγοντες και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η στατιστική ανάλυση των καναλιών πάνω στο σώμα.

Σύμφωνα με υπάρχουσες μελέτες, δεδομένα που προκύπτουν για διαφορετικούς χρήστες [241], [244], διαφορετικές θέσεις των κεραιών [242], [233], [237], διαφορετικά περιβάλλοντα [237] και διαφορετικά είδη κινήσεων [242], [233], [232] οδηγούν σε διαφορετικά μοντέλα καναλιών. Για παράδειγμα στο [241] τα δεδομένα για μια γυναίκα χρήστη προσαρμόζονται καλύτερα από την κατανομή lognormal, ενώ για έναν άντρα χρήστη τα δεδομένα προσεγγίζονται καλύτερα από την κατανομή gamma. Επιπλέον στο [242] για ένα ακίνητο χρήστη, τα δεδομένα προσεγγίζονται καλύτερα από την κατανομή lognormal, ενώ για πιο δυναμικές κινήσεις, την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα δίνει η κατανομή Weibull.

Παρόλα αυτά, με μια προσεκτική εξέταση των υφιστάμενων μελετών, μπορούμε να πούμε ότι υπάρχουν κάποιες τάσεις όσον αφορά τις κατανομές. Για παράδειγμα,

στις [241], [233] και [237], σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου όπου είναι πιθανό να παρατηρηθεί σκίαση, οι κατανομές lognormal και gamma περιγράφουν τα δεδομένα στις περισσότερες περιπτώσεις. Επιπρόσθετα, στις [232], [239] και [18] η κατανομή Rice προσεγγίζει καλύτερα τα δεδομένα των μετρήσεων σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου, με τον πομπό στη θέση της μέσης και για κινούμενο χρήστη, εξαιτίας των συνθηκών καναλιού LOS. Τέλος, στις [233] και [242] η κατανομή Weibull προσεγγίζει τα σενάρια των μετρήσεων που περιλαμβάνουν επιτόπια δραστηριότητα.

Επιπλέον, οι μετρήσεις διεξάγονται σε διαφορετικά είδη περιβάλλοντος, όπως είναι ο ανηχικός θάλαμος [242], [149], εσωτερικοί χώροι [241], [12] και εξωτερικοί χώροι [237], [240]. Οι μετρήσεις σε ένα ανηχικό θάλαμο, που είναι ένα περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις, έχουν ως σκοπό να ελαχιστοποιήσουν την επίδραση του περιβάλλοντος και να απομονώσουν την επίδραση του σώματος. Ο κυριότερος παράγοντας που επηρεάζει τη λαμβανόμενη ισχύ σε ένα τέτοιο περιβάλλον όταν οι κεραίες τοποθετούνται στον κορμό του σώματος, είναι η παρουσία και η κίνηση του χρήστη. Παρόλα αυτά, τα κανάλια πάνω στο σώμα μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από τη σκέδαση που προκαλείται από το περιβάλλον που βρίσκεται γύρω από το χρήστη. Συνεπώς, έχει μεγάλο ενδιαφέρον να μελετήσουμε και να μοντελοποιήσουμε τις διαλείψεις των καναλιών πάνω στο σώμα σε πιο ρεαλιστικά περιβάλλοντα, όπως είναι οι τοποθεσίες εσωτερικών χώρων.

Αρκετά μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσουν το κανάλι πάνω στο σώμα. Για παράδειγμα η κατανομή Nakagami- m έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για τη μοντελοποίηση του απλού καναλιού πάνω στο σώμα [149], [240]. Στο [149] υποστηρίζεται ότι το μοντέλο Nakagami- m παρέχει την καλύτερη προσαρμογή για την πλειονότητα των καναλιών τόσο για ανηχικά περιβάλλοντα όσο και εσωτερικούς χώρους. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες άλλες κατανομές, όπως οι lognormal, gamma και Rice δίνουν καλύτερα αποτελέσματα [242], [233], [230], [237], [232]. Οι κατανομές lognormal και gamma χρησιμοποιούνται συνήθως για να μοντελοποιήσουν τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading) [239] παρόλα αυτά στα [241], [237], [233] έχει παρατηρηθεί ότι περιγράφουν επίσης και τις διαλείψεις μικρής κλίμακας που οφείλονται σε πολλαπλές διαδρομές του σήματος για κανάλια πάνω στο σώμα. Επιπλέον στο [230],

υποστηρίζεται ότι η κατανομή lognormal περιγράφει καλύτερα την πλειονότητα των καναλιών πάνω στο σώμα για ένα κινούμενο και έναν ακίνητο χρήστη αντίστοιχα σε ένα περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις, ενώ η κατανομή $\text{Nakagami-}m$ δεν έχει καλή προσαρμογή. Από την άλλη, στα [232], [239], [12] υποστηρίζεται ότι η κατανομή Rice είναι αυτή που προσεγγίζει καλύτερα τις μετρήσεις πάνω στο σώμα. Η κατανομή Weibull είναι ένα ευέλικτο μοντέλο διαλείψεων που έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στο παρελθόν για να χαρακτηρίσει τις διαλείψεις μικρής κλίμακας σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου πολλαπλών διαδρομών [247]. Παρόλα αυτά, όσον αφορά τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα, το μοντέλο Weibull σε πολύ λίγες περιπτώσεις περιλαμβάνεται σε ελέγχους καλής προσαρμογής [241], [242], [12] και γενικά δεν παρέχει την καλύτερη προσέγγιση, σε αντίθεση με τα ευρήματά μας. Η κατανομή κ - μ [248], που περιλαμβάνει ως ειδικές περιπτώσεις τις κατανομές Rice και $\text{Nakagami-}m$, έχει πρόσφατα χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει το κανάλι σώμα-προς-σώμα σε ένα εσωτερικό περιβάλλον [135]. Η κατανομή η - μ [248], που περιλαμβάνει ως ειδικές περιπτώσεις τις κατανομές Hoyt και $\text{Nakagami-}m$, θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ένα σενάριο πολλαπλών διαδρομών στην περίπτωση μη οπτικής επαφής (NLOS). Παρόλα αυτά, αυτές οι δύο κατανομές δεν έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι στιγμής για να μοντελοποιήσουν το κανάλι πάνω στο σώμα.

3.5 Εφαρμογές συστημάτων BAN

Οι επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα έχουν μεγάλο φάσμα εφαρμογών. Για παράδειγμα, όπως χαρακτηριστικά αναφέρει στην ιστοσελίδα της η ομάδα εργασίας 6 της IEEE 802.15 (BAN) [160] «αναπτύσσει ένα πρότυπο επικοινωνίας βελτιστοποιημένο για συσκευές χαμηλής ισχύος και λειτουργία πάνω, μέσα και γύρω από το σώμα (αλλά δεν περιορίζεται στους ανθρώπους) για να εξυπηρετήσει διάφορες εφαρμογές όπως ιατρικές, ηλεκτρονικών συσκευών, προσωπικής ψυχαγωγίας κ.α.». Υπάρχει επίσης μεγάλο, αλλά ανεπαρκώς δημοσιοποιημένο ενδιαφέρον από την αμυντική κοινότητα, με έμφαση στον εξοπλισμό του μελλοντικού στρατιώτη με ασύρματα συνδεδεμένες συσκευές on-body. Η περιοχή των ιατρικών δικτύων αισθητήρων φαίνεται να είναι η μεγαλύτερη ίσως πιθανή αγορά με πολλά νέα προϊόντα να λανσάρονται καθημερινά, κάποια από τα

οποία χρησιμοποιούν ή θα χρησιμοποιήσουν μελλοντικά, on-body κανάλια. Οι εφαρμογές των ιατρικών εμφυτευμάτων, της παρακολούθησης ασθενών, των διαγνωστικών συστημάτων και της ιατρικής περίθαλψης ήδη αξιοποιούν αυτή την τεχνολογία. Ψυχαγωγία και προσωποποιημένα πολυμέσα, ασφάλεια, αστυνομία, προπόνηση αθλητών, πυροσβέστες, αναγνώριση ταυτότητας, μόδα και προσωποποιημένες επικοινωνίες είναι λίγες ακόμα περιοχές εφαρμογών όπου οι επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα μπορούν να αξιοποιηθούν. Κάποια παραδείγματα των περιοχών εφαρμογής έχουν ήδη παρουσιαστεί στην παράγραφο 3.1. Τα συστήματα BAN έχουν γίνει μέρος της έρευνας και της ανάπτυξης συστημάτων επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς και θα είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι των μελλοντικών εξατομικευμένων συστημάτων επικοινωνιών.

3.6 Ασύρματα συστήματα πολλαπλών κεραιών παρουσία του ανθρώπινου σώματος

Τα τελευταία χρόνια, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η τεχνολογία των πολλαπλών κεραιών παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον για τα συστήματα BAN, καθώς οι εφαρμογές αυτών των συστημάτων έχουν υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων αλλά και αξιοπιστία της μετάδοσης. Συνεπώς, μεγάλη είναι η εξάπλωση που γνωρίζουν τα συστήματα διαφορισμού. Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας των καναλιών πάνω στο σώμα και των διαλείψεων που αυτά υφίστανται λόγω του σώματος και του περιβάλλοντος, ο διαφορισμός έχει προταθεί από πολλούς ερευνητές για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου. Για τους λόγους αυτούς είναι μεγάλο το ενδιαφέρον που συγκεντρώνει η μελέτη των συστημάτων διαφορισμού πάνω στο ανθρώπινο σώμα. Στη συνέχεια της παραγράφου αυτής, θα κάνουμε μια επισκόπηση των κυριότερων μελετών πάνω στο διαφορισμό και πιο συγκεκριμένα σε αυτές που ασχολούνται με την ανάλυση της απόδοσης του διαφορισμού και με τη μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού για κανάλια πάνω στο ανθρώπινο σώμα.

3.6.1 Κυριότερες σειρές μετρήσεων για συστήματα διαφορισμού πάνω στο σώμα

Ο χαρακτηρισμός και η μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού πάνω στο σώμα, πραγματοποιείται μέσω μετρήσεων. Στις μετρήσεις διαφορισμού για κανάλια πάνω στο σώμα, καταγράφεται η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος των κεραιών. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται συνήθως με τη χρήση VNA και η επεξεργασία και ο συνδυασμός των σημάτων γίνεται off-line.

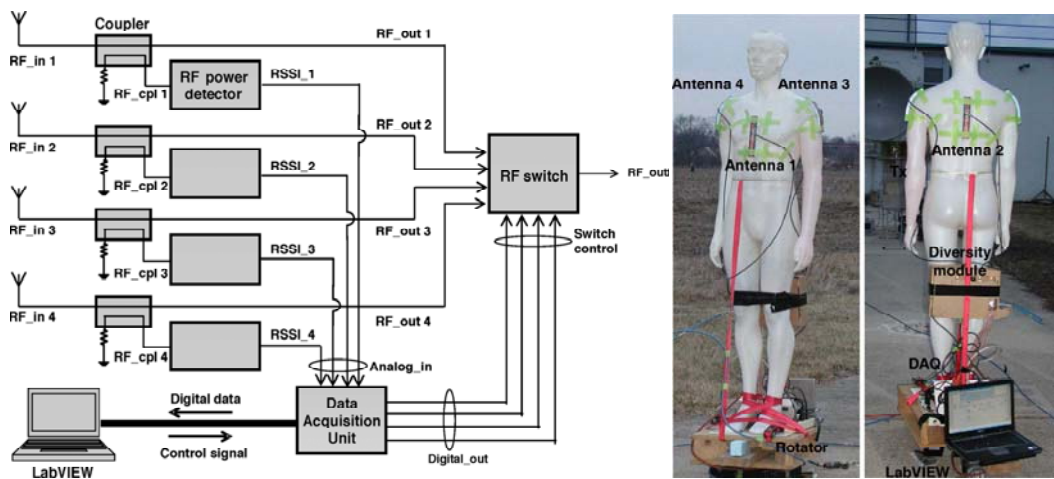
Οι συγγραφείς στα [249], [250] χρησιμοποιούν ένα σύστημα μετρήσεων που βασίζεται σε ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων (Crossbow Micaz) [251]. Οι τέσσερις φορητές κεραιές συνδέονται με τις τέσσερις ασύρματες συσκευές που λειτουργούν ως δέκτες και μετρούν το RSSI (Received Signal Strength Indicator). Η κεραία του πομπού συνδέεται κι αυτή σε μια τέτοια μονάδα. Η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος σε κάθε μια μονάδα του δέκτη στέλνεται σε μια επιπλέον μονάδα που συγκεντρώνει όλη την πληροφορία της ισχύος του σήματος από όλες τις μονάδες του δέκτη και την προωθεί στον υπολογιστή για επεξεργασία. Η χρησιμοποίηση τέτοιων μονάδων αισθητήρων αποτελεί έναν πολύ αποδοτικό τρόπο για την πραγματοποίηση μετρήσεων και τη συγκέντρωση της πληροφορίας διαφορισμού από το ασύρματο κανάλι, λόγω του μικρού μεγέθους τους και της κινητικότητας που επιτρέπουν καθώς δεν είναι συνδεδεμένα με καλώδια.

Στο [32] οι συγγραφείς έχουν αναπτύξει ένα σύστημα μετρήσεων πάνω στο σώμα για ένα 1x2 σύστημα στα 868 MHz. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα φορητό πομπό με μπαταρία και 2 φορητές στοιχειοκεραίες που η καθεμία αποτελείται από τέσσερις ελικοειδείς κεραιές πάνω σε ένα επίπεδο γείωσης 25.4 mm. Κάθε κεραία συνδέεται με το δικό της δέκτη που καταγράφει τα δεδομένα, και πιο συγκεκριμένα την περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος του κάθε στοιχείου για να συνδυαστεί αργότερα στην ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί. Ο πομπός είναι μια RF πηγή/γεννήτρια σήματος NovaSource G6 που συνδέεται με μια κατακόρυφα πολωμένη κεραία $\lambda/4$. Η μονάδα του δέκτη της φορητής διάταξης και εδώ βασίζεται στην αρχιτεκτονική του συστήματος ασύρματων αισθητήρων Crossbow Mica2Dot [252]. Κάθε μονάδα του δέκτη αποτελείται από τη μονάδα παροχής ισχύος. Ένας μετατροπέας A/D χρησιμοποιείται για να κβαντίσει τη λαμβανόμενη τάση RSSI από το RF ολοκληρωμένο κύκλωμα Chipcon CC1000 της κάθε μονάδας. Οι δέκτες ήταν

συνδεδεμένοι με τις τέσσερις κεραίες σε ορθογώνια διάταξη προσαρμοσμένοι σε ένα πουοφάν με πάχος 3mm που εφαρμόζε πάνω στο σώμα του χρήστη.

Στα [17], [18] οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση VNA με δύο θύρες για ένα σύστημα διαφορισμού 1x2 στα 2.45 GHz. Η κεραία του πομπού συνδέεται σε μια γεννήτρια σήματος, η οποία παράγει το επιθυμητό σήμα στα 2.45 GHz. Οι δύο κεραίες του δέκτη συνδέονται στις δύο θύρες του VNA, το οποίο ρυθμίζεται για λειτουργία δέκτη διπλού καναλιού. Ο χρόνος δειγματοληψίας είναι 10 ms και για κάθε μέτρηση καταγράφονται 16010 σημεία.

Στο [226] έχει σχεδιαστεί και αναπτυχθεί ένα 1x4 σύστημα διαφορισμού που χρησιμοποιεί το διαφορισμό επιλογής και λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων 100 MHz – 1000 MHz. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση μετρήσεων με απώτερο σκοπό την αξιολόγηση της χωρητικότητας του καναλιού MIMO. Στο Σχ. 3.37 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος διαφορισμού 4 κλάδων. Στην πλευρά του δέκτη, ένα ποσοστό του RF σήματος από κάθε κεραία δρομολογείται σε έναν RF ανιχνευτή ισχύος. Κάθε ανιχνευτής ισχύος παράγει μια αναλογική τάση RSSI, ανάλογη της RF ισχύος εισόδου. Η τάση RSSI στη συνέχεια ψηφιοποιείται και καταγράφεται από μια μονάδα επίκτησης δεδομένων (DAQ) που συνδέεται με έναν υπολογιστή εφοδιασμένο με το πρόγραμμα LabVIEW. Το LabVIEW χρησιμοποιείται για να επεξεργαστεί τα τέσσερα σήματα RSSI και για να ελέγχει τον 4-σε-1 μεταγωγέα RF. Ο μεταγωγέας RF ελέγχεται από το DAQ για να δρομολογήσει το ισχυρότερο σήμα που επιλέγεται από το LabVIEW. Το υλοποιημένο σύστημα μπορεί να μετρήσει το σήμα RF και να ελέγξει τον μεταγωγέα RF με μέγιστο ρυθμό 10^6 φορές το δευτερόλεπτο. Είναι λοιπόν κατάλληλο για λειτουργία σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη, δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με πραγματικό χρήστη και έτσι δεν επιτρέπεται η κινητικότητα. Επιπλέον χρησιμοποιεί διαφορισμό επιλογής που να μεν είναι η πιο απλή τεχνική και πιο εύκολο να υλοποιηθεί αλλά δεν είναι η βέλτιστη.



Σχήμα 3.37: Σχηματικό διάγραμμα της υλοποιημένης μονάδας διαφορισμού και η διάταξη μετρήσεων διαφορισμού.

Στον πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι σημαντικότερες σειρές μετρήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί για κανάλια διαφορισμού με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, για περιπτώσεις on-body και off-body.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.5: ΣΕΙΡΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ BAN

	$N_T \times N_R$	Συχνότητα φέροντος	Κανάλι	LOS	NLOS	Περιβάλλον	Κινητικότητα
[14]	1x2	2.45 GHz	on-body	√	√	ανηχωικός	√
[234]	1x2	2.45 GHz	on-body	√	√	γραφείο/ ανηχωικός	στατικότητα
[32]	1x2	868 MHz	on-body	√	√	γραφείο/ ανηχωικός	κινητικότητα/ στατικότητα
[249] [250]	1x4	2.45 GHz	off-body	√	√	γραφείο/ διάδρομος	√
[253] [17]	1x2	2.45 GHz	on-body	√	√	multipath	√
[18]	1x2	2.45, 5.8, 10 GHz	on-body	√	-	multipath	√
[226]	1x4	0.4-0.7 GHz	off-body	√	√	multipath/ εξωτερικός χώρος	στατικότητα

Στην παρούσα διατριβή, παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος μετρήσεων με τη χρήση VNA που διαθέτει δύο θύρες για ένα σύστημα διαφορισμού 1x2 στα 2.45 GHz. Ο VNA ρυθμίζεται έτσι ώστε να μπορούμε να πραγματοποιήσουμε ταυτόχρονες μετρήσεις ισχύος στους δύο κλάδους του δέκτη, χωρίς τη χρήση μεταγωγών ή πρόσθετων οργάνων και κυκλωμάτων. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιούμε

μετρήσεις διαφορισμού που είναι ταυτόχρονες, επιτρέπουν την κινητικότητα του χρήστη, ενώ η επεξεργασία και ο συνδυασμός των σημάτων γίνεται off-line. Περισσότερες πληροφορίες για το σύστημα μετρήσεων δίνεται στην παράγραφο 6.3.2.

3.6.2 Μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού του σώματος

Η γνώση του στατιστικού μοντέλου του συνδυασμένου σήματος είναι απαραίτητη για το βέλτιστο σχεδιασμό και την ανάλυση απόδοσης του δέκτη διαφορισμού. Η κατανομή του συνδυασμένου σήματος απαιτείται για τον υπολογισμό μεγεθών όπως η χωρητικότητα καναλιού, το BER, τα στατιστικά δεύτερης τάξης και το κέρδος διαφορισμού για διαφορετικές τεχνικές διαφορισμού. Σε σχέση με το κέρδος διαφορισμού, είναι κοινή πρακτική να εκτιμάται από τις κατανομές των απλών και συνδυασμένων σημάτων. Επιπλέον αν το στατιστικό μοντέλο του σήματος διαφορισμού είναι γνωστό, μπορούμε να υπολογίσουμε τη χωρητικότητα του καναλιού, το BER και τα στατιστικά δεύτερης τάξης μέσω προσομοιώσεων ή και αναλυτικών μεθόδων. Συνεπώς, η κατανομή του σήματος διαφορισμού είναι εξαιρετικής σημασίας και χρησιμότητας.

Στην [32] πραγματοποιείται μια μελέτη χαρακτηρισμού και μοντελοποίησης ενός συστήματος διαφορισμού πάνω στο σώμα σε εσωτερικό χώρο στα 868 MHz. Η εργασία αυτή παρουσιάζει το χαρακτηρισμό της απόδοσης ενός δέκτη διαφορισμού για κανάλια πάνω στο σώμα και θεωρεί τρεις διαδεδομένες διατάξεις διαφορισμού: επιλογής (SC), μεγίστου λόγου (MRC) και ίσης απολαβής (EGC). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για σενάρια τόσο στατικού όσο και κινούμενου χρήστη σε ένα ανηχικό θάλαμο και σε περιβάλλον γραφείου. Το κέρδος διαφορισμού για ένα 1x2 σύστημα που αποτελούνταν από κεραίες τοποθετημένες είτε σε οριζόντια σειρά είτε σε κατακόρυφη σειρά, φάνηκε ότι εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, την κινητικότητα του χρήστη και το επίπεδο της συνεισφοράς των πολλαπλών διαδρομών από το γύρω περιβάλλον. Απομονώθηκε η επίδραση της κίνησης και των εσωτερικών πολλαπλών διαδρομών για το σύστημα διαφορισμού πάνω στο σώμα. Το μέγιστο κέρδος διαφορισμού παρατηρήθηκε για τη διάταξη MRC δύο κλάδων τοποθετημένων σε οριζόντια σειρά, ενώ ο πομπός και ο δέκτης ήταν τοποθετημένοι σε αντίθετες πλευρές του σώματος και ο χρήστης ήταν σε κατάσταση κίνησης στο περιβάλλον του γραφείου. Ο στατιστικός χαρακτηρισμός των διαλείψεων που

εμφανίζουν τα κανάλια διαφορισμού πάνω στο σώμα πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας στατιστικά πρώτης και δεύτερης τάξης για δέκτες διαφορισμού που λειτουργούν με διαλείψεις Nakagami- m .

Όπως είδαμε στη μελέτη [32], μια κατανομή που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το κανάλι του σώματος για ένα σύστημα διαφορισμού είναι η Nakagami- m . Η κατανομή Nakagami- m , είναι μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που έχει χρησιμοποιηθεί πρόσφατα για την μοντελοποίηση καναλιών που περιλαμβάνουν το ανθρώπινο σώμα. Η κατανομή αυτή είναι πολύ δημοφιλής καθώς προσεγγίζει την Rice PDF για $m > 1$, την Rayleigh PDF για $m = 1$ και περιγράφει συνθήκες διαλείψεων που είναι χειρότερες από Rayleigh ($m < 1$) και οι αναλυτικές εκφράσεις δεύτερης τάξης για λήψη διαφορισμού σε διαλείψεις Nakagami- m , υπάρχουν στη βιβλιογραφία [254]. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν πιο γενικευμένες κατανομές όπως είναι οι η - μ (για μη οπτική επαφή), κ - μ (για οπτική επαφή) και α - μ κατανομές και συγκρίθηκαν με την κατανομή Nakagami- m . Η κατανομές αυτές είναι πιο γενικευμένες όπως είπαμε, γιατί περιλαμβάνουν περισσότερους βαθμούς ελευθερίας και έτσι αναμένεται να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα.

3.7 Ανοιχτά θέματα και συνεισφορά διατριβής

Στην ενότητα αυτή συνοψίζουμε τα κυριότερα *ανοιχτά θέματα* και τα ενεργά ερευνητικά θέματα, με ειδική έμφαση σε αυτά που θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια.

Την τελευταία δεκαετία παρατηρείται ένα ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον για τους φορετούς αισθητήρες και τις φορετές συσκευές. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην ιδέα ενός δικτύου BAN. Η επιτροπή IEEE 802.15.6 [160] πρόσφατα ολοκλήρωσε την ανάπτυξη ενός επικοινωνιακού προτύπου βελτιστοποιημένου για τη λειτουργία πάνω στο σώμα (on-body), μέσα στο σώμα (in-body) και γύρω από το σώμα (off-body) για χρήση σε πλήθος εφαρμογών (π.χ. ιατρικές, αθλητικές, εμπορικές κ.α.). Είναι επόμενο λοιπόν, να απαιτείται περισσότερη έρευνα για το σχεδιασμό σύμπακτων (compact) κεραιών, που να προορίζονται για φορετές εφαρμογές, με

σκοπό να μειωθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των κεραιών και του σώματος και να βελτιωθεί η απόδοση τους.

Στην παρούσα διατριβή σχεδιάζονται και κατασκευάζονται φορητές επίπεδες κεραιές με υφασμάτινο υπόστρωμα και υφασμάτινα αγωγίμα μέρη, με σκοπό τη διεξαγωγή μετρήσεων για τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα.

Τέλος ένα ακόμα θέμα που έχει μεγάλο ενδιαφέρον είναι ο χαρακτηρισμός και η μοντελοποίηση του καναλιού του σώματος, είτε αποτελεί το ίδιο το σώμα το κανάλι, είτε είναι μέρος του καναλιού διάδοσης. Η μοντελοποίηση του καναλιού on-body είναι αυτή τη στιγμή ένα πολύ επίκαιρο θέμα που απασχολεί την έρευνα στην περιοχή των ασύρματων BAN και χρειάζεται αρκετή μελέτη. Η μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα είναι απαραίτητη για το σωστό σχεδιασμό του δέκτη του συστήματος. Επιπλέον, ένα καίριο υπό διερεύνηση θέμα είναι η μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα, στην περίπτωση ενός συστήματος πολλαπλών κεραιών. Η γνώση του στατιστικού μοντέλου του καναλιού διαφορισμού είναι απαραίτητη για τη βέλτιστη σχεδίαση του δέκτη διαφορισμού αλλά και για την ανάλυση της απόδοσής του. Η κατανομή των σημάτων διαφορισμού απαιτείται για την εκτίμηση μεγεθών, όπως η χωρητικότητα, το BER, τα στατιστικά μεγέθη δεύτερης τάξης και το κέρδος διαφορισμού.

Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιείται η μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα, όπου νέα σενάρια μελετώνται σε σχέση με την τοποθέτηση των φορητών κεραιών πάνω στο σώμα, τη στάση του σώματος και το περιβάλλον διάδοσης. Επίσης, νέες στατιστικές κατανομές χρησιμοποιούνται, πιο γενικευμένες από αυτές που μέχρι στιγμής έχουν μελετηθεί στη βιβλιογραφία, που τα αποτελέσματα δείχνουν ότι είναι πιο κατάλληλες για τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

Συστήματα MIMO και επικοινωνία κοντά στο ανθρώπινο σώμα

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθεί η περιγραφή της μελέτης που πραγματοποιήθηκε για την επίδραση της παρουσίας του χρήστη στη χωρητικότητα του καναλιού MIMO, για διαφορετικά συστήματα κεραιών (κινητό τερματικό με σύμπακτη συστοιχία κεραιών και συστοιχία φορετών κεραιών). Εξετάστηκαν τρία σενάρια σχετικά με την παρουσία του χρήστη: το πρώτο αντιστοιχεί στη θέση «επισκόπησης πολυμέσων» και, συνεπώς, εξετάζεται η επίδραση του χεριού του χρήστη στην απόδοση του συστήματος, το δεύτερο αντιστοιχεί στη θέση «τσέπης» και συνεπώς εξετάζεται η επίδραση του σώματος του χρήστη, με τη μορφή ενός απλοποιημένου μοντέλου του σώματος και το τρίτο σενάριο συγκρίνει την απόδοση ενός MIMO συστήματος υπό την παρουσία του σώματος του χρήστη, όταν στον εξοπλισμό του χρήστη περιλαμβάνεται ένα κινητό τερματικό MIMO ή μια συστοιχία φορετών κεραιών. Αρχικά, αξιολογούμε την επίδραση του χρήστη στα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών. Στη συνέχεια, τα διαγράμματα ακτινοβολίας ενσωματώνονται σε συγκεκριμένα μοντέλα καναλιού, που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της χωρητικότητας του καναλιού. Όπως προαναφέραμε, επιλέχθηκε ένα στοχαστικό μοντέλο καναλιού, βασισμένο στη συνδιακύμανση (covariance-based), που περιλαμβάνει τα φαινόμενα συσχέτισης μεταξύ των στοιχείων της κεραίας. Το μοντέλο αυτό επιλέχθηκε γιατί είναι επαρκές για πολλά περιβάλλοντα διάδοσης, ενώ είναι απλό και εύκολο στη χρήση. Οι μελέτες μας αναφέρονται σε σύστημα MIMO 4x4, εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά. Στο ένα άκρο του συστήματος μια γραμμική στοιχειοκεραία παίζει το ρόλο του σταθμού βάσης. Στο άλλο άκρο, ανάλογα με το

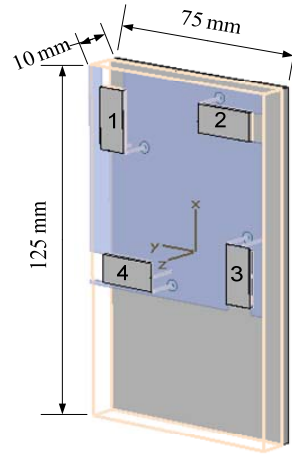
σενάριο που μελετάμε, θεωρούμε, είτε ένα τερματικό PDA (Personal Digital Assistant) με μια στοιχειοκεραία 4 patch στοιχείων, είτε ένα σύστημα φορετών κεραιών. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, οι κεραιές καθώς και τα μοντέλα του χεριού και του σώματος έχουν μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια ενός 3D ηλεκτρομαγνητικού προσομοιωτή, του CST Microwave Studio και έχουν προκύψει τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών, λαμβάνοντας υπόψη την παρουσία του σώματος του χρήστη.

Στην παράγραφο 4.2 περιγράφεται το μοντέλο του τερματικού PDA και η συστοιχία των ενσωματωμένων κεραιών του, όπως σχεδιάστηκε από τα πανεπιστήμια KTH (Kungliga Tekniska högskolan) της Στοκχόλμης και UPM (Universidad Politécnica de Madrid) της Μαδρίτης. Η μοντελοποίηση του καναλιού και ο υπολογισμός της χωρητικότητας του καναλιού MIMO για το μοντέλο καναλιού που έχουμε θεωρήσει περιλαμβάνεται στην παράγραφο 4.3, όπου περιγράφεται επίσης η μεθοδολογία της εισαγωγής των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών μέσα σε αυτά τα μοντέλα. Η παράγραφος 4.4 περιγράφει τα σενάρια αξιολόγησης που μελετήσαμε. Η παράγραφος 4.5 περιλαμβάνει τα αποτελέσματα για τη χωρητικότητα του καναλιού, που προέκυψαν για την περίπτωση που ο χρήστης κρατάει το τερματικό MIMO στη θέση «επισκόπησης πολυμέσων». Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται βασίζονται σε προσομοιώσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών. Εξετάζονται διαφορετικά μοντέλα χεριού και σχετικές θέσεις του χεριού ως προς το τερματικό. Τα αποτελέσματα της χωρητικότητας βασίζονται σε προσομοιώσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών. Η παράγραφος 4.6 αναφέρεται στο σενάριο της θέσης «τσέπης», όπου εξετάζεται η επίδραση του σώματος του χρήστη στη χωρητικότητα του καναλιού MIMO, χρησιμοποιώντας τις προσομοιώσεις των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών. Η παράγραφος 4.7 περιγράφει τη συγκριτική μελέτη της απόδοσης ενός συστήματος MIMO μεταξύ ενός τερματικού MIMO και μιας συστοιχίας φορετών κεραιών, υπό τη παρουσία του σώματος του χρήστη. Το σώμα του χρήστη μοντελοποιείται λεπτομερώς και τα διαγράμματα ακτινοβολίας προκύπτουν από προσομοίωση. Τέλος, η παράγραφος 4.8 συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα.

4.2 MIMO τερματικό και κεραιοσυστοιχία

Για να μελετηθεί η επίδραση της παρουσίας του ανθρώπινου σώματος στην απόδοση του MIMO συστήματος χρησιμοποιείται μία τερματική συσκευή στην οποία τοποθετούνται τέσσερις όμοιες κεραίες όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1 [255]. Οι διαστάσεις της συσκευής αυτής είναι τέτοιες ώστε να ταιριάζουν με αυτές ενός εμπορικού PDA (Personal Digital Assistant). Η σχεδίαση και κατασκευή του πειραματικού PDA έγινε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος ACE2 (Antenna Centre of Excellence) από το εργαστήριο Signal Processing του πανεπιστημίου ΚΤΗ της Στοκχόλμης [256]. Τα στοιχεία της κεραίας του PDA είναι τέσσερα όμοια αναδιπλωμένα PIFA patches σχεδιασμένα για μια εφαρμογή κινητού τερματικού διπλής ζώνης (1800 και 2450 MHz) [257]. Το βάρος στο σχεδιασμό δίδεται κυρίως στην πρώτη ζώνη, ενώ η περαιτέρω μελέτη εστιάζεται στη συχνότητα των 1766 MHz που αποτελεί κανάλι μετάδοσης της άνω ζεύξης στο πρότυπο GSM (κανάλι 791). Περισσότερες πληροφορίες για την τερματική συσκευή και τα στοιχεία της κεραίας παρουσιάζονται στο [258].

Στην παρούσα μελέτη, η μελέτη της επίδρασης του σώματος στο σύστημα MIMO γίνεται μέσω προσομοίωσης με χρήση ηλεκτρομαγνητικών μοντέλων που αναπτύσσονται για το σκοπό αυτό. Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το μοντέλο του PDA με τις PIFA κεραίες που αναπτύχθηκε για το σκοπό αυτό και προσομοιώνει τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του εργαστηριακού πρωτοτύπου. Η πλάκα διηλεκτρικού έχει διαστάσεις 72.5 x 75 mm και στηρίζεται πάνω σε ένα υπόστρωμα διαστάσεων 125 x 75 x 10 mm από ένα αφρώδες υλικό χαμηλής διαπερατότητας ($\epsilon_r = 1.03$) που ονομάζεται Rohacell (PMI). Τα παραπάνω τοποθετούνται πάνω σε ένα μεταλλικό επίπεδο γείωσης ίδιας επιφάνειας με πάχος 3 mm. Η τροφοδοσία της κεραίας γίνεται μέσω ενός χάλκινου σύρματος ακτίνας 0.2 mm το οποίο συνδέει το πάνω μεταλλικό στοιχείο της PIFA με την ομοαξονική τροφοδοσία. Το στοιχείο βραχυκύκλωσης της κεραίας είναι και αυτό σύρμα ίδιας ακτίνας και συνδέει το πάνω μεταλλικό στοιχείο με το επίπεδο γείωσης. Η απόσταση μεταξύ των δύο συρμάτων επιλέγεται τέτοια, ώστε να υπάρχει η βέλτιστη προσαρμογή της καθεμίας κεραίας στην αντίσταση των 50 Ω.



Σχήμα 4.1: Το μοντέλο προσομοίωσης του PDA.

4.3 Χωρητικότητα με χρήση ενός μοντέλου καναλιού που βασίζεται σε πίνακες συνδιακύμανσης

Με τη χρήση του στοχαστικού μοντέλου που αναλύεται παρακάτω μπορεί να υπολογιστεί η χωρητικότητα του MIMO συστήματος, καθώς και η επίδραση που προκαλεί σε αυτήν η παρουσία του χρήστη που κρατάει το PDA. Θεωρείται ότι το PDA λειτουργεί σαν δέκτης (οι κεραίες του είναι κεραίες λήψης).

4.3.1 Μοντέλο καναλιού

Ας θεωρήσουμε ένα σύστημα MIMO επίπεδων διαλείψεων με N_T κεραίες στον πομπό και N_R κεραίες στο δέκτη. Ο πίνακας \mathbf{H} του καναλιού του μοντέλου που βασίζεται στη συνδιακύμανση μπορεί να εκφραστεί ως εξής [259]:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{g} \mathbf{C}_R^{1/2} \mathbf{H}_{\text{iid}} \mathbf{C}_T^{1/2} \quad (4.1)$$

όπου \mathbf{C}_R και \mathbf{C}_T είναι οι $N_R \times N_R$ και $N_T \times N_T$ πίνακες συνδιακύμανσης της κεραίας λήψης και εκπομπής αντίστοιχα. Αυτοί οι δύο πίνακες είναι θετικά ημιορισμένοι ερμιτιανοί (τετραγωνικοί πίνακες που είναι ίσοι με τους ανάστροφους συζυγείς πίνακες του εαυτού τους και έχουν μη αρνητικές ιδιοτιμές) και προσδιορίζουν τη συσχέτιση στο δέκτη και στον πομπό αντίστοιχα. Ο \mathbf{H}_{iid} δηλώνει ένα $N_R \times N_T$

πίνακα από ανεξάρτητες και ταυτόσημα κατανομημένες (i.i.d.) τυχαίες μεταβλητές Gauss και g είναι μια σταθερά κανονικοποίησης, που έχει επιλεχθεί έτσι ώστε να ισχύει $E\{\|\mathbf{H}\|_F^2\} = N_R \cdot N_T$ για ασυσχέτιστες κεραιές (όπου $\|\bullet\|_F$ είναι η νόρμα Frobenius).

Το μοντέλο που περιγράφεται εδώ προϋποθέτει ότι η συσχέτιση μεταξύ των κεραιών λήψης είναι ανεξάρτητη από τη συσχέτιση μεταξύ των κεραιών εκπομπής και αντιστρόφως. Μία τέτοια παραδοχή μπορεί να γίνει αποδεκτή εφόσον οι αποστάσεις μεταξύ των στοιχείων κάθε συστοιχίας τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη, είναι πολύ μικρότερες από την απόσταση μεταξύ των δύο συστοιχιών και συνεπώς η συσχέτιση επηρεάζεται μόνο από παράγοντες που βρίσκονται πολύ κοντά σε κάθε κεραία.

Στο μοντέλο που εξετάζεται θεωρείται ότι το κανάλι παρουσιάζει επίπεδες διαλείψεις τύπου Rayleigh με ομοιόμορφη κατανομή της προσπίπτουσας ισχύος για την αζιμουθιακή γωνία φ στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Δηλαδή η ισχύς του σήματος που φτάνει στον δέκτη για συγκεκριμένη περιοχή πρόσπτωσης, $\Delta\theta$, γύρω από τον ισημερινό (επίπεδο xy), είναι ίδια για όλες τις γωνίες φ (αζιμούθιο) του συστήματος συντεταγμένων. Επίσης δεν υπολογίζονται οι επιπτώσεις του φαινομένου Doppler, κάτι που ισχύει για χρήστες που κινούνται με χαμηλές ταχύτητες (πρακτικά από 0 έως 3 Km/h).

Τα χαρακτηριστικά των κεραιών του PDA, η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ τους καθώς και η επίδραση του χρήστη μπορούν να ενσωματωθούν στην αναπαράσταση του καναλιού υπολογίζοντας τους πίνακες συνδιακύμανσης χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα ακτινοβολίας των στοιχείων. Για να υπολογίσουμε τους πίνακες συνδιακύμανσης ακολουθούμε την προσέγγιση της κατανομής συνεχούς προσπίπτοντος πεδίου και υπολογίζουμε τη συνδιακύμανση μεταξύ του i και j στοιχείου της κεραίας ως συνάρτηση των πεδίων που εκπέμπουν ή λαμβάνουν οι κεραιές από την παρακάτω σχέση [255]:

$$C_R(i, j) = C_T(i, j) = \iint_{\Omega} \mathbf{E}_i(\Omega) \cdot \mathbf{E}_j^*(\Omega) S(\Omega) d\Omega \quad (4.2)$$

Όπου ως $E_i(\Omega)$ και $E_j(\Omega)$ συμβολίζονται οι μιγαδικές τιμές των πεδίων των αντίστοιχων στοιχείων της κεραίας, Ω είναι η παράμετρος της στερεάς γωνίας και $S(\Omega)$ είναι η κοινή συνάρτηση Γωνιακής Πυκνότητας Ισχύος του προσπίπτοντος πεδίου. Εισάγοντας τις σφαιρικές συντεταγμένες, η σχέση (4.2) μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$C_R(i, j) = C_T(i, j) = \int_{\varphi} \int_{\theta} \mathbf{E}_i(\theta, \varphi) \cdot \mathbf{E}_j^*(\theta, \varphi) S(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta d\theta d\varphi \quad (4.3)$$

όπου το $S(\theta, \varphi)$ εκφράζει την κατανομή της ισχύος του προσπίπτοντος πεδίου. Η περιοχή πρόσπτωσης ορίζεται ως:

$$\frac{\pi - \Delta\theta}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi + \Delta\theta}{2}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi \quad (4.4)$$

Έτσι, καθώς το $\Delta\theta \rightarrow 0$ η περιοχή στην οποία προσπίπτει το πεδίο είναι γύρω από τον ισημερινό του σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων και όταν το $\Delta\theta = \pi$ αντιστοιχεί σε πρόσπτωση σε όλη τη σφαίρα. Η κατανομή του $S(\theta, \varphi)$ μπορεί να μοντελοποιηθεί από αρκετές συναρτήσεις (Gaussian, Laplacian, ομοιόμορφη κλπ) και εκφράζεται με πολλούς τρόπους. Στη διατριβή αυτή επιλέγεται η ομοιόμορφη κατανομή, υποθέτοντας το $S(\theta, \varphi)$ ομοιόμορφο στο αζιμούθιο φ και ανεξάρτητο της γωνίας ανύψωσης θ μέσα σε μια δεδομένη περιοχή πρόσπτωσης, δηλαδή $S(\theta, \varphi) = 1/\Omega$, έτσι ώστε $\iint_{\Omega} S(\theta, \varphi) d\Omega = 1$, όπου Ω είναι η στερεά γωνία που αντιστοιχεί στις γωνίες θ και φ . Η επιλογή αυτή ισοδυναμεί τελικά με τη σχέση:

$$S(\theta, \varphi) = \frac{1}{4\pi \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)} \quad (4.5)$$

Έτσι, όταν ισχύει $\Delta\theta=180^\circ$ το $S(\theta, \varphi)$ ισούται με $1/4\pi$ και εξετάζεται η περίπτωση ιστροπικής λήψης.

4.3.2 Υπολογισμός χωρητικότητας

Θεωρούμε ότι ο πομπός (σταθμός βάσης) έχει τέσσερις πλήρως ασυσχέτιστες και χωρίς απώλειες κεραίες καθώς αυτές μπορούν να έχουν ορθογώνια διαγράμματα ακτινοβολίας μεταξύ τους [22]. Έτσι για τον πίνακα συνδιακύμανσης του πομπού ισχύει $C_T = I$, όπου I είναι ο μοναδιαίος πίνακας. Για τον υπολογισμό των στοιχείων συνδιακύμανσης των σημάτων στη λήψη C_R μεταξύ των στοιχείων i και j χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα ακτινοβολίας των στοιχείων του PDA με και χωρίς την παρουσία του σώματος του χρήστη. Έτσι τα χαρακτηριστικά της κεραίας και η επίδραση του σώματος του χρήστη μπορούν να ενσωματωθούν στην αναπαράσταση του καναλιού.

Για να υπολογίσουμε τις τιμές των αντίστοιχων διαγραμμάτων ακτινοβολίας πεδίου $E_\ell(\Omega)$ στην **Error! Reference source not found.**, χρησιμοποιούμε το διάγραμμα κέρδους της κεραίας λαμβάνοντας υπόψη ότι $|E_\ell(\Omega)|^2 = |E_o|^2 \cdot G_\ell(\Omega)$, όπου $G_\ell(\Omega)$ είναι το διάγραμμα κέρδους ισχύος και E_o είναι το πεδίο της ισοτροπικής και χωρίς απώλειες κεραίας. Όλες οι τιμές του πεδίου κανονικοποιούνται σε μια μέγιστη διαθέσιμη διέγερση ισχύος $4\pi/\eta$ (η είναι η εμπέδηση του ελεύθερου χώρου στη θύρα εισόδου της κεραίας), με αποτέλεσμα $|E_o|=1$ και έτσι $|E_\ell(\Omega)|^2 = G_\ell(\Omega)$.

Η χωρητικότητα του καναλιού, υποθέτοντας ότι ο πομπός δεν έχει καμία γνώση του καναλιού, δίνεται από τη γνωστή σχέση (2.28) η οποία παρατίθεται και εδώ για λόγους ευκολίας:

$$C_{MIMO} = \log_2 \det \left(I_{N_R} + \frac{\rho}{N_T} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \quad (4.6)$$

Επειδή ο πίνακας \mathbf{H} έχει υπολογιστεί σύμφωνα με το στοχαστικό μοντέλο καναλιού που βασίζεται στη συνδιακύμανση, η αξιολόγηση της χωρητικότητας του καναλιού περιλαμβάνει τα φαινόμενα της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των στοιχείων

της κεραίας και την επίδραση του σώματος του χρήστη, ανάλογα με το σενάριο που έχουμε θεωρήσει.

4.4 Σενάρια αξιολόγησης συστημάτων MIMO

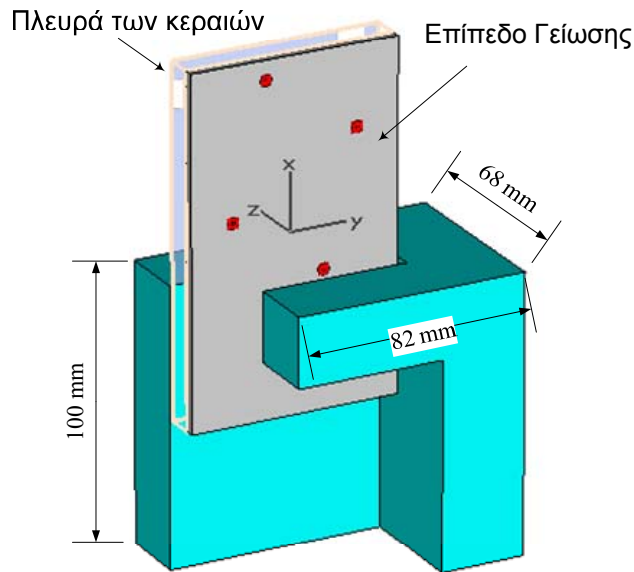
4.4.1 Η επίδραση της θέσης του χεριού στην απόδοση ενός ασυρμάτου τερματικού MIMO

Για να μελετήσουμε την επίδραση του χεριού του χρήστη, επιλέξαμε τη θέση «επισκόπησης δεδομένων», όπως απεικονίζεται στο Σχ. 4.2.



Σχήμα 4.2: Το τερματικό σε θέση «επισκόπησης δεδομένων».

Το χέρι του χρήστη μοντελοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός HM προσομοιωτή ακολουθώντας την ιδέα ενός ομογενούς μοντέλου και βασίζεται στις διαστάσεις που δίνονται στο [259] με κάποιες μεταβολές με σκοπό να μπορεί να κρατά κατάλληλα το PDA. Δοκιμάστηκαν επίσης και κάποια πιο ρεαλιστικά μοντέλα χεριού (π.χ. με δάχτυλα), αλλά τα αποτελέσματα της HM προσομοίωσης ήταν σχεδόν ταυτόσημα με τα αντίστοιχα για το απλοποιημένο χέρι. Συνεπώς, υιοθετήσαμε το τελευταίο μοντέλο για να μπορούμε εύκολα να κατασκευάσουμε ένα πραγματικό ομοίωμα χεριού για πειραματικούς σκοπούς. Οι ακριβείς διαστάσεις του μοντέλου του χεριού, ενώ κρατά το PDA, φαίνονται στο Σχ. 4.3.

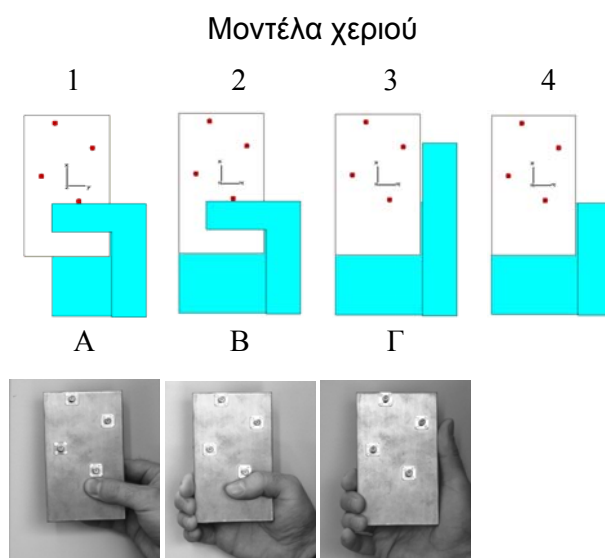


Σχήμα 4.3: Γεωμετρικό μοντέλο του PDA και του χεριού.

4.4.1.1 Μοντέλα χεριού

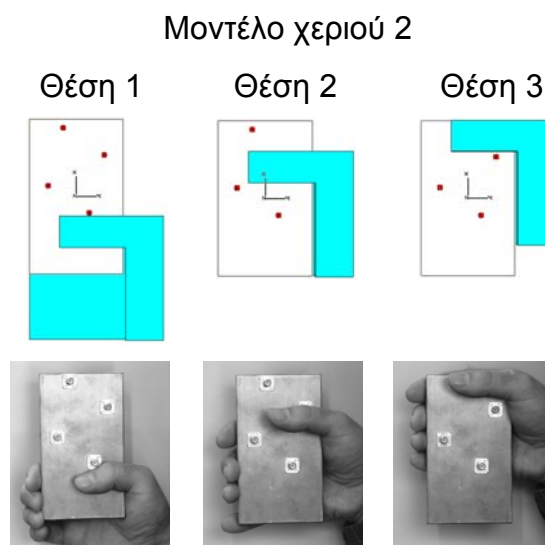
Σε αυτή την παράγραφο εστιάζουμε στην επίδραση της θέσης του χεριού στην απόδοση του συστήματος και ειδικότερα στη χωρητικότητα του καναλιού MIMO. Το χέρι μοντελοποιήθηκε ακολουθώντας το μοντέλο του ομογενούς ιστού ($\epsilon_r = 41$ και $\sigma = 1.4 \text{ S/m}$) στα 1800 MHz [259]. Στο πρώτο μέρος της παρούσας μελέτης, αναπτύχθηκαν τρία διαφορετικά μοντέλα χεριού με σκοπό να προσομοιωθούν οι αντίστοιχες πραγματικές περιπτώσεις (Α, Β και Γ) όπως απεικονίζονται στο Σχ. 4.4. Και στις τρεις περιπτώσεις, το χέρι δεν καλύπτει τα στοιχεία της κεραίας.

Στις περιπτώσεις Β και Γ, σε αντίθεση με την περίπτωση Α, η παλάμη καλύπτει μια μεγάλη περιοχή του PDA. Τα μοντέλα 2, 3 και 4 μοντελοποιήθηκαν έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση της παρουσίας του αντίχειρα του χρήστη στην αξιολόγηση της απόδοσης του τερματικού. Στο μοντέλο 2 ο αντίχειρας έχει τις ίδιες διαστάσεις και την ίδια θέση με το μοντέλο 1, ενώ στο μοντέλο 3, ο αντίχειρας θεωρείται όρθιος. Το τελευταίο μοντέλο (μοντέλο 4) είναι παρόμοιο με τα δύο προηγούμενα μοντέλα, αλλά χωρίς αντίχειρα. Στην πραγματικότητα, η επιφάνεια που είναι τοποθετημένες οι κεραίες καλύπτεται από μια πλαστική θήκη που κρατά το χέρι του χρήστη σε απόσταση από τα στοιχεία της κεραίας. Στην προσομοίωση όλα τα μοντέλα προσεγγίζουν την χειρότερη περίπτωση, καθώς το χέρι έχει απόσταση από το PDA μόνο 2 mm.



Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστικές θέσεις του χεριού ως προς το PDA (περιπτώσεις A, B, Γ) και τα αντίστοιχα μοντέλα (άποψη από την πλευρά του επιπέδου γείωσης).

Στο δεύτερο μέρος της έρευνας, η περίπτωση B του πρώτου μέρους της μελέτης θεωρήθηκε ως μια ρεαλιστική θέση του χεριού ως προς το PDA. Σε αυτό το σημείο, το χέρι τοποθετήθηκε σε τρεις διαφορετικές θέσεις (Σχ. 4.5). Η πρώτη θέση είναι ταυτόσημη με την περίπτωση B που εξετάστηκε προηγουμένως (Σχ. 4.4). Η θέση όπου το κάτω μέρος του χεριού και του PDA είναι στο ίδιο ύψος είναι η δεύτερη (θέση 2), στην τρίτη θέση το πάνω μέρος του χεριού είναι στο ίδιο ύψος με το πάνω μέρος του PDA (θέση 3). Στη θέση 2 το χέρι του χρήστη καλύπτει κάποια από τα στοιχεία της κεραίας ενώ στη θέση 3 το χέρι καλύπτει όλα τα στοιχεία.



Σχήμα 4.5: Τρεις διαφορετικές τοποθετήσεις του χεριού.

4.4.2 Η επίδραση του σώματος του χρήστη στην απόδοση ενός ασυρμάτου τερματικού MIMO

Η επίδραση του χεριού του χρήστη στην απόδοση ενός συστήματος MIMO και ειδικότερα στη χωρητικότητα του καναλιού μελετήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, ενώ το τερματικό θεωρήθηκε ότι βρίσκεται στη θέση «επισκόπησης πολυμέσων». Σε μια τέτοια περίπτωση, η επίδραση της παρουσίας του χρήστη ποικίλλει με τον τύπο και την τοποθέτηση των κεραιών, καθώς και με τη θέση του χεριού ενώ κρατάει το τερματικό. Για παράδειγμα, παρατηρείται κακή προσαρμογή υψηλής εμπέδησης όταν το χέρι αρχίζει να καλύπτει την κεραία .

Ένα ανοιχτό θέμα όμως είναι το πώς ολόκληρο το σώμα του χρήστη επηρεάζει την απόδοση ενός συστήματος MIMO. Σε αυτή την ενότητα, εστιάζουμε στην επίδραση όλου του σώματος στην απόδοση ενός τερματικού MIMO, το οποίο θεωρούμε ότι βρίσκεται στη «θέση τσέπης» (Σχ. 4.6).

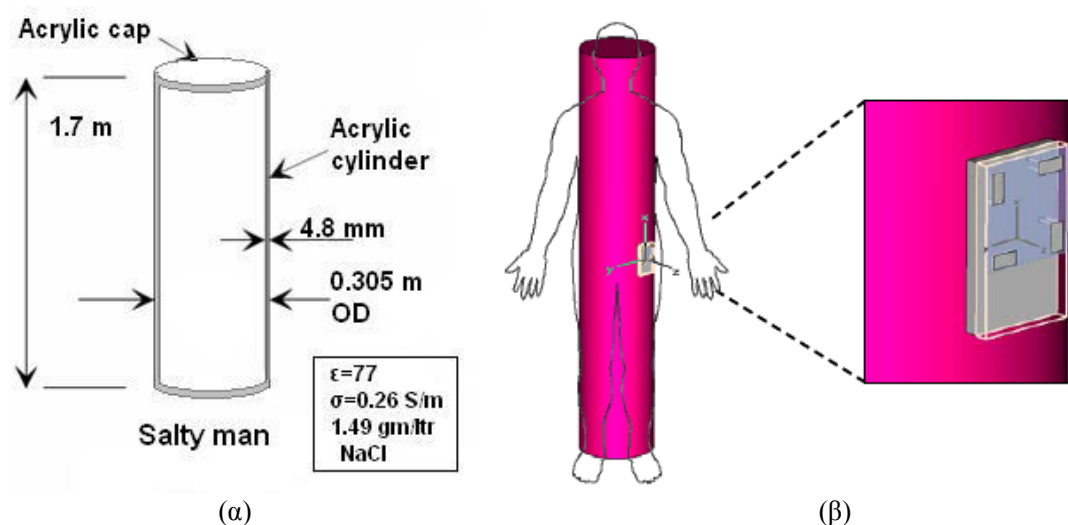


Σχήμα 4.6: Το τερματικό σε «θέση τσέπης».

4.4.2.1 Μοντέλα του σώματος

Το σώμα του χρήστη έχει μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια ενός ΗΜ προσομοιωτή, και είναι βασισμένο στο μοντέλο του «salty man» (Σχ. 4.7α) [144]. Οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν είναι δύο: ένα απλοποιημένο ομοιογενές μοντέλο του ανθρώπινου σώματος, που προσομοιώνεται από έναν απλό διηλεκτρικό κύλινδρο (μοντέλο A1) και το αποκαλούμενο μοντέλο δυο στρωμάτων «salty man», που χρησιμοποιείται συχνά σε μετρήσεις ελέγχου της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας EMC (μοντέλο

A2). Και στις δύο περιπτώσεις, η πλευρά του επιπέδου γείωσης του ήταν στραμμένη προς το σώμα του χρήστη. Το ομοιογενές μοντέλο είχε διηλεκτρικές ιδιότητες παρόμοιες με του ομοιογενούς ανθρώπινου ιστού στα 1800 MHz ($\epsilon_r = 41$, $\sigma = 1.65$ S/m), ενώ το μοντέλο του «salty man» αποτελείται από έναν ακρυλικό κύλινδρο ($\epsilon_r = 77$, $\sigma = 0.26$ S/m) με ακρυλικά καπάκια και στα δύο άκρα του ενώ στο εσωτερικό περιέχει ένα αλατούχο διάλυμα ($\epsilon_r = 4$) του οποίου η συγκέντρωση είναι 1.49 γρ. αλατιού ανά λίτρο αποσταγμένου νερού. Στα Σχ. 4.7α και β παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες του σχεδιασμού και οι διαστάσεις του μοντέλου «salty man» και το μοντέλο προσομοίωσης του σώματος, αντίστοιχα. Ο λόγος για τον οποίο επιλέξαμε το τελευταίο μοντέλο, εκτός από την απλότητά του στα πλαίσια της προσομοίωσης, είναι ότι μπορεί εύκολα να υλοποιηθεί για να πραγματοποιήσουμε επαναλήψιμες μετρήσεις σε πραγματικό περιβάλλον.



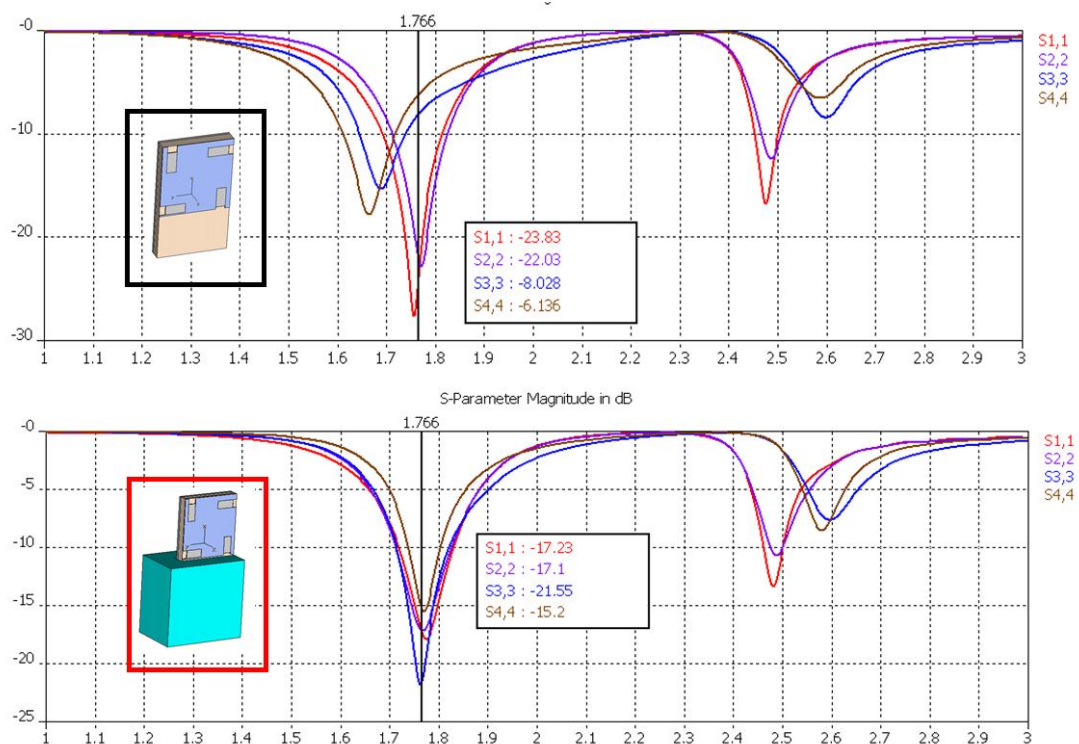
Σχήμα 4.7: (α) Το μοντέλο του Salty man, και (β) το γεωμετρικό απλοποιημένο μοντέλο του σώματος του χρήστη και το τερματικό MIMO σε θέση τσέπης.

4.5 Αποτελέσματα για το τερματικό στο χέρι

Στη συνέχεια αυτής της παραγράφου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των S-παραμέτρων, των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και της χωρητικότητας για την περίπτωση της μελέτης της επίδρασης του χεριού του χρήστη στην απόδοση του τερματικού MIMO.

4.5.1 Προσομοίωση των S-παραμέτρων και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας

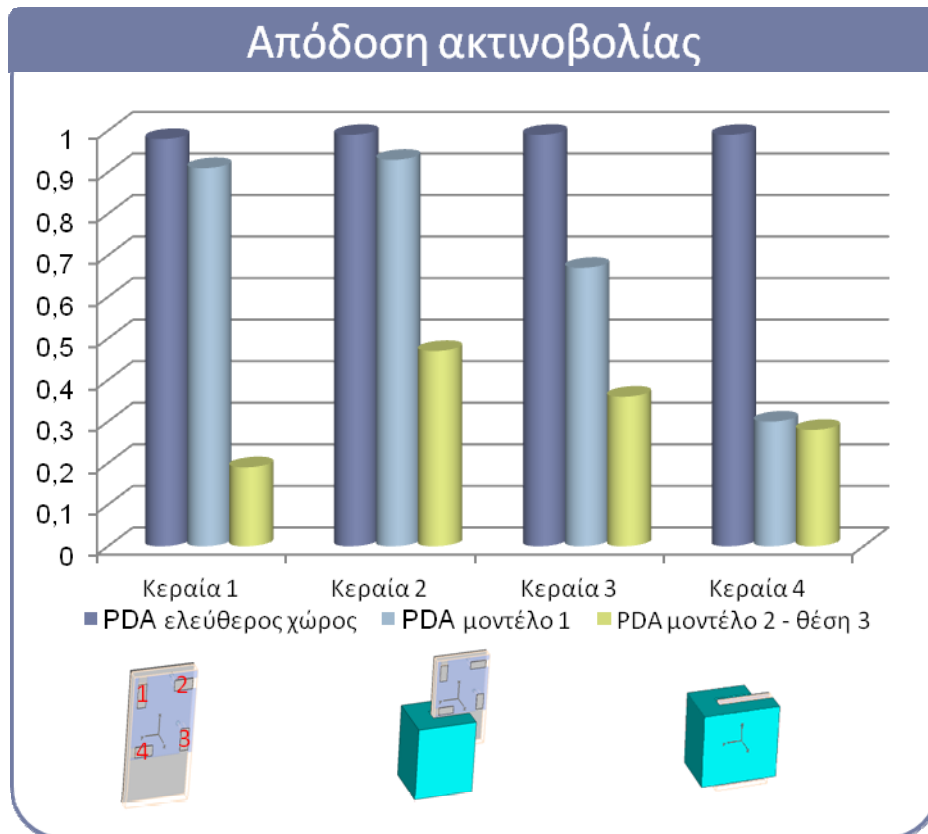
Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα των S-παραμέτρων των στοιχείων της κεραίας του PDA. Παρατηρούμε ότι για τη συχνότητα των 1.766 GHz, έχουμε μείωση του βάθους του συντονισμού για όλα τα στοιχεία της κεραίας, αλλά για τα στοιχεία 3 και 4 που βρίσκονται πιο κοντά στο χέρι του χρήστη, παρατηρείται αποσυντονισμός της συχνότητας.



Σχήμα 4.8: Διαγράμματα S_{ii} των στοιχείων της κεραίας του PDA, στον ελεύθερο χώρο και ενώ είναι τοποθετημένο στο χέρι του χρήστη (Μοντέλο 2).

Στο Σχ. 4.9 παρουσιάζονται οι τιμές της απόδοσης ακτινοβολίας των στοιχείων της κεραίας του PDA όταν είναι στον ελεύθερο χώρο αλλά και όταν είναι τοποθετημένο στο χέρι του χρήστη για δύο διαφορετικές θέσεις. Παρατηρούμε ότι για την περίπτωση του μοντέλου 1, επηρεάζεται κυρίως η απόδοση ακτινοβολίας του στοιχείου 4 που βρίσκεται πιο κοντά στο χέρι του χρήστη, ενώ η απόδοση των στοιχείων 1 και 2 που είναι πιο μακριά από το χέρι, μένει σχεδόν ανεπηρέαστη. Για

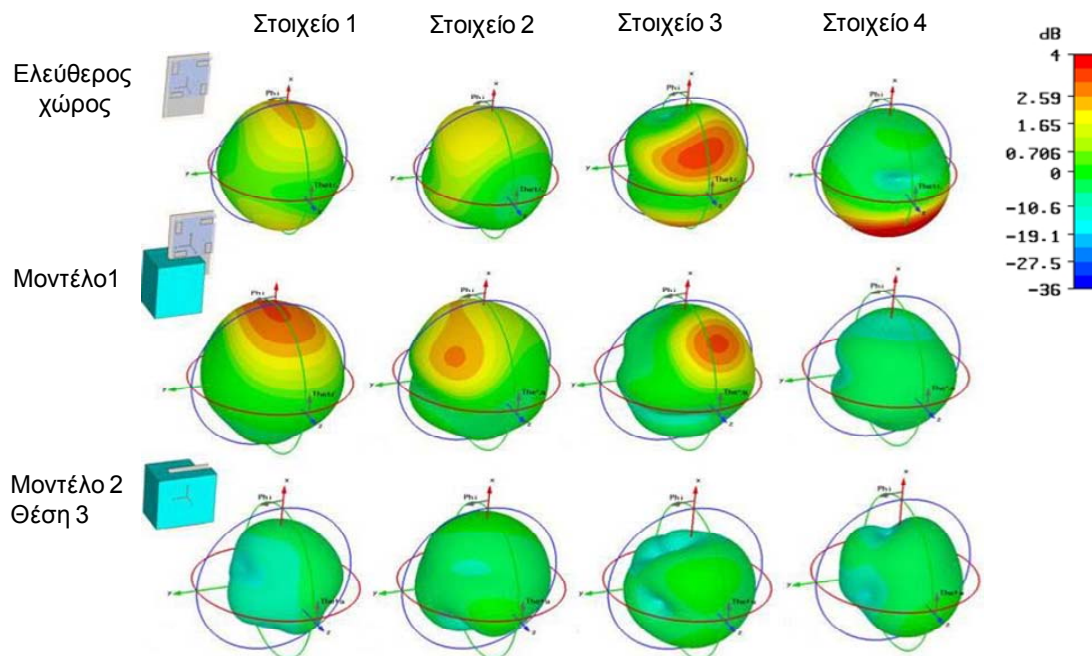
την περίπτωση της Θέσης 3 που είναι και η χειρότερη περίπτωση καθώς καλύπτονται όλα τα στοιχεία της κεραίας, παρατηρούμε ότι η απόδοση ακτινοβολίας όλων των στοιχείων μειώνεται από 53% μέχρι 81%. Σημαντικότερη είναι η μείωση για τα στοιχεία 1 και 4, όπως παρατηρούμε από το Σχ. 4.9, καθώς είναι αυτά που βρίσκονται στην εσωτερική πλευρά της παλάμης του χεριού.



Σχήμα 4.9: Απόδοση ακτινοβολίας των στοιχείων της κεραίας του PDA, στον ελεύθερο χώρο και τοποθετημένο στο χέρι του χρήστη (Μοντέλο 1 και Μοντέλο 2-Θέση 3).

Τα 3D προσομοιωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας των στοιχείων της κεραίας για το PDA στον ελεύθερο χώρο αλλά και με την παρουσία του χεριού στα 1766 MHz παρουσιάζονται στο Σχ. 4.10. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας προέκυψαν διεγείροντας κάθε φορά τη θύρα ενός από τα στοιχεία, ενώ τα υπόλοιπα ήταν τερματισμένα. Μπορούμε να δούμε ότι η παρουσία του χεριού στο μοντέλο 1 επηρεάζει σημαντικά το διάγραμμα του στοιχείου 4, όπως φαίνεται κι από την απόδοση ακτινοβολίας. Επιπλέον επιβεβαιώνεται και γραφικά η σημαντική επίδραση του χεριού στα

διαγράμματα όλων των στοιχείων της κεραίας για τη Θέση 3 και κυρίως των στοιχείων 1 και 4.

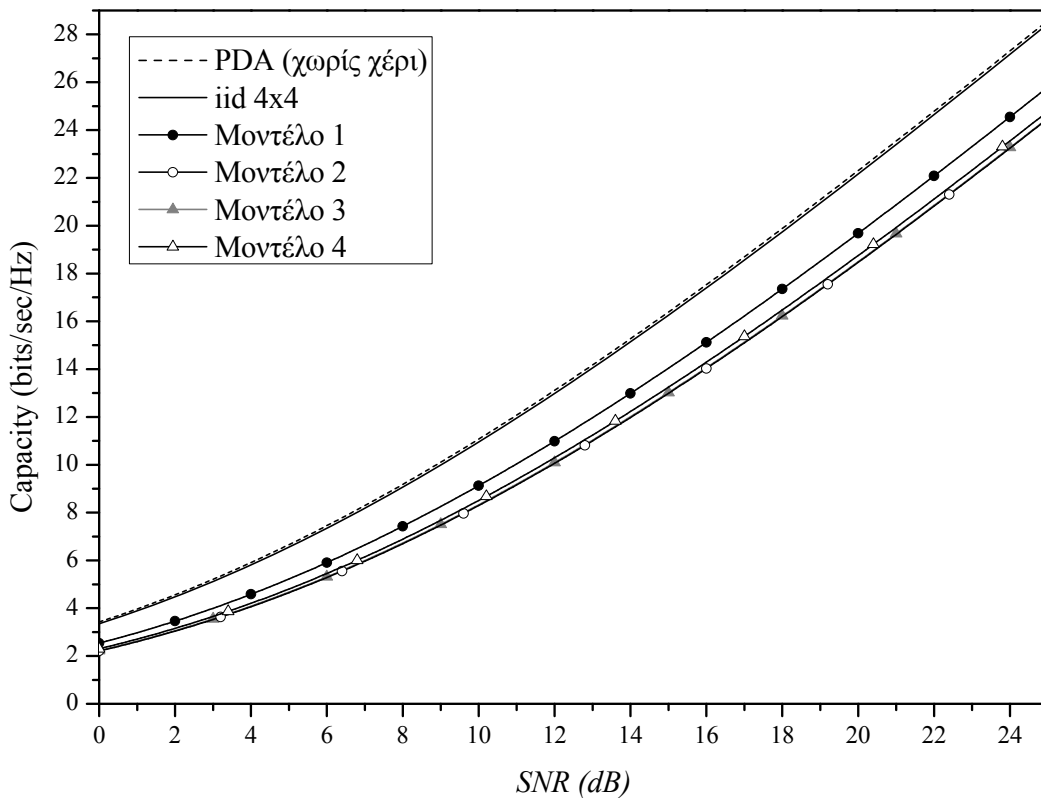


Σχήμα 4.10: Διαγράμματα ακτινοβολίας των στοιχείων της κεραίας του PDA, στον ελεύθερο χώρο και ενώ είναι τοποθετημένο στο χέρι του χρήστη (Μοντέλο 1 και Μοντέλο 2-Θέση 3).

4.5.2 Αποτελέσματα χωρητικότητας για το μοντέλο καναλιού που βασίζεται στους πίνακες συνδιακύμανσης

Η επίδραση του χεριού του χρήστη στη χωρητικότητα του καναλιού MIMO αξιολογείται μέσω ενός μεγάλου αριθμού HM προσομοιώσεων για όλες τις περιπτώσεις της προηγούμενης παραγράφου. Η μια αφορούσε το PDA στον ελεύθερο χώρο («PDA χωρίς χέρι») και οι υπόλοιπες έξι το χέρι του χρήστη να κρατά το PDA σε διαφορετικές θέσεις και με διαφορετικά μοντέλα χεριού, όπως προαναφέρθηκε. Τα διαγράμματα πεδίου που προέκυψαν για κάθε στοιχείο της κεραίας ενσωματώθηκαν στο μοντέλο καναλιού που βασίζεται στη συνδιακύμανση, για να υπολογιστεί η χωρητικότητα του καναλιού MIMO. Ειδικότερα, τα διαγράμματα πεδίου του PDA αλλά και των συνδυασμένων περιπτώσεων χεριού και PDA, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συντελεστών συνδιακύμανσης $C_R(i, j)$, μεταξύ των στοιχείων i

και j . Υπολογίζεται ένας ικανοποιητικός αριθμός υλοποιήσεων του καναλιού και στη συνέχεια υπολογίζεται η χωρητικότητα του καναλιού με παρόμοια διαδικασία όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.

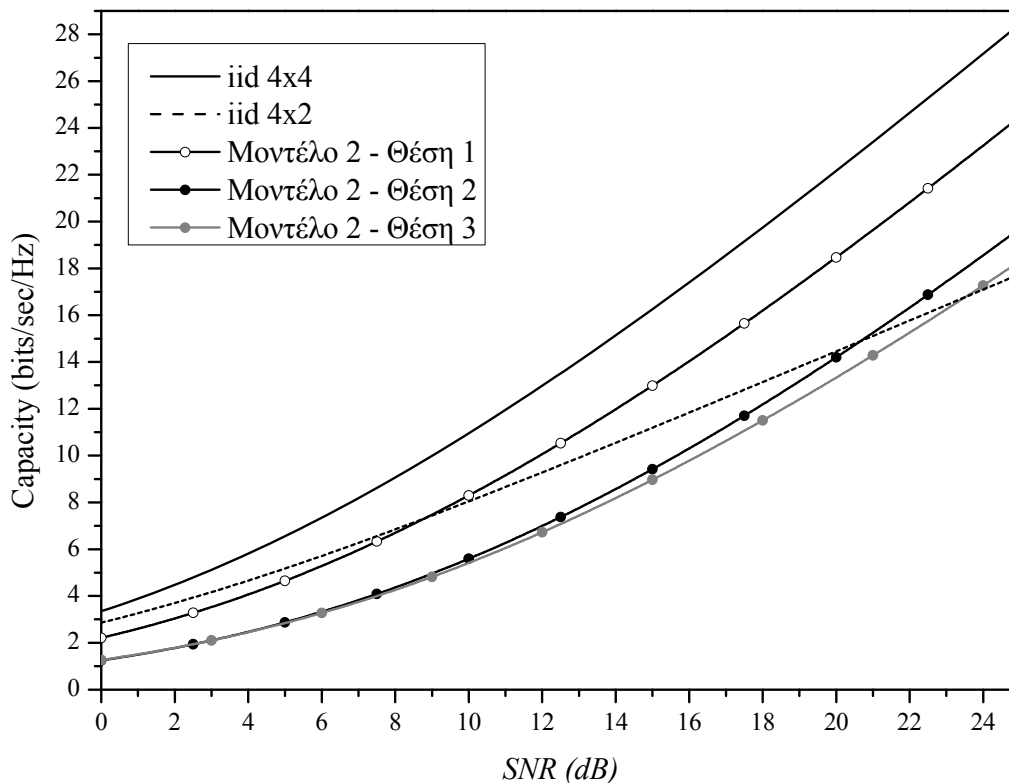


Σχήμα 4.11: Η χωρητικότητα του καναλιού MIMO ως συνάρτηση του SNR για τέσσερα χαρακτηριστικά μοντέλα χεριού (Σχ. 4.4).

Στο Σχ. 4.11 απεικονίζεται η μέση (εργοδική) χωρητικότητα του καναλιού ως συνάρτηση του SNR για το “PDA χωρίς χέρι” και τα τέσσερα μοντέλα χεριού (Σχ. 4.4). Το SNR κυμαίνεται από 0 dB έως 25 dB, ενώ η περιοχή πρόσπτωσης θεωρείται ότι είναι όλη η σφαίρα. Ως περίπτωση αναφοράς, παριστάνεται επίσης και η χωρητικότητα ενός 4×4 i.i.d. καναλιού ως συνάρτηση του SNR. Από το Σχ. 4.11, συγκρίνοντας τις καμπύλες “PDA χωρίς χέρι” and “Μοντέλο 1”, βλέπουμε ότι η επίδραση της παρουσίας του χεριού στη χωρητικότητα του καναλιού MIMO είναι αρκετά σημαντική σε όλο το εύρος τιμών του SNR. Ειδικότερα, η παρουσία του χεριού (Μοντέλο 1) οδηγεί σε μείωση της χωρητικότητας του καναλιού έως περίπου 3 bps/Hz στις υψηλότερες τιμές (~25 dB).

Από το Σχ. 4.11, συγκρίνοντας τις καμπύλες “Μοντέλο 2”, “Μοντέλο 3” και “Μοντέλο 4”, παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση του αντίχειρα (όρθιου ή όχλι) έχει

μηδαμινή επίδραση στη χωρητικότητα του καναλιού, ενώ η απουσία του (Μοντέλο 4) οδηγεί σε ελάχιστη αύξηση της χωρητικότητας του καναλιού MIMO, σε σχέση με τα Μοντέλα 2 και 3. Επισημαίνεται, επίσης, ότι η περίπτωση B (Μοντέλο 2) έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας του καναλιού, σε σχέση με την περίπτωση A (Μοντέλο 1), έως περίπου 1.4 bps/Hz σε υψηλές τιμές του SNR (~25 dB), ενώ δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές μεταξύ των περιπτώσεων B και Γ (Μοντέλα 2 και 3). Συνεπώς, ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη χωρητικότητα είναι η επιφάνεια του PDA που καλύπτεται από το χέρι του χρήστη. Τελικά, παρατηρείται ότι η χωρητικότητα που προκύπτει για το PDA στον ελεύθερο χώρο είναι σχεδόν ταυτόσημη με την αντίστοιχη χωρητικότητα για το κανάλι 4×4 i.i.d. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι παράμετροι προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για το PDA αντιστοιχούν σε κεραιές σχεδόν χωρίς απώλειες, με απόδοση ακτινοβολίας κοντά στο 1 και συσχέτιση μεταξύ των κεραιών μικρότερη του 0.2.



Σχήμα 4.12: Η χωρητικότητα του καναλιού MIMO ως συνάρτηση του SNR για τρεις διαφορετικές θέσεις του χεριού (Σχ. 4.4).

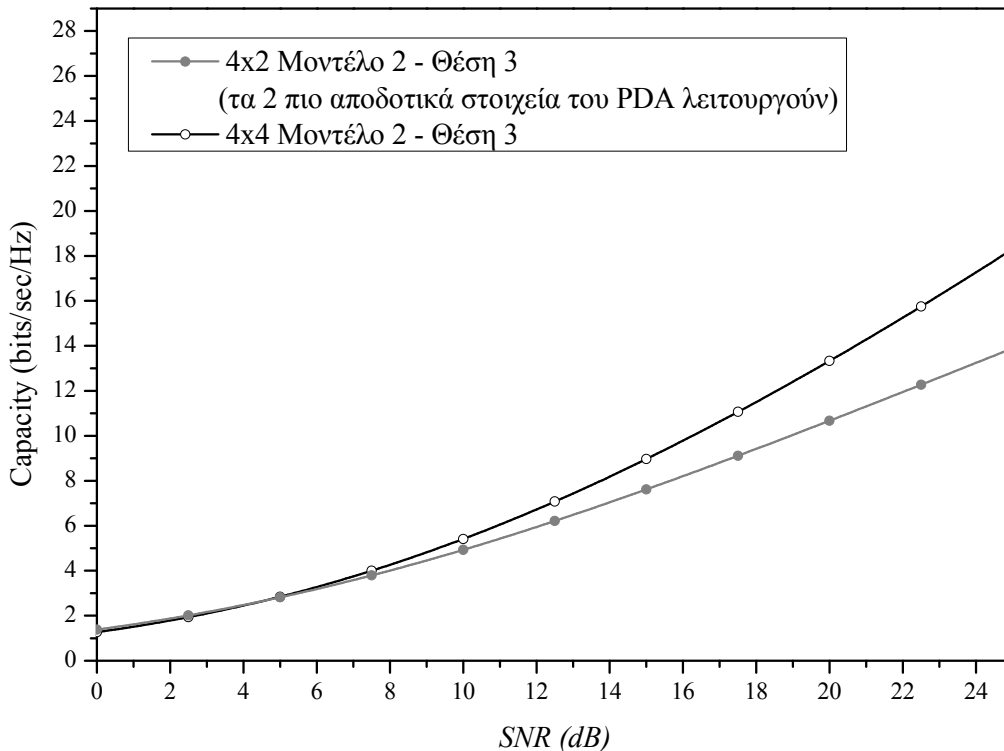
Το Σχ. 4.12 απεικονίζει τη χωρητικότητα του καναλιού ως συνάρτηση του SNR για τις διαφορετικές θέσεις του χεριού, όπως απεικονίζονται στο Σχ. 4.4. Ως

περιπτώσεις αναφοράς περιλαμβάνονται στο γράφημα και οι χωρητικότητες ενός i.i.d καναλιού 4×4 και ενός 4×2 . Είναι εμφανές ότι η χωρητικότητα του 4×4 i.i.d καναλιού είναι σημαντικά καλύτερη από τις χωρητικότητες που αντιστοιχούν στις τρεις διαφορετικές θέσεις του χεριού, για όλο το εύρος τιμών του SNR.

Στο Σχ. 4.12, συγκρίνοντας της καμπύλες για τη Θέση 1 και τη Θέση 2, παρατηρούμε τη σημαντική υποβάθμιση της χωρητικότητας του καναλιού στη δεύτερη περίπτωση. Αυτό συμβαίνει επειδή στη Θέση 2 το χέρι του χρήστη καλύπτει κάποια από τα στοιχεία της κεραίας, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες ακτινοβολούμενης ισχύος και να μειώνεται η απόδοση ακτινοβολίας των συγκεκριμένων στοιχείων. Η υποβάθμιση της χωρητικότητας φτάνει τα 4 bits/sec/Hz, για υψηλές τιμές του SNR (~25 dB). Αν θεωρήσουμε τη χειρότερη περίπτωση, όπου το χέρι του χρήστη καλύπτει όλα τα στοιχεία της κεραίας (Θέση 3), η υποβάθμιση της χωρητικότητας σε σχέση με τη Θέση 1 φτάνει μέχρι τα 6.5 bits/sec/Hz. Η χωρητικότητα του 4×2 i.i.d καναλιού, είναι συγκρίσιμη με τη χωρητικότητα που προκύπτει από τη Θέση 1 του μοντέλου του χεριού για χαμηλές τιμές του SNR (μικρότερες από 10 dB), ενώ για υψηλότερες τιμές, η δεύτερη περίπτωση επιδεικνύει σημαντικά καλύτερη χωρητικότητα. Από την άλλη, η χωρητικότητα του καναλιού που προκύπτει από τη Θέση 3 είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του 4×2 i.i.d καναλιού, για σχεδόν όλο το εύρος των τιμών του SNR που έχουμε θεωρήσει. Η παραπάνω διαπίστωση μας οδήγησε να ελέγξουμε το αν η χρήση των δυο πιο αποδοτικών στοιχείων της κεραίας σε ένα 4×2 σχήμα, θα οδηγήσει σε συγκρίσιμη χωρητικότητα με αυτή που προέκυψε για την περίπτωση της Θέσης 3.

Στο Σχ. 4.13, παρουσιάζεται η μέση χωρητικότητα του καναλιού ως συνάρτηση του SNR, για την περίπτωση της Θέσης 3 (όπου όλα τα στοιχεία της κεραίας καλύπτονται από το χέρι) όταν λειτουργούν είτε όλα τα στοιχεία της κεραίας ή τα δύο με την υψηλότερη απόδοση ακτινοβολίας. Ενώ η χωρητικότητα του καναλιού που προκύπτει όταν υποθέτουμε ότι λειτουργούν όλα τα στοιχεία ξεπερνά τη χωρητικότητα που προκύπτει όταν λειτουργούν τα δύο στοιχεία για υψηλότερες τιμές του SNR, οι δύο καμπύλες είναι συγκρίσιμες και σχεδόν ταυτόσημες για τιμές του SNR χαμηλότερες από 10 dB. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι για χαμηλές τιμές του SNR τα στοιχεία που παρουσιάζουν χαμηλή απόδοση ακτινοβολίας δε συνεισφέρουν στη χωρητικότητα του καναλιού. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί μια τέτοια περίπτωση είναι με κατάλληλο έλεγχο της

απόδοσης των στοιχείων, ώστε όταν η τιμή της πέφτει κάτω από κάποιο κατώφλι, είτε να διακόπτεται η λειτουργία των στοιχείων αυτών, είτε αν έχουν χαμηλή ισχύ να τροφοδοτούνται με περισσότερη ισχύ.



Σχήμα 4.13: Η χωρητικότητα του καναλιού MIMO ως συνάρτηση του SNR για το "Μοντέλο 2-Θέση 3" με 2 ή με 4 στοιχεία να βρίσκονται σε λειτουργία.

4.6 Αποτελέσματα για το τερματικό στο σώμα

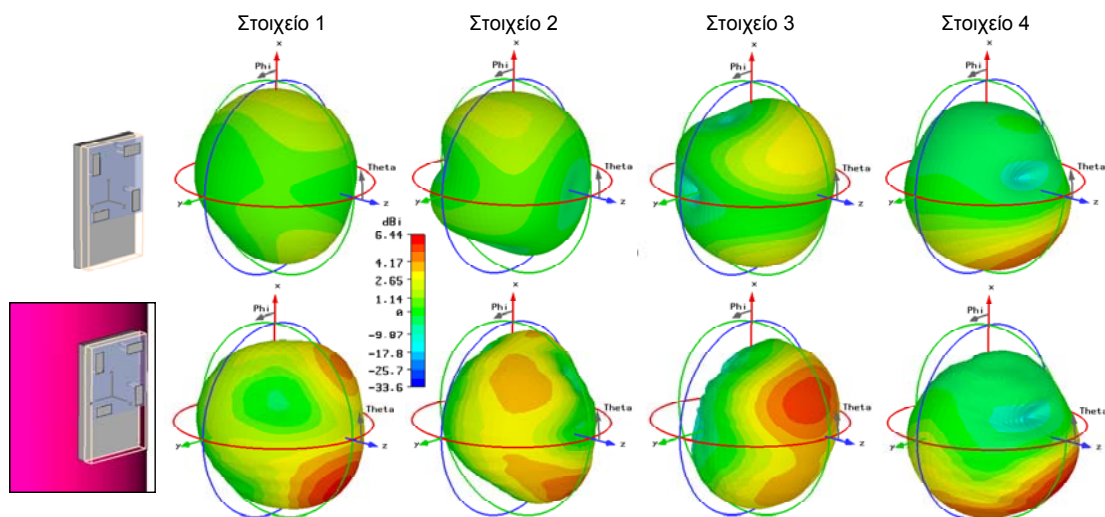
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των S-παραμέτρων, των διαγραμμάτων ακτινοβολίας και της χωρητικότητας για την περίπτωση της μελέτης της επίδρασης του σώματος του χρήστη στην απόδοση του τερματικού MIMO.

4.6.1 Προσομοίωση των S-παραμέτρων και των διαγραμμάτων ακτινοβολίας

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών του τερματικού, εξήχθησαν με και χωρίς την παρουσία του σώματος του χρήστη. Δεν παρατηρήσαμε σημαντικές

διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων για τα μοντέλα A1 και A2. Για την προσομοίωση των HM μοντέλων χρησιμοποιήσαμε έναν υπολογιστή P4 @ 3.2 GHz με 2GB RAM. Ο ολικός χρόνος προσομοίωσης για το μοντέλο A1 ήταν περίπου 12 ώρες και για το μοντέλο A2 ήταν περίπου 40 ώρες. Συνεπώς προτείνουμε τη χρήση του ομοιογενούς μοντέλου, καθώς η προσομοίωσή του απαιτεί λιγότερο χρόνο.

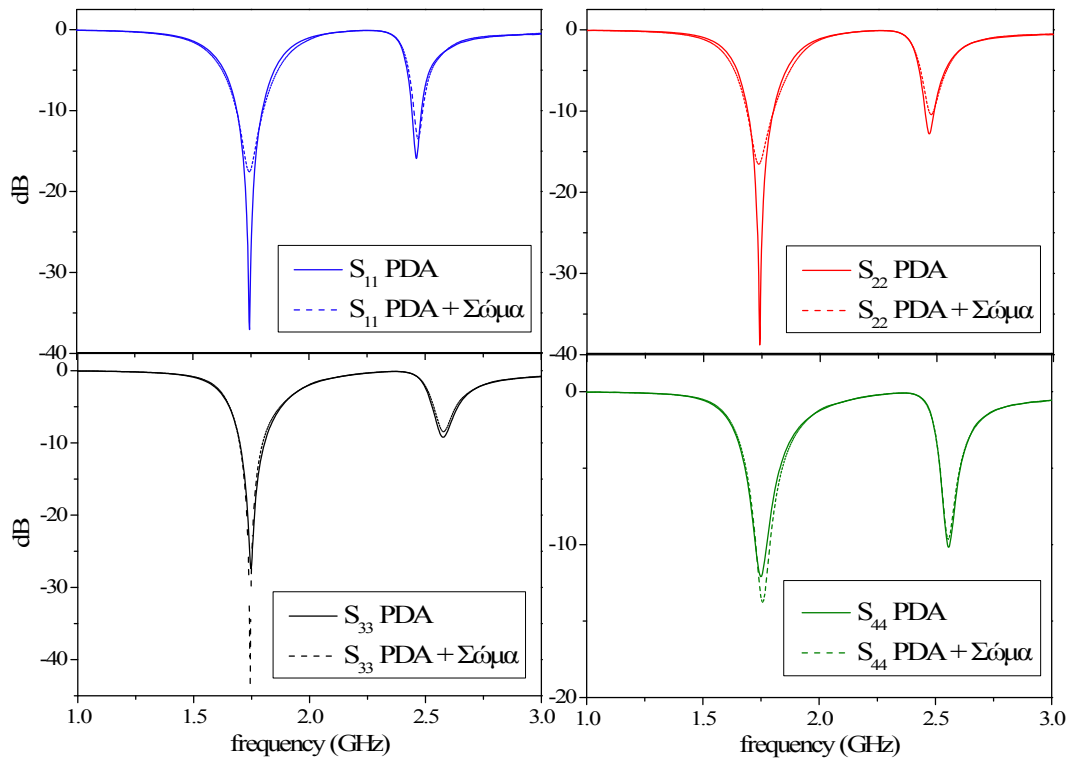
Τα 3D προσομοιωμένα διαγράμματα ακτινοβολίας των στοιχείων της κεραίας για το PDA στον ελεύθερο χώρο αλλά και με την παρουσία του σώματος στα 1766 MHz παρουσιάζονται στο Σχ. 4.14. Τα διαγράμματα ακτινοβολίας προέκυψαν διεγείροντας κάθε φορά τη θύρα ενός από τα στοιχεία, ενώ τα υπόλοιπα ήταν τερματισμένα σε 50Ω. Μπορούμε να δούμε ότι η παρουσία του σώματος επηρεάζει σημαντικά τα διαγράμματα όλων των στοιχείων.



Σχήμα 4.14: Διαγράμματα κέρδους σε dBi για τα 4 στοιχεία για το PDA στον ελεύθερο χώρο και για το PDA με το σώμα.

Μπορούμε να δούμε από το Σχ. 4.15 τις παραμέτρους απωλειών επιστροφής (S_{ii}) σε dB για τα 4 στοιχεία με και χωρίς την παρουσία του σώματος. Θα επικεντρωθούμε στη συχνότητα των 1766 MHz, όπου κανείς μπορεί να παρατηρήσει τον πολύ καλό συντονισμό των στοιχείων. Από το Σχ. 4.15, μπορούμε επίσης να διαπιστώσουμε ότι το εύρος ζώνης απωλειών επιστροφής στα -10 dB δεν επηρεάζεται από την παρουσία του σώματος για κανένα στοιχείο. Αυτό που επηρεάζεται αρνητικά, κυρίως για τα στοιχεία 1 και 2, είναι η προσαρμογή της εμπέδησης. Οι παράμετροι της αμοιβαίας σύζευξης (S_{ij}) που προέκυψαν από την προσομοίωση ήταν σε γενικές γραμμές κάτω

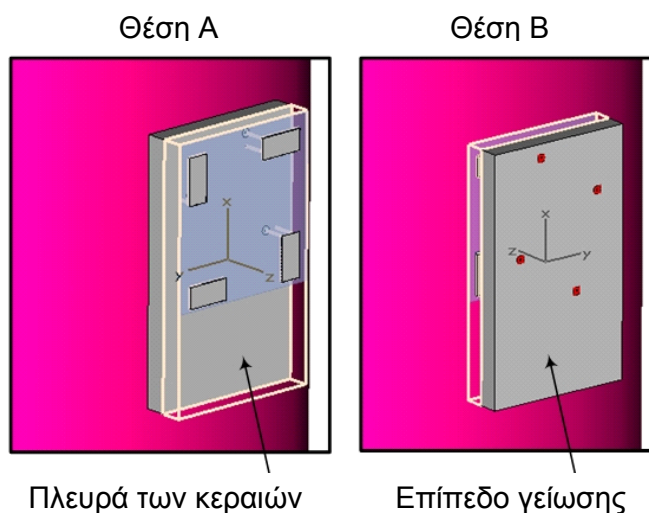
από -11 dB για τα 1766 MHz με και χωρίς την παρουσία του σώματος. Εξαιρέση στο παραπάνω είναι ο συντελεστής S_{23} που βρέθηκε ίσος με -9.6 dB με το σώμα και -9.8 dB χωρίς το σώμα.



Σχήμα 4.15: Οι παράμετροι απωλειών επιστροφής (S_{ii}) με και χωρίς την παρουσία του σώματος για τα 4 στοιχεία της κεραίας.


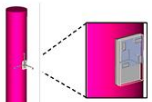
Ένα επιπλέον σενάριο που εξετάσαμε αφορούσε μια διαφορετική τοποθέτηση του PDA σε σχέση με το σώμα. Το μοντέλο του σώματος που χρησιμοποιήσαμε ήταν το μοντέλο ομοιογενούς ιστού (μοντέλο A1), ενώ η πλευρά των κεραιών ήταν στραμμένη προς το σώμα (θέση B). Η θέση B του PDA απεικονίζεται στο Σχ. 4.16.

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζεται η απόδοση ακτινοβολίας της κεραίας του PDA, στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα του χρήστη. Παρατηρούμε ότι η επίδραση του σώματος είναι σημαντική και να κυμαίνεται από 30% μέχρι 44%, με την απόδοση των στοιχείων 1 και 2, που βρίσκονται πιο κοντά στο σώμα, να υποβαθμίζεται περισσότερο.



Σχήμα 4.16: Θέσεις A και B για το μοντέλο σώματος A1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΤΟΥ PDA, ΣΤΟΝ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΧΩΡΟ ΚΑΙ ΤΟΠΟΘΕΤΗΜΕΝΟ ΣΤΟ ΣΩΜΑ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ

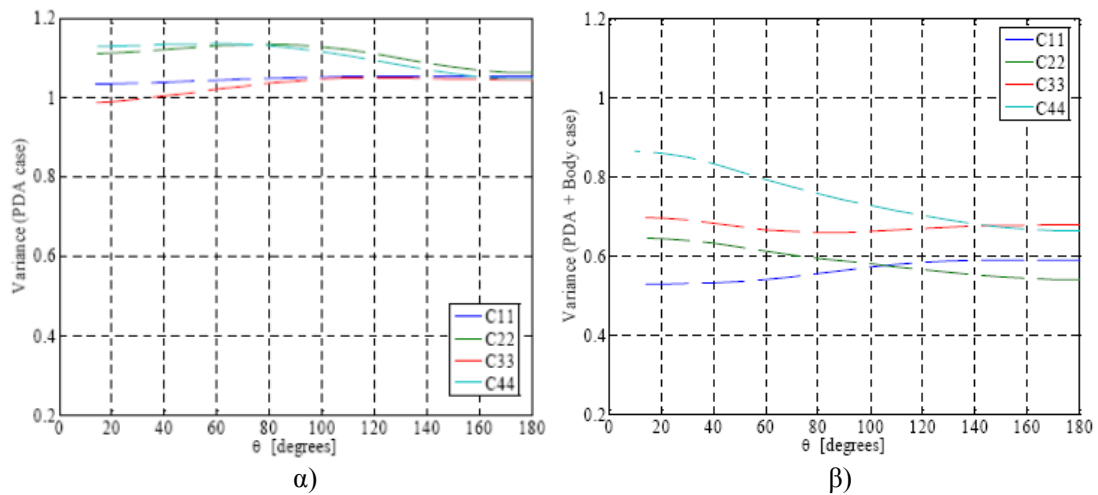
	Στοιχεία			
	1	2	3	4
PDA ελεύθερος χώρος 	0.98	0.99	0.99	0.99
PDA στο σώμα 	0.60	0.55	0.69	0.68

4.6.2 Αποτελέσματα χωρητικότητας για το μοντέλο καναλιού που βασίζεται στους πίνακες συνδιακύμανσης

Πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες τέσσερις ξεχωριστές HM προσομοιώσεις: το PDA στον ελεύθερο χώρο (“PDA”), τα μοντέλα A1 και A2 με το PDA στη θέση A και το μοντέλο A1 με το PDA στη θέση B (Σχ. 4.16). Τα διαγράμματα ακτινοβολίας που προέκυψαν για κάθε στοιχείο της κεραίας, ενσωματώθηκαν σε ένα μοντέλο καναλιού βασισμένο στη συσχέτιση με σκοπό να υπολογιστεί η χωρητικότητα του καναλιού MIMO.

Τα διαγράμματα ακτινοβολίας πεδίου για το PDA αλλά και για τις περιπτώσεις συνδυασμού σώματος και PDA, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των συντελεστών συνδιακύμανσης $C(i, j)$, μεταξύ των στοιχείων της κεραίας i και j . Στη συνέχεια υπολογίστηκε ένας ικανοποιητικός αριθμός από υλοποιήσεις καναλιού καθώς και η αντίστοιχη χωρητικότητα καναλιού με μια διαδικασία παρόμοια με της παραγράφου 4.3.

Οι συντελεστές διακύμανσης $C(i, i)$, τόσο για το PDA όσο και για την περίπτωση του σώματος με το PDA (μοντέλο A1 – θέση A), απεικονίζονται στο Σχ. 4.17α και β αντίστοιχα, ως συνάρτηση της περιοχής πρόσπτωσης, που αναπαριστάται από τη γωνία θ . Επισημαίνεται ότι για $\theta = 180^\circ$, η περιοχή πρόσπτωσης αντιστοιχεί σε όλη τη σφαίρα.

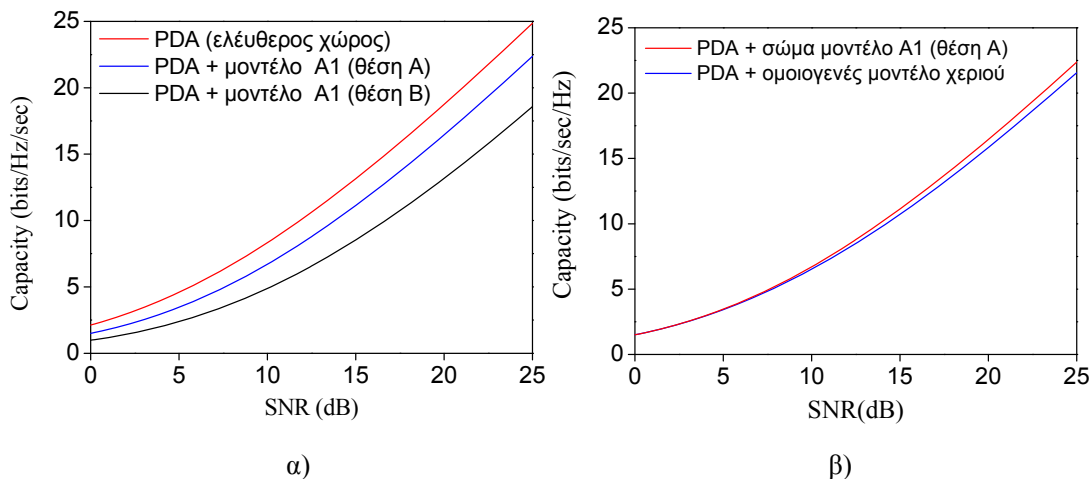


Σχήμα 4.17: Συντελεστές διακύμανσης για την περίπτωση του α) PDA και β) του PDA με το σώμα

Εξαιτίας του γεγονότος ότι και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις (PDA και PDA με σώμα) οι τιμές των συντελεστών συνδιακύμανσης $C(i, j)$, όπου $i \neq j$, ήταν πολύ μικρές, κοντά στο 0.1, δεν απεικονίζονται στο Σχ. 4.17.

Από τα Σχ. 4.17α και β, είναι φανερό ότι η παρουσία του σώματος οδηγεί σε σημαντική μείωση στις τιμές των συντελεστών διακύμανσης. Η μείωση αυτή είναι πιο εμφανής όταν εστιάσουμε στους συντελεστές $C(1,1)$ και $C(2,2)$. Ειδικότερα, ενώ στην περίπτωση που το PDA μελετάται στον ελεύθερο χώρο, οι τιμές των

παραπάνω παραμέτρων είναι γύρω στο 1, στην περίπτωση του συνδυασμού σώματος και PDA οι αντίστοιχες τιμές δεν ξεπερνούν το 0.6 και 0.7 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.18: Η χωρητικότητα του καναλιού συναρτήσεως του SNR α) για τις διαφορετικές θέσεις του PDA και β) για το PDA με το σώμα και το PDA με το χέρι.

Στο Σχ. 4.18α φαίνεται η μέση (εργοδική) χωρητικότητα καναλιού ως συνάρτηση του SNR για το PDA στον ελεύθερο χώρο και για όλες τις περιπτώσεις που μελετάμε. Το εύρος τιμών του SNR κυμαίνεται από 0 dB έως 25 dB, ενώ η περιοχή πρόσπτωσης είναι ολόκληρη η σφαίρα ($\theta = 180^\circ$).

Από το Σχ. 4.18α, συγκρίνοντας τις καμπύλες “PDA (ελεύθερος χώρος)” και “PDA – μοντέλο A1 (θέση A)”, φαίνεται ότι η επίδραση της παρουσίας του σώματος στην χωρητικότητα του καναλιού MIMO είναι αρκετά σημαντική σε όλο το εύρος τιμών του SNR. Ειδικότερα, η παρουσία του σώματος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της χωρητικότητας του καναλιού από 1.6 bit/sec/Hz, δηλαδή μείωση 19%, στις μεσαίες τιμές του SNR (~10 dB) έως περίπου 2.5 bits/sec/Hz, δηλαδή μείωση 10% , στις υψηλότερες τιμές (~25 dB). Στις χαμηλές τιμές του SNR (~0 dB) η αντίστοιχη μείωση είναι περίπου 30 % (0.6 bits/sec/Hz).

Συγκρίνοντας την καμπύλη για το μοντέλο A1 στη θέση B με την καμπύλη για το PDA στον ελεύθερο χώρο (Σχ. 4.18α), παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα υπόκειται σε σημαντική υποβάθμιση σε όλο το εύρος του SNR από 3.4 bits/sec/Hz, δηλαδή 41% στις μεσαίες τιμές του SNR (~10 dB) ως περίπου 6.3 bits/sec/Hz, δηλαδή 25% μείωση στις υψηλότερες (~25 dB). Στις χαμηλές τιμές του SNR (~0 dB) η αντίστοιχη μείωση είναι περίπου 54% (1.2 bit/sec/Hz). Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός

ότι τα στοιχεία της κεραιάς σε αυτή την περίπτωση καλύπτονται από το σώμα του χρήστη.

Επιπρόσθετα, συγκρίναμε την επίδραση του σώματος του χρήστη («θέση τσέπης»-Θέση A) και του χεριού του χρήστη («θέση επισκόπησης πολυμέσων») στη χωρητικότητα του καναλιού, με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους Zervos et al. [257]. Συγκρίνοντας τις αντίστοιχες καμπύλες της χωρητικότητας στο Σχ. 4.18β, επισημαίνεται ότι για τιμές του SNR μικρότερες από 10 dB, η επίδραση του χεριού στη «θέση επισκόπησης δεδομένων» είναι συγκρίσιμη με την απόδοση του σώματος στη «θέση τσέπης», ενώ για υψηλότερες τιμές η χωρητικότητα που έχει υπολογιστεί θεωρώντας την επίδραση του χεριού είναι ελαφρώς χειρότερη από τη χωρητικότητα με την επίδραση του σώματος.

4.7 Συγκριτική μελέτη της απόδοσης συστημάτων MIMO

Με τη χρήση των φορητών κεραιών ολοένα να επεκτείνεται και σε κάποιες περιπτώσεις να αντικαθιστά τη χρήση των συμβατικών κεραιών των συσκευών χειρός, είναι πολύ σημαντικό να μπορούμε να αξιολογήσουμε την απόδοση και τα πλεονεκτήματα των φορητών κεραιών, στην περίπτωση ενός συστήματος MIMO. Στη συνέχεια της εργασίας, θα συγκρίνουμε την απόδοση ενός τερματικού MIMO, ενώ το κρατάει ο χρήστης σε μια τυπική θέση, με την απόδοση ενός συστήματος φορητών κεραιών MIMO, με σκοπό να εξετάσουμε τα πλεονεκτήματα των φορητών κεραιών, σε σχέση με την περίπτωση των τερματικών.

Ως μέτρο αξιολόγησης της απόδοσης του συστήματος MIMO, επιλέγεται η χωρητικότητα του καναλιού. Εστιάζουμε στους παράγοντες που επηρεάζουν τη χωρητικότητα και, συνεπώς, καθορίζουν την επιλογή τύπου κεραιάς για ένα σύστημα MIMO, και μελετούμε την επίδρασή τους. Στο πρώτο μέρος της έρευνας, εξετάζεται η επίδραση της απόδοσης ακτινοβολίας και της συσχέτισης μεταξύ των κεραιών του δέκτη, μέσω της σύγκρισης της απόδοσης δύο συστημάτων MIMO 4x4: το ένα περιλαμβάνει στον εξοπλισμό του χρήστη ένα ασύρματο τερματικό χειρός και το άλλο ένα σύστημα φορητών κεραιών με τον ίδιο τύπο κεραιών, αλλά με αυξημένη απόσταση μεταξύ τους. Στο δεύτερο μέρος της έρευνας μελετήσαμε την επίδραση του

αριθμού των κεραιών, συγκρίνοντας δύο συστήματα φορετών κεραιών MIMO, ένα 6x6 και ένα 4x4 (το ίδιο με το πρώτο μέρος της έρευνας).

Όπως είδαμε, το κοινό χαρακτηριστικό των δύο αυτών συστημάτων που θα εξετάσουμε είναι ότι διαθέτουν τον ίδιο τύπο και αριθμό κεραιών προσαρμοσμένες πάνω στο τερματικό και πάνω στο σώμα. Η μελέτη θα αφορά σε πρώτη φάση ένα 4x4 σύστημα MIMO, όπου στην πλευρά του χρήστη θεωρούμε, αντίστοιχα, για κάθε περίπτωση, είτε το κινητό τερματικό, είτε το σύστημα των φορετών κεραιών. Ο τύπος των κεραιών που χρησιμοποιούμε για λόγους σύγκρισης και στα δύο συστήματα είναι κεραιές PIFA.

Θεωρητικά αυτό που περιμένουμε είναι, στο φορετό σύστημα, να μειωθεί η συσχέτιση μεταξύ των σημάτων και η αμοιβαία σύζευξη μεταξύ των κεραιών (εξαιτίας της απομάκρυνσης των κεραιών) σε σχέση με την περίπτωση του τερματικού. Η παρουσία του σώματος επιδρά και στα δύο συστήματα, με αποτέλεσμα την αύξηση της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των κεραιών και του ανθρώπινου ιστού και τη μείωση της απόδοσης ακτινοβολίας, αλλά είναι ενδιαφέρον να εξετάσουμε τη φύση της επίδρασης αυτής και πώς επηρεάζει το κάθε σύστημα.

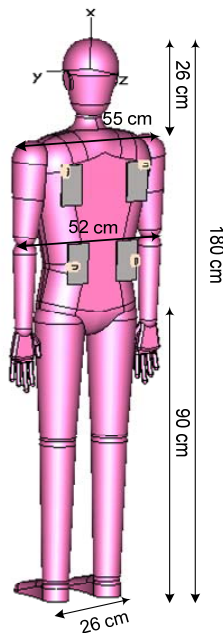
Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των HM μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν στην HM προσομοίωση, κάποιες βασικές πληροφορίες για το μοντέλο καναλιού MIMO και τον υπολογισμό της χωρητικότητας του καναλιού. Επίσης, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τη χωρητικότητα σε σχέση με τη συσχέτιση των σημάτων και την απόδοση ακτινοβολίας, αλλά και τον αριθμό των κεραιών και στο τέλος θα δοθούν κάποια συμπεράσματα από όλη αυτή τη μελέτη.

4.7.1 Μοντέλο του σώματος

Το σώμα του χρήστη έχει μοντελοποιηθεί ως ένα ομογενές ομοίωμα σώματος. Οι διηλεκτρικές ιδιότητες του ανθρώπινου ιστού συναντούν τις απαιτήσεις των προτύπων [143], [143] για το εύρος ζώνης συχνοτήτων της προσομοίωσης (1-3 GHz) στους 20°C.

Οι ακριβείς διαστάσεις του μοντέλου του σώματος με τις κεραιές τοποθετημένες πάνω στην πλάτη του, φαίνονται στο Σχ. 4.19. Οι κεραιές είναι PIFA του ίδιου τύπου που είχαν σχεδιαστεί για το τερματικό χεϊρόν. Παρόλα αυτά οι τέσσερις κεραιές έχουν απομακρυνθεί και το επίπεδο γείωσης έχει διατηρηθεί στο ίδιο μέγεθος για

κάθε στοιχείο με το επίπεδο γείωσης του τερματικού χειρός. Η τοποθέτηση των κεραιών έχει επιλεγεί έτσι ώστε να παρέχει ικανοποιητική απόσταση μεταξύ τους με σκοπό τη μείωση της συσχέτισης των σημάτων και της αμοιβαίας σύζευξης μεταξύ των κεραιών. Η διάταξη των στοιχείων ακολουθεί τη συμμετρία της αρχικής διάταξης πάνω στο τερματικό.

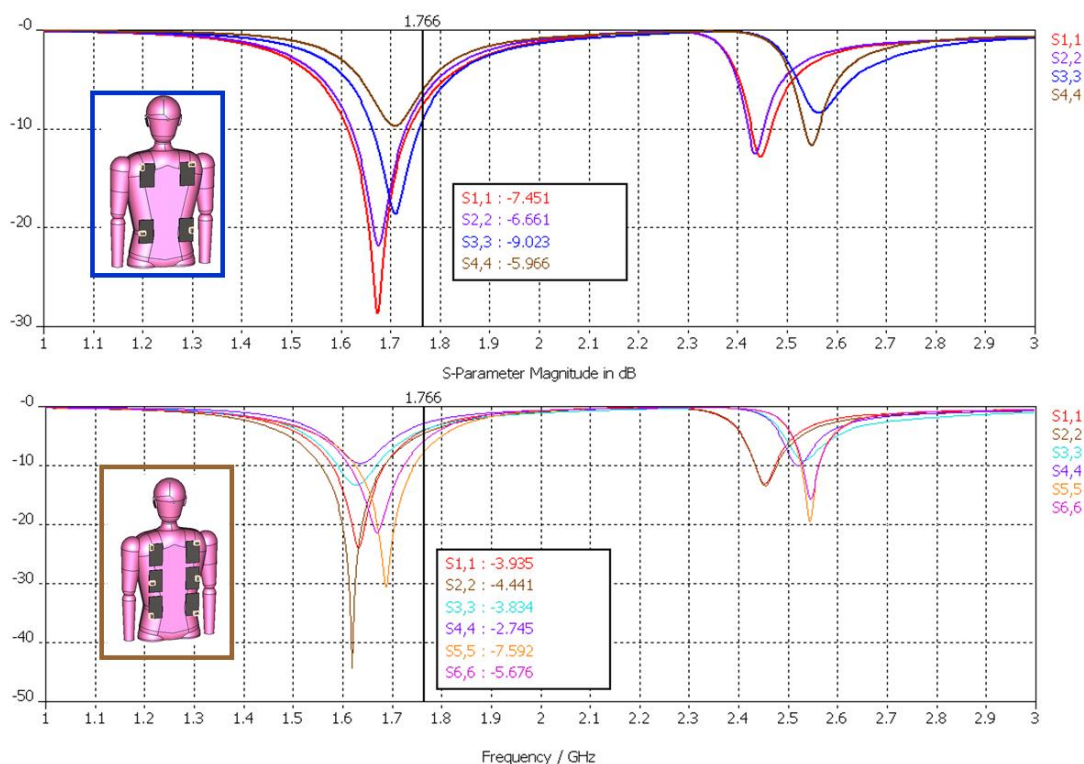


Σχήμα 4.19: Γεωμετρικό μοντέλο του σώματος και οι κεραιές που είναι τοποθετημένες πάνω στο σώμα.

4.7.2 Προσομοίωση διαγραμμάτων ακτινοβολίας και των S-παραμέτρων

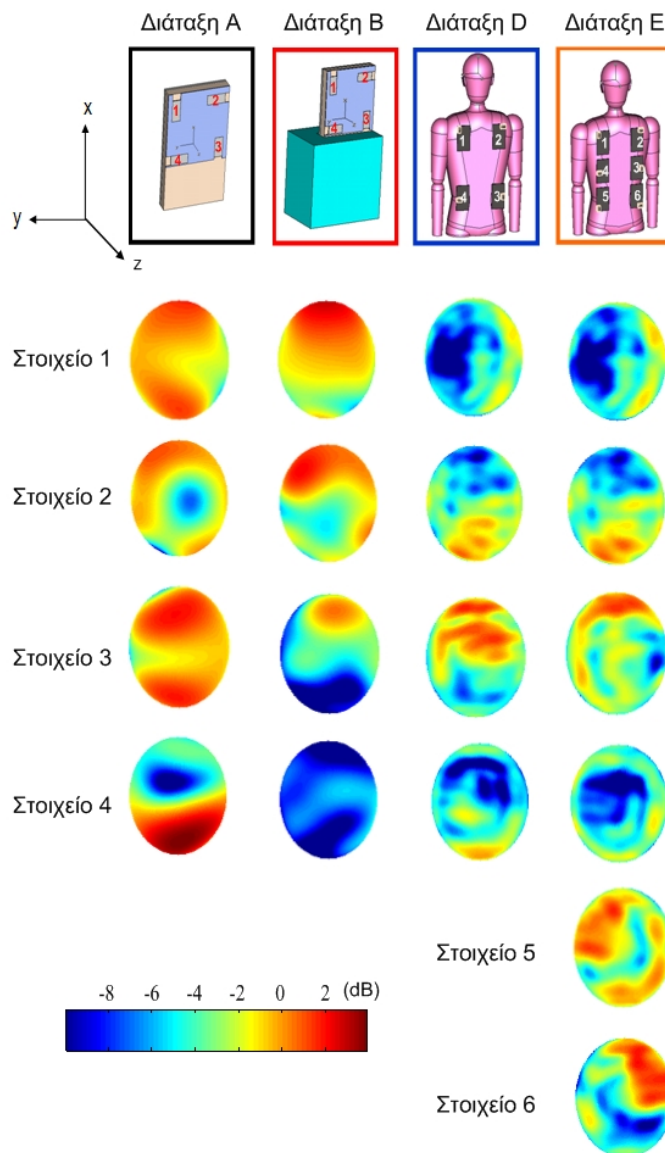
Σε αυτό το σημείο της μελέτης, εξετάστηκαν δύο σενάρια 4x4 συστημάτων: το ασύρματο τερματικό στο χέρι και το φορητό σύστημα κεραιών. Και οι δύο περιπτώσεις προσομοιώθηκαν με και χωρίς την παρουσία του σώματος και του χεριού. Συνεπώς, συνολικά προσομοιώθηκαν τέσσερις περιπτώσεις: Τερματικό χεριός στον ελεύθερο χώρο (A), Τερματικό χεριός στο χέρι (B), 4x4 σύστημα κεραιών στον ελεύθερο χώρο (C), Φορητό 4x4 σύστημα κεραιών πάνω στο σώμα (D). Μια ακόμα περίπτωση, δηλαδή η διάταξη E, αναφέρεται σε ένα φορητό σύστημα κεραιών 6x6 (Σχ. 4.21) και θα εξεταστεί στην παράγραφο 4.7.5.

Στο Σχ. 4.20, παρουσιάζονται οι συντελεστές ανάκλασης για τις περιπτώσεις D και E. Παρατηρείται ένας αποσυντονισμός όλων των στοιχείων της κεραίας του PDA, που δείχνει το μέγεθος της επίδρασης του σώματος του χρήστη. Οι αντίστοιχοι συντελεστές των περιπτώσεων A και B, παρουσιάζονται στο Σχ. 4.8.



Σχήμα 4.20: Διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης των περιπτώσεων D και E.

Στο Σχ. 4.21 απεικονίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραίων στο άνω ημισφαίριο, προβεβλημένα στο επίπεδο x-y. Είναι φανερό ότι η παρουσία του σώματος διαστρεβλώνει τα διαγράμματα και μειώνει το κέρδος όλων των στοιχείων στην περίπτωση των φορετών κεραίων, ενώ στην περίπτωση του τερματικού χειρός επηρεάζει σοβαρά τα διαγράμματα των στοιχείων 3 και 4 που είναι σε κοντινή απόσταση από το χέρι του χρήστη.



Σχήμα 4.21: Η προβολή στο οριζόντιο επίπεδο των διαγραμμάτων ακτινοβολίας του άνω ημισφαιρίου.

4.7.3 Συντελεστής συσχέτισης και απόδοση ακτινοβολίας

Στην προσπάθεια αξιολόγησης ενός MIMO συστήματος, συγκρίνοντας την περίπτωση των φορετών συστημάτων με την περίπτωση των φορητών συσκευών χειρός, θεωρούμε ως κριτήριο σύγκρισης τη χωρητικότητα. Δύο είναι οι παράγοντες που υπεισέρχονται και καθορίζουν την τιμή της χωρητικότητας: ο συντελεστής συσχέτισης και η απόδοση ακτινοβολίας.

4.7.3.1 Συντελεστής συσχέτισης

Η απόδοση των συστημάτων MIMO σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα ασύρματων επικοινωνιών εξαρτάται σημαντικά από τη συσχέτιση των σημάτων εξαιτίας της παρουσίας σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης. Η τιμή της διασυσχέτισης μεταξύ των ραδιοκυμάτων που προσπίπτουν σε δύο διαφορετικές κεραιές είναι συνάρτηση του PAS (Power Azimuth Spectrum), των διαγραμμάτων ακτινοβολίας των κεραιών και της απόστασης των κεραιών. Ο συντελεστής συσχέτισης μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια των παρακάτω σχέσεων:

$$\rho = \frac{\iint_{4\pi} \bar{G}_{1total} \bar{G}_{2total}^* d\Omega}{\sqrt{\iint_{4\pi} \bar{G}_{1total} \bar{G}_{1total}^* d\Omega \iint_{4\pi} \bar{G}_{2total} \bar{G}_{2total}^* d\Omega}} \quad (4.7)$$

$$\rho = \frac{|S_{11}^* S_{12} + S_{21}^* S_{22}|^2}{\left(1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)\right) \left(1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2)\right)} \quad (4.8)$$

Η πρώτη σχέση χρησιμοποιεί τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών στο μακρινό πεδίο, ενώ ο δεύτερος τις S παραμέτρους των κεραιών. Στην περίπτωση που υπάρχουν αντικείμενα σκέδασης πολύ κοντά στις κεραιές, όπως π.χ. στην περίπτωση που το κινητό τερματικό είναι πολύ κοντά στο σώμα του χρήστη, τότε ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίζεται από την πρώτη σχέση, όπως και στη δική μας μελέτη.

4.7.3.2 Απόδοση ακτινοβολίας

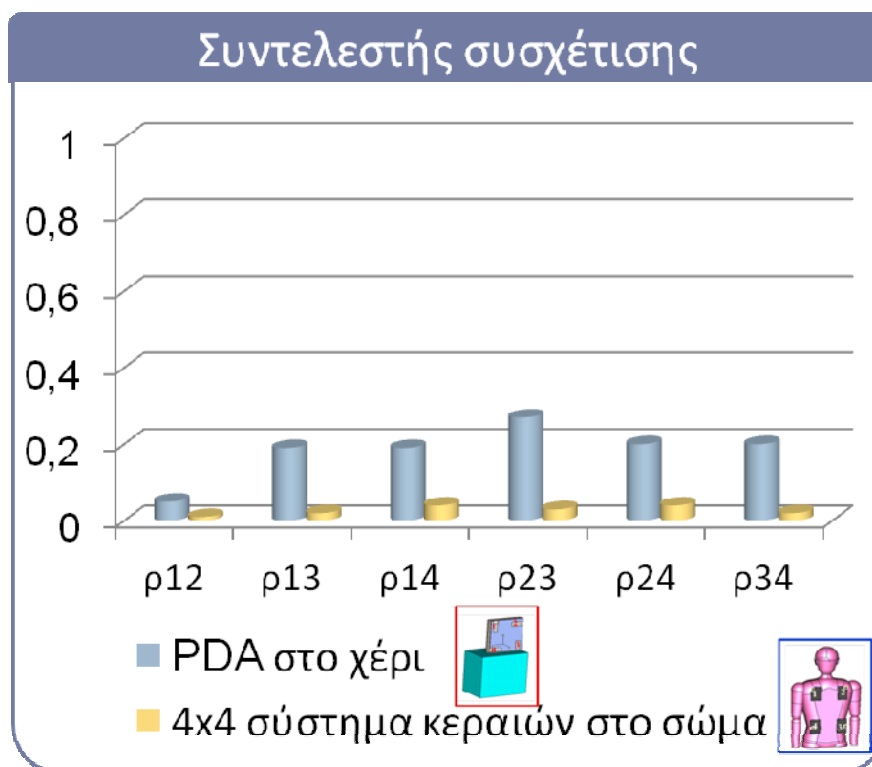
Η απόδοση ακτινοβολίας εμπεριέχεται στον πλήρη ορισμό του κέρδους μιας κεραιάς και περιλαμβάνει τις απώλειες λόγω διηλεκτρικού και τις απώλειες αγωγιμότητας:

$$G(\theta, \phi) = n \cdot D(\theta, \phi) \quad (4.9)$$

$$n = \frac{P_{radiated}}{P_{input}}$$

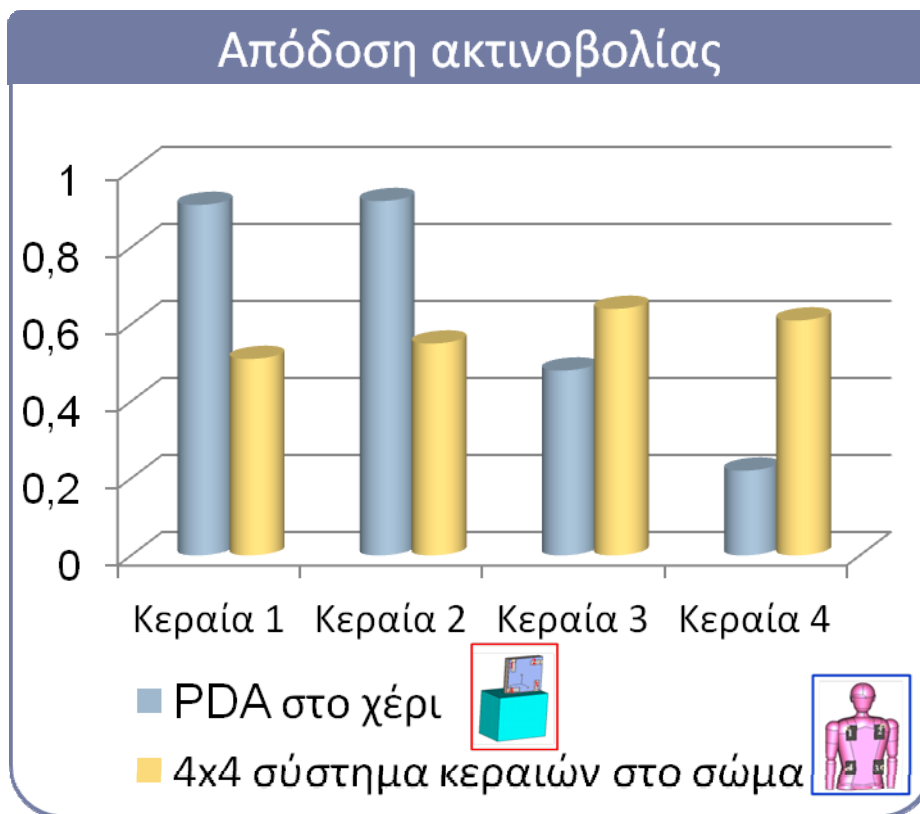
4.7.3.3 Αποτελέσματα του συντελεστή συσχέτισης και της απόδοσης ακτινοβολίας

Το πρώτο αποτέλεσμα που προκύπτει από το Σχ. 4.22, συγκρίνοντας τις διατάξεις B και D, είναι ότι η συσχέτιση του συστήματος φορετών κεραίων κατά μέσο όρο είναι πολύ πιο χαμηλή από τη συσχέτιση του συστήματος του τερματικού και η μέγιστη διαφορά τους είναι 0.24 για το ζεύγος των στοιχείων 2 και 3.



Σχήμα 4.22: Συντελεστές συσχέτισης των στοιχείων της κεραίας για τις διατάξεις B και D.

Το Σχ. 4.23 δείχνει την απόδοση ακτινοβολίας για τα δύο συστήματα υπό μελέτη παρουσία του χεριού και του σώματος του χρήστη αντίστοιχα. Αυτό που παρατηρούμε από το Σχ. 4.23 είναι ότι, ο παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση ακτινοβολίας είναι οι διηλεκτρικές απώλειες που προκαλούνται από την παρουσία του σώματος. Για το φορετό σύστημα κεραίων, η μείωση της απόδοσης ακτινοβολίας είναι σημαντική, αλλά παρόμοια για όλα τα στοιχεία, ενώ για το σύστημα του τερματικού η μείωση είναι σημαντική, μόνο για τα στοιχεία 3 και 4 που βρίσκονται πιο κοντά στο χέρι του χρήστη.



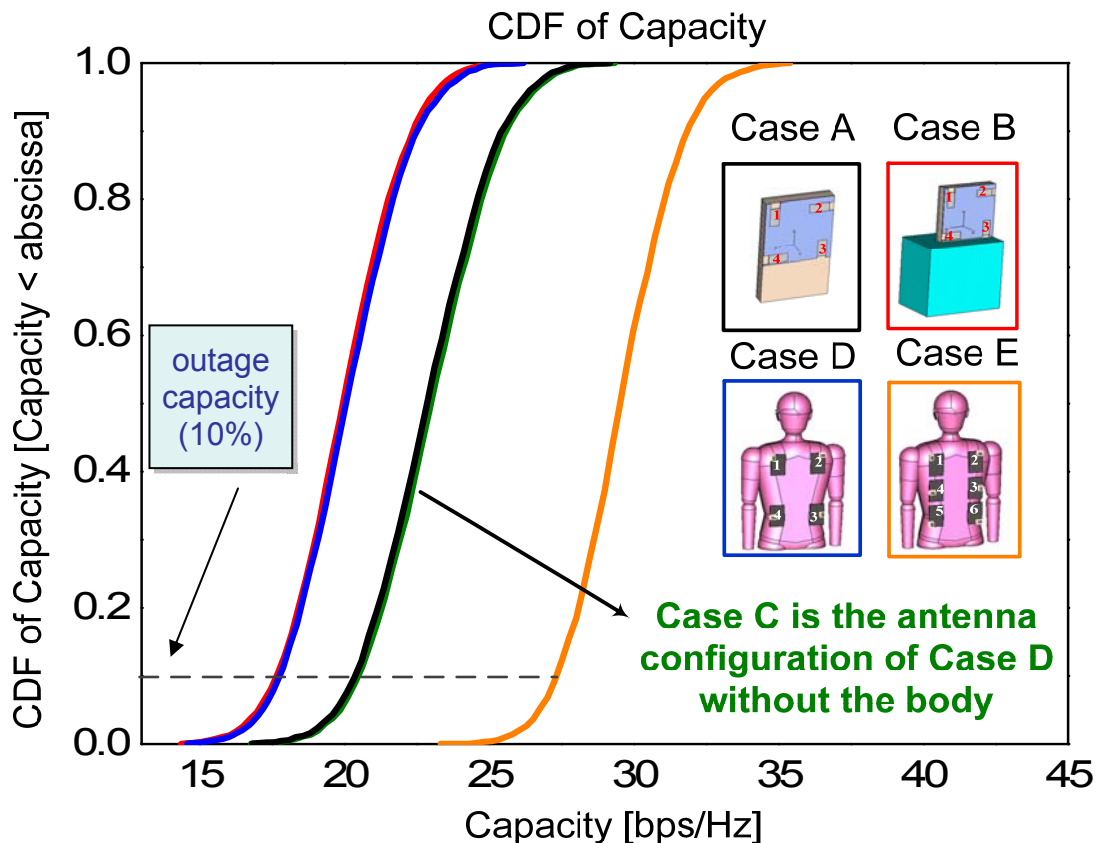
Σχήμα 4.23: Απόδοση ακτινοβολίας των κεραιών για τις διατάξεις B και D.

4.7.4 Αποτελέσματα χωρητικότητας

Η χωρητικότητα του καναλιού υπολογίστηκε όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.3, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (4.1) – (4-6). Το Σχ. 4.24, δείχνει την CDF της χωρητικότητας των δύο συστημάτων για SNR=20 dB. Η περιοχή πρόσπτωσης θεωρείται όλη η σφαίρα ($\theta = 180^\circ$). Από το Σχ. 4.24 συγκρίνοντας τις καμπύλες για τις διατάξεις B και D, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η χωρητικότητα διακοπής (outage capacity) για τα δύο συστήματα είναι πρακτικά η ίδια. Παρόλα αυτά πρέπει να εξετάσουμε βαθύτερα αυτό το αποτέλεσμα. Για συγκεκριμένο αριθμό και τύπο κεραιών λήψης, δύο είναι οι παράγοντες που καθορίζουν τις τιμές της χωρητικότητας: ο συντελεστής συσχέτισης και η απόδοση ακτινοβολίας.

Αν εστιάσουμε στα αποτελέσματα της απόδοσης ακτινοβολίας (Σχ. 4.23), παρατηρούμε ότι η μέση απόδοση ακτινοβολίας για τη διάταξη B είναι υψηλότερη από αυτή της περίπτωσης D. Έτσι, θα περιμέναμε ότι το σύστημα του τερματικού θα

παρουσίαζε υψηλότερη χωρητικότητα, αλλά αυτό δε συμβαίνει (Σχ. 4.24). Συνεπώς, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η αύξηση της απόστασης μεταξύ των στοιχείων στο σύστημα φορετών κεραίων και η αντίστοιχη μείωση της συσχέτισης (Σχ. 4.22) είναι αποδοτική για τη χωρητικότητα, καθώς αντισταθμίζει τις διηλεκτρικές απώλειες.



Σχήμα 4.24: CDF της χωρητικότητας για SNR=20 dB.

4.7.5 Η επίδραση του αριθμού των κεραίων στη χωρητικότητα του καναλιού

Καθώς η μείωση της συσχέτισης δεν αποτελεί λύση για όλες τις περιπτώσεις και δεν είναι πάντα δυνατή, αποφασίσαμε να μελετήσουμε ακόμα μια δυνατότητα των συστημάτων φορετών κεραίων: την προσθήκη περισσότερων στοιχείων για τη βελτίωση της χωρητικότητας του καναλιού. Ο συνολικός αριθμός κεραίων αυξάνεται στις έξι, με το κόστος της μικρότερης απόστασης μεταξύ των στοιχείων της κεραίας (Σχ. 4.21, Διάταξη E).

Στο Σχ. 4.24 απεικονίζεται επίσης η CDF της χωρητικότητας του καναλιού για το 6x6 σύστημα των φορετών κεραιών. Η χωρητικότητα διακοπής του 6x6 συστήματος MIMO είναι περίπου 10 bps/Hz υψηλότερη από τη χωρητικότητα διακοπής των δύο 4x4 συστημάτων MIMO που εξετάστηκαν στην παράγραφο 4.7.4. Συνεπώς θα μπορούσαμε να δηλώσουμε ότι ένας αποδοτικός τρόπος για τη βελτίωση της χωρητικότητας του καναλιού θα ήταν η προσθήκη περισσότερων στοιχείων στο σύστημα φορετών κεραιών.

4.7.6 Σύνοψη και συμπεράσματα της συγκριτικής μελέτης

Η μελέτη αυτή πραγματεύεται την επίδραση του συντελεστή συσχέτισης, της απόδοσης ακτινοβολίας και του αριθμού των κεραιών στη χωρητικότητα του καναλιού MIMO μέσω μιας συγκριτικής μελέτης τριών συστημάτων κεραιών MIMO. Η συσχέτιση μελετήθηκε μέσω της αύξησης της απόστασης των στοιχείων της κεραίας από τη διάταξη B στη διάταξη D. Η απόδοση ακτινοβολίας εξετάστηκε με την παρουσία του χρήστη στις περιπτώσεις B και D ενώ ο αριθμός των κεραιών μελετήθηκε στη διάταξη E.

Η χωρητικότητα του καναλιού MIMO επιλέχθηκε ως κριτήριο αξιολόγησης και υπολογίστηκε με τη χρήση ενός μοντέλου καναλιού βασισμένο στη συνδιακύμανση. Οι μελέτες μας έδειξαν ότι, για το σύστημα φορετών κεραιών, η επίδραση του σώματος είναι παρόμοια για όλα τα στοιχεία, αλλά πιο σοβαρή απ' ό,τι σε ένα σύστημα τερματικού, όπου η επίδραση εξαρτάται από το πόσο κοντά είναι οι κεραίες του τερματικού στον χρήστη. Επιπλέον, οι συντελεστές συσχέτισης μειώθηκαν όταν αυξήθηκε η απόσταση των κεραιών. Η προσθήκη περισσότερων κεραιών αύξησε σημαντικά τη χωρητικότητα.

Όταν πρέπει να πάρουμε μια απόφαση μεταξύ ενός συστήματος τερματικού και ενός συστήματος φορετών κεραιών, για να χρησιμοποιηθεί ως τμήμα ενός συστήματος MIMO, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι προαναφερθέντες παράγοντες. Όταν ο αριθμός των κεραιών είναι περιοριστικός για τοποθέτηση σε ένα τερματικό χειρός ή όταν αυτό παρουσιάζει πολύ υψηλές τιμές συσχέτισης μεταξύ των στοιχείων του, οι οποίες είναι επίσης σημαντικά υψηλότερες από τις αντίστοιχες ενός συστήματος φορετών κεραιών, πρέπει να εκμεταλλευτούμε τις δυνατότητες που μας προσφέρει το σύστημα φορετών κεραιών για τη βελτίωση της χωρητικότητας. Κατά

αυτό τον τρόπο, η χωρητικότητα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, αν δεν θεωρήσουμε άλλο τρόπο (π.χ. σχεδιαστικές τεχνικές, κατευθυντικές κεραιές) για την εξάλειψη της επίδρασης του σώματος του χρήστη, που προκαλεί μείωση της απόδοσης ακτινοβολίας.

4.8 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στις προηγούμενες παραγράφους, παρουσιάστηκε η μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε σχέση με την επίδραση του σώματος και του χεριού του χρήστη, στη χωρητικότητα του καναλιού MIMO. Το κινητό τερματικό ήταν ένα PDA εφοδιασμένο με 4 κεραιές patch. Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε βασίζεται στον υπολογισμό των διαγραμμάτων ακτινοβολίας της κεραιάς και την ενσωμάτωσή τους σε κατάλληλα μοντέλα καναλιού. Για την περίπτωση της παρουσίας του χεριού του χρήστη και τη μελέτη των διαφορετικών μοντέλων και θέσεων του χεριού, αλλά και για τη μελέτη της παρουσίας του σώματος, τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραιάς προέκυψαν μέσα από προσομοιώσεις. Το μοντέλο του καναλιού που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα στοχαστικό κανάλι βασισμένο στη συσχέτιση

Η ανάλυση των δεδομένων της μελέτης για την επίδραση του σώματος και του χεριού στη χωρητικότητα ενός καναλιού MIMO των παραγράφων 4.5 και 4.6, έδειξε ότι η παρουσία του χεριού ή του σώματος σε όλες τις περιπτώσεις υποβαθμίζει σημαντικά τη χωρητικότητα του καναλιού MIMO, με τη μεγαλύτερη υποβάθμιση να παρατηρείται για χαμηλές τιμές του SNR, κάτι που δεν πρέπει να αμελείται κατά το σχεδιασμό τερματικών, αλλά και την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων. Για παράδειγμα, η τοποθέτηση των πολλαπλών κεραιών στα κινητά τερματικά πρέπει να γίνεται με προσοχή, με σκοπό να διασφαλιστεί η ικανοποιητική απόσταση μεταξύ τους και την ίδια στιγμή να τα κρατήσουμε όσο δυνατόν πιο μακριά από το χέρι του χρήστη. Τελικά, με σκοπό να αξιολογήσουμε ρεαλιστικά διαφορετικά συστήματα και τεχνικές MIMO, η υποβάθμιση της απόδοσης από 9% μέχρι 62% πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, εξαιτίας της παρουσίας του χεριού του χρήστη, ανάλογα με τη συγκεκριμένη συστοιχία κεραιών, τη θέση του χεριού και το εύρος του SNR. Η αντίστοιχη υποβάθμιση της χωρητικότητας που παρατηρείται για την περίπτωση του

σώματος σε κοντινή απόσταση με το τερματικό στη “θέση τσέπης” ήταν από 10% μέχρι 54%.

Η συγκριτική μελέτη της παραγράφου 4.7 μας οδήγησε σε ποιοτικά συμπεράσματα, σε σχέση με την επίδραση της συσχέτισης των κεραιών, της απόδοσης της ακτινοβολίας και του αριθμού των κεραιών στην απόδοση ενός συστήματος MIMO. Παρατηρήσαμε ότι η μείωση της συσχέτισης που προκαλείται από την αύξηση της απόστασης μεταξύ των στοιχείων δεν επηρεάζει σημαντικά τη χωρητικότητα. Σε αντίθεση, η μείωση της απόδοσης ακτινοβολίας που προκαλείται από την παρουσία του σώματος του χρήστη είναι σημαντική, ειδικά όταν η απόσταση μεταξύ κεραιών και σώματος του χρήστη είναι πολύ μικρή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Σχεδιασμός και υλοποίηση φορετών κεραιών

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία της κατασκευής φορετών κεραιών. Αρχικά σχεδιάζεται και υλοποιείται μια κεραία ορθογωνικού patch με ομοαξονική τροφοδοσία. Μέσω μετρήσεων, καθορίζονται οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του υφάσματος του υποστρώματος και επαναπροσδιορίζονται οι διαστάσεις της κεραίας. Στη συνέχεια σχεδιάζεται και κατασκευάζεται μια κεραία ορθογωνικού patch με υφασμάτινο υπόστρωμα σε δύο εκδοχές, μία από αγωγίμα υφάσματα και μία με αγωγίμα μέρη από φύλλο χαλκού, καθώς και τροφοδοσία γραμμής μικροταινίας. Ως υλικό για το υπόστρωμα χρησιμοποιείται σε όλες τις κατασκευές ύφασμα τσόχας. Όλες οι κεραιές μετρώνται και αναλύεται η απόδοσή τους.

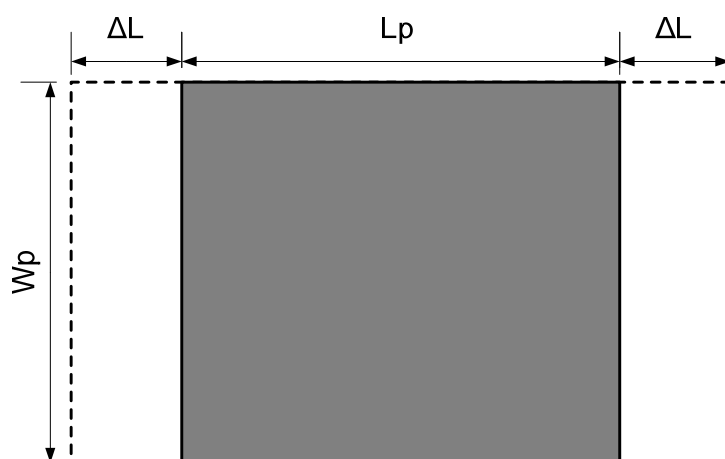
5.1 Εισαγωγή

Η εμφάνιση των αγωγίμων υφασμάτων αλλά και των φορετών επικοινωνιακών συστημάτων που μπορούν να ενσωματωθούν στο ρουχισμό του χρήστη πυροδότησε την έρευνα για τις κεραιές με βάση το ύφασμα. Από τότε, τα υφάσματα φαίνονται να είναι πολλά υποσχόμενα υλικά για το σχεδιασμό κεραιών με ένα ολοένα αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον. Ο Salonen παρουσίασε μια ποικιλία από κεραιές με βάση το ύφασμα, αλλά τα αγωγίμα μέρη τους (patch και επίπεδο γείωσης) ήταν κατασκευασμένα από ταινία χαλκού [173], [172], [171], [199], [260]. Μια υφασμάτινη κεραία κινητού τηλεφώνου προτάθηκε από τον Massey [168]. Στο άρθρο [174], ο Locher παρουσίασε μια αμιγώς υφασμάτινη κεραία patch, για την κατασκευή της οποίας χρησιμοποιήθηκαν ηλεκτροαγωγίμα υφάσματα για το patch και το αγωγίμο επίπεδο και προοριζόταν για ενσωμάτωση στα ρούχα. Στο [261], παρουσιάζεται μια κεραία από ταινία χαλκού στα 868 MHz, και μια κεραία στα 2.45

GHz που είναι κεντημένη με νήμα ανοξείδωτου ατσάλιου πάνω σε βαμβακερό ύφασμα. Μια κεραία UWB (Ultra Wide Band) για επικοινωνία πάνω στο σώμα, κατασκευασμένη από υφασμάτινα υλικά περιγράφεται στο [185]. Για πιο χαμηλές συχνότητες, το αντικείμενο έρευνας στο [262] και το [179] είναι οι υφασμάτινες κεραιές GPS, όπου μελετάται επίσης και το φαινόμενο της κάμψης της κεραίας [175]. Το ενδιαφέρον στρέφεται τελευταία και προς τα επικοινωνιακά συστήματα πολλαπλών κεραιών, κάτι που καθίσταται δυνατό από τις ελαφριές και ευλύγιστες υφασμάτινες κεραιές [191].

5.2 Σχεδιασμός κεραίας

Η φορητή κεραία που σχεδιάστηκε είναι κεραία μικροταινιακού patch (Microstrip Patch Antenna - MPA), η οποία αποτελείται από το επίπεδο γείωσης, το υπόστρωμα και μια μεταλλική επιφάνεια (patch) η οποία ακτινοβολεί. Μια κεραία μικροταινιας με ορθογωνικό patch χαρακτηρίζεται από το μήκος L , το πλάτος W και τη θέση του σημείου τροφοδοσίας, x_f και y_f . Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου από τις ακμές του ακτινοβόλου patch δεν είναι κάθετες στο επίπεδο γείωσης αλλά παρουσιάζουν καμπυλώσεις, έχοντας σαν αποτέλεσμα το patch να φαίνεται ηλεκτρικά μεγαλύτερο από τις φυσικές του διαστάσεις, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5.1.



Σχήμα 5.1: Ενεργό μήκος L_{eff} του patch.

Οι δυναμικές γραμμές διασχίζουν δυο περιοχές όπου υπάρχει διηλεκτρικό, τον αέρα και το υπόστρωμα της κεραίας. Εξαιτίας του ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι ουσιαστικά μια ανομοιογενής γραμμή μεταξύ δυο διαφορετικών στρωμάτων (που έχουν διαφορετική διηλεκτρική σταθερά), ορίζεται ένα μέγεθος που ονομάζεται ενεργός διηλεκτρική σταθερά και συμβολίζεται ως ϵ_{reff} . Θεωρούμε ότι η κεραία βρίσκεται μέσα σε ένα ομοιογενή χώρο διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{reff} .

Η αύξηση των διαστάσεων του patch είναι κατά μήκος ΔL και από τις δύο πλευρές του patch (Σχ. 5.1), και εξαρτάται από την τιμή της ενεργούς διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{reff} :

$$\epsilon_{\text{reff}} = \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W_p} \right]^{-1/2} \right) \quad (5.1)$$

και του λόγου h/W_p . Το h είναι το πάχος του υποστρώματος. Η ενεργός διηλεκτρική σταθερά λαμβάνει υπόψη ότι τα πεδία άκρων μιας κεραίας που ακτινοβολεί ταξιδεύουν μερικώς μέσω του υλικού του υποστρώματος και μερικώς μέσω του αέρα. Συνεπώς η τιμή της βρίσκεται μεταξύ της σταθεράς του αέρα που ισούται με 1 και της επιτρεπτότητας του υλικού του υποστρώματος. Ένα πρακτικό πλάτος του patch, W_p , που οδηγεί σε καλές αποδόσεις ακτινοβολίας είναι το εξής [202]:

$$W_p = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (5.2)$$

Το W_p δίνεται συναρτήσει της συχνότητας συντονισμού f_r , της ταχύτητας του φωτός c και της διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_r . Για να υπολογίσουμε το μήκος L_p του patch χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$L_p = L_{\text{eff}} - 2\Delta L \quad (5.3)$$

Το ενεργό μήκος του patch δίνεται από την σχέση:

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}}, \quad (5.4)$$

όπου η επέκταση του μήκους μπορεί να προσδιοριστεί από τη σχέση:

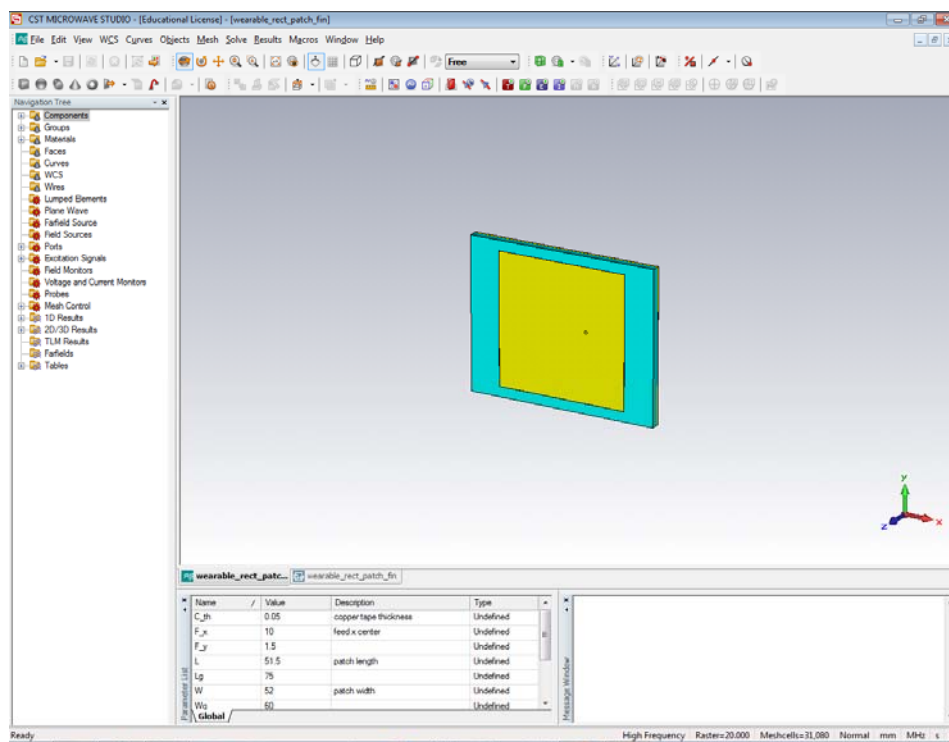
$$\Delta L = \left[\frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{W_p}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} + 0.258) \left(\frac{W_p}{h} + 0.8 \right)} \right] h \quad (5.5)$$

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθήσαμε για το σχεδιασμό κεραιών μικροταινίας ορθογωνικού patch, που βασίζεται στη μεθοδολογία που περιγράψαμε προηγουμένως. Για να σχεδιαστεί η κεραία απαιτείται ο καθορισμός των απαιτούμενων παραμέτρων των χρησιμοποιούμενων υλικών. Αρχικά καθορίζουμε τη διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος (ϵ_r), τη συχνότητα λειτουργίας (f_r) και το ύψος του υποστρώματος (h). Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ενεργό διηλεκτρική σταθερά της κεραίας χρησιμοποιώντας την (5.1). Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά, εκτιμούμε τις διαστάσεις του patch, W_p, L_p , από τις (5.2) – (5.5). Οι διαστάσεις του patch όπως είδαμε, σχετίζονται με την επιτρεπτότητα του υλικού του υποστρώματος και με το μήκος κύματος για το οποίο η κεραία σχεδιάζεται. Στη συνέχεια, με βάση τις διαστάσεις που υπολογίσαμε και τα χαρακτηριστικά των υλικών, σχεδιάζουμε την κεραία.

Για το σχεδιασμό της κεραίας μικροταινίας με patch και την ανάλυση της απόδοσής της, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης, CST Microwave Studio. Στο Σχ. 5.2 απεικονίζεται το παράθυρο σχεδιασμού του CST Microwave Studio. Το CST επιτρέπει το σχεδιασμό τριδιάστατων μοντέλων και την εφαρμογή διαφορετικών στρωμάτων υλικών (π.χ. όταν χρησιμοποιούνται δύο υποστρώματα). Επιπλέον, μπορούμε να καθορίσουμε τις ιδιότητες των υλικών που θέλουμε να προσομοιώσουμε. Όλες οι κεραίες που σχεδιάστηκαν στην παρούσα διατριβή προορίζονται για λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων 2.45 GHz ISM. Στον ελεύθερο χώρο, αυτό αντιστοιχεί σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μήκους $\lambda = c/f$ ίσο με 12 cm. Αυτή η ζώνη συχνοτήτων εκτείνεται μεταξύ 2.4 - 2.4835 GHz, που σημαίνει ότι απαιτείται μια κεραία με ελάχιστο εύρος ζώνης 83.5 MHz.

Το αρχικό σημείο του σχεδιασμού μια κεραίας είναι η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας. Αυτή σχετίζεται με τις απαιτήσεις που έχουμε θέσει για την κεραία. Στη δική μας περίπτωση αυτοί οι περιορισμοί είναι:

- λειτουργία στα 2.45 GHz,
- ελάχιστο εύρος ζώνης 83.5 MHz,
- και συντελεστή ανάκλασης μικρότερο από -10 dB στη ζώνη συχνοτήτων 2.4 - 2.4835 GHz.



Σχήμα 5.2: Παράθυρο σχεδιασμού του προγράμματος CST Microwave Studio

5.3 Χαρακτηρισμός του υφασμάτινου υλικού του υποστρώματος

Ο σχεδιασμός μια κεραίας, όπως προαναφέραμε, απαιτεί τη γνώση κάποιων παραμέτρων που σχετίζονται με το υπόστρωμα:

- το πάχος του h ,
- την επιτρεπτότητά του ϵ_r ,
- το συντελεστή απωλειών του $\tan \delta$.

5.3.1 Πάχος

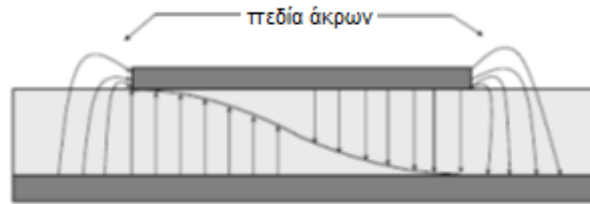
Το πάχος, h , ενός υφασμάτινου υλικού μπορεί να καθοριστεί με βάση το πρότυπο ISO 5084. Ορίζει ότι το πάχος ενός κομματιού υφάσματος είναι η απόσταση μεταξύ ενός επιπέδου αναφοράς πάνω στο οποίο τοποθετείται το ύφασμα, και μία παράλληλη επιφάνεια πίεσης που εφαρμόζει προκαθορισμένη πίεση στο ύφασμα. Σε αυτή τη μελέτη όλες οι μετρήσεις πάχους έγιναν με τη χρήση παχυμέτρου.

5.3.2 Επιτρεπτότητα και συντελεστής απωλειών

Η επιτρεπτότητα, ϵ , καθορίζει την απόκριση ενός υλικού σε ένα εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η μονάδα της είναι Farad ανά meter (F/m) και ο ελεύθερος χώρος έχει επιτρεπτότητα ϵ_0 ίση με $8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m. Η επιτρεπτότητα ενός υλικού συνήθως δίνεται σε σχέση με αυτή του κενού, δηλαδή ως σχετική επιτρεπτότητα ϵ_r , που είναι αδιάστατη. Η πραγματική επιτρεπτότητα, ϵ , μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (5.6)$$

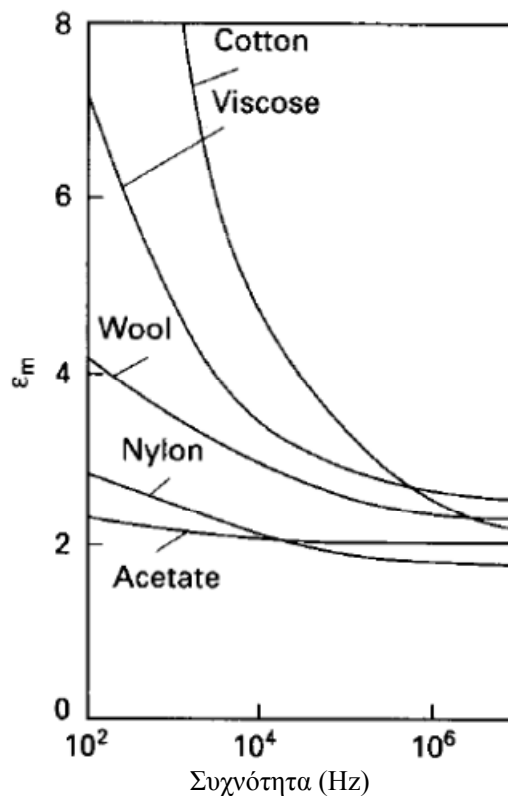
Όσο υψηλότερη είναι η επιτρεπτότητα ενός υλικού, τόσο περισσότερες γραμμές πεδίου θα παγιδευτούν μέσα σε αυτό το υλικό και τόσο λιγότερα πεδία άκρων θα εμφανιστούν (όπως φαίνεται στο Σχ. 5.3).



Σχήμα 5.3: Διατομή μιας MPA με πεδία άκρων ενός ηλεκτρικού πεδίου

Όμως αυτά τα πεδία άκρων είναι η πηγή της ακτινοβολίας μιας κεραίας. Συνεπώς για το σχεδιασμό μιας κεραίας, συνίσταται ένα υλικό υποστρώματος με χαμηλή επιτρεπτότητα.

Για να καθορίσουμε την επιτρεπτότητα ενός υφάσματος στη συχνότητα των 2.45 GHz, ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία βασισμένη στη συχνότητα συντονισμού μιας κεραίας μικροταινίας. Η συχνότητα έχει σημαντική επίδραση στη σχετική επιτρεπτότητα, και πιο συγκεκριμένα, η επιτρεπτότητα μειώνεται, όταν η συχνότητα αυξάνει, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.4 [263].



Σχήμα 5.4: Διακύμανση της διηλεκτρικής σταθεράς με τη συχνότητα (Hz) για διάφορα υλικά υποστρώματος και για 65 % σχετική υγρασία.

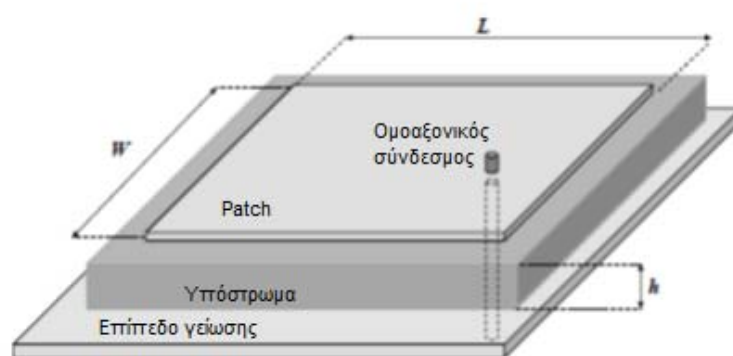
Συνεπώς, είναι πολύ σημαντικό να καθορίσουμε την επιτρεπτότητα ενός υλικού στη συχνότητα λειτουργίας του. Η συχνότητα συντονισμού μια κεραίας μικροταινίας συνδέεται με το μήκος L του patch Το μήκος L είναι προσεγγιστικά ίσο με $\lambda/2$, δηλαδή 6 cm για μια συχνότητα 2.45 GHz. Μια καλύτερη προσέγγιση για το L δίνεται, όπως είδαμε στην παράγραφο 5.2, όπου το μήκος εξαρτάται από την ενεργό διηλεκτρική σταθερά, $\epsilon_{r,eff}$.

Ο συντελεστής απωλειών εκφράζει τις απώλειες αγωγιμότητας μέσα στο υπόστρωμα. Όσο υψηλότερες είναι οι απώλειες, τόσο λιγότερο αποδοτική θα είναι η κεραία. Ο συντελεστής απωλειών εκφράζεται από τη σχέση:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_I}{\epsilon_R} \quad (5.7)$$

όπου ϵ_I είναι το φανταστικό και ϵ_R είναι το πραγματικό μέρος της σχετικής επιτρεπτότητας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθούμε για τον καθορισμό των ιδιοτήτων του υποστρώματος, χρησιμοποιώντας μια κεραία ορθογωνικού patch, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.5. Για τον καθορισμό της επιτρεπτότητας και των απωλειών του υλικού του υποστρώματος ακολουθούνται διαδοχικά βήματα:

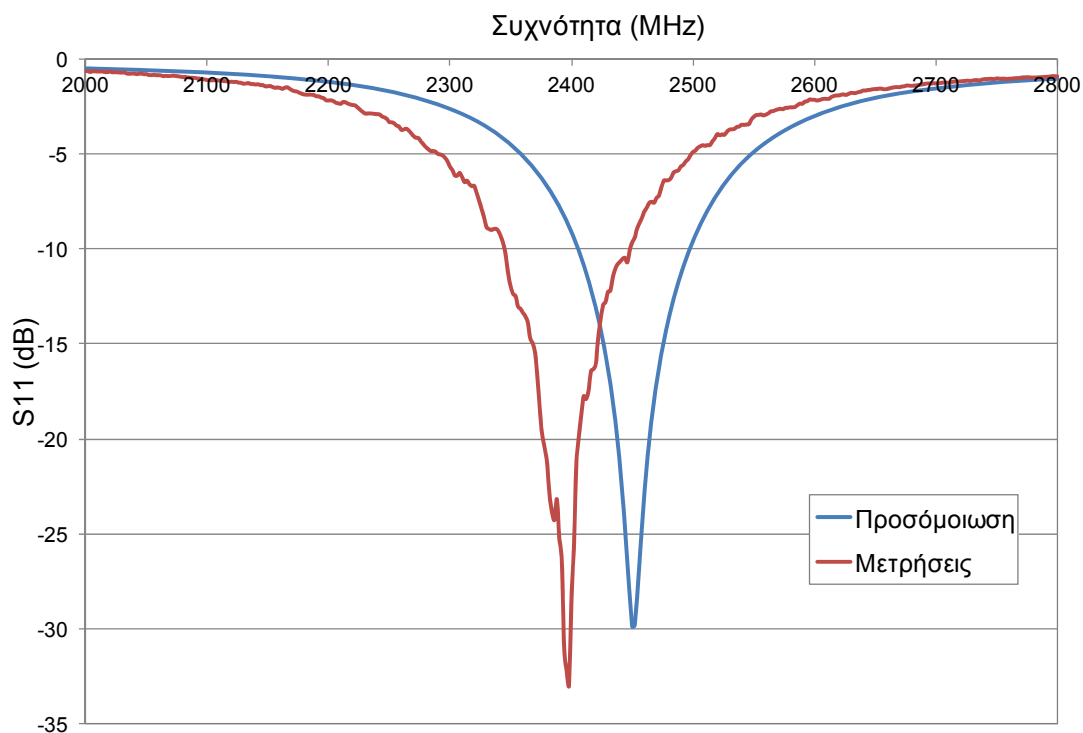


Σχήμα 5.5: Μια κεραία ορθογωνικού patch.

- Εκτίμηση της ϵ_r και του $\tan \delta$ του υφάσματος με βάση τιμές από τη βιβλιογραφία. Υπολογισμός της $\epsilon_{r,eff}$, από την (5.1) και του W από την (5.2),

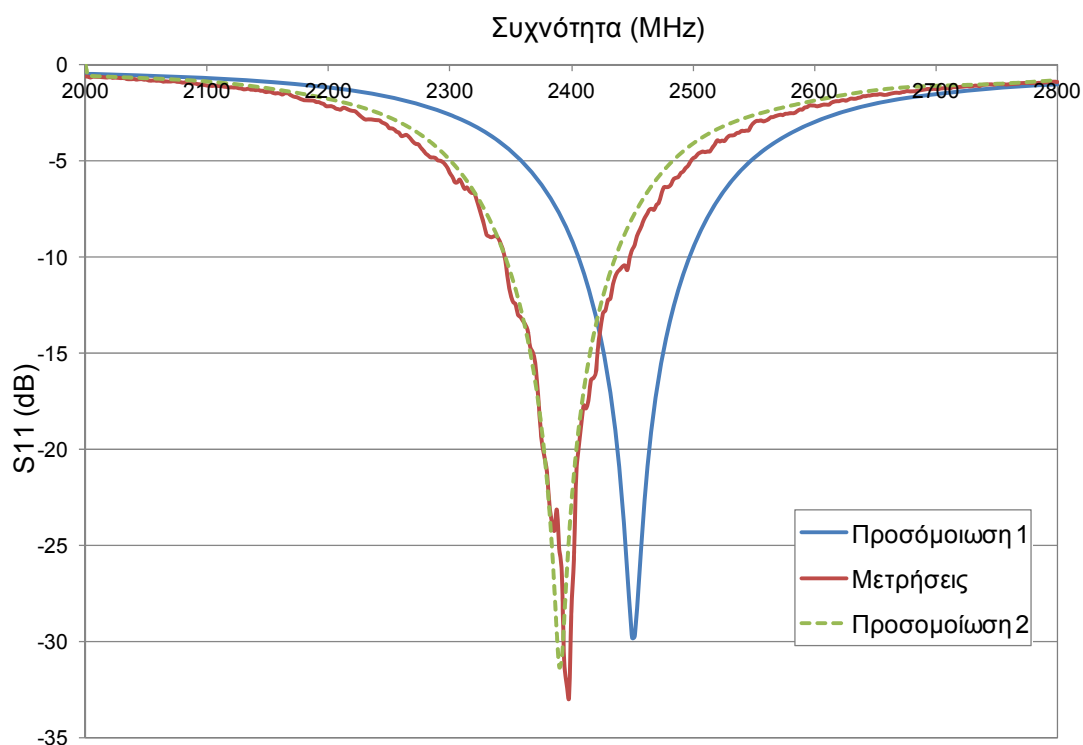
χρησιμοποιώντας το πάχος του υλικού, h . Υπολογισμός του L χρησιμοποιώντας τις (5.3) - (5.5).

- Χρήση του L για το σχεδιασμό μια κεραίας ορθογώνιου patch με τη χρήση του CST Microwave Studio, με βάση το W που υπολογίσαμε και μια αυθαίρετα επιλεγμένη θέση του σημείου τροφοδοσίας (x_f, y_f) .
- Κατασκευή του πρωτοτύπου της κεραίας και μέτρηση των απωλειών επιστροφής με το VNA.
- Σύγκριση της προσομοίωσης και των μετρήσεων, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.6, μέσω του συντελεστή S_{11} , της συχνότητας συντονισμού και του εύρους ζώνης. Αν η νέα συχνότητα συντονισμού είναι μικρότερη από αυτή που προέκυψε από την προσομοίωση, τότε η ϵ_r του υλικού είναι μεγαλύτερη από αυτή που είχαμε αρχικά εκτιμήσει. Επιπλέον, αν έχουμε ένα λιγότερο ευρύ και πιο βαθύ συντονισμό οι απώλειες είναι μικρότερες από ό,τι εκτιμήσαμε.



Σχήμα 5.6: Προσομοίωση με βάση μια εκτίμηση για την ϵ_r και σύγκριση συντελεστή ανάκλασης από προσομοίωση και μετρήσεις.

- Εκτίμηση των νέων ϵ_r και $\tan \delta$ του υποστρώματος. Αρχικά με βάση τη νέα συχνότητα συντονισμού που προέκυψε από τις μετρήσεις και τις (5.3) - (5.5), υπολογίζουμε την $\epsilon_{r,eff}$ και από την (5.1) υπολογίζουμε μια προσεγγιστική τιμή για την ϵ_r . Το $\tan \delta$ και η τελική τιμή της ϵ_r υπολογίζονται με μια διαδικασία συνεχόμενων προσομοιώσεων, μέχρι να ταυτιστεί ο συντελεστής S_{11} της προσομοίωσης με τον αντίστοιχο των μετρήσεων, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.7.
- Επανασχεδιασμός της κεραίας βάσει των νέων τιμών ϵ_r και $\tan \delta$ του διηλεκτρικού. Εισάγουμε τη νέα ϵ_r στις παραμέτρους του υποστρώματος στο πρόγραμμα προσομοίωσης και προσομοιώνουμε το νέο συντελεστή ανάκλασης.
- Για να επαληθεύσουμε τη διαδικασία, κατασκευάζουμε νέο πρωτότυπο της κεραίας και συγκρίνουμε το συντελεστή ανάκλασης από προσομοίωση και μετρήσεις.



Σχήμα 5.7: Σύγκριση των μετρήσεων του πρωτότυπου με δύο προσομοιώσεις, η πρώτη με τις αρχικές τιμές για τα χαρακτηριστικά του διηλεκτρικού και η δεύτερη με τις νέες τιμές, μέχρι να ταυτιστούν οι συντελεστές ανάκλασης.

Στο [195], παρουσιάζεται μια εναλλακτική προσέγγιση για τον καθορισμό των διηλεκτρικών ιδιοτήτων των υφασμάτων υλικών. Βασίζεται στη μέθοδο δύο γραμμών μεταφοράς (two-line method) η οποία μετράει τα χαρακτηριστικά διάδοσης γραμμών μεταφοράς με διαφορετικά μήκη πάνω στο ύφασμα. Στο [197], οι διηλεκτρικές ιδιότητες παραδοσιακών υφασμάτων διερευνώνται και προκύπτουν με τη μέθοδο κυματοδηγού κοιλοτήτων.

5.3.3 Χαρακτηριστικά του υλικού του υφασμάτινου υποστρώματος

Το ύφασμα που χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή του υποστρώματος της φορητής κεραιάς είναι η τσόχα. Ο λόγος για αυτή την επιλογή ήταν διττός:

1. Έχει μεγαλύτερο πάχος από τα υφάσματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιοτεχνία ενδυμάτων.
2. Η δομή του περιλαμβάνει αρκετό αέρα κάτι που υπονοεί μια σχετική επιτρεπτότητα κοντά στο 1.

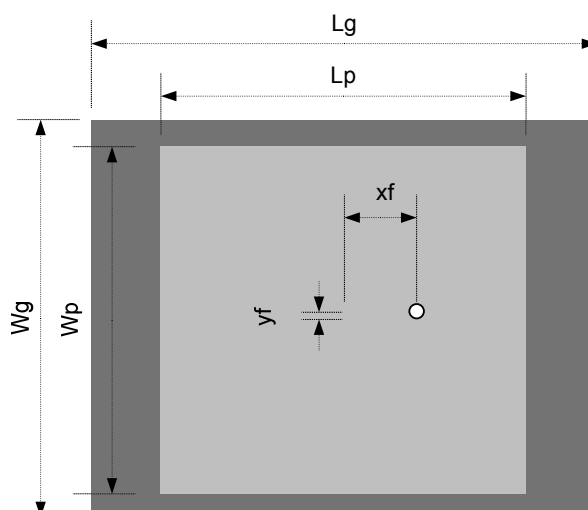
Τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος δίνονται στον πίνακα 5.1 και καθορίστηκαν με βάση τη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.3.2.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΤΣΟΧΑΣ

Χαρακτηριστικά	ϵ_r	$\tan \delta$	h (mm)
	1.17	0.004	4

5.4 Σχεδιασμός φορητής κεραιάς με υφασμάτινο υπόστρωμα στα 2.45 GHz

Στο πρώτο στάδιο του σχεδιασμού της φορητής κεραιάς σχεδιάστηκε μια κεραία ορθογώνιου patch. Όπως είδαμε και προηγουμένως ο στόχος για το εύρος ζώνης της κεραιάς είναι να είναι μεγαλύτερο από 83.5 MHz. Η κεραία σχεδιάστηκε για τη ζώνη συχνοτήτων 2.45 GHz ISM. Το μοντέλο της κεραιάς που σχεδιάστηκε φαίνεται στο Σχ. 5.8.



Σχήμα 5.8: Κεραία ορθογώνιου patch.

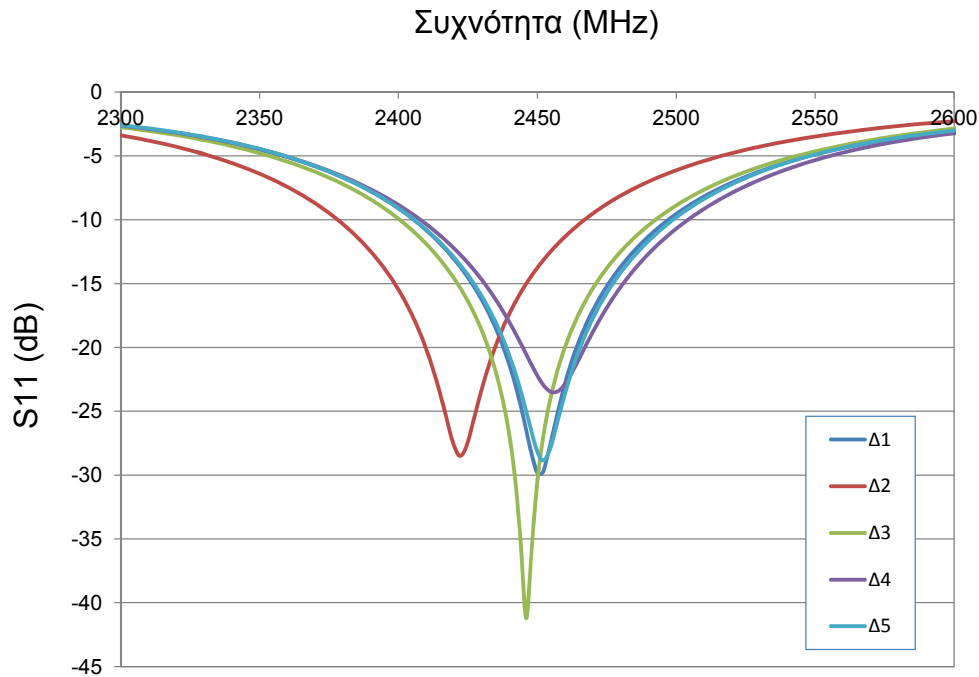
Όπως είδαμε και παραπάνω η κεραία αρχικά σχεδιάστηκε για αυθαίρετες τιμές των ϵ_r και $\tan \delta$, που προέκυψαν από τη βιβλιογραφία. Οι αρχικές διαστάσεις της κεραίας υπολογίστηκαν όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.2. Οι διαστάσεις αυτές βέβαια δεν οδηγούν αυτόματα σε μια καλή κεραία καθώς η σχέσεις που εφαρμόσαμε είναι προσεγγιστικές και δεν λαμβάνουν υπόψη τη θέση της τροφοδοσίας. Στη συνέχεια, οι διαστάσεις της κεραίας βελτιστοποιήθηκαν για να επιτύχουμε συντονισμό στην επιθυμητή συχνότητα των 2.45 GHz. Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι τελικές διαστάσεις της αρχικής κεραίας, με τις αυθαίρετες τιμές για τα χαρακτηριστικά του υποστρώματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Χαρακτηριστικά υποστρώματος	ϵ_r	$\tan \delta$	h (mm)			
	1.1	0.011	4			
Διαστάσεις	L_p	W_p	L_g	W_g	y_f	x_f
(mm)	51.5	52	75	60	1	10

Οι τιμές που προέκυψαν είναι στρογγυλοποιημένες για να διευκολύνεται η κοπή των υλικών για την κατασκευή της κεραίας. Ο συγκεκριμένος τύπος κεραίας είναι σχετικά απλός να κατασκευαστεί. Η ακρίβεια με την οποία θα γίνει η κατασκευή θα

έχει επίδραση στο συντελεστή ανάκλασης της κεραίας. Η επίδραση αυτή απεικονίζεται στη Σχ. 5.9, μεταβάλλοντας κάποιες σχεδιαστικές παραμέτρους της κεραίας. Τα αντίστοιχα μεγέθη που μεταβάλλονται δίνονται στον πίνακα 5.3.



Σχήμα 5.9: Επίδραση των αλλαγών των διαστάσεων της κεραίας στην προσαρμογή της αντίστασης εισόδου (S_{11}).

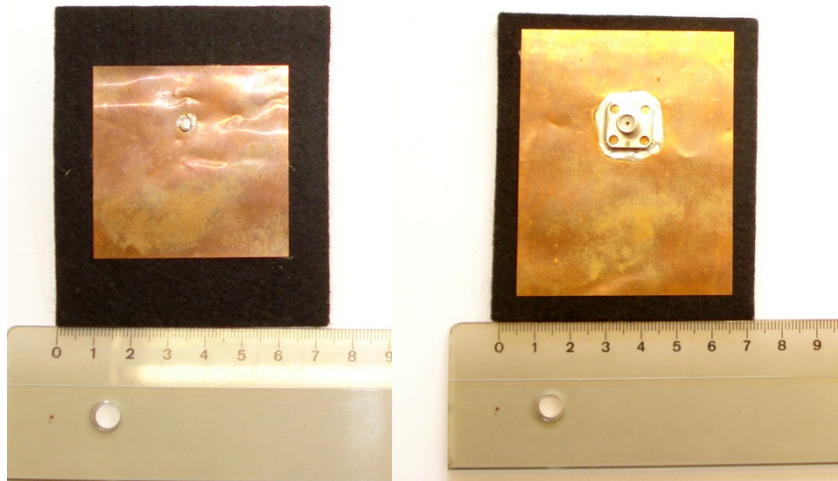
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΕΣ ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ PATCH

Διαστάσεις (mm)	L_p	W_p	x_f	y_f
$\Delta 1$	51.5	52	10	1
$\Delta 2$	52	52	10	1
$\Delta 3$	51.5	52.5	10	1
$\Delta 4$	51.5	52	10.5	1
$\Delta 5$	51.5	52	10	1.5

Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση $\Delta 2$, δηλαδή όταν αυξήσουμε κατά 0.5 mm το μήκος του patch, η ζώνη συχνοτήτων ISM δεν καλύπτεται πλήρως, που σημαίνει ότι

το κριτήριο του συντελεστή ανάκλασης -10 dB δεν ικανοποιείται για όλες τις συχνότητες μεταξύ 2.4 και 2.4835 GHz. Συνεπώς η διάσταση αυτή του patch είναι η πιο κρίσιμη και πρέπει να κοπεί με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια. Η μετατόπιση του σημείου τροφοδοσίας στον άξονα y κατά 0.5 mm ($\Delta 5$) δεν έχει επίδραση στο συντελεστή ανάκλασης, ενώ αντίθετως η αντίστοιχη μετατόπισή του στον άξονα x ($\Delta 4$) έχει επίδραση κυρίως στο βάθος του συντονισμού, το οποίο μειώνεται. Τέλος, η αύξηση του πλάτους του patch κατά 0.5 mm ($\Delta 3$) παρατηρούμε ότι μετατοπίζει τη συχνότητα συντονισμού προς τα αριστερά και αυξάνει το βάθος του συντονισμού. Βέβαια, και στις τρεις αυτές περιπτώσεις η επίδραση δεν είναι τόσο σημαντική, όσο της αλλαγής του μήκους του patch και συγχρόνως το επιθυμητό εύρος ζώνης συνεχίζει να καλύπτεται.

Η αρχική κεραία που σχεδιάστηκε, στη συνέχεια υλοποιήθηκε, χρησιμοποιώντας μη αγωγίμη τσόχα ως υπόστρωμα και φύλλο χαλκού για τα αγωγιμα μέρη. Στο Σχ. 5.10 φαίνεται το πρωτότυπο της αρχικής κεραίας με τις διαστάσεις του πίνακα 5.2.



Σχήμα 5.10: Πρωτότυπο αρχικής κεραίας.

Η φορητή κεραία του Σχ. 5.10 με το υπόστρωμα τσόχας μετρήθηκε στον ανηχικό θάλαμο και στη συνέχεια έγινε σύγκριση του συντελεστή ανάκλασης των μετρήσεων και της προσομοίωσης (Σχ. 5.6). Από το Σχ. 5.6 παρατηρούμε ότι ενώ βάσει της προσομοίωσης η κεραία έπρεπε να συντονίζεται στα 2.45 GHz, η τιμή της συχνότητας συντονισμού που προέκυψε από τις μετρήσεις είναι 2.4 GHz και τα 2.45 GHz είναι

στα όρια του εύρους ζώνης της κεραίας. Η συχνότητα συντονισμού που προέκυψε από τις μετρήσεις είναι συνεπώς μικρότερη από αυτήν της προσομοίωσης. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η πραγματική επιτρεπτότητα του υλικού είναι μεγαλύτερη από αυτήν που είχαμε αρχικά υποθέσει. Με την επαναληπτική διαδικασία που περιγράψαμε στην παράγραφο 5.3.2 έγινε ο καθορισμός των διηλεκτρικών ιδιοτήτων της τσόχας (ϵ_r , $\tan \delta$) και προέκυψαν οι τιμές που φαίνονται στον πίνακα 5.1.

5.5 Υλοποίηση φορετής κεραίας με ομοαξονική τροφοδοσία

5.5.1 Υλοποίηση κεραίας

Η κεραία με ομοαξονική τροφοδοσία και αγώγιμα μέρη από φύλλο χαλκού (Copper patch and Coaxial feed – CC) είναι του ίδιου τύπου με αυτή που υλοποιήθηκε στην παράγραφο 5.4, με διαφορετικές όμως διαστάσεις. Η κεραία CC σχεδιάστηκε με βάση τα πραγματικά διηλεκτρικά χαρακτηριστικά της τσόχας, όπως προέκυψαν από την διαδικασία που περιγράψαμε στην παράγραφο 5.3 και έτσι καταλήξαμε στις τελικές διαστάσεις της νέας κεραίας. Οι τελικές διαστάσεις της κεραίας που κατασκευάστηκε φαίνονται στον πίνακα 5.4.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.4 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΤΕΛΙΚΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Χαρακτηριστικά υποστρώματος	ϵ_r	$\tan \delta$	h (mm)			
	1.17	0.004	4			
Διαστάσεις	L_p	W_p	L_g	W_g	x_f	y_f
(mm)	50.5	48	72	55	1	10

Το αγώγιμο φύλλο χαλκού που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του patch και του επιπέδου γείωσης έχει πάχος 0.12 mm. Τα αγώγιμα μέρη κόπηκαν στις κατάλληλες διαστάσεις και κολλήθηκαν με κόλλα πάνω στο υπόστρωμα από τσόχα. Τα πρωτότυπα της φορετής κεραίας τροφοδοτούνται μέσω τροφοδοσίας ομοαξονικού SMA 50Ω. Η τελική κεραία παρουσιάζεται στο Σχ. 5.11, όπου παρουσιάζονται τα τρία πανομοιότυπα πρωτότυπα που κατασκευάστηκαν.



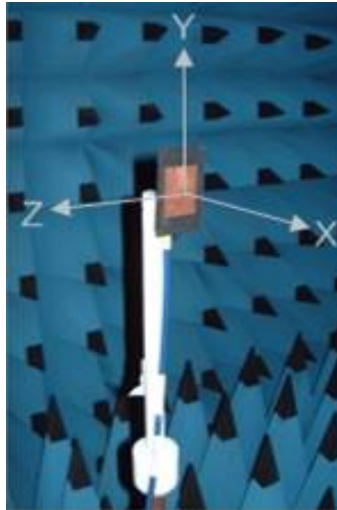
Σχήμα 5.11: Πρωτότυπο τελικής κεραίας.

5.5.2 Μέτρηση κεραίας

Για να αξιολογήσουμε την απόδοση της φορετής κεραίας CC, πραγματοποιήθηκαν δύο είδη μετρήσεων. Αρχικά μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά της κεραίας με ένα Agilent/HP 8358 VNA, δίνοντας μια πρώτη ένδειξη για τις επιδόσεις της κεραίας μέσω του συντελεστή ανάκλασης $|S_{11}|$. Στη συνέχεια μετρήθηκε η μετάδοση μεταξύ δύο κεραίων στον ανηχικό θάλαμο του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος», δίνοντας επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την πόλωσή της και την απόδοση ακτινοβολίας. Ο ανηχικός θάλαμος είναι ένας ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένος θάλαμος που προσομοιώνει περιβάλλον "ελεύθερου χώρου" μέσω της απορρόφησης όλης της ΗΜ ενέργειας που προσπίπτει στα τοιχώματά του. Ένας ιδανικός ανηχικός θάλαμος συμπεριφέρεται ως ένας άδειος χώρος με διαστάσεις που τείνουν στο άπειρο. Η οροφή, οι τοίχοι και το δάπεδο του θαλάμου καλύπτονται εσωτερικά με ειδικά πυραμιδοειδή απορροφητικά σώματα από αφρώδες υλικό εμποτισμένο με σκόνη άνθρακα και από ειδικά πλακίδια φερίτη.

Δημιουργείται κατ' αυτόν τον τρόπο στο εσωτερικό του θαλάμου ένα περιβάλλον διάδοσης που εξασφαλίζει ακρίβεια, αξιοπιστία και επαναληψιμότητα μετρήσεων των τιμών του ΗΜ πεδίου.

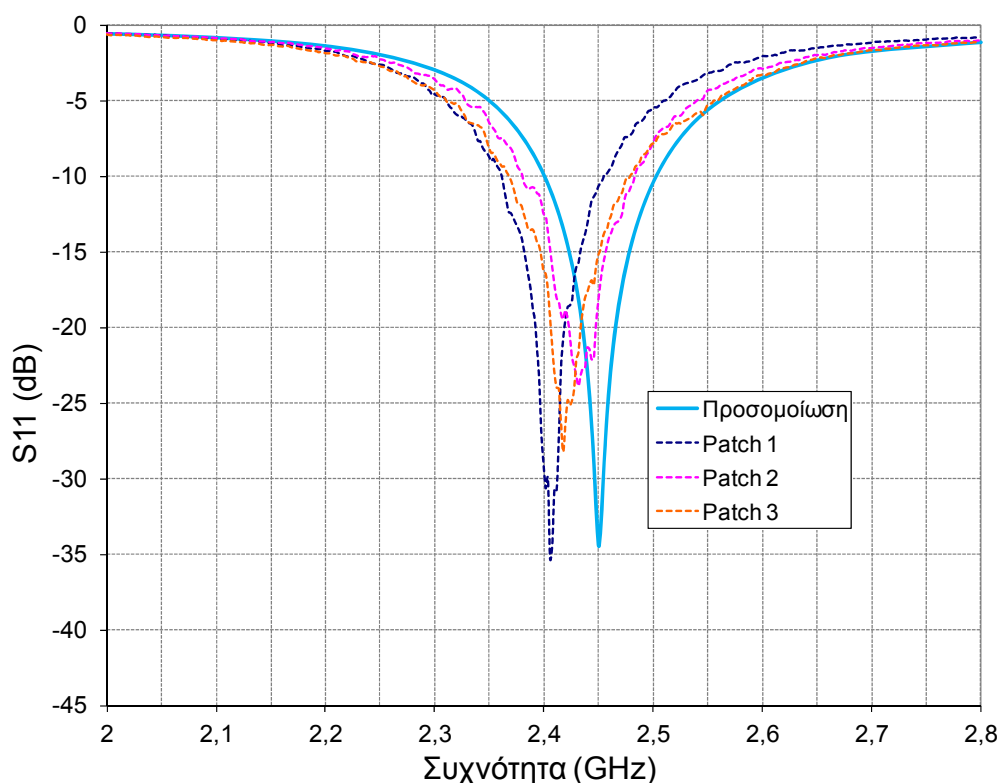
Μέσα στον ανηχικό θάλαμο μετρήθηκαν με την βοήθεια ενός αναλυτή δικτυωμάτων, τα διαγράμματα του συντελεστή ανάκλασης και τα διαγράμματα ακτινοβολίας στο xy και xz επίπεδο. Σε αυτή τη διάταξη μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκε μια φορητή κεραία και μια κεραία χοάνης με γνωστό κέρδος. Στο Σχ. 5.12 απεικονίζεται η διάταξη των μετρήσεων μέσα στον ανηχικό θάλαμο. Η μετρητική απόσταση του θαλάμου είναι 5m.



Σχήμα 5.12: Διάταξη μετρήσεων στον ανηχικό θάλαμο.

Στο Σχ. 5.13 απεικονίζονται τα διαγράμματα του συντελεστή S_{11} και για τα τρία πρωτότυπα της κεραίας που κατασκευάστηκαν. Όπως παρατηρούμε υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των συντελεστών ανάκλασης που μετρήθηκαν σε σύγκριση με τον αντίστοιχο που προέκυψε από την προσομοίωση.

Πιο συγκεκριμένα τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.5.

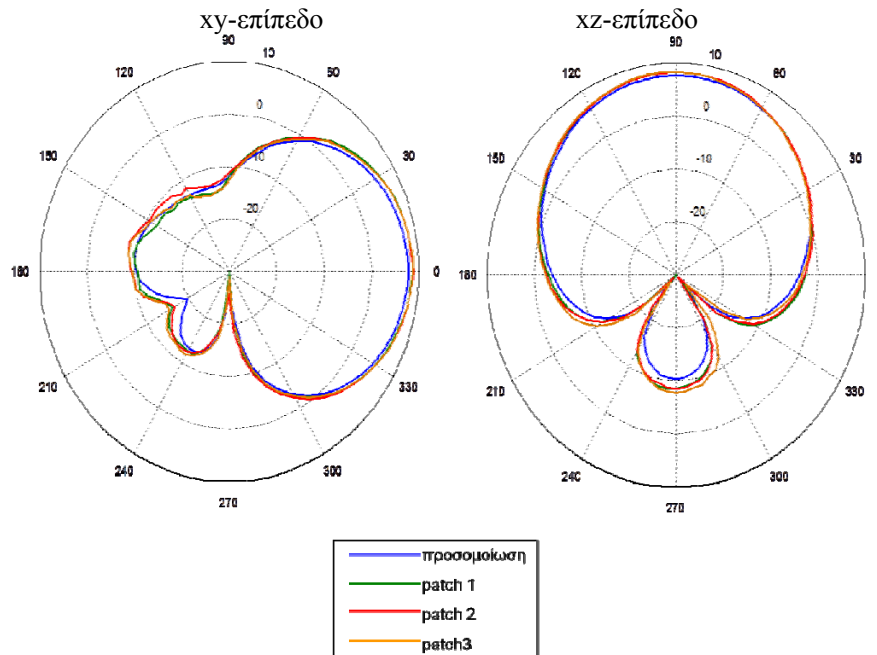


Σχήμα 5.13: Προσομοίωση και μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης της τελικής κεραιας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.5 ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ ΚΑΙ ΚΕΡΔΟΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Πρωτότυπο κεραιάς	Συχνότητα συντονισμού	Βάθος συντονισμού	Εύρος ζώνης	Κέρδος	Απόδοση ακτινοβολίας
Προσομοίωση	2.45 GHz	-34.5 dB	102 MHz	7.8 dBi	93%
1	2.41 GHz	-35.3 dB	90 MHz	8 dBi	93%
2	2.43 GHz	-23.9 dB	100 MHz		
3	2.42 GHz	-28.2 dB	110 MHz		

Παρατηρούμε ότι ο πραγματικός συντελεστής ανάκλασης έχει κάποιες μικρές αποκλίσεις σε σχέση με την προσομοίωση, αλλά και μεταξύ των τριών πρωτοτύπων. Οι αποκλίσεις αυτές πιθανώς οφείλονται σε μικρές κατασκευαστικές ατέλειες αλλά και στην κόλληση μεταξύ τους με κόλλα που φαίνεται να επιδρά στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας των κεραιών. Η φορητή κεραία είναι γραμμικά πολωμένη, που σημαίνει ότι το ηλεκτρικό πεδίο που εκπέμπεται από την κεραία έχει σταθερό προσανατολισμό σε κάθε σημείο για όλες τις χρονικές στιγμές. Για να διασφαλίσουμε τη μέγιστη λήψη, η κεραία λήψης πρέπει να έχει την ίδια πόλωση με την κεραία εκπομπής. Στο Σχ. 5.14 φαίνονται τα διαγράμματα κέρδους της τελικής κεραιάς.



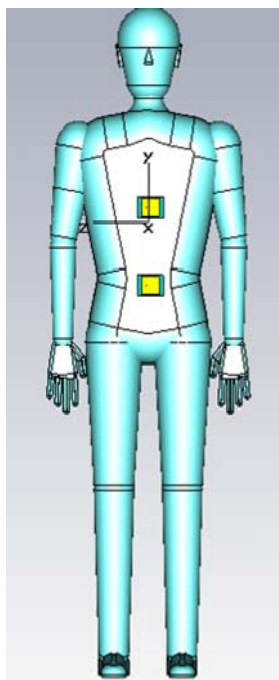
Σχήμα 5.14: Διαγράμματα κέρδους τελικής κεραιάς στα επίπεδα xy και xz.

Η κεραιά CC προσομοιώθηκε και παρουσία του ανθρώπινου σώματος για να διερευνηθεί η επίδρασή του στα χαρακτηριστικά της κεραιάς. Το μοντέλο του σώματος παρουσιάζεται στο Σχ. 5.15.

Η κεραιά CC τοποθετήθηκε πάνω σε ένα ομοίωμα ανθρώπου που υλοποιήθηκε στο πρόγραμμα σχεδιασμού και προσομοίωσης Autodesk Inventor 3D CAD [155] και εισήχθη στη συνέχεια στο CST Microwave Studio [264] (Σχ. 5.15). Στα πλαίσια της προσομοίωσης αυτής θεωρούμε ότι υπάρχει ομοιογενής κατανομή και όλο το σώμα αποτελείται από το ίδιο υλικό. Στα σχετικά πρότυπα [143] και [144] καθορίζονται οι διηλεκτρικές ιδιότητες του ανθρώπινου σώματος. Η διηλεκτρική επιτρεπτότητα εκφράζεται ως εξής:

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (5.8)$$

όπου το ϵ_r' δηλώνει το πραγματικό μέρος της επιτρεπτότητας και αντίστοιχα το ϵ_r'' δηλώνει το φανταστικό.



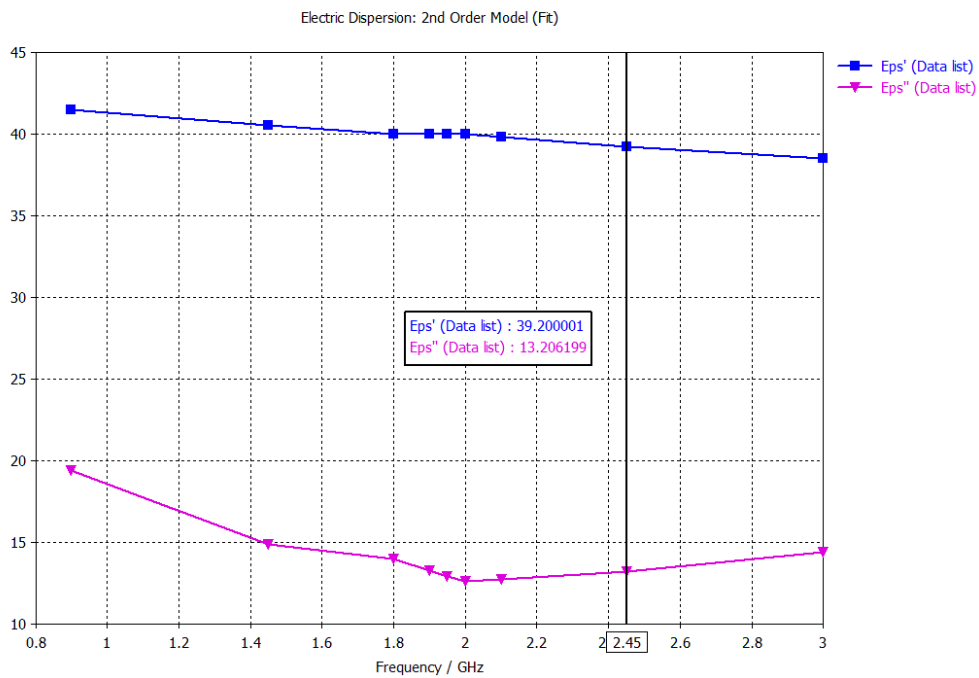
Σχήμα 5.15: Μοντέλο ανθρώπινου σώματος.

Το φανταστικό μέρος υπολογίζεται μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σ ως εξής:

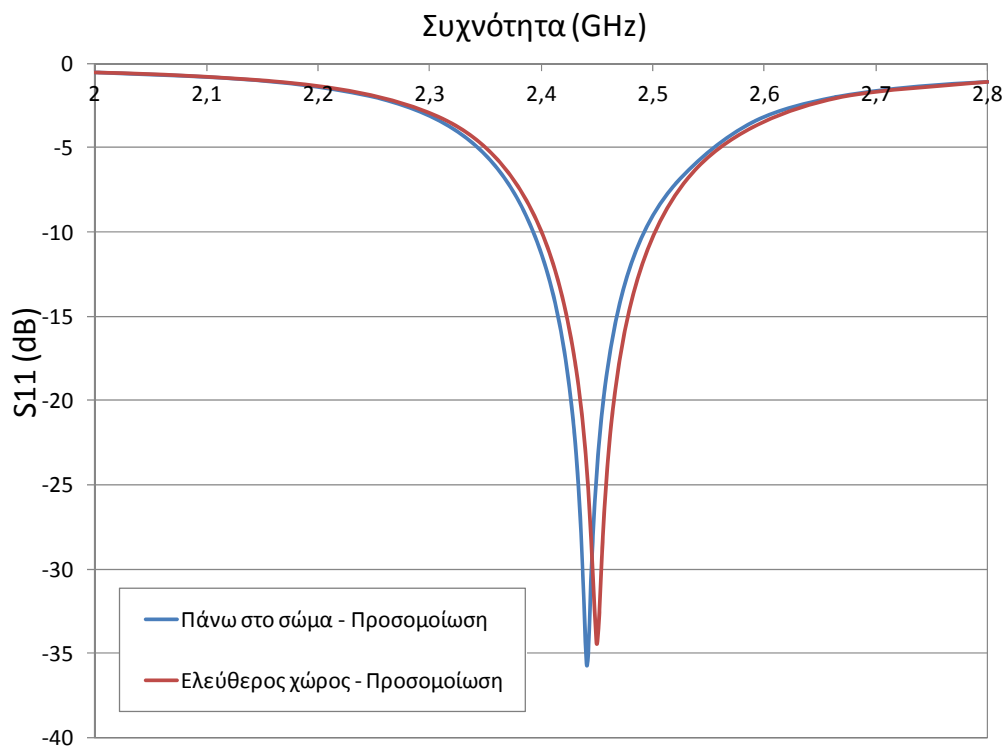
$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (5.9)$$

όπου η ηλεκτρική αγωγιμότητα εκφράζει το πόσο έντονα ένα υλικό αντιτίθεται στην ροή του ρεύματος και εκφράζεται σε μονάδα S/m. Το $\varepsilon_0 = 8.8 \cdot 10^{-12}$ είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού και έχει μονάδες F/m και το $\omega = 2\pi f$ είναι η γωνιακή συχνότητα σε μονάδες rad/sec. Οι ιδιότητες του ανθρώπινου σώματος παρουσιάζονται στο διάγραμμα του Σχ. 5.16 συναρτήσει της συχνότητας.

Στη συχνότητα συντονισμού προκύπτει από το Σχ. 5.16 το πραγματικό $\varepsilon_r' = 39.2$ και το φανταστικό μέρος της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας $\varepsilon_r'' = 13.2$ αντίστοιχα. Συνεπώς από την (5.9) υπολογίζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα ίση με $\sigma = 1.79 \text{ S/m}$ και η τιμή της διηλεκτρική σταθεράς $\varepsilon_r = \varepsilon_r' = 39.2$.



Σχήμα 5.16: Πραγματικό (ϵ_r') και φανταστικό μέρος (ϵ_r'') της επιτρεπτότητας του σώματος.



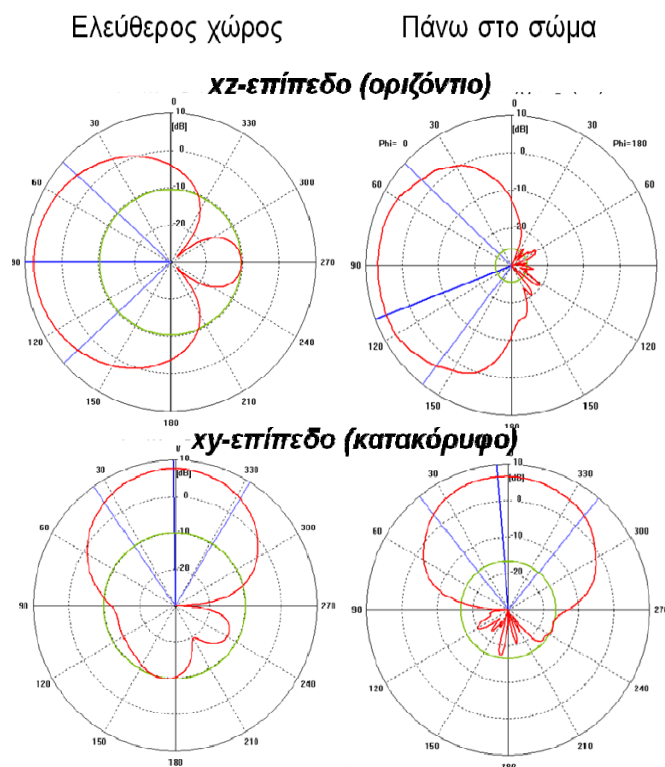
Σχήμα 5.17: Σύγκριση συντελεστή ανάκλασης στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης του συντελεστή ανάκλασης παρουσιάζονται στο Σχ. 5.17. Παρατηρούμε ότι ο αποσυντονισμός της συχνότητας είναι αμελητέος εξαιτίας της χρήσης του επιπέδου γείωσης που θωρακίζει την κεραία.

Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι τιμές του κέρδους, όταν η κεραία είναι στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα του χρήστη. Παρατηρούμε ότι η εγγύτητα με το ανθρώπινο σώμα επιφέρει μια μικρή μείωση του μεγίστου κέρδους της τάξης των 1 – 1.1 dB.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΕΡΔΟΥΣ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ ΣΤΟΝ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΧΩΡΟ ΚΑΙ ΠΑΝΩ ΣΤΟ ΣΩΜΑ

Προσομοίωση κεραίας	Κέρδος (xz-επίπεδο)	Κέρδος (xy-επίπεδο)
Ελεύθερος χώρος	7.8 dB	7.8 dB
Πάνω στο σώμα	6.8 dB	6.7 dB



Σχήμα 5.18: Σύγκριση διαγραμμάτων ακτινοβολίας πάνω στο σώμα και στον ελεύθερο χώρο.

Στο Σχ. 5.18 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα. Παρατηρούμε μια μικρή παραμόρφωση των διαγραμμάτων

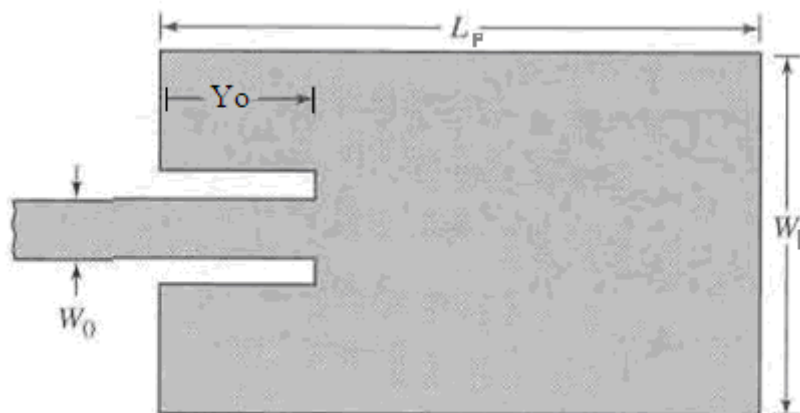
και, κυρίως, όσον αφορά την οπίσθια ακτινοβολία της κεραίας, εξαιτίας της παρουσίας του ανθρώπινου σώματος σε αυτή την κατεύθυνση.

5.6 Υλοποίηση υφασμάτινης φορητής κεραίας με τροφοδοσία μέσω γραμμής μικροταινίας

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση μιας υφασμάτινης φορητής κεραίας που τροφοδοτείται μέσω γραμμής μικροταινίας, με σκοπό την αξιολόγηση της χρήσης υφασμάτινων υλικών για την κατασκευή φορητής κεραίας. Η κεραία έχει ορθογωνικό patch και αναπτύχθηκε πάνω σε υφασμάτινο υπόστρωμα, ενώ και τα αγωγία μέρη της είναι κατασκευασμένα από αγωγίμο ύφασμα. Παράλληλα υλοποιείται και μια δεύτερη εκδοχή της ίδιας κεραίας με μεταλλικά αγωγία μέρη από φύλλο χαλκού για λόγους σύγκρισης και αξιολόγησης του αγωγίμου υφάσματος. Το υπόστρωμα είναι από τσόχα με τα ίδια χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 5.3.3.

5.6.1 Σχεδιασμός κεραίας

Η φορητή κεραία που σχεδιάστηκε είναι κεραία μικροταινίας με ορθογωνικό patch, η οποία αποτελείται από το επίπεδο γείωσης, το υπόστρωμα και μια μεταλλική επιφάνεια (patch) η οποία ακτινοβολεί.



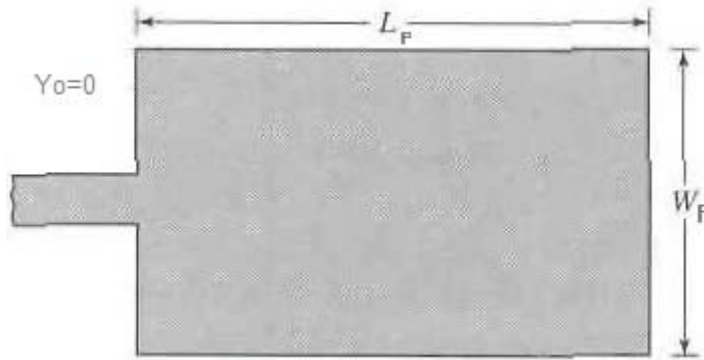
Σχήμα 5.19: Γραμμή μικροταινίας που εισέρχεται σε βάθος Y_0 μέσα στο patch [202].

Στο Σχ. 5.19 απεικονίζεται το patch της κεραίας που τροφοδοτείται μέσω μιας γραμμής μικροταινίας. Ο σχεδιασμός της κεραίας αυτής ακολουθεί την ίδια μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.2. Παρατηρώντας το Σχ. 5.19 βλέπουμε ότι η γραμμή μικροταινίας εισχωρεί μέσα στο patch σε βάθος Y_o . Η πηγή έχει εκ κατασκευής εσωτερική αντίσταση 50Ω . Για να έχουμε τη βέλτιστη προσαρμογή θα πρέπει και η κεραία να έχει αντίσταση 50Ω . Η αντίσταση την οποία θα έβλεπε η κεραία για $Y_o = 0$ (Σχ. 5.20), δηλαδή αν δεν είχε εισχωρήσει καθόλου μέσα στο patch η γραμμή μικροταινίας θα ήταν:

$$R_{in} = \frac{1}{2G_1} \quad (5.10)$$

όπου η παράμετρος G_1 δίνεται από :

$$G_1 = \frac{W_p}{120\lambda_o} \quad (5.11)$$

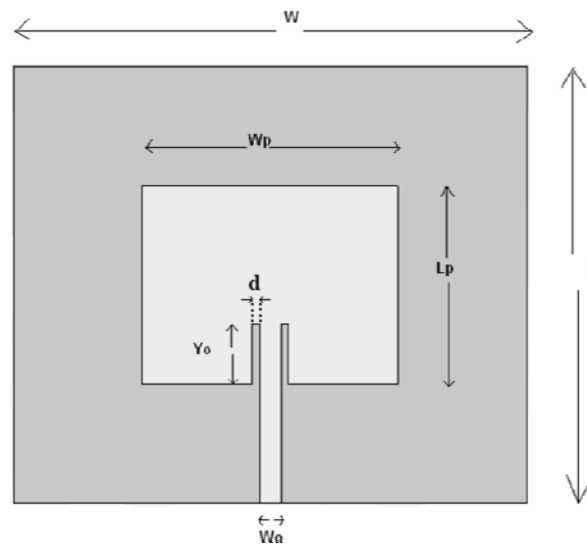


Σχήμα 5.20: Γραμμή μικροταινίας που δεν εισχωρεί στο patch [202].

Το W_p είναι το πλάτος του patch, όπως υπολογίζεται από την (5.2) και λ_o το μήκος κύματος που εκπέμπει η κεραία στον ελεύθερο χώρο. Το πόσο θα εισχωρήσει η γραμμή μικροταινίας μέσα στο patch, δηλαδή το Y_o , ώστε να υπάρχει καλή προσαρμογή υπολογίζεται από την:

$$R_{in(Y=Y_o)} = R_{in(Y=0)} \cos^2 \left(\frac{\pi}{L_p} Y_o \right) \quad (5.12)$$

Στην (5.12) απαιτούμε το $R_{in(y=y_0)}$ να είναι 50Ω αφού αυτή είναι η εσωτερική αντίσταση της πηγής. Το L_p είναι το μήκος του patch που έχει υπολογιστεί από την (5.3). Η κάτοψη της κεραίας δίνεται στο Σχ. 5.21.



Σχήμα 5.21: Κάτοψη της patch κεραίας.

Οι παράμετροι της κεραίας που πρέπει να προσδιοριστούν είναι οι εξής:

- Το μήκος του patch, L_p .
- Το πλάτος του patch, W_p .
- Το μήκος Y_o της σχισμής που σχηματίζεται μεταξύ της γραμμής τροφοδοσίας και του patch.
- Το πάχος του κενού που δημιουργείται όταν μπαίνει η γραμμή μικροταινίας μέσα στο patch, d .
- Το πλάτος της γραμμής μικροταινίας, W_o .

Έχοντας ως δεδομένα την διηλεκτρική σταθερά του υποστρώματος ϵ_r , το πάχος των αγώγιμων επιφανειών, την επιθυμητή συχνότητα, f_r , και το πάχος του υποστρώματος, h , υπολογίζουμε το πλάτος του patch, από την (5.2). Αντικαθιστώντας τις τιμές βρίσκουμε ότι $W_p = 58 \text{ mm}$. Στη συνέχεια βρίσκουμε την

τιμή της ενεργού διηλεκτρικής σταθεράς από την (5.1). Για να υπολογίσουμε το μήκος του patch L_p χρησιμοποιούμε τις (5.3) - (5.5). Προκύπτει ότι $L_p = 52mm$. Για να υπολογίσουμε πόσο θα εισχωρήσει η γραμμή μικροταινίας μέσα στο patch, χρησιμοποιούμε τις (5.10) - (5.12). Υπολογίζουμε ότι $R_{in} = 250\Omega$ και εφαρμόζοντας την (5.12) προκύπτει ότι $Y_o = 9.8mm$. Το μήκος και το πλάτος του υποστρώματος δίνονται προσεγγιστικά από τις:

$$L = 2L_p \tag{5.13}$$

$$W = 2W_p \tag{5.14}$$

Το πλάτος της γραμμής μικροταινίας δίνεται από την:

$$W_o = (1/10)W_p \tag{5.15}$$

Στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι τελικές διαστάσεις της κεραίας όπως υπολογίστηκαν και στη συνέχεια βελτιστοποιήθηκαν με τη βοήθεια του CST Microwave Studio, για την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας και το όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.7 ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΕΡΑΙΑΣ

Χαρακτηριστικά υποστρώματος	ϵ_r	$\tan \delta$	h (mm)				
	1.17	0.004	4				
Διαστάσεις	L_p	W_p	L_g	W_g	W_o	Y_o	d
(mm)	52	58	70	68	2.8	10	1

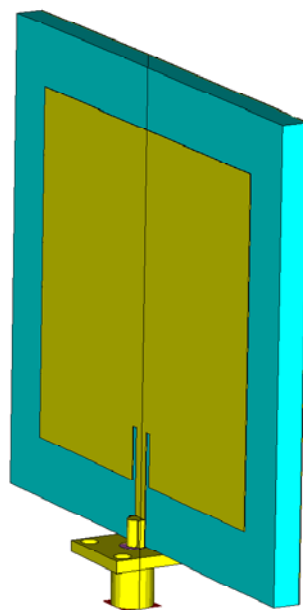
Όπως προαναφέραμε τα αγωγή μέρη της φορετής κεραίας είναι κατασκευασμένα από υφασμάτινο υλικό. Παράλληλα υλοποιείται και μια δεύτερη εκδοχή της ίδιας κεραίας με μεταλλικά αγωγή μέρη από φύλλο χαλκού για λόγους σύγκρισης. Η υφασμάτινη κεραία περιγράφεται στην παράγραφο 5.6.2, ενώ στην παράγραφο 5.6.3 παρουσιάζεται η κεραία με τα μεταλλικά αγωγή μέρη.

5.6.2 Κεραία από αγώγιμο ύφασμα

Ο στόχος για το σχεδιασμό αυτής της κεραίας είναι το εύρος ζώνης να καλύπτει τη ζώνη συχνοτήτων ISM 2.45 GHz. Το patch και το επίπεδο γείωσης της φορετής κεραίας είναι κατασκευασμένα από αγώγιμο υφασμάτινο υλικό, το Conductive Aluminum Laminated Fabric της εταιρείας Plug&Wear (Σχ. 3.30). Το υπόστρωμα είναι από τσόχα με τα ίδια χαρακτηριστικά που υπολογίστηκαν στην παράγραφο 5.3.3. Η ένωση του SMA με την κεραία έγινε με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς είναι μια πολύ ευαίσθητη κατασκευή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και της μέτρησης της εν λόγω κεραίας.

5.6.2.1 Προσομοίωση κεραίας

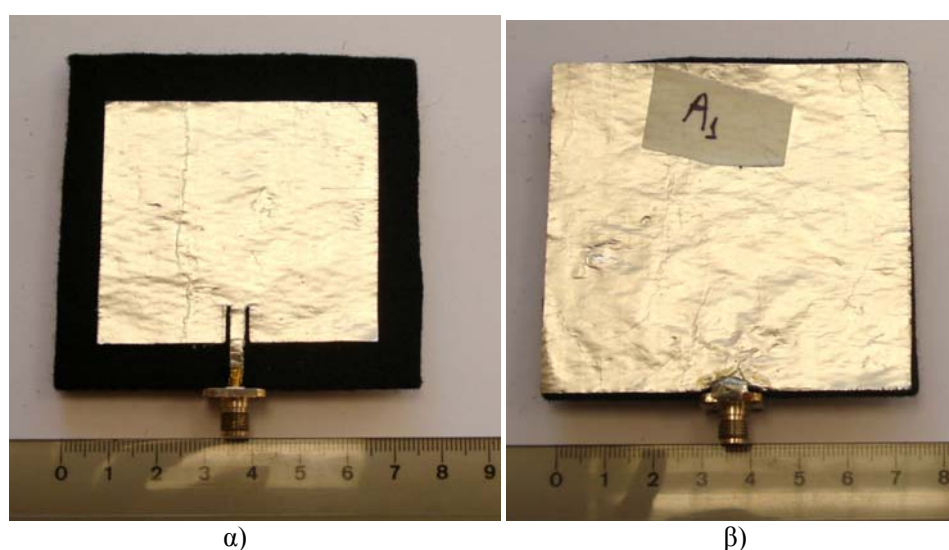
Η υφασμάτινη αυτή κεραία συμβολίζεται με TM (Textile patch and Microstrip feed). Οι διαστάσεις της κεραίας παρουσιάζονται στον πίνακα 5.7. Οι διαστάσεις του πλάτους και κυρίως του μήκους του patch είναι οι διαστάσεις που επηρεάζουν άμεσα την προσαρμογή της κεραίας. Η κεραία σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης CST Microwave Studio, με βάση αυτές τις διαστάσεις, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.22.



Σχήμα 5.22: Προσομοίωση patch κεραίας TM.

5.6.2.2 Υλοποίηση κεραιάς

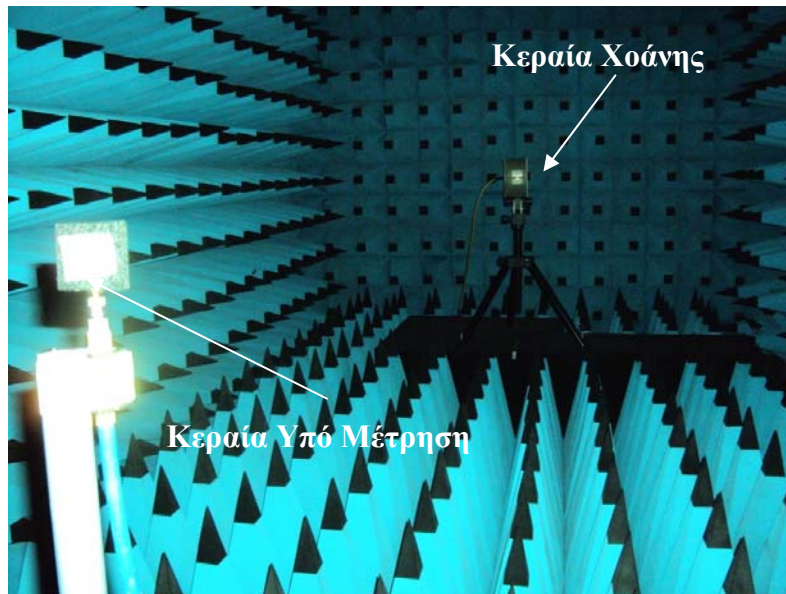
Στη συνέχεια υλοποιήθηκε η υφασμάτινη κεραιά, με βάση τον προηγούμενο σχεδιασμό. Για την κατασκευή της χρησιμοποιήθηκε αγώγιμο ύφασμα (Conductive Aluminum Laminated Fabric), ενώ για το υπόστρωμα, τσόχα. Το αγώγιμο ύφασμα κόπηκε από μια μεγάλη επιφάνεια πάχους 0.156 mm, σε κατάλληλα σχήματα. Οι επιφάνειες από αγώγιμο ύφασμα κολλήθηκαν με απλή κόλλα πάνω στο υπόστρωμα από τσόχα. Στο Σχ. 5.23 απεικονίζεται το πρωτότυπο της κεραιάς που υλοποιήθηκε.



Σχήμα 5.23: Πρωτότυπο φορητής κεραιάς TM με χρήση φύλλων χαλκού σε α) πρόσοψη και β) πίσω όψη.

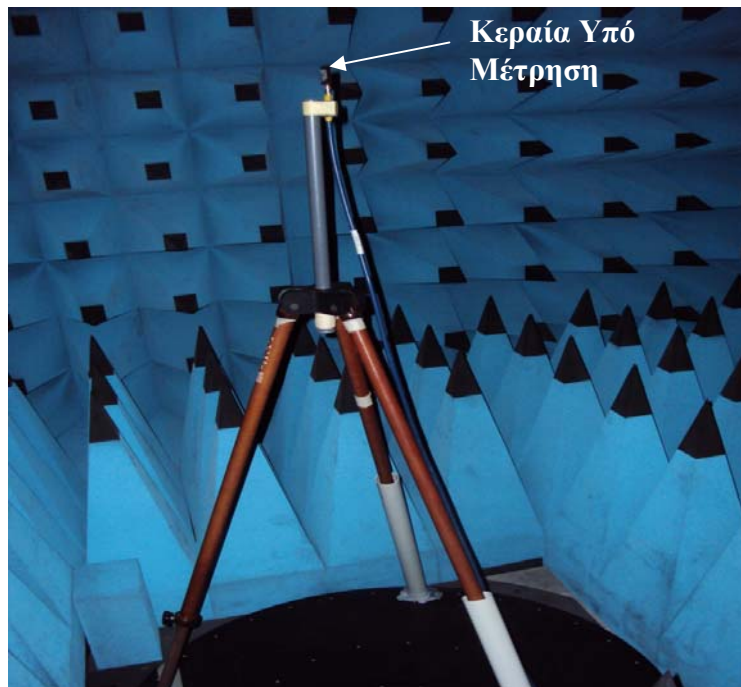
5.6.2.3 Μέτρηση κεραιάς

Μετά την υλοποίησή της, η κεραιά TM μετρήθηκε στον ανηχωικό θάλαμο. Μετρήθηκε ο συντελεστής ανάκλασης και τα διαγράμματα ακτινοβολίας στο xy και yz επίπεδο με την βοήθεια ενός αναλυτή δικτυωμάτων. Για τη μέτρηση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας έγινε χρήση μιας κεραιάς χοάνης που χρησιμοποιήθηκε σαν κεραιά αναφοράς. Στο Σχ. 5.24 φαίνεται η διάταξη των μετρήσεων μέσα στον ανηχωικό θάλαμο.



Σχήμα 5.24: Διάταξη μετρήσεων στον ανηχοϊκό θάλαμο.

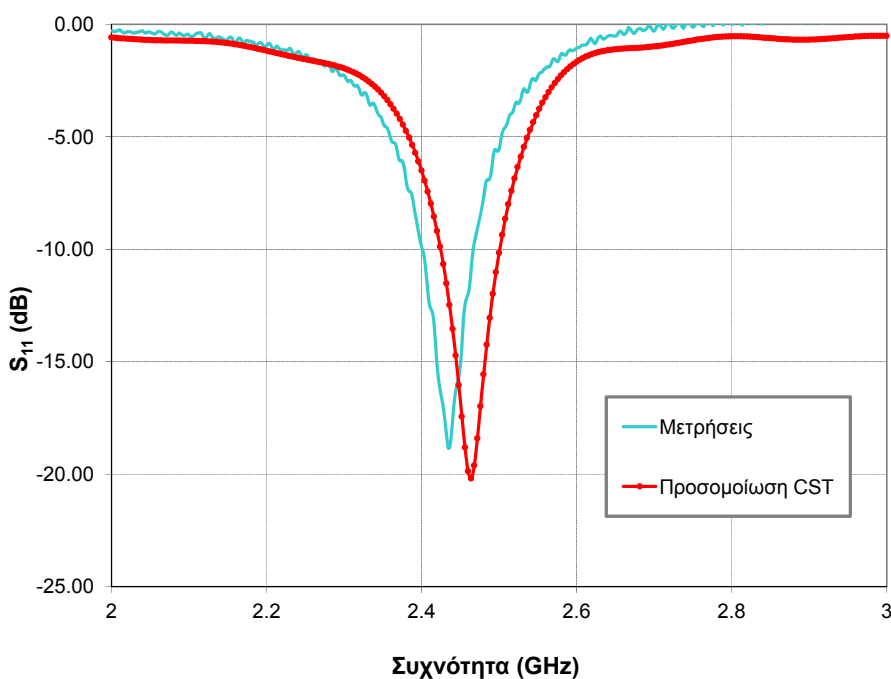
Η κεραία που μετρήθηκε, τοποθετήθηκε πάνω σε ένα τρίποδο στήριξης το οποίο μπορεί να περιστρέφεται με την βοήθεια μιας τράπεζας περιστροφής (Σχ. 5.25) και συνδέθηκε μέσω καλωδίου με τον αναλυτή δικτυωμάτων.



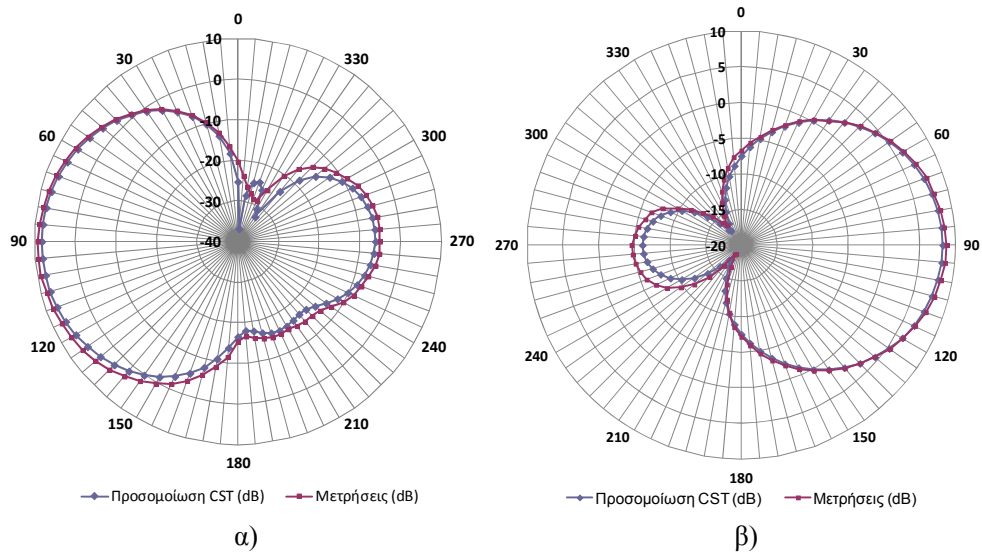
Σχήμα 5.25: Τρίποδο στήριξης και τράπεζα περιστροφής.

Στο Σχ. 5.26 παρουσιάζεται το διάγραμμα του S_{11} , ενώ στα Σχ. 5.27α και β απεικονίζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας, για τα επίπεδα xy και yz, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση και τις μετρήσεις.

Όπως παρατηρούμε, υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ του συντελεστή ανάκλασης που μετρήθηκε και του αντίστοιχου που προέκυψε από την προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα, η συχνότητα συντονισμού από την προσομοίωση είναι 2.46 GHz με βάθος συντονισμού -20 dB, ενώ η συχνότητα συντονισμού από τις μετρήσεις είναι 2.42 GHz με βάθος συντονισμού -17 dB. Επιπλέον από τα παραπάνω διαγράμματα ακτινοβολίας (Σχ. 5.27) προκύπτει ότι υπάρχει πολύ καλή συμφωνία των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που μετρήθηκαν στο θάλαμο με τα αντίστοιχα που προέκυψαν από την προσομοίωση. Το μέγιστο κέρδος της κεραίας προέκυψε 8.2 dB από την προσομοίωση και 9.3 dB από τις μετρήσεις.

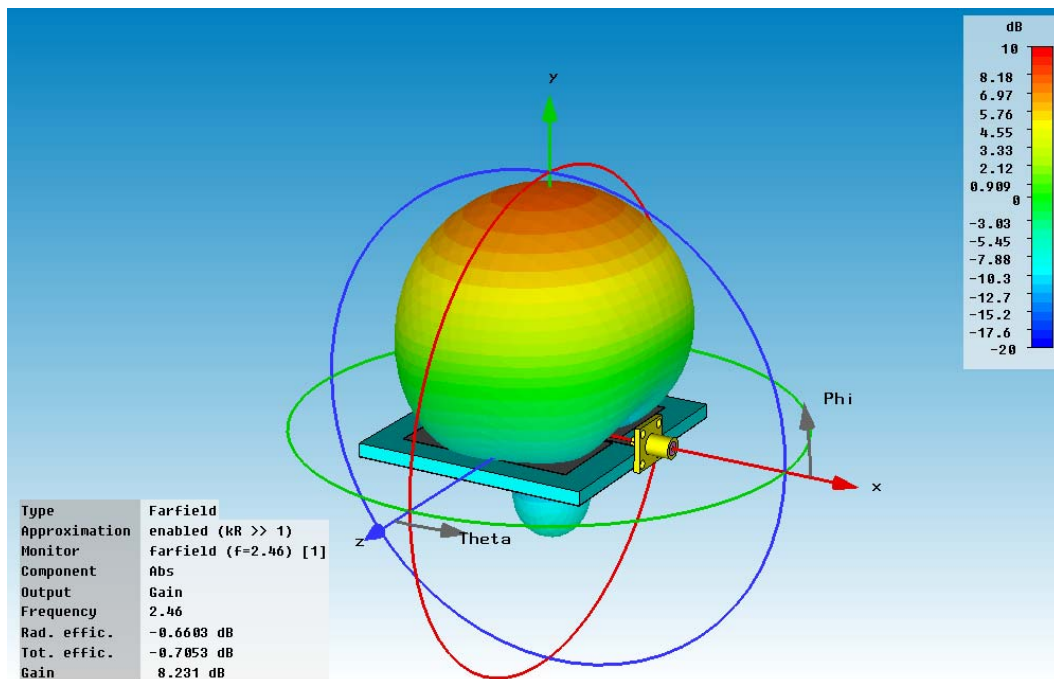


Σχήμα 5.26: Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης S_{11} της κεραίας TM όπως προέκυψε από την προσομοίωση και τις μετρήσεις.



Σχήμα 5.27: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραίας TM από προσομοίωση και μετρήσεις στο επίπεδο α) xy για $\theta=90^\circ$ και β) yz για $\varphi=90^\circ$.

Στο Σχ. 5.28 ακολουθεί το τριδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας TM με αγωγίμο ύφασμα που προέκυψε από την προσομοίωση.



Σχήμα 5.28: Τριδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας για την patch κεραία TM.

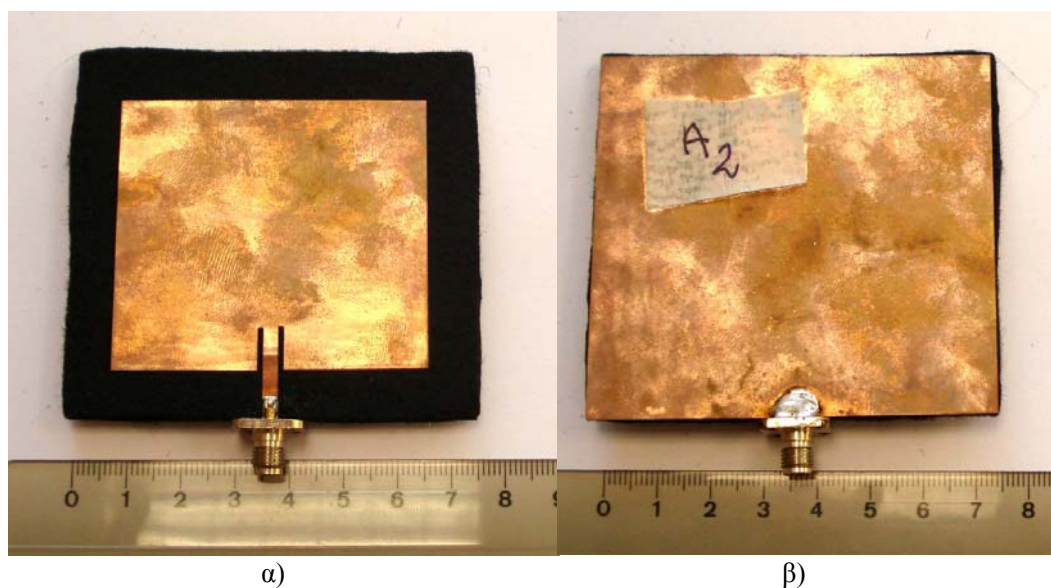
Το επίπεδο γείωσης, που έχει αυτό το μοντέλο κεραίας, έχει ως αποτέλεσμα την σχεδόν μηδενική οπίσθια ακτινοβολία. Το επίπεδο γείωσης αποτελεί τον κύριο λόγο

για τον οποίο τέτοιες κεραιές είναι κατάλληλες για χρήση πάνω στον ανθρώπινο σώμα. Δεν υπάρχει οπίσθια ακτινοβολία προς τη μεριά του ανθρώπου, όποτε εξαλείφεται η απορρόφηση από το ανθρώπινο σώμα, και συνεπώς οι απώλειες ακτινοβολίας.

5.6.3 Κεραία με μεταλλικά αγωγία μέρη

5.6.3.1 Υλοποίηση κεραίας

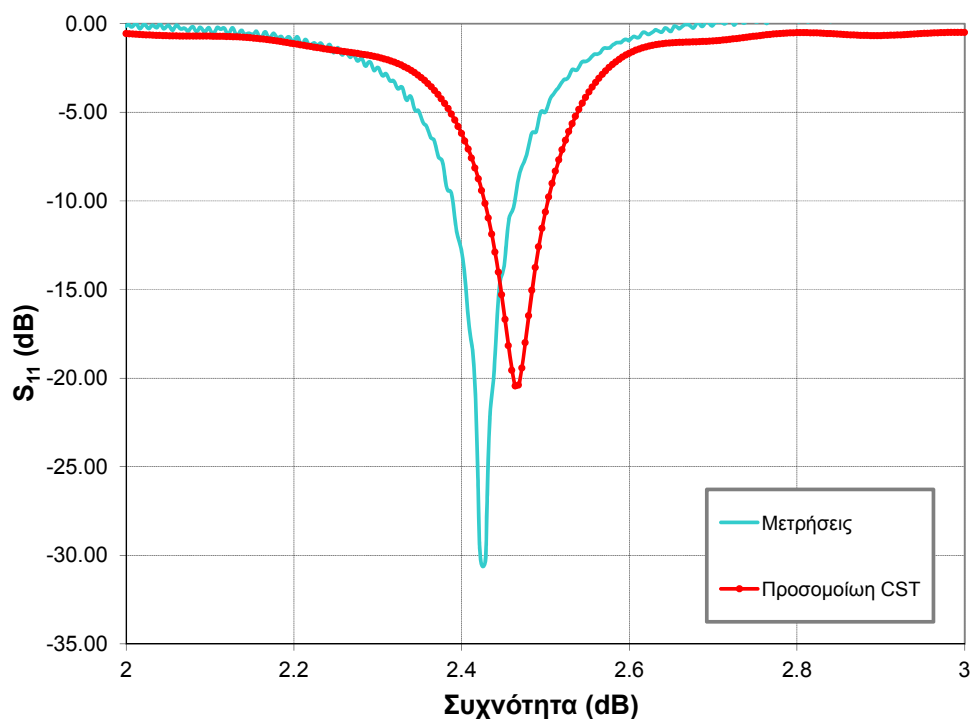
Η κεραία αυτή συμβολίζεται με CM (Copper patch and Microstrip feed). Η μόνη της διαφοροποίηση με την κεραία TM είναι ότι τα αγωγία μέρη αυτής της κεραίας είναι κατασκευασμένα από φύλλο χαλκού πάχους 0.12 mm. Οι διαστάσεις της κεραίας παρουσιάζονται στον πίνακα 5.7. Για την κατασκευή της χρησιμοποιήσαμε για τα αγωγία μέρη φύλλο χαλκού ενώ για το υπόστρωμα τσόχα. Τα φύλλα χαλκού τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τα αγωγία μέρη των κεραιών κόπηκαν από μια μεγάλη χάλκινη επιφάνεια πάχους 0.12 mm, σε κατάλληλα σχήματα. Να σημειωθεί ότι οι αγωγίμες επιφάνειες από το φύλλο χαλκού κολλήθηκαν με απλή κόλλα πάνω σε υπόστρωμα από τσόχα. Στο Σχ. 5.29 απεικονίζεται το πρωτότυπο της κεραίας που υλοποιήθηκε.



Σχήμα 5.29: Πρωτότυπο φορετής κεραίας CM με χρήση φύλλων χαλκού στα 2.45 GHz α) πρόσοψη και β) πίσω όψη.

5.6.3.2 Μέτρηση κεραίας

Η κεραία CM μετρήθηκε στον ανηχικό θάλαμο τόσο όσον αφορά το συντελεστή ανάκλασης όσο και τα διαγράμματα ακτινοβολίας της, με την ίδια διαδικασία που ακολουθήσαμε και για τη μέτρηση της κεραίας TM. Το διάγραμμα S_{11} της κεραίας CM παρουσιάζεται στο Σχ. 5.30 όπως προέκυψε από την προσομοίωση και τις μετρήσεις.

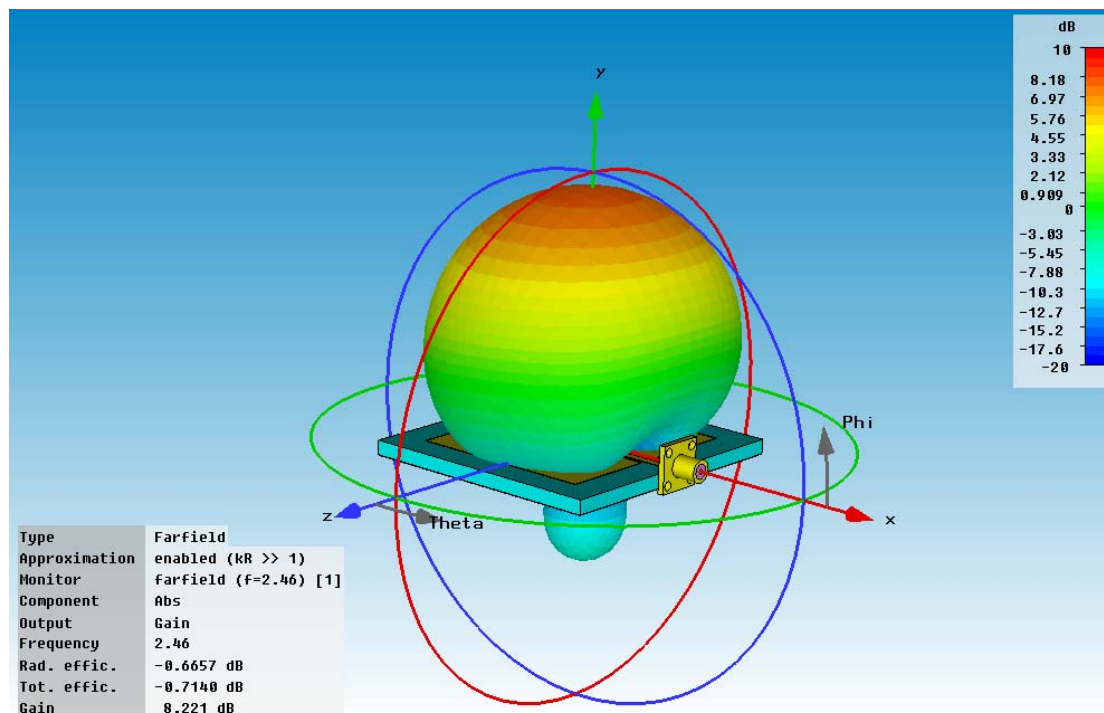


Σχήμα 5.30: Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης της κεραίας CM όπως προέκυψε από τις μετρήσεις και την προσομοίωση.

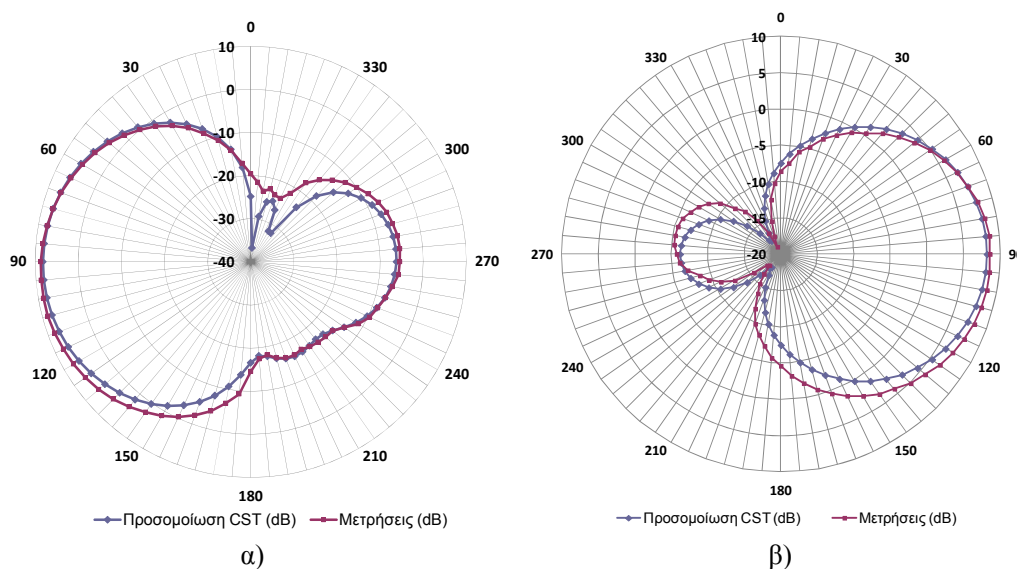
Όπως παρατηρούμε η συχνότητα συντονισμού που προέκυψε από τις μετρήσεις δεν παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση σε σχέση με την αντίστοιχη συχνότητα που υπολογίστηκε στην προσομοίωση. Επιπλέον το βάθος του συντονισμού που προέκυψε από τις μετρήσεις είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, η συχνότητα συντονισμού στον προσομοιωτή είναι 2.46 GHz με βάθος συντονισμού -21 dB, ενώ στο θάλαμο μετρήθηκε 2.43 GHz με βάθος συντονισμού -31 dB. Παρατηρούμε ότι η συχνότητα συντονισμού για την κεραία

αυτή, είναι ίση με την αντίστοιχη συχνότητα συντονισμού της υφασμάτινης κεραίας TM που έχει κατασκευαστεί με αγώγιμο ύφασμα.

Στο Σχ. 5.31 παρουσιάζεται το τριδιάστατο διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας CM.



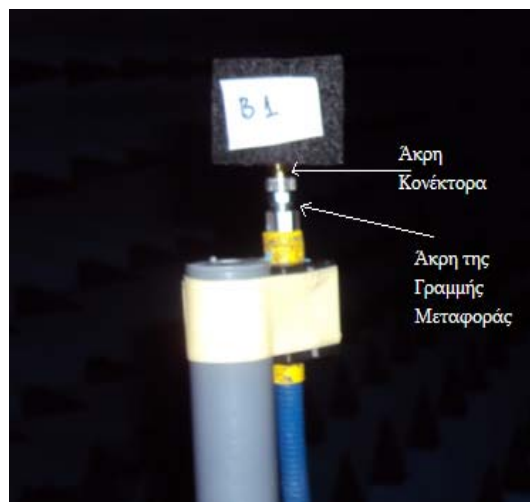
Σχήμα 5.31: Διάγραμμα ακτινοβολίας στον χώρο για την κεραία CM.



Σχήμα 5.32: Διαγράμματα ακτινοβολίας κεραίας CM από προσομοίωση και μετρήσεις στο επίπεδο α) xy για $\theta=90^\circ$ και β) yz για $\phi=90^\circ$.

Η κεραία έχει την μέγιστη κατευθυντικότητα της προς τα θετικά του άξονα y και το μέγιστο κέρδος της εκτιμήθηκε 8.2 dB από την προσομοίωση και 8.8 dB από τις μετρήσεις. Κάτω από το επίπεδο γείωσης παρατηρούμε ότι η ακτινοβολία είναι πολύ περιορισμένη, όπως είναι αναμενόμενο (Σχ. 5.31). Επίσης στην περιοχή που βρίσκεται η γραμμή μικροταινίας, η κεραία έχει μηδενική ακτινοβολία και το διάγραμμα παρουσιάζει ένα βύθισμα. Στα Σχ. 5.32α και β παρουσιάζονται τα διαγράμματα ακτινοβολίας της κεραίας CM στα επίπεδα xy και yz αντίστοιχα.

Όπως παρατηρούμε από το Σχ. 5.32, ο κύριος λοβός της ακτινοβολίας είναι συγκεντρωμένος για $(\varphi=90^\circ, \theta=90^\circ)$. Από τα παραπάνω διαγράμματα ακτινοβολίας προκύπτει ότι υπάρχει καλή συμφωνία των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που μετρήθηκαν στο θάλαμο με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης. Οι μικρές αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων που πήραμε στον θάλαμο και των αποτελεσμάτων που πήραμε από την προσομοίωση οφείλονται στο ότι υπήρχε ακτινοβολία από την άκρη του καλωδίου τροφοδοσίας που συνέδεε τις κεραίες υπό μέτρηση, με τον αναλυτή δικτυωμάτων. Όπως βλέπουμε στο Σχ. 5.33, η άκρη του καλωδίου αυτού αποτελείται από μέταλλο που ακτινοβολεί επηρεάζοντας άμεσα τις μετρήσεις.



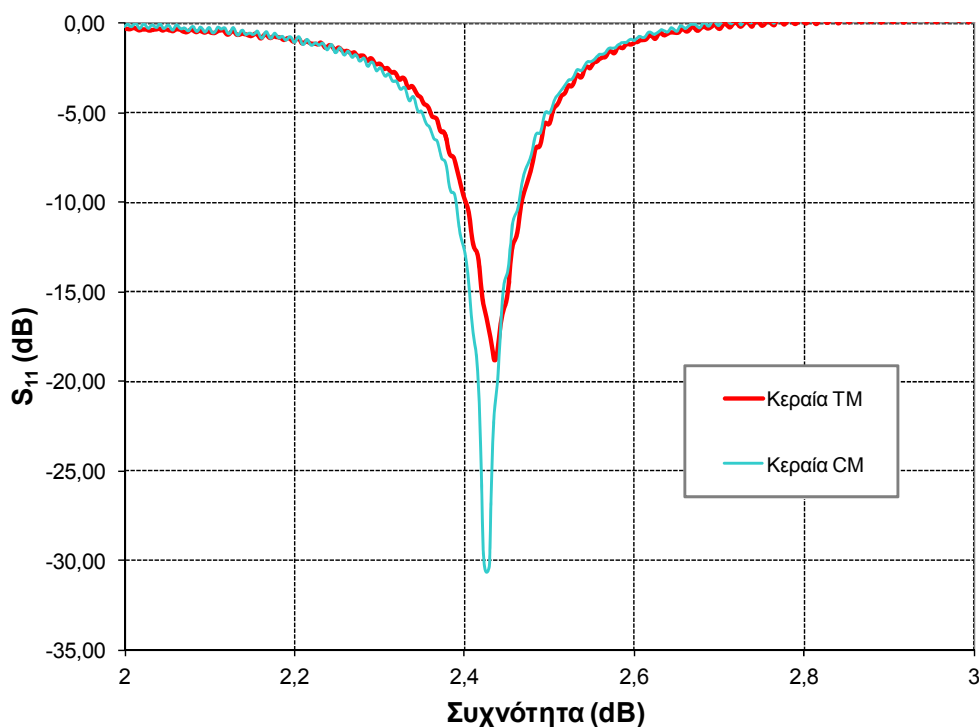
Σχήμα 5.33: Σύνδεση μιας κεραίας με καλώδιο τροφοδοσίας.

5.6.4 Συμπεράσματα

Από την προηγούμενη ανάλυση προέκυψε ότι η κεραία TM συντονίζεται στην ίδια συχνότητα με την κεραία CM, ενώ οι δύο κεραίες διαφέρουν μόνο στο βάθος

συντονισμού, με την κεραία CM να παρουσιάζει πιο βαθύ συντονισμό (Σχ. 5.34). Επιπλέον, το κέρδος της κεραίας με φύλλα χαλκού είναι 8.8 dB, ενώ η αντίστοιχη κεραία με αγώγιμο ύφασμα έχει κέρδος 9.3 dB. Οι δύο κεραίες έχουν παρόμοια ολική απόδοση ακτινοβολίας, δηλαδή η κεραία TM έχει απόδοση 85.9 %, και η κεραία CM 85.8 %.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η χρήση αγώγιμου υφάσματος οδηγεί σε μια κεραία εξίσου αποδοτική και αξιόπιστη με την αντίστοιχη με χρήση φύλλου χαλκού. Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ θετικό, καθώς η υφασμάτινη κεραία υλοποιείται πιο εύκολα και είναι πιο βολική για το χρήστη. Το ύφασμα μπορεί να κοπεί με το χέρι και η υφασμάτινη κεραία μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα στο ρουχισμό του χρήστη.



Σχήμα 5.34: Διάγραμμα του συντελεστή ανάκλασης των δύο εκδοχών της κεραίας όπως προέκυψε από τις μετρήσεις.

5.7 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάστηκε ο σχεδιασμός και η υλοποίηση διαφορετικών τύπων φορετών κεραιών, για λειτουργία στη ζώνη συχνοτήτων ISM 2.4 - 2.4835 GHz. Διερευνήθηκε η χρήση μη αγώγιμων υφασμάτων για το υπόστρωμα της κεραίας,

αλλά και αγώγιμων υφασμάτων για τα αγώγιμα μέρη. Ως υλικό του υποστρώματος χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις κατασκευές ύφασμα τσόχας, εξαιτίας της χαμηλής επιτρεπτότητας του. Για τα αγώγιμα μέρη χρησιμοποιήθηκε φύλλο χαλκού, αλλά και ένα αγώγιμο ύφασμα που αποδείχθηκε εξίσου κατάλληλο για την κατασκευή της κεραίας. Στην παράγραφο 5.5 υλοποιήθηκε μια κεραία ορθογωνικού patch από φύλλο χαλκού και ομοαξονική τροφοδοσία. Τέλος, στην παράγραφο 5.6 παρουσιάστηκε η κατασκευή μιας κεραίας ορθογωνικού patch από αγώγιμο ύφασμα με τροφοδοσία μέσω γραμμής μικροταινίας. Οι κεραίες παρουσίασαν συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των μετρήσεων. Όλες οι κεραίες παρουσιάζουν απόδοση ακτινοβολίας πάνω από 85% στον ελεύθερο χώρο. Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας όλων των μοντέλων που κατασκευάστηκαν με τις διάφορες παραμέτρους λειτουργίας τους (πίνακας 5.8).

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.8: ΣΥΝΟΠΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΚΕΡΑΙΕΣ ΠΟΥ ΥΛΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Παράμετροι	CC ελεύθερος χώρος	TM ελεύθερος χώρος	CM ελεύθερος χώρος
Συχνότητα συντονισμού (προσομοίωση) GHz	2.42	2.46	2.46
Συχνότητα συντονισμού (μέτρηση) GHz	2.42	2.42	2.42
Εύρος ζώνης (προσομοίωση) %	4.2	3.3	3.3
Εύρος ζώνης (μέτρηση) %	3.7-4.5	2.8	3.1
Κέρδος (προσομοίωση) dB	7.8	8.2	8.2
Κέρδος (μετρήσεις) dB	8	9.3	8.8
Απόδοση ακτινοβολίας (προσομοίωση) %	93	86	86

Συνοψίζοντας, παρατηρούμε ότι η κεραία με ομοαξονική τροφοδοσία, διαθέτει μεγαλύτερο εύρος ζώνης, σε σχέση με τις κεραίες με τροφοδοσία γραμμής μικροταινίας. Αυτό είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό καθώς, όπως είδαμε, η εγγύτητα της κεραίας στο ανθρώπινο σώμα μπορεί να μειώσει το εύρος ζώνης λειτουργίας της, οπότε ένα μεγάλο εύρος ζώνης βοηθά στην αντιστάθμιση αυτής της επίδρασης. Από την άλλη, οι κεραίες με τροφοδοσία γραμμής μικροταινίας έχουν

μεγαλύτερο κέρδος σε σχέση με την κεραία με ομοαξονική τροφοδοσία, η οποία βέβαια διαθέτει την υψηλότερη απόδοση ακτινοβολίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

Συστήματα φορετών κεραιών και επικοινωνία πάνω στο ανθρώπινο σώμα

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τη μοντελοποίηση του καναλιού του σώματος, στην περίπτωση συστημάτων πολλαπλών κεραιών. Αρχικά θα μελετήσουμε το απλό κανάλι του σώματος, όπου έχουμε μια κεραία πομπού και δέκτη και θα μοντελοποιήσουμε το κανάλι μέσω μετρήσεων. Θα παρουσιάσουμε τη διάταξη των μετρήσεων και τα σενάρια που ακολουθήσαμε. Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε την απόδοση του διαφορισμού χώρου για το κανάλι του σώματος και θα το μοντελοποιήσουμε.

6.1 Εισαγωγή

Για να διερευνήσουμε και να αναλύσουμε την απόδοση πολλαπλών κεραιών για ασύρματα συστήματα επικοινωνιών με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, μπορούμε να υιοθετήσουμε πολλές προσεγγίσεις. Η απόδοση μπορεί να μελετηθεί μέσω λεπτομερών προσομοιώσεων με κεραιές πάνω σε ένα αριθμητικό ομοίωμα ολόκληρου του σώματος ή μπορεί να διερευνηθεί μέσω μετρήσεων πραγματικού χρόνου των καναλιών διάδοσης πάνω στο σώμα με τις κεραιές τοποθετημένες πάνω σε άνθρωπο. Η τρίτη προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα στατιστικό μοντέλο καναλιού, το οποίο χαρακτηρίζει πλήρως τα κανάλια διάδοσης και το περιβάλλον πάνω στο σώμα. Η πρώτη προσέγγιση είναι πολύ απαιτητική υπολογιστικά και γίνεται ακόμα περισσότερο απαιτητική, όταν τοποθετούνται πολλαπλές κεραιές πάνω σε ένα αριθμητικό ομοίωμα. Μοιάζει σχεδόν μη πραγματοποιήσιμο, αν εισάγουμε τυχαίες κινήσεις του σώματος στην προσομοίωση, ενώ δεν έχει τόση αξία για στατική στάση του χρήστη χωρίς καμία κίνηση, καθώς ο σχεδιασμός του συστήματος βασίζεται σε στατιστικά μοντέλα καναλιού. Η τρίτη προσέγγιση μπορεί να υιοθετηθεί,

χρησιμοποιώντας ένα πρότυπο στατιστικό μοντέλο καναλιού, για τα κανάλια πάνω στο σώμα, το οποίο βέβαια έχει εξαχθεί για συγκεκριμένα σενάρια μετρήσεων, κάτι που περιορίζει την εφαρμογή του. Κατά συνέπεια, οι μετρήσεις διάδοσης του καναλιού πάνω στο σώμα είναι πολύ χρήσιμες σε πραγματικά περιβάλλοντα με φυσικές κινήσεις ενός κανονικού ανθρώπου για να ποσοτικοποιήσουμε τη σημασία των συστημάτων πολλαπλών κεραιών για φορετές εφαρμογές. Για το σκοπό αυτό, οι κεραιές τοποθετήθηκαν πάνω σε έναν εθελοντή που πραγματοποιούσε διάφορες κινήσεις σε διαφορετικά περιβάλλοντα σύμφωνα με επιλεγμένα σενάρια μετρήσεων. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά μετρήσεις του απλού καναλιού SISO του σώματος με σκοπό τη μοντελοποίησή του και περιγράφονται στην παράγραφο 6.2. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται σε μετρήσεις διαφορισμού του καναλιού πάνω στο σώμα με σκοπό την ανάλυση απόδοσης του διαφορισμού χώρου και τη μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού πάνω στο σώμα και περιγράφονται στην παράγραφο 6.3. Περισσότερες λεπτομέρειες, όπως το είδος των κεραιών, πώς τοποθετούνται πάνω στο σώμα κ.τ.λ., δίνονται στις αντίστοιχες παραγράφους. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στη ζώνη συχνοτήτων 2.45 GHz ISM band. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται σε δύο περιβάλλοντα, σε ένα εσωτερικού χώρου με πολλαπλές διαδρομές και στον ανηχωτικό θάλαμο. Χρησιμοποιούνται ομοαξονικά καλώδια για τη σύνδεση των κεραιών με τον εξοπλισμό των μετρήσεων. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πραγματοποιούνται συγκεκριμένες ακολουθίες κινήσεων από το χρήστη. Οι κινήσεις αυτές περιγράφονται αργότερα σε αυτό το κεφάλαιο.

6.2 Μοντελοποίηση του καναλιού του σώματος (on-body channel)

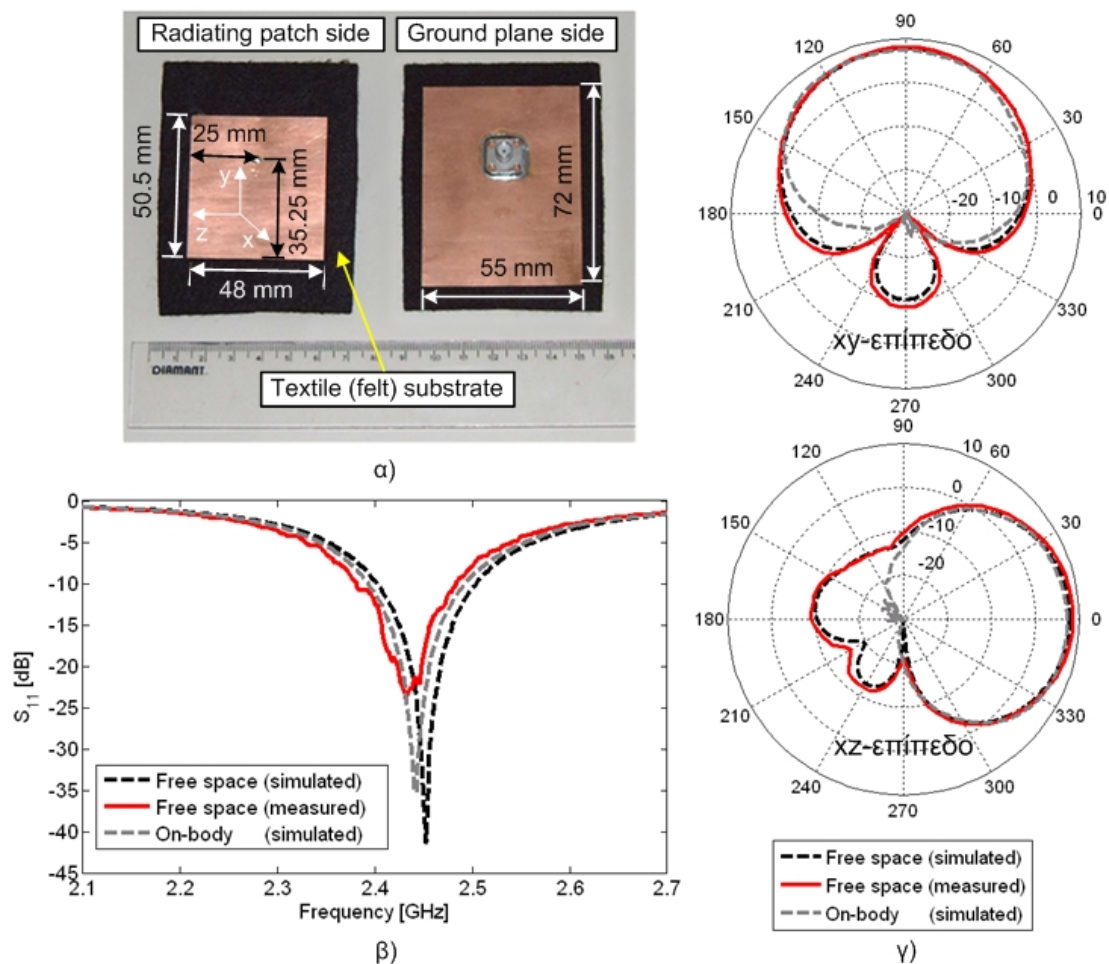
Οι διαλείψεις που υφίστανται τα κανάλια πάνω στο σώμα, μπορούν να θεωρηθούν ως η συνισταμένη δύο συνιστωσών: της επίδρασης της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών που προκαλείται από το γύρω περιβάλλον και της επίδρασης του ανθρώπινου σώματος. Στα πλαίσια της διατριβής, πραγματοποιήσαμε μια διεξοδική έρευνα των φαινομένων διάδοσης και των διαλείψεων του καναλιού πάνω στο σώμα. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε δύο περιβάλλοντα, ένα περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις και ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου στη συχνότητα των 2.45 GHz, με σκοπό να

μοντελοποιήσουμε το κανάλι του σώματος, που περιλαμβάνει τόσο την επίδραση του ανθρώπινου σώματος όσο και του περιβάλλοντος. Αυτή η διερεύνηση βασίζεται σε μετρήσεις σήματος που πραγματοποιήθηκαν για περιπτώσεις, τόσο στατικού, όσο και κινούμενου χρήστη, χρησιμοποιώντας φορητές κεραίες που τοποθετούνται σε διάφορες θέσεις πάνω στο ανθρώπινο σώμα. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, εστιάζουμε στις διαλείψεις μικρής κλίμακας και εντοπίζουμε το ενδιαφέρον μας στην επίδραση της κίνησης του χρήστη και της θέσης της κεραίας. Προέκυψε ένας εκτεταμένος αριθμός μετρήσεων του σήματος για συγκεκριμένα σενάρια. Τα σενάρια αυτά, λαμβάνουν υπόψη τους διαφορετικές θέσεις των κεραίων λήψης (Rx) και κινήσεις του χρήστη καθώς και τις αλλαγές του περιβάλλοντος. Επίσης πραγματοποιείται μια λεπτομερής στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, όπου εξάγονται εμπειρικά στατιστικά μεγέθη πρώτης και δεύτερης τάξης. Θεωρούμε διάφορες στατιστικές κατανομές για τον έλεγχο καλής προσαρμογής των δεδομένων, που χρησιμοποιούνται ευρέως στη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα.

6.2.1 Επιλογή και τοποθέτηση φορητών κεραίων πάνω στο σώμα

Η φορητή κεραία που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη είναι η κεραία CC που υλοποιήθηκε στην παράγραφο 5.5. Η κεραία CC, όπως είδαμε, είναι μια γραμμικά πολωμένη κεραία ορθογωνικού patch που λειτουργεί στην ζώνη συχνοτήτων ISM στα 2.45 GHz. Το εύρος ζώνης της κεραίας είναι 100 MHz για $S_{11} < -10\text{dB}$ και το μέγιστο κέρδος της κεραίας μετρήθηκε ίσο με 8 dBi. Τα αγώγιμα μέρη της κεραίας (το επίπεδο γείωσης και το ορθογωνικό patch), είναι κατασκευασμένα από φύλλο χαλκού και είναι προσκολλημένα στην επιφάνεια του υφασμάτινου υποστρώματος από τσόχα. Σε αυτή τη μελέτη, οι κεραίες θεωρούνται ως μέρος του καναλιού διάδοσης πάνω στο σώμα. Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιήσαμε αυτή την απλή και ευρέως χρησιμοποιούμενη κεραία, με σκοπό να εστιάσουμε στην επίδραση της θέσης της κεραίας και της κίνησης του χρήστη στα χαρακτηριστικά των διαλείψεων του καναλιού. Αυτός ο τύπος κεραίας είναι μια ρεαλιστική επιλογή για φορητές εφαρμογές καθώς είναι χαμηλού προφίλ, οικονομική, απλή στην κατασκευή και στην ενσωμάτωση στο ρουχισμό του χρήστη. Επιπλέον, δεν επηρεάζεται από την εγγύτητα

στο σώμα του χρήστη, όπως άλλα είδη κεραιών (π.χ. ομοιοκατευθυντικές κεραιές) εξαιτίας της παρουσίας του επιπέδου γείωσης. Ένας ουσιαστικός λόγος, λοιπόν, που προτιμάται αυτή η κεραιά για επικοινωνίες πάνω στο σώμα, είναι ότι δεν έχει οπίσθια ακτινοβολία και απώλειες ακτινοβολίας.



Σχήμα 6.1: α) Πρωτότυπο της φορετής κεραιάς, β) συντελεστής ανάκλασης S_{11} από προσομοίωση και από μετρήσεις, γ) διαγράμματα κέρδους στα 2.45 GHz από μετρήσεις και προσομοίωση στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα.

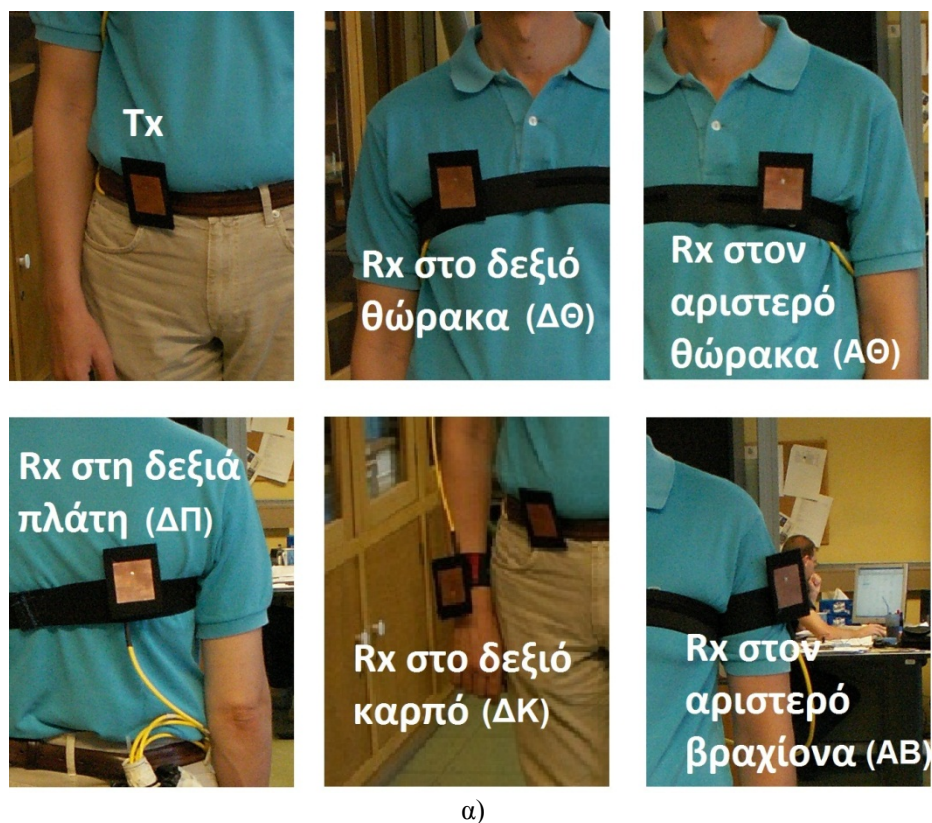
Το Σχ. 6.1 παρουσιάζει τη γεωμετρία, το συντελεστή ανάκλασης και τα διαγράμματα κέρδους της φορετής κεραιάς στον ελεύθερο χώρο και πάνω στο σώμα. Ο αποσυντονισμός της συχνότητας και η παραμόρφωση του διαγράμματος κέρδους που παρατηρούνται όταν οι κεραιές βρίσκονται πάνω στο σώμα του χρήστη είναι αμελητέα εξαιτίας της παρουσίας του επιπέδου γείωσης της κεραιάς, όπως αναφέραμε στην παράγραφο 5.5. Το σύστημα μετρήσεων αποτελείται από μια φορητή

κεραία εκπομπής που τοποθετείται πάνω στο σώμα του χρήστη σε μια σταθερή θέση και μια φορητή κεραία λήψης που τοποθετείται σε διάφορες θέσεις πάνω στο σώμα, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.2.

Οι κεραιές φέρονταν από έναν μέσου μεγέθους ενήλικα άντρα (75 kg βάρος και 1.75 m ύψος), που επιλέχθηκε με σκοπό να εμβαθύνουμε στην επίδραση του περιβάλλοντος, της κίνησης του χρήστη και της θέσης της κεραίας στις διαλείψεις του καναλιού του σώματος. Η χρήση ενός άντρα μέσου μεγέθους για τη διαδικασία των μετρήσεων, είναι μια κοινή πρακτική σε πολλές σχετικές εργασίες [242], [237], [149]. Επιπλέον, αυτή η επιλογή επιτρέπει την αποτελεσματική σύγκριση των αποτελεσμάτων μας με ήδη δημοσιευμένα αποτελέσματα.

Για τη διαδικασία των μετρήσεων, η κεραία εκπομπής (Tx) τοποθετείται στη δεξιά πλευρά της μέσης του χρήστη (στη ζώνη), περίπου 85 mm από τον κεντρικό άξονα του σώματος του χρήστη, που θεωρείται μια τυπική θέση για φορητές εφαρμογές, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.2. Μεταξύ των κεραιών και του σώματος υπάρχει μια απόσταση περίπου 15 mm. Επιλέχθηκαν πέντε θέσεις πάνω στο σώμα για την τοποθέτηση της κεραίας Rx, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 6.2. Πιο συγκεκριμένα, οι θέσεις της κεραίας λήψης είναι: δεξιά πλευρά του θώρακα (ΔΘ), αριστερή πλευρά του θώρακα (ΑΘ), δεξιά πλευρά της πλάτης (ΔΠ), δεξιός καρπός (ΔΚ) και αριστερός βραχίονας (ΑΒ). Όλες οι προαναφερθείσες θέσεις της κεραίας είναι χαρακτηριστικές θέσεις για επικοινωνιακές και ιατρικές εφαρμογές (π.χ. θώρακας – παρακολούθηση της θέσης του ασθενή, καρπός – μετρητής παλμών, κινητό τηλέφωνο καρπού).

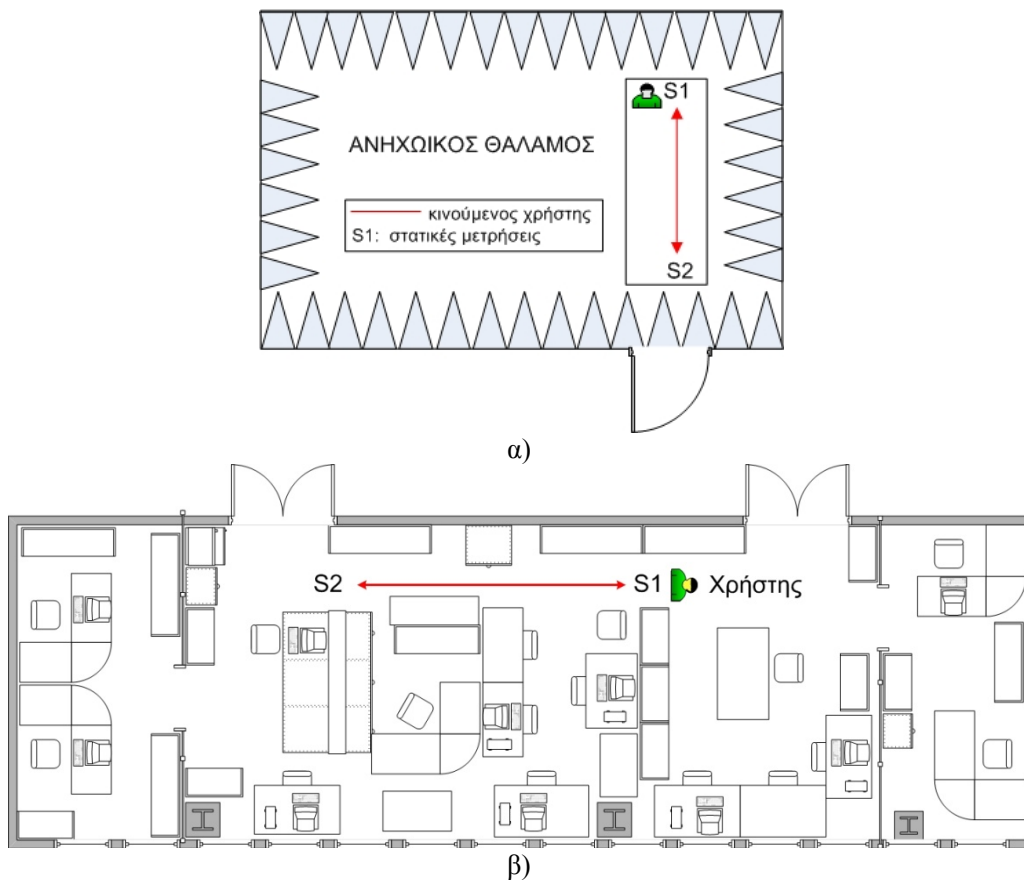
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι τα ομοαξονικά καλώδια, που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ήταν καλυμμένα με απορροφητικό υλικό, ενώ δακτύλιοι φερρίτη ήταν προσαρμοσμένοι επάνω τους, κοντά στα σημεία τροφοδοσίας των κεραιών, για να καταστείλουν την μεταφορά παρασιτικών ραδιοσυχνοτήτων. Επιπλέον, τα ομοαξονικά καλώδια ήταν με κατάλληλο τρόπο εξαρτημένα στο σώμα για να εμποδίζεται η κίνηση και την κάμψη τους κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Σχ. 6.3).



Σχήμα 6.2: α) Θέση κεραίας εκπομπής και πολλαπλές θέσεις κεραίας λήψης και β) φωτογραφία κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των μετρήσεων στο χώρο του εργαστηρίου.

6.2.2 Περιβάλλον μετρήσεων

Τα περιβάλλοντα διάδοσης στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις είναι ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών (περιβάλλον εργαστηρίου) και ένα περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις (ανηχοϊκός θάλαμος). Τα περιβάλλοντα αυτά επιλέχθηκαν έτσι ώστε στη μία περίπτωση να απομονωθεί το φαινόμενο των πολλαπλών διαδρομών (περιβάλλον εργαστηρίου) και να συγκριθεί με την περίπτωση που οι διαλείψεις παράγονται αποκλειστικά από τις κινήσεις του σώματος (ανηχοϊκός θάλαμος). Οι μετρήσεις εσωτερικού χώρου πραγματοποιήθηκαν σε ένα εσωτερικό εργαστήριο (135 m²) που βρίσκεται στον 1ο όροφο του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Το γραφείο περιείχε έπιπλα, υπολογιστές και εργαστηριακό εξοπλισμό που δημιουργούσαν συνθήκες πολλαπλών διαδρομών όπως φαίνεται στο Σχ. 6.3β. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν αργά το απόγευμα που το εργαστήριο δεν χρησιμοποιούνταν.

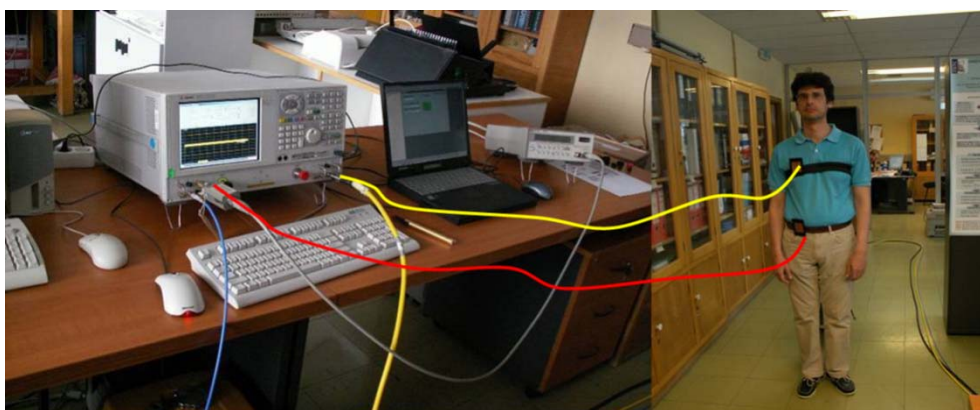


Σχήμα 6.3: Σχηματικό διάγραμμα α) του ανηχοϊκού θαλάμου και β) του εργαστηρίου όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις.

Ο ανηχικός θάλαμος βρίσκεται επίσης στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Ο ανηχικός θάλαμος είναι ένας ηλεκτρομαγνητικά θωρακισμένος θάλαμος που προσομοιώνει περιβάλλον "ελεύθερου χώρου" μέσω της απορρόφησης όλης της ΗΜ ενέργειας που προσπίπτει στα τοιχώματά του, όπως περιγράψαμε αναλυτικά στη παράγραφο 5.5.2.

6.2.3 Εξοπλισμός μετρήσεων

Το σύστημα των μετρήσεων αποτελούνταν από ένα διανυσματικό αναλυτή δικτυωμάτων (VNA) για να παράγει (εκπέμπει) και να μετράει (λαμβάνει) τα σήματα. Για όλες τις μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκε ένα VNA με δύο θύρες, HP/Agilent 8358A. Οι κεραιές εκπομπής και λήψης συνδέονται με τις δύο θύρες του VNA. Ο συντονισμός της διαδικασίας των μετρήσεων και η λήψη των δεδομένων των μετρήσεων μέσω κατάλληλου λογισμικού που είναι εγκατεστημένο στον υπολογιστή που συνδέεται με το VNA. Το VNA ήταν ρυθμισμένο για λειτουργία σε μία συχνότητα που επιτρέπει την ανάκτηση των ληφθέντων σημάτων στο πεδίο του χρόνου (zero-span). Η κεραιά εκπομπής τροφοδοτείται χρησιμοποιώντας ένα σήμα συνεχούς κύματος (CW) στα 2.45 GHz που παράγεται από το σύστημα εκπομπής του VNA. Η ισχύς εισόδου στην κεραιά εκπομπής ρυθμίστηκε στα -10 dBm, ενώ το επίπεδο θορύβου εκτιμήθηκε στα -90 dBm.



Σχήμα 6.4: Διάταξη μετρήσεων στα 2.45 GHz.

Τα δεδομένα της μέτρησης από το VNA αποθηκεύονται στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή από το λογισμικό στη μορφή ενός αρχείου κειμένου που περιέχει την

ισχύ του σήματος σε dBm. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, το VNA ήταν πάντα καλιμπραρισμένο για να αποκλείσουμε τις απώλειες των καλωδίων και έτσι τα δεδομένα των μετρήσεων εκφράζουν την ισχύ στην είσοδο της κεραίας. Η διαδικασία βαθμονόμησης (calibration) επίσης διασφαλίζει ότι εκπέμπεται ολική ισχύς ίση με -10 dBm από την κεραία εκπομπής.



Σχήμα 6.5: Φωτογραφία του χρήστη με τις κεραίες α) στο χώρο του γραφείου και β) στον ανηχοϊκό θάλαμο.

6.2.4 Διάταξη και μεθοδολογία μετρήσεων στα 2.45 GHz

Η κεραία εκπομπής συνδέεται με τη θύρα του VNA για να εκπέμψει το επιθυμητό σήμα των 2.45 GHz. Η κεραία λήψης συνδέεται με τη θύρα λήψης του VNA. Η διάταξη των μετρήσεων απεικονίζεται στο Σχ. 6.4. Το VNA ρυθμίζεται για μετρήσεις στο πεδίο του χρόνου με σύνολο 1601 σημεία σε κάθε σάρωση. Ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν 1.9 ms συνεπώς ο χρόνος σάρωσης ήταν περίπου 3 s. Για κάθε

σενάριο πραγματοποιήσαμε τουλάχιστον 10 σαρώσεις, δηλαδή τουλάχιστον 16010 σημεία καταγράφηκαν για κάθε μέτρηση και αποθηκεύτηκαν για περαιτέρω επεξεργασία (offline).

Ο χρόνος δειγματοληψίας των 1.9 ms (συχνότητα δειγματοληψίας 526 Hz) επιλέχθηκε ώστε να διασφαλίσουμε ότι όλες οι μεταβολές που προκαλούνται από τις γρήγορες κινήσεις του σώματος θα συλλαμβάνονται, κάνοντας τη συχνότητα δειγματοληψίας μεγαλύτερη από τη διπλάσια μέγιστη μετατόπιση Doppler του σώματος (~17 Hz).

Η μέγιστη μετατόπιση Doppler υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την (2.1) στο κεφάλαιο 2, υποθέτοντας ότι η μέση σχετική ταχύτητα της κίνησης των κεραιών ήταν 1 m/s κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Αυτό δίνει μετατοπίσεις περίπου 8.17 Hz. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πραγματοποιούνταν συγκεκριμένες ακολουθίες δραστηριοτήτων, όπως κανονικό περπάτημα, περπάτημα σημειωτόν κ.α., που θα τις δούμε αναλυτικά στην παράγραφο 6.2.5. Οι ίδιες κινήσεις επαναλαμβάνονταν για όλα τα κανάλια πάνω στο σώμα.

6.2.5 Σενάρια κινήσεων του χρήστη στον ανηχικό θάλαμο

Στον ανηχικό θάλαμο τα αποτελέσματα των μετρήσεων επηρεάζονται κυρίως από την κίνηση του σώματος και τη στάση του χρήστη, καθώς η επίδραση του περιβάλλοντος ελαχιστοποιείται. Για τις μετρήσεις στον ανηχικό θάλαμο επιλέχθηκαν τρεις από τις θέσεις που είδαμε στο Σχ. 6.2. Συγκεκριμένα οι κεραιές τοποθετήθηκαν στις θέσεις ΔΘ, ΑΘ και ΔΠ. Τα σενάρια κινήσεων που επιλέξαμε περιλαμβάνουν κάποιες κινήσεις που θα μας βοηθήσουν να μελετήσουμε την επίδραση της κίνησης του χρήστη στο κανάλι του σώματος. Τα σενάρια παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1 ΣΕΝΑΡΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΔΘ, ΑΘ	Π: Κανονικό περπάτημα
	ΠΠ: Περπάτημα με τα χέρια παράλληλα
	ΠΚΧ: Περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών
	ΠΣ: Περπάτημα σημειωτόν
	ΠΠΣ: Περπάτημα σημειωτόν με τα χέρια παράλληλα
ΔΠ	Π: Κανονικό περπάτημα

Οι γενικές κινήσεις που επιλέχθηκαν ήταν ακίνητος, κανονικό περπάτημα και περπάτημα σημειωτών. Σε κάθε κίνηση υπήρχαν όμως κάποιες διαφοροποιήσεις όσον αφορά την κίνηση των χεριών, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.6. Στις κινήσεις Π και ΠΣ ο χρήστης εκτελεί την κανονική κίνηση των χεριών όταν κάποιος περπατάει. Στις κινήσεις ΠΠ και ΠΠΣ η τα χέρια κινούνται με τον ίδιο τρόπο, ενώ στην κίνηση ΠΚΧ τα χέρια παραμένουν ακίνητα καθόλη τη διάρκεια των μετρήσεων.



Σχήμα 6.6: Σενάρια κινήσεων του χρήστη στον ανηχωικό θάλαμο.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το χρήστη να περπατά κατά μήκος της διαδρομής S1-S2 περίπου 4 m (Σχ. 6.3), ενώ για την ακίνητη στάση και το περπάτημα σημειωτών ο χρήστης στεκόταν στο σημείο S1. Η διάρκεια της κάθε κίνησης ήταν ίση με μια σάρωση. Παρόλα αυτά, κάθε σενάριο μετρήσεων (συνδυασμός θέσης της κεραίας λήψης και κίνησης του χρήστη) επαναλήφθηκε τουλάχιστον 10 φορές. Αυτή η διαδικασία μετρήσεων εγγυάται τη συνέπεια και την επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

6.2.6 Σενάρια κινήσεων του χρήστη στο χώρο του εργαστηρίου

Οι κινήσεις του χρήστη, όπως φαίνονται στο Σχ. 6.7, επιλέχθηκαν με σκοπό να εξάγουμε αποτελέσματα για διαφορετικού βαθμού κινητικότητα (όσον αφορά την κίνηση του χρήστη και το μεταβαλλόμενο περιβάλλον), η οποία αντίστοιχα επηρεάζει το περιβάλλον διάδοσης.



Σχήμα 6.7: Συνθήκες κινητικότητας καναλιού για κάθε σενάριο κίνησης.

Συνεπώς, θεωρήσαμε τις ακόλουθες γενικές κινήσεις του χρήστη για όλα τα κανάλια πάνω στο σώμα: ακίνητος, κανονικό περπάτημα, περπάτημα σημειωτόν, περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών όπως φαίνονται στο Σχ. 6.8. Ο χρήστης περπατούσε κατά μήκος της διαδρομής S1-S2 κατά τη διάρκεια των μετρήσεων (Σχ. 6.3), ενώ οι μετρήσεις στην ακίνητη στάση και στο περπάτημα σημειωτόν πραγματοποιήθηκαν με το χρήστη να βρίσκεται στο σημείο S1. Η διάρκεια της κάθε κίνησης ήταν ίση με το χρόνο μιας σάρωσης. Για να διασφαλίσουμε την αξιοπιστία και την επαναληψιμότητα των μετρήσεων, κάθε σενάριο μετρήσεων επαναλήφθηκε τουλάχιστον 10 φορές. Ειδικότερα για σενάρια μετρήσεων που περιελάμβαναν και κίνηση των χεριών αλλά και αλλαγές στο περιβάλλον, ο αριθμός των επαναλήψεων ήταν μεγαλύτερος (20-40 επαναλήψεις). Επιπλέον, το μέσο σφάλμα στις τιμές της μέσης τιμής της περιβάλλουσας του σήματος μεταξύ των διαφορετικών επαναλήψεων κάθε σεναρίου μετρήσεων κυμαινόταν από 0.4 έως 2 dB, που είναι αποδεκτό και επιβεβαιώνει την αξιοπιστία της διαδικασίας των μετρήσεων.



Σχήμα 6.8: Σενάρια κινήσεων του χρήστη στο γραφείο.

6.2.7 Ανάλυση δεδομένων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε για τη στατιστική ανάλυση των μετρήσεων, με σκοπό την εξαγωγή μιας στατιστικής κατανομής για το κανάλι διάδοσης πάνω στο σώμα. Επιπλέον, πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση δεύτερης τάξης.

6.2.7.1 Εκτίμηση στατιστικών παραμέτρων

Όπως είδαμε, η λαμβανόμενη ισχύς μετρήθηκε για πέντε διαφορετικά κανάλια πάνω στο σώμα και για τέσσερις διαφορετικές κινήσεις του χρήστη. Κάθε συνδυασμός της θέσης της κεραίας Rx και της κίνησης του χρήστη αποτελεί ένα σενάριο μετρήσεων. Πριν τη στατιστική ανάλυση, όλα τα λαμβανόμενα δείγματα της περιβάλλουσας του σήματος, r , που προέκυψαν για κάθε σενάριο μετρήσεων, κανονικοποιήθηκαν ως προς την αντίστοιχη rms τιμή τους, $\hat{r} = \sqrt{E(r^2)}$. Για να πραγματοποιήσουμε τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, η κατανομή της περιβάλλουσας για κάθε σενάριο μετρήσεων συγκρίθηκε με τις ακόλουθες γνωστές κατανομές πιθανότητας: Rice, Rayleigh, Weibull, normal, lognormal, gamma, Nakagami- m , η - μ και κ - μ .

Όπως ειπώθηκε στην παράγραφο 6.2, οι προαναφερθείσες κατανομές χρησιμοποιούνται ευρέως στη στατιστική ανάλυση για το χαρακτηρισμό και τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα. Οι τιμές των στατιστικών παραμέτρων των κατανομών Rice (β, σ), Nakagami- m (m, Ω), η- μ (η, μ) και κ- μ (κ, μ) [248] υπολογίστηκαν με τη χρήση εκτιμητών βασισμένων σε ροπές, ενώ για τις υπόλοιπες κατανομές χρησιμοποιήθηκε εκτίμηση μέγιστης πιθανοφάνειας (ML - Maximum Likelihood) με ένα 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Για τη μαθηματική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab.

Εκτίμηση στατιστικών παραμέτρων για τις κατανομές Nakagami- m , η- μ και κ- μ

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των στατιστικών παραμέτρων για τις κατανομές Nakagami- m (m, Ω), η- μ (η, μ) και κ- μ (κ, μ). Για την κατανομή Nakagami- m οι παράμετροι της κατανομής m (παράμετρος διαλείψεων Nakagami) και Ω (μέση ισχύς) υπολογίζονται ως εξής:

$$m = \frac{E^2(P^2)}{E(P^4) - E^2(P^2)} \quad (6.1)$$

$$\Omega = E(P^2) \quad (6.2)$$

όπου P είναι το κανονικοποιημένο επίπεδο σήματος ($R/\sqrt{\Omega}$) και R το πλάτος του σήματος που προέκυψε από τις μετρήσεις. Για την κ- μ κατανομή, οι παράμετροι κ και μ υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις [248]:

$$\kappa^{-1} = \frac{\sqrt{2} [E(P^4) - 1]}{\sqrt{2E^2(P^4) - E(P^4) - E(P^6)}} - 2 \quad (6.3)$$

$$\mu = \frac{1}{V(P^2)} \frac{1 + 2\kappa}{(1 + \kappa)^2} \quad (6.4)$$

Για την η - μ κατανομή, οι παράμετροι η και μ υπολογίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις [248]:

$$\eta_{1,2} = \frac{\sqrt{2c} + \sqrt{3 - 2c \pm \sqrt{9 - 8c}}}{\sqrt{2c} - \sqrt{3 - 2c \pm \sqrt{9 - 8c}}} \quad (6.5)$$

$$\mu_{1,2} = \frac{1}{2V(P^2)} \left[1 + \left(\frac{H}{h} \right)_{1,2}^2 \right] \quad (6.6)$$

όπου $c = \frac{E(P^6) - 3E(P^4) + 2}{2[E(P^4) - 1]}$ και $\frac{H}{h} = \frac{1 - \eta}{1 + \eta}$. Επιλέγουμε από τα ζεύγη τιμών

$(\eta_1, \mu_1), (\eta_2, \mu_2)$ αυτά που δίνουν τη μικρότερη απόλυτη διαφορά:

$$|E(P) - E(D)| = \left| E(P) - \frac{\Gamma(2\mu + 1/2)}{h^{\mu+1/2} \sqrt{2\mu} \Gamma(2\mu)} {}_2F_1 \left[\mu + \frac{3}{4}, \mu + \frac{1}{4}; \mu + \frac{1}{2}; \left(\frac{H}{h} \right)^2 \right] \right| \quad (6.7)$$

Οι μέσες τιμές $E(P)$ και $E(D)$ υπολογίζονται από τα δεδομένα των μετρήσεων και από την εκτίμηση παραμέτρων αντίστοιχα.

6.2.7.2 Έλεγχος καλής προσαρμογής των κατανομών

Η εμπειρική Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής (CDF) για κάθε σενάριο μετρήσεων υπολογίστηκε από τα κανονικοποιημένα δεδομένα. Για να προσδιορίσουμε την κατανομή με την καλύτερη προσαρμογή σε κάθε σενάριο μετρήσεων, αρκετά θεωρητικά μοντέλα αναφοράς συγκρίθηκαν με τις εμπειρικές CDF, χρησιμοποιώντας τον έλεγχο καλής προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov (KS-test) [265]. Ο έλεγχος KS-test είναι μια γενική μη παραμετρική μέθοδος που εξετάζει αν δυο δείγματα δεδομένων προέρχονται από την ίδια κατανομή. Υπολογίζει τη μέγιστη απόλυτη διαφορά μεταξύ της εμπειρικής κατανομής των δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής και τη χρησιμοποιεί για να συγκρίνει τις κατανομές. Η

διαφορά αυτή εκφράζεται από το στατιστικό μέγεθος KS-statistic και ορίζεται ως εξής:

$$D = \max_x |F_E(x) - F_X(x)| \quad (6.8)$$

όπου F_E είναι η εμπειρική CDF των δεδομένων των μετρήσεων και F_X είναι η CDF της θεωρητικής κατανομής αναφοράς.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι όταν ένας χρήστης είναι ακίνητος, για όλες τις θέσεις του δέκτη πάνω στο σώμα που θεωρήσαμε, κανένα θεωρητικό μοντέλο διαλείψεων δεν παρέχει ικανοποιητική προσαρμογή στο σήμα, καθώς λόγω της στατικότητας παρατηρούνται πολύ μικρές διαλείψεις στο λαμβανόμενο σήμα, τόσο στον ανηχικό όσο και στο εργαστήριο. Το ίδιο παρατηρήθηκε και για τη θέση ΔΚ (δεξιάς καρπός) της κεραίας λήψης, όταν ο χρήστης περπατάει χωρίς κίνηση των χεριών, στο χώρο του εργαστηρίου. Αυτό οφείλεται στην εγγύτητα των κεραιών εκπομπής και λήψης στη συγκεκριμένη περίπτωση και στην απουσία εμποδίων μεταξύ τους, που έχουν ως αποτέλεσμα μικρές διαλείψεις για τα αντίστοιχα κανάλια πάνω στο σώμα. Συνεπώς δεν θα παρουσιάσουμε τη στατιστική ανάλυση των διαλείψεων του καναλιού στις προαναφερθείσες περιπτώσεις (ακίνητος χρήστης και στα δύο περιβάλλοντα μετρήσεων και σενάριο ΔΚ-Περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών στο χώρο του εργαστηρίου) και έτσι τα αντίστοιχα αποτελέσματα παραλείπονται. Στην υπόλοιπη εργασία εστιάζουμε μόνο σε σενάρια που ενέχουν κινητικότητα. Η τιμή του μεγέθους KS-statistic είναι ένα μέτρο του σφάλματος προσαρμογής για αυτή τη μεθοδολογία ελέγχου προσαρμογής και όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές του τόσο χειρότερη είναι και η προσαρμογή.

6.2.8 Αποτελέσματα σε περιβάλλον ανηχικού θαλάμου

Ο πίνακας 6.2 δείχνει ότι για τη θέση ΔΘ, το μοντέλο lognormal παρέχει την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα, για όλα τα σενάρια εκτός από το περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών όπου προσεγγίζει καλύτερα η κατανομή Rice. Αυτό απεικονίζεται γραφικά στο Σχ. 6.9α. Η κατανομή lognormal χρησιμοποιείται συνήθως για τη μοντελοποίηση της σκίασης. Τα φαινόμενα που επηρεάζουν τη

διάδοση του σήματος στα κανάλια πάνω στο σώμα (ανακλάσεις, περίθλαση, απώλειες κ.α.) είναι πολλαπλασιαστικά, κάτι που οδηγεί σε κατανομές lognormal. Η κατανομή Rice προσομοιώνει ένα περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών με μια ισχυρή απευθείας ζεύξη LOS. Το γεγονός ότι η κατανομή Rice παρέχει την καλύτερη προσέγγιση όταν τα χέρια δεν κινούνται υπονοεί ότι η κίνηση των χεριών είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει τη λαμβανόμενη ισχύ.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

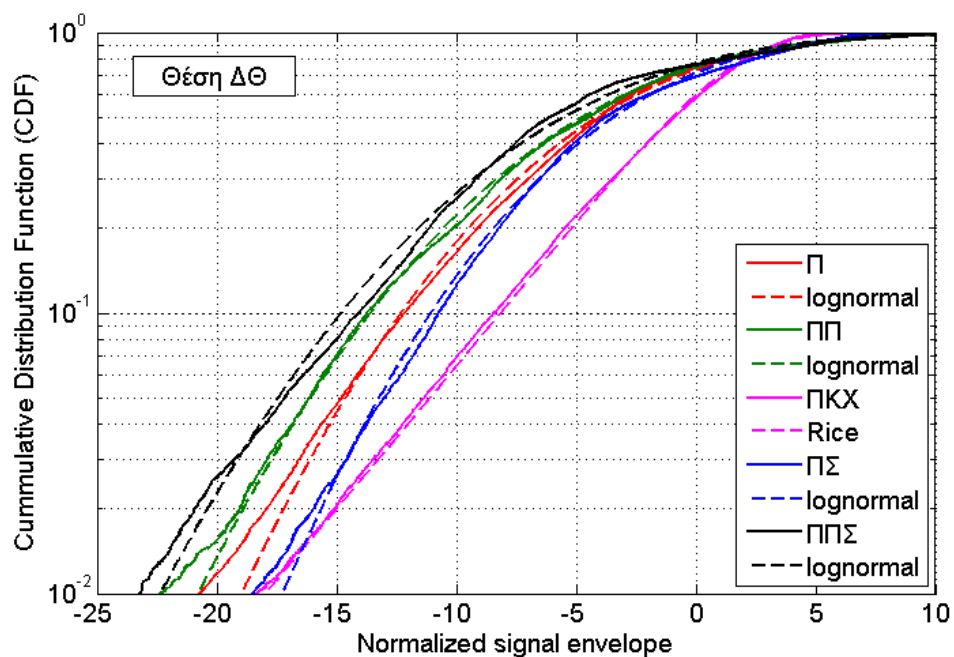
Θέση κεραίας	Σενάρια κίνησης	Μοντέλο καλύτερης προσαρμογής	Παράμετροι	
ΔΘ	Π	L	$\mu=-0.474$	$\sigma=0.735$
	ΠΠ	L	$\mu=-0.544$	$\sigma=0.795$
	ΠΚΧ	R	$\nu=0.752$	$\sigma=0.466$
	ΠΣ	L	$\mu=-0.395$	$\sigma=0.685$
	ΠΠΣ	L	$\mu=-0.634$	$\sigma=0.835$
ΑΘ	Π	L	$\mu=-0.279$	$\sigma=0.599$
	ΠΠ	R	$\nu=0.935$	$\sigma=0.251$
	ΠΠ	L	$\mu=-0.064$	$\sigma=0.265$
	ΠΚΧ	R	$\nu=0.933$	$\sigma=0.255$
	ΠΣ	R	$\nu=0.617$	$\sigma=0.556$
ΔΠ	Π	R	$\nu=0.92$	$\sigma=0.277$
		L	$\mu=-0.077$	$\sigma=0.288$
	Π	N	$m=1.622$	$\Omega=1$

*ΔΘ: δεξιός θώρακας, ΑΘ: αριστερός θώρακας, ΔΠ: δεξιά πλάτη

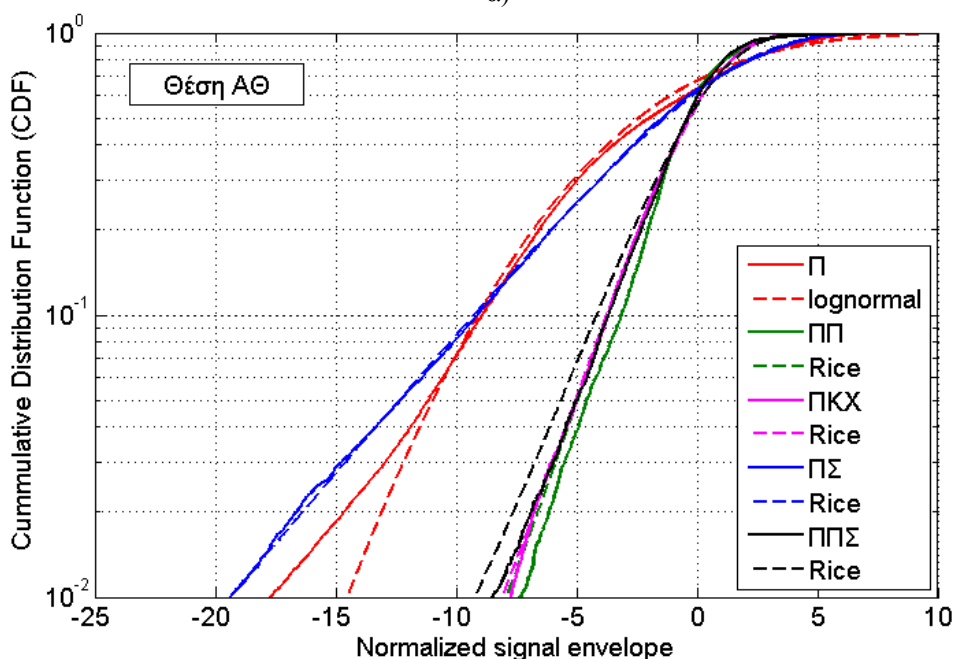
*L: lognormal, R: Rice, N: Nakagami- m .

Το μοντέλο καλύτερης προσαρμογής για τη θέση ΑΘ διαφέρει ανάλογα με το είδος της κίνησης, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.9β. Για το κανονικό περπάτημα (Π), η κατανομή lognormal παρέχει την καλύτερη προσαρμογή, για τις κινήσεις ΠΠ και ΠΠΣ τόσο η lognormal όσο και η Rice κατανομή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μοντελοποιήσουν τις διαλείψεις εξαιτίας του χρήστη. Τέλος για τις κινήσεις ΠΣ και ΠΚΧ η καλύτερη προσέγγιση είναι του μοντέλου Rice. Η φυσική εξήγηση είναι ότι από τη στιγμή που τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης είναι στην μπροστινή μεριά του σώματος, τα χέρια δεν είναι τόσο κοντά στις κεραίες και δεν διακόπτουν απαραίτητα την επικοινωνία LOS, οδηγώντας έτσι στην κατανομή Rice. Παρόλα αυτά, σε κάποιες περιπτώσεις τα φαινόμενα που πηγάζουν από την εγγύτητα του σώματος (ανακλάσεις και σκίαση από τα χέρια) οδηγούν σε κατανομή lognormal. Οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων για τις θέσεις ΔΘ και ΑΘ μπορούν να

αποδοθούν στη θέση της κεραίας εκπομπής. Τέλος, για τη θέση ΔΠ, η κατανομή Nakagami- m παρέχει την καλύτερη προσαρμογή και η φυσική εξήγηση είναι ότι το σήμα που φτάνει στο δέκτη αποτελείται από ένα μικρό αριθμό από συστάδες (clusters) πολλαπλών διαδρομών χωρίς καμία κυρίαρχη συνιστώσα ανάμεσα τους.



α)

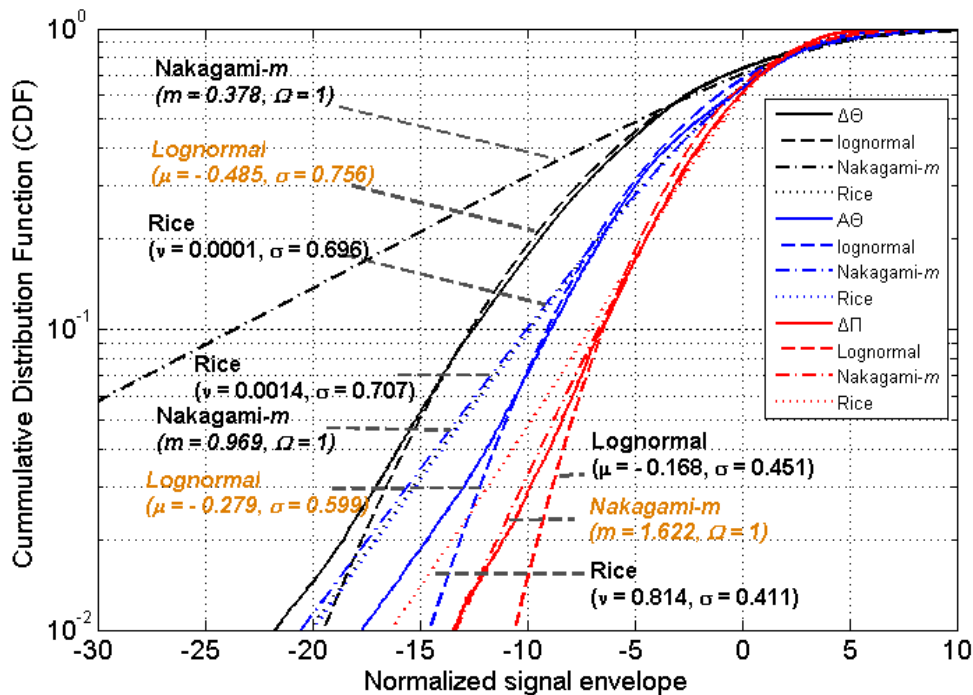


β)

*Π: κανονικό περπάτημα, ΠΠ: κανονικό περπάτημα, ΠΚΧ: περπάτημα χωρίς κίνηση χεριών ΠΣ: περπάτημα σημειωτόν, ΠΠΣ: περπάτημα σημειωτόν.

Σχήμα 6.9: Πειραματικές και θεωρητικές CDF α) της θέσης ΔΘ (δεξιός θώρακας) και β) της θέσης ΑΘ (αριστερός θώρακας), για όλες τις κινήσεις του χρήστη.

Όσον αφορά στα υπόλοιπα θεωρητικά μοντέλα που συγκρίναμε με τα δεδομένα, η κατανομή Rayleigh δίνει πάντα τη χειρότερη προσαρμογή, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, σε όλες τις περιπτώσεις. Η φυσική εξήγηση είναι ότι το ανθρώπινο σώμα και οι κινήσεις του δεν παράγουν αρκετές πολλαπλές διαδρομές ώστε να δικαιολογήσουν αυτή την κατανομή. Η κατανομή Weibull, που είναι μια γενίκευση της κατανομής Rayleigh, δίνει τη δεύτερη καλύτερη προσαρμογή σε κάποιες περιπτώσεις, αλλά σε καμία την καλύτερη. Οι κατανομές η-μ και κ-μ παρέχουν καλή προσέγγιση σε κάποιες περιπτώσεις, αφού αποτελούν γενίκευση των κατανομών Rice και Nakagami-*m* αντίστοιχα, αλλά δεν προσφέρουν κάποιο πλεονέκτημα έναντι των άλλων κατανομών που αναφέραμε προηγουμένως. Αυτές οι κατανομές είναι πιο κατάλληλες για σενάρια που περιλαμβάνουν και το γύρω περιβάλλον (εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου [135]) και όχι μόνο το ανθρώπινο σώμα, κάτι που συμβαίνει στην παρούσα μελέτη, σε περιβάλλον ανηχωικού θαλάμου.



* $\Delta\Theta$: δεξιός θώρακας, $A\Theta$: αριστερός θώρακας, $\Delta\Pi$: δεξιά πλάτη.

Σχήμα 6.10: Πειραματικές και θεωρητικές CDF (lognormal, Nakagami-*m*, Rice) για το κανονικό περπάτημα (Π) και όλες τις θέσεις της κεραίας.

Στο Σχ. 6.10, απεικονίζονται γραφικά οι εμπειρικές CDF για το περπάτημα ανά θέση της κεραίας μαζί με τις θεωρητικές CDF, και απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα η κατανομή με την καλύτερη προσαρμογή. Από τα προηγούμενα αποτελέσματα, είναι εμφανές ότι οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση στο κανάλι πάνω στο σώμα είναι η κίνηση του χρήστη και η θέση της κεραίας.

6.2.9 Αποτελέσματα σε περιβάλλον εργαστηρίου

Στη συνέχεια αναλύουμε την προσαρμογή των δεδομένων των μετρήσεων σε δημοφιλείς κατανομές διαλείψεων, καθώς και τα στατιστικά δεύτερης τάξης σε κάθε περίπτωση, δηλαδή ο ρυθμός διέλευσης στάθμης (level crossing rate, LCR) και η μέση διάρκεια διαλείψεων (average fade duration, AFD).

6.2.9.1 Προσαρμογή κατανομής και στατιστική ανάλυση πρώτης τάξης

Στην υπόλοιπη παράγραφο εστιάζουμε μόνο σε σενάρια που ενέχουν κινητικότητα και συγκεκριμένα στις ακόλουθες κινήσεις (Σχ. 6.8): κανονικό περπάτημα (Π), περπάτημα σημειωτόν (ΠΣ) και περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών (ΠΚΧ). Ο πίνακας 6.3 παρουσιάζει το KS-statistic για τις πέντε κατανομές που προσεγγίζουν την περιβάλλουσα του σήματος στην πλειονότητα των περιπτώσεων, δηλαδή για τις κατανομές Weibull, Rice, gamma, κ - μ και Nakagami- m . Η τιμές του KS-statistic που παρουσιάζονται με έντονο χρώμα αντιστοιχούν στις κατανομές που παρέχουν την καλύτερη προσαρμογή και συνεπώς είναι οι χαμηλότερες σε κάθε περίπτωση, δηλαδή αντιστοιχούν στη χαμηλότερη μέγιστη διαφορά μεταξύ της εμπειρικής CDF των δεδομένων και της CDF του θεωρητικού μοντέλου. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 6.3, από τις εννιά κατανομές που εξετάστηκαν, μόνο τα μοντέλα Weibull, gamma και Rice παρείχαν την καλύτερη προσαρμογή στα κανονικοποιημένα δεδομένα. Στην πραγματικότητα, η κατανομή Weibull παρείχε την καλύτερη προσαρμογή στα περισσότερα από τα σενάρια των μετρήσεων.

Ο πίνακας 6.4 παρουσιάζει τις κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή για όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν σύμφωνα με τον έλεγχο καλής προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov, και τις αντίστοιχες στατιστικές παραμέτρους που εκτιμήθηκαν.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3 ΤΑ KS-STATISTIC ΓΙΑ ΤΙΣ ΠΕΝΤΕ ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ (WEIBULL, RICE, GAMMA, Κ-Μ, NAKAGAMI-Μ) ΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΑΚΟΛΟΥΘΕΙ Η ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑ ΤΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΣΣΟΤΕΡΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ

Τιμές του KS-statistic	Weibull	Rice	Gamma	κ-μ	Nakagami-m
ΔΘ-Π	0.005	0.004	0.039	0.007	0.009
ΔΘ-ΠΣ	0.022	0.024	0.029	0.026	0.025
ΔΘ-ΠΚΧ	0.008	0.009	0.034	0.010	0.009
ΑΘ- Π	0.004	0.005	0.033	0.006	0.005
ΑΘ- ΠΣ	0.036	0.032	0.070	0.037	0.062
ΑΘ- ΠΚΧ	0.013	0.014	0.039	0.014	0.014
ΔΠ- Π	0.015	0.051	0.031	0.033	0.023
ΔΠ- ΠΣ	0.034	0.035	0.052	0.037	0.035
ΔΠ- ΠΚΧ	0.037	0.086	0.021	0.117	0.107
ΔΚ- Π	0.041	0.147	0.031	0.219	0.084
ΔΚ- ΠΣ	0.055	0.117	0.046	0.081	0.091
ΑΒ- Π	0.014	0.025	0.041	0.018	0.023
ΑΒ- ΠΣ	0.044	0.048	0.054	0.045	0.045
ΑΒ- ΠΚΧ	0.015	0.011	0.052	0.033	0.032

*Π: κανονικό περπάτημα, ΠΣ: περπάτημα σημειωτόν, ΠΚΧ: περπάτημα χωρίς κίνηση χεριών.

*ΔΘ: δεξιός θώρακας, ΑΘ: αριστερός θώρακας, ΔΠ: δεξιά πλάτη, ΔΚ: δεξιός καρπός, ΑΒ: αριστερός βραχίονας.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΕΝΑΡΙΟ

Σενάριο μέτρησης	Μοντέλο καλύτερης προσαρμογής	Παράμετροι κατανομών	
ΔΘ-Π	R	$\beta = 0.57$	$\sigma = 0.58$
ΔΘ-ΠΣ	W	$\alpha = 1.01$	$b = 2.05$
ΔΘ-ΠΚΧ	W	$\alpha = 1.01$	$b = 2.07$
ΑΘ- Π	W	$\alpha = 1.00$	$b = 2.02$
ΑΘ- ΠΣ	R	$\beta = 0.76$	$\sigma = 0.46$
ΑΘ- ΠΚΧ	W	$\alpha = 1.01$	$b = 2.05$
ΔΠ- Π	W	$\alpha = 0.97$	$b = 1.79$
ΔΠ- ΠΣ	W	$\alpha = 1.04$	$b = 2.46$
ΔΠ- ΠΚΧ	G	$\alpha = 2.46$	$b = 0.34$
ΔΚ- Π	G	$\alpha = 1.96$	$b = 0.41$
ΔΚ- ΠΣ	G	$\alpha = 2.21$	$b = 0.39$
ΑΒ- Π	W	$\alpha = 0.99$	$b = 1.93$
ΑΒ- ΠΣ	W	$\alpha = 1.03$	$b = 2.39$
ΑΒ- ΠΚΧ	R	$\beta = 0.64$	$\sigma = 0.54$

*R: Rice (β, σ), W: Weibull (a, b), G: gamma (a, b)

*Π: κανονικό περπάτημα, ΠΣ: περπάτημα σημειωτόν, ΠΚΧ: περπάτημα χωρίς κίνηση χεριών.

*ΔΘ: δεξιός θώρακας, ΑΘ: αριστερός θώρακας, ΔΠ: δεξιά πλάτη, ΔΚ: δεξιός καρπός, ΑΒ: αριστερός βραχίονας.

Οι Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας (PDF) των τριών αυτών κατανομών που παρείχαν την καλύτερη προσαρμογή δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$f_{Weibull}(r) = ba^{-b}r^{b-1} \exp\{-(r/a)^b\}, \quad b > 0, r \geq 0 \quad (6.9)$$

όπου b είναι η παράμετρος διαλείψεων της κατανομής Weibull και a είναι η παράμετρος κλίμακας. Η κατανομή Weibull μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει τις διαλείψεις Rice ($b > 2$), Rayleigh ($b = 2$) ή και διαλείψεις χειρότερες από Rayleigh ($b < 2$).

$$f_{Rice}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{(r^2 + \beta^2)}{2\sigma^2}\right\} I_0\left(\frac{r\beta}{\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (6.10)$$

όπου β είναι ο συντελεστής της ισχύος οπτικής επαφής (LOS), σ^2 είναι η διασπορά των γκαουσιανών συντελεστών σκέδασης και $I_n(\bullet)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel 1^{ου} είδους και τάξης n .

$$f_{Gamma}(r) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} r^{a-1} \exp\{-r/b\}, \quad r \geq 0, a, b > 0 \quad (6.11)$$

όπου a είναι η παράμετρος διαλείψεων, b είναι η παράμετρος κλίμακας και με $\Gamma(\bullet)$ συμβολίζεται η συνάρτηση gamma.

Για να επαληθεύσουμε την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του ελέγχου καλής προσαρμογής που πραγματοποιήσαμε, σε αυτή την παράγραφο συγκρίνουμε τις στατιστικές παραμέτρους των θεωρητικών κατανομών με ανάλογα δημοσιευμένα αποτελέσματα. Στην παρούσα μελέτη, η παράμετρος διαλείψεων a της κατανομής gamma παίρνει τιμές από 1.96 έως 2.46. Για ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου και με συχνότητα 2.45 GHz στο [233], σε κάποιες από τις περιπτώσεις η κατανομή του καναλιού πάνω στο σώμα βρέθηκε ότι προσεγγίζεται καλύτερα από τη gamma με την παράμετρο διαλείψεων να κυμαίνεται από 3.74 έως 4.52. Στην ίδια μελέτη, όταν η κεραία εκπομπής ήταν τοποθετημένη στο δεξιό γοφό για διάφορες θέσεις της κεραίας λήψης, η κατανομή Weibull περιγράφει καλύτερα την κατανομή του καναλιού και η

παράμετρος διαλείψεων b παίρνει τιμές από 1.11 έως 3.17. Στην παρούσα μελέτη, η παράμετρος b της κατανομής Weibull κυμαίνεται από 1.79 για το σενάριο ΔΠ-Π έως 2.46 για το σενάριο ΔΠ-ΠΣ. Επιπλέον για τις θέσεις ΔΠ και ΑΒ και από τη στιγμή που η παράμετρος διαλείψεων υποδεικνύει το βαθμό των διαλείψεων του καναλιού, οι διαλείψεις είναι πιο ισχυρές για το κανονικό περπάτημα (Π) σε σύγκριση με το περπάτημα σημειωτόν (ΠΣ). Η παράμετρος διαλείψεων K της κατανομής Rice εκφράζει το λόγο της ισχύος του σήματος οπτικής επαφής προς την ισχύ των σημάτων πολλαπλών διαδρομών που σκεδάζονται στο χώρο και ορίζεται ως $K = \beta^2 / 2\sigma^2$. Οι τιμές της παραμέτρου K (σε dB) για τα σενάρια ΔΘ-Π, ΑΘ-ΠΣ και ΑΒ-ΠΚΧ είναι -3.19, 1.34 και -1.55 αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι η παράμετρος διαλείψεων K δεν είναι όσο μεγάλη θα περίμενε κανείς για μια επικοινωνία οπτικής επαφής και ειδικότερα στα σενάρια ΔΘ-Π και ΑΒ-ΠΚΧ η ισχύς του σήματος οπτικής επαφής είναι μικρότερη από τη σκεδαζόμενη ισχύ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σκέδαση που προκαλείται από το περιβάλλον και την κίνηση του σώματος του χρήστη είναι σημαντική, ενώ η ισχύς του σήματος οπτικής επαφής εξασθενεί από το σώμα του χρήστη. Για ένα κανάλι πάνω στο σώμα σε ένα εξωτερικό περιβάλλον στη συχνότητα των 2.45 GHz, στο άρθρο [240] η παράμετρος K υπολογίζεται 9.72 για τη θέση της κεραίας λήψης στο θώρακα, υποδηλώνοντας μια ισχυρή ακτίνα οπτικής επαφής, εξαιτίας του μικρού βαθμού σκέδασης από το περιβάλλον. Αντιθέτως, για ένα εσωτερικό περιβάλλον στο [18], η παράμετρος K παίρνει σχετικά χαμηλές τιμές με τις μέσες τιμές να κυμαίνονται από -0.2 έως 2.4 dB για το κανάλι με τον πομπό στη μέση και το δέκτη στον καρπό και για διαφορετικούς τύπους κεραίων.

Σχετικά με τα υπόλοιπα θεωρητικά μοντέλα που συγκρίναμε με τα δεδομένα των μετρήσεων, οι κατανομές lognormal και normal είχαν τη χειρότερη προσαρμογή σε σύγκριση με τις άλλες κατανομές στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι κατανομές Rayleigh, Nakagami- m και η - μ παρέχουν την δεύτερη καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα σε κάποιες περιπτώσεις, αλλά σε καμία περίπτωση την πρώτη καλύτερη προσαρμογή. Η κατανομή κ - μ παρέχει καλή προσαρμογή σε περιπτώσεις όπου έχουμε απευθείας σήμα οπτικής επαφής καθώς είναι μια γενίκευση της κατανομής Rice, αλλά δεν προσφέρει καμία βελτίωση σε σχέση με τις κατανομές που συζητήσαμε προηγουμένως.

Όπως είδαμε στον πίνακα 6.4, για τα σενάρια που περιλαμβάνουν κινητικότητα, οχτώ από τα δεκατέσσερα κανάλια (57 %) ακολουθούν την κατανομή Weibull. Επιπλέον η κατανομή Weibull ήταν η δεύτερη καλύτερη για τα υπόλοιπα από τα σενάρια κινητικότητας. Η κατανομή Rice περιγράφει καλύτερα τρία σενάρια (ΔΘ-Π, ΑΘ-ΠΣ και ΑΒ-ΠΚΧ), και τα υπόλοιπα τρία σενάρια (ΔΠ-ΠΚΧ, ΔΚ-Π και ΔΚ-ΠΣ) ακολουθούν την κατανομή gamma. Σαν ένα γενικό σχόλιο, παρατηρούμε ότι για τα κανάλια ΔΠ και ΑΒ οι τιμές της παραμέτρου b της κατανομής Weibull που εκτιμήσαμε για το περπάτημα σημειωτόν είναι υψηλότερες από αυτές που υπολογίσαμε για το περπάτημα, κάτι που δείχνει ότι ο βαθμός των διαλείψεων είναι μικρότερος για το περπάτημα σημειωτόν. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι για τις συγκεκριμένες θέσεις των κεραιών λήψης, το λαμβανόμενο σήμα είναι αποτέλεσμα κυρίως της συμβολής των σημάτων που σκεδάζονται από το σώμα και το γύρω περιβάλλον. Συνεπώς, για το περπάτημα σημειωτόν, αν η συμβολή είναι ενισχυτική στο συγκεκριμένο σημείο, τότε οδηγεί σε μικρότερο βαθμό διαλείψεων σε σύγκριση με το περπάτημα όπου η συμβολή των σημάτων σκέδασης είναι μεταβαλλόμενη λόγω της κίνησης στο χώρο.

Το μοντέλο διαλείψεων Rice χαρακτηρίζει με ακρίβεια κανάλια με ζεύξη οπτικής επαφής μεταξύ των κεραιών πομπού και δέκτη. Σε αυτή τη μελέτη, η κατανομή Rice παρέχει την καλύτερη προσαρμογή όταν και η κεραία εκπομπής αλλά και λήψης βρίσκονται στην μπροστινή πλευρά του σώματος (ΔΘ-Π και ΑΘ-ΠΣ), που εξηγείται από το γεγονός ότι τα χέρια δεν είναι τόσο κοντά στις κεραίες και δεν διακόπτουν απαραίτητα την επικοινωνία οπτικής επαφής, έτσι οδηγούν στην κατανομή Rice. Για το σενάριο ΑΒ-ΠΚΧ η φυσική εξήγηση είναι παρόμοια από τη στιγμή που τα χέρια δεν κινούνται και η θέση της κεραίας λήψης μπορεί να δικαιολογήσει την παρουσία οπτικής επαφής (LOS). Από την άλλη, η κατανομή gamma παρέχει την καλύτερη προσαρμογή στα εμπειρικά δεδομένα για τα σενάρια ΔΠ-ΠΚΧ, ΔΚ-Π και ΔΚ-ΠΣ, παρόλο που έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί σε άλλες μελέτες για να μοντελοποιήσει τη λαμβανόμενη ισχύ του σήματος σε περιβάλλοντα με πολλαπλές διαδρομές. Παρόλα αυτά, για τον ίδιο τύπο περιβάλλοντος, στα άρθρα [241], [233], [237] η κατανομή gamma παρέχει επίσης καλή προσαρμογή στο λαμβανόμενο σήμα. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η κατανομή Weibull παρέχει την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα και φαίνεται να παρέχει μια προσεγγιστική λύση για την υπέρθεση των συνιστωσών πολλαπλών διαδρομών εξαιτίας της ευελιξίας της.

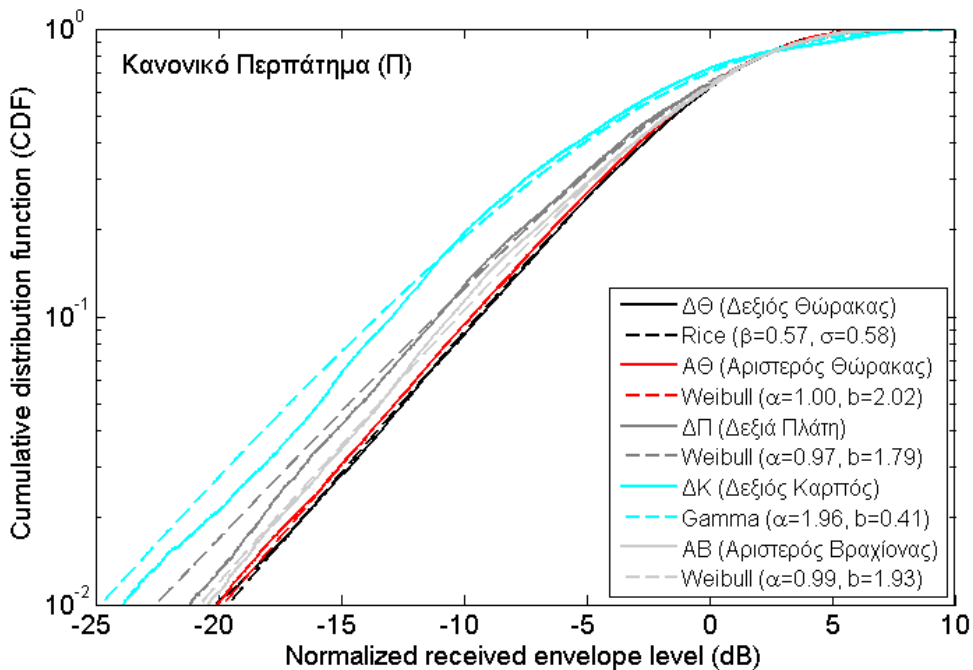
Τα Σχ. 6.11-6.13 απεικονίζουν τις εμπειρικές CDF για καθεμία από τις τρεις δραστηριότητες του χρήστη και για όλα τα κανάλια πάνω στο σώμα, μαζί με τις θεωρητικές CDF των κατανομών που προσεγγίζουν καλύτερα τα δεδομένα σε κάθε περίπτωση, όπως αυτό προέκυψε από τον έλεγχο καλής προσαρμογής. Οι στατιστικές παράμετροι των θεωρητικών κατανομών παρουσιάζονται στον πίνακα 6.4. Όπως παρατηρούμε από τα Σχ. 6.11-6.13, οι εμπειρικές CDF προσεγγίζονται πολύ καλά από τις αντίστοιχες θεωρητικές CDF στα περισσότερα σενάρια. Οι καμπύλες CDF που αποκλίνουν περισσότερο από τις θεωρητικές CDF είναι για τα σενάρια ΔΠ-Π, ΔΚ-Π και ΔΚ-ΠΣ, ειδικότερα στις ουρές των κατανομών.

Παρατηρώντας τις καμπύλες για το περπάτημα και το περπάτημα σημειωτόν (Σχ. 6.11 και 6.12), είναι εμφανές ότι οι διαλείψεις είναι πιο ισχυρές για την ΔΚ θέση της κεραίας λήψης μεταξύ όλων των θέσεων της κεραίας (Π και ΠΣ). Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι όσον αφορά τις θέσεις ΔΘ και ΔΚ, το λαμβανόμενο σήμα δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στο περιβάλλον. Από την άλλη, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι διαλείψεις που υφίστανται τα κανάλια ΑΘ, ΔΠ και ΑΒ εξαρτώνται από το μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα για τα τρία αυτά κανάλια, οι διαλείψεις είναι πιο ασθενείς για το περπάτημα σημειωτόν (ΠΣ) σε σύγκριση με το περπάτημα (Π). Ειδικότερα για το κανάλι ΔΠ, οι διαλείψεις του σήματος είναι σημαντικά πιο ισχυρές για το περπάτημα (Π), δηλαδή το πεδίο τιμών είναι 32 dB όταν το περιβάλλον αλλάζει (Π) ενώ από την άλλη είναι 22 dB για ένα λιγότερο μεταβαλλόμενο περιβάλλον (ΠΣ).

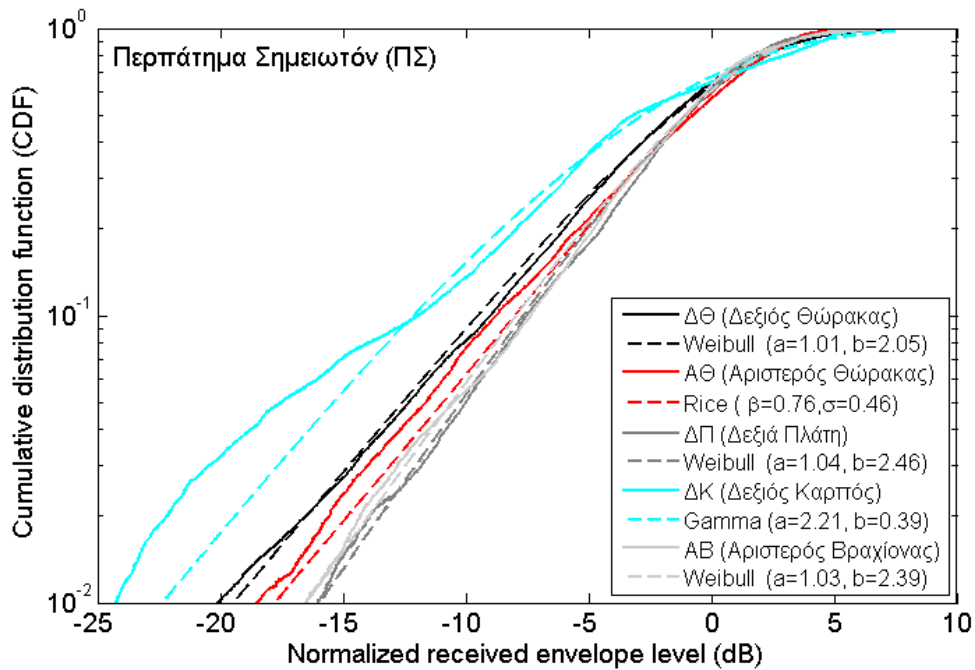
Παρατηρώντας τα σενάρια για το περπάτημα και το περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών (Σχ. 6.11 και 6.13) μπορούμε να δούμε ότι ενώ οι διαλείψεις είναι πιο ισχυρές για το κανάλι ΔΚ όταν κινούνται τα χέρια (Π), το ίδιο κανάλι υφίσταται μικρότερου βαθμού διαλείψεις από ότι τα άλλα κανάλια όταν τα χέρια είναι προσκολλημένα στο σώμα του χρήστη (ΠΚΧ). Πιο συγκεκριμένα, ο βαθμός των διαλείψεων είναι μικρότερος σε σύγκριση με όλες τις άλλες θέσεις την κεραίας λήψης για πιθανότητα από 10 % έως 80 % . Επιπρόσθετα, για το ίδιο κανάλι, οι διαλείψεις του σήματος επηρεάζονται σημαντικά από την κίνηση των χεριών. Στην πραγματικότητα οι διαλείψεις του σήματος είναι πιο ισχυρές όταν τα χέρια κινούνται και το πεδίο τιμών τους είναι 34 dB σε σύγκριση με τα 24 dB όταν τα χέρια δεν κινούνται. Από την άλλη,

παρατηρούμε ότι για τα κανάλια ΔΘ, ΑΘ, ΔΠ και ΑΒ οι διαλείψεις δεν μεταβάλλονται σημαντικά από την κίνηση των χεριών.

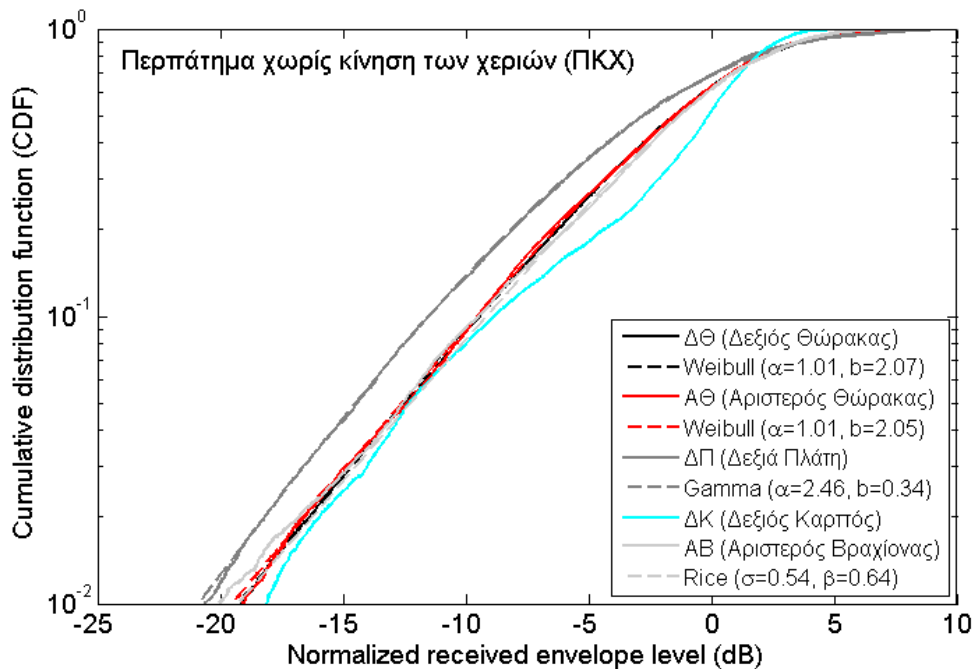
Με βάση τα προηγούμενα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, είναι εμφανές ότι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την διάδοση των καναλιών πάνω στο σώμα είναι η θέση των κεραιών, η μεταβολές του περιβάλλοντος και η κίνηση των χεριών. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των κινήσεων Π (κανονικό περπάτημα) και ΠΣ (περπάτημα σημειωτόν) είναι ο βαθμός των μεταβολών στο περιβάλλον. Συνεπώς, μπορούμε να σημειώσουμε ότι ενώ οι αλλαγές στο περιβάλλον δεν επηρεάζουν σημαντικά τις διαλείψεις που υφίστανται τα κανάλια με την κεραία λήψης κοντά στην κεραία εκπομπής (ΔΘ, ΔΚ), οι θέσεις της κεραίας που δεν βρίσκονται τόσο κοντά στην κεραία εκπομπής (ΑΘ, ΔΠ, ΑΒ) και ειδικότερα αν βρίσκονται και στην πλάτη του χρήστη (συνθήκες NLOS) επηρεάζονται σημαντικά. Από την άλλη, η διαφορά μεταξύ των κινήσεων Π και ΠΚΧ (περπάτημα με ακίνητα χέρια) είναι ο βαθμός των μεταβολών στην κινητικότητα του χρήστη, με έμφαση την κίνηση των χεριών. Στη μελέτη μας, μόνο η κεραία που βρίσκεται στον καρπό του χρήστη επηρεάζεται σημαντικά από την κίνηση των χεριών, ενώ η επίδραση στις κεραιές στο θώρακα, στην πλάτη και στο βραχίονα είναι αμελητέα.



Σχήμα 6.11: Εμπειρικές CDF για όλα τα κανάλια ενώ ο χρήστης περπατάει κανονικά και οι θεωρητικές CDF για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα.



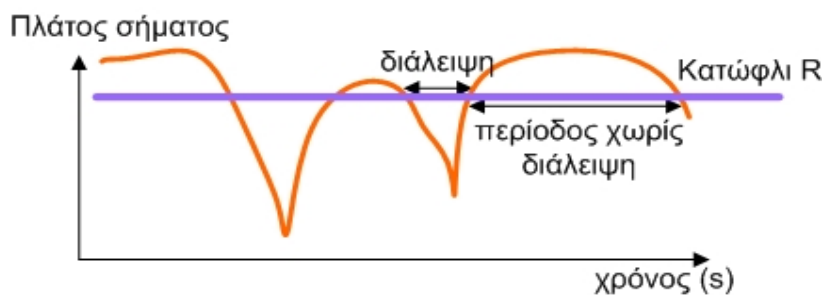
Σχήμα 6.12: Εμπειρικές CDF για όλα τα κανάλια ενώ ο χρήστης περπατάει σημειωτόν και οι θεωρητικές CDF για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα.



Σχήμα 6.13: Εμπειρικές CDF για όλα τα κανάλια ενώ ο χρήστης περπατάει χωρίς κίνηση των χεριών και οι θεωρητικές CDF για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα.

6.2.9.2 Στατιστική ανάλυση δεύτερης τάξης

Η CDF ενός σήματος διαλείψεων είναι ένα στατιστικό μέγεθος πρώτης τάξης και ορίζεται ως η πιθανότητα η περιβάλλουσα του σήματος να είναι μικρότερη ή ίση από ένα δεδομένο κατώφλι. Παρόλα αυτά υπάρχουν περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητο να μελετήσουμε το λαμβανόμενο σήμα διαλείψεων με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Για παράδειγμα ο ρυθμός και η διάρκεια των διαλείψεων μπορεί να είναι χρήσιμα σε κάποιες πρακτικές εφαρμογές, όπου είναι απαραίτητη η βελτίωση της ποιότητας κωδικοποίησης του σήματος και η ελαχιστοποίηση των πιθανών σφαλμάτων. Για να αξιοποιήσουμε αυτού του είδους την πληροφορία, τα στατιστικά δεύτερης τάξης του σήματος πρέπει να χρησιμοποιηθούν, δηλαδή ο ρυθμός διέλευσης στάθμης (LCR) και η μέση διάρκεια διαλείψεων (AFD).



Σχήμα 6.14: Σχηματική αναπαράσταση διαλείψεων.

Για ένα σήμα με διαλείψεις, το LCR ορίζεται ως ο μέσος αριθμός των φορών ανά δευτερόλεπτο που το σήμα διέρχεται από ένα επίπεδο κατωφλίου με θετική κλίση. Το AFD ορίζεται ως η μέση χρονική περίοδος που η κανονικοποιημένη περιβάλλουσα του σήματος βρίσκεται κάτω από ένα επίπεδο κατωφλίου.

Υπολογισμός των LCR από τα εμπειρικά δεδομένα

Η μεθοδολογία που ακολουθούμε για να υπολογίσουμε το εμπειρικό LCR είναι η εξής:

Βήμα 1: Επιλέγουμε τα επίπεδα των διαλείψεων $FL(j)$ ($j=1,2,\dots,L$) από τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των κανονικοποιημένων δεδομένων.

Βήμα 2: Για κάθε επίπεδο διαλείψεων $FL(j)$ που επιλέξαμε, υπολογίζουμε των αριθμό των φορών $N_{FL(j)}$ που το ζευγάρι δεδομένων $R(k)$ και $R(k+1)$ ικανοποιεί την ακόλουθη συνθήκη:

$$R(k+1) < FL(j) \leq R(k) \quad (6.12)$$

όπου $k=1,2,\dots, K$ ο αριθμός του δείγματος και K ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων στη διάρκεια ενός sweep time.

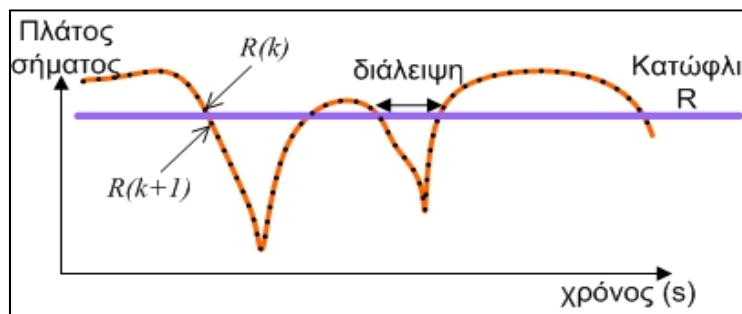
Βήμα 3: Το LCR υπολογίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο για όλα τα επίπεδα διαλείψεων:

$$LCR_{FL(j)} = N_{FL(j)} / \text{sweep time} \quad (6.13)$$

Βήμα 4: Στη συνέχεια με βάση τη στατιστική ανάλυση πρώτης τάξης, επιλέγεται η θεωρητική κατανομή που προσεγγίζει καλύτερα τα εμπειρικά δεδομένα και βάσει αυτής υπολογίζεται το θεωρητικό LCR .

Βήμα 5: Τέλος υπολογίζεται η τιμή της μέγιστης συχνότητας Doppler, f_m , πραγματοποιώντας μια ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων με το εμπειρικό και το θεωρητικό LCR , και το εμπειρικό LCR κανονικοποιείται ως προς την τιμή αυτή:

$$LCR_{FL(j)}^{norm} = LCR_{FL(j)} / f_m \quad (6.14)$$



Σχήμα 6.15: Υπολογισμός του εμπειρικού LCR.

Υπολογισμός των AFD από τα εμπειρικά δεδομένα

Βήμα 1: Για κάθε επίπεδο διαλείψεων $FL(j)$ που επιλέξαμε στο Βήμα 1 του υπολογισμού του LCR , υπολογίζουμε τα ζευγάρια δεδομένων $R(k)$ και $R(k+1)$ που ικανοποιούν την ακόλουθη συνθήκη:

$$R(k+1) < FL(j) \leq R(k) \quad \& \quad R(k+q) < FL(j) \leq R(k+q+1) \quad (6.15)$$

Όπου $k=1,2,\dots, K$ είναι ο αριθμός του δείγματος, K είναι ο συνολικός αριθμός των δειγμάτων και $k+1 < k+q \leq K$. Στη συνέχεια υπολογίζουμε την αντίστοιχη χρονική διάρκεια των διαλείψεων (t_c) ως εξής:

$$t_c = \frac{1}{2}(t_{k+q} + t_{k+q+1}) - \frac{1}{2}(t_k + t_{k+1}) \quad (6.16)$$

όπου t_k είναι ο η χρονική στιγμή που αντιστοιχεί στο δείγμα $R(k)$. Το πρώτο δείγμα $R(i)$ που είναι μικρότερο από $FL(j)$ θεωρείται το αρχικό σημείο της διάρκειας των διαλείψεων.

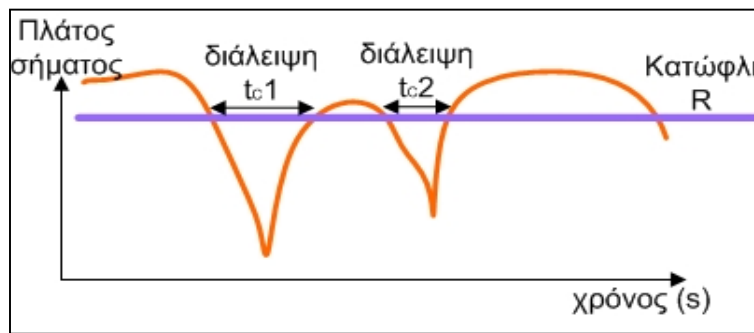
Βήμα 2: Το AFD υπολογίζεται κατ' αυτόν τον τρόπο για όλα τα επίπεδα διαλείψεων:

$$AFD_{FL(j)} = \tau_{FL(j)} = \sum_{i=1}^S (t_c)_i / S \quad (6.17)$$

όπου με S συμβολίζεται ο αριθμός των χρονικών υποδιαστημάτων.

Βήμα 3: Τέλος το εμπειρικό AFD κανονικοποιείται ως προς την μέγιστη συχνότητα Doppler, f_m :

$$AFD_{FL(j)}^{norm} = AFD_{FL(j)} \cdot f_m \quad (6.18)$$



Σχήμα 6.16: Υπολογισμός του εμπειρικού AFD.

Υπολογισμός των θεωρητικών LCR και AFD

Εκφράσεις κλειστής μορφής για τα LCR και AFD για τα μοντέλα Weibull και Rice παρουσιάζονται στα [266], [267]. Εκφράσεις κλειστής μορφής για τα LCR και AFD της περιβάλλουσας σήματος που ακολουθεί κατανομή gamma, μπορούν άμεσα να εξαχθούν από τα στατιστικά δεύτερης τάξης της πιο γενικής κατανομής α - μ [268], θέτοντας $\{a=1, \mu=a_G\}$, όπου a , μ είναι οι παράμετροι της κατανομής α - μ και a_G είναι η παράμετρος διαλείψεων της κατανομής gamma. Οι εκφράσεις των LCR και AFD για τα προαναφερθέντα κανάλια με διαλείψεις συναρτήσει της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας $\rho = r / \sqrt{\Omega}$, όπου $\Omega = E[r^2]$ είναι η μέση ισχύς του σήματος και με $E[\cdot]$ δηλώνεται ο τελεστής προσδοκίας, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.5.

Για να υπολογίσουμε τις εμπειρικές τιμές των LCR και AFD από τα δεδομένα των μετρήσεων, οι περιβάλλουσες των σημάτων κανονικοποιούνται στις rms τιμές τους όπως περιγράφεται στην παράγραφο 6.2.6.1 και τα επίπεδα διαλείψεων επιλέγονται με βάση την περιοχή τιμών των κανονικοποιημένων δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα βήμα 0.5 dB. Οι εμπειρικές τιμές των LCR και AFD στη συνέχεια κανονικοποιούνται στη μέγιστη συχνότητα Doppler (f_m) για να εξαλείψουμε την εξάρτηση από την κίνηση. Η τιμή της μέγιστης συχνότητας Doppler f_m για κάθε σενάριο υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων του LCR υποθέτοντας ότι το σήμα με τις διαλείψεις ακολουθεί την κατανομή που έχει την καλύτερη προσαρμογή σε κάθε περίπτωση (πίνακας 6.4). Για κάθε σενάριο οι τιμές της f_m παρουσιάζονται στον πίνακα 6.6.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5 ΕΚΦΡΑΣΕΙΣ ΚΛΕΙΣΤΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΓΙΑ ΤΑ LCR ΚΑΙ AFD

Weibull	LCR*	$N_{Weibull}(\rho) = \sqrt{2\pi} f_m \left(\frac{\rho}{a}\right)^{b/2} \exp\left\{-\left(\frac{\rho}{a}\right)^b\right\}$
	AFD	$T_{Weibull}(\rho) = \frac{1 - \exp\left\{-\left(\frac{\rho}{a}\right)^b\right\}}{\sqrt{2\pi} f_m \left(\frac{\rho}{a}\right)^{b/2} \exp\left\{-\left(\frac{\rho}{a}\right)^b\right\}}$
Rice	LCR*	$N_{Rice}(\rho) = \frac{\sqrt{2\pi(K+1)} f_m \rho I_0(2\sqrt{K(K+1)}\rho)}{\exp\{K + (K+1)\rho^2\}}$
	AFD**	$T_{Rice}(\rho) = \frac{[1 - Q(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)}\rho^2)] \exp\{K + (K+1)\rho^2\}}{\sqrt{2\pi(K+1)} f_m \rho I_0(2\sqrt{K(K+1)}\rho)}$
Gamma	LCR*	$N_{Gamma}(\rho) = \frac{\sqrt{2\pi} f_m (\sqrt{a_G(a_G+1)}\rho)^{a_G-0.5}}{\Gamma(a_G) \exp(\sqrt{a_G(a_G+1)}\rho)}$
	AFD	$T_{Gamma}(\rho) = \frac{\Gamma(a_G, \sqrt{a_G(a_G+1)}\rho)}{\sqrt{2\pi} f_m (\sqrt{a_G(a_G+1)}\rho)^{a_G-0.5} \exp(\sqrt{a_G(a_G+1)}\rho)}$

* f_m είναι η μέγιστη συχνότητα Doppler,

** $Q(\cdot, \cdot)$ είναι η συνάρτηση *Marcum-Q* που ορίζεται ως $Q(a, b) = \int_b^\infty x \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2}\right) I_0(ax) dx$.

Για κάθε θέση της κεραιάς Rx, η μέγιστη συχνότητα Doppler είναι πάντα μικρότερη για το περπάτημα, υποδηλώνοντας μικρότερο βαθμό μεταβολών στην πρώτη περίπτωση. Οι υψηλότερες τιμές της f_m παρατηρούνται για τα σενάρια ΔΠ-Π και ΔΠ-ΠΣ. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της έλλειψης μιας ζεύξης LOS μεταξύ των κεραιών πομπού και δέκτη καθώς και της μεταβαλλόμενης συνεισφοράς των σκεδαζόμενων σημάτων που έχει ως αποτέλεσμα τις ταχείες μεταβολές του λαμβανόμενου σήματος. Οι μικρότερες τιμές του f_m για κάθε κίνηση παρατηρούνται για το κανάλι ΔΚ, κάτι που είναι αναμενόμενο, αν σκεφτούμε την πολύ κοντινή απόσταση των κεραιών εκπομπής και λήψης. Να σημειώσουμε ότι στο [149], που αφορά ένα περιβάλλον εξωτερικού χώρου στη συχνότητα των 2.45 GHz, οι τιμές της f_m για τα κανάλια μέση – αριστερός θώρακας και μέση – δεξιός θώρακας και για ένα κινητό χρήστη υπολογίστηκαν 2.71 Hz και 4.28 Hz αντίστοιχα. Επιπλέον, σε ένα

εσωτερικό περιβάλλον στο [32] με έντονη σκέδαση, οι αντίστοιχες τιμές υπολογίστηκαν 9.2 Hz και 10.8 Hz.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.6 ΜΕΓΙΣΤΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ DOPPLER f_m ΚΑΙ ΟΙ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ LCR ΚΑΙ AFD ΓΙΑ ΕΠΙΠΕΔΟ ΣΗΜΑΤΟΣ $-10dB$ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΕΝΑΡΙΟ

Σενάρια μετρήσεων	Θεωρητική κατανομή	f_m (Hz)	LCR	AFD
ΔΘ-Π	R	5.92	0.57	0.15
ΔΘ-ΠΣ	W	2.72	0.59	0.14
ΔΘ-ΠΚΧ	W	4.55	0.68	0.13
ΑΘ- Π	W	5.62	0.71	0.13
ΑΘ- ΠΣ	R	4.61	0.41	0.19
ΑΘ- ΠΚΧ	W	5.26	0.66	0.13
ΔΠ- Π	W	6.23	0.91	0.14
ΔΠ- ΠΣ	W	6.04	0.41	0.11
ΔΠ- ΠΚΧ	G	4.92	0.86	0.16
ΔΚ- Π	G	3.23	0.96	0.20
ΔΚ- ΠΣ	G	2.00	0.50	0.27
ΑΒ- Π	W	4.97	0.81	0.14
ΑΒ- ΠΣ	W	3.94	0.38	0.14
ΑΒ- ΠΚΧ	R	5.84	0.54	0.17

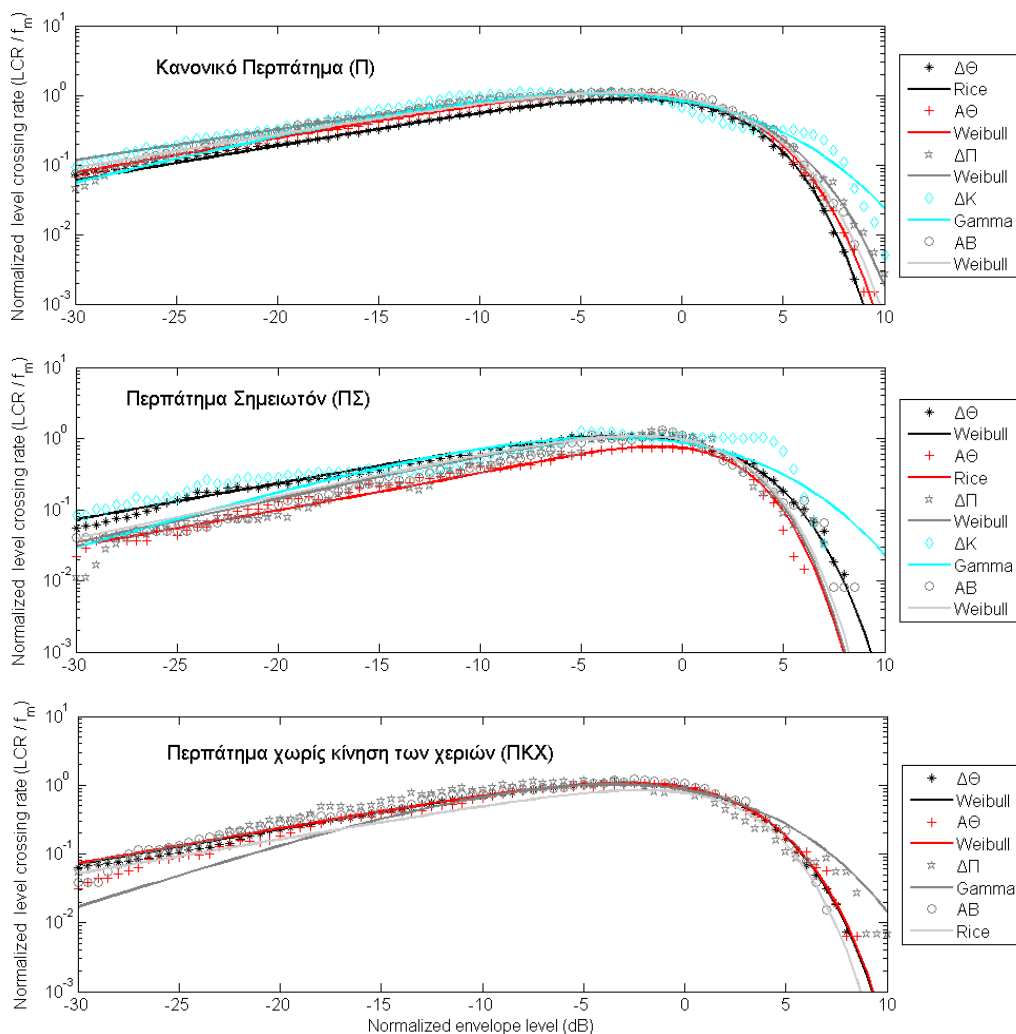
*Π: κανονικό περπάτημα, ΠΣ: περπάτημα σημειωτόν, ΠΚΧ: περπάτημα χωρίς κίνηση χεριών.

*ΔΘ: δεξιός θώρακας, ΑΘ: αριστερός θώρακας, ΔΠ: δεξιά πλάτη, ΔΚ: δεξιός καρπός, ΑΒ: αριστερός βραχίονας.

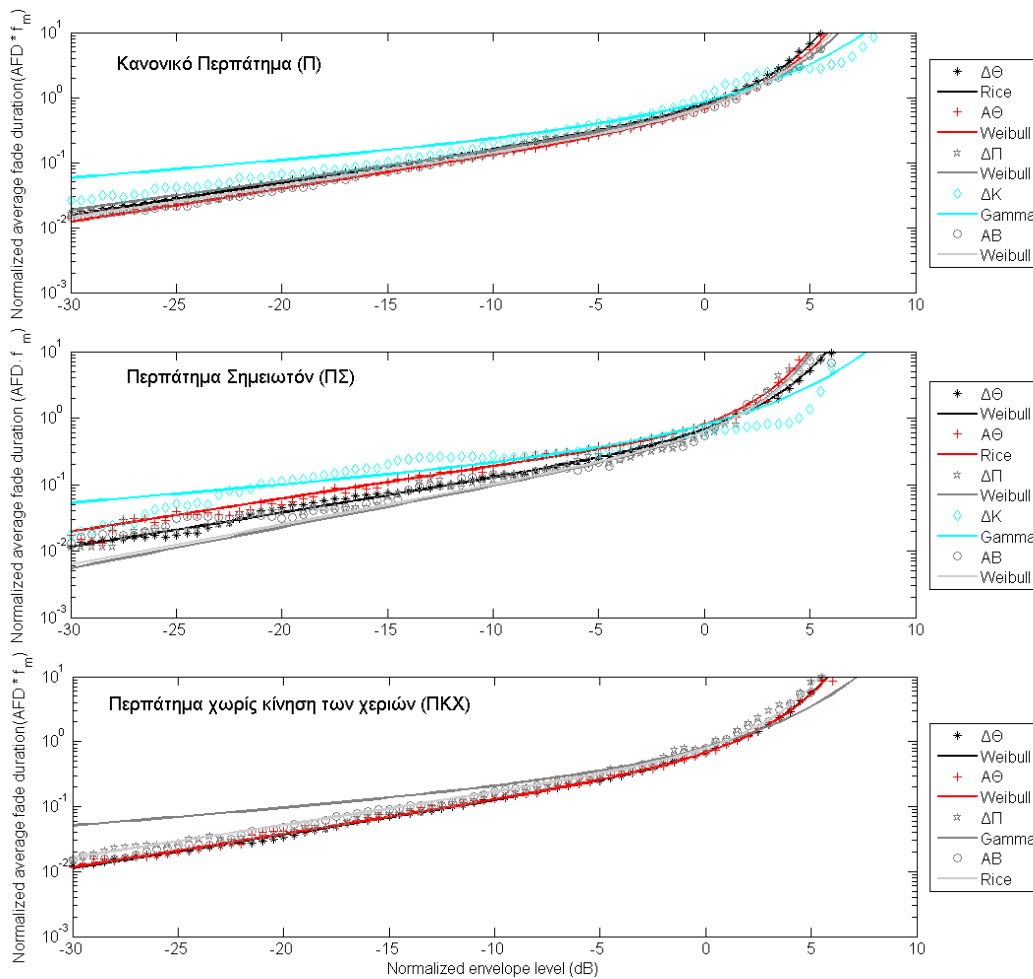
Στον πίνακα 6.6, δίνονται επίσης και οι εμπειρικές τιμές των κανονικοποιημένων LCR και AFD για επίπεδο σήματος -10 dB , σε σχέση με την rms τιμή για κάθε κανάλι. Η υψηλότερη τιμή LCR σε επίπεδο διαλείψεων -10 dB ανάμεσα σε όλα τα σενάρια μετρήσεων βρέθηκε ότι είναι 0.96 για το σενάριο ΔΚ-Π, υποδηλώνοντας ένα κανάλι με μεγάλο αριθμό διελεύσεων του επιπέδου διαλείψεων και σχετικά μεγάλης διάρκειας διαλείψεις, όπως επιβεβαιώνεται από την τιμή του AFD στον πίνακα 6.4. Παρόμοια, η υψηλότερη τιμή του AFD μεταξύ όλων των σεναρίων για βάθος διαλείψεων -10 dB υπολογίζεται ότι είναι 0.27 για το σενάριο ΔΚ-ΠΣ και όπως φαίνεται από τον πίνακα 6.4 αντιστοιχεί σε ένα σενάριο με μέτριο αριθμό διελεύσεων αλλά μεγάλης διάρκειας διαλείψεις.

Οι εμπειρικές καμπύλες του LCR παρουσιάζονται στο Σχ. 6.17, μαζί με τις θεωρητικές για την κατανομή με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα κανονικοποιημένη ως προς την f_m (LCR/f_m). Οι θεωρητικές παράμετροι των κατανομών που υπολογίστηκαν για κάθε σενάριο μετρήσεων δίνονται στον πίνακα

6.3. Όπως παρατηρούμε από τις καμπύλες των LCR, ο αριθμός των διελεύσεων αυξάνει όταν πλησιάζουμε στην rms τιμή του σήματος (0 dB) και μειώνεται στα άκρα του πεδίου τιμών του σήματος. Να σημειώσουμε ότι τα περισσότερα από τα θεωρητικά LCR παρέχουν μια καλή προσέγγιση για τα εμπειρικά LCR και ειδικά για κατώφλι πάνω από την rms τιμή του σήματος. Από το Σχ. 6.17, παρατηρούμε ότι οι εμπειρικές τιμές του LCR για τα σενάρια ΔΚ-ΠΣ και ΔΠ-ΠΚΧ αποκλίνουν από τα θεωρητικά LCR για διαλείψεις κάτω από την rms τιμή του σήματος και ειδικότερα στην περιοχή ουράς των κατανομών. Συγκρίνοντας τις διάφορες θέσεις της κεραίας λήψης για κάθε δραστηριότητα του χρήστη, τα εμπειρικά LCR είναι παρόμοια γύρω από την rms τιμή του σήματος, ενώ αποκλίνουν στα άκρα του πεδίου τιμών του σήματος και ειδικότερα για την κίνηση ΠΣ (Περπάτημα Σημειωτών).



Σχήμα 6.17: Εμπειρικές καμπύλες των LCR μαζί με τις θεωρητικές για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα για όλα τα κανάλια και τις κινήσεις του χρήστη.



Σχήμα 6.18: Εμπειρικές καμπύλες των AFD μαζί με τις θεωρητικές για τις αντίστοιχες κατανομές με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα για όλα τα κανάλια και τις κινήσεις του χρήστη.

Συνεχίζοντας την έρευνα για τα στατιστικά δεύτερης τάξης, οι εμπειρικές τιμές του AFD απεικονίζονται στο Σχ. 6.18, μαζί με τις θεωρητικές τιμές του AFD για την κατανομή με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα κανονικοποιημένη ως προς την f_m ($AFD \cdot f_m$). Οι αντίστοιχες εκτιμήτριες παράμετροι που υπολογίστηκαν θεωρητικά για κάθε σενάριο μετρήσεων δίνονται στον πίνακα 6.3. Παρομοίως όπως και για τα LCR, πολύ καλή συμφωνία παρατηρείται μεταξύ των εμπειρικών και θεωρητικών τιμών των AFD στις περισσότερες περιπτώσεις. Παρόλα αυτά, οι εμπειρικές τιμές του AFD για τα σενάρια ΔK - Π , ΔK - $\Pi\Sigma$ και $\Delta\Pi$ - $\Pi K X$ παρουσιάζουν κάποια απόκλιση από τις θεωρητικές για τιμές του κανονικοποιημένου επιπέδου σήματος κάτω από την rms τιμή του και ειδικότερα στην περιοχή ουράς των καμπυλών. Επιπλέον, όπως παρατηρείται από τις καμπύλες των AFD, η διάρκεια των

διαλείψεων σταδιακά αυξάνει για υψηλότερα επίπεδα σήματος, κάτι που είναι πλήρως αναμενόμενο. Τέλος, όσον αφορά τη θέση ΔΚ της κεραίας όταν ο χρήστης περπατάει σημειωτόν (ΠΣ), είναι εμφανές ότι οι διαλείψεις διαρκούν για μεγαλύτερη χρονική περίοδο για τιμές του σήματος μικρότερες από την rms τιμή του.

6.2.9.3 Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτή την παράγραφο πραγματοποιήσαμε μια διεξοδική ανάλυση σχετικά με τις διαλείψεις του σήματος που υφίσταται ένα ασύρματο δίκτυο BAN που λειτουργεί στα 2.45 GHz τόσο σε ένα περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις (ανηχικός θάλαμος) όσο και σε ένα περιβάλλον εσωτερικού χώρου. Με βάση εκτεταμένες μετρήσεις του σήματος, διαπιστώθηκε ότι η θέση των κεραιών, καθώς και οι συνθήκες του καναλιού είναι τα βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν τις ιδιότητες της διάδοσης πάνω στο σώμα.

Στον ανηχικό θάλαμο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τρεις θέσεις των κεραιών πάνω στο σώμα και διάφορες κινήσεις του χρήστη. Ακολούθησε στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, για να συγκρίνουμε τα δεδομένα των μετρήσεων με διάφορες θεωρητικές κατανομές. Η κατανομή lognormal παρείχε την καλύτερη προσαρμογή για την πλειονότητα των σεναρίων των μετρήσεων (8 σεναρία), εξαιτίας των φαινομένων που προκαλούνται από την κίνηση των χεριών (ανακλάσεις, σκίαση κ.α.). Σε κάποιες περιπτώσεις, η κατανομή Rice πρόσφερε καλή προσαρμογή, όταν η συνιστώσα LOS δεν σκιαζόταν. Η κατανομή Nakagami- m παρείχε την καλύτερη προσαρμογή μόνο σε μια περίπτωση (θέση ΔΠ), όπου υπήρχε NLOS. Η διεξοδική μας ανάλυση έδειξε ξεκάθαρα ότι η κίνηση του σώματος, η θέση της κεραίας και η σχετική θέση μεταξύ των κεραιών πομπού και λήψης επηρεάζουν τις ιδιότητες της διάδοσης πάνω στο σώμα. Τα αποτελέσματα φανερώνουν πόσο σημαντικό είναι για τις εφαρμογές πάνω στο σώμα να μελετούμε αναλυτικά τη στατιστική συμπεριφορά της διάδοσης πάνω στο σώμα και των διαλείψεων που υφίστανται τα κανάλια, που βρίσκονται κοντά στο ανθρώπινο σώμα.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο περιβάλλον εσωτερικού χώρου παρουσιάστηκαν για πέντε θέσεις της κεραίας λήψης πάνω στο σώμα και για τρεις διαφορετικές κινήσεις του χρήστη που αντιστοιχούν σε διαφορετικού βαθμού κινητικότητα σε ένα περιβάλλον γραφείου. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη στατιστική ανάλυση, για να συγκρίνουμε τα κανονικοποιημένα δεδομένα της

περιβάλλουσας με διάφορα θεωρητικά μοντέλα. Για την πλειονότητα των επιλεγμένων σεναρίων μετρήσεων, η κατανομή Weibull παρείχε την καλύτερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι κατανομές Rice και gamma παρείχαν, επίσης, καλύτερη προσαρμογή σε σχέση με τις άλλες κατανομές που εξετάστηκαν. Παραδόξως, η κατανομή Nakagami- m δεν παρείχε την καλύτερη προσαρμογή σε κανένα από τα επιλεγμένα σενάρια, καθώς υπήρχαν κατανομές πιο κατάλληλες για να περιγράψουν τα συγκεκριμένα σενάρια για τις συγκεκριμένες συνθήκες καναλιού. Επίσης, παρουσιάστηκαν οι εμπειρικές τιμές του ρυθμού διέλευσης στάθμης (LCR) και της μέσης διάρκειας διαλείψεων (AFD) για τα επιλεγμένα σενάρια. Αυτά τα εμπειρικά στατιστικά μεγέθη δεύτερης τάξης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα θεωρητικά, που προέκυψαν χρησιμοποιώντας αναλυτικές εκφράσεις για τα στατιστικά μεγέθη δεύτερης τάξης της κατανομής της περιβάλλουσας του σήματος, την οποία ακολουθούσαν τα πειραματικά δεδομένα σε κάθε περίπτωση. Από την στατιστική ανάλυση δεύτερης τάξης προέκυψε ότι, τα εμπειρικά στατιστικά μεγέθη δεύτερης τάξης συμφωνούσαν με τα θεωρητικά.

6.3 Χωρικός διαφορισμός για επικοινωνίες πάνω στο ανθρώπινο σώμα

Έχει αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια ότι οι εφαρμογές των δικτύων BAN, όπως ο στρατιωτικός και αθλητικός εξοπλισμός για επικοινωνία μεταξύ ασύρματων πομποδεκτών, απαιτούν συστήματα με υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων και μεγαλύτερο ρυθμό απόδοσης [17]. Συγχρόνως, τα κανάλια πάνω στο σώμα υπόκεινται σε ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον που προκαλείται από τις αλλαγές στη στάση του σώματος, του περιβάλλοντος και της κατεύθυνσης του σήματος. Επιπλέον, τα επίπεδα της εκπεμπόμενης ισχύος πρέπει να παραμένουν σχετικά χαμηλά. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, ο διαφορισμός χώρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντιμετωπίσουμε τις διαλείψεις και να αυξήσουμε τους ρυθμούς επικοινωνίας σε ένα περιβάλλον πάνω στο σώμα. Τα κανάλια πάνω στο σώμα χαρακτηρίζονται με διάφορους τρόπους [2], [11], [10] αλλά λίγες είναι οι μελέτες που έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη του διαφορισμού πάνω στο σώμα [13], [14], [17], [18], [32]. Συνεπώς η μελέτη της βελτίωσης που προσφέρεται από το

διαφορισμό για τα κανάλια επικοινωνίας πάνω στο σώμα είναι ένα θέμα ανοιχτό προς μελέτη. Στα πλαίσια της διατριβής, ποσοτικοποιούμε τη βελτίωση που μπορεί να επιτευχθεί μέσω του διαφορισμού για διάφορα κανάλια επικοινωνίας πάνω στο σώμα και εστιάζουμε στην απόδοση διαφορισμού μέσω πειραματικών δεδομένων με πραγματικές κεραιές σε πραγματικά περιβάλλοντα. Συνεπώς, παρέχουμε μια πιο ρεαλιστική οπτική της απόδοσης του διαφορισμού κεραιάς για τα κανάλια πάνω στο σώμα.

Στην παράγραφο αυτή, διερευνούμε τις διαλείψεις που υφίστανται τα κανάλια διαφορισμού πάνω στο σώμα στα 2.45 GHz εστιάζοντας στην επίδραση της θέσης των κεραιών λήψης και της κίνησης του ανθρώπινου σώματος. Η διερεύνηση αυτή βασίζεται στη διεξαγωγή και την ανάλυση των μετρήσεων του σήματος σε ένα εσωτερικό περιβάλλον γραφείου χρησιμοποιώντας φορετές κεραιές. Για να επιβεβαιώσουμε την αξιοπιστία των μετρήσεων και την επαναληψιμότητα της απόδοσης διαφορισμού, οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται αρκετές φορές για κάθε κανάλι. Θεωρούμε τρεις βασικές τεχνικές συνδυασμού σημάτων, όπως είδαμε στην παράγραφο 2.3.1, δηλαδή το διαφορισμό επιλογής (SC), το διαφορισμό ίσης απολαβής (EGC) και το διαφορισμό μεγίστου λόγου (MRC). Αρχικά αναλύουμε την απόδοση διαφορισμού για διάφορα κανάλια επικοινωνίας πάνω στο σώμα. Το κέρδος διαφορισμού (DG), οι συντελεστές συσχέτισης και οι συναρτήσεις αθροιστικής κατανομής (CDF) υπολογίζονται σε κάθε περίπτωση. Στη συνέχεια πραγματοποιούμε στατιστικό χαρακτηρισμό των διαλείψεων που υφίστανται τα κανάλια διαφορισμού πάνω στο σώμα, όσον αφορά στατιστικά μεγέθη πρώτης και δεύτερης τάξης. Η έρευνά μας έδειξε ότι ανάμεσα στις κατανομές που ελέγχθηκαν, η κατανομή α - μ παρέχει ικανοποιητική προσαρμογή στα δεδομένα που προέκυψαν από το διαφορισμό των λαμβανόμενων σημάτων και επίσης προσφέρει και μια πολύ καλή προσέγγιση στα στατιστικά δεύτερης τάξης για την πλειονότητα των σεναρίων.

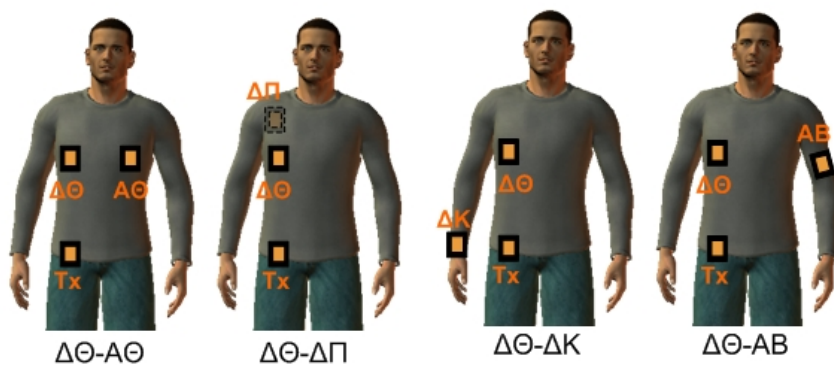
Η μελέτη που παρουσιάζεται εδώ, έχει ήδη δημοσιευθεί στα [269], [270]. Στην παράγραφο 6.3.1 παρουσιάζουμε την κεραιά που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις καθώς και τις θέσεις που αυτή τοποθετήθηκε πάνω στο σώμα, κατά τη διάρκειά τους. Οι λεπτομέρειες της διαδικασίας των μετρήσεων συνοψίζονται στην παράγραφο 6.3.2 ενώ η παράγραφος 6.3.3 περιγράφει την ανάλυση της απόδοσης του χωρικού διαφορισμού πάνω στο σώμα. Η παράγραφος 6.3.4 δίνει τις λεπτομέρειες της στατιστικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα των μετρήσεων. Τέλος,

η παράγραφος 6.3.5 συνοψίζει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των αποτελεσμάτων.

6.3.1 Επιλογή και τοποθέτηση φορητών κεραιών πάνω στο σώμα

Η κεραία που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη του διαφορισμού είναι η κεραία CC που υλοποιήθηκε στην παράγραφο 5.5 και περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2.1. Για τη διενέργεια των πειραμάτων μας, τοποθετήσαμε μια κεραία εκπομπής (Tx) και δύο κεραίες λήψης (Rx) πάνω στο σώμα ενός ενήλικα άντρα βάρους 75 kg και ύψους 1.75 m. Η κεραία Tx τοποθετήθηκε στο ύψος της ζώνης, στη δεξιά πλευρά της μέσης του χρήστη και διατηρήθηκε σταθερή για όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Τέσσερα διαφορετικά ζεύγη θέσεων επιλέχθηκαν για την τοποθέτηση των κεραιών Rx, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.16: δεξιά και αριστερή πλευρά του θώρακα ($\Delta\Theta$ -A Θ), δεξιά πλευρά του θώρακα και δεξιά πλευρά της πλάτης ($\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$), δεξιά πλευρά του θώρακα και δεξιός καρπός ($\Delta\Theta$ - $\Delta\text{Κ}$) και τέλος δεξιά πλευρά του θώρακα και αριστερός βραχίονας ($\Delta\Theta$ -AB).

Φορητό σύστημα διαφορισμού



Σχήμα 6.19: Ζεύγη κεραιών που επιλέχθηκαν.

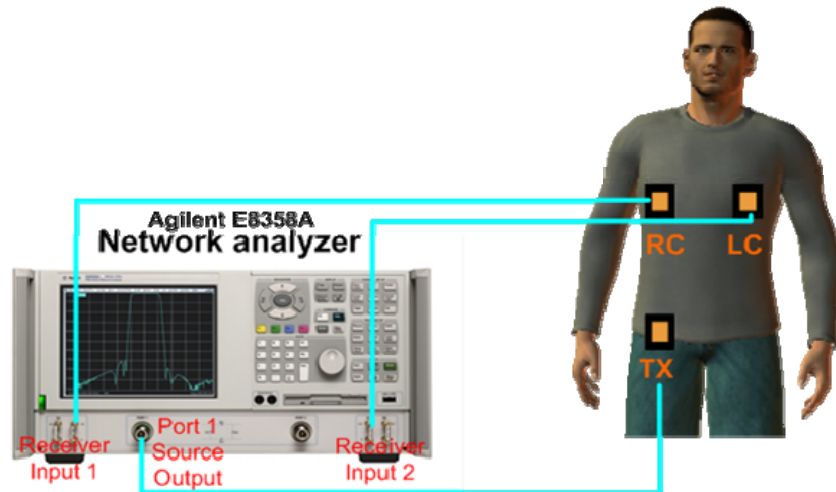
Σε αυτή τη μελέτη, οι κεραίες θεωρούνται μέρος του καναλιού διάδοσης πάνω στο σώμα. Ο βασικός στόχος της μελέτης αυτής είναι να διερευνήσει την επίδραση της θέσης των κεραιών Rx, καθώς και της κίνησης του χρήστη στις διαλείψεις που υφίστανται τα κανάλια διαφορισμού πάνω στο σώμα. Σε αυτά τα πλαίσια, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε έναν απλό και ευρέως χρησιμοποιούμενο τύπο κεραίας [246]

με σκοπό να εξάγουμε αποτελέσματα που αφορούν όσο το δυνατόν ευρύτερο πεδίο εφαρμογών. Οι κεραιές που χρησιμοποιήσαμε είναι φορετές κεραιές ορθογωνικού patch και γραμμικής πόλωσης που λειτουργούν στην μη-αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων ISM των 2.45 GHz. Αυτός ο τύπος κεραιάς είναι μια ρεαλιστική επιλογή για τις φορετές εφαρμογές χάρη στην επίπεδη κατασκευή της και την απλή ενσωμάτωσή της στο ρουχισμό του χρήστη. Επιπλέον, οι κεραιές τύπου patch δεν επηρεάζονται από την εγγύτητα του ανθρώπινου σώματος όσο κάποιοι άλλοι τύποι κεραιάς (π.χ. ομοιοκατευθυντικές κεραιές). Επιπρόσθετα και πιο σημαντικά, είναι προτιμότερες για επικοινωνίες πάνω στο σώμα για να αποφύγουμε την οπίσθια ακτινοβολία και της απώλειες ακτινοβολίας [271]. Το επίπεδο γείωσης και το ακτινοβολόν patch κάθε κεραιάς είναι κατασκευασμένα από φύλλο χαλκού πάχους 0.12 mm και χρησιμοποιήσαμε ένα υφασμάτινο υπόστρωμα από τσόχα με $\epsilon_r = 1.17$. Οι κεραιές απέχουν περίπου 15 mm από το ανθρώπινο σώμα.

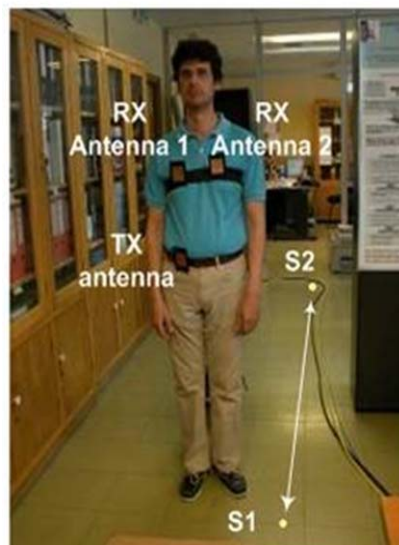
6.3.2 Διάταξη και μεθοδολογία μετρήσεων διαφορισμού στα 2.45 GHz

Για να αναλύσουμε την απόδοση διαφορισμού των καναλιών πάνω στο σώμα, πραγματοποιήσαμε μετρήσεις σε εσωτερικό περιβάλλον εργαστηρίου με έντονη σκέδαση, τοποθετώντας τις φορετές κεραιές εκπομπής και λήψης πάνω σε έναν εθελοντή. Το εργαστήριο βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του στο ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και είναι ο ίδιος χώρος που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2.2. Το εργαστήριο παρείχε ένα περιβάλλον που προσφέρει συνθήκες πολλαπλών διαδρομών. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν αργά το απόγευμα που το εργαστήριο ήταν άδειο. Για την πραγματοποίηση του συστήματος μετρήσεων διαφορισμού χρησιμοποιήσαμε έναν διανυσματικό αναλυτή δικτυωμάτων Agilent E8358A (vector network analyzer - VNA) για την παραγωγή (εκπομπή) και μέτρηση (λήψη) των σημάτων. Η κεραιά Tx τροφοδοτείται χρησιμοποιώντας ένα συνεχές σήμα (CW) στα 2.45 GHz που παράγεται από το VNA. Το VNA έχει ρυθμιστεί κατάλληλα για να επιτρέπει τις ταυτόχρονες μετρήσεις της απόλυτης ισχύος των σημάτων στους δύο κλάδους του συστήματος διαφορισμού. Σε χρόνο σάρωσης 3 s, καταγράφηκαν 1601 δείγματα από κάθε κλάδο του συστήματος διαφορισμού και επεξεργάστηκαν αργότερα με τη βοήθεια υπολογιστή σύμφωνα με τις τεχνικές συνδυασμού σημάτων που έχουμε

θεωρήσει. Επιλέχθηκαν τέσσερα κανάλια πάνω στο σώμα, που συμβολίζονται όπως είδαμε ως ΔΘ-ΑΘ, ΔΘ-ΔΠ, ΔΘ-ΔΚ και ΔΘ-ΑΒ (Σχ. 6.19).



Σχήμα 6.20: Διάταξη μετρήσεων διαφορισμού στα 2.45 GHz.



Σχήμα 6.21: Διάταξη μετρήσεων διαφορισμού σε περιβάλλον εργαστηρίου.

Οι κινήσεις του χρήστη κατά τη διάρκεια των μετρήσεων επιλέχθηκαν με σκοπό να λάβουμε υπόψη μας διαφορετικούς βαθμούς κινητικότητας σχετικά με την κίνηση του χρήστη και την κίνηση της κεραίας στο περιβάλλον, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 6.2.6. Πιο συγκεκριμένα, θεωρήσαμε τις παρακάτω κινήσεις για το χρήστη (Σχ. 6.8): κανονικό περπάτημα (Π), περπάτημα σημειωτόν (ΠΣ) και περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών (ΠΚΧ). Κάθε συνδυασμός θέσης της κεραίας

Rx και κίνησης του χρήστη αποτελεί ένα σενάριο μετρήσεων διαφορισμού, π.χ. ΔΘ-ΑΘ/Π είναι η συντομογραφία για τη θέση των κεραιών του δέκτη στο δεξιό θώρακα – αριστερό θώρακα και για την κίνηση του κανονικού περπατήματος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ενώ ο χρήστης περπατούσε κατά μήκος μιας διαδρομής μήκους 4 m. Η διάρκεια κάθε κίνησης ήταν ίση με μία σάρωση. Παρόλα αυτά κάθε σενάριο μετρήσεων επαναλήφθηκε τουλάχιστον 10 φορές.

Οι συνθήκες του καναλιού πάνω στο σώμα εξαρτώνται από τις σχετικές θέσεις των κεραιών Tx και Rx αλλά και από τις πολλαπλές διαδρομές που προκαλούνται από το ανθρώπινο σώμα και το γύρω περιβάλλον. Η σχετική θέση της κεραίας Tx και των κεραιών Rx άλλαζε σημαντικά μόνο για το ζεύγος κεραιών ΔΘ - ΔΚ ενώ ο χρήστης πραγματοποιούσε τις κινήσεις Π και ΠΣ. Από την άλλη, οι πολλαπλές διαδρομές που προκαλούνται από το σώμα επηρεάζονταν μόνο όταν ο χρήστης κουνούσε τα χέρια του, δηλαδή για τις κινήσεις Π και ΠΣ. Τέλος, οι πολλαπλές διαδρομές λόγω του περιβάλλοντος άλλαζαν όταν η κίνηση του χρήστη προκαλούσε κίνηση των κεραιών στο περιβάλλον (κινήσεις Π και ΠΚΧ).

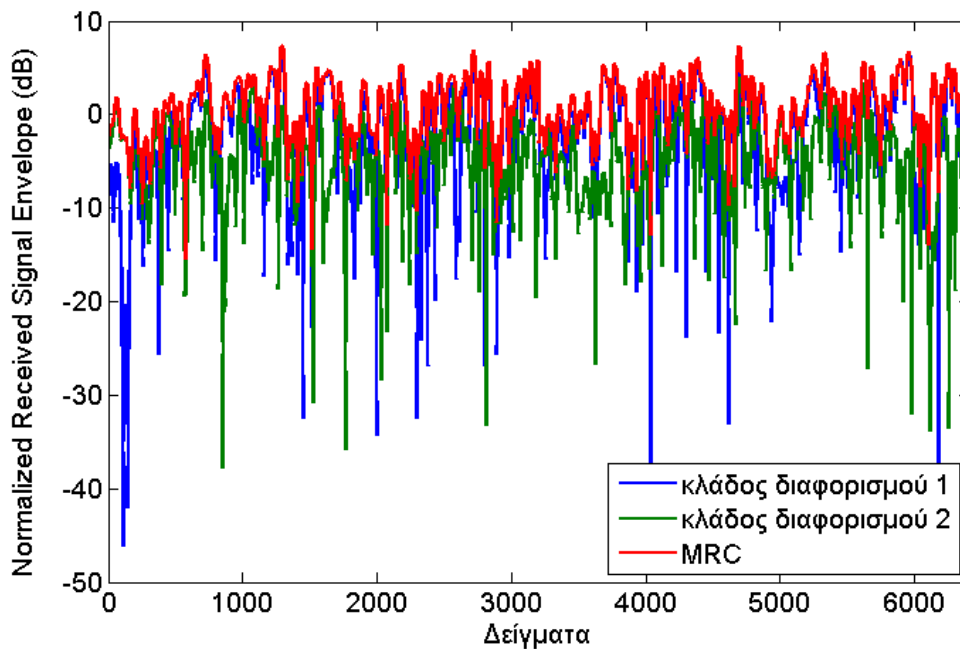
Πριν την ανάλυση των δεδομένων, όλα τα λαμβανόμενα δείγματα ισχύος που προέκυψαν για κάθε σενάριο μετρήσεων κανονικοποιήθηκαν σε μια τιμή, δηλαδή στη μέση ισχύ των δύο κλάδων του συστήματος διαφορισμού όλων των σεναρίων με σκοπό τη δίκαιη σύγκριση των στατιστικών πρώτης και δεύτερης τάξης. Τα κανονικοποιημένα δείγματα της περιβάλλουσας του σήματος στους δύο κλάδους συνδυάστηκαν χρησιμοποιώντας τρία βασικά σχήματα διαφορισμού: διαφορισμός επιλογής (SC), διαφορισμός ίσης απολαβής (EGC) και διαφορισμός μεγίστου λόγου (MRC), που παρουσιάστηκαν με περισσότερη λεπτομέρεια στην παράγραφο 2.3.1. Ο διαφορισμός επιλογής είναι μια μη ιδανική τεχνική σύμφωνα με την οποία επιλέγεται κάθε φορά το σήμα του κλάδου με το μεγαλύτερο πλάτος. Στο διαφορισμό ίσης απολαβής, τα σήματα σε όλους τους κλάδους πολλαπλασιάζονται με ίσα βάρη και προστίθενται συμφασικά για παράδειγμα προσθέτοντας τις περιβάλλουσες τους. Τέλος, ο διαφορισμός μεγίστου λόγου είναι η βέλτιστη γραμμική τεχνική διαφορισμού, αλλά είναι η πιο πολύπλοκη από άποψη υλοποίησης. Για το σύστημα του διπλού διαφορισμού, το πλάτος του σήματος στην έξοδο του συστήματος διαφορισμού για τα σχήματα SC, EGC και MRC μπορούν να εκφραστούν αντίστοιχα ως εξής [36]:

$$R_{SC} = \max(r_1, r_2) \quad (6.19)$$

$$R_{EGC} = \frac{r_1 + r_2}{\sqrt{2}} \quad (6.20)$$

$$R_{MRC} = \sqrt{r_1^2 + r_2^2} \quad (6.21)$$

όπου r_1, r_2 είναι το πλάτος των σημάτων στους δύο κλάδους αντίστοιχα. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι πειραματικές Συναρτήσεις Αθροιστικής Κατανομής (CDF) των δύο κλάδων καθώς και των συνδυασμένων σημάτων.



Σχήμα 6.22: Λαμβανόμενο πλάτος για τους δύο κλάδους διαφορισμού και το σήμα διαφορισμού MRC για το σενάριο ΔΘ-ΑΘ/ΠΣ.

6.3.3 Μεθοδολογία αξιολόγησης επιδόσεων του καναλιού διαφορισμού του σώματος

Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των περιβαλλουσών των σημάτων στους δύο κλάδους υπολογίστηκε με βάση την (3.12). Οι τρεις τεχνικές διαφορισμού που εκφράζονται από τις σχέσεις (6.19) - (6.21), εφαρμόστηκαν στα δεδομένα των μετρήσεων για να προκύψει το σήμα διαφορισμού σε κάθε περίπτωση (Σχ. 6.22). Υπολογίστηκαν οι πειραματικές CDF των σημάτων στους δύο κλάδους αλλά και του σήματος διαφορισμού. Το κέρδος διαφορισμού υπολογίστηκε από τις CDF ως η

διαφορά μεταξύ του σήματος διαφορισμού και του σήματος του ισχυρότερου κλάδου σε επίπεδο πιθανότητας 1% ή επίπεδο αξιοπιστίας 99%.

6.3.3.1 Συσχέτιση σημάτων

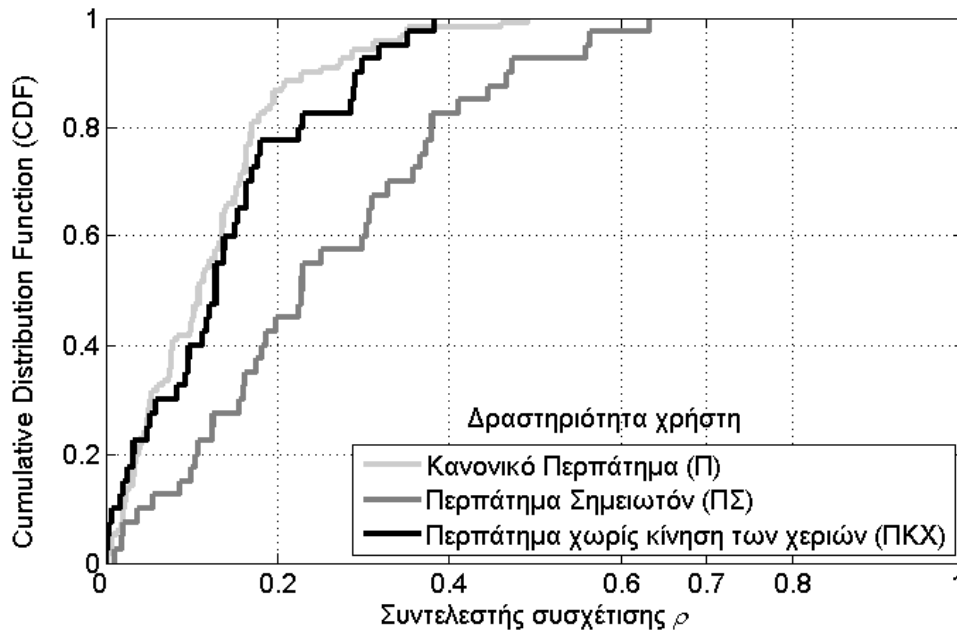
Ο συντελεστής συσχέτισης ρ μεταξύ των δύο κλάδων του συστήματος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση [25]:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^M (r_1(i) - \bar{r}_1)(r_2(i) - \bar{r}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M (r_1(i) - \bar{r}_1)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M (r_2(i) - \bar{r}_2)^2}} \quad (6.22)$$

όπου M είναι ο αριθμός των δειγμάτων και \bar{r}_k είναι η μέση τιμή της περιβάλλουσας r_k του κλάδου διαφορισμού k . Η συσχέτιση μεταξύ των σημάτων στους κλάδους εξαρτάται από πολλές παραμέτρους: την απόσταση μεταξύ των κεραιών του δέκτη, τις πολλαπλές διαδρομές που προκαλούνται από το γύρω περιβάλλον και τις κινήσεις του σώματος, την αμοιβαία σύζευξη και την παραμόρφωση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας που προκαλείται από την παρουσία του ανθρώπινου σώματος. Σε γενικές γραμμές, η κοντινή τοποθέτηση των κεραιών αυξάνει τη συσχέτιση μεταξύ των σημάτων στους κλάδους, ενώ οι πολλαπλές διαδρομές βοηθούν στην αποσυσχέτισή τους. Από την άλλη, η σύζευξη θεωρείται ένα μη επιθυμητό αποτέλεσμα στις κεραιές που τοποθετούνται κοντά η μία στην άλλη, παρόλα αυτά σε συγκεκριμένες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συσχέτισης των σημάτων [272].

Οι συντελεστές διασυσχέτισης, όπως απεικονίζεται στις αντίστοιχες CDF στο Σχ. 6.23, είναι πάντα μικρότεροι από 0.5 για τις κινήσεις Π και ΠΚΧ και επίσης μικρότεροι από 0.65 για την κίνηση ΠΣ. Ανάμεσα στις διαφορετικές κινήσεις, οι συντελεστές διασυσχέτισης είναι μεγαλύτεροι για την κίνηση ΠΣ που σημαίνει ότι η κίνηση της κεραιάς στο περιβάλλον βοηθά στην αποσυσχέτιση των σημάτων στους δύο κλάδους. Παρόλα αυτά είναι φανερό ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές διασυσχέτισης είναι μικρότερες από 0.7 και μια καλή απόδοση διαφορισμού μπορεί

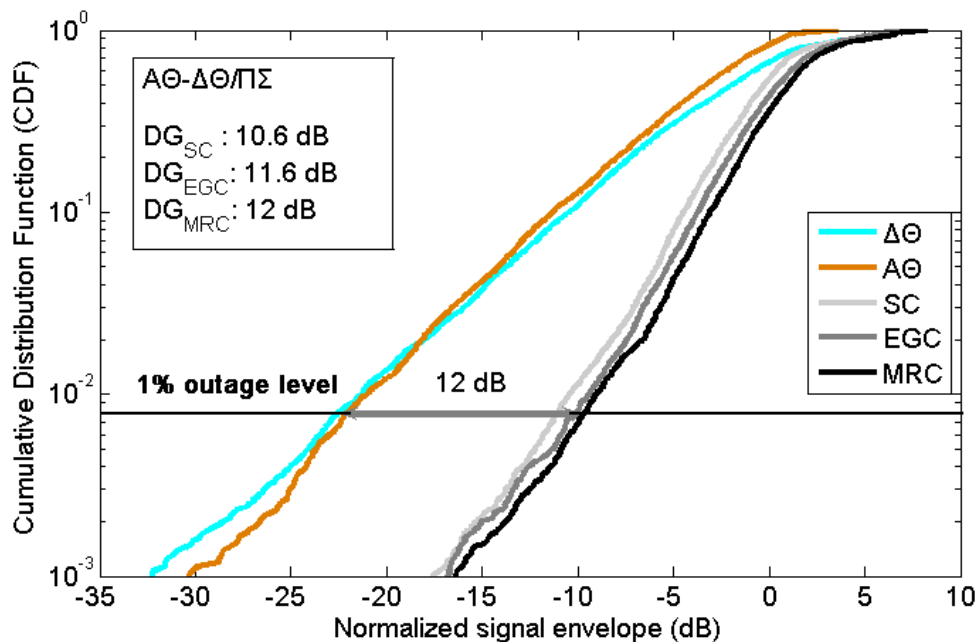
να επιτευχθεί [22]. Στον πίνακα 6.7, καταγράφονται οι μέσες τιμές διασυσχέτισης ($\bar{\rho}$) για κάθε σενάριο, όπου κανείς μπορεί να παρατηρήσει ότι οι αντίστοιχες τιμές είναι σχετικά χαμηλές, και σε γενικές γραμμές χαμηλότερες από 0.3.



Σχήμα 6.23: Πειραματικές CDF των συντελεστών διασυσχέτισης για όλα τα ζεύγη κεραιών Rx ανά κατηγορία κίνησης του χρήστη (Π, ΠΣ, ΠΚΧ).

6.3.3.2 Κέρδος διαφορισμού

Το κέρδος διαφορισμού αποτελεί ένα χρήσιμο μέγεθος για την ανάλυση της απόδοσης του συστήματος διαφορισμού. Στην παρούσα μελέτη, υπολογίστηκε ως η διαφορά μεταξύ των CDFs του ισχυρότερου κλάδου και του σήματος διαφορισμού για 1% αθροιστική πιθανότητα (Σχ. 6.24). Σύμφωνα με το [22], ένα αξιολογικό κέρδος διαφορισμού μπορεί να επιτευχθεί αν η ετεροσυσχέτιση και η ανισοσταθμία ισχύος μεταξύ των σημάτων στους δύο κλάδους είναι επαρκώς χαμηλές. Η ανισοσταθμία ισχύος μεταξύ των κλάδων διαφορισμού σε αυτή τη μελέτη εκφράζεται από τη μέση διαφορά του πλάτους των σημάτων (D_R). Στον πίνακα 6.7, παρουσιάζονται οι τιμές του κέρδους διαφορισμού μαζί με τις τιμές της μέσης ετεροσυσχέτισης ($\bar{\rho}$) και του D_R για όλα τα σενάρια μέτρησης που μελετήσαμε. Κάποιος μπορεί να παρατηρήσει ότι οι τιμές του $\bar{\rho}$ είναι σχετικά χαμηλές, και γενικά χαμηλότερες από 0.3.



Σχήμα 6.24: Υπολογισμός κέρδους διαφορισμού για το σενάριο μετρήσεων ΔΘ-ΑΘ / ΠΣ (Δεξιός Θώρακας-Αριστερός Θώρακας/ Περπάτημα Σημειωτόν).

Το υψηλότερο κέρδος διαφορισμού μεταξύ όλων των σεναρίων μέτρησης (12 dB) παρατηρήθηκε για την τεχνική MRC ενώ ο χρήστης περπατούσε σημειωτόν και η συστοιχία των κεραιών ήταν τοποθετημένη στο μπροστινό μέρος του σώματος του χρήστη (ΔΘ-ΑΘ/ΠΣ). Σε αυτή την περίπτωση το D_R είναι το ελάχιστο (2.2 dB) μεταξύ όλων των σεναρίων, όπως φαίνεται από τον πίνακα 6.7. Από την άλλη, το χαμηλότερο κέρδος διαφορισμού παρατηρείται για το σενάριο ΔΘ-ΔΠ/ΠΚΧ, όπου το D_R είναι ίσο με 17.2 dB, την υψηλότερη τιμή μεταξύ όλων των σεναρίων. Σε γενικές γραμμές, όπως φαίνεται και από τον πίνακα 6.7, το κέρδος διαφορισμού ευνοείται στις περισσότερες περιπτώσεις για χαμηλότερες τιμές του D_R και κατά προτίμηση για τιμές κάτω από 10 dB.

Οι θέσεις των κεραιών που παρέχουν την καλύτερη απόδοση όσον αφορά το κέρδος διαφορισμού, αν υπολογίσουμε το μέσο όρο για τις τρεις κινήσεις (Π, ΠΣ και ΠΚΧ), είναι όταν η κεραία Tx και η συστοιχία των κεραιών Rx είναι τοποθετημένες στην ίδια πλευρά του σώματος (ΔΘ-ΑΘ). Αντιθέτως, το χαμηλότερο κέρδος διαφορισμού παρατηρείται για το ζεύγος κεραιών ΔΘ-ΔΠ. Αν ο χρήστης περπατάει (κίνηση Π) η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται για το ζεύγος ΔΘ-ΔΚ. Παρόλα αυτά,

όπως παρατηρείται στον πίνακα 6.7, το κέρδος διαφορισμού για αυτή τη συγκεκριμένη θέση των κεραιών RX παρουσιάζει την υψηλότερη εξάρτηση από την κίνηση του χρήστη μεταξύ όλων (π.χ. οι τιμές του κυμαίνονται για το MRC από 3.8 μέχρι 11.2). Αξίζει να σημειωθεί, ότι η απόδοση του κέρδους διαφορισμού για το EGC είναι συγκρίσιμη με αυτή του MRC. Ειδικότερα, το EGC αγγίζει το 93% της μέσης απόδοσης του κέρδους διαφορισμού του MRC. Αυτή είναι μια πολύ χρήσιμη παρατήρηση για πρακτικές εφαρμογές δικτύων BAN, αν σκεφτούμε ότι το EGC απλούστερο να υλοποιηθεί από τη στιγμή που δεν απαιτείται καμία εκτίμηση του πλάτους του καναλιού σε αυτή την περίπτωση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.7 ΜΕΣΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΙΑΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ($\bar{\rho}$), ΜΕΣΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΥΣΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ (D_R) ΚΑΙ ΚΕΡΔΟΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ ΓΙΑ ΟΛΕΣ ΤΙΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΗ

Diversity scenarios	$\bar{\rho}$	D_R (dB)	Diversity Gain (dB)		
			SC	EGC	MRC
$\Delta\Theta$ - $\Delta\Theta$ / Π	0.11	4.2	8.4	9.1	9.8
$\Delta\Theta$ - $\Delta\Theta$ / ΠΣ	0.26	2.2	10.6	11.6	12.0
$\Delta\Theta$ - $\Delta\Theta$ / ΠΚΧ	0.16	5.6	6.2	7.4	7.8
$\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$ / Π	0.12	16.1	4.1	4.6	5.3
$\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$ / ΠΣ	0.19	15.5	3.3	4.4	4.9
$\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$ / ΠΚΧ	0.18	17.2	2.3	2.8	3.6
$\Delta\Theta$ - $\Delta\mathcal{K}$ / Π	0.15	6.8	9.7	10.5	11.2
$\Delta\Theta$ - $\Delta\mathcal{K}$ / ΠΣ	0.26	10.3	5.2	6.5	6.9
$\Delta\Theta$ - $\Delta\mathcal{K}$ / ΠΚΧ	0.09	13.0	2.2	3.1	3.8
$\Delta\Theta$ - $\Delta\mathcal{B}$ / Π	0.11	11.8	4.3	5.1	5.8
$\Delta\Theta$ - $\Delta\mathcal{B}$ / ΠΣ	0.30	11.6	3.5	4.2	4.8
$\Delta\Theta$ - $\Delta\mathcal{B}$ / ΠΚΧ	0.13	11.9	4.6	5.3	6.0

6.3.4 Μεθοδολογία μοντελοποίησης του καναλιού διαφορισμού του σώματος

Ένα σημαντικό θέμα για την επιτυχία του σχεδιασμού ενός συστήματος BAN είναι η ακριβής στατιστική μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης. Στο παρελθόν, ένας σημαντικός αριθμός από δημοσιευμένα άρθρα που ασχολούνται με τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα εμφανίστηκαν στην τεχνική βιβλιογραφία. Παρόλα αυτά, λίγες είναι οι δημοσιευμένες δουλειές σχετικά με το χαρακτηρισμό και την μοντελοποίηση των καναλιών διαφορισμού πάνω στο σώμα. Ο χωρικός διαφορισμός

των καναλιών του σώματος μέσω του κέρδους διαφορισμού και της συσχέτισης μεταξύ των σημάτων των κλάδων έχει διερευνηθεί στα [17], [32].

Η γνώση της κατανομής των σημάτων διαφορισμού είναι απαραίτητη για το βέλτιστο σχεδιασμό του δέκτη διαφορισμού και ανάλυση της απόδοσης. Η κατανομή διαλείψεων προκύπτει μέσω στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων των μετρήσεων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό μεγεθών όπως η χωρητικότητα του καναλιού, στατιστικά δεύτερης τάξης και κέρδος διαφορισμού. Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα στατιστικής μοντελοποίησης καναλιών διαφορισμού πάνω στο σώμα υπάρχουν στα [32], [234], [18]. Ανάμεσα στις κατανομές διαλείψεων που χρησιμοποιούνται, η κατανομή Nakagami- m φαίνεται να παρέχει καλή προσαρμογή σε κανάλια διαφορισμού πάνω στο σώμα στα [32], [234]. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις για τις οποίες άλλες κατανομές, όπως οι Rice, normal, gamma και lognormal παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα [18].

Οι μελέτες σχετικά με τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα οδηγούν σε τόσο διαφορετικά αποτελέσματα όσον αφορά τις κατανομές επειδή πραγματοποιούνται κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα αυτά εξαρτώνται από το συγκεκριμένο περιβάλλον, το φύλο, τη μορφολογία σώματος και τις κινήσεις του χρήστη, καθώς και τον τύπο, την θέση πάνω στο σώμα των κεραιών και τη σχετική θέση κεραιών Rx και Tx. Με τη σειρά τους, αυτοί οι σημαντικοί παράγοντες επηρεάζουν τη μοντελοποίηση του καναλιού καθώς ρυθμίζουν τις συνθήκες που καθορίζουν την διάδοση πάνω στο σώμα: τις διηλεκτρικές παραμέτρους του ανθρώπινου ιστού, τις συνθήκες του καναλιού (οπτική επαφή, μη οπτική επαφή), τις πολλαπλές διαδρομές που προκαλούνται από το περιβάλλον και το σώμα και τελικά τα χαρακτηριστικά των κεραιών. Έτσι, για να λάβουμε υπόψη τόσες πολλές διαφορετικές παραμέτρους, είναι απαραίτητη η στατιστική ανάλυση των μετρήσεων με σκοπό τη μοντελοποίηση του καναλιού πάνω στο σώμα.

Πρόσφατα, οι κατανομές κ - μ , η - μ και α - μ προτάθηκαν ως πιο ευέλικτα μοντέλα για πρακτικά κανάλια διαλείψεων [248], [268]. Αυτά τα γενικά μοντέλα διαλείψεων μοιάζουν πολλά υποσχόμενα για το χαρακτηρισμό των καναλιών διαφορισμού πάνω στο σώμα, καθώς έχουν εξαχθεί με την υπόθεση ενός ανομοιογενούς περιβάλλοντος σκέδασης που έχει ως αποτέλεσμα ένα πιο ακριβές μοντέλο. Αυτές οι κατανομές περιλαμβάνουν ως ειδικές περιπτώσεις ή προσεγγίζουν τις προαναφερθείσες ευρέως γνωστές κατανομές διαλείψεων. Από όσο γνωρίζουμε, μεταξύ αυτών των

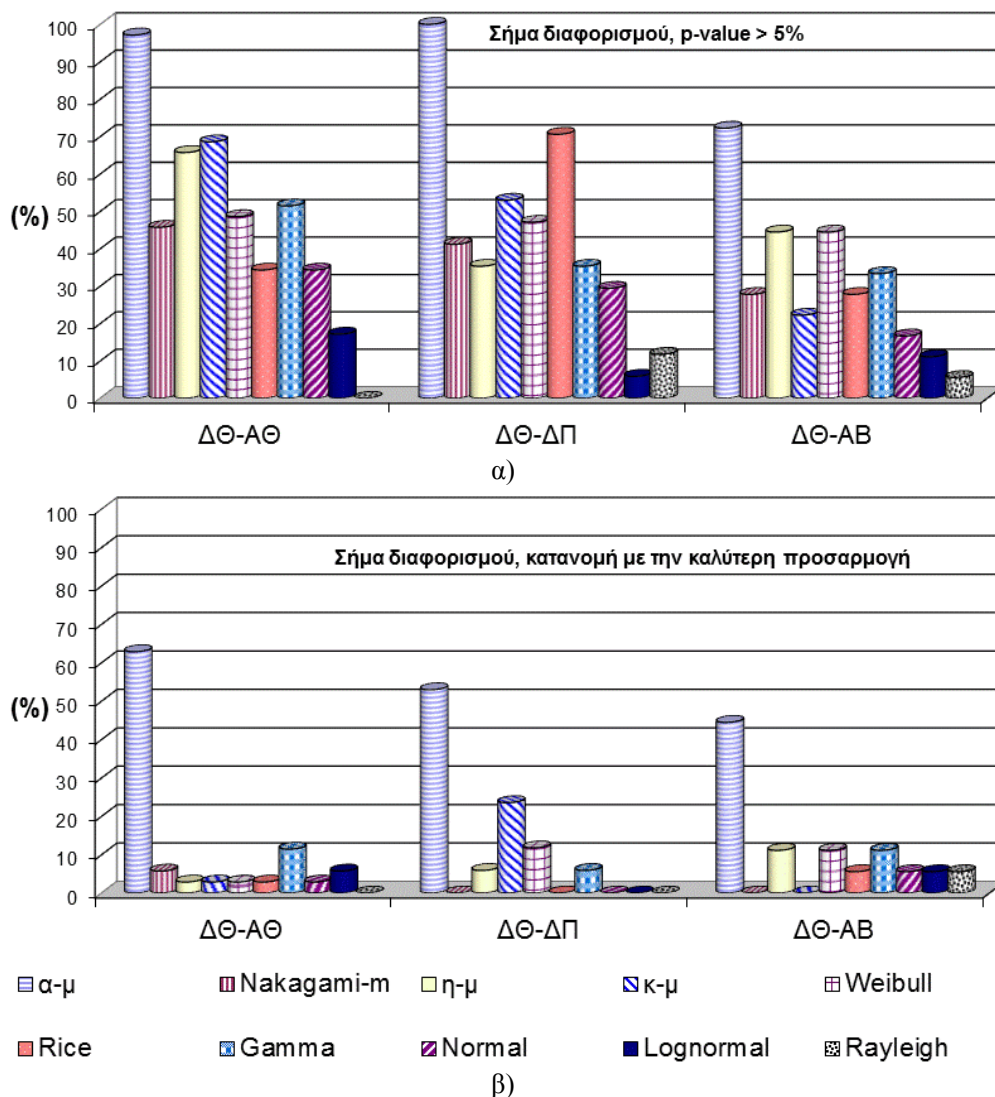
γενικευμένων κατανομών διαλείψεων, μόνο η κ - μ έχει χρησιμοποιηθεί στο [135] για να μοντελοποιήσει το κανάλι σώμα-προς-σώμα. Επιπλέον, καμία από τις προαναφερθείσες γενικευμένες κατανομές δεν έχει ακόμα χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει το κανάλι διαφορισμού πάνω στο σώμα. Το μοντέλο διαλείψεων α - μ δείχνει να είναι πολλά υποσχόμενο για το χαρακτηρισμό των καναλιών διαφορισμού πάνω στο σώμα, καθώς όχι μόνο περιλαμβάνει τις κατανομές Rayleigh, Nakagami- m , και Weibull ως ειδικές περιπτώσεις αλλά επίσης περιγράφει τη lognormal ως οριακή περίπτωση. Επιπλέον, είναι εξαιρετικά ευέλικτη, παρέχοντας τη βέλτιστη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις [268].

6.3.4.1 Προσαρμογή κατανομής και στατιστική ανάλυση πρώτης τάξης

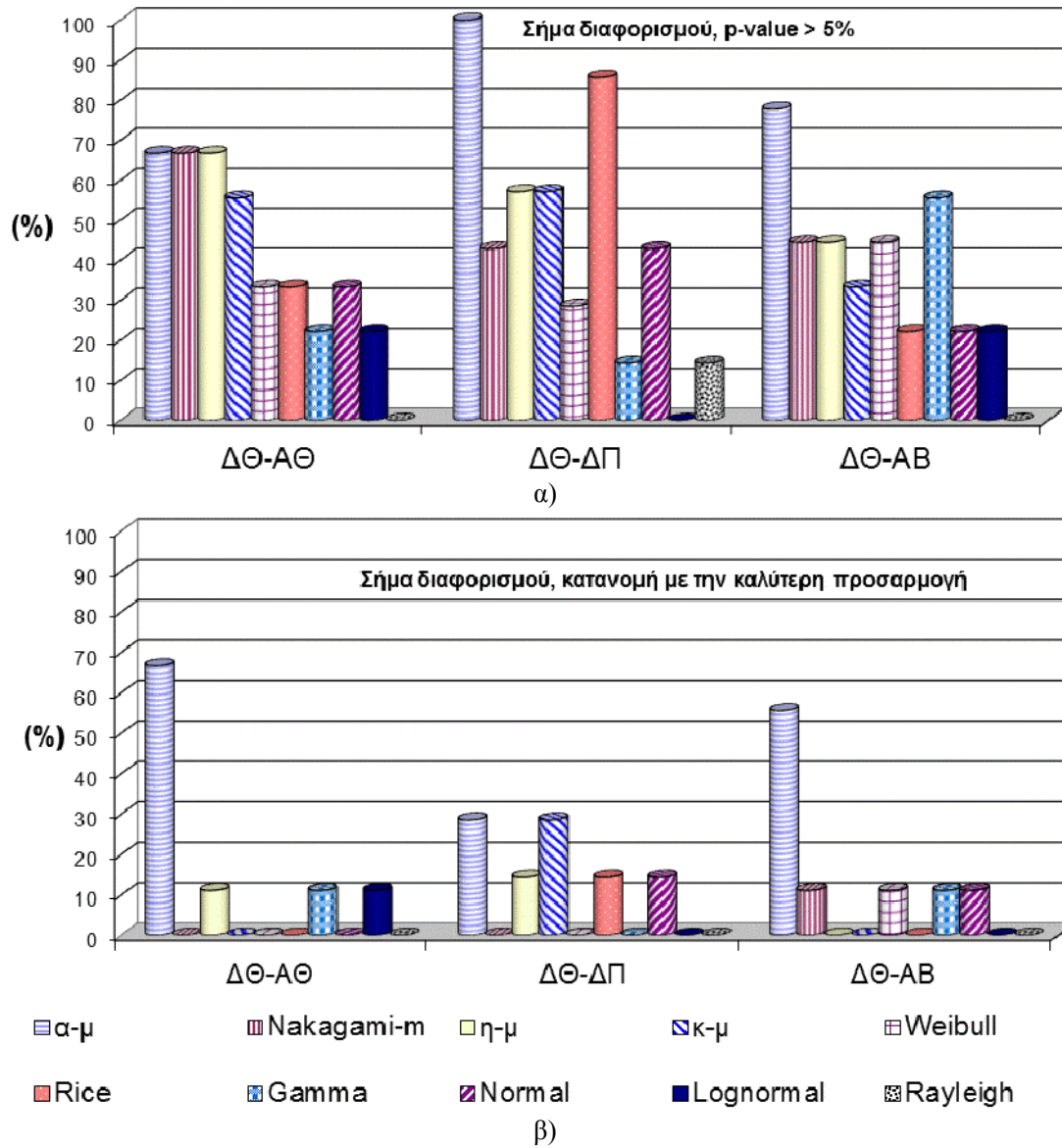
Για να πραγματοποιήσουμε τον έλεγχο προσαρμογής των δεδομένων για κάθε σενάριο μετρήσεων, κάθε εμπειρική CDF των σημάτων διαφορισμού συγκρίνεται με τις κατανομές η - μ , κ - μ και α - μ μαζί με τις ακόλουθες πολύ γνωστές κατανομές διαλείψεων: Rice, Rayleigh, Weibull, normal, lognormal, gamma και Nakagami- m που χρησιμοποιούνται ευρέως για την στατιστική ανάλυση των καναλιών πάνω στο σώμα. Οι εκτιμητρίες παράμετροι των κατανομών Rice, Nakagami- m (m , Ω), η - μ (η , μ) [248], κ - μ (κ , μ) [248] και α - μ (α , μ) [268] προέκυψαν χρησιμοποιώντας εκτίμηση βασισμένη στις ροπές, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2.7.1, ενώ για τις υπόλοιπες κατανομές χρησιμοποιήθηκε εκτίμηση μεγίστης πιθανοφάνειας χρησιμοποιώντας ένα 95% διάστημα εμπιστοσύνης. Για να προσδιορίσουμε την κατανομή με την καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα για κάθε σενάριο μετρήσεων, χρησιμοποιήσαμε τον έλεγχο καλής προσαρμογής Kolmogorov-Smirnov (KS-test) [265]. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, μια θεωρητική κατανομή θεωρείται ότι προσαρμόζει την εμπειρική CDF αν η παράμετρος p-value ισούται ή υπερβαίνει το επίπεδο σημαντικότητας. Σε αυτή τη μελέτη θεωρούμε επίπεδο σημαντικότητας 5%.

Παρατηρήθηκε, ότι κανένα θεωρητικό μοντέλο δεν παρείχε επαρκή προσαρμογή στο σήμα διαλείψεων σε αρκετές περιπτώσεις (π.χ. όταν ο χρήστης περπατούσε σημειωτόν (ΠΣ) για όλες τις θέσεις των Rx κεραιών που έχουμε θεωρήσει και επίσης για το ζεύγος κεραιών ΔΘ-ΔΚ για όλες τις κινήσεις του χρήστη). Αυτό συμβαίνει, εξαιτίας των ασθενών διαλείψεων που παρατηρούνται σε αυτές τις περιπτώσεις.

Συνεπώς, τα αντίστοιχα αποτελέσματα δεν περιλαμβάνονται στην ακόλουθη στατιστική ανάλυση των διαλείψεων του καναλιού διαφορισμού. Για αυτό εστιάζουμε μόνο στα ζεύγη ΔΘ-ΑΘ, ΔΘ-ΔΠ και ΔΘ-ΑΒ και σε κινήσεις που περιλαμβάνουν κίνηση των κεραιών στο περιβάλλον: περπάτημα (Π) και περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών (ΠΚΧ).



Σχήμα 6.25: Ποσοστό των περιπτώσεων που κάθε θεωρητική κατανομή (α) προσέγγιζε τις CDF των σημάτων διαφορισμού με p-value μεγαλύτερο του 5% και (β) παρείχε την καλύτερη προσαρμογή μεταξύ των κατανομών που ελέγχθηκαν για κάθε θέση του ζεύγους κεραιών διαφορισμού για το περπάτημα (Π), χρησιμοποιώντας την τεχνική MRC.



Σχήμα 6.26: Ποσοστό των περιπτώσεων που κάθε θεωρητική κατανομή (α) προσέγγιζε τις CDF των σημάτων διαφορισμού με p-value μεγαλύτερο του 5% και (β) παρείχε την καλύτερη προσαρμογή μεταξύ των κατανομών που ελέγχθηκαν για κάθε θέση του ζεύγους κεραιών διαφορισμού για το περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών, χρησιμοποιώντας την τεχνική MRC.

Ανάμεσα στις κατανομές που εξετάστηκαν, τα ακόλουθα επτά μοντέλα προσάρμοσαν το συνδυασμένο σήμα για την πλειονότητα των σεναρίων: α-μ, κ-μ, η-μ, Nakagami-m, Weibull, Rice και gamma. Τα Σχ. 6.25α και 6.26α δείχνουν το ποσοστό των περιπτώσεων που κάθε θεωρητική κατανομή είχε ως αποτέλεσμα μια p-value υψηλότερη από 5% για το περπάτημα και το περπάτημα χωρίς την κίνηση των χεριών αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας διαφορισμό μεγίστου λόγου (MRC). Αντίστοιχα, τα Σχ. 6.25β και 6.26β παρουσιάζουν το ποσοστό των περιπτώσεων που κάθε μοντέλο είχε

την καλύτερη προσαρμογή ανάμεσα στα υπόλοιπα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τα Σχ. 6.25α και 6.26α, στις περισσότερες περιπτώσεις, πάνω από μια κατανομές προσέγγιζαν τις εμπειρικές CDF των συνδυασμένων σημάτων με μια p-value πάνω από 5%. Επιπλέον, τα 6.25β και 6.26β δείχνουν ότι το μοντέλο α - μ ήταν το καλύτερο στην πλειονότητα των περιπτώσεων.

Όσον αφορά στο περπάτημα, ανάμεσα στις κατανομές που ελέγχθηκαν, η α - μ προσέγγιζε το 91% των σεναρίων και στο 56% των περιπτώσεων ήταν η καλύτερη. Ειδικότερα, όπως παρατηρούμε από το Σχ. 6.25α, προσεγγίζει το 97% του σεναρίου $\Delta\Theta$ -A Θ , το 100% του $\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$ και το 72% $\Delta\Theta$ -AB. Οι κατανομές η - μ και κ - μ ήταν οι δεύτερες καλύτερες προσεγγίζοντας σχεδόν το 53% των περιπτώσεων με p-value που υπερβαίνει το 5%. Οι κατανομές Nakagami- m και Rice, που έχουν πρόσφατα χρησιμοποιηθεί για να περιγράψουν τα κανάλια διαφορισμού πάνω στο σώμα [32], [234], [18], προσεγγίζουν μόνο το 40% και το 41% των περιπτώσεων αντίστοιχα.

Όσον αφορά στο περπάτημα χωρίς κίνηση των χεριών, η κατανομή α - μ προσέγγισε το 80% των σεναρίων και ήταν η καλύτερη στο 52% αυτών. Πιο συγκεκριμένα, το Σχ. 6.26α δείχνει ότι προσεγγίζει το 67%, 100% και 78% των σεναρίων $\Delta\Theta$ -A Θ , $\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$ και $\Delta\Theta$ -AB αντίστοιχα. Η κατανομή η - μ ήταν η δεύτερη καλύτερη προσεγγίζοντας το 56% των περιπτώσεων με p-value που υπερβαίνει το 5%. Τα αντίστοιχα ποσοστά των κατανομών Nakagami- m και Rice ήταν 52% και 44%, με χαμηλότερο p-value από την κατανομή α - μ στις περισσότερες περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα του ελέγχου καλής προσαρμογής, καθώς και τα πολύ καλά χαρακτηριστικά της κατανομής α - μ την καθιστούν την πιο κατάλληλη να μοντελοποιήσει τις περιπτώσεις των συνδυασμένων σημάτων. Συνεπώς, θα προτιμηθεί από τις άλλες κατανομές για την υπόλοιπη στατιστική ανάλυση. Η Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας (PDF) της α - μ κατανομής δίνεται από [268]:

$$f_{\alpha-\mu}(r) = \frac{\alpha\mu^\mu r^{\alpha\mu-1}}{\hat{r}^{\alpha\mu}\Gamma(\mu)} \exp\left\{-\mu \frac{r^\alpha}{\hat{r}^\alpha}\right\}, \quad \alpha > 0 \quad (6.23)$$

όπου $\alpha > 0$ και $\mu > 0$ είναι οι παράμετροι της κατανομής, $\hat{r} = \sqrt[\alpha]{\mathbb{E}(r^\alpha)}$ είναι η α -root μέση τιμή με το $\mathbb{E}(\cdot)$ να συμβολίζει την προσδοκία και $\Gamma(\cdot)$ είναι η συνάρτηση

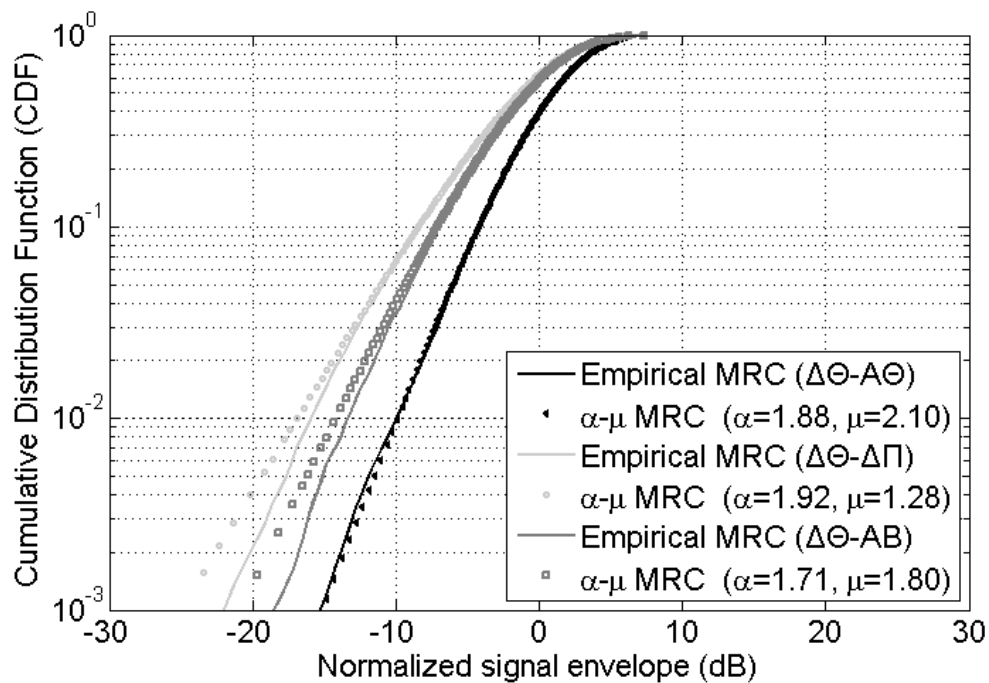
gamma. Οι εκτιμήτριες που βασίζονται στη ροπή για τις παραμέτρους α , μ και \hat{r} προκύπτουν ως λύση του ακόλουθου συστήματος εξισώσεων [268]:

$$\frac{\Gamma^2(\mu+1/\alpha)}{\Gamma(\mu)\Gamma(\mu+2/\alpha)-\Gamma^2(\mu+1/\alpha)} = \frac{\mathbb{E}^2(r)}{\mathbb{E}(r^2)-\mathbb{E}^2(r)} \quad (6.24)$$

$$\frac{\Gamma^2(\mu+2/\alpha)}{\Gamma(\mu)\Gamma(\mu+4/\alpha)-\Gamma^2(\mu+2/\alpha)} = \frac{\mathbb{E}^2(r^2)}{\mathbb{E}(r^4)-\mathbb{E}^2(r^2)} \quad (6.25)$$

$$\hat{r} = \frac{\mu^{1/a}\Gamma(\mu)\mathbb{E}(r)}{\Gamma(\mu+1/a)} \quad (6.26)$$

Από τη στιγμή που η λύση του συστήματος αυτού δεν μπορεί να προκύψει σε κλειστή μορφή, οποιοδήποτε από τα σύγχρονα ολοκληρωμένα μαθηματικά λογισμικά πακέτα, όπως είναι το Matlab, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση μιας αριθμητικής λύσης με ένα υπολογιστικά αποδοτικό τρόπο.



Σχήμα 6.27: Εμπειρικές και αντίστοιχες θεωρητικές α - μ CDF για τα συνδυασμένα σήματα (MRC) ανά θέση του ζεύγους κεραιών διαφορισμού για όλες τις κινήσεις του χρήστη.

Στο Σχ. 6.27 παρουσιάζονται οι εμπειρικές CDF των σημάτων διαφορισμού MRC μαζί με τα αντίστοιχα μοντέλα α - μ , συμπεριλαμβάνοντας όλες τις κινήσεις του χρήστη για κάθε θέση του ζεύγους των κεραιών. Όπως μπορεί κανείς να δει, η κατανομή α - μ προσεγγίζει πολύ καλά τις εμπειρικές CDF των σημάτων διαφορισμού.

Για να εμβαθύνουμε περισσότερο, οι αντίστοιχες εκτιμήτριες παράμετροι για κάθε μοντέλο καναλιού για τα επιλεγμένα σενάρια και τεχνικές διαφορισμού παρουσιάζονται στον πίνακα 6.8.

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.8 ΕΚΤΙΜΗΤΡΙΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ $\alpha - \mu$ (α, μ, \hat{r}) ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ

Σενάρια διαφορισμού	Τεχνική διαφορισμού	K-S statistic	Εκτιμήτριες παράμετροι για την κατανομή α - μ		
			α	μ	\hat{r}
$\Delta\Theta$ - $A\Theta$ / Π	SC	0.008	$\alpha=1.45$	$\mu=3.03$	$\hat{r}=1.08$
	EGC	0.004	$\alpha=2.08$	$\mu=1.91$	$\hat{r}=1.16$
	MRC	0.006	$\alpha=1.88$	$\mu=2.20$	$\hat{r}=1.25$
$\Delta\Theta$ - $A\Theta$ / ΠΚΧ	SC	0.017	$\alpha=1.49$	$\mu=2.36$	$\hat{r}=0.97$
	EGC	0.007	$\alpha=2.61$	$\mu=1.23$	$\hat{r}=1.02$
	MRC	0.009	$\alpha=1.85$	$\mu=1.97$	$\hat{r}=1.09$
$\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$ / Π	SC	0.008	$\alpha=2.38$	$\mu=0.86$	$\hat{r}=0.97$
	EGC	0.010	$\alpha=2.32$	$\mu=1.12$	$\hat{r}=0.76$
	MRC	0.010	$\alpha=2.24$	$\mu=1.01$	$\hat{r}=0.97$
$\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$ / ΠΚΧ	SC	0.016	$\alpha=1.99$	$\mu=1.16$	$\hat{r}=1.08$
	MRC	0.018	$\alpha=1.86$	$\mu=1.40$	$\hat{r}=1.07$
$\Delta\Theta$ - AB / Π	SC	0.011	$\alpha=2.08$	$\mu=1.06$	$\hat{r}=1.05$
	EGC	0.008	$\alpha=2.26$	$\mu=1.24$	$\hat{r}=0.91$
	MRC	0.010	$\alpha=1.97$	$\mu=1.31$	$\hat{r}=1.07$
$\Delta\Theta$ - AB / ΠΚΧ	EGC	0.014	$\alpha=2.10$	$\mu=1.53$	$\hat{r}=0.94$

*Π: κανονικό περπάτημα, ΠΚΧ: περπάτημα χωρίς κίνηση χεριών.

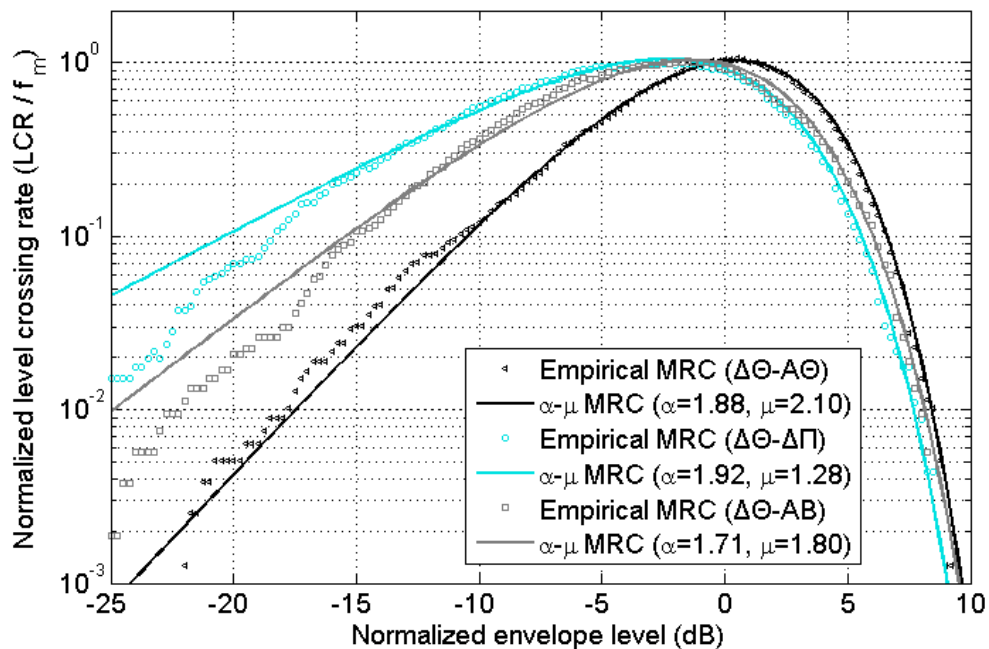
* $\Delta\Theta$: δεξιός θώρακας, $A\Theta$: αριστερός θώρακας, $\Delta\Pi$: δεξιά πλάτη, AB : αριστερός βραχίονας.

6.3.4.2 Στατιστική ανάλυση δεύτερης τάξης

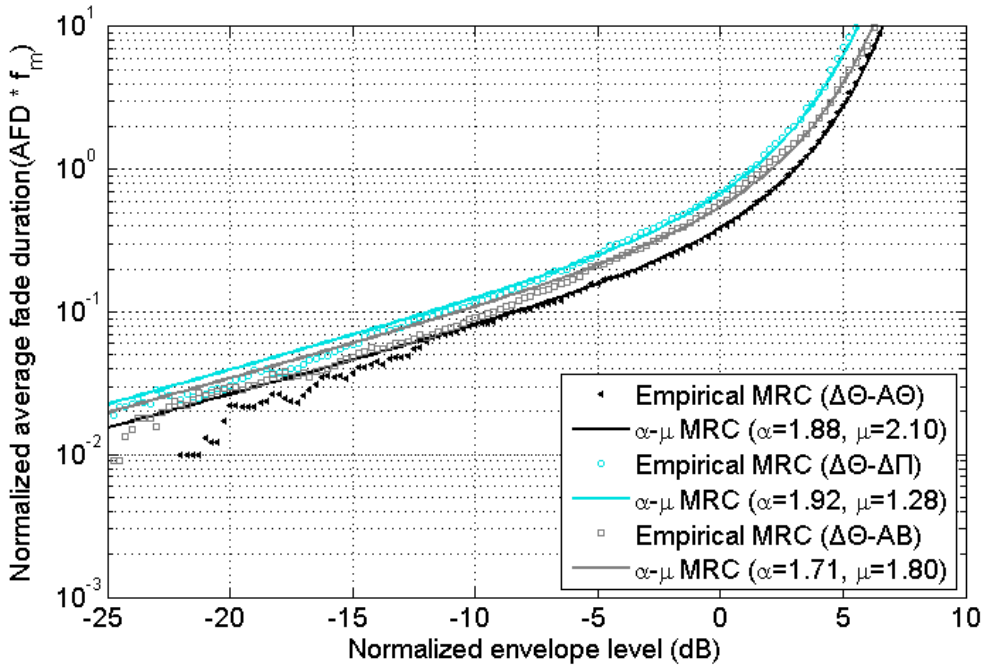
Η χρήση του διαφορισμού αντιμετωπίζει τις βαθιές διαλείψεις και ως αποτέλεσμα, ο ρυθμός των διελεύσεων και η διάρκεια των διαλείψεων μειώνονται χάρη στο σήμα διαφορισμού. Η βελτίωση που προσφέρεται από το διαφορισμό ποσοτικοποιείται από το κέρδος διαφορισμού αλλά μπορεί επίσης να εκτιμηθεί και από το Ρυθμό Διέλευσης Στάθμης (LCR) και τη Μέση Διάρκεια Διαλείψεων (AFD). Η στατιστική ανάλυση

δεύτερης τάξης, η μελέτη δηλαδή των LCR και AFD, είναι χρήσιμη σε πρακτικές εφαρμογές, όπου η βελτίωση της ποιότητας κωδικοποίησης του σήματος και η ελαχιστοποίηση των πιθανών σφαλμάτων είναι απαραίτητες. Στην ακόλουθη ανάλυση, παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνο για το MRC καθώς προσφέρει την καλύτερη απόδοση μεταξύ όλων [36]. Παρόλα αυτά τα συμπεράσματα μπορούν να επεκταθούν και για τις υπόλοιπες τεχνικές διαφορισμού που εξετάστηκαν.

Για να εκτιμήσουμε τις εμπειρικές τιμές των LCR και AFD από τα συνδυασμένα σήματα, τα επίπεδα των διαλείψεων επιλέχθηκαν με βάση εύρος των κανονικοποιημένων δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα βήμα 0.5 dB. Οι πειραματικές τιμές των LCR και AFD κανονικοποιήθηκαν ως προς την μέγιστη συχνότητα Doppler f_m για να εξαλείψουμε την εξάρτηση από την ταχύτητα κίνησης. Η τιμή της μέγιστης συχνότητας Doppler f_m για κάθε σενάριο υπολογίστηκε από το LCR χρησιμοποιώντας μια ανάλυση ελαχίστων τετραγώνων υπό την υπόθεση ότι το συνδυασμένο σήμα διαλείψεων ακολουθεί κατανομή α - μ .



Σχήμα 6.28: Εμπειρικές και οι αντίστοιχες θεωρητικές α - μ LCR καμπύλες, για τα ζεύγη κεραίων διαφορισμού ΔΘ-ΑΘ, ΔΘ-ΔΠ, και ΔΘ-ΔΚ για όλες τις κινήσεις του χρήστη χρησιμοποιώντας MRC.



Σχήμα 6.29: Εμπειρικές και οι αντίστοιχες θεωρητικές α - μ AFD καμπύλες, για τα ζεύγη κεραιών διαφορισμού $\Delta\Theta$ - $\Delta\Theta$, $\Delta\Theta$ - $\Delta\Pi$, και $\Delta\Theta$ - $\Delta\kappa$ για όλες τις κινήσεις του χρήστη χρησιμοποιώντας MRC.

Οι θεωρητικές τιμές των LCR και AFD υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας εκφράσεις κλειστής μορφής άμεσα διαθέσιμες από την τεχνική βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα για ένα σενάριο διαλείψεων α - μ , τα LCR και AFD μπορούν να εκφραστούν σε κλειστή μορφή ως εξής [268]:

$$\text{LCR: } N_{\alpha-\mu}(\rho) = \frac{\sqrt{2\pi} f_m \mu^{\mu-0.5} \rho^{\alpha(\mu-0.5)}}{\Gamma(\mu) \exp(\mu\rho^\alpha)} \quad (6.27)$$

$$\text{AFD: } T_{\alpha-\mu}(\rho) = \frac{\Gamma(\mu, \mu\rho^\alpha) \exp(\mu\rho^\alpha)}{\sqrt{2\pi} f_m \mu^{\mu-0.5} \rho^{\alpha(\mu-0.5)}} \quad (6.28)$$

όπου $\rho = r / \hat{r}$ είναι το κανονικοποιημένο επίπεδο πλάτους/περιβάλλουσας και $\Gamma(\cdot, \cdot)$ είναι η μη ολοκληρωμένη συνάρτηση gamma που ορίζεται ως $\Gamma(a, b) = \int_0^b x^{a-1} \exp(-x) dx$ [268]. Τα θεωρητικά LCR και AFD υπολογίστηκαν

χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες παραμέτρους της α - μ όπως φαίνονται στον πίνακα 6.5 για κάθε σενάριο.

Τα εμπειρικά LCR των συνδυασμένων κατά MRC σημάτων για κάθε θέση του ζεύγους κεραιών διαφορισμού παρουσιάζονται στο Σχ. 6.28, μαζί με τα θεωρητικά LCR για την κατανομή α - μ κανονικοποιημένη κατά f_m (δηλ. LCR/f_m). Όπως είναι αναμενόμενο, ο αριθμός των διελεύσεων μειώνεται στα άκρα του εύρους τιμών του σήματος, ενώ φτάνει στη μέγιστη τιμή γύρω στα 0 dB του σήματος. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα LCR της θεωρητικής α - μ παρείχαν καλή προσέγγιση για τα εμπειρικά LCR ειδικότερα για επίπεδα κατωφλίου μεγαλύτερα από -15 dB. Παρόλα αυτά, από το Σχ. 6.28, μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι οι εμπειρικές τιμές του LCR για τα ζεύγη κεραιών ΔΘ-ΔΠ και ΔΘ-ΑΒ αποκλίνουν από τις θεωρητικές τιμές για διαλείψεις κάτω από -15 dB. Πιο συγκεκριμένα, οι θεωρητικές καμπύλες φαίνεται να υπερεκτιμούν τις εμπειρικές LCR. Από την άλλη, μια πολύ ακριβής προσέγγιση επιτυγχάνεται για τα ζεύγη κεραιών ΔΘ-ΑΘ σε όλο το εύρος των τιμών του σήματος διαλείψεων. Συγκρίνοντας τα τρία διαφορετικά ζεύγη κεραιών Rx, οι εμπειρικές τιμές των LCR είναι περίπου ίδιες γύρω από τα 0 dB, ενώ αποκλίνουν σημαντικά για χαμηλότερα επίπεδα σήματος. Σε γενικές γραμμές, για επίπεδα διαλείψεων κάτω από περίπου 0 dB, ο ρυθμός διέλευσης στάθμης είναι υψηλότερος για το ζεύγος κεραιών ΔΘ-ΔΠ, ενώ για επίπεδα διαλείψεων πάνω από 0 dB ο ρυθμός διέλευσης στάθμης είναι υψηλότερος για τη θέση κεραιών ΔΘ-ΑΘ. Παρόλα αυτά, πάνω από 0 dB μόνο μικρές διαφορές παρατηρούνται μεταξύ των σεναρίων που παρουσιάστηκαν.

Συνεχίζοντας την έρευνα για τα στατιστικά δεύτερης τάξης, οι εμπειρικές καμπύλες AFD απεικονίζονται στο Σχ. 6.29 για τα ίδια σενάρια διαφορισμού όπως και για τα LCR, μαζί με τα θεωρητικά AFD για την κατανομή α - μ κανονικοποιημένα ως προς f_m (δηλ. $AFD \cdot f_m$). Όπως παρατηρείται από τις καμπύλες AFD, η διάρκεια των διαλείψεων βαθμιαία αυξάνεται για υψηλότερα επίπεδα σήματος, κάτι που είναι πλήρως αναμενόμενο. Όπως απεικονίζεται στο Σχ. 6.29, παρατηρείται μια πολύ καλή συμφωνία μεταξύ των εμπειρικών και θεωρητικών AFD για το ζεύγος κεραιών ΔΘ-ΔΠ. Για τις θέσεις των κεραιών ΔΘ-ΑΘ και ΔΘ-ΑΒ και κατώφλια κάτω από -15 dB και -10 dB αντίστοιχα, παρατηρείται κάποια απόκλιση αλλά και πάλι επιτυγχάνεται μια αποδεκτή προσέγγιση. Τέλος, όπως φαίνεται στο Σχ. 6.29, για τις θέσεις των κεραιών ΔΘ-ΔΠ οι διαλείψεις διαρκούν για μεγαλύτερο διάστημα για όλες

τις τιμές του σήματος, ενώ για το ζεύγος κεραιών ΔΘ-ΑΘ οι διαλείψεις είναι συντομότερες.

6.3.4.3 Σύνοψη και συμπεράσματα

Σε αυτή την παράγραφο πραγματοποιήσαμε το στατιστικό χαρακτηρισμό ενός καναλιού διπλού διαφορισμού πάνω στο σώμα για τρεις βασικές τεχνικές διαφορισμού (SC, EGC και MRC). Βασισμένοι σε διεξοδικές μετρήσεις σήματος για διαφορετικές θέσεις κεραιών Rx και κινήσεις χρήστη, πραγματοποιήσαμε μια ενδελεχή στατιστική ανάλυση συγκρίνοντας τα συνδυασμένα σήματα με διάφορα θεωρητικά μοντέλα κατανομών. Για την πλειονότητα των επιλεγμένων σεναρίων μετρήσεων, η κατανομή α - μ παρείχε μια πολύ καλή προσαρμογή στα εμπειρικά δεδομένα. Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα εμπειρικά LCR και AFD για τα επιλεγμένα σενάρια διαφορισμού. Αυτά τα στατιστικά μεγέθη δεύτερης τάξης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα θεωρητικά, που προέκυψαν χρησιμοποιώντας αναλυτικές εκφράσεις για τα στατιστικά δεύτερης τάξης της κατανομής α - μ . Βρέθηκε ότι τα εμπειρικά LCR και AFD είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα θεωρητικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προσεγγίστηκε η περιοχή των ασυρμάτων συστημάτων πολλαπλών κεραιών για επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα, ως εξής:

- ❖ Πραγματοποιήθηκε εκτενής μελέτη της επίδραση του σώματος του χρήστη στην απόδοση ενός τερματικού MIMO.
- ❖ Σχεδιάστηκαν, μοντελοποιήθηκαν, υλοποιήθηκαν και μετρήθηκαν πειραματικά πρωτότυπα φορετών κεραιών.
- ❖ Αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία μετρήσεων, με σκοπό τη μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης πάνω στο σώμα.
- ❖ Αναπτύχθηκε κατάλληλη μεθοδολογία μετρήσεων με σκοπό την ανάλυση απόδοσης του καναλιού διαφορισμού πάνω στο σώμα και τη μοντελοποίηση του.

Αρχικά, μοντελοποιήθηκε ένα ασύρματο τερματικό MIMO με τέσσερις επίπεδες κεραιές ανεστραμμένου-F (PIFA), με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της παρουσίας του χεριού και του σώματος του χρήστη στις επιδόσεις του συστήματος για τη συχνότητα των 1800 MHz. Σε πρώτη φάση, εξετάστηκε η επίδραση του χεριού του χρήστη, ενώ στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση όλου του σώματος, μέσω προσομοιώσεων. Η επίδραση αυτή μελετήθηκε για ένα μοντέλο προσομοίωσης τηλεπικοινωνιακού καναλιού βασισμένο σε πίνακες συσχέτισης. Στον υπολογισμό των μεγεθών του καναλιού χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα ακτινοβολίας των κεραιών του τερματικού που προέκυψαν από προσομοίωση. Τέλος, έγινε σύγκριση των επιδόσεων του συστήματος ενός τερματικού MIMO με ένα σύστημα πολλαπλών φορετών κεραιών. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι τα εξής:

- Αξιολογήθηκε η χωρητικότητα συστημάτων MIMO που περιλαμβάνουν τερματικά και βρέθηκε ότι η απόδοση του συστήματος μπορεί να υποβιβαστεί από 10% μέχρι και 60% εξαιτίας της παρουσίας του ανθρώπινου σώματος.
- Πραγματοποιήθηκε σύγκριση της απόδοσης φορετών κεραιών και τερματικών MIMO και διαπιστώθηκε ότι έχουμε κέρδος από τη χρήση φορετών κεραιών, αν ο αριθμός των κεραιών είναι περιοριστικός για ένα τερματικό ή όταν το τερματικό παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερη συσχέτιση από το σύστημα των φορετών κεραιών.

Στη συνέχεια της εργασίας, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν τρία είδη φορετών κεραιών με υφασμάτινο υπόστρωμα τσόχας στα 2.45 GHz. Διερευνήθηκε το είδος του αγώγιμου υλικού, το είδος της τροφοδοσίας και το είδος του διαγράμματος ακτινοβολίας. Εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η χρήση ομοαξονικής τροφοδοσίας και η τροφοδοσία μικροταινίας οδήγησαν σε κεραιές σταθερές και αξιόπιστες σε πιθανή καμπύλωση της κατασκευής τους. Ιδιαίτερα η χρήση ομοαξονικής τροφοδοσίας πρόσφερε στην κεραία μεγάλη σταθερότητα.
- Η χρήση του αγώγιμου υφάσματος “Conductive Aluminum Laminated Fabric” για την υλοποίηση του ακτινοβολούντος καλύμματος και του επιπέδου γείωσης της κεραίας ήταν εξίσου αποδοτική με τη χρήση φύλλων χαλκού, κάτι που είναι πολύ σημαντικό για την κατασκευή μιας φορετής κεραίας, που πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφριά και ευλύγιστη.

Τέλος, ασχοληθήκαμε με τη μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης πάνω στο ανθρώπινο σώμα και με την ανάλυση απόδοσης και μοντελοποίηση του καναλιού διαφορισμού πάνω στο σώμα. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Πραγματοποιήθηκε μια στατιστική μελέτη πρώτης τάξης του καναλιού του σώματος και προέκυψε ότι το θεωρητικό μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα το απλό κανάλι σε περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις είναι η κατανομή lognormal, ενώ σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών η Weibull.
- Αξιολογήθηκε η μέση χωρητικότητα του καναλιού και διαπιστώθηκε ότι στην περίπτωση μιας εφαρμογής πάνω στο σώμα απαιτητικής σε χωρητικότητα, ακόμα και μια θέση NLOS είναι προτιμότερη από τη θέση στον καρπό του χεριού, αν υπάρχει κίνηση των χεριών.

- Σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε διάταξη μετρήσεων διαφορισμού.
- Μελετήθηκε η απόδοση του καναλιού χωρικού διαφορισμού του σώματος με κριτήριο το κέρδος διαφορισμού και διαπιστώθηκε ότι έχουμε κέρδος από τη χρήση διαφορισμού όταν τα σήματα στους κλάδους διαφορισμού είναι ασυσχέτιστα, με συγκρίσιμες μέσες τιμές ισχύος αλλά υπάρχουν και διαλείψεις, ενώ το κέρδος διαφορισμού είναι πιο υψηλό σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών σε σχέση με ένα περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις.
- Από την οπτική της υλοποίησης συστημάτων διαφορισμού, έγινε σύγκριση των διαφορετικών τεχνικών διαφορικού συνδυασμού των σημάτων και προέκυψε ότι ακόμα και η πιο απλή τεχνική (SC) μας δίνει το 83% της απόδοσης της βέλτιστης τεχνικής (MRC).
- Πραγματοποιήθηκε στατιστική μελέτη πρώτης τάξης του καναλιού διαφορισμού και βρέθηκε ότι το θεωρητικό μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα το απλό κανάλι σε περιβάλλον χωρίς ανακλάσεις είναι η κατανομή lognormal, ενώ σε περιβάλλον πολλαπλών διαδρομών καλύτερη είναι η κατανομή α - μ .

7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Τα προαναφερθέντα συμπεράσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως αφετηρία για μελλοντικές κατευθύνσεις και επέκταση της έρευνας των συστημάτων πολλαπλών κεραιών για επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα. Προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις:

- Η μελέτη κατά την πορεία της διατριβής, ειδικότερα στο πρώτο μέρος της, εστίασε στην επίδραση του χρήστη στην απόδοση συστημάτων τερματικών MIMO, μέσω προσομοιώσεων. Αξιοποιώντας τη μελέτη αυτή, θα μπορούσαμε να την επεκτείνουμε, πραγματοποιώντας μετρήσεις με κάποιο ανθρώπινο ομοίωμα ή εθελοντή για την εξαγωγή πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων. Επιπλέον, καθώς είναι δυνατή η εισαγωγή μοντέλων από σχεδιαστικά προγράμματα, όπως το Poser και το MakeHuman.org, όπου μπορούμε να μοντελοποιήσουμε τον άνθρωπο σε διάφορες στάσεις και κινήσεις ή ακόμα και μέρη του σώματος με μεγάλη ευκολία, στα μοντέλα ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης (όπως το CST Microwave Studio) θα μπορούσαμε να

μελετήσουμε την επίδραση του χρήστη σε διάφορες στάσεις ή και στην ακολουθία μιας κίνησης [158]. Η επίδραση του χεριού του χρήστη αναμένεται να είναι μεγαλύτερη σε αυτού του είδους τις κεραίες, καθώς, ανάλογα με τη θέση κρατήματος, ενδέχεται να καλύπτεται πλήρως η κεραία με σημαντικό υποβιβασμό της απόδοσής της. Η πιο λεπτομερής και ρεαλιστική μελέτη της επίδρασης του χρήστη αναμένεται να συμβάλει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού ασύρματων τερματικών και συστημάτων MIMO. Τέλος, αξιοποιώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων και των προσομοιώσεων, θα μπορούσαμε να μοντελοποιήσουμε το σύνθετο κανάλι που περιλαμβάνει τις κεραίες και το σώμα του χρήστη. Μια παρόμοια μελέτη πραγματοποιείται στο [226].

- Όσον αφορά στο σχεδιασμό και την υλοποίηση φορητών κεραιών, είναι πολλά τα θέματα όπου μπορεί να επεκταθεί η έρευνα. Ο πρώτος από τους μελλοντικούς μας στόχους είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας φορητής κεραίας που θα ενσωματωθεί σε συστήματα MIMO. Οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τις συμβατικές κεραίες συνήθως αναφέρονται σε συνθήκες ελεύθερου χώρου. Ωστόσο, όταν η κεραία βρίσκεται τόσο κοντά σε μέσο με υψηλές απώλειες, όπως είναι οι ιστοί του ανθρώπινου σώματος, η λειτουργία της αλλάζει σημαντικά και αυτές οι παράμετροι πρέπει να επαναπροσδιοριστούν. Όπως έχουμε δει, η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων πάνω στο σώμα γίνεται, είτε με απευθείας ζεύξη LOS, είτε με σκέδαση από τα μέρη του σώματος, είτε μέσω του σώματος, είτε μέσω επιφανειακών κυμάτων. Στη συχνότητα των 2.45 GHz που μελετήσαμε, η διάδοση μέσα από το σώμα είναι αμελητέα. Συνεπώς, είναι σημαντικό η κεραία που θα υλοποιήσουμε να εκπέμπει το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας, παράλληλα με την επιφάνεια του σώματος. Επιπλέον, πρέπει να αποφευχθεί η ύπαρξη οπίσθιας ακτινοβολίας, για να μετριάσουμε τις απώλειες απορρόφησης, αλλά και για να θωρακίσουμε το χρήστη. Όλες αυτές οι απαιτήσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την κατασκευή της φορητής κεραίας, ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστη, ανθεκτική και αποδοτική. Αρχικά, θα μπορούσε να διερευνηθεί η επίδραση διαφόρων μεταβολών στη μορφή της κεραίας, π.χ. κάμψη, τσάκιση, στα χαρακτηριστικά ακτινοβολίας της, ώστε να είναι πιο ανθεκτική και σταθερή στην λειτουργία της. Ο σκοπός μιας φορητής κεραίας

είναι να ενσωματωθεί στο ρουχισμό του χρήστη, όποτε μια πιθανή αλλαγή στην καμπύλωσή της είναι αναμενόμενη και λογική, αφού η επιφάνεια πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί (ανθρώπινο σώμα) δεν είναι επίπεδη, ούτε ακίνητη. Επιπλέον, ενδιαφέρον θα είχε η χρήση και σύγκριση διαφόρων αγώγιμων υφασμάτων για την υλοποίηση του ακτινοβόλου patch και του επιπέδου γείωσης. Η διερεύνηση διαφορετικών υφασμάτων θα μπορούσε να βοηθήσει στη βελτίωση των λειτουργικών παραμέτρων της κεραίας, όπως π.χ. το εύρος ζώνης συχνοτήτων. Μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της συμπεριφοράς φορετών κεραιών που ενσωματώνονται στον ρουχισμό, όταν τα συγκεκριμένα ρούχα πλυθούν. Για το λόγο αυτό, θα μπορούσαν να επιλεγούν υφάσματα για την υλοποίηση της κεραίας, που θα μπορούν να πλένονται. Έτσι, οι κεραίες αυτές θα είναι πιο πρακτικές και ανθεκτικές. Ενδιαφέρουσα θα ήταν η μελέτη και κατασκευή φορετών κεραιών, που θα παρουσιάζουν κυκλική πόλωση [176], [178]. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές όπως π.χ. η χρήση πιο πολύπλοκου τρόπου τροφοδοσίας των κεραιών ή η εφαρμογή τροφοδοσίας με γραμμή μικροταινίας μετατοπισμένης ως προς το κέντρο της δομής τους.

- Ένα άλλο θέμα, στο οποίο μπορεί να επεκταθεί η έρευνά μας, είναι η διερεύνηση διαφορετικών μεθόδων τροφοδοσίας φορετών κεραιών. Θα είχε ενδιαφέρον να εξετάσουμε το αν θα μπορούσαμε να αντικαταστήσουμε την ομοαξονική σύνδεση με κάποια άλλου είδους σύνδεση πιο φιλική προς το χρήστη, όπως αυτή που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.3.6.4 [215].
- Στα πλαίσια της διατριβής αναλύσαμε την απόδοση του διαφορισμού χώρου μέσω μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα 2.45 GHz. Η μελέτη μας αυτή μπορεί να επεκταθεί σε μετρήσεις για διάφορους τύπους ανθρώπου, διαφορετικές κεραίες και τοποθετήσεις πάνω στο σώμα, κινήσεις του χρήστη κ.α., ώστε να γίνει ακόμα πιο ολοκληρωμένη.
- Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση του καναλιού SISO και του καναλιού διαφορισμού πάνω στο σώμα. Μελλοντικά, μπορούμε να επεκτείνουμε τη μελέτη μας και σε συστήματα MIMO. Αρχικά, θα μπορούσε να επεκταθεί σε ένα σύστημα MIMO 2x2 και στην πορεία να προχωρήσουμε σε περισσότερες κεραίες, όπου η διαδικασία των μετρήσεων γίνεται πιο

πολύπλοκη. Για την πραγματοποίηση μετρήσεων MIMO, π.χ. 2x2, απαιτείται μια διάταξη με ένα VNA με τέσσερις θύρες, ή η χρήση μεταγωγέων για τη σύνδεση των κεραιών στο δίθυρο VNA ή ο σχεδιασμός και η υλοποίηση διάταξης ή πλατφόρμας μετρήσεων με τη χρήση ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (DSP) [33], [75].

Βιογραφικά στοιχεία

Η Ασημίνα Π. Μιχαλοπούλου γεννήθηκε στις 5 Ιουλίου 1982 στην Αθήνα. Αποφοίτησε από το 2^ο Ενιαίο Λύκειο Αιγίου το 2000 με γενικό βαθμό απολυτηρίου «Άριστα» (19,8). Το ίδιο έτος εισήχθη στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, όπου και ολοκλήρωσε τις σπουδές της το Φεβρουάριο του 2006 με βαθμό διπλώματος «Λίαν Καλώς» (7,42). Από τη διπλωματική της εργασία με τίτλο «Η χρήση συναρτήσεων βάσης ολικού πεδίου (entire-domain) σε ολοκληρωτικές εξισώσεις για γραμμικές κεραίες τύπου Hallén και Rocklington» προέκυψαν δυο δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και μια δημοσίευση στα πρακτικά διεθνούς επιστημονικού συνεδρίου.

Τον Δεκέμβριο του 2006 έγινε δεκτή ως Υποψήφια Διδάκτωρ στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με γνωστικό αντικείμενο «Εξυπνες Κεραίες και Συστήματα Πολλαπλών Εισόδων – Πολλαπλών Εξόδων (MIMO)». Παράλληλα, από το Δεκέμβριο του 2006, είναι Υπότροφος Μεταπτυχιακή Υποψήφια Διδάκτωρ (ΥΜΥΔ) στο Ινστιτούτο Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» και μέλος του Εργαστηρίου Ασύρματων Επικοινωνιών του Ινστιτούτου.

Στα πλαίσια της εκπόνησης της διατριβής της συμμετείχε ενεργά στο ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα “Antenna Centre of Excellence” (ACE II). Στα πλαίσια του ACE II συμμετείχε ως μέλος της ερευνητικής ομάδας του Ινστιτούτου Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» στη διεξαγωγή μετρήσεων στο πανεπιστήμιο UPM (Μαδρίτη), με σκοπό τη σύνταξη τεχνικής αναφοράς σχετικά με την αξιολόγηση της απόδοσης ενός συστήματος MIMO. Επιπλέον, παρακολούθησε το θερινό σχολείο «MIMO Communication Systems and Antennas», που πραγματοποιήθηκε στο πανεπιστήμιο ΚΤΗ (Στοκχόλμη) στα πλαίσια του European School of Antennas (ESoA). Από το Φεβρουάριο έως τον Ιούλιο του 2008 ήταν επισκέπτρια υπότροφος στο Electrosience Lab του Ohio State University (Οχάιο), όπου συμμετείχε στο ερευνητικό πρόγραμμα “Body Wearable Diversity Antenna Systems”. Παράλληλα, υπήρξε ενεργό μέλος του Εργαστηρίου Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών της ΣΗΜΜΥ-ΕΜΠ, αποκομίζοντας σημαντική διδακτική εμπειρία

κατά την επικουρική διδασκαλία του εργαστηρίου Μικροκυμάτων για 3 συνολικά εξάμηνα.

Τα ερευνητικά ενδιαφέροντα της κ. Μιχαλοπούλου κινούνται στην περιοχή των ασύρματων τηλεπικοινωνιών και εστιάζουν στα ασύρματα συστήματα πολλαπλών κεραιών και στις επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα (body-centric communications). Στα πλαίσια της διατριβής της, ασχολήθηκε με την ανάπτυξη, την αξιολόγηση επιδόσεων και τη μοντελοποίηση συστημάτων πολλαπλών κεραιών για επικοινωνίες με επίκεντρο το ανθρώπινο σώμα.

Η Α. Μιχαλοπούλου, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής της έχει λάβει μέρος σε διεθνή συνέδρια, στα οποία παρουσίασε το ερευνητικό της έργο και δημοσίευσε τις εργασίες της στα πρακτικά τους. Έχει δημοσιεύσει εργασίες της στα διεθνή επιστημονικά περιοδικά IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility (TEC), IEEE Transactions on Antennas and Propagation (TAP) και IET Microwaves, Antennas and Propagation (MAP).

Τέλος, η Α. Μιχαλοπούλου είναι μέλος του Τεχνικού Επιμελητηρίου της Ελλάδος (ΤΕΕ).

Βιβλιογραφία

- [1] C. Baber, J. Knight, D. Haniff and L. Cooper, "Ergonomics of Wearable Computers," *Mobile Networks and Applications*, vol. 4, pp. 15-21, 1999.
- [2] P. Hall and Y. Hao, *Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communications*, London: Artech House, 2006.
- [3] M. Jensen and Y. Rahmat-Samii, "EM interaction of handset antennas and a human in personal communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 83, pp. 7-17, January 1995.
- [4] R. Vaughan and N. Scott, "Evaluation of antenna configurations for reduced power absorption in the head," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, pp. 1371-1380, September 1999.
- [5] T. Zervos, A. Alexandridis, V. Petrović, K. Dangakis, B. Kolundžija, A. Đorđević and C. Soras, "Mobile phone antenna performance and power absorption in terms of handset size and distance from user's head," *Wireless Personal Communications*, vol. 33, pp. 109-120, April 2005.
- [6] T. Zervos, K. Peppas, F. Lazarakis, A. A. Alexandridis, K. Dangakis and C. Soras, "Channel capacity evaluation for a multiple-input-multiple-output terminal in the presence of user's hand," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 1, no. 6, pp. 1137-1144, December 2007.
- [7] [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG1.html>.
- [8] [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/>.
- [9] P. Carvey, "Technology for the Wireless Interconnection of Wearable Personal Electronic Accessories," in *IX VLSI Signal Processing Workshop*, 1996.
- [10] M. R. Kamarudin, Y. I. Nechayev and P. S. Hall, "Performance of Antennas in the On-body Environment," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2005.
- [11] Y. I. Nechayev, P. S. Hall, C. C. Constantinou, Y. Hao, A. Alomainy, R. Dubrovka and C. Parini, "Antennas and Propagation for On-Body Communication Systems," in *11th Int. Symposium on Antenna Tech and Applied Electromagnetics (ANTEM)*, France, 2005.
- [12] Y. I. Nechayev and P. S. Hall, "Multipath Fading of On-body Propagation Channels," in *IEEE International AP-S Symposium - USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, 2008.
- [13] A. A. Serra, P. Nepa, G. Manara and P. S. Hall, "On the Performance Analysis of Diversity Techniques in Body-Centric Communication Systems," in *IET Seminar on Antenna and Propagation for Body-Centric Wireless Communications*, London, 2007.
- [14] A. A. Serra, P. Nepa, G. Manara and P. S. Hall, "Diversity measurements of on-body communication systems," *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, 2007.
- [15] S. L. Cotton and W. G. Scanlon, "Characterization and modeling of the indoor radio channel at 868 MHz for a mobile bodyworn wireless personal area network," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 51-55, 2007.

- [16] S. L. Cotton and W. G. Scanlon, "Channel Characterization for Single- and Multiple-Antenna Wearable Systems Used for Indoor Body-to-Body Communications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, April 2009.
- [17] I. Khan, P. Hall, A. Serra, A. Guraliuc and P. Nepa, "Diversity Performance Analysis for On-Body Communication Channels at 2.45 GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 956-963, April 2009.
- [18] I. Khan, Y. Nechayev and P. Hall, "On-Body Diversity Channel Characterization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 2, pp. 573-580, February 2010.
- [19] R. Prasad, *Universal Wireless Personal Communications*, London: Artech House, 1998.
- [20] B. H. Fleury, "An Uncertainty Relation for WSS Processes and Its Application to SWWUS Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 44, no. 12, December 1996.
- [21] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, New York: Wiley, 1997.
- [22] R. G. Vaughan and J. B. Andersen, "Antenna Diversity in Mobile Communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 149-172, November 1987.
- [23] J. Gong, J. F. Hayes and M. R. Soleymani, "Comparison of Capacities of the Transmit Antenna Diversity with the Receive Antenna Diversity in the MIMO Scheme," in *IEEE CCECE*, 2003.
- [24] P. Irazoqui-Pastor and J. T. Bernhard, "Examining the Performance Benefits of Antenna Diversity Systems in Portable Wireless Environments," in *IEEE Antenna Applications Symposium*, Allerton Park, 1999.
- [25] C. B. Dietrich, K. Dietze, J. R. Nealy and W. L. Stutzman, "Spatial, Polarization, and Pattern Diversity for Wireless Handheld Terminals," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 9, September 2001.
- [26] M. Karaboikis, C. Soras, G. Tsachtsiris and V. Makios, "Three-branch Antenna Diversity Systems on Wireless Devices Using Various Printed Monopoles," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Istanbul, 2003.
- [27] J. S. Colburn, Y. Rahmat-Samii, M. A. Jensen and G. J. Pottie, "Evaluation of Personal Communications Dual-Antenna Handset Diversity Performance," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 3, August 1998.
- [28] K. Ogawa, T. Matsuyoshi and K. Monma, "An Analysis of the Performance of a Handset Diversity Antenna Influenced by Head, Hand and Shoulder effects at 900 MHz: Part II - Correlation Characteristics," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, no. 3, May 2001.
- [29] A. A. Serra, P. Nepa, G. Manara and P. S. Hall, "Experimental investigation of diversity techniques for on-body communication systems," in *IET Seminar: Antennas & Propagation for Body-Centric Wireless Communications*, 2007.
- [30] F. Bektas, B. Vondra, P. E. Veith, L. Faltin, A. P. Arpad and L. Scholtz, "Bluetooth communication employing antenna diversity," in *8th IEEE International Symposium on Computers and Communication (ISCC '03)*, 2003.
- [31] S. L. Cotton and W. G. Scanlon, "Indoor channel characterization for a wearable antenna array at 868 MHz," in *IEEE Wireless Communications & Networking*

- Conference (WCNC 2006)*, Las Vegas, April 2006.
- [32] S. L. Cotton and W. G. Scanlon, "Characterization and modeling of on-body spatial diversity within indoor environments at 868 MHz," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, January 2009.
- [33] I. Khan and P. Hall, "Experimental Evaluation of MIMO Capacity and Correlation for Narrowband Body-Centric Wireless Channels," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 1, pp. 195-202, January 2010.
- [34] D. G. Brennan, "Linear diversity combining techniques," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 2, February 2003.
- [35] L. R. Kahn, "Ratio Squarer," *Proceedings IRE*, vol. 42, p. 1704, November 1954.
- [36] M. D. Turkmani, A. A. Arowojolu, P. A. Jefford and C. J. Kellett, "An experimental evaluation of the performance of two-branch space and polarization diversity schemes at 1800 MHz," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 44, no. 2, May 1995.
- [37] P.-S. Kildal and K. Rosengren, "Electromagnetic analysis of effective and apparent diversity gain of two parallel dipoles," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 9-13, 2003.
- [38] R. H. Clarke, "A statistical theory of mobile-radio reception," *Bell Systems Tech. Journal*, pp. 957-1000, July-August 1968.
- [39] E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj and H. V. Poor, *MIMO Wireless Communications*, New York: Cambridge Uni. Press, 2007.
- [40] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna gaussian channels," 1995.
- [41] D. Neiryneck, C. Williams, A. Nix and M. Beach, "Exploiting multiple-input multiple-output in the personal sphere," *IET Microwaves, Antennas and Propagations*, vol. 1, no. 6, December 2007.
- [42] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, pp. 311-335, March 1998.
- [43] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 1451-1458, 1998.
- [44] E. Biglieri, J. Proakis and S. Shamai, "Fading channels: Information-theoretic and communications aspects," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, pp. 2619-2692, 1998.
- [45] D. Porrat, P. Kyritsi and D. C. Cox, "MIMO capacity in hallways and adjacent rooms," *IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 2, pp. 1930-1934, November 2002.
- [46] K. Yu, M. Bengtsson, B. Ottersten, D. McNamara, P. Karlsson and M. Beach, "Second order statistics of NLOS indoor MIMO channels based on 5.2 GHz measurements," *IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 1, pp. 156-160, November 2001.
- [47] A. L. Swindlehurst, G. German, J. Wallace and M. Jensen, "Experimental measurements of capacity for MIMO indoor wireless channels," in *IEEE 3rd Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, March 2001.
- [48] K. Sulonen, P. Suvikunnas, L. Vuokko, J. Kivinen and P. Vainikainen, "Comparison

- of MIMO antenna configurations in picocell and microcell environments," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 703-712, June 2003.
- [49] T. Fugen, C. Kuhnert, J. Maurer and W. Wiesbeck, "Performance of multiuser MIMO systems under realistic propagation conditions," in *ITG Workshop on Smart Antennas*, 2004.
- [50] P. S. Kildal, "Definition of effective diversity gain and how to measure it in a reverberation chamber," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 34, no. 1, pp. 56-59, July 2002.
- [51] K. Rosengren and P. S. Kildal, "Study of distributions of modes and plane waves in reverberation chambers for characterization of antennas in multipath environment," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 30, no. 20, pp. 386-391, September 2001.
- [52] K. Rosengren, P. S. Kildal, C. Carlsson and J. Carlsson, "Characterization of antennas for mobile and wireless terminals in reverberation chambers: Improved accuracy by platform stirring," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 30, no. 20, pp. 391-397, September 2001.
- [53] K. Rosengren and P.-S. Kildal, "Radiation efficiency, correlation, diversity gain and capacity of a six-monopole antenna array for a MIMO system: theory, simulation and measurement in reverberation chamber," *IEE Proceedings in Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 152, no. 1, pp. 7- 16, February 2005.
- [54] P.-S. Kildal and K. Rosengren, "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 12, pp. 104- 112, December 2004.
- [55] R. Thomae, D. Hampicke, A. Richter, G. Sommerkorn, A. Schneider, U. Trautwein and W. Wirtzner, "Identification of the time-variant directional mobile radio channels," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, pp. 357-364, 2000.
- [56] L. García García, "Contribution to the characterization and evaluation of multiple antenna systems for communications: prototyping, propagation and antenna perspective," *PhD Thesis*, 2007.
- [57] T. Kaiser, A. Wilzeck, M. Berentsen and M. Rupp, "Prototyping for MIMO systems - an overview," in *XII European Signal Processing Conference*, Vienna (Austria), 2004.
- [58] P. Wolniansky, G. Foschini, G. Golden and R. Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in *URSI ISSSE*, 1998.
- [59] M. D. Batarie, J. F. Kepler, T. P. Krauss, S. Mukthavaram, L. W. Porter and F. W. Vook, "An experimental OFDM system for broadband mobile communications," in *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2001.
- [60] R. Seeger, L. Brotje and K. D. Kammeyer, "A MIMO hardware demonstrator: application of space-time block codes," in *3rd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 2003.
- [61] E. Aschbacher, S. Caban, C. Mehlhruer, G. Maier and M. Rupp, "Design of a flexible and scalable 4x4 MIMO testbed," in *IEEE 11th Digital Signal Processing Workshop, and the 3rd IEEE Signal Processing Education Workshop*, 2004.
- [62] C. Pietsch, W. Teich, J. Lindner, C. Waldschmidt and W. Wiesbeck, "A Highly

- Flexible MIMO Demonstrator," in *International ITG/IEEE Workshop on Smart Antennas (WSA)*, Duisburg, 2005.
- [63] A. Van Zelst and T. Schenk, "Implementation of a MIMO OFDM-based wireless LAN system," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 52, no. 2, pp. 483 - 494, February 2004.
- [64] M. Ingram, J. Barry, G. Stuber, J. S. Kenney, V. Mooney, T. Pratt, D. Waters, L. Dong, K. U-yen, K. Ryu, A. Mody, W. Xiang, T. Zhang and N. Jone, "Georgia Tech MIMO-OFDM Link Prototype," in *IEEE Radio & Wireless Conference*, Atlanta, 2004.
- [65] R. Gozali, R. Mostafa, R. Palat, S. Marikar, P. Robert, W. Newhall, C. Beaudette, S. Tsiakkouris, C. Anderson, J. Neel, B. Woerner and J. Reed, "Virginia Tech Space-Time Advanced Radio (VT-STAR)," in *IEEE Radio and Wireless Conference (RAWCON)*, 2001.
- [66] D. Samuelsson, J. Jaldén, P. Zetterberg and B. Ottersten, "Realization of a Spatially Multiplexed MIMO System," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, March 2005.
- [67] D. Borkowski, "Hardware implementation for real-time multi-user MIMO system," in *IEEE Radio & Wireless Conference*, Atlanta, 2004.
- [68] S. Haene, D. Perels, D. Baum, M. Borgmann, A. Burg, N. Felber, W. Fichtner and H. Boeleskei, "Implementation aspects of a Real-Time Multi-Terminal MIMO-OFDM Testbed," in *IEEE Radio & Wireless Conference*, Atlanta, 2004.
- [69] A. Bourdoux, T. Kaiser, M. Rupp and U. Heute, "Special Issue on Implementation Aspects and Testbeds for MIMO systems," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2006.
- [70] "Signalion," [Online]. Available: www.signalion.com.
- [71] C. Gomez-Calero, L. Garcia-Garcia, R. Martinez and L. d. Haro, "Comparison of antenna configurations in different scenarios using a wideband MIMO testbed," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S 2006)*, pp. 301-304, July 2006.
- [72] J. Kåredal, "Measurement-Based Modeling of Wireless Propagation Channels - MIMO and UWB," *Doctoral Dissertation, Lund University*, 2009.
- [73] K. Ghanem and P. Hall, "Capacity Evaluation of On-body Channels Using MIMO Antennas," in *IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, (WIMOB 2009)*, 2009.
- [74] K. Ghanem and P. Hall, "Investigation of capacity of on-body channels using MIMO antennas," in *Loughborough Antennas & Propagation Conference, (LAPC 2009)*, 2009.
- [75] Y. Ouyang, D. Love and W. Chappell, "Body-Worn Distributed MIMO System," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1752-1765, May 2009.
- [76] D. Neiryneck, C. Williams, A. Nix and M. Beach, "Experimental Capacity Analysis for Virtual Array Antennas in Personal and Body Area Networks," in *International workshop on Wireless Adhoc Networks*, 2005.
- [77] K. Sakaguchi, H. Y. Chua and K. Araki, "MIMO Channel Capacity in an Indoor Line-of-Sight Environment," *IEICE Transactions on Communication*, Vols. E88-B, no. 7,

- July 2005.
- [78] R. E. Jaramillo, O. Fernandez and R. P. Torres, "Empirical Analysis of 2x2 MIMO Channel in Outdoor-Indoor Scenarios for BFWA Applications," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, no. 6, December 2006.
 - [79] L. Garcia, N. Jalden, B. Lindmark, P. Zetterberg and L. Haro, "Measurements of MIMO Indoor Channels at 1800 MHz with Multiple Indoor and Outdoor Base Stations," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007.
 - [80] S. Pan, S. Durrani and M. E. Bialkowski, "MIMO Capacity for Spatial Channel Model Scenario," in *Australian Communication Theory Workshop*, Australia, 2007.
 - [81] H. Özcelik, M. Herdin, R. Prestros and E. Bonek, "How MIMO capacity is linked with single element fading statistics," in *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications*, Torino, Italy, 2003.
 - [82] Z. Tang and A. S. Mohan, "Experimental Investigation of Indoor MIMO Ricean Channel Capacity," *IEEE Antennas and Wireless Prop letters*, vol. 4, 2005.
 - [83] S. K. Jayaweera and H. V. Poor, "MIMO Capacity Results for Rician Fading Channels," in *IEEE Global Telecommunications Conference, (GLOBECOM)*, 2003.
 - [84] I. Sarris and A. R. Nix, "Maximum MIMO Capacity in Line-of-Sight," in *5th International Conference on Information, Communications and Signal Processing*, 2005.
 - [85] P. A. Catherwood and W. G. Scanlon, "Wearable ultra-wideband channel sounder for MIMO antenna systems," in *IET Irish Signals and Systems Conference, (ISSC 2008)*, 2008.
 - [86] J. Valenzuela-Valdes, M. Garcia-Fernandez, A. Martinez-Gonzalez and D. Sanchez-Hernandez, "The Influence of Efficiency on Receive Diversity and MIMO Capacity for Rayleigh-Fading Channels," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 5, pp. 1444-1450, May 2008.
 - [87] F. Harrysson, J. Medbo, A. Molisch, A. Johansson and F. Tufvesson, "The Composite Channel Method: Efficient Experimental Evaluation of a Realistic MIMO Terminal in the Presence of a Human Body," in *Vehicular Technology Conference, (VTC)*, 2008.
 - [88] M. Shafi, M. Zhang, A. L. Moustakas, P. J. Smith, A. F. Molisch, F. Tufvesson and S. Simon, "Polarized MIMO channels in 3-D: models, measurements and mutual information," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 514-527, March 2006.
 - [89] H. S. Rad and S. Gazor, "A 3D correlation model for MIMO non-isotropic scattering with arbitrary antenna arrays," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2005.
 - [90] K. Yu and B. Ottersten, "Models for MIMO Propagation Channels, A Review," *Journal on Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 7, pp. 653-666, August 2002.
 - [91] H. Özcelik, "Indoor MIMO Channel Models," *PhD. Thesis, Institut für Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik*, 2004.
 - [92] P. Almers, E. Bonek, A. Burr, N. Czink, M. Debbah, V. Degli-Espoti, H. Hofstetter, P. Kyosti, D. Laurenson, G. Matz, A. Molisch, C. Oestges and H. Ozcelik, "Survey of Channel and Radio Propagation Models for Wireless MIMO Systems," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2007, 2007.

- [93] G. German, Q. Spencer, L. Swindlehurst and R. A. Valenzuela, "Wireless Indoor channel modeling: Statistical agreement of ray tracing simulations and channel sounding measurements," in *26th IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, (ICASSP 2001)*, Salt Lake City, 2001.
- [94] T. Zwick, C. Fischer and W. Wiesbeck, "A stochastic multipath channel model including path directions for indoor environments," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 6, p. 1178 – 1192, August 2002.
- [95] J. Kermaol, L. Schumacher, K. Pedersen, P. Mogensen and F. Frederiksen, "A stochastic MIMO radio channel model with experimental validation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 6, p. 1211 – 1226, August 2002.
- [96] K. Pedersen, J. Andersen, J. Kermaol and P. Mogensen, "A stochastic multiple- input multiple- output radio channel model for evaluation of space-time coding algorithms," in *52nd IEEE Vehicular Technology Conference*, 2000.
- [97] H. Özcelik, M. Herdin, W. Weichselberger, J. Wallace and E. Bonek, "Deficiencies of "kronecker" MIMO radio channel model," *Electronics Letters*, vol. 39, no. 16, p. 1209 – 1210, 2003.
- [98] K. Yu, M. Bengtsson, B. Ottersten, D. McNamara, P. Karlsson and M. Beach, "Modeling of wide-band MIMO radio channels based on NLoS indoor measurements," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 3, p. 655 – 665, May 2004.
- [99] J. Toftgard, S. N. Hornsleth and J. B. Andersen, "Effects on portable antennas of the presence of a person," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 6, pp. 739-746, June 1993.
- [100] L. Correia, "Wireless Flexible Personalized Communications, final report of COST Action 259," Wiley, New York, 2001.
- [101] M. Murase, Y. Tanaka and H. Arai, "Propagation and antenna measurements using antenna switching and random field measurements," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 3, p. 537–541, August 1994.
- [102] G. F. Pedersen, J. Ø. Nielsen, K. Olesen and I. Z. Kovacs, "Measured variation in performance of handheld antennas for a large number of test persons," in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, 1998.
- [103] K. Boyle, "Mobile phone antenna performance in the presence of people and phantoms," in *IEE Antennas and Propagation Professional Network, Technical Seminar: Antenna Measurement and SAR*, 2002.
- [104] J. Ø. Nielsen and G. F. Pedersen, "In-network performance of handheld mobile terminals," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, no. 3, p. 903–916, 2006.
- [105] J. Krogerus, J. Toivanen, C. Icheln and P. Vainikainen, "Effect of the Human Body on Total Radiated Power and the 3-D Radiation Pattern of Mobile Handsets," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 6, pp. 2375 -2385, December 2007.
- [106] M. Okoniewski and M. A. S. tuchly, "A Study of the Handset Antenna and Human Body Interaction," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1855 - 1864, October 1996.
- [107] O. P. Gandhi, "Some Numerical Methods for Dosimetry: Extremely Low Frequencies

- to Microwave Frequencies," *Radio Science*, vol. 30, pp. 161-177, 1995.
- [108] S. I. Watanabe, H. Taki, T. Nojima and O. Fujiwara, "Characteristics of the SAR Distributions in a Head Exposed to Electromagnetic Fields Radiated by a Hand-Held Portable Radio," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1874-1883, October 1996.
- [109] J. Graffin, N. Rots and G. F. Pedersen, "Radiation Phantoms for Handheld Phones," in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Boston, 2000.
- [110] K. R. Boyle, Y. Yuan and L. P. Ligthart, "Analysis of Mobile Phone Antenna Impedance Variations With User Proximity," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 2, pp. 364-372, February 2007.
- [111] M. Francavilla, A. Schiavoni, P. Bertotto and G. Richiardi, "Effect of the Hand on Cellular Phone Radiation," *IEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 148, no. 4, pp. 247-253, August 2001.
- [112] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Measurements of radio performances for UMTS terminals in speech mode (Release 7)," 3GPP TR25.914 V7.0.0 (2006-06), [Online]. Available: <http://www.3gpp.org>.
- [113] P. Moller, "CTIA Hand phantom development status," in *COST 2100 TD(08)523*, Trodheim, 2008.
- [114] [Online]. Available: http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG4_Radio/TSGR4_45/Report/.
- [115] D. Gesbert, M. Shafi, D. S. Shiu, P. J. Smith and A. Naguib, "From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 3, p. 281–302, April 2003.
- [116] W. Kotterman, G. Pedersen and K. Olesen, "Capacity of the mobile MIMO channel for a small wireless handset and user influence," 2002.
- [117] K. Sulonen and P. Vainikainen, "Performance of mobile phone antennas including effect of environment using two methods," *IEEE Transactions on Instrumental Measurements*, vol. 52, no. 6, p. 1859–1864, December 2003.
- [118] J. Ø. Nielsen and G. F. Pedersen, "Mobile handset performance evaluation using radiation pattern measurements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 7, p. 2154–2165, 2006.
- [119] P. Suvikunnas, J. Villanen, K. Sulonen, C. Icheln, J. Ollikainen and P. Vainikainen, "Evaluation of the performance of multiantenna terminals using a new approach," *IEEE Transactions on Instrumental Measurements*, vol. 55, no. 5, p. 1804–1813, 2006.
- [120] A. Michalopoulou, T. Zervos, K. Peppas, A. A. Alexandridis, F. Lazarakis, K. Dangakis and D. I. Kaklamani, "The impact of the position of MIMO terminal user's hand on channel capacity," in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2007)*, Athens, September 2007.
- [121] U. Navsariwala, M. Schamberger and N. Buris, "Impact of a user on the performance of MIMO antenna systems in small wireless devices," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, (AP-S 2008)*, 2008.
- [122] J. Volakis, G.-Y. Lee, D. Psychoudakis and C.-C. Chen, "Multiple body-worn antenna diversity," in *IEEE International Workshop on Antenna Technology, (IWAT 2009)*,

2009.

- [123] "Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations," TS 25.996, v6.1.0 (2003-09), Third Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification Group (TSG), RAN WG1, [Online]. Available: <http://www.3gpp.org>.
- [124] V. Erceg, "Tgn channel models," *IEEE 802.11-03/940r4*, 2004.
- [125] A. B. Gershman and N. Sidiropoulos, *Space-Time Processing for MIMO Communications*, Wiley Editorial, 2005.
- [126] "Ubiquitous communication through natural human actions," [Online]. Available: <http://www.redtacton.com/en>.
- [127] A. Alomainy, "Antennas and radio propagation for body-centric wireless networks," *PhD Thesis, Queens Mary University, London, May 2007*.
- [128] H. J. Yoo, S. J. Song, N. Cho and H. J. Kim, "Low-energy on-body communication for BSN," *Body Sensor Networks*, March 2007.
- [129] [Online]. Available: <http://www.nfc-forum.org>.
- [130] T. G. Zimmerman, "Personal area networks: Near-field intra-body communication," *IBM system journal*, vol. 35, no. 3-4, pp. 609-617, 1994.
- [131] [Online]. Available: <http://www.wi-fi.org>.
- [132] [Online]. Available: <http://ieee802.org/11>.
- [133] [Online]. Available: <http://www.uwbforum.org/>.
- [134] [Online]. Available: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.15.6-2012.html>.
- [135] S. L. Cotton, W. G. Scanlon and J. Guy, "The κ - μ distribution applied to the analysis of fading in body to body communication channels for fire and rescue personnel," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, 2008.
- [136] [Online]. Available: <http://www.ee.qub.ac.uk/wireless/>.
- [137] [Online]. Available: <http://www.sonymobile.com/global-en/products/accessories/liveview/>.
- [138] [Online]. Available: <http://www.apple.com>.
- [139] [Online]. Available: <http://www.gmb.nl/>.
- [140] [Online]. Available: http://www.ihealth99.com/scale_feature.html.
- [141] [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/>.
- [142] C. Gabriel, "Tissue equivalent material for hand phantoms," *Phys. Med. Biol.*, vol. 52, pp. 4205-4210, 2007.
- [143] "IEC 62209-2: Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body. Part 2: procedure to determine the specific absorption rate (SAR) in the head and body for 30 MHz to 6 GHz handheld and body-mounted devices used in close proximity to the body," [Online].
- [144] "ETSI Technical Report 273-7, Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Improvement of radiated methods of measurement (using test sites) and evaluation of the corresponding measurement uncertainties; Part 7: Artificial human beings," February 1998. [Online].
- [145] [Online]. Available: <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>.
- [146] [Online]. Available: <http://www.mcluk.org/>.
- [147] H. Tamura, Y. Ishikawa, T. Kobayashi and T. Nojima, "A dry phantom material

- composed of ceramic and graphite powder," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, no. 2, pp. 132-137, 1997.
- [148] Y. Nikawa, M. Chino and K. Kikuchi, "Soft and dry phantom modeling material using silicone rubber with carbon fiber," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10 Part 2, p. 1949–1953, 1996.
- [149] S. L. Cotton and W. G. Scanlon, "An experimental investigation into the influence of user state and environment on fading characteristics in wireless body area networks at 2.45 GHz," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, January 2009.
- [150] Y. I. Nechayev, P. S. Hall, C. C. Constantinou, Y. Hao, A. Alomainy, R. Dubrovka and C. G. Parini, "On-body path gain variations with changing posture and antenna position," in *IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington DC, July 2005.
- [151] P. J. Dimbylow, "Current densities in a 2 mm resolution anatomically realistic model of the body induced by low frequency electric fields," *Phys. Med. Biol.*, vol. 45, pp. 1013-1022, 1999.
- [152] [Online]. Available: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/ImpExp.aspx>.
- [153] T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kuneida, M. Taki and Y. Yamanka, "Development of realistic high resolution whole-body voxel models of Japanese adult male and female of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry," *Physics in Medicine and Biology*, vol. 49, pp. 1-15, 2004.
- [154] [Online]. Available: <http://noodle.med.yale.edu/zubal/>.
- [155] [Online]. Available: <http://usa.autodesk.com/autodesk-inventor/>.
- [156] [Online]. Available: <http://poser.smithmicro.com/poser.html>.
- [157] A. Michalopoulou, A. A. Alexandridis, T. Zervos, K. Peppas, F. Lazarakis and D. I. Kaklamani, "Handheld Terminal vs. Bodyworn Antenna Systems: A comparative Study of MIMO Systems Performance," in *IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID (IMWS 2009)*, Cavtat, Croatia, 2009.
- [158] M. Gallo, P. S. Hall, Q. Bai, Y. I. Nechayev, C. C. Constantinou and M. Bozzetti, "Simulation and measurement of dynamic on-body communications channels," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 2, pp. 623-630, February 2011.
- [159] L. Vallozzi, H. Rogier and C. Hertleer, "A Textile Patch Antenna with Dual Polarization for Rescue Workers' Garments," in *3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009)*, 2009.
- [160] [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/15/pub/TG6.html>.
- [161] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [162] IEEE, "IEEE recommended practice for determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human head from wireless communications devices: Measurement techniques," *IEEE Std. 1528-2003*, 2003.
- [163] A. Michalopoulou, T. Zervos, A. A. Alexandridis, K. Peppas, F. Lazarakis, K.

- Dangakis and D. I. Kaklamani, "The impact of the user's body on the performance of a MIMO terminal in "pocket position", in *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007)*, Edinburgh, November 2007.
- [164] T. Salim, "Antennas for on-body communication systems," *PhD thesis, University of Birmingham*, September 2006.
- [165] K. M. Ramlee, "Design and performance of antennas for on-body communication channels and antenna diversity," *PhD thesis, University of Birmingham*, September 2007.
- [166] P. Salonen, L. Sydänheimo, M. Keskilampi and M. Kivikoski, "A small planar inverted-F antenna for wearable applications," *3rd International Symposium on Wearable Computers*, pp. 95-100, October 1999.
- [167] P. Salonen, M. Keskilampi and L. Sydänheimo, Antenna design for wearable applications, Finland: Tampere University of Technology.
- [168] P. J. Massey, "Mobile phone fabric antenna integrated with clothing," in *11th International Conference on Antennas and Propagation*, 2001.
- [169] P. Salonen and L. Sydänheimo, "Development of an S-band flexible antenna for smart clothing," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2002.
- [170] P. Salonen and L. Hurme, "A novel fabric WLAN antenna for wearable applications," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2003.
- [171] P. Salonen, Y. Rahmat-Samii, M. Schaffrath and M. Kivikoski, "Effect of textile materials on wearable antenna performance: a case study of GPS antennas," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004.
- [172] P. Salonen, Y. Rahmat-Samii, H. Hurme and M. Kivikoski, "Dual-band wearable textile antenna," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004.
- [173] P. Salonen, F. Yang, Y. Rahmat-Samii and M. Kivikoski, "WEBGA - wearable electromagnetic band-gap antenna," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2004.
- [174] I. Locher, M. Klemm, T. Kirstein and G. Troster, "Design and characterization of purely textile patch antennas," *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 29, no. 4, pp. 777-788, November 2006.
- [175] T. Kellomaki, J. J. Heikkinen and M. A. Kivikoski, "Effects of bending GPS antennas," in *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference*, December 2006.
- [176] A. Tronquo, H. Rogier, C. Hertleer and L. Van Langenhove, "A robust planar textile antenna for wireless body LANs operating in the 2.45 GHz ISM band," *IEE Electronics Letters*, vol. 42, no. 3, pp. 142-143, February 2006.
- [177] L. Vallozzi, H. Rogier and C. Hertleer, "Dual polarized textile patch antenna for integration into protective garments," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 7, pp. 440-443, 2008.
- [178] C. Hertleer, H. Rogier, L. Vallozzi and L. Van Langenhove, "A textile antenna for off-body communication integrated into protective clothing for firefighters," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Special Issue on Antennas and Propagation for Body-centric Wireless Communications*, vol. 57, no. 8, pp. 919-925, 2009.
- [179] L. Vallozzi, H. Rogier and C. Hertleer, "Design of a protective garment GPS antenna,"

- Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, pp. 1504-1508, June 2009.
- [180] Y. Ouyang, E. Karayianni and W. J. Chappell, "Effect of fabric patterns on electrotexile patch antennas," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Washington DC, July 2005.
- [181] S. Zhu and R. Langley, "Dual wearable textile antenna on an EBG substrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 926-935, 2009.
- [182] Q. Bai and R. Langley, "Crumbled textile antennas," *IEE Electronics Letters*, vol. 45, no. 9, pp. 436-438, 2009.
- [183] T. Kellomaki, J. Heikkinen and M. Kivikoski, "Wearable antennas for FM reception," in *1st European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006)*, Nice, November 2006.
- [184] M. Klemm and G. Troster, "Textile UWB antenna for on-body communications," in *1st European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006)*, Nice, November 2006.
- [185] M. Klemm, I. Z. Kovacs, G. F. Pedersen and G. Tröster, "Novel Small-Size Directional Antenna for UWB WBAN/WPAN Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 12, pp. 3884- 3896, December 2005.
- [186] K. Furuya, Y. Taira, H. Iwasaki, S. Yamamoto, N. Tamaki, T. Harada and A. Kuramoto, "Wideband wearable antenna for DTV reception," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, July 2008.
- [187] D. L. Paul, C. Jayatisa, G. S. Hilton and C. J. Railton, "Conformability of a textile antenna for reception of digital television," in *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC 2010)*, November 2010.
- [188] D. L. Paul, M. G. Peterson and G. S. Hilton, "A low-profile textile antenna for reception of digital television and wireless communications," in *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS 2012)*, January 2012.
- [189] C. Cibirin, P. Leuchtman, M. Gimersky, R. Vahldieck and S. Mosciroda, "A flexible wearable antenna," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Monterey, June 2004.
- [190] T. F. Kennedy, P. W. Fink, A. W. Chu and G. F. Studor, "Potential space applications for body-centric wireless and e-textile antennas," in *IET Seminar on Antennas and Propagation for Body-centric Wireless Communications*, London, April 2007.
- [191] T. F. Kennedy, P. W. Fink, A. W. Chu, N. J. Champagn, G. Y. Lin and M. A. Khayat, "Body-worn e-textile antennas: The good, the low-mass, and the conformal," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 910-918, 2009.
- [192] "Harris broadband body-worn dipole antenna (30-108 MHz)," [Online]. Available: http://rf.harris.com/media/RF-3161_tcm26-9094.pdf.
- [193] P. Salonen and M. Keskilammi, "Softwear antenna," *Military Communications Conference*, pp. 1-6, November 2008.
- [194] P. Salonen, M. Keskilammi and y. Rahmat-Samii, "Textile antennas: Effect of antenna bending on radiation pattern and efficiency," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, San Diego, July 2008.
- [195] F. Declercq, H. Rogier and C. Hertleer, "Permittivity and loss tangent characterization for garment antennas based on a new matrix-pencil two-line method," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2548-2554, August

2008.

- [196] S. Sankarilingam and B. Gupta, "Determination of dielectric constant of fabric materials and their use as substrates for design and development of antennas for wearable applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 12, pp. 3122-3130, 2010.
- [197] Y. Ouyang and W. J. Chappell, "High frequency properties of electro-textiles for wearable antenna applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 2, pp. 381-389, 2008.
- [198] M. Klemm, I. Locher and G. Troster, "A novel circularly polarized textile antenna for wearable applications," *7th European Conference on Wireless Technology*, pp. 285-288, 2004.
- [199] P. Salonen, Y. Rahmat-Samii and M. Kivikoski, "Wearable antennas in the vicinity of human body," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1, pp. 467-470, June 2004.
- [200] Z. N. Chen, A. Cai, T. P. See, X. Qing and M. W. Chia, "Small planar UWB antennas in proximity of the human head," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, pp. 1846-1857, 2006.
- [201] J. C. Haartsen and S. Mattisson, "Bluetooth - A new low-power radio interface providing short-range connectivity," *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, pp. 1651-1661, October 2000.
- [202] C. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd Edition, Wiley Editorial, 1997.
- [203] M. Tanaka and J.-H. Jang, "Wearable microstrip antenna," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 2, pp. 704-707, June 2003.
- [204] J. Carter, J. Saberlin, T. Shah, P. Sai Ananthanarayanan and C. Furse, "Inexpensive fabric antenna for off-body wireless sensor communication," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S/URSI 2010)*, pp. 1-4, July 2010.
- [205] K. Yeonho, L. Kyoungwan, K. Yongju and Y. C. Chung, "Wearable UHF RFID tag antenna design using flexible electro-thread and textile," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 5487-5490, June 2007.
- [206] A. Tronquo, H. Rogier, C. Hertleer and L. Van Langenhove, "Applying textile materials for the design of antennas for wireless body area networks," *1st European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006)*, pp. 1-5, November 2006.
- [207] "P130 Technical Data Sheet," Statex Produktions & Vertriebs GmbH, Bremen, Germany, [Online]. Available: <http://www.statex.de>.
- [208] "Nora Technical Data Sheet," Statex Produktions & Vertriebs GmbH, Bremen, Germany, [Online]. Available: <http://www.statex.de>.
- [209] [Online]. Available: <http://www.lessemf.com>.
- [210] [Online]. Available: <http://www.pluginandwear.com>.
- [211] [Online]. Available: <http://www.shieldextrading.net>.
- [212] [Online]. Available: <http://www.sparkfun.com>.
- [213] [Online]. Available: <http://www.heathcoat.co.uk>.
- [214] [Online]. Available: <http://www.seeitsafe.co.uk>.
- [215] T. Kellomaki, "Snap-On Buttons in a Coaxial-to-Microstrip," in *2009 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC 2009)*, Loughborough, UK, November

- 2009.
- [216] Y. Nechayev, P. Hall and Z. Hu, "Characterisation of narrowband communication channels on the human body at 2.45 GHz," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 4, no. 6, pp. 722-732, June 2010.
- [217] S. Ullah, S. Saleem, H. Higgins, N. Ullah, Y. Zhong and K. S. Kwak, "Evaluation of Implant Communication with Polarisation and Unslotted CSMA/CA Protocol in Wireless Body Area Networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2010, pp. 1-4, 2010.
- [218] A. Lea, P. Hui, J. Ollikainen and R. Vaughan, "Propagation Between On-Body Antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 11, pp. 3619-3627, Νοεμβριος 2009.
- [219] J. R. Wait, "The ancient and modern history of EM ground-wave propagation," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, pp. 7-24, 1998.
- [220] K. Norton, "The Physical Reality of Space and Surface Waves in the Radiation Field of Radio Antennas," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 25, no. 9, pp. 1192-1202, September 1937.
- [221] R. M. Edwards and M. I. Khattak, "Understanding Body-Centric Antennas," *Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC 2010)*, pp. 629-632, 2010.
- [222] M. Rehman, Y. Gao, X. Chen, C. Parini, Z. Ying, T. Bolin and J. Zweers, "On-Body Bluetooth Link Budget: Effects of Surrounding Objects and Role of Surface Waves," *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC 2007)*, pp. 1-4, December 2007.
- [223] J. Wang, Y. Nishikawa and T. Shibata, "Analysis of On-Body Transmission Mechanism and Characteristic Based on an Electromagnetic Field Approach," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, no. 10, pp. 2464-2470, October 2009.
- [224] M. Grimm and D. Manteuffel, "Electromagnetic Wave Propagation on Human Trunk Models excited by Half-Wavelength Dipoles," *Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, 2010.
- [225] J. Ryckaert, P. De Doncker, R. Meys, A. de Le Hoye and S. Donnay, "Channel model for wireless communication around human body," *IEEE Electronics Letters*, vol. 40, no. 9, pp. 543- 544, April 2004.
- [226] G.-Y. Lee, D. Psychoudakis, C.-C. Chen and J. L. Volakis, "Channel decomposition method for designing body-worn antenna diversity systems," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 1, pp. 254-262, January 2011.
- [227] P. S. Hall, M. Ricci and T. M. Hee, "Characterization of on-body communication channels," *3rd International Conference on Microwave and Millimetre Wave Technology (ICMMT 2002)*, pp. 770-772, August 2002.
- [228] K. I. Ziri-Castro, W. G. Scanlon and N. E. Evans, "Indoor radio channel characterization and modelling for a 5.2 GHz body-worn receiver," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 3, 2004.
- [229] A. Alomainy, Y. Hao, C. G. Parini and P. S. Hall, "Comparison between two different antennas for UWB on-body propagation measurements," *Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 31-34, 2005.
- [230] A. Fort, C. Desset, P. De Doncker, P. Wambacq and L. Van Biesen, "An ultra

- wideband body area propagation channel model - From statistics to implementation," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology*, vol. 54, no. 4, April 2006.
- [231] W. G. Scanlon and S. L. Cotton, "Understanding on-body fading channels at 2.45 GHz using measurements based on user state and environment," *Loughborough Antennas and Propagation Conference*, March 2008.
- [232] S. L. Cotton and W. G. Scanlon, "A statistical analysis of indoor multipath fading for a narrowband wireless body area network," *IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2006)*, pp. 1-5, September 2006.
- [233] D. Smith, L. Hanlen, D. Miniutti, J. Zhang, D. Rodda and B. Gilbert, "Statistical characterization of the dynamic narrowband body area channel," *1st International Symposium on Applied Sciences on Biomedical and Communication Techniques (ISABEL '08)*, pp. 1-5, October 2008.
- [234] G. Conway, S. Cotton and W. Scanlon, "An antennas and propagation approach to improving physical layer performance in wireless body area networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 1, pp. 27-36, January 2009.
- [235] G. A. Conway and W. G. Scanlon, "Antennas for over-body-surface communication at 2.45 GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 4, pp. 844-855, April 2009.
- [236] Y. Hao, A. Alomainy, Y. Zhao, C. G. Parini, Y. Nechayev, P. S. Hall and C. C. Constantinou, "Statistical and deterministic modelling of radio propagation channels in WBAN at 2.45 GHz," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S 2006)*, pp. 2169-2172, July 2006.
- [237] Z. H. Hu, Y. I. Nechayev, P. S. Hall, C. C. Constantinou and Y. Hao, "Measurements and statistical analysis of on-body channel fading at 2.45 GHz," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 612-615, 2007.
- [238] G. A. Conway, W. G. Scanlon and S. L. Cotton, "The performance of on-body wearable antennas in a repeatable multipath environment," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S 2008)*, pp. 1-4, July 2008.
- [239] Y. Nechayev, Z. Hu and P. Hall, "Short-term and long-term fading of on-body transmission channels at 2.45 GHz," *Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC 2009)*, pp. 657-660, November 2009.
- [240] S. L. Cotton and W. G. Scanlon, "Characterization of the on-body channel in an outdoor environment at 2.45 GHz," *3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2009)*, pp. 722-725, March 2009.
- [241] G. Chaganti, D. B. Smith and L. W. Hanlen, "Second order statistics for many-link body area networks," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 322-325, 2010.
- [242] M. Kim and J.-I. Takada, "Statistical model for 4.5 GHz narrowband on-body propagation channel with specific actions," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1250-1254, 2009.
- [243] B. Zhen, M. Kim, J.-I. Takada and R. Kohno, "Characterization and modeling of dynamic on-body propagation at 4.5 GHz," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 1263-1267, 2009.
- [244] A. Taparugssanagorn, C. Pomalaza-Raez, A. Isola, R. Tesi, M. Hamalainen and J.

- Iinatti, "UWB channel study for wireless body area networks in medical applications," *International Journal of Ultra Wideband Communications and system (IJUWBCS), Special Issue on Applications of Ultra Wideband Systems in Biomedicine*, vol. 1, no. 4, pp. 226-236, 2010.
- [245] A. Sani, A. Alomainy, G. Palikaras, Y. Nechayev, Y. Hao, C. Parini and P. Hall, "Experimental characterization of UWB on-body radio channel in indoor environment considering different antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 1, pp. 238-241, January 2010.
- [246] A. Alomainy, Y. Hao, A. Owadally, C. G. Parini, Y. Nechayev, C. C. Constantinou and P. S. Hall, "Statistical analysis and performance evaluation for on-body radio propagation with microstrip patch antennas," *IEEE Transactions on antennas and Propagation*, vol. 55, no. 1, pp. 245-248, January 2007.
- [247] R. Ganesh and K. Pahlavan, "On the modeling of fading multipath indoor radio channels," *IEEE GLOBECOM 1989*, vol. 3, pp. 1346-1350, 1989.
- [248] M. Yacoub, "The κ - μ distribution and the η - μ distribution," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 49, no. 1, 2007.
- [249] Y. Ouyang and W. Chappell, "Diversity characterization of body-worn textile antenna system at 2.4 GHz," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S 2006)*, pp. 2117-2120, July 2006.
- [250] Y. Ouyang and W. Chappell, "Distributed body-worn transceiver system with the use of electro-textile antennas," *IEEE International Microwave Symposium (MTT-S 2007)*, pp. 1229-1232, June 2007.
- [251] [Online]. Available: http://www.openautomation.net/uploads/productos/micaz_datasheet.pdf.
- [252] [Online]. Available: <https://www.eol.ucar.edu/rtf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2dot.pdf>.
- [253] I. Khan, P. Hall, A. Guraliuc and P. Nepa, "Reciprocity and repeatability of diversity measurements for on-body communication channels at 2.45 GHz," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S 2008)*, pp. 1-4, July 2008.
- [254] M. D. Yacoub, C. R. C. M. d. Silva and J. E. V. Bautista, "Second order statistics for diversity-combining techniques in Nakagami-fading channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, p. 1464-1470, November 2001.
- [255] R. E. Collin and F. Zucker, *Antenna Theory, Part 1*, New York: McGraw-Hill, 1969.
- [256] B. Lindmark, N. Jaldén, P. Zetterberg, L. Garcia-Garcia, T. Zervos, A. Alexandridis, F. Lazarakis, K. Dangakis, C. Orlenius and M. Franzén, "Antenna technology for reconfigurable multiple antenna terminals," *ACE-Deliverable 2.2-D8*, December 2005.
- [257] T. Zervos, A. Alexandridis, K. Peppas, F. Lazarakis, K. Dangakis, C. Soras and B. Lindmark, "The influence of MIMO terminal user's hand on channel capacity," *European Conference on Antennas & Propagation (EUCAP 2006)*, November 2006.
- [258] Θ. Ν. Ζερβός, *Αλληλεπίδραση μεταξύ ασύρματων τερματικών συσκευών και του ανθρώπινου σώματος*, Πάτρα: Διδακτορική Διατριβή, 2007.
- [259] O. Kivekas, J. Ollikainen, T. Lehtiniemi and P. Vainikainen, "Bandwidth, SAR, and efficiency of internal mobile phone antennas," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 1, pp. 71-86, 2004.
- [260] P. Salonen, Y. Rahmat-Samii, H. Hurme and M. Kivikoski, "Effect of conductive

- material on wearable antenna performance: A case study of WLAN antennas," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S 2004)*, vol. 1, pp. 463-466, June 2004.
- [261] H. Visser and A. Reniers, "Textile antennas, a practical approach," *2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007)*, pp. 1-8, November 2007.
- [262] J. Heikkinen, T. Laine-Ma and M. Kivikoski, "Flexible fabric-based patch antenna with protective coating," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S 2007)*, pp. 4168-4171, June 2007.
- [263] W. Morton and J. Hearl, "Physical properties of textile fibres," *The Textile Institute*, 1993.
- [264] "Computer Simulation Technology: User's guide, CST GmbH," [Online]. Available: <http://www.cst.com>.
- [265] W. Press, *Numerical recipes in C*, Cambridge University Press, 1992.
- [266] N. Sagias, D. Zogas, G. Karagiannidis and G. Tombras, "Channel capacity and second-order statistics in Weibull fading," *IEEE Communication Letters*, vol. 8, no. 6, June 2004.
- [267] G. Stuber, *Principles of mobile communication*, Boston: Kluwer, 1996.
- [268] M. Yacoub, "The α - μ distribution: A physical fading model for the Stacy distribution," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 1, pp. 27-34, January 2007.
- [269] A. Michalopoulou, A. A. Alexandridis, K. Peppas, T. Zervos, F. Lazarakis, K. Dangakis and n. p. D. I. Kaklamani vol.60, "Statistical Analysis for On-Body Spatial Diversity Communications at 2.45 GHz," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 8, pp. 4014-4019, August 2012.
- [270] A. Michalopoulou, T. Zervos, K. Peppas, F. Lazarakis and A. A. A. K. D. D. I. Kaklamani, "On-body diversity channels at 2.45 GHz: Measurements and statistical analysis," in *5th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2011)*, Rome, Italy, April 2011.
- [271] U. Kim and J. Choi, "Design of a microstrip patch antenna with enhanced F/B for WBAN applications," *IEICE Transactions on Communications*, Vols. E94-B, no. 5, pp. 1135-1141, May 2011.
- [272] C. Waldschmidt, J. v. Hagen and W. Wiesbeck, "Influence and modeling of mutual coupling in MIMO and diversity systems," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (AP-S 2002)*, San Antonio, TX, June 2002.
- [273] P. Hall and Y. Hao, "Antennas and Propagation for Body Centric Communications," *1st European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2006)*, pp. 1-7, November 2006.
- [274] Q. Bai and R. Langley, "Bending of a Small Coplanar Textile Antenna," *Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC 2010)*, November 2010.
- [275] A. Michalopoulou, A. A. Alexandridis, K. Peppas, T. Zervos, F. Lazarakis, K. Dangakis and D. I. Kaklamani, "On-body channel modelling: Measurements and statistical analysis," in *2010 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC 2010)*, Loughborough, UK, November 2010.
- [276] A. Michalopoulou, A. A. Alexandridis, K. Peppas, T. Zervos, F. Lazarakis, K. Dangakis and D. I. Kaklamani, "On-body channel statistical analysis based on

measurements in an indoor environment at 2.45 GHz," *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 6, no. 6, pp. 636-645, April 2012.