

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Μελέτη ραδιοδιάδοσης μη οπτικής επαφής (NLOS) σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου παρουσία βιολογικού σκεδαστή με το πρόγραμμα Η/Μ προσομοίωσης SuperNEC V2.4

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Α. ΠΑΠΑΦΩΤΙΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Π. ΦΩΤΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2004



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

Μελέτη ραδιοδιάδοσης μη οπτικής επαφής (NLOS) σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου παρουσία βιολογικού σκεδαστή με το πρόγραμμα Η/Μ προσομοίωσης SuperNEC V2.4

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Α. ΠΑΠΑΦΩΤΙΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Π. ΦΩΤΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Χρήστος Καψάλης Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2004.

..... Χρήστος Καψάλης Καθηγητής Ε.Μ.Π. Φίλιππος Κωνσταντίνου Καθηγητής Ε.Μ.Π. Δήμητρα Κακλαμάνη Επίκουρος Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2004

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ Α. ΠΑΠΑΦΩΤΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Π. ΦΩΤΟΠΟΥΛΟΣ

Διπλωματούχοι Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί και Μηχανικοί Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Παναγιώτης Α. Παπαφωτίου, 2004 Copyright © Δημήτριος Π. Φωτόπουλος, 2004

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 τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η στατιστική συμπεριφορά του λαμβανόμενου σήματος σε εσωτερικό χώρο με έμφαση στην παρουσία ανθρώπου δίπλα σε κεραία συσκευής κινητού τηλεφώνου.

Αρχικά, αναλύονται οι αρχές και οι μηχανισμοί διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλοντα κινητών επικοινωνιών. Εκτενής αναφορά γίνεται για το φαινόμενο των μακροχρόνιων και βραχυχρόνιων διαλείψεων που οφείλονται στην πολυδιαδρομική διάδοση. Ακόμη, αναπτύσσονται διάφορα μοντέλα που προσεγγίζουν τις απώλειες διάδοσης σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου.

Το βασικό στάδιο της εργασίας αυτής αφορά τη μελέτη ραδιοδιάδοσης μη οπτικής επαφής (NLOS) σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου παρουσία βιολογικού σκεδαστή με το πρόγραμμα ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης SuperNEC V.2.4. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται επεξεργασία της περιβάλλουσας σήματος που λαμβάνεται σε κεραία - δέκτη ακολουθώντας διαφορετικές διαδρομές λόγω περίθλασης, ανάκλασης και σκέδασης. Επίσης, εισάγεται ο παράγοντας απορρόφησης που επιβάλλει η παρουσία του βιολογικού σκεδαστή – ανθρώπου. Τέλος, το τυχαίο λαμβανόμενο σήμα που ακολουθεί γενικά κατανομή Rayleigh αποδεικνύεται ότι προσεγγίζεται καλύτερα από μία πιο εξειδικευμένη κατανομή η οποία ονομάζεται VeCa. Το μοντέλο αυτό αναφέρεται αποκλειστικά σε NLOS ζεύξη εσωτερικού χώρου και λαμβάνει υπόψη του την παρουσία βιολογικού σκεδαστή δίπλα στην κεραία.

Λέξεις Κλειδιά

Μη οπτική επαφή (NLOS), διάδοση σε εσωτερικό χώρο, βιολογικός σκεδαστής, κατανομή VeCa.

Abstract

The scope of this thesis is the study of the statistical model that corresponds to the received signal in the indoor environment emphasizing on the presence of human near the mobile phone antenna.

Primarily, the mechanisms of electromagnetic waves propagation of mobile communications are analyzed. There is also a thorough examination of multipath phenomena which result to large-scale and small-scale fading. In addition, several models of indoor propagation loss are presented.

The main part of this project deals with the research of a non-line of sight (NLOS) connection in an indoor environment with the presence of a biological scatterer using the electromagnetic simulation software SuperNEC V.2.4. Specifically, the signal which follows different paths due to diffraction, reflection and scattering, is measured at the receiver antenna in order to be examined. Moreover, the absorption factor induced by the presence of a biological scatterer is introduced. Finally, we conclude that the random received signal, which is generally described by the Rayleigh distribution, is better determined by a specialized distribution called VeCa. This particular statistical model refers to an indoor non-line of sight (NLOS) connection and takes into consideration the presence of a human near the mobile phone antenna.

Key words

Non-line of sight (NLOS), indoor propagation, biological scatterer, VeCa distribution

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή	14
1.1 Ασύρματη μετάδοση σημάτων	14
1.2 Ζώνες συγνοτήτων	15
1.3 Ασύοματα συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών	
1 3 1 Τύποι κυνελών	19
1.3.2 Τύποι διαύλων επικοινωνίας	20
1.3.3 Στόχοι των κυψελωτών συστημάτων	21
1.3.4 Πολλαπλή ποοσπέλαση	22
1.3.5 Evertée source	23
1.5.5 Τ ενικές εφαρμογές	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Το ασύρματο περιβάλλον στις κινητές επικοινωνίες	26
2.1 Γενικές αρχές για τη διάδοση	
2.2 Απώλειες διαδρομής	29
2.2.1 Απώλειες ελευθέρου γώρου	
2.2.2 Διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια	
2 2 3 Απώλειες διάδοσης σε συστήματα μη-οπτικής και οπτικής επαφ	\dot{mc} 32
$2.24 \Sigma \kappa (\alpha \sigma n \kappa \alpha) \alpha \pi \omega \lambda \epsilon \epsilon \epsilon \delta (\alpha \delta \alpha \omega) n \epsilon$	33
2.2.5 Μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Διαλείψεις	36
3.1 Εισαγωγή	
3.2 Μακροχρόνιες διαλείψεις	
3.3 Βραχυχρόνιες διαλείψεις	
3.3.1 Πολυδιαδρομική διάδοση	40
3.3.2 Ολίσθηση Doppler	43
3.3.3 Παράμετροι χρονικής διασποράς	
3.3.4 Εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού	
3.3.5 Εξάπλωση Doppler και χρόνος συνοχής	
3.3.6 Τύποι βραγυγρόνιων διαλείψεων	51
3.3.6.1 Διαλείψεις που οφείλονται στη γρονική διασπορά καθυστές	onσnc52
3.3.6.2 Διαλείψεις που οφείλονται στη διασπορά Doppler	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Ασύρματη διάδοση εσωτερικού χώρου – Indoor propag	gation 58
4.1 Εισαγωγή	
4.2 Εμπειρικά μοντέλα διάδοσης εντός κτιρίων (within buildings)	59
4.2.1 Παράγοντας για τοίχους και πατώματα	59
4.2.2 Μοντέλο COST231 πολλαπλών τοίχων	61
4.2.3 Μοντέλο Ericsson	
4.3 Εμπειρικά μοντέλα διάδοσης μέσα σε κτίρια (into buildings)	
4.3.1 Εισανωνή	63
4 3 2 Μοντέλο COST231 οπτικής επαφής	63
433 Μοντέλα κέρδους ορόφου	
4 3 4 Μοντέλο COST231 μη οπτικής επαφής	
1.5. 1 110 1 1000 000 1 25 1 µij on tukije on uvje	

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

4.4 1 Διάδοση ματαξά ορόαφου	66
$4.4.1 \Delta \mu 0001 \mu \epsilon \mu \zeta 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0$	00
4.4.3 Βασικοί παράμετορι των αυσικών μοντέλων	70
4 5 Κεραίες εσωτερικού νώρου	71
4.5.1 Κατανεμημένες κεραίες	
4.6 Συμπέρασμα	73
	- /
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Το πρόγραμμα προσομοίωσης SuperNEC	74
5.1 Εισαγωγή	74
5.2 Η αριθμητική μέθοδος του SuperNEC	75
5.3 Θεωρία του προγράμματος SuperNEC	76
5.3.1 Η εξίσωση του Pocklington	79
5.3.2 Περίθλαση από ακμές	79
5.3.3 Περίθλαση από γωνίες	82
5.3.4 Μέθοδος των ειδώλων	82
5.3.5 Τα στοιχεία ακτινοβολίας που περιλαμβάνονται στο SuperNEC	83
	0.4
ΚΕΨΑΛΑΙΟ 6 : Στατιστικά μοντελά περιγραφης ρραχυχρονιών οιαλειψεών	v 84
6.1 Εισαγωγή	84
6.2 Κατανομή Rice	84
6.3 Kατανομή Rayleigh	85
6.4 Λογαριθμοκανονική κατανομή	87
6.5 Κατανομή VeCa	87
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7 1 Εισανωνή	94 94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης	94 94 95
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2 1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 	94 94 95 95
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πουπού και δέκτη στα 1800 MHz 	94 95 95 95
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτοικές πλάκες (UTD plates) 	94 95 95 95 98 104
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης	94 95 95 95 98 104 105
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης 	94 95 95 95 98 104 105 107
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση	94 95 95 98 104 105 107 111
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης	94 95 95 95 95 98 104 105 107 111 116
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 7.3.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh 7.3.4 Παράγοντας απορρόφησης παρουσία ανθρώπου 	94 95 95 95 98 104 105 107 111 116 119
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση	94 95 95 95 95 98 104 105 107 111 116 119 124
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση	94 95 95 95 95 98 104 105 107 111 116 119 124 128
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 7.3.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh 7.3.3 Εξάρτηση λαμβανόμενου σήματος από την απόσταση d 7.3.4 Παράγοντας απορρόφησης παρουσία ανθρώπου 7.3.6 Στατιστική μελέτη της απόστασης d 7.4 Έλεγχος VeCa για το συνολικό φαινόμενο 	94 95 95 95 98 104 105 107 111 116 119 124 128 130
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης	94 95 95 95 95 95 95 95 95
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης	94 94 95 95 98 104 105 107 111 116 116 119 124 128 130 136 136
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 7.3.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh 7.3.4 Παράγοντας απορρόφησης παρουσία ανθρώπου 7.3.5 Εισαγωγή της αποδοτικότητας στις μετρήσεις 7.3.6 Στατιστική μελέτη της απόστασης d 7.4 Έλεγχος VeCa για το συνολικό φαινόμενο 7.5 Συμπέρασμα 7.6.1 Μετρήσεις και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 	94 94 95 95 95 98 104 105 107 111 116 119 124 128 130 136 136 138
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 7.3.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh 7.3.4 Παράγοντας απορρόφησης παρουσία ανθρώπου 7.3.5 Εισαγωγή της αποδοτικότητας στις μετρήσεις 7.3.6 Στατιστική μελέτη της απόστασης d 7.4 Έλεγχος VeCa για το συνολικό φαινόμενο 7.5 Συμπέρασμα 7.6 Αντίστροφο πείραμα 7.6.1 Μετρήσεις και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης 	94 94 95 95 95 98 104 105 107 111 116 116 119 124 128 130 136 136 138 141
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 7.3.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh 7.3.4 Παράγοντας απορρόφησης παρουσία ανθρώπου 7.3.5 Εισαγωγή της αποδοτικότητας στις μετρήσεις 7.3.6 Στατιστική μελέτη της απόστασης d 7.4 Έλεγχος VeCa για το συνολικό φαινόμενο 7.5 Συμπέρασμα 7.6.1 Μετρήσεις και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης 7.6.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh στο αντίστροφο πείραμα 7.6.3 Στατιστική μελέτη της απόστασης d 	94 95 95 95 95 95 104 105 107 111 116 124 124 136 136 136 136 131
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 7.3.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh 7.3.5 Εξάρτηση λαμβανόμενου σήματος από την απόσταση d 7.3.6 Στατιστική μελέτη της απόστασης d 7.4 Έλεγχος VeCa για το συνολικό φαινόμενο 7.5 Συμπέρασμα 7.6.1 Μετρήσεις και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης 7.6.2 Έλεγχος VeCa για το αντίστροφο πείραμα 7.6.4 Έλεγχος VeCa για το αντίστροφο πείραμα 	94 95 95 95 95 95 95 95 95
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση 7.1 Εισαγωγή 7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης 7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου 7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz 7.2.3 Διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) 7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα 7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 7.3.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh 7.3.5 Εισαγωγή της αποδοτικότητας στις μετρήσεις 7.3.6 Στατιστική μελέτη της απόστασης d 7.4 Έλεγχος VeCa για το συνολικό φαινόμενο 7.5 Συμπέρασμα 7.6.1 Μετρήσεις και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. 7.6.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh στο αντίστροφο πείραμα 7.6.4 Έλεγχος VeCa για το αντίστροφο πείραμα 7.6.4 Έλεγχος VeCa για το αντίστροφο πείραμα 7.6.4 Έλεγχος VeCa για το αντίστροφο πείραμα 	94 95 95 95 95 95 95 95 95
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 : Προσομοίωση	94 94 95 95 95 98 104 105 107 111 116 119 124 128 130 136 136 136 138 141 153 155 159

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα (1.1)	Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	15
Σχήμα (1.2)	Δομικά στοιχεία συστήματος κινητών επικοινωνιών	18
Σχήμα (1.3)	Τύποι κυψελών	20
Σχήμα (2.1)	Οι τρεις σημαντικότεροι μηχανισμοί διάδοσης : ανάκλαση (R), περίθλαση (D), σκέδαση (S)	28
Σχήμα (2.2)	Λαμβανόμενο σήμα συναρτήσει της απόστασης πομπού – δέκτη	20 29
Σχήμα (2.3)	Διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια	31
Σχήμα (2.4)	Περιβάλλον διάδοσης επίγειων κινητών επικοινωνιών	32
Σχήμα (3.1)	Υπολογισμός του τοπικού μέσου όρου	38
Σχήμα (3.2)	Πολυδιαδρομική διάδοση στις κινητές επικοινωνίες	41
Σχήμα (3.3)	Μετάδοση σήματος στενής ζώνης και επίδειξη δυο ακραίων περιπτώσεων	42
Σχήμα (3.4)	Περιβάλλουσα λαμβανόμενου σήματος με δύο εισερχόμενα μονοπάτια διάδοσης.	43
Σχήμα (3.5)	Ολίσθηση Doppler	44
Σχήμα (3.6)	Παράδειγμα πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος	45
Σχήμα (3.7α)	Δείγμα μετρήσεων προφίλ καθυστέρησης καναλιού στα 900 MHz	45
Σχήμα (3.7β)	Δείγμα μετρήσεων προφίλ καθυστέρησης καναλιού στα 1700 MH	46
Σχήμα (3.8)	Προφίλ καθυστέρησης ισχύος	48
Σχήμα (3.9)	Τύποι βραχυχρόνιων διαλείψεων	51
Σχήμα (3.10)	Χαρακτηριστικά διαύλου με επίπεδες διαλείψεις	52
Σχήμα (3.11)	Χαρακτηριστικά διαύλου με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς συχνότητα	54
Σχήμα (3.12α)	Διάγραμμα απεικόνισης των βραχυχρόνιων διαλείψεων συναρτήσει της διάρκειας συμβόλου	56
Σχήμα (3.12β)	Διάγραμμα απεικόνισης των βραχυχρόνιων διαλείψεων συναρτήσει του εύρους ζώνης του σήματος βασικής ζώνης	56
Σχήμα (4.1)	Παράδειγμα πικοκυψέλης	59
Σχήμα (4.2)	Παράδειγμα απωλειών διαδρομής σε εσωτερικό χώρο με γραφεία	60
Σχήμα (4.3)	Απώλειες ορόφου για το μοντέλο COST231 πολλαπλών τοίχων	62
Σχήμα (4.4)	Γεωμετρία του μοντέλου COST231 οπτικής επαφής	63
Σχήμα (4.5)	Γεωμετρία διείσδυσης κτιρίων σε συνθήκες μη οπτικής επαφής	65
Σχήμα (4.6)	Διαφορετικά μονοπάτια διάδοσης μεταξύ ορόφων	67
Σχήμα (4.7)	Γεωμετρία δυο ακμών	67
Σχήμα (4.8)	Μεταβολή των απωλειών διαδρομής συναρτήσει του αριθμού ορόφων	69
Σχήμα (4.9)	Διάδοση μεταξύ κεραιών τοποθετημένων στον ίδιο όροφο	70
Σχήμα (4.10)	Τυπική κεραία χρήσης σε εσωτερικό χώρο	71
Σχήμα (4.11)	Κάλυψη εσωτερικού χώρου με (α) μία κεραία και (β) κατανεμημένες κεραίες	72
Σχήμα (4.12)	Ισχύς κατανεμημένων κεραιών συγκρινόμενη με απλή κεραία : συνολικά ακτινοβολούμενη ισχύς και ισχύς για κάθε κεραία-στοιχείο	73
Σχήμα (5.1α)	Μοντέλο αεροσκάφους με κεραίες κατασκευασμένο με τη μέθοδο των ροπών	76
Σχήμα (5.1β)	Μοντέλο αεροσκάφους κατασκευασμένο σύμφωνα με τη γεωμετρική μέθοδο της περίθλασης	76

Σχήμα (5.2)	Οι διαφορετικοί συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη όταν συμπληρώνεται ο πίνακας αλληλεπιδράσεων της μεθόδου των ροπών		
Σ χήμα (5.3)	Περίθλαση σε ακμή		
Σχήμα (5.4)	Οι επιφάνειες ο και η σε μια ακμή (κάτοψη)		
Σχήμα (5.5)	Μέθοδος των ειδώλων	83	
Σχήμα (6.1)	Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rice σε λογαριθμική κλίμακα για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου Κ		
Σχήμα (6.2)	Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rayleigh		
Σχήμα (6.3)	Μεταβολή περιβάλλουσας σήματος σε περιβάλλον διαλείψεων Rayleigh		
Σχήμα (6.4)	Διάταξη πομπού και δέκτη παρουσία κεφαλιού χρήστη		
Σχήμα (7.1α)	Κάτοψη της διάταξης εσωτερικού χώρου	96	
Σχήμα (7.1β)	Πλάγια όψη της διάταξης εσωτερικού χώρου	96	
Σχήμα (7.1γ)	Άλλα όψη της διάταξης εσωτερικού χώρου	97	
Σχήμα (7.2)	Η κεραία του δέκτη	99	
Σχήμα (7.3)	Η κεραία του πομπού	99	
Σχήμα (7.4α)	Κάτοψη της κεραίας του πομπού και του ανθρώπινου ομοιώματος	100	
Σχήμα (7.4β)	Πλάγια όψη της κεραίας του πομπού και του βιολογικού σκεδαστή	100	
Σχήμα (7.5α)	Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή ανάκλασης του πομπού συναρτήσει της απόστασης d	102	
Σχήμα (7.5β)	Διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης εισόδου του πομπού συναρτήσει της απόστασης d	102	
Σχήμα (7.6)	Καθορισμός παραμέτρων διηλεκτρικής πλάκας	105	
Σχήμα (7.7α)	Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση πομπού-κεφαλιού d=1 cm	107	
Σχήμα (7.7β)	Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση πομπού-κεφαλιού d=2.6 cm	107	
Σχήμα (7.7γ)	Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση πομπού-κεφαλιού d=5 cm	108	
Σχήμα (7.8α)	Πειραματική και θεωρητική CDF για d=1 cm	114	
Σχήμα (7.8β)	Πειραματική και θεωρητική CDF για d=2.6 cm	115	
Σχήμα (7.8γ)	Πειραματική και θεωρητική CDF για d=5 cm	115	
Σχήμα (7.9α)	Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-6 έως x=-5.82m	116	
Σχήμα (7.9β)	Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.80 έως x=-5.62m	116	
Σχήμα (7.9γ)	Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.60 έως x=-5.42m	117	
Σχήμα (7.9δ)	Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.40 έως x=-5.22m	117	
Σχήμα (7.9ε)	Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.20 έως x=-5m	118	
Σχήμα (7.10α)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-6 έως x=-5.82m	126	
Σχήμα (7.10β)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για		

	x=-5.80 έως x=-5.62m	126
Σχήμα (7.10γ)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.60 έως x=-5.42m	127
Σχήμα (7.10δ)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για $x=-5.40$ έως $x=-5.22m$	127
Σχήμα (7.10ε)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.20 έως x=-5m	128
Σχήμα (7.11)	Απεικόνιση της κίνησης του χρήστη	131
Σχήμα (7.12)	Σύγκριση των CDF	135
Σχήμα (7.13)	Σύγκριση των PDF	135
Σχήμα (7.14α)	Κάτοψη της διάταξης εσωτερικού χώρου	137
Σχήμα (7.14β)	Πλάγια όψη της διάταξης εσωτερικού χώρου	137
Σχήμα (7.15α)	Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση δέκτη-κεφαλιού 1 cm.	140
Σχήμα (7.15β)	Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση δέκτη-κεφαλιού 2.6 cm.	140
Σχήμα (7.15γ)	Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση δέκτη-κεφαλιού 5 cm	141
Σχήμα (7.16α)	Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητού-κεφαλιού 1 cm	145
Σχήμα (7.16β)	Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητού-κεφαλιού 2.6 cm	145
Σχήμα (7.16γ)	Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητού-κεφαλιού 5 cm	146
Σχήμα (7.17α)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-6 έως x=- 5.82m	146
Σχήμα (7.17β)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.80 έως x=- 5.62m	147
Σχήμα (7.17γ)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.60 έως x=-5.42m.	147
Σχήμα (7.17δ)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.40 έως x=- 5.22m	148
Σχήμα (7.17ε)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.20 έως x=-5m.	148
Σχήμα (7.18α)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για $x=-6$ έως $x=-5.82m$.	151
Σχήμα (7.18β)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για $x=-5.80$ έως $x=-5.62m$	151
Σχήμα (7.18γ)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για $x=-5.60$ έως $x=-5.42m$	152
Σχήμα (7.18δ)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για $x=-5.40$ έως $x=-5.22m$	152
Σχήμα (7.18ε)	Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.20 έως x=-5m	153
Σχήμα (7.19)	Σύγκριση των CDF	158
Σχήμα (7.20)	Σύγκριση των PDF	158

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας (1.1)	Κατηγοριοποίηση φάσματος ραδιοσυχνοτήτων	16
Πίνακας (3.1)	Εκθέτης απωλειών σε διάφορα περιβάλλοντα	39
Πίνακας (3.2)	Τυπικές τιμές <i>rms</i> καθυστέρησης	47
Πίνακας (4.1)	Εκθέτης απωλειών διαδρομής σύμφωνα με το μοντέλο της ITU-R	60
Πίνακας (4.2)	Παράγοντας απωλειών διείσδυσης ορόφων	61
Πίνακας (4.3)	Μοντέλο Ericsson εσωτερικής διάδοσης	62
Πίνακας (4.4)	Παράμετροι για το μοντέλο COST231 οπτικής επαφής	64
Πίνακας (4.5)	Παράμετροι για το μοντέλο COST231 μη οπτικής επαφής	66
Πίνακας (4.6)	Διηλεκτρική σταθερά τυπικών υλικών κατασκευής κτιρίων	70
Πίνακας (7.1)	Αντίσταση εισόδου του δέκτη για διάφορα μήκη διπόλου	98
Πίνακας (7.2)	Αντίσταση εισόδου του πομπού για διάφορες τιμές d	101
Πίνακας (7.3)	Μετρήσεις προσομοίωσης $I(A)$	106
Πίνακας (7.4)	Ακτινοβολούμενη ισχύς για διαφορετικές αποστάσεις d	109
Πίνακας (7.5)	Κανονικοποιημένες τιμές της περιβάλλουσας	110
Πίνακας (7.6)	Τιμές περιβάλλουσας για δεδομένη απόσταση <i>d</i> =2 cm	111
Πίνακας (7.7)	Αναλυτικός έλεγχος X^2 για διαλείψεις Rayleigh	113
Πίνακας (7.8)	Αποτελέσματα ελέγχων Χ ²	113
Πίνακας (7.9)	Υπολογισμοί ισχύος και αποδοτικότητας Η.R.Chuang	120
Πίνακας (7.10)	Προσέγγιση της αποδοτικότητας δ	120
Πίνακας (7.11)	Μεταβολές λόγω συχνότητας	122
Πίνακας (7.12)	Λόγοι των SAR σε κάθε απόσταση d	122
Πίνακας (7.13)	Προσδιορισμός δ στα 1800 MHz	123
Πίνακας (7.14)	Κανονικοποιημένες τιμές περιβάλλουσας με απορρόφηση	125
Πίνακας (7.15)	Έλεγχος X^2 για Rayleigh	129
Πίνακας (7.16)	Παραγωγή τυχαίου δείγματος	132
Πίνακας (7.17)	Αναλυτικός έλεγχος X^2 για VeCa και Rayleigh	134
Πίνακας (7.18)	Μετρήσεις προσομοίωσης $I(\mathbf{A})$ στο αντίστροφο πείραμα	139
Πίνακας (7.19)	Τιμές περιβάλλουσας για d=2 cm στο αντίστροφο πείραμα	142
Πίνακας (7.20)	Αναλυτικός έλεγχος X^2 για διαλείψεις Rayleigh	143
Πίνακας (7.21)	Αποτελέσματα ελέγχων Χ ²	144
Πίνακας (7.22)	Τιμές περιβάλλουσας με απορρόφηση στο αντίστροφο πείραμα	150
Πίνακας (7.23)	Έλεγχος X^2 για Rayleigh	154
Πίνακας (7.24)	Παραγωγή τυχαίου δείγματος	155
Πίνακας (7.25)	Αναλυτικός έλεγχος X^2 για VeCa και Rayleigh	157

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

1.1 Ασύρματη μετάδοση σημάτων

Η θεωρητική θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας έγινε από τον J.Maxwell, ο οποίος ενοποίησε τη θεωρία του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού μέσω των ομώνυμων κλασσικών εξισώσεων, προβλέποντας την ηλεκτρομαγνητική φύση του φωτός καθώς και το ότι το φως και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με κυματικές διαταραχές της ίδιας ταχύτητας. Ο G.Marconi υλοποίησε για πρώτη φορά το 1897 ένα σύστημα ασύρματης μετάδοσης, τον τηλέγραφο, βασιζόμενος στη θεωρία που είχε διατυπώσει αρκετά χρόνια πριν ο Maxwell. Οι πρώτες αποστολές τηλεγραφικών μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις πραγματοποιήθηκαν από το Marconi στις αρχές του εικοστού αιώνα, ενώ η ασύρματη μετάδοση φωνής σε μεγάλες αποστάσεις συνδυάστηκε με την εφεύρεση των ενισχυτικών λυχνιών και των ταλαντωτών κατά τη δεκαετία 1905-1915.

Από την εποχή του Marconi μέχρι το 1940 η τεχνολογία των κεραιών επικεντρώθηκε στην κατηγορία των κεραιών σύρματος και με συχνότητες μέχρι UHF (Ultra High Frequencies). Από το 1940 άρχισε η χρησιμοποίηση και άλλων τύπων κεραιών, όπως ανοικτών κυματοδηγών, χοανοκεραιών, κεραιών με ανακλαστήρα κλπ. Η αλματώδης ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και της τεχνολογίας πληροφόρησης σε συνδυασμό με την αντίστοιχη αύξηση του όγκου της πληροφορίας που διακινείται παγκοσμίως έχουν επιφέρει και αναμένεται να δώσουν ακόμη μεγαλύτερη ώθηση στην περιοχή των κεραιών και των ασυρμάτων ζεύξεων, τόσο στην εισαγωγή νέων μεθόδων ανάλυσης σύνθετων κεραιών, όσο και στην ανάπτυξη συστημάτων έξυπνων κεραιών.

Μετά τον 2ο Παγκόσμιο πόλεμο αναπτύχθηκαν ταχέως τα Συστήματα Αναφοράς (Dispatch Systems) που χρησιμοποίησαν οι αστυνομικές δυνάμεις, εταιρίες ταξί και άλλοι οργανισμοί που διέθεταν στόλο οχημάτων. Οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν για τέτοια συστήματα βρίσκονται στο εύρος 70 – 470 MHz.

Πρόσφατα, παρουσιάστηκαν νέες υπηρεσίες όπως είναι οι τηλεειδοποιητές (radio pagers), οι ασύρματες κινητές συσκευές (hand-portable equipment) που χρησιμοποιούν οι ομάδες ασφαλείας και φυσικά οι συνδρομητές κυψελωτών συστημάτων τηλεφωνίας, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless Local Area Networks -WLANs) και υπηρεσίες προσωπικών επικοινωνιών (Personal Communications Services -PCS). Οι σύγχρονες υπηρεσίες κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιούν το συχνότητες από 900MHz έως 3GHz.

Η μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων γίνεται κατά δύο τρόπους, είτε με χρήση ενσύρματων μέσων, είτε με ασύρματη μετάδοση. Η χρήση ενσύρματων μέσων, όπως γραμμών μεταφοράς, κυματοδηγών ή οπτικών ινών, προτιμάται κυρίως για την τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση σημείων που είναι σταθερά και εντοπισμένα σε μικρή γεωγραφική έκταση. Ωστόσο οι οπτικές ίνες βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή και στη διασύνδεση σημείων μεγάλης απόστασης χάρη στην ικανότητά τους να μεταφέρουν τεράστιο φάσμα συχνοτήτων με μικρές απώλειες.

Από την άλλη πλευρά, η ασύρματη μετάδοση βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και χρησιμοποιεί κεραίες για την εκπομπή και για τη λήψη των σημάτων. Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της ασύρματης μετάδοσης είναι η αλγεβρική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή, το σχετικά μικρό κόστος εγκατάσταση και λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου και η δυνατότητα κινητών επικοινωνιών.

1.2 Ζώνες συχνοτήτων

Οι ραδιοσυχνότητες εκτείνονται από περίπου 3 KHz έως 300 GHz, παρόλο που είναι δυνατή η διάδοση ραδιοκυμάτων και σε συχνότητες μερικών KHz. Κατόπιν διεθνούς συμφωνίας, το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων χωρίζεται στις ζώνες που φαίνονται στον σχήμα (1.1) και παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα (1.1).



Σχήμα (1.1) : Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

FREQUENCY BAND	FREQUENCY RANGE
Extremely Low Frequency (ELF)	< 3 KHz
Very Low Frequency (VLF)	3 – 30 KHz
Low Frequency (LF)	30 – 300 KHz
Medium Frequency (MF)	300 KHz – 3 MHz
High Frequency (HF)	3 – 30 MHz
Very High Frequency (VHF)	30 – 300 MHz
Ultra High Frequency (UHF)	300 MHz – 3 GHz
Super High Frequency (SHF)	3 – 30 GHz
Extra High Frequency (EHF)	30 – 300 GHz

Πίνακας (1.1) : Κατηγοριοποίηση Φάσματος Ραδιοσυχνοτήτων

Στην ζώνη VLF το μήκος κύματος είναι πολύ μεγάλο με αποτέλεσμα οι αποδοτικές κεραίες να έχουν μεγάλες διαστάσεις. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι μικρό και συνεπώς ο ρυθμός μετάδοσης στις ψηφιακές επικοινωνίες (που είναι ανάλογος του εύρους ζώνης) να είναι χαμηλός. Τα ραδιοκύματα της ζώνης αυτής ανακλώνται από την ιονόσφαιρα και επιστρέφουν προς την επιφάνεια της γης επιτυγχάνοντας επικοινωνία μακρών αποστάσεων που εφαρμόζεται στην τηλεγραφία και στη ναυσιπλοΐα. Η επικοινωνία στην ζώνη VLF χρησιμοποιείται και στις υποθαλάσσιες επικοινωνίες αφού η εξασθένιση του σήματος στο νερό είναι μικρότερη στις χαμηλές συχνότητες.

Στις ζώνες LF και MF ο κύριος τρόπος διάδοσης είναι τα κύματα εδάφους με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά διάδοσης να επηρεάζονται από την παρουσία του εδάφους. Στην ζώνη LF το κύμα επιφάνειας χρησιμοποιείται επιτυχώς για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων. Οι κεραίες έχουν αρκετά μεγάλο μέγεθος καθότι το μήκος κύματος είναι πολύ μεγάλο. Επιπλέον στη ζώνη αυτή χρησιμοποιούνται πομποί υψηλής ισχύος.

Το αυξημένο εύρος ζώνης στη ζώνη MF επιτρέπει την ραδιοφωνική εκπομπή AM. Av και η εξασθένηση στο επιφανειακό κύμα MF είναι μεγαλύτερη, είναι δυνατή η εκπομπή σε αποστάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων, κυρίως την ημέρα. Τη νύχτα είναι δυνατή η διάδοση ιονοσφαιρικού κύματος με αποτέλεσμα να δημιουργεί παρεμβολή στο κύμα εδάφους. Η παρεμβολή αυτή μπορεί να έχει ενισχυτικό ή καταστροφικό χαρακτήρα ανάλογα με τις φάσεις των κυμάτων που συμβάλλουν και τις μεταβολές ύψους του στρώματος D (D - layer) της ιονόσφαιρας. Το φαινόμενο αυτό έχει ονομαστεί διάλειψη (fading) και εμφανίστηκε για πρώτη φορά σε ασύρματες επικοινωνίες της ζώνης αυτής στη δεκαετία του '50 και του '60. Είναι από τα πιο σημαντικά φαινόμενα στις ασύρματες κινητές επικοινωνίες γι' αυτό και θα γίνει εκτενής αναφορά στη συνέχεια.

Διάδοση με κύματα εδάφους είναι επίσης εφικτή στην HF ζώνη, αλλά η διάδοση με ιονοσφαιρικά κύματα είναι κυρίαρχη. Η μπάντα αυτή δεν χρησιμοποιείται για ασύρματες επικοινωνίες πολιτών. Ωστόσο, είναι δυνατή η επικοινωνία σε παγκόσμια κλίμακα λόγω των απλών ή πολλαπλών ανακλάσεων (hops) από τα διάφορα ιονοσφαιρικά στρώματα. Το ύψος των ιονοσφαιρικών στρωμάτων μεταβάλλεται με την ώρα της ημέρας, την εποχή του χρόνου και τη γεωγραφική θέση. Τα φαινόμενα αυτά προσέλκυσαν το ενδιαφέρον των ερευνητών εδώ και πολλά χρόνια λόγω των σοβαρών προβλημάτων που προκαλούν.

Οι συχνότητες στις μπάντες VHF και UHF είναι συνήθως πολύ υψηλές για ιονοσφαιρική διάδοση. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω της απευθείας και της ανακλώμενης συνιστώσας του κύματος χώρου. Οι κεραίες στις μπάντες αυτές έχουν αρκετά μικρό φυσικό μέγεθος και μπορούν να τοποθετηθούν σε ιστούς με ύψος αρκετά μεγάλο σε σύγκριση με το μήκος κύματος. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το κύμα χώρου υπερισχύει έναντι του κύματος επιφάνειας για τις μπάντες VHF και UHF. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι ικανοποιητικό για υψηλής ποιότητας ραδιοφωνία FM και τηλεοπτικά κανάλια. Βέβαια, η διάδοση περιορίζεται σε σημεία μέσα στον ορίζοντα και η κάλυψη είναι αναγκαστικά τοπική. Η ανάλυση της διάδοσης του κύματος χώρου στις μπάντες VHF και UHF απαιτεί να ληφθούν υπόψη προβλήματα ανακλάσεων τόσο από το έδαφος όσο και από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια. Σημαντικά είναι επίσης τα φαινόμενα περίθλασης από κορυφές λόφων και κτίρια καθώς και τα φαινόμενα διάθλασης από χαμηλά στρώματα της ατμόσφαιρας.

Τα ραδιοκύματα με συχνότητες στην ζώνη SHF, αποκαλούνται και μικροκύματα, αφού το μήκος κύματος τους έχει μικρές διαστάσεις. Στη ζώνη αυτή είναι απαραίτητο να υπάρχει διάδοση οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλιώς οι απώλειες είναι πολύ υψηλές. Στις συχνότητες αυτές είναι δυνατή η σχεδίαση κεραιών με συγκεντρωμένη ενέργεια ακτινοβολίας, οι οποίες 'φωτίζουν' συγκεκριμένη κατεύθυνση. Οι συχνότητες αυτές χρησιμοποιούνται στις δορυφορικές επικοινωνίες (αφού διαπερνούν την ιονόσφαιρα χωρίς σημαντικές απώλειες), στις επίγειες ζεύξεις σημείου προς σημείο (point-to-point) και στα συστήματα ραντάρ.

Τα ραδιοκύματα στη ζώνη EHF συχνά χαρακτηρίζονται με τον όρο χιλιοστομετρικά κύματα (mm-wave). Στη ζώνη αυτή λόγω της υψηλής φέρουσας συχνότητας είναι διαθέσιμο μεγάλο εύρος ζώνης. Έτσι σε συνάρτηση με το γεγονός ότι οι χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων είναι κατειλημμένες, η ζώνη EHF αξιοποιείται από νέες υπηρεσίες. Υπερισχύει η διάδοση με οπτική επαφή (Line Of Sight-LOS), ενώ η παρεμβολή από ανάκλαση στο έδαφος δεν είναι σημαντική, αφού η ανωμαλία του εδάφους είναι πολύ μεγαλύτερη λόγω του μικρού μήκους κύματος. Τα πιο σημαντικά φαινόμενα στη μπάντα αυτή είναι η σκέδαση από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις (βροχή και χιόνι) και σε συγκεκριμένες συχνότητες η απορρόφηση από υδρατμούς και άλλα ατμοσφαιρικά αέρια.

1.3 Ασύρματα συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών

Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών φαίνονται στο σχήμα (1.2).



Σχήμα (1.2) : Δομικά στοιχεία συστήματος κινητών επικοινωνιών.

Ο κινητός σταθμός (MS) επικοινωνεί με το σταθμό βάσης (BTS) χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους ραδιοδιαύλους και την αντίστοιχη ραδιοεπαφή. Για όλα τα στοιχεία του συστήματος που επικοινωνούν μεταξύ τους, υπάρχουν συγκεκριμένες διεπαφές (interfaces). Με τον όρο κινητός σταθμός (MS) εννοούμε όλα τα τερματικά, είτε χειρός είτε φορητά (π.χ. σε laptop ή σε αυτοκίνητο). Οι σταθμοί βάσης (BTS) είναι οι σταθεροί σταθμοί του δικτύου που χρησιμοποιούνται για την ραδιοεπικοινωνία με τους MS. Ένας BTS είναι εγκατεστημένος είτε στο κέντρο είτε στα όρια μιας περιοχής κάλυψης και αποτελείται από τις κεραίες εκπομπής και λήψης, συνήθως πάνω σε ιστό, καθώς και από τους αντίστοιχους πομποδέκτες. Κάθε BTS συνδέεται και με το δίκτυο κορμού (backbone network) του παροχέα, μέσω ενός ελεγκτή που καλείται BSC (Base Station Controller). Πολλοί BSC συνδέονται σε ένα κέντρο μεταγωγής MSC (Mobile Switching Centre), που διαχειρίζεται και δρομολογεί τις κλήσεις σε μια μεγάλη περιοχή εξυπηρέτησης. Συνήθως ένα από τα MSC αναλαμβάνει και τη διασύνδεση του συστήματος κινητών επικοινωνιών (PLMN) με το σταθερό δίκτυο επικοινωνιών (PSTN) και ονομάζεται GMSC (Gateway Mobile Switching Centre).

Με την εισαγωγή των κυψελωτών συστημάτων, τα δίκτυα προσφέρουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες σε μεγάλο αριθμό χρηστών με περιορισμένο διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Η βασική ιδέα των κυψελωτών συστημάτων είναι ο περιορισμός της εκπεμπόμενης ισχύος από τους σταθμούς βάσης, ώστε να περιοριστεί η έκταση της

κάλυψης σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή, που καλείται κυψέλη, και η επαναχρησιμοποίηση των ραδιοδιαύλων του BTS από άλλο BTS που βρίσκεται σε κάποια απόσταση. Στα αναλογικά κυψελωτά συστήματα αλλά και σε αρκετά ψηφιακά κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί ένα μόνο τμήμα του διαθέσιμου φάσματος και κυψέλες που απέχουν αρκετά μεταξύ τους μπορούν να επαναχρησιμοποιούν το ίδιο τμήμα του φάσματος. Στα CDMA κυψελωτά συστήματα, ακόμη και γειτονικές κυψέλες είναι δυνατό να χρησιμοποιούν τους ίδιους ραδιοδιαύλους.

1.3.1 Τύποι κυψελών

Στα πρώτα κυψελωτά συστήματα η ακτίνα των κυψελών εκτείνονταν σε αρκετά χιλιόμετρα και εξυπηρετούσαν χρήστες που βρίσκονταν σε οχήματα. Κυψέλες με αρκετά μεγάλη ακτίνα της τάξης μερικών δεκάδων χιλιομέτρων καλούνται μακροκυψέλες (macrocells). Με την αύξηση του ποσοστού διείσδυσης στην αγορά, ο αριθμός των συνδρομητών που πρέπει να εξυπηρετηθούν σε μια συγκεκριμένη περιοχή αυξάνει. Με τις παρούσες τεχνολογίες ραδιοεπαφών και με δεδομένο τον περιορισμένο αριθμό των ραδιοδιαύλων, ο αριθμός των συνδρομητών που μπορούν να εξυπηρετηθούν είναι περιορισμένος. Για την υποστήριξη μεγαλύτερης χωρητικότητας, χρησιμοποιούνται ξανά οι ραδιοδίαυλοι μειώνοντας ταυτόχρονα την ισχύ εκπομπής από τους σταθμούς βάσης. Προκύπτουν λοιπόν μικρότερες σε έκταση κυψέλες που καλούνται μικροκυψέλες (microcells) και έχουν ακτίνα μέχρι 1km. Τα συστήματα 2^{ης} γενιάς χρησιμοποιούν και μικρότερες κυψέλες με ακτίνα περίπου 100m, που ονομάζονται πικοκυψέλες (picocells) και οι οποίες χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε εσωτερικούς χώρους αλλά και σε περιοχές υψηλής πυκνότητας τηλεπικοινωνιακής κίνησης (spots ή hot-spots).

Λόγω της έκτασης κάλυψης και των φαινομένων διάδοσης, οι macrocells προορίζονται κυρίως για παροχή υπηρεσιών στενής ζώνης σε αγροτικές ή ημιαστικές περιοχές με μικρή παρεμπόδιση της διάδοσης λόγω κτιρίων και σημαντική παρεμπόδιση λόγω βλάστησης. Οι BTS των macrocells τοποθετούνται συνήθως σε υψηλούς πύργους με καλή ορατότητα της περιοχής κάλυψης. Οι BTS των microcells τοποθετούνται συνήθως πάνω από τις στέγες κτιρίων και προορίζονται για παροχή υπηρεσιών στενής ζώνης. Οι BTS των picocells τοποθετούνται συνήθως στο επίπεδο των δρόμων προς κάλυψη, σε ύψη μέχρι 4m, και αν πρόκειται για εσωτερικούς χώρους σε διαδρόμους ή και σε ανελκυστήρες.

Για να εκμεταλλευτούμε τα πλεονεκτήματα όλων των τύπων των κυψελών, συνήθως σχεδιάζουμε τα δίκτυα με ιεραρχική δομή κυψελών, δηλαδή με επικάλυψη διαφορετικών τύπων κυψελών. Προκύπτουν έτσι δύο τύποι συστημάτων ιεραρχημένων κυψελών : τα συστήματα χαμηλής βαθμίδας ιεράρχησης (Low Tier Systems), όπου συνδυάζονται πικοκυψέλες και μικροκυψέλες (π.χ. DECT) και τα συστήματα υψηλής βαθμίδας ιεράρχησης (High Tier Systems) όπου συνδυάζονται μικροκυψέλες και μακροκυψέλες. (π.χ. στο GSM). Τα χαμηλής βαθμίδας συστήματα χρησιμοποιούνται για την κάλυψη μικρών περιοχών με πεζούς χρήστες, ενώ τα υψηλής βαθμίδας υποστηρίζουν και χρήστες κινούμενους με υψηλές ταχύτητες. Γενικά τα χαμηλής βαθμίδας συστήματα παρέχουν καλύτερη ποιότητα φωνής και μικρότερο κόστος λόγω της απουσίας τεχνικών αντιμετώπισης της χρονικής διασποράς.

Μια τελευταία κατηγορία κυψελών είναι αυτή των δορυφορικών συστημάτων που καλούνται megacells και καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Οι διάφοροι τύποι κυψελών απεικονίζονται στο σχήμα (1.3).



Σχήμα (1.3) : Τύποι κυψελών.

1.3.2 Τύποι διαύλων επικοινωνίας

Τα ασύρματα συστήματα ραδιομετάδοσης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο του διαύλου επικοινωνίας : τα simplex, τα half-duplex και τα fullduplex συστήματα. Στα simplex η επικοινωνία είναι δυνατή μόνο στη μια κατεύθυνση, με κλασικό παράδειγμα τα συστήματα τηλεειδοποίησης. Στα half-duplex συστήματα έχουμε αμφίδρομη αλλά όχι ταυτόχρονη επικοινωνία, χρησιμοποιείται δηλαδή ένας δίαυλος και για τις δυο κατευθύνσεις και συνεπώς ο χρήστης μια δεδομένη χρονική στιγμή μπορεί μόνο να εκπέμπει ή να λαμβάνει. Στα full-duplex συστήματα έχουμε ταυτόχρονη εκπομπή και μετάδοση μεταξύ χρηστών και σταθμών βάσης. Το σύστημα παρέχει δυο ταυτόχρονους διαύλους για επικοινωνία στις δυο κατευθύνσεις. Η κατεύθυνση από το σταθμό βάσης (BTS) προς τον κινητό σταθμό (MS) καλείται ευθεία (forward) ή κάτω ζεύξη (down-link), ενώ από τον MS προς τον BTS καλείται αντίστροφη (reverse) ή άνω ζεύξη (up-link). Οι δυο δίαυλοι είτε χρησιμοποιούν διαφορετική συχνότητα για την ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη, οπότε προκύπτει σύστημα Frequency Division Duplex (FDD), είτε χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα αλλά γειτονικές χρονοσχισμές, οπότε προκύπτει σύστημα Time Division Duplex (TDD).

Στα FDD συστήματα οι πομποδέκτες χρησιμοποιούν την ίδια κεραία για εκπομπή και λήψη, οπότε απαιτείται η χρήση διπλέκτη. Για την επαρκή απομόνωση εκπομπής και λήψης και για την ελαχιστοποίηση του κόστους του διπλέκτη απαιτείται αρκετή απόσταση μεταξύ των δυο διαύλων επικοινωνίας και φίλτρα με μικρή ζώνη διέλευσης. Στα TDD συστήματα είναι προφανές ότι δεν υπάρχει ανάγκη για στενά φίλτρα αλλά μεγάλη απαίτηση για ακριβή συγχρονισμό. Η υλοποίηση των TDD συστημάτων είναι δυνατή μόνο με ψηφιακές τεχνικές και απαιτεί τη χρήση χρονικών διαστημάτων φύλαξης (guard times) μεταξύ των χρονοσχισμών σε ένα χρονοπλαίσιο. Η απαίτηση αυτή προκύπτει από τη μεταβαλλόμενη καθυστέρηση διάδοσης αλλά και τη χρονική εξάπλωση του διαύλου λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Αν δεν υπήρχαν τα διαστήματα φύλαξης, τα σήματα σε γειτονικές χρονοσχισμές θα επικαλύπτονταν, προκαλώντας σημαντικές παραμορφώσεις. Τα διαστήματα φύλαξης είναι δυνατό να μειωθούν σε έκταση αν ρυθμίσουμε τη χρονική στιγμή εκπομπής των MS, επιτρέποντας στους πιο απομακρυσμένους MS να αρχίζουν την εκπομπή πιο νωρίς. Γενικά χρησιμοποιούμε FDD συστήματα σε περιπτώσεις που θέλουμε κάλυψη μεγάλων αποστάσεων με υψηλή ισχύ εκπομπής και TDD συστήματα σε περιπτώσεις όπου έχουμε περιορισμένο εύρος ζώνης και πυκνή δομή επαναχρησιμοποίησης. Ένα ακόμη πλεονέκτημα των TDD είναι η δυνατότητα απουσίας ακριβούς συγχρονισμού μεταξύ των BTS.

1.3.3 Στόχοι των κυψελωτών συστημάτων

Η πολυπλοκότητα των συστημάτων που επιτρέπουν ευρεία κάλυψη περιοχών και συγκεκριμένα των κυψελωτών συστημάτων επηρεάζει τις σημαντικές παραμέτρους του καναλιού. Οι τρεις στόχοι-κλειδιά είναι:

Κάλυψη και κινητικότητα: Το σύστημα πρέπει να είναι διαθέσιμο σε όλες τις τοποθεσίες που επιθυμούν οι χρήστες. Στο πρώιμο στάδιο ανάπτυξης του νέου συστήματος αυτό υπονοεί εξωτερική κάλυψη σε μια μεγάλη περιοχή. Καθώς το σύστημα εξελίσσεται και οι χρήστες γίνονται πιο απαιτητικοί, το εύρος κάλυψης επεκτείνεται ώστε να περιλάβει και εσωτερικούς χώρους. Για να λειτουργεί μια μόνο συσκευή στα διάφορα συστήματα με διαφορετικές προδιαγραφές, τα συστήματα πρέπει να παρέχουν την έννοια της κινητικότητας.

- Χωρητικότητα: Καθώς ο αριθμός των χρηστών σε ένα κινητό σύστημα μεγαλώνει, οι απαιτήσεις από τους διαθέσιμους πόρους στο κατανεμημένο φάσμα αυξάνονται αναλογικά. Αυτές οι απαιτήσεις διογκώνονται ακόμα περισσότερο από την αυξημένη χρήση υπηρεσιών πολύ υψηλών ρυθμών πληροφορίας. Αυτό κάνει αναγκαία την επαναχρησιμοποίηση καναλιών μεταξύ κυψελών για να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα με φραγμένες ή χαμένες κλήσεις. Όταν μια κλήση φράσσεται, οι χρήστες δεν έχουν πρόσβαση στο δίκτυο γιατί δεν υπάρχουν διαθέσιμα κανάλια. Όταν μια κλήση χάνεται, τότε σημαίνει ότι διακόπηκε γιατί ο χρήστης μπήκε σε κυψέλη που δεν έχει ελεύθερους διαύλους. Χαμένες κλήσεις μπορούν να προκύψουν κι από ανεπαρκή κάλυψη.
- Ποιότητα: Σε ένα ώριμο δίκτυο, η έμφαση δίνεται στη διασφάλιση ότι οι παρεχόμενες υπηρεσίες είναι υψηλής ποιότητας, και αυτό αφορά ποιότητα λόγου σε συστήματα φωνής και ρυθμό λαθών (bit error rate) σε συστήματα πληροφορίας.

1.3.4 Πολλαπλή προσπέλαση

Με δεδομένο το 'μερίδιο' του φάσματος συχνοτήτων που τους αναλογεί, σε διάφορους χρήστες, μπορούν να εκχωρούνται κανάλια σύμφωνα με διάφορες τεχνικές γνωστές σαν μέθοδοι πολλαπλής προσπέλασης. Έτσι, αποδίδονται αποκλειστικοί δίαυλοι σε πολλαπλούς χρήστες με διαίρεση του εύρους ζώνης. Η διαίρεση αυτή μπορεί να είναι συχνότητας (FDMA), χρόνου (TDMA), κώδικα (CDMA), χώρου (SDMA) ή και υβριδικοί συνδυασμοί αυτών.

Στην πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access) το ολικό εύρος ζώνης του συστήματος χωρίζεται σε ορθογωνικούς διαύλους μη επικαλυπτόμενους στη συχνότητα που αποδίδονται σε διαφορετικούς χρήστες.

Στην πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access) ο χρόνος χωρίζεται σε μη επικαλυπτόμενες χρονοσχισμές που αποδίδονται σε διαφορετικούς χρήστες, μεταξύ των οποίων απαιτείται συγχρονισμός. Σε σχέση με την FDMA τεχνική, ο ρυθμός μετάδοσης είναι πολλαπλάσιος κατά ένα παράγοντα ίσο με τον αριθμό των χρηστών που μοιράζονται το συχνοτικό δίαυλο (π.χ. 8 στο GSM). Άρα η διάρκεια του συμβόλου είναι μικρότερη κατά τον ίδιο παράγοντα, καθιστώντας την TDMA τεχνική ευάλωτη σε διασυμβολική παρεμβολή.

Στην πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access) ο χρόνος και το εύρος ζώνης χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα από διαφορετικούς χρήστες που διαμορφώνονται από ορθογωνικούς ή ημι-ορθογωνικούς κώδικες διασποράς. Με τους ορθογωνικούς κώδικες ο δέκτης μπορεί να ξεχωρίσει το επιθυμητό σήμα από τους άλλους CDMA χρήστες χωρίς παρεμβολές. Βέβαια μόνο περιορισμένος αριθμός ορθογωνικών κωδίκων διασποράς υπάρχει για κάθε δεδομένο εύρος ζώνης. Με τους ημιορθογωνικούς κώδικες ο δέκτης δεν μπορεί να ξεχωρίσει τελείως το επιθυμητό σήμα από τους άλλους χρήστες και έτσι απομένει μια παρεμβολή μεταξύ των χρηστών. Το πλεονέκτημα τους είναι ότι δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό κωδίκων σε δεδομένο εύρος ζώνης.

Τέλος, στην πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης χώρου (Space Division Multiple Access) γίνεται χρήση έξυπνων κεραιών που δίνουν τη δυνατότητα του χωρικού διαχωρισμού των χρηστών από τους σταθμούς βάσης και έτσι είναι δυνατή η χρήση των ίδιων πόρων του συστήματος για χωρικά διασκορπισμένους χρήστες.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι τεχνικές πολλαπλής προσπέλασης αφορούν στην απόδοση και χρήση των πόρων του συστήματος από διαφορετικούς χρήστες. Για τη συνεχή αμφίδρομη επικοινωνία ενός χρήστη, χρησιμοποιούνται οι τεχνικές duplexing FDD και TDD που αναφέρθηκαν.

1.3.5 Γενικές εφαρμογές

Υπάρχουν τρεις κύριες περιοχές εφαρμογής των ασυρμάτων κινητών επικοινωνιών, οι οποίες εμφανίζουν τεράστια ανάπτυξη και συνεπώς παρουσιάζουν μεγάλο σχεδιαστικό και ερευνητικό ενδιαφέρον.

 Ασύρματη πρόσβαση σε μεγάλα δίκτυα για προσωπικές επικοινωνίες χαμηλών απαιτήσεων

Οι προσωπικές επικοινωνίες χαμηλών απαιτήσεων στοχεύουν στο να παρέχουν κινητές υπηρεσίες φωνής και δεδομένων με μικρές φορητές συσκευές σε πεζούς και σχεδόν στάσιμους χρήστες μέσα σε σπίτια και κτίρια ή γύρω από αυτά. Στις ανεπτυγμένες χώρες πολλοί από τους κατοίκους των πυκνοκατοικημένων περιοχών βρίσκονται τον περισσότερο χρόνο της μέρας σε τέτοιο περιβάλλον και κατά συνέπεια δεν απαιτείται από τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που τους εξυπηρετούν να υποστηρίζουν κινητικότητα μεγάλης ταχύτητας. Οι προσωπικές επικοινωνίες αυτής της μορφής αποτελούν εξέλιξη των ασύρματων αναλογικών οικιακών τηλεφώνων, η χρήση των οποίων αυξήθηκε ραγδαία στις αρχές της δεκαετίας 1980. Παγκοσμίως διατίθενται ζώνες συχνοτήτων κοντά στα 1GHz και 2GHZ για τη λειτουργία νέων συστημάτων προσωπικών επικοινωνιών. Στα συστήματα αυτά οι κυριότεροι σχεδιαστικοί περιορισμοί προέργονται τόσο από τις εφαρμογές που πρέπει να υποστηριγθούν όσο και από το περιβάλλον. Η ασύρματη συσκευή φωνής/δεδομένων (μαζί με την μπαταρία της), που πρέπει να κουβαλούν οι χρήστες σε συνδυασμό με την ανάγκη να χρησιμοποιείται η συσκευή όλη μέρα χωρίς επαναφόρτιση της μπαταρίας, καθιστά το μέγεθος, το βάρος της και την κατανάλωση ισχύος σχεδιαστικούς στόχους μεγάλης σημασίας. Ο στόχος της ελαχιστοποίησης της κατανάλωσης ισχύος θέτει περιορισμούς στην ισχύ εκπομπής και στην πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων επεξεργασίας σήματος. Η χαμηλή ισχύς εκπομπής των πομπών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα αυτά και η ανάγκη να παρέγεται ευρεία κάλυψη σε πυκνοκατοικημένες περιογές υπαγορεύουν πυκνή διάταξη από σταθμούς βάσης οι οποίοι παρέχουν πρόσβαση σε μεγάλα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Επειδή οι σταθμοί βάσης που απαιτούνται για ένα μεγάλο σύστημα είναι πάρα πολλοί, πρέπει το κόστος τους να είναι χαμηλό και συνεπώς δεν μπορεί οι σταθμοί αυτοί να υποστηρίζουν πολύπλοκες λειτουργίες.

Λόγω της εξαιρετικής ανάγκης για οικονομία ισχύος, μικρό μέγεθος, βάρος και μικρή πολυπλοκότητα των τερματικών καθώς και λόγω της ανάγκης για παροχή κυκλώματος καλής ποιότητας, τα συστήματα για προσωπικές επικοινωνίες χαμηλών απαιτήσεων δέχονται συμβιβασμούς σε ό,τι αφορά τον αριθμό των χρηστών ανά MHz, ανά σταθμό βάσης και την περιοχή κάλυψης. Λόγω του μικρού μεγέθους και της κινητικότητας των τερματικών PCS (Personal Communication Services), υποστηρίζονται μέτριοι ρυθμοί μετάδοσης, από μερικές δεκάδες μέχρι εκατοντάδες kbps.

 Ασύρματα-κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών για προσωπικές επικοινωνίες υψηλών απαιτήσεων

Στόχος αυτών των συστημάτων είναι η παροχή υπηρεσιών σε κινητά τερματικά, που εμφανίζουν μεγάλη διασπορά σε δρόμους και λεωφόρους αστικών, ημιαστικών και αγροτικών περιοχών. Η σπουδαιότερη απαίτηση είναι η εξυπηρέτηση κινητών τερματικών μεγάλης ταχύτητας. Τα βήματα εξέλιξης που ακολουθήθηκαν στα κυψελωτά συστήματα είναι η μετάβαση σε ψηφιακή μετάδοση και η βελτίωση των διαδικασιών ελέγχου, ώστε η εγκατάσταση των κλήσεων και οι διαπομπές να γίνουν πιο περίτεχνες και αποτελεσματικές. Οι μεγαλύτερες επικρίσεις για τα ψηφιακά κυψελωτά συστήματα προήλθαν από το γεγονός ότι γρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα συστήματα μεγάλοι και υψηλού κόστους σταθμοί βάσης. Έτσι, η μεγαλύτερη μέριμνα αφορούσε στον περιορισμό του αριθμού των ακριβών σταθμών βάσης. Τούτο οδήγησε τη σχεδίαση στο να παρέχει μεγάλη χωρητικότητα χρηστών αυξάνοντας τον αριθμό χρηστών ανά MHz και ανά σταθμό βάσης. Λόγω της μεγάλης αυτής επιδίωξης για μεγιστοποίηση του αριθμού χρηστών, η εξέλιξη των ψηφιακών κυψελωτών συστημάτων δέχτηκε συμβιβασμούς που οδήγησαν σε υψηλή πολυπλοκότητα των συσκευών. Συνολικά, οι συμβιβασμοί δέχονται υψηλή πολυπλοκότητα τερματικών, υψηλή κατανάλωση ισχύος εκπομπής και επεξεργασίας σήματος και χαμηλή ποιότητα κυκλωμάτων. Τα συστήματα που αναπτύχθηκαν είχαν ως στόχο την υποστήριξη χαμηλού ρυθμού δεδομένων, της τάξης των 10 kbps, ενώ αναπτύχθηκαν και συστήματα για μετάδοση πακέτων με σύντομα μηνύματα.

• Ασύρματα τοπικά δίκτυα

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (Wireless LAN, WLAN) παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης (Mbps) σε μικρή περιοχή με κινητικότητα των χρηστών. Οι μικρές περιοχές μπορεί να είναι μεγάλα κτίρια, πανεπιστημιουπόλεις, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα, βιομηχανίες κτλ. Παγκοσμίως τα συστήματα αυτά λειτουργούν στην ISM (Industrial Scientific & Medical) ζώνη συχνοτήτων γιατί δεν απαιτείται άδεια λειτουργίας. Παραδείγματα ISM ζωνών είναι η περιοχή των 2.4GHz, των 5.2GHz και των 17GHz με κάποιες παραλλαγές ανά περιοχή. Το πλεονέκτημα της μη απαιτούμενης αδειοδότησης μετατρέπεται εύκολα σε μειονέκτημα, αν αναλογιστούμε ότι στην ίδια ζώνη συχνοτήτων λειτουργούν παρόμοια συστήματα, αυξάνοντας τις υπάρχουσες παρεμβολές. Για το λόγο αυτό τα WLAN συστήματα πρέπει να εκπέμπουν με περιορισμένη ισχύ ανά μονάδα εύρους ζώνης και για να το επιτύχουν χρησιμοποιούν τεχνικές διασποράς φάσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Το ασύρματο περιβάλλον στις κινητές επικοινωνίες

2.1 Γενικές αρχές για την διάδοση

Στα συστήματα κινητών επικοινωνιών η επικοινωνία κινητών σταθμών και σταθμών βάσης στηρίζεται σε διάφορους μηχανισμούς διάδοσης των ραδιοκυμάτων που λαμβάνουν χώρα λόγω του μέσου διάδοσης. Φυσικά και τεχνητά εμπόδια συμμετέχουν στη διάδοση και επηρεάζουν το λαμβανόμενο σήμα. Η ενέργεια που φθάνει στο δέκτη ακολουθεί διαφορετικά μονοπάτια διάδοσης. Ουσιαστικά τα αφικνούμενα ραδιοκύματα καταφθάνουν από διαφορετικές κατευθύνσεις εξαιτίας των ποικίλων μηχανισμών ραδιοδιάδοσης.

Οι κινητές επικοινωνίες χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητες στη ζώνη από μερικές εκατοντάδες MHz μέχρι λίγα GHz. Η κατανομή της μέσης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος σε μια συγκεκριμένη περιοχή ή σε ένα συγκεκριμένο χώρο είναι κατά κύριο λόγο βασική απαίτηση για αξιόπιστη επικοινωνία. Η ισχύς αυτή πρέπει να είναι επαρκής για την εξυπηρέτηση της ζητούμενης ζεύξης, αλλά δεν πρέπει να είναι και αυθαίρετα μεγάλη ώστε να προκαλεί παρεμβολή σε άλλη ζεύξη με την ίδια συχνότητα. Επειδή όμως η ραδιοζεύξη μεταβάλλεται πάρα πολύ καθώς ο κινητός δέκτης διανύει μικρές αποστάσεις, δεν ενδιαφέρει μόνο η μέση ισχύς αλλά και η στατιστική συμπεριφορά της. Μας ενδιαφέρει επίσης η ποιότητα του σήματος, γιατί μπορεί να είναι τέτοια, ώστε να εμφανίζονται σφάλματα κατά οποιονδήποτε τρόπο, ακόμη και αν υπάρχει επαρκής διαθέσιμη ισχύς για τις επικοινωνίες. Αυτό συμβαίνει κυρίως κατά τις απότομες κινήσεις σε περιβάλλον με πολλά εμπόδια, όπου δεν υπάρχει απευθείας οπτική επαφή πομπού και δέκτη και προκαλούνται σκεδάσεις. Οι μηχανισμοί που διέπουν την ραδιοδιάδοση είναι πολύπλοκοι και ποικίλοι και μπορούν γενικά να συνοψιστούν σε τρεις βασικούς:

Ανάκλαση (reflection)

Ανάκλαση συμβαίνει όταν το διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε αντικείμενο με διαστάσεις πολύ μεγάλες συγκρινόμενες με το μήκος κύματος του διαδιδόμενου κύματος. Ανάκλαση προκαλείται από την επιφάνεια του εδάφους, τους τοίχους και τα έπιπλα. Όταν έχουμε ανάκλαση το κύμα μπορεί επίσης να διαθλαστεί μερικώς. Οι συντελεστές της ανάκλασης και της διάθλασης είναι συναρτήσεις των ιδιοτήτων του υλικού μέσου και γενικά εξαρτώνται από την πόλωση του κύματος, τη γωνία πρόσπτωσης και τη συχνότητα.

Περίθλαση (diffraction)

Περίθλαση συμβαίνει όταν η διαδρομή του κύματος μεταξύ πομπού και δέκτη εμποδίζεται από επιφάνεια με αιχμές. Τα κύματα (δευτερογενή) που παράγονται από την παρεμβαλλόμενη επιφάνεια εμφανίζονται ακόμα και πίσω από αυτή και φτάνουν στο δέκτη ακόμα και όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού-δέκτη. Σε υψηλές συχνότητες η περίθλαση εξαρτάται από τη γεωμετρία του αντικειμένου-εμποδίου καθώς και από το πλάτος, τη φάση και την πόλωση του κύματος στο σημείο πρόσπτωσης. Γενικά η περίθλαση είναι σπουδαίο φυσικό φαινόμενο, αφού σε αυτήν οφείλεται η διάδοση κυμάτων γύρω από εμπόδια.

Σκέδαση (scattering)

Σκέδαση λαμβάνει χώρα όταν το μέσο στο οποίο διαδίδεται το κύμα αποτελείται από αντικείμενα με μικρές διαστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος και ο αριθμός των αντικειμένων-εμποδίων ανά μονάδα όγκου είναι μεγάλος. Τα σκεδαζόμενα κύματα παράγονται από ανώμαλες επιφάνειες, μικρά αντικείμενα ή άλλες ανωμαλίες του καναλιού. Στην πράξη, φύλλα, σηματοδότες, οδικά σήματα και σκάλες σε κτίρια μπορούν να προκαλέσουν σκέδαση σε κινητά συστήματα επικοινωνιών. Μια βάσιμη γνώση των φυσικών λεπτομερειών των αντικειμένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή πρόβλεψη της ισχύος του σκεδαζόμενου σήματος.

Οι τρεις μηχανισμοί διάδοσης ανάκλαση, περίθλαση και σκέδαση φαίνονται στο σχήμα (2.1).



Σχήμα (2.1) : Οι τρεις σημαντικότεροι μηχανισμοί διάδοσης: ανάκλαση (R), περίθλαση (D), σκέδαση (S)

Καθώς το κινητό τερματικό κινείται σε μια περιοχή οι τρεις μηγανισμοί διάδοσης επιδρούν κάθε στιγμή στο λαμβανόμενο σήμα κατά διαφορετικούς τρόπους. Αν για παράδειγμα το κινητό έχει οπτική επαφή με το σταθμό βάσης, η περίθλαση και η σκέδαση ενδέγεται να μην επηρεάζουν τη διάδοση. Αντίθετα, αν το κινητό βρίσκεται στο ύψος του οδοστρώματος, σε μεγάλη μητροπολιτική περιοχή, χωρίς να έχει οπτική επαφή με το σταθμό βάσης, η περίθλαση και η σκέδαση είναι πολύ πιθανό να κυριαρχούν στη διάδοση. Καθώς το κινητό διανύει μικρές αποστάσεις, η λαμβανόμενη στιγμιαία ένταση του σήματος στενής ζώνης μεταβάλλεται απότομα και θα εμφανίζονται βραγύγρονες διαλείψεις. Ο λόγος είναι ότι η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι άθροισμα πολλών συνιστωσών που προέρχονται από πολλές κατευθύνσεις και καθώς οι φάσεις τους είναι τυχαίες, το διανυσματικό άθροισμα τους συμπεριφέρεται σαν θόρυβος, όπως π.χ. διαλείψεις Rayleigh. Στις βραγύγρονες διαλείψεις η ισγύς του λαμβανόμενου σήματος μπορεί να μεταβληθεί κατά 30 ή 40 dB όταν ο δέκτης μετακινηθεί κατά κλάσμα μόνο του μήκους κύματος. Καθώς το κινητό απομακρύνεται από τον πομπό κατά μεγαλύτερες αποστάσεις, η τοπικά λαμβανόμενη μέση ισχύς σήματος μειώνεται βαθμιαία. Συνήθως η τοπική μέση ισχύς του σήματος υπολογίζεται για μετακινήσεις του δέκτη κατά 5 ως 40 μήκη κύματος. Το σχήμα (2.2) δείχνει τις επιδράσεις των διαλείψεων μικρής κλίμακας καθώς και την ευρείας κλίμακας μεταβολή του σήματος σε ασύρματο σύστημα κινητών επικοινωνιών. Παρατηρούμε ότι το σήμα παρουσιάζει απότομες διαλείψεις καθώς κινείται ο δέκτης, αλλά η τοπική μέση ισχύς σήματος μεταβάλλεται πολύ πιο αργά με την απόσταση.



Σχήμα (2.2) : Λαμβανόμενο σήμα συναρτήσει της απόστασης πομπού-δέκτη.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε περιβάλλοντα κινητών επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από τρία επιμέρους φαινόμενα που είναι γνωστά ως απώλειες διαδρομής (path loss), σκίαση (shadowing) και διαλείψεις πολλαπλών δρόμων (multipath fading). Οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών, σαν πιο πολύπλοκο φαινόμενο, περιγράφονται εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.

2.2 Απώλειες διαδρομής

2.2.1 Απώλειες ελευθέρου χώρου

Αν ο πομπός-σταθμός βάσης βρίσκεται στον ελεύθερο χώρο και εκπέμπει ισχύ εξόδου P_t watt από κεραία με κατευθυντικό κέρδος G_t και ο δέκτης βρίσκεται σε απόσταση d μέτρων από τον πομπό, τότε η μέση επιφανειακή πυκνότητα ισχύος στον δέκτη (ή η μέση τιμή του διανύσματος Poynting) είναι ίση με:

$$S_0 = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad W / m^2$$
 (2.1)

Η ενεργός επιφάνεια (effective aperture) της κεραίας του δέκτη-κινητού είναι:

$$A_r = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \tag{2.2}$$

οπότε προκύπτει η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη:

$$P_r = S_0 \cdot A_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$
(2.3)

Ισοδύναμα ισχύει :

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{c/f}{4\pi d}\right)^2 \tag{2.4}$$

όπου c η ταχύτητα του φωτός, λ το μήκος κύματος και G τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης. Για την περίπτωση ισοτροπικών κεραιών στην εκπομπή και τη λήψη (μοναδιαίο κέρδος) έχουμε :

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{c/f}{4\pi d}\right)^2 = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$
(2.5)

Στη σχεδίαση των ραδιοσυστημάτων χρησιμοποιείται ο όρος απώλειες διάδοσης (propagation loss) ή απώλειες διαδρομής (path loss) για να εκφραστεί ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολείται από την κεραία του πομπού προς την ισχύ που λαμβάνεται από την κεραία του κινητού. Στον ελεύθερο χώρο, λοιπόν, οι απώλειες διάδοσης για ισοτροπικές κεραίες δίνονται από τη σχέση:

$$L_f = \frac{P_t}{P_r} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi d}{c/f}\right)^2$$
(2.6)

και σε dB:

$$L_f(dB) = 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) = 20\log\left(\frac{4\pi d}{c/f}\right)$$
(2.7)

Όπως φαίνεται στην παραπάνω σχέση, οι απώλειες εξαρτώνται από το τετράγωνο της απόστασης *d*. Επίσης όταν μειώνεται το μήκος κύματος, δηλαδή αυξάνει η συχνότητα εκπομπής, αυξάνουν και οι απώλειες διαδρομής. Για την αντιστάθμιση αυτών των απωλειών θα πρέπει να αυξηθούν τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης.

Στο ασύρματο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών, οι απώλειες διαδρομής δεν εξαρτώνται μόνο από τη συχνότητα και την απόσταση, αλλά εξαρτώνται επίσης από το ύψος των κεραιών του σταθμού βάσης και του κινητού τερματικού, από τη μορφολογία της περιοχής και από τις ανθρώπινες κατασκευές. Αυτοί οι πρόσθετοι παράγοντες κάνουν τον προσδιορισμό των απωλειών διάδοσης λόγω διαδρομής πιο δύσκολο.

2.2.2 Διάδοση πάνω από επίπεδη επιφάνεια

Για αποστάσεις μικρότερες από μερικές δεκάδες χιλιομέτρων είναι συνήθως επιτρεπτό να παραβλέψουμε την καμπυλότητα της γης και να παραδεχθούμε ότι είναι ομαλή και επίπεδη, όπως στο σχήμα (2.3).



Αν επιπροσθέτως παραδεχόμαστε επίπεδη πρόσπτωση, έτσι ώστε ρ =-1, τότε το πεδίο έχει την εξής μορφή:

$$E = E_d \left[1 - \exp(-j\Delta\phi) \right] = E_d \left[1 - \cos\Delta\phi + j\sin\Delta\phi \right]$$
(2.8)

Συνεπώς,

$$|E| = |E_d| \left[1 + \cos^2 \Delta \phi - 2\cos \Delta \phi + \sin^2 \Delta \phi\right]^{1/2} = 2|E_d| \sin \frac{\Delta \phi}{2}$$
(2.9)

και χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση :

$$\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta R = \frac{4\pi h_T \dot{h_R}}{\lambda d}$$
(2.10)

με $h_T' = h_T$ και $h_R' = h_R$ έχουμε :

$$|E| = 2|E_d|\sin\left(\frac{2\pi h_T h_R}{\lambda d}\right)$$
(2.11)

Η λαμβανόμενη ισχύς $P_{\!\scriptscriptstyle R}$ είναι ανάλογη του E^2 , έτσι :

$$P_{R} = 4 \left| E_{d} \right| \sin^{2} \left(\frac{2\pi h_{T} h_{R}}{\lambda d} \right) = 4 P_{T} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^{2} G_{T} G_{R} \sin^{2} \left(\frac{2\pi h_{T} h_{R}}{\lambda d} \right)$$
(2.12)

An $d \succ h_T$, h_R , auth givetai :

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left(\frac{h_T h_R}{d^2}\right)^2 \tag{2.13}$$

Αυτή η σχέση είναι γνωστή ως η εξίσωση της επίπεδης επιφάνειας. Διαφέρει από τη σχέση του ελεύθερου χώρου σε δυο σημεία. Πρώτον, σαν λογικό επακόλουθο της παραδοχής για το d, η γωνία $\Delta \varphi$ είναι μικρή και το λ απαλείφεται από την εξίσωση αφήνοντάς την ανεξάρτητη της συχνότητας. Δεύτερον, παρουσιάζει μια αντίστροφη εξάρτηση της τέταρτης δύναμης της απόστασης από τον πομπό. Αυτό σημαίνει πιο γρήγορη εξασθένηση της λαμβανόμενης ισχύος με πτώση 12 dB για κάθε διπλασιασμό της απόστασης. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η τελική προσεγγιστική εξίσωση εφαρμόζεται μόνο σε περιπτώσεις όπου ισχύει η παραδοχή $d \succ h_T, h_R$.

2.2.3 Απώλειες διάδοσης σε συστήματα μη-οπτικής και οπτικής επαφής

Η περίπτωση της διάδοσης σε ελεύθερο χώρο είναι μια πολύ εξειδικευμένη περίπτωση. Η πλειονότητα των επίγειων ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών λειτουργεί σε περιβάλλον μη-οπτικής επαφής (non-line-of-sight, NLOS) όπως αυτό του σχήματος (2.4). Στην εξίσωση (2.4) παρατηρούμε ότι, για διάδοση οπτικής επαφής (line-of-sight, LOS) η λαμβανόμενη ισχύς είναι αντίστροφα ανάλογη του d². Γενικά, η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής αυξάνει εκθετικά με την απόσταση. Για διάδοση οπτικής επαφής χωρίς φυσικά εμπόδια, ο εκθέτης είναι n=2.



Σχήμα (2.4) : Περιβάλλον διάδοσης επίγειων κινητών επικοινωνιών.

Βάσει εμπειρικών δεδομένων, έχει αναπτυχθεί ένα αρκετά γενικό μοντέλο για διάδοση NLOS και χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των περιπτώσεων. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από τη σχέση:

$$L(d) \propto L_f \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \tag{2.14}$$

και δείχνει ότι η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής L αυξάνει εκθετικά με την απόσταση d. Οι όροι της σχέσης (2.14) είναι οι εξής:

n= εκθέτης απωλειών διαδρομής. Τυπικές τιμές 3.5 ≤ n ≤ 5 d= απόσταση μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης d₀= Απόσταση αναφοράς ή απόσταση μέχρι την οποία ισχύει διάδοση LOS L_f= Απώλειες διαδρομής σε απόσταση d₀ και διάδοση LOS L= Απώλειες διαδρομής για συνδυασμένη διάδοση του σήματος και LOS και NLOS

Ο εκθέτης *n* δείχνει πόσο γρήγορα αυξάνουν οι απώλειες διαδρομής με την απόσταση. Η απόσταση αναφοράς *d*₀ θεωρεί ότι υπάρχει διάδοση στον ελεύθερο χώρο (χωρίς εμπόδια) μέχρι απόσταση *d*₀ από την κεραία. Είναι ενδιαφέρον να επιλεγεί η απόσταση αναφοράς που είναι κατάλληλη για το εκάστοτε περιβάλλον διάδοσης.

Η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής (absolute mean path loss) σε dB, ορίζεται ως η τιμή των απωλειών λόγω διαδρομής $L(d_0)$, σε dB, από τον πομπό έως την απόσταση αναφοράς, συν τις πρόσθετες απώλειες διαδρομής, που δίνονται από την σχέση (2.14). Έτσι, η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής L(d) σε dB, δίνεται από τη σχέση:

$$L(d) = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(\frac{d}{d_0})$$
(2.15)

Εμπειρικά αποτελέσματα δείχνουν, ότι τα τυπικά NLOS συστήματα κινητών επικοινωνιών σε εξωτερικούς χώρους έχουν απώλειες διαδρομής με εκθέτη $3.5 \le n \le 5$ και οι δίαυλοι εσωτερικών χώρων έχουν απώλειες διαδρομής με εκθέτη $2 \le n \le 4$.

2.2.4 Σκίαση και απώλειες διαδρομής

Η εξίσωση (2.15) δεν λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι η αταξία στο περιβάλλον μπορεί να είναι διαφορετική σε δύο θέσεις όπου η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ίδια. Αυτό οδηγεί σε σήματα, των οποίων η μέση ισχύς είναι πολύ διαφορετική από εκείνη που υπολογίζεται αν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (2.15). Μετρήσεις που έχουν γίνει δείχνουν ότι, για οποιαδήποτε τιμή του d, η τιμή των απωλειών διαδρομής *L(d)* σε μια συγκεκριμένη θέση, είναι τυχαία και έχει λογαριθμοκανονική κατανομή γύρω από τη μέση τιμή των απωλειών που υπολογίζεται με βάση την απόσταση. Δηλαδή:

$$L(d) = L(d) + X_{\sigma} = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(\frac{d}{d_0}) + X_{\sigma}$$
(2.16)

και

$$P_r(d) = P_t(d) - L(d)$$
(2.17)

όπου X_{σ} είναι τυχαία μεταβλητή Gauss (σε dB) με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ (επίσης σε dB).

Η λογαριθμοκανονική κατανομή περιγράφει τις τυχαίες επιδράσεις σκίασης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μεγάλου αριθμού μετρήσεων σε θέσεις που έχουν μεν την ίδια απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά έχουν διαφορετικούς βαθμούς αταξίας στη διαδρομή διάδοσης. Το φαινόμενο αυτό αναφέρεται και ως λογαριθμική-κανονική σκίαση. Με απλά λόγια, η λογαριθμική-κανονική σκίαση συνεπάγεται ότι οι μετρούμενες στάθμες σήματος, για συγκεκριμένη απόσταση πομπού-δέκτη, έχουν κατανομή Gauss γύρω από τη μέση τιμή στάθμης που υπολογίζεται συναρτήσει της απόστασης από τη σχέση (2.15), όταν οι τιμές στάθμης του σήματος εκφράζονται σε dB. Η τυπική απόκλιση της κατανομής Gauss που περιγράφει τη σκίαση εκφράζεται επίσης σε dB.

2.2.5 Μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης

Η μέγιστη απόσταση d_{max} που μπορεί να καλυφθεί με συνθήκες διάδοσης οπτικής επαφής σε ελεύθερο χώρο, προκύπτει από την εξίσωση :

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{c/f}{4\pi d}\right)^2 = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$
(2.18)

Υποθέτουμε τώρα ότι η στάθμη της ισχύος στον δέκτη είναι $P_r = P_{r\min}$ και αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ισχύ φέροντος που οδηγεί σε μια παραδεκτή επίδοση ή κατώφλι, όσον αφορά το ρυθμό λαθών (BER). Συμπεραίνουμε τότε ότι για συστήματα LOS ισχύει:

$$d_{\max} = \left(\frac{P_t G_t G_r}{P_{r\min}}\right)^{1/2} \cdot \frac{\lambda}{4\pi}$$
(2.19)

Για γενικότερες συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLOS), υποθέτουμε ότι υπάρχει μια απόσταση αναφοράς d_0 ή απόσταση διάδοσης ελεύθερου χώρου μεταξύ της κεραίας

του πομπού και του πλησιέστερου εμποδίου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα (2.4) τα ραδιοκύματα καλύπτουν την απόσταση d_0 με άμεση δέσμη και στη συνέχεια υφίστανται σκέδαση και διαδίδονται κατά τρόπο NLOS.

Η ισχύς λήψης για τη συνδυασμένη διαδρομή LOS και NLOS είναι :

$$P_r = P_t G_t G_r L_{TOT} \tag{2.20}$$

όπου το $L_{TOT} = L_{LOS} \cdot L_{NLOS}$ έχει δυο συνιστώσες, τις απώλειες LOS και τις απώλειες NLOS. Οι απώλειες LOS οφείλονται στη διάδοση του σήματος μόνο σε απόσταση d_0 κατά τρόπο LOS, ενώ στο υπόλοιπο της απόστασης d το σήμα διαδίδεται κατά τρόπο NLOS. Τυπικά $d - d_0 \approx d$ καθότι το d_0 είναι πολύ μικρότερο από το d. Από τις προηγούμενες εξισώσεις προκύπτει ότι

$$L_{TOT}(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n = L_{LOS} \cdot L_{NLOS}$$
(2.21)

Τελικά η μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης προκύπτει από την εξής σχέση :

$$d_{\max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2}{P_{r\min}}\right]^{1/n} d_0(m)$$
(2.22)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Διαλείψεις

3.1 Εισαγωγή

Στο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών η ασύρματη επικοινωνία λαμβάνει χώρα μεταξύ σταθερών σταθμών βάσης και περιφερόμενων κινητών τερματικών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στις περισσότερες εφαρμογές να μην υπάρχει πλήρης διάδοση οπτικής επαφής μεταξύ της κεραίας του σταθμού βάσης και της κεραίας του κινητού τερματικού, λόγω φυσικών ή τεχνητών εμποδίων. Η διαδρομή διάδοσης αποτελείται από ένα τμήμα οπτικής επαφής, σχετικά μικρού μήκους, ακολουθούμενο από πολλά τμήματα χωρίς οπτική επαφή. Σε τέτοιο περιβάλλον οι ανακλάσεις, οι περιθλάσεις και οι σκεδάσεις που λαμβάνουν χώρα έχουν ως αποτέλεσμα την άφιξη πολλών επίπεδων κυμάτων στο κινητό τερματικό, από πολλές κατευθύνσεις και με διαφορετικές καθυστερήσεις. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Τα πολλαπλά επίπεδα κύματα συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη για να παράγουν ένα σύνθετο λαμβανόμενο σήμα.

Η διαδρομή διάδοσης μεταβάλλεται με την κίνηση του κινητού τερματικού και/ή την κίνηση των τριγύρω αντικειμένων και του περιβάλλοντος. Συνεπώς, μικρές μεταβολές στις καθυστερήσεις, λόγω της κίνησης του τερματικού, προκαλούν μεγάλες μεταβολές στις φάσεις των επιπέδων κυμάτων που καταφθάνουν. Αυτές οι μεταβολές της φάσης δρουν εποικοδομητικά ή αρνητικά κατά την ανυσματική άθροιση των διαφόρων συνιστωσών στην κεραία του δέκτη, γεγονός που αποδεικνύεται από τις μεγάλες μεταβολές της περιβάλλουσας και της φάσης του λαμβανόμενου σήματος. Καθώς το κινητό τερματικό μετακινείται, οι χωρικές μεταβολές της περιβάλλουσας και της φάσης εμφανίζονται ως χρονικές μεταβολές, ένα φαινόμενο που ονομάζεται διαλείψεις περιβάλλουσας.
ισοτροπική σκέδαση παρατηρείται όταν τα επίπεδα κύματα Η καταφθάνουν από όλες τις κατευθύνεις με ίση πιθανότητα και είναι μια λογική υπόθεση για τη μοντελοποίηση της διάδοσης γύρω από το κινητό τερματικό. Ωστόσο, οι πομποί είναι σχετικά ελεύθεροι από τοπικούς σκεδαστές, οπότε τα επίπεδα κύματα τείνουν να φθάνουν από μια γενική κατεύθυνση. Μπορεί κανείς να φανταστεί ότι στο ασύρματο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών ο δέκτης θα λαμβάνει πολλά ανακλώμενα κύματα και ένα άμεσο. Τα ανακλώμενα κύματα που λαμβάνονται από το κινητό θα καταφθάνουν από διαφορετικές γωνίες. Συνήθως το άμεσο κύμα παρουσιάζεται σχετικά πιο ισχυρό, σε σύγκριση με τα ανακλώμενα. Το μοντέλο που περιγράφει αυτή την κατάσταση λέγεται στατιστικό μοντέλο Rice. Ωστόσο, η σχεδίαση ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών δεν μπορεί να βασίζεται σε αυτήν την οπτιμιστική κατάσταση. Βασίζεται σε ασθενή ή έμμεσα κύματα που υπάρχουν συνήθως στον περίγυρο του δέκτη. Όλα τα ανακλώμενα κύματα που λαμβάνονται από το κινητό τερματικό συνδυάζονται ώστε να παρέγουν ένα σήμα πολλαπλών διαδρομών με διαλείψεις.

3.2 Μακροχρόνιες διαλείψεις

Το πρώτο είδος διαλείψεων που μελετάται αποτελούν οι μακροχρόνιες διαλείψεις ή αλλιώς διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (Long-scale fading). Πρόκειται για διαλείψεις που εμπεριέχουν τις απώλειες διάδοσης, δηλαδή τη μεταβολή της εξασθένισης με την απόσταση, και τη σκίαση, δηλαδή την τυχαία μεταβολή της εξασθένισης για δεδομένη απόσταση. Οι μεγάλης κλίμακας διαλείψεις εκφράζουν τη μέση εξασθένηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας της κίνησης σε μεγάλες περιοχές.

Οι μακροχρόνιες διαλείψεις αποτυπώνονται στη μέση τιμή της περιβάλλουσας του σήματος που φτάνει στο δέκτη. Η μέση αυτή τιμή μειώνεται βαθμιαία καθώς η απόσταση πομπού - δέκτη αυξάνεται. Είναι θεμιτό να υπολογίζεται για μετακινήσεις του δέκτη κατά 20 έως 40 μήκη κύματος, έτσι ώστε να απομακρυνθεί η συνεισφορά των βραχυχρόνιων διαλείψεων (οι διαλείψεις αυτές μελετώνται σε επόμενη παράγραφο).

Οι απώλειες διαδρομής (path loss), που σε μεγάλο βαθμό προκαλούν τις μακροχρόνιες διαλείψεις, οφείλονται στην επέκταση του μετώπου, την απορρόφηση, και τη διασπορά του κύματος, ενώ παράλληλα εξαρτώνται από το περιβάλλον διάδοσης του κύματος. Επιπλέον, κάθε αντικείμενο όπως τοίχοι, κτήρια, λόφοι, μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα σκίασης με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η λαμβανόμενη ισχύς του σήματος.

Παρατηρώντας το ακόλουθο σχήμα βλέπουμε ότι η μέση τιμή του λαμβανόμενου σήματος μειώνεται με την απόσταση. Η τιμή αυτή ισούται με τη συνισταμένη των μακροχρόνιων διαλείψεων και συμβολίζεται με *m*(*x*).



Σχήμα (3.1) : Υπολογισμός του τοπικού μέσου όρου.

Για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης που ουσιαστικά αποτελούν τις μακροχρόνιες διαλείψεις, έχουν αναπτυχθεί ποικίλα μοντέλα που συνήθως είναι συνδυασμοί αναλυτικών και εμπειρικών μεθόδων. Η εμπειρική προσέγγιση βασίζεται στην προσαρμογή καμπυλών ή σε αναλυτικές εκφράσεις που αντιπροσωπεύουν ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων. Αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα ότι λαμβάνει εμμέσως υπόψη όλους τους παράγοντες διάδοσης, γνωστούς και άγνωστους, μέσω των πειραματικών δεδομένων. Ωστόσο, το σημαντικό μειονέκτημα των εμπειρικών μοντέλων είναι ότι δεν ισχύουν σε διαφορετικές συχνότητες μετάδοσης και διαφορετικά περιβάλλοντα από αυτά στα οποία πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξή τους.

Έχουν παρουσιαστεί κατά καιρούς πολλά μοντέλα διάδοσης που προβλέπουν τις απώλειες διαδρομής. Τόσο τα θεωρητικά όσο και τα αναλυτικά μοντέλα διάδοσης δείχνουν ότι η μέση τιμή του λαμβανόμενου σήματος μειώνεται λογαριθμικά με την απόσταση. Η γενική σχέση που εκφράζει τις απώλειες διαδρομής για τυχαία απόσταση πομπού – δέκτη περιγράφεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$\overline{PL}(d) \propto \left(\frac{d}{d_o}\right)^n \tag{3.1}$$

$$\overline{PL}(dB) = \overline{PL}(d_o) + 10n\log(\frac{d}{d_o})$$
(3.2)

όπου *n* είναι ο εκθέτης απωλειών διαδρομής που εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο οι απώλειες αυξάνονται με την απόσταση, *d*_o είναι η απόσταση αναφοράς που προκύπτει από μετρήσεις κοντά στον πομπό ή από αναλυτική σχέση, και *d* είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η τιμή του *n* εξαρτάται από το συγκεκριμένο περιβάλλον διάδοσης, τη συχνότητα λειτουργίας, τα ύψη των κεραιών, και υπολογίζεται ελαχιστοποιώντας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές του εκθέτη απωλειών σε ποικίλα περιβάλλοντα κινητών ραδιοεπικοινωνιών.

Περιβάλλον	Εκθέτης Απωλειών Διαδρομής <i>n</i>	
Ελεύθερος χώρος	2	
Αστική περιοχή	2.7 – 3.5	
Σκιασμένη αστική περιοχή	3 – 5	
Εντός κτιρίου με οπτική επαφή	1.6 – 1.8	
Εντός κτιρίου χωρίς οπτική επαφή	4 - 6	
Εργοστάσιο χωρίς οπτική επαφή	2 - 3	

Πίνακας (3.1) : Εκθέτης απωλειών σε διάφορα περιβάλλοντα.

3.3 Βραχυχρόνιες διαλείψεις

Ο όρος βραχυχρόνιες διαλείψεις χρησιμοποιείται για την περιγραφή της απότομης διακύμανσης του πλάτους του ραδιοσήματος σε βραχύ χρονικό διάστημα ή σε βραχεία διανυόμενη απόσταση, ώστε τα φαινόμενα διαλείψεων μεγάλης κλίμακας να μπορούν να αμεληθούν. Οι διαλείψεις αυτές προκύπτουν από τη συμβολή δύο ή περισσοτέρων εκδοχών του μεταδιδόμενου σήματος που αφικνούνται στο δέκτη σε ελαφρώς διαφορετικές χρονικές στιγμές ή ισοδύναμα με μικρή διαφορά φάσης. Η συμβολή αυτών των κυμάτων μπορεί σε μια δεδομένη χρονική στιγμή να είναι καταστροφική (αναιρετική) ή εποικοδομητική, ανάλογα με τις σχετικές διαφορές φάσης.

Οι βραχυχρόνιες διαλείψεις σε ένα ασύρματο κανάλι εκδηλώνονται με δύο τρόπους :

- Με εξάπλωση (spreading) του λαμβανόμενου σήματος στο πεδίο του χρόνου.
- Με χρονομεταβλητή συμπεριφορά του καναλιού λόγω δυναμικού περιβάλλοντος διάδοσης.

Και οι δύο τρόποι εκδήλωσης βραχυχρόνιων διαλείψεων είναι δυνατό να επιφέρουν παραμόρφωση στο λαμβανόμενο σήμα, για διαφορετικούς όμως λόγους. Ο πρώτος εξ' αυτών καθορίζει το αν το κανάλι επιφέρει παραμόρφωση στο σήμα λόγω διασυμβολικής παρεμβολής (Inter-Symbol Interference, ISI) ή όχι, και ο δεύτερος καθορίζει το πόσο γρήγορα αλλάζει η συμπεριφορά του καναλιού.

Οι δύο τρόποι με τους οποίους εκδηλώνονται οι βραχυχρόνιες διαλείψεις είναι ανεξάρτητοι με αποτέλεσμα, όπως θα δούμε στη συνέχεια, να υπάρχουν 4 είδη ανεξάρτητων βραχυχρόνιων διαλείψεων. Το είδος διαλείψεων που θα παρουσιαστεί εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες :

- Πολυδιαδρομική διάδοση. Η παρουσία σκεδαστών και ανακλαστών στο περιβάλλον διάδοσης έχει ως συνέπεια τη δημιουργία πολλαπλών εκδόσεων του μεταδιδόμενου σήματος που φθάνουν στον πομπό. Τα τυχαία πλάτη και φάσματα των αφικνούμενων σημάτων προκαλούν διακυμάνσεις στην ισχύ του σήματος, με αποτέλεσμα να επιφέρουν βραχυχρόνιες διαλείψεις και παραμόρφωση του σήματος.
- Ταχύτητα του κινητού. Η σχετική κίνηση μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού έχει σαν αποτέλεσμα την τυχαία φασματική διαμόρφωση του σήματος εξαιτίας του φαινομένου Doppler. Η φασματική μετατόπιση θα είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με το αν ο κινητός δέκτης κινείται προς τον σταθμό βάσης ή απομακρύνεται από αυτόν.
- Η ταχύτητα των αντικειμένων του περιβάλλοντος διάδοσης. Όταν τα αντικείμενα αυτά είναι εν κινήσει προκαλούν μια χρονικά μεταβαλλόμενη μετατόπιση Doppler. Στην περίπτωση που κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες από το κινητό τότε οι βραχυχρόνιες διαλείψεις οφείλονται σχεδόν αποκλειστικά στο φαινόμενο αυτό. Διαφορετικά, η ταχύτητα των αντικειμένων αυτών μπορεί να αγνοηθεί και να ληφθεί υπόψη μόνο η ταχύτητα του κινητού.
- Το εύρος ζώνης του σήματος. Όταν το μεταδιδόμενο σήμα έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης από εκείνο του καναλιού μετάδοσης τότε το λαμβανόμενο σήμα θα παραμορφωθεί. Όπως θα δειχτεί σε επόμενη παράγραφο το εύρος ζώνης του καναλιού ποσοτικοποιείται από το εύρος ζώνης συνοχής, το οποίο εξαρτάται από το πολυδιαδρομικό περιβάλλον του καναλιού.

Στην ποιοτική ανάλυση που ακολουθεί θα εξετάσουμε τους παράγοντες αυτούς και τα φαινόμενα που τους εκδηλώνουν. Επιπρόσθετα, θα παραθέσουμε τις παραμέτρους που τους αντιπροσωπεύουν και, τέλος, θα μελετήσουμε τα 4 είδη βραχυχρόνιων διαλείψεων που παρουσιάζονται στα κανάλια πολυδιαδρομικής διάδοσης.

3.3.1 Πολυδιαδρομική Διάδοση

Ο πρώτος και πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το είδος των βραχυχρόνιων διαλείψεων είναι το συγκεκριμένο περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης. Το περιβάλλον αυτό καθορίζει αν η ζεύξη είναι οπτικής επαφής ή όχι, καθώς και τον αριθμό των σημάτων που φτάνουν στο δέκτη, και τα σχετικά πλάτη και τις διαφορές φάσης αυτών. Το περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης είναι στατικό ή δυναμικό ανάλογα με το αν κινείται ο δέκτης ή ο πομπός ή ακόμη τα αντικείμενα που ανήκουν στο περιβάλλον διάδοσης. Όταν το περιβάλλον είναι δυναμικό τότε το κανάλι είναι χρονομεταβλητό. Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά είναι τεραστίας σημασίας για την περιγραφή των διαλείψεων που εμφανίζονται όταν το σήμα διασχίσει το ασύρματο κανάλι. Παραδείγματα ζεύξεων πολυδιαδρομικής διάδοσης παρουσιάζονται στο σχήμα (3.2).



Σχήμα (3.2) : Πολυδιαδρομική διάδοση στις κινητές επικοινωνίες.

Ένα μέσο μετάδοσης, στο οποίο υπάρχει πολυδιαδρομική διάδοση, περιλαμβάνει αρκετά διαφορετικά μονοπάτια, στα οποία η ενέργεια ταξιδεύει από τον πομπό στον δέκτη. Αν σκεφτεί κανείς αρχικά την περίπτωση ενός ακίνητου δέκτη, τότε οδηγούμαστε σε μια στατική κατάσταση στην οποία ένα σήμα στενής ζώνης, π.χ. ένα αδιαμόρφωτο φέρον, μεταδίδεται και πολλές εκδοχές του φτάνουν στον δέκτη. Το φαινόμενο των χρονικών καθυστερήσεων, που οφείλεται στις διάφορες διαδρομές που ακολουθεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, είναι η ύπαρξη διαφορετικής φάσης ανάμεσα στα επιμέρους κύματα, η υπέρθεση των οποίων λειτουργεί είτε εποικοδομητικά, είτε καταστροφικά, όσον αφορά στο σήμα που λαμβάνει ο δέκτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του στατικού περιβάλλοντος οι διαλείψεις είναι καθαρά χωρικό φαινόμενο, αφού η θέση τους δεν μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου.

Στο σχήμα (3.3) φαίνεται η περίπτωση συμβολής σε στατικό περιβάλλον διάδοσης. Είναι φανερό ότι υπάρχουν πολυδιαδρομικά σήματα, τα οποία αθροίζονται διανυσματικά στην κεραία του δέκτη.



Σχήμα (3.3) : Μετάδοση σήματος στενής ζώνης και επίδειξη δύο ακραίων περιπτώσεων.

Αν, στη συνέχεια, εξεταστεί η περίπτωση που και ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε κίνηση, τότε υπάρχει μια δυναμική κατάσταση, στην οποία υπάρχει μια διαρκής αλλαγή στο μήκος κάθε μονοπατιού διάδοσης. Το δυναμικό περιβάλλον είναι η πιο ρεαλιστική περίπτωση σε ένα ασύρματο κανάλι κινητών επικοινωνιών. Άλλωστε, ο δέκτης ή ο πομπός καθώς και τα αντικείμενα που ανήκουν στο περιβάλλον διάδοσης κινούνται. Το δυναμικό αυτό περιβάλλον που είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα, καθιστά το φαινόμενο των βραχυχρόνιων διαλείψεων πολύπλοκο και εντελώς τυχαίο. Οι βραχυχρόνιες διαλείψεις δεν είναι πλέον καθαρά χωρικό φαινόμενο.

Για να γίνει σαφές τι συμβαίνει στην περίπτωση του δυναμικού περιβάλλοντος, θεωρούμε ένα τυχαίο σημείο στο χώρο στο οποίο παρατηρούμε τι συμβαίνει σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές. Έστω ότι την πρώτη χρονική στιγμή συμβάλουν στο σημείο αυτό ν εκδοχές του αρχικού σήματος που έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως πλάτη και διαφορές φάσης. Η συμβολή των εκδοχών αυτών δίνει μια τιμή στη λαμβανόμενη ισχύ στο σημείο αυτό, που εξαρτάται από τη συγκεκριμένη κατάσταση στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Μέχρι την επόμενη χρονική στιγμή, μεσολαβούν οι μεταβολές στο περιβάλλον γύρω από το σημείο αυτό. Μέχρι τότε, είναι πολύ πιθανόν να έχει αλλάξει ο αριθμός των εκδοχών του σήματος, καθώς και τα σχετικά πλάτη και οι διαφορές φάσης μεταξύ αυτών. Τότε η λαμβανόμενη ισχύς στο σημείο αυτό θα διαφέρει σε σχέση με τη λαμβανόμενη ισχύ της προηγούμενης χρονικής στιγμής. Στην περίπτωση αυτή που θεωρήσαμε ένα σημείο, το φαινόμενο των βραχυχρόνιων διαλείψεων στο σημείο αυτό είναι καθαρά χρονικό φαινόμενο. Άρα, βραχυχρόνιες διαλείψεις εμφανίζονται ακόμα και αν δεν κινείται ο δέκτης αλλά είναι κινούμενο το περιβάλλον του.

Στο σχήμα (3.4) φαίνεται ένα απλό παράδειγμα για την κατανόηση της πολυδιαδρομικής διάδοσης σε δυναμικό περιβάλλον, και συγκεκριμένα δείχνει πώς μεταβάλλεται η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος στην απλή περίπτωση που υπάρχουν δύο εισερχόμενα μονοπάτια διάδοσης. Στο δυναμικό περιβάλλον υπάρχει συνεχής αλλαγή του ηλεκτρικού μήκους για καθένα από τα δύο μονοπάτια (έστω ότι ο αριθμός των μονοπατιών παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια παρατήρησης) και άρα συνεχής αλλαγή στη σχετική φάση των δύο εκδοχών. Σε κάποια σημεία λαμβάνει χώρα εποικοδομητική συμβολή ενώ σε άλλα αναιρετική. Στην πράξη υπάρχουν πολλά διαφορετικά μονοπάτια που συνδυάζονται σε κάθε σημείο και αυτό οδηγεί σε πιο πολύπλοκη περιβάλλουσα σήματος από αυτή που φαίνεται στο σχήμα (3.4).



Σχήμα (3.4) : Περιβάλλουσα λαμβανόμενου σήματος με δύο εισερχόμενα μονοπάτια διάδοσης.

3.3.2 Ολίσθηση Doppler

Θεωρούμε κινητό τερματικό που μετακινείται με σταθερή ταχύτητα ν μεταξύ των θέσεων X και Y, που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει σήματα από απομακρυσμένο πομπό S όπως φαίνεται στο σχήμα (3.5).



Σχήμα (3.5) : Ολίσθηση Doppler

Η διαφορά Δl των διαδρομών, από την πηγή S προς τις θέσεις X και Y του κινητού είναι $\Delta l = dcos\theta = vtcos\theta$, όπου Δt είναι ο χρόνος που χρειάζεται το κινητό να φθάσει από τη θέση X στη θέση Y. Η γωνία θ υποτίθεται ότι είναι ίδια, καθότι η πηγή S είναι πολύ απόμακρη. Η αλλαγή στη φάση του λαμβανόμενου σήματος, λόγω της διαφοράς μήκους των διαδρομών, είναι :

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cdot \cos \theta \tag{3.3}$$

και συνεπώς η φαινομενική ολίσθηση συχνότητας, η ολίσθηση Doppler f_D δίνεται από τη σχέση:

$$f_D = \frac{\Delta\phi}{2\pi\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos\theta \tag{3.4}$$

Η εξίσωση (3.4) συσχετίζει την ολίσθηση Doppler με την ταχύτητα του κινητού και τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της κίνησης του κινητού και της κατεύθυνσης άφιξης του σήματος. Παρατηρούμε από τη σχέση (3.4) ότι, αν το κινητό κινείται προς την κατεύθυνση άφιξης του κύματος η ολίσθηση είναι θετική (δηλαδή, η φαινομενική συχνότητα αυξάνει) και αν το κινητό απομακρύνεται από την κατεύθυνση άφιξης του κύματος η ολίσθηση συχνότητας είναι αρνητική (δηλαδή, η φαινομενική συχνότητα ελαττώνεται). Οι συνιστώσες πολλαπλών διαδρομών που καταφθάνουν από τις διάφορες κατευθύνσεις συνεισφέρουν στην εξάπλωση Doppler του λαμβανόμενου σήματος, αυξάνοντας έτσι το εύρος ζώνης του.

3.3.3 Παράμετροι χρονικής διασποράς

Αν θεωρήσουμε ένα πολυδιαδρομικό περιβάλλον όπως αυτό του σχήματος (3.6), τότε ο εκπεμπόμενος κρουστικός παλμός $\delta(t)$ καταφθάνει στον δέκτη ως μια

σειρά κρουστικών παλμών με διαφορετικές εξασθενήσεις και καθυστερήσεις, οπότε η συνολική χρονική διασπορά μεγαλώνει σημαντικά. Καθώς αυξάνει ο αριθμός των σκεδαστών στην περιοχή του κινητού τερματικού, αυξάνεται και η διασπορά καθυστέρησης. Η διασπορά καθυστέρησης υπαγορεύει μια περίοδο αναμονής, η οποία καθορίζει πότε μπορεί να μεταδοθεί ο επόμενος παλμός από τον σταθμό βάσης.



Σχήμα (3.6) : Παράδειγμα πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος.

Ο αναμενόμενος βαθμός διασποράς καθυστέρησης καθορίζεται μέσω της μέτρησης του προφίλ καθυστέρησης ισχύος (power delay profile) του διαύλου. Τα προφίλ καθυστέρησης ισχύος μετριούνται με διάφορες τεχνικές και παριστάνονται γραφικά ως διαγράμματα της σχετικής λαμβανόμενης ισχύος συναρτήσει της επιπρόσθετης καθυστέρησης. Τέτοια διαγράμματα παρουσιάζονται στο σχήμα (3.7).



Σχήμα (3.7α) : Δείγμα μετρήσεων προφίλ καθυστέρησης καναλιού στα 900MHz.



1700MHz.

Για να μπορούμε να συγκρίνουμε διαφορετικά πολυδιαδρομικά κανάλια, αλλά και να αναπτύξουμε κάποιες γενικές οδηγίες για τη σχεδίαση ασύρματων συστημάτων, εισάγουμε κάποιες παραμέτρους που χονδρικά ποσοτικοποιούν το κανάλι διάδοσης. Οι παράμετροι αυτοί είναι η επιπρόσθετη μέση καθυστέρηση (mean excess delay), η *rms* καθυστέρηση (rms delay spread) και η μέγιστη επιπρόσθετη καθυστέρηση (excess delay spread). Οι παράμετροι αυτοί λαμβάνονται από το προφίλ καθυστέρησης ισχύος.

Η μέση επιπρόσθετη καθυστέρηση (mean excess delay) είναι η πρώτη ροπή του προφίλ καθυστέρησης ισχύος και ορίζεται ως εξής :

$$\overline{\tau} = \frac{\sum_{k}^{k} a_{k}^{2} \tau_{k}}{\sum_{k}^{k} a_{k}^{2}} = \frac{\sum_{k}^{k} P(\tau_{k}) \tau_{k}}{\sum_{k}^{k} P(\tau_{k})}$$
(3.5)

όπου τ_{κ} είναι η επιπρόσθετη καθυστέρηση ως προς το πρώτο λαμβανόμενο σήμα και $P(\tau_{\kappa})$ είναι η σχετική ισχύς ως προς τη μέγιστη ισχύς για καθυστέρηση τ_{κ} .

Η *rms* καθυστέρηση (rms delay spread) είναι η τετραγωνική ρίζα της δεύτερης κεντρικής ροπής του προφίλ καθυστέρησης ισχύος και ορίζεται ως εξής :

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\overline{\tau})^2} \tag{3.6}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η rms καθυστέρηση και η επιπρόσθετη μέση καθυστέρηση καθορίζονται από το προφίλ της καθυστέρησης ισχύος το οποίο είναι ο χρονικός ή χωρικός μέσος διαδοχικών παλμικών αποκρίσεων σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο. Τυπικές τιμές της rms καθυστέρησης είναι της τάξης του μsec για εξωτερικά κανάλια (outdoor mobile radio channels) και της τάξης του nsec σε εσωτερικά κανάλια (indoor radio channels). Ο πίνακας (3.2) παρουσιάζει τυπικές τιμές της rms καθυστέρησης από διάφορες μετρήσεις.

······································				
Περιβάλλον	Συχνότητα (MHz)	rms καθυστέρηση	Σημείωση	
Αστικό	910	1300ns μέση 600 ns τυπ.απόκλ. 3500 ns max	New York City	
Αστικό	892	10-25µsec	San Francisco Χειρότερη περίπτωση	
Προαστιακό	910	200-310 ns	Μέση, τυπική περίπτωση	
Προαστιακό	910	1960-2100 ns	Μέση, ακραία περίπτωση	
Εντός κτιρίου	1500	10-50 ns 25 ns μέσος	Κτίριο με γραφεία	
Εντός κτιρίου	850	270 ns max	Κτίριο γραφείων	
Εντός κτιρίου	1900	70-94 ns μέση 1470 ns max	3 κτίρια στο San Francisco	

Πίνακας (3.2): Τυπικές τιμές της rms καθυστέρησης

Η μέγιστη επιπρόσθετη καθυστέρηση (X dB) του προφίλ καθυστέρησης ισχύος ορίζεται ως η χρονική καθυστέρηση κατά την οποία η ισχύς του πολυδιαδρομικού σήματος πέφτει X dB κάτω από το πιο ισχυρό λαμβανόμενο σήμα. Σημειωτέον ότι το πιο ισχυρό λαμβανόμενο σήμα είναι δυνατό να μην είναι το πρώτο λαμβανόμενο αλλά κάποιο άλλο.

Στο σχήμα (3.8) φαίνεται ένα παράδειγμα προφίλ καθυστέρησης. Μπορούμε να διακρίνουμε την *rms* καθυστέρηση, τη μέση επιπρόσθετη καθυστέρηση, τη μέγιστη επιπρόσθετη καθυστέρηση για το X=30dB, καθώς και το επίπεδο κατωφλίου.

Στην πράξη, οι τιμές των παραμέτρων διασποράς χρόνου εξαρτώνται από την επιλογή του κατωφλίου θορύβου. Το κατώφλι θορύβου είναι το όριο που χρησιμεύει για τον διαχωρισμό του θερμικού θορύβου με τις συνιστώσες του μεταδιδόμενου σήματος. Αν το κατώφλι θορύβου οριστεί σε πολύ μικρή τιμή, τότε ο θόρυβος θα εκλαμβάνεται ως χρήσιμο πολυδιαδρομικό σήμα με αποτέλεσμα οι παράμετροι να λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές.





Αξίζει να σημειωθεί ότι το προφίλ καθυστέρησης ισχύος και η απόκριση συχνότητας ενός ασύρματου καναλιού συνδέονται μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Συνεπώς, είναι δυνατό να ληφθεί μία ισοδύναμη περιγραφή του καναλιού στο πεδίο της συχνότητας. Όπως στο πεδίο του χρόνου χρησιμοποιούνται οι παράμετροι διασποράς χρόνου για την περιγραφή του καναλιού, στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιείται το εύρος ζώνης συνοχής (Coherence Bandwidth). Η *rms* καθυστέρηση και η μέγιστη επιπρόσθετη καθυστέρηση είναι αντιστρόφως ανάλογα του εύρους ζώνης συνοχής, παρόλο που η σχέση τους είναι συνάρτηση του συγκεκριμένου πολυδιαδρομικού περιβάλλοντος. Στην παράγραφο που ακολουθεί γίνεται εκτενής αναφορά στο εύρος ζώνης συνοχής.

3.3.4 Εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού

Σκοπός του ορισμού του εύρους ζώνης συνοχής B_c είναι να παράγουμε ένα μέτρο για την επίδραση που έχει ο ασύρματος δίαυλος σε ένα σήμα που τον διασχίζει και κατά συνέπεια να μπορούμε να θέτουμε περιορισμούς στην ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων σε ένα ασύρματο κανάλι.

Ενώ η χρονική διασπορά είναι ένα φυσικό φαινόμενο που προκαλείται από ανακλάσεις και σκεδάσεις του σήματος στο ασύρματο κανάλι, το εύρος ζώνης συνοχής B_c ορίζεται από τις παραμέτρους διασποράς χρόνου. Το εύρος ζώνης συνοχής B_c είναι ένα στατιστικό μέτρο του εύρους ζώνης συχνοτήτων στο οποίο ένας δίαυλος μπορεί να θεωρηθεί επίπεδος, δηλαδή να επιτρέπει να διέλθουν όλες οι φασματικές συνιστώσες με περίπου ίσο κέρδος και γραμμική φάση. Με άλλα λόγια, εύρος ζώνης συνοχής είναι η περιοχή συχνοτήτων μέσα στην οποία δύο συνιστώσες συχνότητας εμφανίζουν μεγάλη πιθανότητα συσχέτισης πλάτους. Δύο συχνότητες που απέχουν περισσότερο από B_c επηρεάζονται κατά εντελώς διαφορετικό τρόπο από τον δίαυλο. Αν το εύρος ζώνης συνοχής ορίζεται ως το εύρος συχνοτήτων μέσα στο οποίο η συνάρτηση συσχέτισης των περιβαλλουσών δύο σημάτων με συχνότητες f_1 και f_2 αντίστοιχα είναι πάνω από 0.9, τότε ισχύει :

$$B_c \approx \frac{1}{50\sigma_\tau} \tag{3.7}$$

Εάν ο ορισμός δεν είναι τόσο αυστηρός και η συνάρτηση συσχέτισης στο πεδίο συχνότητας λαμβάνεται να έχει τιμή μεγαλύτερη από 0.5, τότε το εύρος ζώνης συνοχής είναι περίπου :

$$B_c \approx \frac{1}{5\sigma_\tau} \tag{3.8}$$

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει ακριβής σχέση μεταξύ του εύρους ζώνης συνοχής και της *rms* καθυστέρησης σ_τ και οι παραπάνω σχέσεις αποτελούν εκτιμήσεις.

Το εύρος ζώνης συνοχής είναι διαφορετικό σε ημιαστικές και αστικές περιοχές, διότι οι τιμές για την *rms* καθυστέρηση σε αυτές τις περιοχές είναι διαφορετικές, λόγω της διαφορετικής μορφολογίας που εμφανίζουν ο περιοχές αυτές στο ασύρματο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών.

3.3.5 Εξάπλωση Doppler και χρόνος συνοχής

Η εξάπλωση καθυστέρησης (delay spread) και το εύρος ζώνης συνοχής είναι παράμετροι που περιγράφουν την ιδιότητα του ραδιοδιαύλου να εμφανίζει χρονική διασπορά σε κάποια γεωγραφική περιοχή και δίνουν την εικόνα του ραδιοδιαύλου στο πεδίο της συχνότητας. Ωστόσο, αυτές οι παράμετροι δεν παρέχουν πληροφορία για τη χρονικά μεταβαλλόμενη φύση του διαύλου, η οποία οφείλεται είτε στη σχετική κίνηση μεταξύ του κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης, είτε στην κίνηση των αντικειμένων στο περιβάλλον του διαύλου. Η εξάπλωση Doppler (Doppler spread) και ο χρόνος συνοχής (coherence time) είναι παράμετροι που περιγράφουν τη χρονικά μεταβαλλόμενη φύση του διαύλου σε περιοχή μικρής κλίμακας.

Η εξάπλωση Doppler B_D είναι ένα μέτρο της διεύρυνσης του φάσματος που προκαλείται από τον ρυθμό χρονικής μεταβολής του ραδιοδιαύλου κινητών επικοινωνιών και ορίζεται ως η περιοχή συχνοτήτων στην οποία το λαμβανόμενο φάσμα Doppler είναι ουσιαστικά μη μηδενικό. Όταν μεταδίδεται φέρον συχνότητας f_C , το φάσμα του λαμβανόμενου σήματος, που ονομάζεται φάσμα Doppler, θα περιέχει φασματικές συνιστώσες στην περιοχή μεταξύ f_C - f_D και f_C + f_D , όπου f_D είναι η ολίσθηση Doppler. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να εκληφθεί σαν φαινόμενο προσωρινής αυτοσυσχέτισης του τυχαίου διαύλου που εμφανίζει διαλείψεις λόγω πολλαπλών διαδρομών και είναι γνωστό ως διαλείψεις επιλεκτικές στον χρόνο. Το μέγεθος της φασματικής διεύρυνσης εξαρτάται από την ολίσθηση Doppler f_D , η οποία είναι συνάρτηση της σχετικής ταχύτητας του κινητού τερματικού και της γωνίας θ μεταξύ της κατεύθυνσης της κίνησης του τερματικού και της κατεύθυνσης άφιξης των σκεδαζομένων κυμάτων. Αν το εύρος ζώνης του σήματος πληροφορίας είναι πολύ μεγαλύτερο από το f_D, οι επιδράσεις της εξάπλωσης Doppler στον δέκτη είναι αμελητέες.

Ο χρόνος συνοχής (coherence time) T_C είναι η αντίστοιχη προς την εξάπλωση Doppler έννοια στο πεδίο του χρόνου και χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίζει, στο πεδίο του χρόνου, την ιδιότητα του διαύλου να εμφανίζει διασπορά συχνότητας. Ο χρόνος συνοχής είναι αντίστροφα ανάλογος προς τη μέγιστη ολίσθηση Doppler f_m και ορίζεται ως :

$$T_C = 1 / f_m \tag{3.9}$$

Η μέγιστη ολίσθηση Doppler f_m δίνεται από τη σχέση :

$$f_m = v / \lambda \tag{3.10}$$

όπου ν είναι η ταχύτητα του κινητού μαζί με την ταχύτητα του κινητού περιβάλλοντος, και λ το μήκος κύματος του ραδιοσήματος.

Ο χρόνος συνοχής είναι μια στατιστική μέτρηση του χρονικού διαστήματος στο οποίο η κρουστική απόκριση του διαύλου είναι ουσιαστικά αμετάβλητη και ποσοτικοποιεί την ομοιότητα της απόκρισης του διαύλου στις διάφορες χρονικές στιγμές. Με άλλα λόγια, ο χρόνος συνοχής είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο δύο λαμβανόμενα σήματα έχουν μεγάλη πιθανότητα να εμφανίζουν συσχέτιση πλάτους. Αν το αντίστροφο του εύρους ζώνης του σήματος βασικής ζώνης είναι μεγαλύτερο από το χρόνο συνοχής του διαύλου, τότε ο δίαυλος θα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του σήματος βασικής ζώνης προκαλώντας έτσι παραμόρφωση στο λαμβανόμενο σήμα. Αν ο χρόνος συνοχής αναφέρεται ως το χρονικό διάστημα κατά διάρκεια του οποίου η συνάρτηση χρονικής συσχέτισης είναι πάνω από 0.5, τότε δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση :

$$T_C = \frac{9}{16\pi f_m} \tag{3.11}$$

όπου f_m είναι η μέγιστη ολίσθηση Doppler. Πρακτικά η σχέση (3.9) προτείνει ένα χρονικό διάστημα στη διάρκεια του οποίου ένα σήμα με διαλείψεις κατά Rayleigh μπορεί να εμφανίζει σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις, ενώ η σχέση (3.11) είναι πιο αυστηρή.

Ο ορισμός του χρόνου συνοχής υπαγορεύει ότι δύο σήματα που καταφθάνουν με καθυστέρηση μεταξύ τους μεγαλύτερη από T_C , επηρεάζονται κατά διαφορετικό τρόπο από το κανάλι.

3.3.6 Τύποι βραχυχρόνιων διαλείψεων

Από την παραπάνω ανάλυση γίνεται κατανοητό ότι ανάλογα με τη σχέση των παραμέτρων του σήματος, π.χ. εύρος ζώνης και ρυθμός μετάδοσης, και των παραμέτρων του διαύλου, π.χ. εξάπλωση καθυστέρησης και εξάπλωση Doppler, τα διάφορα μεταδιδόμενα σήματα υφίστανται διαφορετικούς τύπους διαλείψεων. Οι μηχανισμοί διασποράς χρόνου και διασποράς συχνότητας σ' ένα δίαυλο κινητών επικοινωνιών οδηγούν σε τέσσερις δυνατές επιδράσεις, οι οποίες διακρίνονται μεταξύ τους και χαρακτηρίζονται από τη φύση του μεταδιδόμενου σήματος, τον δίαυλο και την ταχύτητα. Η εξάπλωση καθυστέρησης λόγω πολλαπλών διαδρομών προκαλεί χρονική διασπορά και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα, ενώ η εξάπλωση Doppler προκαλεί διασπορά συχνότητας και διαλείψεις επιλεκτικές ως προς το χρόνο. Οι δύο μηχανισμοί διάδοσης είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.

Το σχήμα (3.9) παρουσιάζει σε μορφή δένδρου τους τέσσερις διαφορετικούς τύπους διαλείψεων.



Σχήμα (3.9) : Τύποι βραχυχρόνιων διαλείψεων.

3.3.6.1 Διαλείψεις που οφείλονται στη χρονική διασπορά καθυστέρησης

Η διασπορά χρόνου λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης προκαλεί στο σήμα είτε επίπεδες είτε επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις.

• Επίπεδες διαλείψεις

Εάν το ασύρματο κανάλι έχει σταθερό κέρδος και γραμμική απόκριση φάσης σε εύρος ζώνης που είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος, τότε το λαμβανόμενο σήμα υφίσταται επίπεδες διαλείψεις. Αυτός ο τύπος διαλείψεων είναι ο πιο γνωστός τύπος που περιγράφεται στην τεχνική βιβλιογραφία. Στις επίπεδες διαλείψεις, η πολυδιαδρομική δομή του καναλιού είναι τέτοια ώστε τα φασματικά χαρακτηριστικά του μεταδιδόμενου σήματος να διατηρούνται στο δέκτη. Ωστόσο, η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος μεταβάλλεται με το χρόνο, λόγω διακυμάνσεων στο κέρδος του καναλιού οι οποίες οφείλονται στην πολυδιαδρομική διάδοση (στις πολλαπλές εκδοχές του ιδίου σήματος που φτάνουν στο δέκτη). Τα χαρακτηριστικά ενός καναλιού επίπεδων διαλείψεων φαίνονται στο σχήμα (3.10).



Από το σχήμα (3.10) μπορεί να δει κάποιος ότι αν το κέρδος του διαύλου αλλάζει με το χρόνο τότε το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος θα αλλάζει και αυτό με το χρόνο. Μπορεί το λαμβανόμενο σήμα να έχει μεταβαλλόμενη στάθμη αλλά τα φασματικά χαρακτηριστικά του παραμένουν αναλλοίωτα από τη μετάδοση. Σε ένα κανάλι επίπεδων διαλείψεων, το αντίστροφο του εύρους ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος είναι πολύ μεγαλύτερο χρονικά από τη χρονική διασπορά καθυστέρησης λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης. Οι δίαυλοι με επίπεδες διαλείψεις είναι επίσης γνωστοί ως δίαυλοι μεταβαλλόμενου πλάτους και μερικές φορές αναφέρονται και ως δίαυλοι στενού εύρους ζώνης, καθότι το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος είναι μικρό σε σύγκριση με το εύρος ζώνης τους. Οι συνήθεις δίαυλοι επίπεδων διαλείψεων προκαλούν βαθιές διαλείψεις και συνεπώς μπορεί να απαιτείται 20 ή 30 dB περισσότερη ισχύς εκπομπής για να επιτευχθεί χαμηλός ρυθμός εσφαλμένων bit κατά τη διάρκεια των βαθιών διαλείψεων. Η κατανομή του κέρδους σε διαύλους με επίπεδες διαλείψεις είναι σημαντική για τη σχεδίαση ασύρματων ζεύξεων και η πιο κοινή κατανομή πλάτους έχει βρεθεί ότι είναι η κατανομή Rayleigh. Το μοντέλο Rayleigh θεωρεί ότι το κανάλι προκαλεί χρονική μεταβολή του πλάτους σύμφωνα με την κατανομή αυτή. Συνοψίζοντας, ένα σήμα υφίσταται επίπεδες διαλείψεις αν :

$$B_{S} \ll B_{C} \tag{3.12}$$

και

$$T_{S} \gg \sigma_{\tau} \tag{3.13}$$

όπου T_S είναι το αντίστροφο του εύρους ζώνης του (π.χ. η διάρκεια ενός συμβόλου) και B_S είναι το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος. Επίσης σ_τ και B_C είναι η rms καθυστέρηση και το εύρος ζώνης συνοχής του καναλιού, αντίστοιχα.

Διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα

Αν ο δίαυλος εισάγει σταθερό κέρδος και γραμμική απόκριση φάσης σε εύρος ζώνης που είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος, τότε ο δίαυλος προκαλεί στο λαμβανόμενο σήμα διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Στην περίπτωση αυτή, η κρουστική απόκριση του διαύλου έχει εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης λόγω πολλαπλών διαδρομών, η οποία είναι μεγαλύτερη από το αντίστροφο του εύρους ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος. Όταν συμβαίνει αυτό, το λαμβανόμενο σήμα περιέχει πολλαπλές εκδοχές της μεταδιδόμενης κυματομορφής με διαφορετικές εξασθενήσεις και καθυστερήσεις και συνεπώς είναι παραμορφωμένο. Οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις οφείλονται στη χρονική διασπορά των μεταδιδόμενων συμβόλων στο δίαυλο. Έτσι ο δίαυλος προκαλεί διασυμβολική παρεμβολή. Στο πεδίο της συχνότητας, διαλείψεις επιλεκτικές ως προς συχνότητα σημαίνει ότι κάποιες συνιστώσες συχνότητας στο φάσμα του λαμβανόμενου σήματος έχουν μεγαλύτερο κέρδος από άλλες.

Οι δίαυλοι με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα μοντελοποιούνται πιο δύσκολα απ' ότι οι δίαυλοι με επίπεδες διαλείψεις, διότι πρέπει να μοντελοποιηθεί κάθε σήμα πολλαπλής διαδρομής και ο δίαυλος να θεωρηθεί ότι είναι γραμμικό φίλτρο. Στο σχήμα (3.11) φαίνονται τα χαρακτηριστικά διαύλου με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα.



Σχήμα (3.11) : Χαρακτηριστικά διαύλου με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα.

Για διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα, το φάσμα X(f) του μεταδιδόμενου σήματος έχει εύρος ζώνης μεγαλύτερο από το εύρος συνοχής B_C του διαύλου. Στο πεδίο της συχνότητας, ένας δίαυλος είναι επιλεκτικός ως προς τη συχνότητα, όταν το κέρδος είναι επιλεκτικό για τις διάφορες συνιστώσες συχνότητας. Οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις προκαλούνται από καθυστερήσεις λόγω πολλαπλών διαδρομών, οι οποίες υπερβαίνουν την περίοδο των μεταδιδόμενων συμβόλων. Οι δίαυλοι με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς συχνότητα ονομάζονται επίσης δίαυλοι ευρείας ζώνης διότι το εύρος ζώνης του σήματος x(t) είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του διαύλου την παροδο του χρόνου το κέρδος και η φάση του διαύλου έχουν διαφορετικές τιμές κατά μήκος του φάσματος του x(t), γεγονός που έχει ως συνέπεια την χρονικά μεταβαλλόμενη παραμόρφωση του λαμβανόμενου σήματος y(t).

Συνοψίζοντας ένα σήμα υφίσταται διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα αν :

$$B_{S} > B_{C} \tag{3.14}$$

και

$$T_{S} < \tau_{d} \tag{3.15}$$

3.3.6.2 Διαλείψεις που οφείλονται στη διασπορά Doppler

• Ταχείες διαλείψεις

Αν συγκρίνουμε το πόσο απότομα αλλάζει το μεταδιδόμενο σήμα με τον ρυθμό μεταβολής του διαύλου, μπορούμε να διακρίνουμε τους διαύλους σε διαύλους με ταχείες διαλείψεις και διαύλους με αργές διαλείψεις. Σε δίαυλο με ταχείες διαλείψεις, η κρουστική του απόκριση αλλάζει απότομα κατά τη διάρκεια μετάδοσης ενός συμβόλου, δηλαδή, ο χρόνος συνοχής του διαύλου είναι μικρότερος από την περίοδο ενός συμβόλου του μεταδιδόμενου σήματος. Τούτο προκαλεί διασπορά συχνότητας λόγω της εξάπλωσης Doppler, γεγονός που συντελεί στην παραμόρφωση του σήματος στη λήψη. Αν θεωρήσουμε το πεδίο συχνότητας, παρατηρούμε ότι η παραμόρφωση λόγω ταχειών διαλείψεων αυξάνει όσο αυξάνει η εξάπλωση Doppler σε σχέση με το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος. Συνεπώς, ένα σήμα υφίσταται ταχείες διαλείψεις αν :

$$T_{S}>T_{C}$$
 (3.16)

και

$$B_{S} < B_{D} \tag{3.17}$$

Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι, όταν ένας δίαυλος χαρακτηρίζεται ως δίαυλος ταχειών ή αργών διαλείψεων, δεν ορίζεται αν είναι δίαυλος με επίπεδες διαλείψεις ή με διαλείψεις επιλεκτικές ως προς συχνότητα. Οι ταχείες διαλείψεις έχουν να κάνουν μόνο με τον ρυθμό μεταβολής του διαύλου λόγω κίνησης του τερματικού. Στην περίπτωση διαύλου με επίπεδες διαλείψεις, μπορούμε να προσεγγίσουμε την κρουστική απόκριση με έναν απλό παλμό δέλτα. Συνεπώς, ένας δίαυλος με επίπεδες και ταχείες διαλείψεις είναι εκείνος στον οποίο το εύρος της συνάρτησης δέλτα μεταβάλλεται ταχύτερα από τον ρυθμό μεταβολής του μεταδιόψεις ως προς συχνότητα και ταχείες διαλείψεις, τα εύρη, οι φάσεις, και οι χρονο-καθυστερήσεις οποιασδήποτε συνιστώσας από πολλαπλή διαδρομή μεταβάλλονται ταχύτερα από τον ρυθμό

Αργές διαλείψεις

Σε δίαυλο με αργές διαλείψεις, η κρουστική του απόκριση μεταβάλλεται με ρυθμό πολύ μικρότερο από τον ρυθμό μεταβολής του μεταδιδόμενου σήματος βασικής ζώνης. Στην περίπτωση αυτή, ο δίαυλος μπορεί να θεωρηθεί στατικός κατά τη διάρκεια ενός ή αρκετών διαστημάτων ίσων με το αντίστροφο του εύρους ζώνης. Στο πεδίο συχνότητας τούτο σημαίνει ότι η εξάπλωση Doppler του διαύλου είναι πολύ μικρότερη από το εύρος ζώνης του σήματος βασικής ζώνης. Συνεπώς, ένα σήμα υφίσταται αργές διαλείψεις αν :

και

$$T_{\rm S} \ll T_{\rm C} \tag{3.18}$$

$$B_{S} \gg B_{D} \tag{3.19}$$

Πρέπει να διευκρινιστεί, ότι η ταχύτητα του κινητού (ή η ταχύτητα των διαφόρων αντικειμένων στον δίαυλο) και ο ρυθμός μετάδοσης στη βασική ζώνη καθορίζουν κατά πόσο το σήμα υπόκειται σε ταχείες ή αργές διαλείψεις. Πρέπει επίσης να τονιστεί, ότι οι ταχείες και αργές διαλείψεις έχουν να κάνουν με τη σχέση μεταξύ του ρυθμού μεταβολών του διαύλου στον χρόνο και του ρυθμού μεταβολών του μεταδιδόμενου σήματος και όχι με μοντέλα απωλειών διάδοσης λόγω διαδρομής.

Η σχέση μεταξύ των σημαντικών παραμέτρων πολυδιαδρομικής διάδοσης και του είδους βραχυχρόνιων διαλείψεων που υφίσταται το σήμα απεικονίζονται στα σχήματα (3.12α) και (3.12β).



Σχήμα (3.12α) : Διάγραμμα απεικόνισης των βραχυχρόνιων διαλείψεων συναρτήσει της διάρκειας συμβόλου.



Σχήμα (3.12β) : Διάγραμμα απεικόνισης των βραχυχρόνιων διαλείψεων συναρτήσει του εύρους ζώνης του σήματος βασικής ζώνης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Ασύρματη διάδοση εσωτερικού χώρου - Indoor propagation

4.1 Εισαγωγή

Οι κινητές και προσωπικές επικοινωνίες έχουν γίνει απαραίτητες στη ζωή του ανθρώπου. Ο στόχος των επικοινωνιών αυτών είναι η παροχή υπηρεσιών σε άτομα οπουδήποτε και αν βρίσκονται. Συνεπώς η επιτυχής λειτουργία των υπηρεσιών αυτών προϋποθέτει την λειτουργία τους σε περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου, όπως μέσα σε κτίρια.

Όταν μια κεραία που λειτουργεί σαν σταθμός βάσης βρίσκεται στο εσωτερικό ενός κτιρίου, τότε σχηματίζεται μια πικοκυψέλη (picocell). Στο σχήμα (4.1) παρουσιάζεται ένα κτίριο γραφείων που σχηματίζει ένα είδος πικοκυψέλης. Οι πικοκυψέλες χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στην κυψελωτή τηλεφωνία σε περιοχές υψηλής τηλεπικοινωνιακής κίνησης όπως σιδηροδρομικοί σταθμοί, αεροδρόμια και γραφεία. Επίσης, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης πληροφοριών που απαιτούνται από τα ασύρματα τοπικά δίκτυα περιορίζουν τα μεγέθη των κυψελών σε πικοκυψέλες και επιβάλλουν την επιπλέον ανάγκη να προβλέψουμε τη φύση της ευρείας μετάδοσης σε περιβάλλον με picocells. Η διάδοση σε πικοκυψέλες έχει ακόμα σχέση και με τον καθορισμό της διάδοσης μέσα σε κτίρια τόσο από μακροκυψελωτά (macrocellular) όσο και μικροκυψελωτά (microcellular) συστήματα. Τα εξωτερικά αυτά συστήματα μπορούν να δράσουν είτε σαν πηγή παρεμβολών στις εσωτερικές κυψέλες είτε σαν μέσο που προσφέρει μεγαλύτερο βάθος κάλυψης χωρίς αύξηση της χωρητικότητας.

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν τόσο τα εμπειρικά όσο και τα φυσικά μοντέλα της διάδοσης σε εσωτερικό χώρο.



Σχήμα (4.1) : Παράδειγμα πικοκυψέλης.

4.2 Εμπειρικά μοντέλα διάδοσης εντός κτιρίων (within buildings)

4.2.1 Παράγοντας για τοίχους και πατώματα

Εδώ έχουμε δυο ξεχωριστές προσεγγίσεις. Η πρώτη είναι η μοντελοποίηση της διάδοσης βάσει των απωλειών διαδρομής, όπως ακριβώς και στα μακροκυψελωτά συστήματα, καθορίζοντας τις παραμέτρους από μετρήσεις. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση τείνει να οδηγεί σε μεγάλα σφάλματα σε περιπτώσεις εσωτερικών χώρων εξαιτίας της μεγάλης μεταβλητότητας των μηχανισμών διάδοσης μεταξύ των διαφορετικών τύπων κτιρίων και μεταξύ διαφορετικών δυνατών διαδρομών μέσα στο ίδιο κτίριο. Το ίδιο ισχύει εάν εφαρμόσουμε μοντέλα παρόμοια με αυτά της περίπτωσης μικροκυψελών.

Μια πιο επιτυχημένη μέθοδος είναι να χαρακτηριστεί η απώλεια εσωτερικού χώρου από έναν σταθερό εκθέτη απωλειών διαδρομής ίσο με 2, όπως και στον ελεύθερο χώρο, συν κάποιους πρόσθετους συντελεστές απωλειών που σχετίζονται με τον αριθμό των ορόφων n_f και των τοίχων n_w που τέμνονται από την απευθείας σύνδεση (απόσταση r) μεταξύ των τερματικών. Οπότε:

$$L = L_1 + 20\log r + n_f a_f + n_w a_w$$
(4.1)

όπου a_f, a_w είναι οι συντελεστές εξασθένησης (σε dB) ανά όροφο και ανά τοίχο αντίστοιχα και L_1 είναι η απώλεια σε απόσταση ενός μέτρου r = 1m. Ένα παράδειγμα πρόβλεψης με αυτό το μοντέλο φαίνεται στο σχήμα (4.2) για μια σειρά γραφείων και ένα διάδρομο, με το σταθμό βάσης μέσα σ' ένα γραφείο. Οι καμπύλες σημειώνονται με τις απώλειες διαδρομής [-dB].



Σχήμα (4.2) : Παράδειγμα απωλειών διαδρομής σε εσωτερικό χώρο με γραφεία.

Μια παρόμοια μέθοδος υπάρχει σε ένα μοντέλο της ITU-R με τη διαφορά ότι μόνο η απώλεια ορόφου υπολογίζεται ξεχωριστά, ενώ οι απώλειες μεταξύ σημείων στον ίδιο όροφο περιλαμβάνονται αλλάζοντας τον εκθέτη των απωλειών διαδρομής. Η βασική μεταβολή με τη συχνότητα υποτίθεται ότι είναι ίδια με τον ελεύθερο χώρο και έτσι προκύπτει το παρακάτω μοντέλο (σε dB):

$$L_{T} = 20\log f_{c} + 10n\log r + L_{f}(n_{f}) - 28$$
(4.2)

όπου *n* είναι ο εκθέτης των απωλειών διαδρομής (πίνακας 4.1) και $L_f(n_f)$ είναι οι απώλειες διείσδυσης ορόφων που μεταβάλλονται σύμφωνα με τον αριθμό των ορόφων που διαπερνάει το σήμα (πίνακας 4.2).

Συχνότητα (GHz)	Περιβάλλον Εσωτερικού χώρου			
(GHz)	Κατοικία	Γραφείο	Εμπορικό	
0.9	-	3.3	2	
1.2-1.3	-	3.2	2.2	
1.8-2	2.8	3	2.2	
4	-	2.8	2.2	
60	-	2.2	1.7	

Πίνακας (4.1) : Εκθέτης απωλειών διαδρομής σύμφωνα με το μοντέλο της ΙΤU-R

Συχνότητα (GHz)	Περιβάλλον Εσωτερικού χώρου		
(GHz)	Κατοικία	Κατοικία Γραφείο	
		9 (1 όροφος)	
0.9	-	19 (2 όροφοι)	-
		24 (3 όροφοι)	
4	$4n_f$	$15 + 4(n_f - 1)$	$6 + 3(n_f - 1)$

Πίνακας (4.2) : Παράγοντας απωλειών διείσδυσης ορόφων

4.2.2 Μοντέλο COST231 πολλαπλών τοίχων

Αυτό το μοντέλο διάδοσης εντός κτιρίων ενσωματώνει ένα γραμμικό παράγοντα απωλειών, ανάλογο με τον αριθμό των τοίχων που διαπερνούνται. Επιπλέον προστίθεται και ένας πιο πολύπλοκος όρος ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό των ορόφων που διαπερνούνται και προκύπτουν απώλειες που μετά τον πρώτο όροφο αυξάνονται πιο αργά καθώς προστίθενται κι άλλοι. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L_T = L_F + L_c + \sum_{i=1}^{W} L_{wi} n_{wi} + L_f n_f^{((n_f+2)/(n_f+1)-b)}$$
(4.3)

όπου L_F είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου για την απευθείας διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη, n_{wi} ο αριθμός των τοίχων που διασχίζονται από το απευθείας μονοπάτι τύπου *i*, W ο αριθμός των τύπων τοίχων, L_{wi} οι απώλειες διείσδυσης για τοίχο τύπου i, n_f ο αριθμός των ορόφων που συναντώνται από το μονοπάτι, *b* και L_C εμπειρικές σταθερές και L_f οι απώλειες ανά όροφο. Κάποιες τιμές που συστήνονται είναι $L_W = 1.9dB$ (900MHz), 3.4dB (1800MHz) για λεπτούς τοίχους, 6.9dB (1800MHz) για βαθείς τοίχους, $L_f = 14.8dB$ (900MHz), 18.3dB (1800MHz) και *b*=0.46. Οι απώλειες ορόφου, δηλαδή ο τελευταίος όρος στη σχέση (4.3) παρουσιάζονται στο σχήμα (4.3). Παρατηρούμε ότι οι επιπλέον απώλειες ανά όροφο μειώνονται με την αύξηση του αριθμού των ορόφων.



Σχήμα (4.3) : Απώλειες ορόφου για το μοντέλο COST231 πολλαπλών τοίχων.

4.2.3 Μοντέλο Ericsson

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το οποίο προορίζεται για χρήση γύρω στα 900MHz, οι απώλειες διαδρομής που περιλαμβάνουν και τη σκίαση θεωρούνται σαν μια τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανεμημένη ανάμεσα σε όρια τα οποία ποικίλουν όπως δείχνει ο πίνακας (4.3). Ο εκθέτης των απωλειών διαδρομής αυξάνεται από 2 σε 12 καθώς η απόσταση μεγαλώνει, υποδεικνύοντας μια ταχεία μείωση της ισχύος του σήματος με την απόσταση. Το μοντέλο μπορεί να επεκταθεί για χρήση και στα 1800MHz με την πρόσθεση 8.5dB επιπλέον απωλειών διαδρομής για όλες τις αποστάσεις.

5 ()		<i>y</i>
Απόσταση (m)	Κάτω όριο απωλειών διαδρομής (dB)	Άνω όριο απωλειών διαδρομής (dB)
1 < r < 10	$30 + 20 \log r$	30 + 40 log r
$10 \le r < 20$	20 + 30 log r	40 + 30 log r
$20 \le r < 40$	$-19 + 60 \log r$	$1 + 60 \log r$
$40 \le r$	-115 + 120 log r	-95 + 120 log r

Πίνακας (4.3) : Μοντέλο Ericsson εσωτερικής διάδοσης

4.3 Εμπειρικά μοντέλα διάδοσης μέσα σε κτίρια (into buildings)

4.3.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν δυο σημαντικά κίνητρα για να εξετάσουμε τη διείσδυση των σημάτων μέσα σε κτίρια. Πρώτον, αφού οι περισσότεροι χρήστες περνούν τον περισσότερο χρόνο τους μέσα σε κτίρια, το επίπεδο υπηρεσιών που έχουν στη διάθεσή τους θα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ισχύεις των παρεχόμενων σημάτων μέσα στα κτίρια (το βάθος κάλυψης). Όταν υπάρχει επαρκής χωρητικότητα στις μακροκυψέλες και μικροκυψέλες του δικτύου, τότε αυτή η εσωτερική κάλυψη που μόλις αναφέρθηκε προσφέρεται από το βαθμό διείσδυσης μέσα στα κτίρια. Όταν, αντιθέτως, είναι απαραίτητο να εξυπηρετηθούν υψηλές πυκνότητες χρηστών μέσα σ' ένα κτίριο (π.χ. σε πολυσύχναστα γραφεία, σταθμούς τρένων και αεροδρόμια), η εσωτερική κάλυψη πρέπει τότε να παρέχεται από τις κατάλληλες πικοκυψέλες. Επειδή δεν είναι αποδοτικό να δίνονται ξεχωριστές συχνότητες σε αυτές, χρειάζεται να επαναχρησιμοποιούνται συχνότητες που ήδη έχουν κατανεμηθεί σε μικροκυψέλες ή μακροκυψέλες, γνωρίζοντας βέβαια καλά μέχρι ποιο σημείο οι δυο τύποι κυψελών θα παρεμβάλλουν μέσα στο κτίριο.

4.3.2 Μοντέλο COST231 οπτικής επαφής

Σε περιπτώσεις όπου υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ της όψης του κτιρίου και της εξωτερικής κεραίας, το ακόλουθο ημι-εμπειρικό μοντέλο έχει προταθεί, η γεωμετρία του οποίου ορίζεται στο σχήμα (4.4). Εδώ r_e είναι η απευθείας διαδρομή ανάμεσα στην εξωτερική κεραία και το σημείο αναφοράς στον τοίχο του κτιρίου.



Σχήμα (4.4) : Γεωμετρία του μοντέλου COST231 οπτικής επαφής.

Αφού το μοντέλο θα εφαρμόζεται συχνά σε μικρή απόσταση, είναι σημαντικό να εφαρμόζεται το πραγματικό μονοπάτι διάδοσης σε τρεις διαστάσεις παρά κατά μήκος του εδάφους. Οι απώλειες που προβλέπονται από το μοντέλο ποικίλουν σημαντικά καθώς η γωνία πρόσπτωσης θ μεταβάλλεται. Οι συνολικές απώλειες περιγράφονται από την ακόλουθη σχέση :

$$L_T = L_F + L_e + L_g (1 - \cos \theta)^2 + \max(L_1, L_2)$$
(4.4)

όπου L_F είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου για όλο το μονοπάτι $(r_i + r_e)$, L_e είναι το μονοπάτι απωλειών μέσω του εξωτερικού τοίχου σε κανονική πρόσπτωση $\theta=0$, L_g είναι οι πρόσθετες απώλειες του εξωτερικού τοίχου σε κάθετη πρόσπτωση $\theta=90^0$ και

$$L_1 = n_W L_i \qquad L_2 = a(r_i - 2)(1 - \cos\theta)^2$$
(4.5)

όπου n_w είναι ο αριθμός των τοίχων που περνά το εσωτερικό μονοπάτι r_i , L_i είναι οι απώλειες ανά εσωτερικό τοίχο και α είναι μια συγκεκριμένη εξασθένηση [dB/m] που εφαρμόζεται για ανεμπόδιστα εσωτερικά μονοπάτια. Όλες οι αποστάσεις είναι σε μέτρα.

Το μοντέλο αυτό έχει ισχύ σε αποστάσεις μέχρι και 500 μέτρα και οι τιμές των παραμέτρων στον πίνακα (4.4) συνιστώνται για χρήση σε πεδίο συχνοτήτων 900-1800MHz. Οι τιμές αυτές είναι σε συμφωνία με μετρήσεις σε πραγματικά κτίρια και περιλαμβάνουν τις επιδράσεις τυπικών διαρρυθμίσεων επίπλων.

Παράμετρος Υλικό Προσεγγιστική τιμή Ξύλινοι τοίγοι 4 Τσιμέντο με μη μεταλλικά $L_{e} \acute{\eta} L_{i} [dB m^{-1}]$ 7 παράθυρα Τσιμέντο χωρίς παράθυρα 10 - 20 L_g [dB] 20 α [dB m⁻¹] 0.6 _

Πίνακας (4.4) : Παράμετροι για το μοντέλο COST231 οπτικής επαφής

4.3.3 Μοντέλα κέρδους ορόφου

Στις περισσότερες περιπτώσεις μακροκυψελών, δεν υπάρχει μονοπάτι οπτικής επαφής μεταξύ του σταθμού βάσης και της όψης του κτιρίου. Εμπειρικά μοντέλα αυτής της κατάστασης συνήθως βασίζονται στη σύγκριση των απωλειών διαδρομής που συναντώνται στο δρόμο εκτός κτιρίου με τις απώλειες διαδρομής εντός του κτιρίου σε διάφορα πατώματα (*n* είναι ο αριθμός των ορόφων όπως στο σχήμα 4.5). Είναι τότε πιθανό να οριστούν απώλειες διείσδυσης ορόφων ως εξής :

$$L_p = L_f(n) - L_{out} \tag{4.6}$$

Με ενδιαφέρον βρέθηκε σε μερικές μελέτες ότι οι απώλειες διείσδυσης στα κτίρια μειώνονται με τη συχνότητα. Τυπικές τιμές για απώλειες διείσδυσης L_f στο ισόγειο είναι 14.2, 13.4 και 12.8dB μετρημένες στα 900, 1800 και 2300MHz αντίστοιχα. Οι απώλειες μειώνονται με το ύψος από το ισόγειο προς τα πάνω με ένα ρυθμό 2db ανά όροφο και μετά ξεκινούν να αυξάνονται πάλι με το ύψος πάνω από τον ένατο ή το δέκατο πέμπτο όροφο. Η ακριβής διακύμανση πιθανώς να εξαρτάται πολύ από τη γεωμετρία των γύρω κτιρίων.



Σχήμα (4.5) : Γεωμετρία διείσδυσης κτιρίων σε συνθήκες μη οπτικής επαφής.

4.3.4 Μοντέλο COST231 μη οπτικής επαφής

Αυτό το μοντέλο συσχετίζει τις απώλειες στο εσωτερικό ενός κτιρίου από εξωτερικό πομπό με τις απώλειες που μετρώνται έξω από το κτίριο, στην κοντινότερη πλευρά του τοίχου που μας ενδιαφέρει, στα 2 μέτρα πάνω από το έδαφος. Οι απώλειες δίνονται από τη σχέση :

$$L_T = L_{out} + L_e + L_{ge} + \max(L_1, L_3) - G_{fh}$$
(4.7)

όπου $L_3 = ar_i$ και r_i , L_e , α και L_1 ορίζονται όπως στο μοντέλο COST231 οπτικής επαφής και το κέρδος ύψους ορόφου δίνεται από

$$G_{fh} = nG_n \qquad \dot{\eta} \qquad G_{fh} = hG_h \tag{4.8}$$

όπου *h* είναι το ύψος του ορόφου πάνω από το ύψος αναφοράς εκτός κτιρίου (σε μέτρα) και *n* ο αριθμός του ορόφου όπως στο σχήμα (4.5). Η σκίαση προβλέπεται ότι είναι λογαριθμοκανονική με διακύμανση 4-6dB που εξαρτάται από το εκάστοτε σημείο. Άλλες τιμές δείχνονται στον πίνακα (4.5).

Παράμετρος	Προσεγγιστική τιμή	
L_{ge} [dB] στα 900 MHz	4	
L_{ge} [dB] στα 1800 MHz	6	
G_n [dB ανά όροφο] στα 900/1800 MHz	1.5 – 2 για συνήθη κτίρια 4-7 για ορόφους με ύψος πάνω από 4 m	

Πίνακας (4.5) : Παράμετροι για το μοντέλο COST231 μη οπτικής επαφής

Τόσο το μοντέλο της οπτικής όσο και αυτό της μη οπτικής επαφής στηρίζονται στην κυρίαρχη συνεισφορά του σήματος που διεισδύει μέσω ενός μόνο εξωτερικού τοίχου. Μια ακριβέστερη εκτίμηση μπορεί να αποκτηθεί αθροίζοντας την ισχύ που περνάει μέσω όλων των τοίχων.

4.4 Φυσικά μοντέλα διάδοσης σε εσωτερικούς χώρους

Όπως και στην περίπτωση διάδοσης σε εξωτερικούς χώρους, έτσι και σε εσωτερικούς χώρους βρίσκουν εφαρμογή τεχνικές και μέθοδοι προβλέψεων ηλεκτρομαγνητικού κύματος όπως για παράδειγμα η γεωμετρική μέθοδος της περίθλασης (UTD theory) και η μέθοδος των ροπών. Ωστόσο, οι μέθοδοι αυτοί που αποτελούν φυσικά μοντέλα, έχουν πολλούς περιορισμούς εξαιτίας της δυσκολίας εξασφάλισης και επαρκούς χρήσης φυσικών δεδομένων. Οι δυσκολίες αυτές στην περίπτωση εσωτερικού χώρου είναι ιδιαίτερα έντονες διότι η παρουσία των επίπλων και η κίνηση των ανθρώπων μπορούν να έχουν σοβαρή επίδραση στη ραδιοκάλυψη του χώρου. Στην συνέχεια θα περιγραφούν τα βασικά φυσικά μοντέλα που δίνουν συμπεράσματα σχετικά με τη διάδοση σε εσωτερικό χώρο.

4.4.1 Διάδοση μεταξύ ορόφων

Στο σχήμα (4.6) φαίνονται τέσσερα διαφορετικά μονοπάτια μεταξύ πομπού και δέκτη που είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικούς ορόφους. Το μονοπάτι 0 είναι απευθείας μονοπάτι και το σήμα που ακολουθεί τη διαδρομή αυτή αντιμετωπίζει την εξασθένιση που οφείλεται στη διείσδυση από τους ορόφους του κτιρίου. Σύμφωνα με τα εμπειρικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν παραπάνω το μονοπάτι 0 είναι εκείνο που παρέχει τη μεγαλύτερη ισχύ στο δέκτη. Τα μονοπάτια 1 και 2 συναντούν περιθλάσεις κατά τη διάδοσή του σήματος έξω και πάλι μέσα από τα παράθυρα του κτιρίου, αλλά ωστόσο δεν συναντούν την εξασθένιση διείσδυσης ορόφων. Τέλος, το σήμα που ακολουθεί το μονοπάτι 3 επίσης περιθλάται από τα παράθυρα, αλλά σε μικρότερη γωνία από τα προηγούμενα δύο μονοπάτια. Ανακλάται από τον τοίχο του απέναντι κτιρίου και έπειτα ανακλάται πάλι πίσω στο αρχικό κτίριο και φτάνει έτσι στο δέκτη.



Σχήμα (4.6) : Διαφορετικά μονοπάτια διάδοσης μεταξύ ορόφων.

Για να γίνει η ανάλυση της ισχύος που φτάνει στο δέκτη από τα μονοπάτια 2 και 3, η γεωμετρία του προβλήματος προσεγγίζεται από τη γεωμετρία διπλής ακμής που απεικονίζεται στο σχήμα (4.7). Οι δύο ακμές αντιπροσωπεύουν τις γωνίες του κτιρίου στα σημεία που το ηλεκτρομαγνητικό κύμα βγαίνει και μπαίνει στο κτίριο.



Έτσι η διάδοση μπορεί τώρα να αναλυθεί σύμφωνα με τη γεωμετρική μέθοδο της περίθλασης. Ο πομπός είναι μια σημειακή πηγή και επομένως ακτινοβολεί σφαιρικά προς όλες τις κατευθύνσεις. Το προσπίπτον κύμα στην ακμή 1 είναι λοιπόν :

$$E_{1} = \sqrt{Z_{0} \frac{P_{T}}{4\pi r_{1}^{2}}} = \frac{1}{2r_{1}} \sqrt{\frac{Z_{0}P_{T}}{\pi}}$$
(4.9)

όπου P_T είναι η ισοτροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς από την πηγή. Από την περίθλαση στην ακμή 1 προκύπτει ένα νέο κύμα που προσπίπτει στην ακμή 2, το οποίο προσεγγίζεται από τη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης :

$$E_2 = E_1 x D_1 x \sqrt{\frac{r_1}{r_2(r_1 + r_2 + r_3)}}$$
(4.10)

όπου ο παράγοντας μέσα στη ρίζα είναι ο παράγοντας εξάπλωσης για πρόσπτωση σφαιρικού κύματος πάνω σε ίσια ακμή.

Όμοια, το πεδίο που δημιουργείται στο δέκτη είναι :

$$E_3 = E_2 x D_2 x \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{r_3(r_1 + r_2 + r_3)}}$$
(4.11)

Επομένως η λαμβανόμενη ισχύς στην ισοτροπική κεραία του δέκτη είναι :

$$P_r = P_T \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{E_3^2}{Z_0} = P_T (\frac{\lambda}{4\pi})^2 \frac{D_1^2 D_2^2}{r_1 r_2 r_3 (r_1 + r_2 + r_3)}$$
(4.12)

Το αποτέλεσμα αυτό βρίσκει εφαρμογή τόσο για το μονοπάτι 1 όσο και για το 2, προφανώς με την αντικατάσταση κατάλληλων αποστάσεων. Η ισχύς που φτάνει από το μονοπάτι 3 επίσης υπολογίζεται από τον τύπο (4.12) με τη διαφορά ότι αυτό πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το συντελεστή ανάκλασης του απέναντι κτιρίου.

Το άθροισμα των ισχύων που προκύπτει από τις ποικίλες συνεισφορές παρουσιάζεται στο σχήμα (4.8). Είναι φανερό από το σχήμα αυτό ότι όταν ο αριθμός των ορόφων είναι μικρός τότε επικρατεί το σήμα του μονοπατιού 0. Όταν όμως ο αριθμός των ορόφων αυξηθεί τότε επικρατούν πρώτον το σήμα που φτάνει από ανάκλαση εφόσον υπάρχει διπλανό κτίριο, και δεύτερον τα σήματα που φτάνουν από περιθλάσεις.



Σχήμα (4.8) : Μεταβολή των απωλειών διαδρομής συναρτήσει του αριθμού ορόφων. Στην περίπτωση του πειράματος ο όροφος έχει ύψος 4m, το κτίριο έχει πλάτος 30m, το δίπλα κτίριο βρίσκεται σε απόσταση 30m και η συχνότητα είναι 900MHz.

4.4.2 Διάδοση μέσα στον ίδιο όροφο

Όταν ο πομπός και ο δέκτης είναι τοποθετημένοι στον ίδιο όροφο ενός κτιρίου, τότε ο κυρίαρχος τρόπος διάδοσης είναι η οπτική επαφή, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.9). Ωστόσο, η παρουσία αντικειμένων μεταξύ του πατώματος και της οροφής έχει σαν αποτέλεσμα η ζώνη Fresnel να παρεμποδίζεται με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι απώλειες λόγω περίθλασης. Ουσιαστικά ο εκθέτης των απωλειών διαδρομής αυξάνεται και συνεπώς η ισχύς του σήματος μειώνεται πολύ γρήγορα με την απόσταση. Αξίζει να σημειωθεί πως είναι δυνατή η αποφυγή της πτώσης ισχύος του σήματος λόγω απωλειών περίθλασης, με την τοποθέτηση των κεραιών στο μέσο του ύψους μεταξύ των εμποδίων του πατώματος και αυτών που βρίσκονται στο ταβάνι.



Σχήμα (4.9) : Διάδοση μεταξύ κεραιών τοποθετημένων στον ίδιο όροφο.

4.4.3 Βασικοί παράμετροι των φυσικών μοντέλων

Η εφαρμογή των φυσικών μοντέλων απαιτεί τη γνώση όχι μόνο της γεωμετρίας του κτιρίου, αλλά και των βασικών παραμέτρων των υλικών κατασκευής του. Ωστόσο είναι πολύ δύσκολη η γνώση των παραμέτρων αυτών αν σκεφτεί κανείς ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται δεν είναι ομογενή. Για παράδειγμα στους τοίχους και τα πατώματα χρησιμοποιείται σκυρόδεμα ενισχυμένο με χάλυβα, ενώ παράλληλα οι τοίχοι παρουσιάζουν ανωμαλίες στην επιφάνειά τους με αποτέλεσμα να είναι εξαιρετικά δύσκολη η απόκτηση δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν στην εφαρμογή των φυσικών μοντέλων. Συνήθως η αντιμετώπιση τέτοιων περιπτώσεων γίνεται με τη θεώρηση ότι οι τοίχοι και τα πατώματα έχουν άπειρη και επίπεδη μορφή. Στον πίνακα (4.6) παρουσιάζονται οι τιμές της διηλεκτρικής σταθεράς βασικών υλικών σε διάφορες συχνότητες.

	1 GHz	57.5 GHz	78.5 GHz	95.9 GHz
Τσιμέντο	7.0 <i>-j</i> 0.85	6.50 <i>-j</i> 0.43	-	6.20 <i>-j</i> 0.34
Αφρομπετό	2.0-j0.50	-	-	-
Πάτωμα με συνθετικό υλικό	-	3.91 <i>-j</i> 0.33	3.64 <i>-j</i> 0.37	3.16- <i>j</i> 0.39
Ασβεστόπλακα	-	2.25-j0.03	2.37-j0.10	2.25-j0.06
Ταβάνι με μόνωση	1.2 <i>-j</i> 0.01	1.59 <i>-j</i> 0.01	1.56 <i>-j</i> 0.02	1.56 <i>-j</i> 0.04
Γυαλί	7.0- <i>j</i> 0.10	6.81- <i>j</i> 0.17	-	-
Υαλοβάμβακας	1.2- <i>j</i> 0.10	-	-	-

Πίνακας (4.6) : Διηλεκτρική σταθερά τυπικών υλικών κατασκευής κτιρίων.

4.5 Κεραίες εσωτερικού χώρου

Μια τυπική κεραία οροφής για κάλυψη εσωτερικού χώρου στα 900MHz φαίνεται στο σχήμα (4.10). Οι βασικές απαιτήσεις στις κεραίες εσωτερικού χώρου είναι το μεγάλο εύρος της δέσμης ακτινοβολίας, καθώς και η διακριτική τους εμφάνιση έτσι ώστε να μοιάζουν για παράδειγμα σαν απλός ανιχνευτής καπνού. Γενικά οι κεραίες αυτές ακτινοβολούν χρησιμοποιώντας γραμμική πόλωση, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που η χρήση κυκλικής πόλωσης είναι προτιμητέα. Έχει αποδειχθεί άλλωστε, ότι η κυκλική πόλωση μειώνει ουσιωδώς το βάθος των διαλείψεων και την μέση καθυστέρηση διασποράς (rms delay spread) λόγω της απόρριψης των περιττών ανακλάσεων καθώς και της μείωσης των απωλειών διασταυρούμενης συνομιλίας. Ομοίως, η μείωση του εύρους της δέσμης ακτινοβολίας της κεραίας φαίνεται ότι μειώνει σημαντικά τη διασπορά καθυστέρησης σε περιπτώσεις οπτικής επαφής, αλλά προφανώς αυτό αποτελεί εμπόδιο στην ομοιόμορφη κάλυψη μιας περιοχής εσωτερικού χώρου.

Γενικά οι τυπωμένες κεραίες είναι αρκετά ελκυστικές για εσωτερικούς χώρους, αλλά οι ενσύρματες κεραίες είναι πιο χρήσιμες σε χαμηλές συχνότητες.



Σχήμα (4.10) : Τυπική κεραία χρήσης σε εσωτερικό χώρο.

4.5.1 Κατανεμημένες Κεραίες

Μια ιδιαίτερα χρήσιμη εφαρμογή κεραιών για εσωτερικούς χώρους είναι η χρήση κατανεμημένων κεραιών. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα (4.11), η ιδέα είναι να χωριστεί η εκπεμπόμενη ισχύς σε πολλές κεραίες-στοιχεία, διασκορπισμένες στο χώρο έτσι ώστε να προσφέρουν κάλυψη στην ίδια περιοχή σαν απλή κεραία αλλά με μειωμένη συνολική ισχύ και βελτιωμένη αξιοπιστία. Αυτό είναι δυνατό επειδή λιγότερη ισχύς χάνεται σε διεισδύσεις και απώλειες σκίασης και γιατί υπάρχει πιο συχνά κανάλι οπτικής επαφής, οδηγώντας έτσι σε μειωμένο βάθος διαλείψεων και μειωμένη χρονική διασπορά.

Ένα σύστημα κατανεμημένων κεραιών μπορεί να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας παθητικούς διαιρέτες και τροφοδότες ή αλλιώς ενεργητικοί επαναλήπτες-ενισχυτές μπορούν να συμπεριληφθούν για να ξεπεραστούν οι απώλειες τροφοδοσίας. Σε συστήματα με εξισορρόπηση μπορεί να είναι επιθυμητό να εισάγουμε καθυστερήσεις μεταξύ των στοιχείων. Αυτό τεχνητά αυξάνει τη διασπορά καθυστέρησης σε περιοχές με επικαλυπτόμενη κάλυψη, επιτρέποντας ποιοτικές βελτιώσεις μέσω της χρονικής διασποράς.

Η βασική μορφή μιας παθητικής κατανεμημένης κεραίας είναι το ακτινοβόλο καλώδιο (leaky feeder), το οποίο είναι ειδικός τύπος ομοαξονικού καλωδίου όπου η επιφάνεια έχει σχισμές για να επιτρέπει την ακτινοβολία κατά μήκος του καλωδίου.

Μπορεί να δειχθεί ότι εάν μια δεδομένη περιοχή πρέπει να καλυφθεί από N κατανεμημένες κεραίες-στοιχεία παρά από μια μόνη κεραία, τότε η συνολικά εκπεμπόμενη ισχύς μειώνεται περίπου κατά ένα παράγοντα $N^{1-n/2}$ και η ισχύς ανά κεραία μειώνεται κατά ένα παράγοντα $N^{n/2}$ όπου n ο εκθέτης απωλειών διαδρομής. Αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα (4.12). Εναλλακτικά, η συνολικά καλυπτόμενη περιοχή θα μπορούσε να επεκταθεί για ένα δεδομένο όριο ακτινοβολούμενης ισχύος, το οποίο μπορεί να είναι σημαντικό για να επιτρέψει συμμόρφωση με τα όρια ασφαλείας ακτινοβολίας στο ανθρώπινο κεφάλι.



Σχήμα (4.11) : Κάλυψη εσωτερικού χώρου με (α) μία κεραία (β) κατανεμημένες κεραίες.


Σχήμα (4.12) : Ισχύς κατανεμημένων κεραιών συγκρινόμενη με απλή κεραία : (–) συνολικά ακτινοβολούμενη ισχύς, (- - -) ισχύς για κάθε κεραία-στοιχείο.

4.6 Συμπέρασμα

Η διάδοση σε εσωτερικούς χώρους επηρεάζεται από ένα ευρύ φάσμα μηχανισμών που λειτουργούν σ' ένα πολύπλοκο, τρισδιάστατο περιβάλλον, οι λεπτομέρειες του οποίου είναι σπάνια διαθέσιμες για να γίνουν προβλέψεις. Ωστόσο, απλά μοντέλα μπορούν να δώσουν μερικές χρήσιμες εκτιμήσεις της διάδοσης μέσα σε κτίρια και επιπλέον η πρόοδος πάνω στο αντικείμενο ενισχύεται από την αυξανόμενη σημασία των επικοινωνιών εντός κτιρίων, ιδιαίτερα για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Το πρόγραμμα προσομοίωσης SuperNEC

5.1 Εισαγωγή

Το SuperNEC (Super Numerical Electromagnetic Code) είναι ένα πρόγραμμα για την προσομοίωση κεραιών και ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων, και κατασκευάστηκε από την εταιρεία Poynting Software (Pty). Το πρόγραμμα επιτρέπει την προσομοίωση και την εκτίμηση της ηλεκτρομαγνητικής επίδοσης απλών κεραιών, καθώς και κεραιών που βρίσκονται τοποθετημένες πάνω σε πολύπλοκες κατασκευές, σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Η ανάπτυξη και εξέλιξη του Super NEC ξεκίνησε πριν από 12 χρόνια. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια ιστορική επισκόπηση της ανάπτυξής του.

Το σημείο εκκίνησης για το πρόγραμμα προσομοίωσης SuperNEC αποτέλεσε ο πολύ γνωστός αριθμητικός ηλεκτρομαγνητικός κώδικας NEC2, ο οποίος αναπτύχθηκε από το αμερικάνικο ναυτικό σε συνεργασία με τα εργαστήρια Lawrence Livermore, το 1982. Το 1987 ο Derek Nitch δημιούργησε μια παράλληλη έκδοση του NEC2, χρησιμοποιώντας κώδικα σε FORTRAN και OCCAM. Ο κώδικας που προέκυψε είχε δυσκολία στην περαιτέρω τροποποίησή του και γι' αυτό ο Derek Nitch ξανασχεδίασε το πρόγραμμα ξεκινώντας από την θεμελιώδη θεωρία χρησιμοποιώντας αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Το νέο πρόγραμμα, το οποίο ήταν γραμμένο σε C++, ήταν πιο γρήγορο, χρησιμοποιούσε δυναμικές δομές δεδομένων και το σημαντικότερο, ήταν πολύ πιο εύκολο να επεκταθεί και να τροποποιηθεί. Το νέο πρόγραμμα ήταν διαμορφωμένο έτσι ώστε να εκτελείται παράλληλα από διαφορετικούς υπολογιστές που ανήκουν στο ίδιο τοπικό δίκτυο. Επιπλέον προστέθηκε η γεωμετρική μέθοδος της περίθλασης (Uniform geometrical Theory of Diffraction, UTD), η οποία χρησιμοποιείται για την επίλυση ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων σε υψηλές συχνότητες, στην ήδη υπάρχουσα μέθοδο των ροπών (Method of Moments, MOM). Έτσι προέκυψε ένα ακριβές υβριδικό μοντέλο.

Μια καινοτομία στο Super NEC είναι ότι τα αρχεία εισόδου και εξόδου του, καθώς και το γραφικό του περιβάλλον βασίζονται στο πρόγραμμα Matlab. Το γεγονός αυτό έκανε το πρόγραμμα πολύ πιο φιλικό στο χρήστη σε σχέση με την προηγούμενη έκδοσή του NEC2, η οποία απαιτούσε αρχεία εισόδου και εξόδου ASCII.

5.2 Η αριθμητική μέθοδος του SuperNEC

Το NEC2 εκτελούσε τις προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών (Method of Moments, MOM). Η μέθοδος αυτή απαιτεί την αντιμετώπιση του προβλήματος σαν διακριτό αποτελούμενο από μικρά αγώγιμα τμήματα (wire segments), συχνά στην μορφή πλέγματος, όταν μοντελοποιούνται επιφάνειες. Τα μικρά αγώγιμα τμήματα και το πλέγμα πρέπει να έχουν μέγεθος περίπου ίσο με το 1/10 του μήκους κύματος. Ο χρόνος επίλυσης του προβλήματος στον υπολογιστή είναι ανάλογος του N³, ενώ η μνήμη που απαιτείται είναι ανάλογη του N², όπου N είναι ο αριθμός των αγνώστων.

Η γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (UTD) είναι μια ηλεκτρομαγνητική μέθοδος που αφορά υψηλές συχνότητες, όπου το μέγεθος των στοιχείων που αποτελούν το πρόβλημα, είναι πολύ μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος. Η μέθοδος UTD συμπλήρωσε την μέθοδο των ροπών, έτσι ώστε τα υψηλής συχνότητας προβλήματα να μπορούν να επιλύονται με τη μέθοδο UTD, ενώ τα χαμηλότερης συχνότητας προβλήματα επιλύονται με την μέθοδο των ροπών. Τα UTD στοιχεία που υλοποιούνται στο SuperNEC είναι διηλεκτρικές πλάκες και κύλινδροι.

Στην προσπάθεια να γεφυρωθεί το χάσμα ανάμεσα στα προβλήματα που επιλύονται μόνο με την μέθοδο των ροπών και σε αυτά που επιλύονται με τη μέθοδο UTD, δημιουργήθηκε ένα νέο υβριδικό μοντέλο που αποτελείται και από τις δύο αυτές μεθόδους. Ο νέος αυτός υβριδικός κώδικας μπορεί να αναλύσει προβλήματα, στα οποία μικρά αγώγιμα τμήματα και διηλεκτρικές πλάκες και κύλινδροι, συνυπάρχουν στο ίδιο πρόβλημα. Κατά την επίλυση των προβλημάτων, ο πίνακας που προκύπτει από τη μέθοδο των ροπών είναι τροποποιημένος εξαιτίας της αλληλεπίδρασης των αγώγιμων τμημάτων με τα UTD αντικείμενα. Η δημιουργία ενός νέου υβριδικού μοντέλου δίνει τη δυνατότητα της αύξησης του εύρους των συχνοτήτων στο οποίο μπορούν να επιλυθούν τα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα.

Στο σχήμα (5.1) παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ενός αεροσκάφους κατασκευασμένο σύμφωνα με τη μέθοδο των ροπών (5.1α) και με τη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (5.1β).



Σχήμα (5.1α) : Μοντέλο αεροσκάφους με κεραίες κατασκευασμένο με τη μέθοδο των ροπών.



Σχήμα (5.1β) : Μοντέλο αεροσκάφους κατασκευασμένο σύμφωνα με τη γεωμετρική μέθοδο της περίθλασης.

Το πρόγραμμα έχει μετατραπεί έτσι ώστε να μπορεί να εκτελείται παράλληλα σε διαφορετικούς υπολογιστές, συνδεδεμένους σε τοπικό δίκτυο με την βοήθεια του πακέτου PVM (Parallel Virtual Machine). Το όφελος από αυτή την προσαρμογή του προγράμματος είναι πολύ σημαντικό, γιατί διαφορετικοί υπολογιστές μπορούν να συνδεθούν για να λύσουν μεγάλα ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα.

5.3 Θεωρία του προγράμματος SuperNEC

Η εξίσωση που πρέπει να επιλυθεί χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ροπών είναι η ακόλουθη:

$$L(J) = E \tag{5.1}$$

όπου L είναι ένας γραμμικός τελεστής. Ο γραμμικός τελεστής που χρησιμοποιείται στο SuperNEC είναι η εξίσωση του Pocklington, η οποία σχετίζει το

παρατηρούμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με την πυκνότητα ρεύματος. Στη μέθοδο των ροπών η πυκνότητα του ρεύματος J, στην διάταξη που μας ενδιαφέρει, αναπτύσσεται στην ακόλουθη σειρά με την βοήθεια των συναρτήσεων βάσης J_1 , J_2 , $J_3...$

$$J = \sum_{n=1}^{N} a_n J_n \tag{5.2}$$

όπου N είναι ο αριθμός των συναρτήσεων βάσης που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν το ρεύμα και a_n είναι ένας άγνωστος μιγαδικός συντελεστής. Χρησιμοποιώντας μια σειρά συναρτήσεων βάρους, W₁, W₂, W₃,..., η εξίσωση (5.1) μετατρέπεται στην ακόλουθη μορφή:

$$\sum_{n=1}^{N} a_n \langle W_m, L(J_n) \rangle = \langle W_m, E_m^{\ i} \rangle$$
(5.3)

όπου $E_m^{\ i}$ αναπαριστά το παραγόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η συνάρτηση βάρους που χρησιμοποιεί το SuperNEC είναι η συνάρτηση δέλτα.

Η εξίσωση (5.3) αποτελεί μια μόνο γραμμή στον πίνακα της μεθόδου των ροπών. Η εξίσωση σχετίζει όλα τα παραγόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία λόγω των πηγών του ρεύματος, με το m-στο σημείο παρατήρησης στο χώρο. Για m=1,2,...,n σημεία παρατήρησης η εξίσωση (5.3) μπορεί να εκφραστεί στη μορφή:

$$\left[Z_{mn}\right]\left[a_{n}\right] = \left[V_{m}\right] \tag{5.4}$$

όπου

$$Z_{mn} = \langle W_m, L(J_n) \rangle \tag{5.5}$$

Το εσωτερικό γινόμενο ορίζεται έτσι ώστε να ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

$$\langle (aJ_1 + \beta J_2), E \rangle = a \langle J_1, E \rangle + b \langle J_2, E \rangle$$
(5.6)

όπου α, β είναι σταθερές,

$$\langle J, E \rangle = \langle E, J \rangle \tag{5.7}$$

$$\langle J^*, J \rangle > 0 \quad \alpha \lambda \lambda \dot{\alpha} \ \langle J^*, J \rangle = 0 \quad \alpha \nu \text{ J}=0$$
 (5.8)

Χρησιμοποιώντας τις δύο πρώτες ιδιότητες μπορεί να δειχθεί ότι:

$$\langle J, (aE_1 + bE_2) \rangle = a \langle J, E_1 \rangle + b \langle J, E_2 \rangle$$
(5.9)

όπου a και b είναι μιγαδικοί συντελεστές.

Τα στοιχεία του πίνακα αλληλεπίδρασης μπορούν να θεωρηθούν ως:

$$Z'_{mn} = \langle W_m, [L(J_n)] + bL[J_n] \rangle$$
(5.10)

όπου $L(J_n)$ είναι ο κλασικός υπολογισμός που γίνεται κατά την επίλυση με τη μέθοδο των ροπών, και $bL(J_n)$ παριστάνει μια πρόσθετη συνεισφορά στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο σημείο παρατήρησης, η οποία οφείλεται στο ρεύμα J_n και στην αλληλεπίδραση του πεδίου με κάποιο εμπόδιο που περιγράφεται από τη θεωρία UTD. Η εξίσωση (5.10) με τη βοήθεια της εξίσωσης (5.9) γράφεται στη μορφή:

$$Z'_{mn} = \langle W_m, [L(J_n)] \rangle + \langle W_m, bL[J_n] \rangle$$
(5.11)

ή

$$Z'_{mn} = Z_{mn} + Z_{mn}^{UTD}$$
(5.12)

Προκύπτει λοιπόν το συμπέρασμα ότι τα στοιχεία του πίνακα της μεθόδου των ροπών προστίθενται με αυτά που προκύπτουν από τα επιπρόσθετα πεδία, τα οποία προκύπτουν από διαθλάσεις ή ανακλάσεις πάνω σε αντικείμενα UTD. Το σχήμα (5.2) δείχνει τους διαφορετικούς συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη σε ένα μόνο στοιχείο του πίνακα επίλυσης του ηλεκτρομαγνητικού προβλήματος. Ο όρος Z_{mn} σε δεδομένο σημείο προκύπτει από το πεδίο που προέρχεται από απευθείας μετάδοση οπτικής επαφής, ενώ ο όρος Z_{mn}^{UTD} είναι το άθροισμα των κυμάτων που προέρχονται από ανάκλαση και περίθλαση, λόγω ακμών και γωνιών ενός εμποδίου, είτε αυτό είναι διηλεκτρική πλάκα ή κύλινδρος ή κάποια άλλη γεωμετρική διάταξη.



Σχήμα (5.2) : Οι διαφορετικοί συντελεστές που λαμβάνονται υπόψη όταν συμπληρώνεται ο πίνακας αλληλεπιδράσεων της μεθόδου των ροπών.

5.3.1 Η εξίσωση του Pocklington

Η εξίσωση του Pocklington είναι η βάση της λύσης της μεθόδου των ροπών που χρησιμοποιεί το SuperNEC. Άλλωστε όπως αναφέρθηκε παραπάνω ο τελεστής L της εξίσωσης (5.1) αποτελεί στο SuperNEC την εξίσωση του Pocklington.

Η μορφή της εξίσωσης του Pocklington είναι τέτοια ώστε το κάθε αγώγιμο τμήμα θεωρείται ότι έχει ένα στοιχειώδες ηλεκτρικό ρεύμα. Η εξίσωση έχει την ακόλουθη μορφή :

$$E_{obs} = \frac{\mu}{j4\pi\omega\varepsilon} \int_{length} \hat{I}(\omega^2\varepsilon + \nabla_0\nabla\cdot) \frac{e^{-jkr}}{r} dl$$
(5.13)

όπου E_{obs} είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο παρατήρησης που προκαλεί η πηγή ακτινοβολίας, \hat{I} είναι η συνάρτηση που χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει το ρεύμα σε ένα στοιχειώδες αγώγιμο τμήμα της πηγής, μ είναι η μαγνητική διαπερατότητα, ε είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα, ω είναι η κυκλική συχνότητα, k είναι ο κυματαριθμός και r είναι η απόσταση μεταξύ της πηγής και του σημείου παρατήρησης.

Τέλος ο τελεστής $\nabla_0 \nabla$ αναπαριστά τον τελεστή ∇^2 , όπου το πρώτο διαφορικό εφαρμόζεται στην πηγή και το δεύτερο στο σημείο παρατήρησης.

5.3.2 Περίθλαση από ακμές

Η θεωρία της περίθλασης από ακμές χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από περίθλαση ενός επίπεδου προσπίπτοντος κύματος σε ακμή μιας επιφάνειας. Τα πεδία στο σημείο παρατήρησης, λόγω περίθλασης, μπορούν να γραφούν στην ακόλουθη μορφή:

$$E^{d} = E^{i} \cdot \overline{\overline{D}} \sqrt{\frac{\rho}{s(s+\rho)}} e^{-jks}$$
(5.14)

όπου E^i είναι η ένταση του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος και E^d είναι η ένταση του κύματος μετά την περίθλαση. Ο δυαδικός συντελεστής δίνεται από τη σχέση:

$$\overline{\overline{D}} = -\hat{\beta}'\hat{\beta}_o D_s - \hat{\phi}'\hat{\phi}D_h$$
(5.15)

όπου D_s και D_h είναι οι δύο συντελεστές περίθλασης (soft και hard). Ο συντελεστής D_h εφαρμόζεται στη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου που είναι κάθετη στο

επίπεδο πρόσπτωσης, ενώ ο συντελεστής D_s εφαρμόζεται στη συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλη στο επίπεδο πρόσπτωσης.

Σε μορφή πινάκων τα πεδία λόγω περίθλασης δίνονται από την εξής σχέση:

$$\begin{pmatrix} E_{\beta}^{\ d} \\ E_{\phi}^{\ d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -D_s & 0 \\ 0 & -D_h \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\beta}^{\ i}(Q_e) \\ E_{\phi}^{\ i}(Q_e) \end{pmatrix}$$
(5.16)

όπου Q_e είναι το σημείο πάνω στην ακμή που παρατηρείται η περίθλαση, ενώ οι διευθύνσεις των διανυσμάτων της παραπάνω σχέσης φαίνονται στο σχήμα (5.3).



Οι τρισδιάστατοι συντελεστές περίθλασης δίνονται από τις σχέσεις:

$$D_{s} = D_{1} + D_{2} - (D_{3} + D_{4})$$

$$D_{h} = D_{1} + D_{2} + D_{3} + D_{4}$$
(5.17)

όπου:

$$D_{1} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}\sin\beta} \cot\left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n}\right] F[kL^{i}a^{+}(\phi - \phi')]$$
(5.18)

$$D_{2} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}\sin\beta} \cot\left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n}\right] F[kL^{i}a^{-}(\phi - \phi')]$$
(5.19)

$$D_{3} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}\sin\beta} \cot\left[\frac{\pi + (\phi - \phi')}{2n}\right] F\left[kL^{m}a^{+}(\phi - \phi')\right]$$
(5.20)

$$D_{4} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2n\sqrt{2\pi k}\sin\beta} \cot\left[\frac{\pi - (\phi - \phi')}{2n}\right] F[kL^{ro}a^{-}(\phi - \phi')]$$
(5.21)

όπου F είναι μια συνάρτηση μεταφοράς, L^i είναι η παράμετρος της απόστασης που σχετίζεται με την περιοχή της σκίασης, L^{rn} είναι η παράμετρος της απόστασης που σχετίζεται με την ανάκλαση στην επιφάνεια n, L^{ro} είναι η παράμετρος της απόστασης που σχετίζεται με την ανάκλαση στην επιφάνεια o, a^+ είναι συνάρτηση που σχετίζεται με την επιφάνεια n και a^- είναι συνάρτηση που σχετίζεται με την επιφάνεια o.

Οι επιφάνειες *n* και *o* σχηματίζουν τις δύο πλευρές της ακμής στις οποίες παρατηρείται περίθλαση. Ο προσδιορισμός για το ποια πλευρά χαρακτηρίζεται σαν *n* και ποια σαν *o* είναι αυθαίρετη. Ωστόσο το SuperNEC αναπτύχθηκε έτσι ώστε όλες οι εξωτερικές γωνίες να μετρούνται με βάση την διεύθυνση *o*, όπως φαίνεται και στο σχήμα (5.4).



Σχήμα (5.4) : Οι επιφάνειες ο και η σε μια ακμή (κάτοψη).

5.3.3 Περίθλαση από γωνίες

Στην προηγούμενη ενότητα δείχθηκε ότι η περίθλαση μπορεί να πραγματοποιηθεί από οποιοδήποτε σημείο πάνω σε μία ακμή, εκτός από την γωνία στην οποία ενώνονται δύο ακμές. Η γεωμετρική θεωρία της περίθλασης εισηγείται την περίθλαση από γωνίες ώστε να αντιμετωπίσει τη δυσκολία αυτή. Τα πεδία που προέρχονται από περίθλαση σε κορυφές δίνονται από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{bmatrix} E_{\beta}^{c} \\ E_{\phi}^{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & Z \\ M & Y \end{bmatrix} \frac{\sqrt{\sin \beta_{c} \sin \beta}}{\cos \beta - \cos \beta_{c}} F[kL_{c}a(\pi + \beta - \beta_{c})] \frac{e^{-jks}}{4\pi s}$$
(5.22)

όπου Z και Y είναι η σύνθετη αντίσταση και αγωγιμότητα ελευθέρου χώρου αντίστοιχα, ενώ τα I και M αναφέρονται στα ισοδύναμα ρεύματα που παράγονται λόγω περίθλασης.

$$\begin{bmatrix} I\\ M \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} E_{\beta}^{i}\\ E_{\phi}^{i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{s}(Q_{e})Y\\ C_{h}(Q_{e})Z \end{bmatrix} \sqrt{\frac{8\pi}{k}} e^{-j\pi/4}$$
(5.23)

όπου $Q_{\scriptscriptstyle e}$ είναι η το σημείο που βρίσκεται η γωνία, και

$$C_{s,h} = \frac{-e^{-j\pi/4}}{2\sqrt{2\pi k}\sin\beta} \left\{ \frac{F[kLa(\phi-\phi')]}{\cos\left(\frac{\phi-\phi'}{2}\right)} \left| F\left(\frac{[La(\phi-\phi')/\lambda]}{kL_c a(\pi+\beta-\beta_c)}\right) + \frac{F[kLa(\phi-\phi')]}{\cos\left(\frac{\phi+\phi'}{2}\right)} \right| F\left(\frac{[La(\phi-\phi')/\lambda]}{kL_c a(\pi+\beta-\beta_c)}\right) \right\}$$
(5.24)

5.3.4 Μέθοδος των ειδώλων

Η μέθοδος των ειδώλων χρησιμοποιείται, ως γνωστόν, για τον υπολογισμό των κυμάτων που ανακλώνται από μια επιφάνεια. Η μέθοδος περιλαμβάνει την τοποθέτηση μιας ακριβώς ίδιας πηγής (φανταστικής πηγής) σε συμμετρικό σημείο ως προς το επίπεδο ανάκλασης, όπως φαίνεται στο σχήμα (5.5), και τον υπολογισμό στο σημείο παρατήρησης της έντασης του πεδίου. Οι συντελεστές ανάκλασης που προκύπτουν από τη μέθοδο των ειδώλων είναι οι ακόλουθοι :

$$R_{V} = \frac{\cos\theta - Z_{r}\sqrt{1 - Z_{r}^{2}\sin^{2}\theta}}{\cos\theta + Z_{r}\sqrt{1 - Z_{r}^{2}\sin^{2}\theta}}$$
(5.25)

$$R_{\rm H} = \frac{-[Z_r \cos\theta - \sqrt{1 - Z_r^2 \sin^2 \theta}]}{Z_r \cos\theta + \sqrt{1 - Z_r^2 \sin^2 \theta}}$$
(5.26)

Το ανακλώμενο πεδίο δίνεται από την εξής σχέση:

$$E_r = R_V E_i + (R_H - R_V)(E_i \cdot \hat{\phi})\hat{\phi}$$
(5.27)

όπου R_V είναι ο συντελεστής ανάκλασης για τα κατακόρυφα πολωμένα κύματα, R_H είναι ο συντελεστής ανάκλασης για τα οριζόντια πολωμένα κύματα, $\hat{\phi}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα στο επίπεδο πρόσπτωσης και τέλος θ είναι η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια με την διεύθυνση του εισερχόμενου κύματος.



5.3.5 Τα στοιχεία ακτινοβολίας που περιλαμβάνονται στο SuperNEC

Το SuperNEC περιλαμβάνει ένα αρκετά ευρύ πεδίο από αντικείμενα ακτινοβολίας που βασίζονται στη γεωμετρική θεωρία της περίθλασης (UTD). Τα αντικείμενα αυτά περιλαμβάνουν :

- Απλή, διπλή και τριπλή περίθλαση από γωνίες και ακμές.
- Πολλαπλές ανακλάσεις που ορίζονται από το χρήστη.
- Διπλούς συνδυασμούς σε ότι αφορά τους μηχανισμούς διάδοσης, όπως π.χ. δυνατότητα περίθλασης έπειτα από ανάκλαση και το αντίστροφο.
- Τριπλούς συνδυασμούς όπως για παράδειγμα ανάκλαση-ανάκλαση-περίθλαση και περίθλαση-περίθλαση-ανάκλαση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Στατιστικά μοντέλα περιγραφής βραχυχρόνιων διαλείψεων

6.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο οι βραχυχρόνιες διαλείψεις παρατηρούνται σε βραχύ διάστημα, μερικών μόνο μηκών κύματος. Ουσιαστικά αποτελούν μεταβολές στο πλάτος και τη φάση του λαμβανομένου σήματος. Οι μεταβολές αυτές αποτελούν ένα στοχαστικό φαινόμενο και περιγράφονται συνήθως από κάποια στατιστικά μοντέλα με μεγάλη ακρίβεια.

Για να μπορούμε να έχουμε ολοκληρωμένη εικόνα ενός τηλεπικοινωνιακού διαύλου είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το είδος της στατιστικής κατανομής που ακολουθεί η περιβάλλουσα του σήματος στο δέκτη. Στις ακόλουθες παραγράφους θα γίνει αναφορά στις πιο κοινές στατιστικές κατανομές που περιγράφουν το λαμβανόμενο σήμα σε περιβάλλον με βραχυχρόνιες διαλείψεις.

6.2 Κατανομή Rice

Όταν στο δέκτη υπάρχουν συνθήκες απευθείας σήματος, όπως διάδοση οπτικής επαφής, τότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη είναι η κατανομή Rice. Στην περίπτωση αυτή, οι τυχαίες πολυδιαδρομικές συνιστώσες του σήματος που φτάνουν από διαφορετικές γωνίες υπερθέτονται στο απευθείας ισχυρό σήμα.

Η κατανομή Rice δίνεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(r^2 + A^2)}{2\sigma^2}\right) I_o(\frac{Ar}{\sigma^2}) & \gamma \iota \alpha \ A \ge 0, r \ge 0\\ 0 & \gamma \iota \alpha \ r < 0 \end{cases}$$
(6.1)

όπου, r είναι το πλάτος της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος, I_o η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης και σ^2 είναι διακύμανση (ή το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης) του λαμβανόμενου σήματος. Επίσης η παράμετρος A αποτελεί το μέγιστο πλάτος του απευθείας σήματος.

Γενικά η κατανομή Rice περιγράφεται σε σχέση με την παράμετρο K η οποία ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος του απευθείας σήματος προς την διακύμανση του πολυδιαδρομικού σήματος, δηλαδή :

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \, \acute{\eta} \, \sigma \varepsilon \, (\mathrm{dB}) \, K = 10 \log \frac{A^2}{2\sigma^2} \tag{6.2}$$

Το σχήμα (6.1) παρουσιάζει τη γραφική παράσταση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rice για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου K.



Σχήμα (6.1) : Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rice σε λογαριθμική κλίμακα για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου K.

6.3 Katavoµή Rayleigh

Στις κινητές ραδιοεπικοινωνίες η κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται ευρεία για την περιγραφή της περιβάλλουσας σε περιβάλλον βραχυχρόνιων διαλείψεων και ειδικά στην περίπτωση επίπεδων διαλείψεων. Γενικά το λαμβανόμενο σήμα ακολουθεί κατανομή Rayleigh όταν στο δέκτη δεν υπάρχει απευθείας σήμα, όπως η περίπτωση μη οπτικής επαφής. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομή Rayleigh είναι :

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & \gamma \alpha , r \ge 0\\ 0 & \gamma \alpha & r < 0 \end{cases}$$
(6.3)

όπου, *r* είναι το πλάτος της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος και σ² είναι διακύμανση του λαμβανόμενου σήματος. Η γραφική απεικόνιση της συνάρτησης αυτής παρουσιάζεται στο σχήμα (6.2).



Σχήμα (6.2) : Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Rayleigh.

Ένα τυπικό παράδειγμα σήματος σε περιβάλλον διαλείψεων Rayleigh απεικονίζεται στο σχήμα (6.3). Πρόκειται για το διάγραμμα της στάθμης της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος συναρτήσει του χρόνου. Η μέτρηση της στάθμης του σήματος συχνότητας 900MHz έγινε από κινητό κινούμενο με 120km/h.



Σχήμα (6.3) : Μεταβολή περιβάλλουσας σήματος σε περιβάλλον διαλείψεων Rayleigh.

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι η συνάρτηση κατανομής Rayleigh προκύπτει από την αντίστοιχη Rice, θέτοντας στην παράμετρο *A*, που αποτελεί το μέγιστο πλάτος του απευθείας σήματος, την τιμή 0.

6.4 Λογαριθμοκανονική κατανομή

Τέλος το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται στην περίπτωση όπου οι συνιστώσες του μεταδιδόμενου σήματος υφίστανται πολλές ανακλάσεις και σκεδάσεις στη διαδρομή μεταξύ πομπού και δέκτη. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της λογαριθμοκανονικής κατανομής είναι :

$$p(r) = \frac{1}{r\sqrt{2\pi\sigma^{2}}} \exp\left\{-\frac{[\ln(r) - m]^{2}}{2\sigma^{2}}\right\}$$
(6.4)

όπου r είναι το πλάτος της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος, m είναι η μέση τιμή και σ είναι η τυπική απόκλιση της αντίστοιχης κανονικής κατανομής που προκύπτει από τον μετασχηματισμό y=ln(r).

6.5 Κατανομή VeCa

Εκτός από τις παραπάνω κατανομές που χρησιμοποιούνται ευρέως στις ασύρματες επικοινωνίες έχουν αναπτυχθεί και άλλες που βρίσκουν εφαρμογή στην στατιστική περιγραφή του σήματος σε πιο ειδικά περιβάλλοντα. Στις κατανομές αυτές ανήκει και η κατανομή Veca η οποία περιγράφει τη συμπεριφορά του λαμβανόμενου σήματος όταν σε μικρή απόσταση από την κεραία βρίσκεται το κεφάλι του χρήστη. Η κατανομή αυτή αναπτύχθηκε στη δημοσίευση [1] της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η περίπτωση όπου η ύπαρξη ενός βιολογικού σκεδαστή στην περιοχή κοντά στην κεραία θα επηρεάσει την απόδοση της κεραίας. Έτσι η λαμβανόμενη ισχύς στην κεραία του δέκτη θα εξαρτάται από την παρουσία αλλά και το είδος του σκεδαστή. Στη συνέχεια προκειμένου να αναπτυχθεί ολοκληρωμένα το νέο στατιστικό μοντέλο VeCa, αναλύεται ο παράγοντας απόδοσης που αφορά διάταξη όπου μία κεραία βρίσκεται κοντά σε κάποιο χρήστη.

Είναι γεγονός ότι η παρουσία του κεφαλιού του χρήστη επηρεάζει το συνολικά ακτινοβολούμενο πεδίο στο δέκτη. Ενώ το αρχικό εκπεμπόμενο πεδίο E_i παράγει πεδίο E_r στο δέκτη, το πεδίο E_t παράγει πεδίο E'_r . Η γεωμετρία του προβλήματος παρουσιάζεται στο σχήμα (6.4).



Σχήμα (6.4) : Διάταξη πομπού και δέκτη παρουσία κεφαλιού χρήστη.

Επειδή πρόκειται για ηλεκτρικές κεραίες και επειδή επικρατούν συνθήκες μακρινού πεδίου, τα ίδια ακριβώς μπορούν να ειπωθούν για την ακτινοβολούμενη και τη λαμβανόμενη ισχύ. Δηλαδή ενώ η ακτινοβολούμενη ισχύς έχει ως αποτέλεσμα η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη να είναι P_r , η παρουσία του χρήστη επηρεάζει την αρχική εκπεμπόμενη ισχύ P_i , και η ισχύς P_t έχει ως αποτέλεσμα η ισχύς που λαμβάνει ο δέκτης να είναι P_r' .

Ο παράγοντας απόδοσης της διάταξης ορίζεται από τον λόγο $\frac{P_i}{P_t}$. Από την

ανάλυση της διάταξης αυτής σε δημοσιεύσεις προκύπτει ότι ο λόγος αυτός είναι αντιστρόφως ανάλογος από την απόσταση d του πομπού από το κεφάλι του χρήστη. Έτσι όταν αυξάνεται το d αυξάνεται και η μεταδιδόμενη ισχύς P_t . Με άλλα λόγια, όσο απομακρύνεται ο χρήστης από την κεραία-πομπό, τόσο λιγότερο ισχύς από την αρχικά ακτινοβολούμενη απορροφάται και τόση περισσότερο μεταδίδεται προς το δέκτη.

Επίσης ορίζεται ως αποδοτικότητα ακτινοβολίας ο αντίστροφος λόγος του παράγοντα απόδοσης, δηλαδή ο λόγος $\frac{P_t}{P_i}$. Είναι προφανές ότι η αποδοτικότητα

ακτινοβολίας είναι ανάλογη της απόστασης d.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής VeCa αναλύεται σε δυο μέρη. Το πρώτο αναφέρεται στις βραχυχρόνιες διαλείψεις του ακτινοβολούμενου σήματος, ενώ το δεύτερο εξετάζει την τυχαία κίνηση της κεραίας δίπλα στο κεφάλι του χρήστη. Τα δυο αυτά σκέλη ουσιαστικά έχουν να κάνουν με δυο διαφορετικά φαινόμενα, τα οποία ακολουθούν διάφορες κατανομές σε κάθε περίπτωση. Ο συνδυασμός των δυο επικρατέστερων κατανομών, θεωρώντας τα δυο φαινόμενα ανεξάρτητα μεταξύ τους, αποτελεί τη βάση για να προκύψει τελικά η κατανομή VeCa.

Το πρώτο φαινόμενο, δηλαδή οι βραχυχρόνιες διαλείψεις του σήματος, εκφράζεται από το μέγεθος *r* που είναι το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος. Στην περίπτωση μη οπτικής επαφής (NLOS), είναι γνωστό ότι αυτό ακολουθεί κατανομή Rayleigh :

$$f_r(r) = \frac{r \cdot e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}}{\sigma^2}, \quad 0 \le r \prec \infty$$
(6.5)

Το δεύτερο φαινόμενο είναι η τυχαία κίνηση της κεραίας δίπλα στο χρήστη. Η τυχαία μεταβλητή που αντιστοιχεί σ' αυτή την κίνηση είναι ο παράγοντας απόδοσης δ της κεραίας. Η ισχύς που εκπέμπεται ή λαμβάνεται από μια κεραία, είτε είναι δίπολο είτε μονόπολο, επηρεάζεται έντονα από την παρουσία κάποιου διηλεκτρικού σκεδαστή στο κοντινό πεδίο της κεραίας. Έτσι, εισάγουμε την έννοια της αποδοτικότητας δ μιας κεραίας και την ορίζουμε, στην περίπτωση πομπού, σαν το λόγο της ακτινοβολούμενης ισχύος προς την ισχύ εισόδου. Είναι ευνόητο ότι η αποδοτικότητα της κεραίας και η απόσταση του βιολογικού σκεδαστή από αυτή είναι μεγέθη στενά συνδεδεμένα και μάλιστα αποδεικνύεται ότι χαρακτηρίζονται από γραμμική σχέση μεταξύ τους. Η απόσταση σκεδαστή-κεραίας και κατά συνέπεια η αποδοτικότητα δεν ακολουθούν αυστηρά κάποια δεδομένη κατανομή, αλλά ανάλογα με τις συνθήκες προσεγγίζονται κυρίως από τις εξής κατανομές : ομοιόμορφη, πολυωνυμική, Rayleigh, κανονική.

Με δεδομένη την κατανομή Rayleigh $f_r(r)$ του r, επιλέγεται η κατάλληλη κατανομή $f_{\delta}(\delta)$ για το δ και θεωρώντας ανεξάρτητα τα δυο φαινόμενα, είναι δυνατόν να προκύψει η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του συνολικού φαινομένου:

$$f(r,\delta) = f_r(r) \cdot f_\delta(\delta) \tag{6.6}$$

Θεωρούμε τον εξής μετασχηματισμό :

$$x = r \cdot \delta \Longrightarrow r = \frac{x}{\delta} \tag{6.7}$$

Οπότε προκύπτει :

$$f(x,\delta) = f_r(\frac{x}{\delta}) \cdot f_{\delta}(\delta) \cdot \frac{dr}{dx} \implies f_r(\frac{x}{\delta}) = \frac{x \cdot e^{-\frac{(x/\delta)^2}{2\sigma^2}}}{\delta \cdot \sigma^2}$$
(6.8)

Από τη σχέση (6.8) προκύπτει :

$$f(x,\delta) = \frac{x \cdot e^{-\frac{(x/\delta)^2}{2\sigma^2}}}{(\delta \cdot \sigma)^2} \cdot f_{\delta}(\delta)$$
(6.9)

Τελικά, η περιθώρια συνάρτηση $f_x(x)$ που απεικονίζει το συνολικό φαινόμενο (λαμβανόμενο σήμα επηρεασμένο από την παρουσία του χρήστη δίπλα στον πομπό) καθορίζεται από τον τύπο :

$$f_x(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,\delta) d\delta$$
 (6.10)

Ας δούμε συνοπτικά τα συμπεράσματα για τις 4 πιο πιθανές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας $f_{\delta}(\delta)$ της αποδοτικότητας.

• Ομοιόμορφη κατανομή (uniform)

Σε αυτή την περίπτωση υποθέτουμε ότι η κεραία του κινητού μπορεί να βρεθεί σε οποιαδήποτε θέση μεταξύ δυο άκρων δίπλα στο κεφάλι του χρήστη (π.χ. $d_{I}=1$ έως $d_{2}=5$ cm) με την ίδια ακριβώς πιθανότητα. Προφανώς, ομοιόμορφη κατανομή θα ακολουθεί και ο βαθμός απόδοσης της κεραίας με άκρα δ_{I} και δ_{2} . Είναι $f_{\delta}(\delta) = \frac{1}{\delta_{2} - \delta_{1}}$ οπότε προκύπτει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$f_x^A(x) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} \frac{x \cdot e^{-\frac{(x/\delta)^2}{2\sigma^2}}}{(\delta \cdot \sigma)^2} \cdot \frac{1}{\delta_2 - \delta_1} d\delta$$
(6.11)

ή λύνοντας το ολοκλήρωμα :

$$f_x^A(x) = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2}}}{(\delta_1 - \delta_2)\sigma} \cdot \left(erf\left(\frac{x}{\sqrt{2}\delta_2\sigma}\right) - erf\left(\frac{x}{\sqrt{2}\delta_1\sigma}\right) \right), \quad 0 \prec x \prec +\infty \quad (6.12)$$

Οι ροπές πρώτης και δεύτερης τάξης είναι :

$$E[x] = \int_{0}^{\infty} x \cdot f_{x}^{A}(x) dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sigma(\delta_{1} + \delta_{2})}{2}$$
(6.13)

$$E[x^{2}] = \int_{0}^{\infty} x^{2} \cdot f_{x}^{A}(x) dx = \frac{2}{3} \left(\delta_{1}^{2} + \delta_{2}^{2} + \delta_{1} \delta_{2} \right) \sigma^{2}$$
(6.14)

ενώ η διασπορά :

$$Var[x] = E[x^{2}] - E[x]^{2} = \sigma\left(\frac{2}{3} - \frac{\pi}{8}\sigma\right)\left(\delta_{1}^{2} + \delta_{2}^{2}\right) + \sigma\left(\frac{2}{3} - \frac{2\pi}{8}\sigma\right)\delta_{1}\delta_{2}$$
(6.15)

Πολυωνυμική κατανομή

Μια πιο ρεαλιστική κατανομή είναι η πολυωνυμική. Ο χρήστης είναι πιο πιθανό να κρατά το κινητό-τερματικό σε μια μέση απόσταση για το περισσότερο χρονικό διάστημα. Θεωρούμε πολυώνυμο 2^{ης} τάξης με ρίζες δ₁ και δ₂ και μια σταθερά c τέτοια ώστε να ισχύει $\int_{-\infty}^{+\infty} f_{\delta}(\delta) = 1 :$ $c = \left[\frac{\delta_2^3 - \delta_1^3}{3} - \frac{(\delta_1 + \delta_2)(\delta_2^2 - \delta_1^2)}{2} + \delta_1\delta_2(\delta_2 - \delta_1)\right]^{-1}$ (6.16) Οι υπολογισμοί γίνονται εξαιρετικά πολύπλοκοι, γι' αυτό παραθέτουμε μόνο την σ.π.π. :

$$f_{x}^{B}(x) = \frac{cx}{\sigma^{2}} e^{-\frac{x^{2}}{2\sigma^{2}}} \left(e^{-\frac{1}{\delta_{2}^{2}}} - e^{-\frac{1}{\delta_{1}^{2}}} \right) + \frac{c\sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(x^{2} - \delta_{1}\delta_{2}\sigma^{2} \right)}{\sigma^{3}} \left(erf\left(\frac{x}{\sqrt{2}\delta_{2}\sigma} \right) - erf\left(\frac{x}{\sqrt{2}\delta_{1}\sigma} \right) \right) + \frac{cx(\delta_{1} + \delta_{2})}{2\sigma^{2}} \left(Ei\left(\frac{-x^{2}}{2\delta_{2}^{2}\sigma^{2}} \right) - Ei\left(\frac{-x^{2}}{2\delta_{1}^{2}\sigma^{2}} \right) \right)$$

$$\mu\epsilon \ 0 \prec x \prec +\infty \ \kappa\alpha i \ Ei(z) = \int_{-z}^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$$

$$(6.17)$$

• Κατανομή Rayleigh

Εδώ υπονοείται ότι οι περισσότερες τιμές της απόστασης κινητού-χρήστη βρίσκονται σ' ένα μικρό σχετικά διάστημα, αν και η καμπύλη Rayleigh θεωρητικά εκτείνεται στο άπειρο. Πρόκειται για την περίπτωση που περιγράφει καλύτερα το πραγματικό, συνολικό φαινόμενο και γι' αυτό ο συνδυασμός των δυο Rayleigh είναι αυτός που δίνει την ουσιαστική κατανομή VeCa. Πριν προχωρήσουμε στον υπολογισμό της σ.π.π. χρειάζεται να ορίσουμε με σ_2 την παράμετρο της κατανομής Rayleigh της αποδοτικότητας δ και κατ' επέκταση της απόστασης και με σ_1 την παράμετρο της αρχικής κατανομής Rayleigh του σήματος που δεν αλλάζει :

$$f_x^C(x) = \int_0^\infty \frac{x \cdot \delta \cdot e^{-\frac{(x/\delta)^2}{2\sigma_1^2}} e^{-\frac{\delta^2}{2\sigma_2^2}}}{\left(\delta \cdot \sigma_1 \sigma_2\right)^2} d\delta = \frac{x \cdot K_0\left(\frac{x}{\sigma_1 \sigma_2}\right)}{\sigma_1^2 \sigma_2^2}$$
(6.18)

όπου $K_0(z)$ η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους. Η συνάρτηση κατανομής (cdf) υπολογίζεται απευθείας :

$$F_x^C(a) = \int_{-\infty}^a f_x^C(x) dx = \frac{a}{\sigma_1 \sigma_2} \mathbf{K}_1(\frac{\mathbf{a}}{\sigma_1 \sigma_2})$$
(6.19)

όπως και η μέση τιμή μ :

$$\mathbf{E}[\mathbf{x}] = \int_{0}^{\infty} x f_{x}^{C}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int_{0}^{\infty} \frac{x^{2} K_{0}\left(\frac{x}{\sigma_{1}\sigma_{2}}\right)}{\sigma_{1}^{2}\sigma_{2}^{2}} d\mathbf{x} = \frac{\pi}{2}\sigma_{1}\sigma_{2}$$
(6.20)

καθώς και η τυπική απόκλιση σ^2 :

$$E\left[\left(x-\bar{x}\right)^{2}\right] = \int_{0}^{\infty} \left(x-\bar{x}\right)^{2} f_{x}^{C}(x) dx = 4\sigma_{1}^{2}\sigma_{2}^{2}$$
(6.21)

• Κανονική κατανομή

Είναι το τελευταίο από τα πιθανά σενάρια για την απόσταση κινητούανθρώπου. Με δεδομένες τις παραμέτρους μ και σ΄ της κατανομής, το ολοκλήρωμα που πρέπει να υπολογιστεί είναι :

$$f_{x}^{D}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x \cdot e^{-\frac{(x/\delta')^{2}}{2\sigma^{2}}} e^{-\frac{1}{2}\frac{(\delta'-\mu)^{2}}{\sigma'}}}{(\delta'\sigma_{1})^{2}\sigma_{2}\sqrt{2\pi}} d\delta'$$
(6.22)

Η εύρεση αναλυτικού αποτελέσματος για τη γενική περίπτωση είναι αδύνατη. Μόνο εάν χρησιμοποιηθεί μετασχηματισμός ώστε το δ' να είναι τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή $\mu=0$ μπορεί να ληφθεί αποτέλεσμα :

$$f_x^D(x) = \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sigma_2} e^{\frac{x}{\sigma_1 \sigma_2}}$$
(6.23)

που είναι φυσικά η εκθετική κατανομή.

Κεφάλαιο 7 Προσομοίωση

7.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο των βραχυχρόνιων διαλείψεων περιγράφεται κατά κύριο λόγο από τα μοντέλα Rayleigh και Rice. Ωστόσο, σε περιβάλλοντα ραδιοζεύξεων με συγκεκριμένες ιδιότητες έχουν αναπτυχθεί και άλλα στατιστικά μοντέλα που περιγράφουν καλύτερα το φαινόμενο των διαλείψεων. Ένα τέτοιο μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του την παρουσία ανθρώπου δίπλα στην κεραία κινητού τηλεφώνου, αποτελεί η κατανομή VeCa, η οποία αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η μελέτη του λαμβανόμενου σήματος σε ζεύξη μη οπτικής επαφής (NLOS) και σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου παρουσία βιολογικού σκεδαστή. Αυτό το περιβάλλον ραδιοδιάδοσης έχει σημαντικό ενδιαφέρον καθότι συναντάται συχνά κυρίως σε κτίρια με χρήστες συσκευών κινητής τηλεφωνίας. Η κατανομή VeCa ανταποκρίνεται στις συνθήκες του πειράματος, γι' αυτό και θα εξεταστεί παρακάτω αν περιγράφει ικανοποιητικά το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη.

Η διάταξη του εσωτερικού χώρου, ο βιολογικός σκεδαστής και οι απαραίτητες κεραίες του δέκτη και του πομπού κατασκευάζονται στο πρόγραμμα ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης SuperNEC. Για να μελετηθεί η συμπεριφορά της περιβάλλουσας του σήματος που φτάνει στο δέκτη λαμβάνονται οι υπολογισμοί του ρεύματος Ι στην κεραία του δέκτη από τα αρχεία εξόδου του προγράμματος. Προφανώς η τιμή του ρεύματος Ι, από το οποίο προκύπτει η τιμή του λαμβανόμενου σήματος, εξαρτάται από την τυχαία κίνηση του ανθρώπου βιολογικού σκεδαστή δίπλα στην κεραία - δέκτη. Επιπλέον, για να αποκτήσει το πείραμα ρεαλιστικό χαρακτήρα και να μην πρόκειται απλά για μια στατική διάταξη, μεταβάλλουμε ταυτόχρονα δυο σημαντικά μεγέθη-αποστάσεις : τη θέση-τετμημένη x της κεραίας και του βιολογικού σκεδαστή καθώς και τη μεταξύ τους απόσταση d. Η πρώτη συντεταγμένη μεταβάλλεται σε ένα διάστημα 1 μέτρου ανά 2 εκατοστά, δηλαδή έχουμε 51 διαφορετικές θέσεις από το σημείο x=-6m στο x=-5m, ενώ η δεύτερη απόσταση κυμαίνεται από 1 έως 5 cm ανά 2 χιλιοστά, γεγονός που σημαίνει 21 διαφορετικές αποστάσεις d. Τελικά οι λαμβανόμενες μετρήσεις ρεύματος που αντιστοιχούν σε κάθε συνδυασμό των δυο μεγεθών είναι συνολικά 21x51 = 1071. Αυτός είναι και ο αριθμός των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται.

Σημειώνεται, τέλος, ότι στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής προσομοιώνονται δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, το κινητό του χρήστη λειτουργεί ως πομπός και ο σταθμός βάσης ως δέκτης, ενώ στην δεύτερη συμβαίνει το ακριβώς αντίθετο, δηλαδή το κινητό του χρήστη είναι ο δέκτης και ο σταθμός βάσης ο πομπός.

7.2 Κατασκευή περιβάλλοντος προσομοίωσης

Το σημαντικότερο βήμα στο ξεκίνημα της διαδικασίας είναι η κατασκευή ενός ορθού περιβάλλοντος προσομοίωσης που ανταποκρίνεται όσο το δυνατόν καλύτερα στην πραγματικότητα. Οι διάφορες παράμετροι των στοιχείων πρέπει να καθορίζονται με σαφήνεια και ορθότητα, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να διαθέτουν τη μέγιστη αξιοπιστία.

7.2.1 Διάταξη εσωτερικού χώρου

Η διάταξη που κατασκευάστηκε με τη βοήθεια του προγράμματος προσομοίωσης SuperNEC αποτελείται από τέσσερις διηλεκτρικές πλάκες που προσομοιάζουν σε τοίχο και αποτελούν την περίμετρο του χώρου – δωματίου όπου πραγματοποιείται το πείραμα, από μία διηλεκτρική πλάκα που χωρίζει το δωμάτιο σε δύο μέρη και που καθιστά τη ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη μη οπτικής επαφής, από μία διηλεκτρική πλάκα που προσομοιώνει ανθρώπινο σώμα και τέλος από δύο διπολικές κεραίες που λειτουργούν σαν πομπός και δέκτης. Η διάταξη αυτή απεικονίζεται στο σχήμα (7.1).



Σχήμα (7.1α) : Κάτοψη της διάταξης εσωτερικού χώρου.



Σχήμα (7.1β) : Πλάγια όψη της διάταξης εσωτερικού χώρου.



Σχήμα (7.1γ) : Άλλη όψη της διάταξης εσωτερικού χώρου.

Το περιβάλλον της προσομοίωσης είναι τρισδιάστατο. Ο πομπός αποτελεί τη συσκευή του κινητού και γι' αυτό ακριβώς βρίσκεται δίπλα στον άνθρωπο. Η ακριβής θέση του καθορίζεται από τις συντεταγμένες της μορφής (x,y,z) που είναι (-6,0,1.6)m στην αρχή της προσομοίωσης. Ο πομπός εκπέμπει σήμα σε συγκεκριμένη συχνότητα, η οποία επιλέχτηκε να είναι 1800 MHz. Το σήμα αυτό λαμβάνεται στο δέκτη που παραμένει ακίνητος στην άλλη πλευρά του δωματίου στη θέση (6,0,1.6). Οι δύο κεραίες βρίσκονται στο ίδιο ύψος και απέχουν 12 m η μία από την άλλη χωρίς οπτική επαφή (non-line-of-sight). Το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη περιλαμβάνει κάθε προϊόν ανάκλασης, σκέδασης ή περίθλασης από εμπόδια και επιφάνειες.

7.2.2 Επιλογή κεραίας πομπού και δέκτη στα 1800 MHz

Η συντριπτική πλειοψηφία των φορητών συσκευών κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν ως κεραίες απλά δίπολα ή μονόπολα. Οι κύριοι λόγοι για τους οποίους έχει επικρατήσει η χρήση αυτού του τύπου κεραιών είναι οι εξής :

- Απλή και εύκολη κατασκευή
- Πρακτική ενσωμάτωση στη συσκευή
- Χαμηλό κόστος σχεδιασμού και κατασκευής
- Ομοιοκατευθυντικότητα του διαγράμματος ακτινοβολίας

Είναι προφανές πως τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν τα απλά δίπολα και μονόπολα ελκυστική λύση για τέτοιου είδους εφαρμογές. Γι' αυτό στην προσομοίωση χρησιμοποιείται κεντρικά τροφοδοτούμενο δίπολο λ/2 τόσο για την κεραία του πομπού όσο και για αυτή του δέκτη.

Ωστόσο, όπως είναι γνωστό, ο συντονισμός, δηλαδή ο μηδενισμός του φανταστικού μέρους της αντίστασης εισόδου της κεραίας και κατ' επέκταση η μέγιστη μεταφορά ισχύος στη γραμμή μεταφοράς, επιτυγχάνεται όταν το μήκος του δίπολου είναι 0.45λ-0.46λ και εφόσον το δίπολο βρίσκεται σε περιβάλλον κενού χώρου. Γι' αυτό οι κεραίες έχουν μήκος λίγο μικρότερο από λ/2.

Στην περίπτωση του δέκτη η διπολική κεραία προσομοιώνεται με μοντέλο απλού σύρματος (snwire) που το βρίσκουμε στο μενού του προγράμματος SuperNEC. Ο λόγος που επιλέγεται η χρήση μοντέλου snwire αντί για sndipole είναι ότι στο δεύτερο δεν μπορεί να μηδενιστεί η τάση τροφοδοσίας. Μεταβάλλοντας το μήκος του διπόλου και πραγματοποιώντας πολλές προσομοιώσεις μετράμε στο αρχείο εξόδου του προγράμματος την αντίσταση εισόδου της κεραίας με σκοπό το μηδενισμό του φανταστικού μέρους της. Οι διαφορετικές τιμές που ελήφθησαν παρουσιάζονται στον πίνακα (7.1). Οι τιμές αυτές αναφέρονται τόσο σε συνθήκες ελευθέρου χώρου όσο και στο περιβάλλον του πειράματος. Παρατηρούμε ότι διαφέρουν ελάχιστα, αφού ο δέκτης στο πείραμα απέχει τουλάχιστον δυο μέτρα (12 μήκη κύματος) από τις διηλεκτρικές πλάκες και συνεπώς επηρεάζεται αμελητέα από αυτές. Ο πίνακας εξηγεί ακόμα γιατί το δίπολο του δέκτη τερματίζεται με φορτίο 75 Ω. Η μορφή της κεραίας του δέκτη παρουσιάζεται στο σχήμα (7.2).

Μήκος διπ	όλου δέκτη	Αντίσταση εισόδου διπόλου - δέκτη							
σε <i>m</i>	σε μήκη κύματος	ελεύθερος χώρος	περιβάλλον πειράματος						
0.0762	0.4572λ	71.0450 <i>-j</i> 0.8642	70.4110 <i>-j</i> 0.5256						
0.0763	0.4578λ	71.2930 <i>-j</i> 0.1551	70.6560+j0.1899						
0.0764	0.4584λ	71.5410+j0.5540	70.9040+j0.9079						
0.0765	0.4590λ	71.7900+ <i>j</i> 1.2627	71.1500+ <i>j</i> 1.6268						

Πίνακας (7.1) : Αντίσταση εισόδου του δέκτη για διάφορα μήκη διπόλου.



Σχήμα (7.2) : Η κεραία του δέκτη.

Στην περίπτωση του πομπού, ο οποίος βρίσκεται δίπλα στο βιολογικό σκεδαστή, η κεραία προσομοιώνεται με μοντέλο διπολικής κεραίας (sndipole) που το βρίσκουμε στο μενού του προγράμματος SuperNEC. Σε ότι αφορά την τροφοδοσία της κεραίας υπάρχει μία πηγή τάσης 1Volt τοποθετημένη στο κέντρο της. Η μορφή του πομπού απεικονίζεται στο σχήμα (7.3).



Σχήμα (7.3) : Η κεραία του πομπού.

Υπάρχει μία δυσκολία κατά την προσπάθεια συντονισμού της κεραίας του πομπού. Συγκεκριμένα ο πομπός βρίσκεται δίπλα στη διηλεκτρική πλάκα που αποτελεί το ανθρώπινο ομοίωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα (7.4). Ουσιαστικά πρόκειται για άνθρωπο που χρησιμοποιεί την συσκευή κινητής τηλεφωνίας και που στην περίπτωση του πειράματος εκπέμπει σήμα στον δέκτη που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του δωματίου. Η παρουσία του ανθρώπου – βιολογικού σκεδαστή έχει επίδραση στην αντίσταση εισόδου της κεραίας. Άλλωστε η αντίσταση εισόδου περιλαμβάνει την ιδία αντίσταση της κεραίας και την αμοιβαία αντίσταση της κεραίας ως προς το περιβάλλον. Η αμοιβαία αντίσταση περιλαμβάνει την επίδραση της σύζευξης μεταξύ της υπό μέτρηση κεραίας και κάθε πηγής του περιβάλλοντος χώρου. Έτσι στη συγκεκριμένη περίπτωση η παρουσία της διηλεκτρικής πλάκας που προσομοιώνει τον άνθρωπο επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση εισόδου της κεραίας του πομπού και επομένως την εκπεμπόμενη ισχύ.



Σχήμα (7.4α) : Κάτοψη της κεραίας του πομπού και του ανθρώπινου ομοιώματος.



Σχήμα (7.4β) : Πλάγια όψη της κεραίας του πομπού και του βιολογικού σκεδαστή.

Σκοπός είναι η επίτευξη μικρού συντελεστή ανάκλασης για την κεραία του πομπού. Άλλωστε ελάχιστος συντελεστής ανάκλασης συνεπάγεται μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύ. Η απόσταση d του βιολογικού σκεδαστή από την κεραία του πομπού μεταβάλλεται από 1 έως 5 cm που είναι οι πλέον αποδεκτές τιμές ώστε το πείραμα να ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Κατόπιν προσομοιώσεων με διαφορετικά μήκη του διπόλου καταλήξαμε στο βέλτιστο μήκος το οποίο είναι l=0.0735 m. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μήκος αυτό υπολογίστηκε για απόσταση d=0.026 m του βιολογικού σκεδαστή από την κεραία του πουτή είναι η πιο πιθανή απόσταση από τον άνθρωπο σε πραγματικές συνθήκες. Γι' αυτή την τιμή του μήκους διπόλου και μεταβάλλοντας την απόσταση d του

βιολογικού σκεδαστή από την κεραία του πομπού καταγράψαμε την αντίσταση εισόδου Z_{in}, καθώς και τον αντίστοιχο συντελεστή ανάκλασης. Τα αποτελέσματα αυτά αποτυπώνονται στον πίνακα (7.2). Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ανάκλασης δίνεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$\rho = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \tag{7.1}$$

όπου Z_{in} η αντίσταση εισόδου της κεραίας και Z_0 η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.

Απόσταση από βιολογικό σκεδαστή <i>d</i> (m)	Πραγματικό μέρος της Ζ _{in} (Ω)	Φανταστικό μέρος της Z _{in} (Ω)	Συντελεστής ανάκλασης ρ					
0.01	27.756	-11.149	0.317					
0.012	29.164	-10.314	0.291					
0.014	31.240	-8.304	0.251					
0.016	33.825	-5.949	0.205					
0.018	36.805	-3.629	0.158					
0.02	40.082	-1.547	0.111					
0.022	43.568	0.187	0.069					
0.024	47.185	1.511	0.033					
0.026	50.860	2.392	0.025					
0.028	54.519	2.819	0.051					
0.03	58.102	2.796	0.079					
0.032	61.547	2.339	0.106					
0.034	64.800	1.476	0.130					
0.036	67.811	0.239	0.151					
0.038	70.542	-1.330	0.171					
0.04	72.955	-3.184	0.188					
0.042	75.026	-5.276	0.204					
0.044	76.735	-7.554	0.219					
0.046	78.071	-9.965	0.232					
0.048	79.029	-12.458	0.244					
0.05	79.613	-14.980	0.254					

Πίνακας (7.2) : Αντίσταση εισόδου του πομπού για διάφορες τιμές d.

Ακολούθως, στο σχήμα (7.5) παρουσιάζονται διαγραμματικά οι παραπάνω μετρήσεις.



Σχήμα (7.5α) : Διάγραμμα μεταβολής του συντελεστή ανάκλασης του πομπού συναρτήσει της απόστασης d



Σχήμα (7.5β) : Διάγραμμα μεταβολής της αντίστασης εισόδου του πομπού συναρτήσει της απόστασης *d*

Τόσο ο πομπός, όσο και ο δέκτης, προσομοιώνονται με 5 στοιχειώδη αγώγιμα τμήματα, όσα απαιτεί για την περίπτωση αυτή η μέθοδος των ροπών, την οποία χρησιμοποιεί το SuperNEC στις προσομοιώσεις. Λόγω της κεραίας του πομπού και της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που αυτή εκπέμπει, πάνω σε κάθε ένα από αυτά τα αγώγιμα τμήματα της κεραίας του δέκτη, επάγεται κάποιο ηλεκτρικό ρεύμα. Από τη θεωρία των κεραιών η ρευματική κατανομή στο δίπολο που είναι τοποθετημένο πάνω στον άξονα z με το κέντρο του να βρίσκεται στην αρχή των αξόνων, προσεγγίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$I(z) = \begin{cases} I \sin\left[\frac{\pi}{2} - k_0 z\right] & z > 0 \\ I \sin\left[\frac{\pi}{2} + k_0 z\right] & z < 0 \end{cases}$$
(7.2)

όπου $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ είναι ο κυματαριθμός και I το μέγιστο ρεύμα του διπόλου.

Εύκολα προκύπτει λοιπόν ότι η ένταση του ρεύματος στην κεραία του δέκτη ακολουθεί κατά προσέγγιση ημιτονοειδή κατανομή και ελαττώνεται καθώς προχωρούμε προς τα άκρα της. Συνεπώς, η ένταση του ρεύματος στο κέντρο της, δηλαδή για z=0 είναι η μέγιστη δυνατή. Στην περίπτωση της προσομοίωσης το τρίτο και κεντρικό στοιχειώδες αγώγιμο τμήμα έχει το μέγιστο ρεύμα. Το ρεύμα αυτό αποτελεί ένα καλό μέτρο υπολογισμού της ισχύος στο δέκτη, επειδή διέρχεται από την αντίσταση τερματισμού. Πιο συγκεκριμένα η ισχύς στο δέκτη υπολογίζεται μέσω της σχέσης :

$$P = \left(\frac{I}{\sqrt{2}}\right)^2 R \tag{7.3}$$

όπου P είναι η ισχύς στο δέκτη, I είναι το πλάτος της έντασης του ρεύματος στο κεντρικό αγώγιμο τμήμα του δέκτη και R είναι η αντίσταση τερματισμού του δέκτη που στην περίπτωση του πειράματος ισούται με 75 Ω.

Σκοπός του πειράματος είναι να μελετήσουμε τα στατιστικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας του σήματος που λαμβάνεται στο δέκτη. Όπως είναι γνωστό, η κεραία του πομπού εκπέμπει ζωνοπερατό σήμα της μορφής:

$$x(t) = x_c \cos(2\pi f_c t) - x_s \sin(2\pi f_c t)$$
(7.4)

όπου $x_c(t)$ είναι η συμφασική συνιστώσα και $x_s(t)$ η ορθογωνική συνιστώσα του σήματος, και $f_c = 1800 \ MHz$.

Επομένως η περιβάλλουσα r(t) του λαμβανόμενου σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$r(t) = \sqrt{x_c^2(t) + x_s^2(t)}$$
(7.5)

Η σχέση $x_c^2(t) + x_s^2(t)$ ισοδυναμεί με την ισχύ που λαμβάνεται στην κεραία του δέκτη. Προκειμένου λοιπόν να υπολογιστεί η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος στην προσομοίωση του SuperNEC πρέπει να υπολογιστεί η τετραγωνική ρίζα της εξίσωσης (7.3). Η περιβάλλουσα του σήματος που λαμβάνεται στην κεραία του δέκτη δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$r(t) = \sqrt{P} = \sqrt{\left(\frac{I}{\sqrt{2}}\right)^2 R} = I\sqrt{\frac{R}{2}}$$
(7.6)

Προκειμένου να μελετηθούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας του σήματος στο δέκτη, γίνονται προσομοιώσεις με τον πομπό να βρίσκεται σε πολλά σημεία του χώρου. Στην περίπτωση του πειράματος επιλέχτηκε τερματισμός της κεραίας του δέκτη με αντίσταση 75 Ω. Επομένως προκύπτει :

$$r(t) = \sqrt{37.5}I$$
 (7.7)

7.2.3 Διηλεκτρικές Πλάκες (UTD plates)

Όπως φαίνεται από το σχήμα (7.1) το μήκος του δωματίου είναι 16 m και το πλάτος 10 m. Όλες οι διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) που προσομοιώνουν τοίχους έχουν ύψος 4 m και πάχος 0.15 m, ενώ η πλάκα που αποτελεί το ανθρώπινο ομοίωμα έχει ύψος 1.7 m και πάχος 0.15 m.

Οι διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) που αποτελούν τους τοίχους έχουν προγραμματιστεί με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ώστε να προσομοιάζουν σε αληθινό τοίχο. Βασισμένοι σε παλαιότερες μελέτες και δημοσιεύσεις θέσαμε τη σχετική διηλεκτρική σταθερά, τη σχετική μαγνητική διαπερατότητα και την αγωγιμότητα ως ακολούθως :

$$\varepsilon_r = 6$$
, $\mu_r = 1$ kai $\sigma = 0.02$ S/m

Στο σχήμα (7.6) παρουσιάζεται ενδεικτικά για μία από τις 5 πλάκες ο ορισμός των παραμέτρων αυτών στο SuperNEC καθώς και οι συντεταγμένες της. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μονάδες που βρίσκονται στο δεξί μέρος του παραθύρου καθορίζουν ότι οι πλευρές είναι ενεργές, δηλαδή συμμετέχουν στον υπολογισμό της περίθλασης.

x-Length	y-Lengti	h <u>r</u>	Lentre
	Generat	e Vertices	
	Vetrices [x,	y, z]	Activ
-7.000000 -7.000000 7.000000 7.000000 7.000000	-5.000000 -5.000000 -5.000000 -5.000000	0.000000 4.000000 4.000000 0.000000	1 1 1
T ranspare	nt		
Thickness	Conductivity	Permittivity	Permeability
0.150000	0.020000	6.000000	1.000000

Σχήμα (7.6) : Καθορισμός παραμέτρων διηλεκτρικής πλάκας.

Στην περίπτωση της διηλεκτρικής πλάκας που προσομοιώνει τον άνθρωπο οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων είναι :

$$ε_r = 40$$
, $μ_r = 1$ και $σ = 1.4$ S/m

7.3 Μετρήσεις – Πειραματικά Αποτελέσματα

Στον πίνακα (7.3) παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Για να γίνει πιο σαφής η παρουσίαση των μετρήσεων θυμίζουμε τα εξής μεγέθη :

- συντεταγμένη x, που παίρνει τιμές από -6 έως -5 και εκφράζει την κίνηση του ανθρώπου στο δωμάτιο για ένα μέτρο,
- απόσταση d, που παίρνει τιμές μεταξύ l και 5 cm και εκφράζει την απόσταση μεταξύ του κεφαλιού του χρήστη και της κεραίας της ασύρματης τηλεφωνικής συσκευής.

Επίσης οι μετρήσεις που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις, αφορούν το μέγεθος I που είναι το πλάτος του επαγόμενου ρεύματος στο κεντρικό στοιχειώδες αγώγιμο τμήμα του δέκτη, το οποίο έχει τερματιστεί με αντίσταση 75 Ω. Μέσω του ρεύματος I μπορεί να υπολογιστεί άμεσα η ισχύς στο δέκτη σύμφωνα με τη σχέση (7.3) αλλά και η περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη από τη σχέση (7.6).

Πίνακας (7.3) : Μετρήσεις προσομοίωσης Ι (Α)

		Aπ δσταση d (m)																				
		0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
	-6	3 647E-05	4 217E-05	4 724E-05	5.089E-05	5 302E-05	5 395E-05	5 411E-05	5 383E-05	5.338E-05	5 289E-05	5 182E-05	5 148E-05	5 122E-05	5 104E-05	5.093E-05	5.089E-05	5.093E-05	5 104E-05	5 120E-05	5 142E-05	5 210E-05
	-5 98	3 271E-05	3 774E-05	4 210E-05	4.530E-05	4 723E-05	4 700E-05	4 808E-05	4 780E-05	4 737E-05	4 603E-05	4.625E-05	4 590E-05	4 562E-05	4.542E-05	4.528E-05	4.521E-05	4.521E-05	4.5265-05	4.537E-05	4.553E-05	4 953E-05
	-5.50	1.0555.05	3.774E-05	4.2192-05	4.009E-00	4.7232-05	4.7992-05	4.000E-05	4.700L-05	4.737E-05	4.095E-05	4.0252-05	4.390L-03	4.302E-05	4.0422-00	4.3282-05	4.5212-05	4.521E-05	4.320E-05	4.337 L-03	4.000	4.9002-00
	-5.90	1.955E-05	2.311E-05	2.042E-05	2.696E-05	3.067E-05	3.163E-05	3.209E-05	3.225E-05	3.226E-05	3.225E-05	3.272E-05	3.200E-05	3.205E-05	3.203E-05	3.207E-05	3.274E-05	3.265E-05	3.299E-05	3.315E-05	3.334E-05	3.592E-05
	-5.94	1.494E-05	1.928E-05	2.325E-05	2.642E-05	2.867E-05	3.014E-05	3.104E-05	3.156E-05	3.188E-05	3.210E-05	3.260E-05	3.276E-05	3.293E-05	3.309E-05	3.328E-05	3.350E-05	3.374E-05	3.401E-05	3.429E-05	3.460E-05	3.153E-05
	-5.92	3.090E-05	3.660E-05	4.171E-05	4.553E-05	4.791E-05	4.915E-05	4.963E-05	4.966E-05	4.949E-05	4.924E-05	4.854E-05	4.840E-05	4.831E-05	4.828E-05	4.831E-05	4.840E-05	4.854E-05	4.875E-05	4.900E-05	4.930E-05	4.691E-05
	-5.9	4.216E-05	4.829E-05	5.375E-05	5.765E-05	5.986E-05	6.074E-05	6.078E-05	6.038E-05	5.980E-05	5.920E-05	5.806E-05	5.765E-05	5.732E-05	5.709E-05	5.695E-05	5.690E-05	5.694E-05	5.705E-05	5.723E-05	5.749E-05	5.888E-05
	-5.88	4.016E-05	4.497E-05	4.935E-05	5.244E-05	5.412E-05	5.469E-05	5.458E-05	5.412E-05	5.355E-05	5.298E-05	5.233E-05	5.193E-05	5.160E-05	5.137E-05	5.122E-05	5.116E-05	5.118E-05	5.127E-05	5.142E-05	5.164E-05	5.568E-05
	-5.86	2.494E-05	2.763E-05	3.043E-05	3.267E-05	3.416E-05	3.497E-05	3.532E-05	3.543E-05	3.544E-05	3.541E-05	3.592E-05	3.591E-05	3.592E-05	3.598E-05	3.608E-05	3.622E-05	3.640E-05	3.661E-05	3.686E-05	3.714E-05	3.992E-05
	-5.84	1.131E-05	1.561E-05	1.972E-05	2.316E-05	2.574E-05	2.754E-05	2.876E-05	2.957E-05	3.015E-05	3.059E-05	3.115E-05	3.149E-05	3.182E-05	3.214E-05	3.247E-05	3.281E-05	3.316E-05	3.352E-05	3.390E-05	3.429E-05	3.136E-05
	-5.82	3.079E-05	3.650E-05	4.162E-05	4.543E-05	4.781E-05	4.906E-05	4.955E-05	4.960E-05	4.945E-05	4.923E-05	4.846E-05	4.834E-05	4.827E-05	4.827E-05	4.832E-05	4.843E-05	4.860E-05	4.882E-05	4.909E-05	4.941E-05	4.727E-05
	-5.8	4 610E-05	5 203E-05	5 732E-05	6 100E-05	6 298E-05	6 366E-05	6 352E-05	6 296E-05	6 226E-05	6 156E-05	6.044E-05	5 994E-05	5 955E-05	5 927E-05	5 909E-05	5 901E-05	5 901E-05	5 910E-05	5 927E-05	5 951E-05	6 119E-05
	-5.79	4.5605.05	5.200E 00	5.102E 00	5.700E 05	5.200E 00	5.000E 00	5 991E 05	5.200E 00	5.220E 00	6.100E 00	5.011E 05	6.004E 00	5.500E 00	6.027E 00	6.000E 00	6.001E 00	5.001E 00	5.010E 00	5.027E 00		5.016E.05
	-5.70	4.300E-03	5.019E-05	5.440E-05	3.729E-05	3.870E-05	3.913E-05	5.881E-05	3.817E-03	3.744E-05	5.075E-05	3.021E-05	3.37 TE-05	3.330E-05	3.497E-05	5.477E-05	5.407E-05	3.400E-03	5.473E-05	3.407E-03	3.308E-05	5.910E-05
	-5.76	2.889E-05	3.136E-05	3.400E-05	3.607E-05	3.739E-05	3.805E-05	3.826E-05	3.825E-05	3.815E-05	3.804E-05	3.854E-05	3.847E-05	3.845E-05	3.848E-05	3.855E-05	3.868E-05	3.885E-05	3.907E-05	3.932E-05	3.961E-05	4.232E-05
	-5.74	1.040E-05	1.453E-05	1.853E-05	2.191E-05	2.447E-05	2.629E-05	2.754E-05	2.838E-05	2.899E-05	2.947E-05	2.989E-05	3.026E-05	3.061E-05	3.096E-05	3.130E-05	3.165E-05	3.201E-05	3.238E-05	3.276E-05	3.315E-05	3.017E-05
	-5.72	3.262E-05	3.799E-05	4.277E-05	4.625E-05	4.832E-05	4.930E-05	4.957E-05	4.943E-05	4.913E-05	4.877E-05	4.782E-05	4.758E-05	4.741E-05	4.732E-05	4.728E-05	4.731E-05	4.740E-05	4.754E-05	4.774E-05	4.799E-05	4.615E-05
	-5.7	5.009E-05	5.586E-05	6.093E-05	6.434E-05	6.599E-05	6.634E-05	6.588E-05	6.503E-05	6.407E-05	6.313E-05	6.195E-05	6.124E-05	6.067E-05	6.023E-05	5.990E-05	5.968E-05	5.956E-05	5.953E-05	5.958E-05	5.972E-05	6.172E-05
	-5.68	4.979E-05	5.464E-05	5.898E-05	6.185E-05	6.314E-05	6.324E-05	6.262E-05	6.168E-05	6.066E-05	5.970E-05	5.910E-05	5.836E-05	5.776E-05	5.728E-05	5.692E-05	5.667E-05	5.653E-05	5.646E-05	5.648E-05	5.658E-05	6.063E-05
	-5.66	3.237E-05	3.566E-05	3.878E-05	4.102E-05	4.224E-05	4.267E-05	4.257E-05	4.222E-05	4.179E-05	4.138E-05	4.162E-05	4.130E-05	4.105E-05	4.088E-05	4.077E-05	4.073E-05	4.074E-05	4.080E-05	4.091E-05	4.107E-05	4.326E-05
	-5.64	2.077E-05	2.455E-05	2.801E-05	3.063E-05	3.231E-05	3.324E-05	3.365E-05	3.376E-05	3.372E-05	3.363E-05	3.335E-05	3.330E-05	3.329E-05	3.331E-05	3.337E-05	3.346E-05	3.358E-05	3.373E-05	3.390E-05	3.411E-05	3.077E-05
	-5.62	4.383E-05	4.856E-05	5.266E-05	5.532E-05	5.649E-05	5.655E-05	5.598E-05	5.511E-05	5.415E-05	5.323E-05	5.182E-05	5.115E-05	5.059E-05	5.016E-05	4.983E-05	4.960E-05	4.944E-05	4.937E-05	4.936E-05	4.943E-05	4.781E-05
	-5.6	6.191E-05	6.712E-05	7.162E-05	7.428E-05	7.508E-05	7.454E-05	7.324E-05	7.165E-05	7.003E-05	6.852E-05	6.709E-05	6.594E-05	6.498E-05	6.415E-05	6.353E-05	6.306E-05	6.270E-05	6.247E-05	6.233E-05	6.230E-05	6.449E-05
	-5.58	6 116E-05	6 565E-05	6 955E-05	7 178E-05	7 228E-05	7 155E-05	7 014E-05	6.848E-05	6 684E-05	6 533E-05	6 443E-05	6 327E-05	6 231E-05	6 153E-05	6 090E-05	6.041E-05	6.005E-05	5 980E-05	5 965E-05	5 960E-05	6 351E-05
	-5.56	4.277E.05	4 590E 05	4 9515 05	F.012E.05	F.050E-05	F 022E 05	4.029E.05	4 9265 05	4 7255 05	4 642E 05	4 6105 05	4 5405 05	4.402E.05	4.447E.05	4 411E 05	4 2955 05	4.267E.05	4.256E.05	4 2515 05	4.2525.05	4 5255 05
~	-5.50	4.277E-05	4.380E-03	4.851E-05	3.013E-05	5.059E-05	5.023E-05	4.936E-05	4.830E-05	4.735E-05	4.043E-05	4.019E-05	4.349E-03	4.492E-05	4.447E-05	4.411E-05	4.365E-05	4.307E-05	4.330E-05	4.331E-03	4.353E-05	4.555E-05
	-5.54	2.795E-05	3.093E-05	3.306E-05	3.557E-05	3.657E-05	3.686E-05	3.672E-05	3.637E-05	3.595E-05	3.553E-05	3.487E-05	3.459E-05	3.437E-05	3.422E-05	3.412E-05	3.408E-05	3.407E-05	3.411E-05	3.418E-05	3.428E-05	3.089E-05
<u>د</u>	-5.52	4.525E-05	4.941E-05	5.305E-05	5.534E-05	5.621E-05	5.604E-05	5.529E-05	5.428E-05	5.322E-05	5.223E-05	5.081E-05	5.007E-05	4.946E-05	4.898E-05	4.862E-05	4.834E-05	4.816E-05	4.805E-05	4.802E-05	4.806E-05	4.657E-05
E	-5.5	6.221E-05	6.695E-05	7.107E-05	7.345E-05	7.402E-05	7.332E-05	7.192E-05	7.026E-05	6.860E-05	6.707E-05	6.573E-05	6.456E-05	6.359E-05	6.281E-05	6.219E-05	6.171E-05	6.135E-05	6.111E-05	6.098E-05	6.094E-05	6.328E-05
, Ęđ	-5.48	6.071E-05	6.485E-05	6.844E-05	7.042E-05	7.076E-05	6.993E-05	6.848E-05	6.682E-05	6.519E-05	6.371E-05	6.276E-05	6.163E-05	6.070E-05	5.995E-05	5.935E-05	5.889E-05	5.855E-05	5.831E-05	5.818E-05	5.814E-05	6.202E-05
⊡	-5.46	4.245E-05	4.523E-05	4.772E-05	4.914E-05	4.947E-05	4.902E-05	4.812E-05	4.708E-05	4.605E-05	4.512E-05	4.472E-05	4.402E-05	4.346E-05	4.301E-05	4.266E-05	4.240E-05	4.221E-05	4.209E-05	4.203E-05	4.203E-05	4.385E-05
	-5.44	2.625E-05	2.870E-05	3.098E-05	3.256E-05	3.334E-05	3.352E-05	3.333E-05	3.296E-05	3.254E-05	3.214E-05	3.157E-05	3.129E-05	3.107E-05	3.089E-05	3.079E-05	3.073E-05	3.071E-05	3.072E-05	3.076E-05	3.084E-05	2.747E-05
	-5.42	3.889E-05	4.251E-05	4.576E-05	4.786E-05	4.876E-05	4.874E-05	4.820E-05	4.744E-05	4.662E-05	4.583E-05	4.476E-05	4.417E-05	4.369E-05	4.333E-05	4.305E-05	4.286E-05	4.274E-05	4.268E-05	4.269E-05	4.275E-05	4.139E-05
	-5.4	5.176E-05	5.611E-05	5.999E-05	6.240E-05	6.327E-05	6.301E-05	6.211E-05	6.096E-05	5.977E-05	5.866E-05	5.774E-05	5.689E-05	5.619E-05	5.564E-05	5.522E-05	5.492E-05	5.472E-05	5.461E-05	5.458E-05	5.464E-05	5.710E-05
	-5.38	5.568E-05	5.970E-05	6.315E-05	6.504E-05	6.538E-05	6.461E-05	6.326E-05	6.172E-05	6.019E-05	5.878E-05	5.796E-05	5.687E-05	5.597E-05	5.522E-05	5.462E-05	5.415E-05	5.378E-05	5.352E-05	5.334E-05	5.325E-05	5.702E-05
	-5.36	3.567E-05	3.871E-05	4.135E-05	4.296E-05	4.351E-05	4.327E-05	4.259E-05	4.173E-05	4.084E-05	4.002E-05	3.959E-05	3.896E-05	3.843E-05	3.800E-05	3.765E-05	3.738E-05	3.716E-05	3.700E-05	3.690E-05	3.684E-05	3.841E-05
	-5.34	2 963E-05	3 159E-05	3 327E-05	3 413E-05	3 418E-05	3 364E-05	3 282E-05	3 191E-05	3 101E-05	3 018E-05	2 906E-05	2 844E-05	2 791E-05	2 747E-05	2 711E-05	2 680E-05	2 654E-05	2 632E-05	2 614E-05	2 599E-05	2 220E-05
	-5 32	4 925E-05	5 186E-05	5.402E-05	5.490E-05	5.451E-05	5 328E-05	5 164E-05	4 994E-05	4.831E-05	4 683E-05	4.528E-05	4.414E-05	4 317E-05	4 237E-05	4 170E-05	4 115E-05	4.070E-05	4.033E-05	4.005E-05	3 984E-05	3 884E-05
	-5.2	4.323E-05	6.467E.05	6 767E 05	6 999E 05	6.960E.05	6.726E.05	6 E 29 E 05	4.334E-05	4.031E-05	4.000E-00	5.944E.05	5 711E 05	5.509E 05	4.237E-05	5.420E.05	5 269E 05	5.210E.05	5.291E.05	F 252E 05	5.304E-05	5.007E-05
	-3.3	6.121E-05	0.407E-05	0.757E-05	0.000E-05	0.000E-05	0.723E-05	0.030E-00	0.340E-03	0.149E-05	5.9702-05	5.044E-05	5.7112-05	5.090E-00	5.505E-05	5.429E-05	5.300E-05	5.5192-05	5.201E-05	5.255E-05	5.234E-05	5.467 E-05
	-5.20	5.475E-05	5.630E-05	6.135E-05	6.294E-05	6.305E-05	6.214E-05	6.070E-05	5.910E-05	5.754E-05	5.674E-05	5.529E-05	5.419E-05	5.327E-05	5.252E-05	5.191E-05	5.142E-05	5.104E-05	5.076E-05	5.050E-05	5.045E-05	5.417E-05
	-5.26	3.383E-05	3.665E-05	3.914E-05	4.066E-05	4.118E-05	4.095E-05	4.031E-05	3.949E-05	3.866E-05	3.818E-05	3.746E-05	3.687E-05	3.638E-05	3.599E-05	3.567E-05	3.542E-05	3.523E-05	3.508E-05	3.499E-05	3.494E-05	3.686E-05
	-5.24	2.364E-05	2.514E-05	2.643E-05	2.708E-05	2.708E-05	2.663E-05	2.595E-05	2.523E-05	2.451E-05	2.325E-05	2.286E-05	2.237E-05	2.195E-05	2.160E-05	2.131E-05	2.105E-05	2.083E-05	2.064E-05	2.047E-05	2.032E-05	1.678E-05
	-5.22	4.369E-05	4.546E-05	4.688E-05	4.724E-05	4.656E-05	4.522E-05	4.360E-05	4.199E-05	4.047E-05	3.899E-05	3.778E-05	3.673E-05	3.582E-05	3.503E-05	3.441E-05	3.388E-05	3.344E-05	3.308E-05	3.278E-05	3.255E-05	3.162E-05
	-5.2	5.807E-05	6.069E-05	6.285E-05	6.362E-05	6.301E-05	6.148E-05	5.955E-05	5.758E-05	5.571E-05	5.450E-05	5.284E-05	5.155E-05	5.046E-05	4.955E-05	4.882E-05	4.821E-05	4.772E-05	4.734E-05	4.705E-05	4.685E-05	4.933E-05
	-5.18	5.573E-05	5.861E-05	6.108E-05	6.221E-05	6.197E-05	6.079E-05	5.917E-05	5.743E-05	5.578E-05	5.490E-05	5.341E-05	5.228E-05	5.132E-05	5.054E-05	4.991E-05	4.940E-05	4.900E-05	4.869E-05	4.848E-05	4.834E-05	5.203E-05
	-5.16	3.810E-05	4.045E-05	4.252E-05	4.365E-05	4.380E-05	4.324E-05	4.233E-05	4.129E-05	4.027E-05	3.962E-05	3.878E-05	3.809E-05	3.752E-05	3.706E-05	3.669E-05	3.640E-05	3.617E-05	3.599E-05	3.587E-05	3.821E-05	3.822E-05
	-5.14	1.862E-05	1.996E-05	2.117E-05	2.189E-05	2.210E-05	2.192E-05	2.154E-05	2.109E-05	2.062E-05	1.984E-05	1.950E-05	1.920E-05	1.894E-05	1.872E-05	1.854E-05	1.839E-05	1.825E-05	1.813E-05	1.802E-05	1.569E-05	1.574E-05
	-5.12	3.067E-05	3.178E-05	3.275E-05	3.301E-05	3.260E-05	3.172E-05	3.065E-05	2.959E-05	2.859E-05	2.756E-05	2.676E-05	2.607E-05	2.548E-05	2.497E-05	2.456E-05	2.422E-05	2.393E-05	2.369E-05	2.349E-05	2.207E-05	2.188E-05
	-5.1	4.841E-05	5.023E-05	5.184E-05	5.238E-05	5.185E-05	5.060E-05	4.904E-05	4.746E-05	4.597E-05	4.497E-05	4.378E-05	4.278E-05	4.193E-05	4.122E-05	4.067E-05	4.022E-05	3.986E-05	3.959E-05	3.939E-05	4.163E-05	4.145E-05
	-5.08	5 318E-05	5 527E-05	5 714E-05	5 787E-05	5 742E-05	5.618E-05	5 459E-05	5 295E-05	5 140E-05	5.049E-05	4 928E-05	4 826E-05	4 743E-05	4 675E-05	4 621E-05	4 579E-05	4 547E-05	4 524F-05	4 509E-05	4 879E-05	4 870E-05
	-5.06	1 2485-05	4 4175-05	4 5685-05	4 631 - 05	4 6045-05	4 51/ =-05	1 308 -05	4 2765-05	4 1605-05	4 0805-05	4 0055-05	3 0335-05	3 8755-05	3 8275-05	3 701 -05	3 76/ =-05	3 7445-05	3 731 -05	3 723 -05	4 0325-05	1 03/ =-05
	5.00	2400-00	+I/E-00						7.210E-00	IUUE-US			0.000E 05	0.010E-05	3.02/E-05	1.0015.05	1.00FE-05	1.000E.05	1.077E.05	1.0765.05		00+E-00
	-5.04	2.053E-05	2.14/E-05	2.235E-05	2.283E-05	2.289E-05	2.203E-05	2.224E-05	2.1/9E-05	2.135E-05	∠.083E-05	2.053E-05	2.030E-05	2.012E-05	2.001E-05	1.991E-05	1.985E-05	1.980E-05	1.9//E-05	1.9/6E-05	2.005E-05	2.016E-05
	-5.02	1.244E-05	1.326E-05	1.405E-05	1.456E-05	1.474E-05	1.465E-05	1.444E-05	1.418E-05	1.392E-05	1.346E-05	1.324E-05	1.303E-05	1.285E-05	1.270E-05	1.257E-05	1.246E-05	1.235E-05	1.225E-05	1.215E-05	9.520E-06	9.394E-06
	-5	3.392E-05	3.527E-05	3.652E-05	3.706E-05	3.684E-05	3.610E-05	3.513E-05	3.413E-05	3.318E-05	3.267E-05	3.190E-05	3.124E-05	3.069E-05	3.023E-05	2.987E-05	2.959E-05	2.936E-05	2.918E-05	2.905E-05	3.082E-05	3.067E-05

7.3.1 Επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Για σταθερή απόσταση μεταξύ του κινητού και του χρήστη εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς τις βραχυχρόνιες διαλείψεις που υφίσταται το λαμβανόμενο σήμα, εάν απεικονίσει γραφικά τη μεταβολή της ισχύος στο δέκτη καθώς ο χρήστης κινείται παράλληλα στον άξονα x, διανύοντας απόσταση 1 m, από το σημείο (-6,0) προς το (-5,0). Οι διαλείψεις αυτές κυμαίνονται από 10 έως 15 dB περίπου.



Σχήμα (7.7α) : Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση πομπού-κεφαλιού *d*=1 cm



Σχήμα (7.7β) : Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση πομπού-κεφαλιού *d*=2.6 cm



Σχήμα (7.7γ) : Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα *x* και σταθερή απόσταση πομπού-κεφαλιού *d*=5 cm

Όπως έχουμε αναφέρει η παρουσία του ανθρώπινου ομοιώματος δίπλα στον πομπό επηρεάζει δραστικά την αντίσταση εισόδου της διπολικής κεραίας του πομπού και κατ' επέκταση την ακτινοβολούμενη ισχύ Wrad . Προφανώς η ισχύς αυτή εξαρτάται από την απόσταση d μεταξύ του πομπού και του βιολογικού σκεδαστή. Το γεγονός αυτό αποτελεί εμπόδιο στη σωστή επεξεργασία των μετρήσεων, αφού το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη συνδέεται άμεσα με την ακτινοβολούμενη ισχύ. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με κατάλληλη κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης. της Συγκεκριμένα, η λαμβανόμενη περιβάλλουσα που είναι $\sqrt{37.5I}$ και εκφράζει ρίζα ισχύος διαιρείται σε κάθε απόσταση d με τη ρίζα της ισχύος ακτινοβολίας $\sqrt{W_{rad}}$. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η ισχύς W_{rad} πρακτικά δεν αλλάζει μεταβάλλοντας τη συντεταγμένη x, διατηρώντας προφανώς ταυτόχρονα σταθερή την απόσταση d. Συνεπώς, στον πίνακα (7.4) φαίνονται οι 21 τιμές ακτινοβολούμενης ισχύος για τις αντίστοιχες αποστάσεις d από 1 έως 5 cm.
<i>d</i> (cm)	W _{rad} (Watt)	$\sqrt{W_{rad}}$
1	0.01630	0.12767
1.2	0.01628	0.12759
1.4	0.01631	0.12771
1.6	0.01590	0.12610
1.8	0.01502	0.12256
2	0.01389	0.11786
2.2	0.01273	0.11283
2.4	0.01165	0.10794
2.6	0.01070	0.10344
2.8	0.00990	0.09950
3	0.00923	0.09607
3.2	0.00860	0.09274
3.4	0.00817	0.09039
3.6	0.00770	0.08775
3.8	0.00740	0.08602
4	0.00710	0.08426
4.2	0.00680	0.08246
4.4	0.00662	0.08136
4.6	0.00643	0.08019
4.8	0.00620	0.07874
5	0.00610	0.07810

Πίνακας (7.4) : Ακτινοβολούμενη ισχύς για διαφορετικές αποστάσεις d

Οι νέες κανονικοποιημένες τιμές της περιβάλλουσας παρουσιάζονται στον πίνακα (7.5). Υπενθυμίζουμε ότι η κανονικοποίηση των τιμών αυτών γίνεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$\sqrt{\frac{37.5I}{W_{rad}}}$$

όπου το Ι για κάθε τετμημένη x και απόσταση d υπάρχει στον πίνακα (7.3).

Πίνακας (7.5) : Κανονικοποιημένες τιμές περιβάλλουσας

										Απο	όσταση d	(m)									
	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
-6	1.749E-03	2.024E-03	2.265E-03	2.471E-03	2.649E-03	2.803E-03	2.937E-03	3.054E-03	3.160E-03	3.255E-03	3.303E-03	3.399E-03	3.470E-03	3.562E-03	3.626E-03	3.698E-03	3.782E-03	3.841E-03	3.910E-03	3.999E-03	4.085E-03
-5.98	1.569E-03	1.811E-03	2.023E-03	2.204E-03	2.360E-03	2.494E-03	2.610E-03	2.712E-03	2.804E-03	2.888E-03	2.948E-03	3.031E-03	3.091E-03	3.170E-03	3.223E-03	3.286E-03	3.357E-03	3.406E-03	3.465E-03	3.541E-03	3.883E-03
-5.96	9.377E-04	1.109E-03	1.267E-03	1.407E-03	1.532E-03	1.643E-03	1.742E-03	1.830E-03	1.911E-03	1.985E-03	2.086E-03	2.158E-03	2.212E-03	2.277E-03	2.326E-03	2.379E-03	2.439E-03	2.483E-03	2.532E-03	2.593E-03	2.816E-03
-5.94	7.166E-04	9.253E-04	1.115E-03	1.283E-03	1.433E-03	1.566E-03	1.685E-03	1.791E-03	1.887E-03	1.976E-03	2.078E-03	2.163E-03	2.231E-03	2.309E-03	2.369E-03	2.435E-03	2.506E-03	2.560E-03	2.619E-03	2.691E-03	2.472E-03
-5.92	1.482E-03	1.757E-03	2.000E-03	2.211E-03	2.394E-03	2.554E-03	2.694E-03	2.817E-03	2.930E-03	3.031E-03	3.094E-03	3.196E-03	3.273E-03	3.369E-03	3.439E-03	3.517E-03	3.605E-03	3.669E-03	3.742E-03	3.834E-03	3.678E-03
-5.9	2.022E-03	2.318E-03	2.577E-03	2.800E-03	2.991E-03	3.156E-03	3.299E-03	3.426E-03	3.540E-03	3.644E-03	3.701E-03	3.807E-03	3.883E-03	3.984E-03	4.054E-03	4.135E-03	4.228E-03	4.294E-03	4.371E-03	4.471E-03	4.617E-03
-5.88	1.926E-03	2.158E-03	2.366E-03	2.547E-03	2.704E-03	2.842E-03	2.962E-03	3.071E-03	3.170E-03	3.261E-03	3.336E-03	3.429E-03	3.496E-03	3.585E-03	3.646E-03	3.718E-03	3.801E-03	3.859E-03	3.927E-03	4.016E-03	4.366E-03
-5.86	1.196E-03	1.326E-03	1.459E-03	1.587E-03	1.707E-03	1.817E-03	1.917E-03	2.010E-03	2.098E-03	2.179E-03	2.290E-03	2.371E-03	2.434E-03	2.511E-03	2.568E-03	2.632E-03	2.703E-03	2.755E-03	2.815E-03	2.888E-03	3.130E-03
-5.84	5.425E-04	7.492E-04	9.456E-04	1.125E-03	1.286E-03	1.431E-03	1.561E-03	1.678E-03	1.785E-03	1.883E-03	1.986E-03	2.079E-03	2.156E-03	2.243E-03	2.311E-03	2.384E-03	2.462E-03	2.523E-03	2.589E-03	2.667E-03	2.459E-03
-5.82	1.477E-03	1.752E-03	1.996E-03	2.206E-03	2.389E-03	2.549E-03	2.689E-03	2.814E-03	2.927E-03	3.030E-03	3.089E-03	3.192E-03	3.270E-03	3.369E-03	3.440E-03	3.520E-03	3.609E-03	3.674E-03	3.749E-03	3.843E-03	3.706E-03
-5.8	2.211E-03	2.497E-03	2.748E-03	2.962E-03	3.147E-03	3.308E-03	3.448E-03	3.572E-03	3.686E-03	3.789E-03	3.852E-03	3.958E-03	4.034E-03	4.136E-03	4.206E-03	4.289E-03	4.382E-03	4.448E-03	4.526E-03	4.628E-03	4.798E-03
-5.78	2.187E-03	2.409E-03	2.608E-03	2.782E-03	2.936E-03	3.072E-03	3.192E-03	3.300E-03	3.400E-03	3.493E-03	3.583E-03	3.679E-03	3.747E-03	3.836E-03	3.899E-03	3.973E-03	4.059E-03	4.119E-03	4.190E-03	4.284E-03	4.639E-03
-5.76	1.386E-03	1.505E-03	1.630E-03	1.752E-03	1.868E-03	1.977E-03	2.077E-03	2.170E-03	2.258E-03	2.341E-03	2.457E-03	2.540E-03	2.605E-03	2.685E-03	2.744E-03	2.811E-03	2.885E-03	2.941E-03	3.003E-03	3.081E-03	3.318E-03
-5.74	4.988E-04	6.974E-04	8.885E-04	1.064E-03	1.223E-03	1.366E-03	1.495E-03	1.610E-03	1.716E-03	1.814E-03	1.905E-03	1.998E-03	2.074E-03	2.161E-03	2.228E-03	2.300E-03	2.377E-03	2.437E-03	2.502E-03	2.578E-03	2.366E-03
-5.72	1.565E-03	1.823E-03	2.051E-03	2.246E-03	2.414E-03	2.562E-03	2.690E-03	2.804E-03	2.909E-03	3.002E-03	3.048E-03	3.142E-03	3.212E-03	3.302E-03	3.366E-03	3.438E-03	3.520E-03	3.578E-03	3.646E-03	3.732E-03	3.618E-03
-5.7	2.403E-03	2.681E-03	2.922E-03	3.125E-03	3.297E-03	3.447E-03	3.576E-03	3.689E-03	3.793E-03	3.885E-03	3.949E-03	4.044E-03	4.110E-03	4.203E-03	4.264E-03	4.337E-03	4.423E-03	4.480E-03	4.550E-03	4.645E-03	4.839E-03
-5.68	2.388E-03	2.622E-03	2.828E-03	3.004E-03	3.155E-03	3.286E-03	3.399E-03	3.499E-03	3.591E-03	3.674E-03	3.767E-03	3.854E-03	3.913E-03	3.997E-03	4.052E-03	4.119E-03	4.198E-03	4.249E-03	4.313E-03	4.400E-03	4.754E-03
-5.66	1.553E-03	1.711E-03	1.860E-03	1.992E-03	2.111E-03	2.217E-03	2.310E-03	2.395E-03	2.474E-03	2.547E-03	2.653E-03	2.727E-03	2.781E-03	2.853E-03	2.902E-03	2.960E-03	3.025E-03	3.071E-03	3.124E-03	3.194E-03	3.392E-03
-5.64	9.962E-04	1.178E-03	1.343E-03	1.488E-03	1.614E-03	1.727E-03	1.826E-03	1.915E-03	1.996E-03	2.070E-03	2.126E-03	2.199E-03	2.255E-03	2.325E-03	2.376E-03	2.432E-03	2.494E-03	2.539E-03	2.589E-03	2.653E-03	2.413E-03
-5.62	2.102E-03	2.331E-03	2.525E-03	2.687E-03	2.823E-03	2.938E-03	3.038E-03	3.127E-03	3.206E-03	3.276E-03	3.303E-03	3.378E-03	3.427E-03	3.500E-03	3.547E-03	3.605E-03	3.671E-03	3.716E-03	3.770E-03	3.844E-03	3.749E-03
-5.6	2.969E-03	3.221E-03	3.434E-03	3.607E-03	3.751E-03	3.873E-03	3.975E-03	4.065E-03	4.146E-03	4.217E-03	4.276E-03	4.354E-03	4.402E-03	4.477E-03	4.523E-03	4.583E-03	4.656E-03	4.702E-03	4.760E-03	4.845E-03	5.056E-03
-5.58	2.934E-03	3.151E-03	3.335E-03	3.486E-03	3.612E-03	3.718E-03	3.807E-03	3.885E-03	3.957E-03	4.021E-03	4.107E-03	4.178E-03	4.221E-03	4.294E-03	4.335E-03	4.390E-03	4.459E-03	4.501E-03	4.555E-03	4.635E-03	4.980E-03
-5.56	2.051E-03	2.198E-03	2.326E-03	2.435E-03	2.528E-03	2.610E-03	2.680E-03	2.744E-03	2.803E-03	2.858E-03	2.944E-03	3.004E-03	3.043E-03	3.103E-03	3.140E-03	3.187E-03	3.243E-03	3.278E-03	3.323E-03	3.385E-03	3.556E-03
-5.54	1.341E-03	1.484E-03	1.614E-03	1.727E-03	1.827E-03	1.915E-03	1.993E-03	2.063E-03	2.128E-03	2.187E-03	2.223E-03	2.284E-03	2.329E-03	2.388E-03	2.429E-03	2.477E-03	2.530E-03	2.567E-03	2.610E-03	2.666E-03	2.422E-03
-5.52	2.170E-03	2.371E-03	2.544E-03	2.688E-03	2.809E-03	2.912E-03	3.001E-03	3.080E-03	3.151E-03	3.215E-03	3.239E-03	3.306E-03	3.351E-03	3.418E-03	3.461E-03	3.513E-03	3.576E-03	3.616E-03	3.667E-03	3.738E-03	3.651E-03
-5.5	2.984E-03	3.213E-03	3.408E-03	3.567E-03	3.699E-03	3.810E-03	3.903E-03	3.986E-03	4.061E-03	4.128E-03	4.190E-03	4.263E-03	4.308E-03	4.383E-03	4.427E-03	4.485E-03	4.556E-03	4.599E-03	4.657E-03	4.739E-03	4.962E-03
-5.48	2.912E-03	3.112E-03	3.282E-03	3.420E-03	3.536E-03	3.634E-03	3.717E-03	3.791E-03	3.859E-03	3.921E-03	4.000E-03	4.070E-03	4.112E-03	4.184E-03	4.225E-03	4.280E-03	4.348E-03	4.389E-03	4.443E-03	4.522E-03	4.863E-03
-5.46	2.036E-03	2.171E-03	2.288E-03	2.386E-03	2.472E-03	2.547E-03	2.612E-03	2.671E-03	2.726E-03	2.777E-03	2.850E-03	2.907E-03	2.944E-03	3.002E-03	3.037E-03	3.081E-03	3.135E-03	3.168E-03	3.210E-03	3.269E-03	3.438E-03
-5.44	1.259E-03	1.377E-03	1.485E-03	1.581E-03	1.666E-03	1.742E-03	1.809E-03	1.870E-03	1.926E-03	1.978E-03	2.012E-03	2.066E-03	2.105E-03	2.156E-03	2.192E-03	2.233E-03	2.281E-03	2.312E-03	2.349E-03	2.398E-03	2.154E-03
-5.42	1.865E-03	2.040E-03	2.194E-03	2.324E-03	2.436E-03	2.533E-03	2.616E-03	2.692E-03	2.760E-03	2.821E-03	2.853E-03	2.917E-03	2.960E-03	3.024E-03	3.065E-03	3.115E-03	3.174E-03	3.212E-03	3.260E-03	3.325E-03	3.245E-03
-5.4	2.483E-03	2.693E-03	2.877E-03	3.030E-03	3.161E-03	3.274E-03	3.371E-03	3.459E-03	3.538E-03	3.610E-03	3.680E-03	3.757E-03	3.807E-03	3.883E-03	3.931E-03	3.991E-03	4.064E-03	4.110E-03	4.168E-03	4.249E-03	4.477E-03
-5.38	2.671E-03	2.865E-03	3.028E-03	3.159E-03	3.267E-03	3.357E-03	3.433E-03	3.502E-03	3.563E-03	3.618E-03	3.694E-03	3.755E-03	3.792E-03	3.854E-03	3.888E-03	3.935E-03	3.994E-03	4.028E-03	4.073E-03	4.141E-03	4.471E-03
-5.36	1.711E-03	1.858E-03	1.983E-03	2.086E-03	2.174E-03	2.248E-03	2.312E-03	2.368E-03	2.418E-03	2.463E-03	2.523E-03	2.573E-03	2.604E-03	2.652E-03	2.680E-03	2.717E-03	2.760E-03	2.785E-03	2.818E-03	2.865E-03	3.012E-03
-5.34	1.421E-03	1.516E-03	1.595E-03	1.657E-03	1.708E-03	1.748E-03	1.781E-03	1.810E-03	1.836E-03	1.857E-03	1.852E-03	1.878E-03	1.891E-03	1.917E-03	1.930E-03	1.948E-03	1.971E-03	1.981E-03	1.996E-03	2.021E-03	1.741E-03
-5.32	2.362E-03	2.489E-03	2.590E-03	2.666E-03	2.724E-03	2.768E-03	2.803E-03	2.833E-03	2.860E-03	2.882E-03	2.886E-03	2.915E-03	2.925E-03	2.957E-03	2.968E-03	2.991E-03	3.022E-03	3.035E-03	3.059E-03	3.098E-03	3.045E-03
-5.3	2.936E-03	3.104E-03	3.240E-03	3.345E-03	3.428E-03	3.494E-03	3.549E-03	3.597E-03	3.640E-03	3.678E-03	3.725E-03	3.771E-03	3.793E-03	3.842E-03	3.865E-03	3.901E-03	3.950E-03	3.975E-03	4.012E-03	4.071E-03	4.302E-03
-5.20	2.020E-03	2.798E-03	2.942E-03	3.057E-03	3.150E-03	3.229E-03	3.295E-03	3.353E-03	3.400E-03	3.492E-03	3.524E-03	3.578E-03	3.009E-03	3.00000-03	3.095E-03	3.737E-03	3.790E-03	3.820E-03	3.80 IE-03	3.924E-03	4.247E-03
-5.20	1.023E-03	1.759E-03	1.077E-03	1.975E-03	2.000E-00	2.120E-03	2.100E-03	2.240E-03	2.209E-03	2.330E-03	2.300E-03	2.430E-03	2.403E-03	2.012E-00	2.009E-00	2.374E-03	2.010E-03	2.040E-03	2.072E-03	2.717E-03	2.090E-03
-5.24	1.134E-03	1.207E-03	1.207E-03	1.315E-03	1.303E-03	1.384E-03	1.408E-03	1.431E-03	1.451E-03	1.431E-03	1.457E-03	1.4//E-03	1.487E-03	1.507E-03	1.51/E-03	1.530E-03	1.34/E-03	1.003E-03	1.503E-03	1.560E-03	1.310E-03
-5.22	2.090E-03	2.102E-03	2.240E-03	2.294E-03	2.320E-03	2.330E-03	2.300E-03	2.302E-03	2.390E-03	2.400E-03	2.400E-03	2.423E-03	2.427 E-03	2.440E-03	2.430E-03	2.402E-03	2.403E-03	2.490E-03	2.503E-03	2.031E-03	2.479E-03
-5.18	2.700E-03	2.913E-03	2 020E 02	3.090E-03	3.140E-03	3.194E-03	3.232E-03	3.207E-03	3.290E-03	3.304E-03	3.300E-03	3.404E-03	3.419E-03	3.430E-03	3.473E-03	3.504E-03	3.544E-03	3.003E-03	3.3932-03	3.044E-03	3.000E-03
-5.16	2.073E-03	2.013E-03	2.929E-03	3.021E-03	3.090E-03	3.139E-03	3.211E-03	3.2000-03	3.30ZE-03	3.379E-03	3.404E-03	3.45ZE-03	3.477E-03	3.527E-03	3.000E-00	3.390E-03	3.039E-03	3.003E-03	3.702E-03	3.759E-03	4.079E-03
-5.10	1.027E-03	0.5905.04	2.039E-03	2.120E-03	2.109E-03	2.247E-03	2.297E-03	2.343E-03	2.304E-03	2.430E-03	2.472E-03	2.010E-00	2.042E-00	2.000E-00	2.012E-03	2.040E-03	2.000E-03	2.709E-03	2.739E-03	2.972E-03	2.997E-03
-5.14	0.931E-04	9.000E-04	1.015E-03	1.003E-03	1.104E-03	1.1392-03	1.109E-03	1.1972-03	1.2212-03	1.2212-03	1.243E-03	1.200E-03	1.203E-03	1.300E-03	1.320E-03	1.330E-03	1.300E-03	1.303E-03	1.3/0E-03	1.220E-03	1.234E-03
-5.12	2 222 02	2 /11E-02	2 4965-02	2.544E-02	2 501 5-02	2 620 - 02	2 6625-02	2 602E-02	2 721 - 02	2 7695-02	2 701E-02	2 9255-02	2 9/15-02	2 9775-02	2 9055-02	2 0225-02	2.060E-02	2 0905-02	2.0095.02	2 2295-02	2 250E-02
-5.08	2.5220-03	2.4110-03	2 7/05-03	2.3446-03	2.3912-03	2.0292-03	2.0020-03	3 00/ = 03	3 0/3 - 03	3 107 - 03	3 1/1 = 03	3 1875 03	3 212 02	3 262 02	3 200=-03	3 328 03	2.3000-03	3 4055 03	3 1125-03	3 70/ = 03	3 8195 03
-5.06	2.0312-03	2.0000-00	2 190 -03	2 240 -03	2 3005-03	2.315-03	2 387 - 03	2 426E-02	2 4635-03	2 517E-02	2 553 - 03	2 597 -03	2 625E-02	2 671E-02	2 690E-03	2 735E-02	2 780 -02	2 8085-03	2 842E-03	3.136E-03	3 1635-03
-5.04	9.847F-0/	1 030E-03	1 072E-03	1 109E-03	1 144F-03	1 176E-03	1 207E-03	1 236E-03	1 264F-03	1 282E-03	1.309E-03	1.340E-03	1.363E-03	1.396E-03	1 417F-03	1 443E-03	1 470F-03	1 488E-03	1.509E-03	1 559E-03	1 581E-03
-5.02	5.967E-04	6.364F-04	6 737E-04	7 071E-04	7.365E-04	7 612E-04	7 837E-04	8 045E-04	8 241F-04	8 284F-04	8 439F-04	8 604F-04	8 706F-04	8 863E-04	8 948F-04	9.055E-04	9 171E-04	9 220E-04	9 279E-04	7 404F-04	7.365E-04
-5	1.627F-03	1.693E-03	1.751E-03	1.800E-03	1.841E-03	1.876E-03	1.907E-03	1.936E-03	1.964E-03	2.011F-03	2.033E-03	2.063E-03	2.079E-03	2.110F-03	2.126F-03	2.150E-03	2.180F-03	2.196E-03	2.218E-03	2.397F-03	2.405E-03
															00				00		

 Θ ếơn x (m)

7.3.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh

Είναι γνωστό ότι η κατανομή Rayleigh περιγράφει με ακρίβεια το λαμβανόμενο σήμα σε περιβάλλον με διαλείψεις και ζεύξη μη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Στο σημείο αυτό θα επαληθεύσουμε ότι στο πείραμα που πραγματοποιήσαμε και στο οποίο κινείται το σύστημα χρήστης-κινητό, οι τιμές της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας ακολουθούν κατανομή Rayleigh.

Διατηρώντας την απόσταση d σταθερή, θεωρούμε ότι το σύστημα χρήστης-κινητό κινείται από το σημείο x=-6 έως το x=-5. Υπάρχουν 21 διαφορετικές αποστάσεις d μεταξύ της κεραίας πομπού και του βιολογικού σκεδαστή. Σε κάθε μία από αυτές αντιστοιχούν 51 τιμές x, που εκφράζουν 51 διαφορετικές αποστάσεις του δέκτη από τον πομπό. Θα εφαρμόσουμε αρχικά το κριτήριο X^2 για το σύνολο τιμών περιβάλλουσας που προκύπτει στην τυχαία θέση d=2 cm ώστε να εξετάσουμε αν οι τιμές ακολουθούν κατανομή Rayleigh. Με τον ίδιο τρόπο θα συνεχίσουμε και στις υπόλοιπες θέσεις. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της κανονικοποιημένης έντασης της περιβάλλουσας του σήματος για όλες τις θέσεις x και για σταθερό d=2 cm.

	1 2 1 1	51 - 1- 1-	•		
Θέση <i>x</i> (m)	Κανονικοποιημένη	Θέση <i>x</i> (m)	Κανονικοποιημένη		
• 、	περιβάλλουσα	• • • /	περιβαλλουσα		
-6	2.803E-03	-5.48	3.634E-03		
-5,98	2.494E-03	-5.46	2.547E-03		
-5,96	1.643E-03	-5.44	1.742E-03		
-5,94	1.566E-03	-5.42	2.533E-03		
-5,92	2.554E-03	-5.4	3.274E-03		
-5,9	3.156E-03	-5.38	3.357E-03		
-5,88	2.842E-03	-5.36	2.248E-03		
-5,86	1.817E-03	-5.34	1.748E-03		
-5,84	1.431E-03	-5.32	2.768E-03		
-5,82	2.549E-03	-5.3	3.494E-03		
-5,8	3.308E-03	-5.28	3.229E-03		
-5,78	3.072E-03	-5.26	2.128E-03		
-5,76	1.977E-03	-5.24	1.384E-03		
-5,74	1.366E-03	-5.22	2.350E-03		
-5,72	2.562E-03	-5.2	3.194E-03		
-5,7	3.447E-03	-5.18	3.159E-03		
-5,68	3.286E-03	-5.16	2.247E-03		
-5,66	2.217E-03	-5.14	1.139E-03		
-5,64	1.727E-03	-5.12	1.648E-03		
-5,62	2.938E-03	-5.1	2.629E-03		
-5,6	3.873E-03	-5.08	2.919E-03		
-5,58	3.718E-03	-5.06	2.345E-03		
-5,56	2.610E-03	-5.04	1.176E-03		
-5,54	1.915E-03	-5.02	7.612E-04		
-5,52	2.912E-03	-5	1.876E-03		
-5,5	3.810E-03				

Πίνακας (7.6) : Tı	μές πε	ριβάλλ	ουσας για	ι δεδομένη	απόσταση	<i>d</i> =2 cm
J (

Σύμφωνα με τον πίνακα (7.6) έχουμε ένα δείγμα με n=51 τιμές, οι οποίες ενδεχομένως να ακολουθούν κατανομή Rayleigh με τη γνωστή σ.π.π. :

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r \ge 0$$
(7.8)

όπου σ^2 η τυπική απόκλιση της κατανομής που είναι και η μοναδική της παράμετρος. Γνωστή είναι και η μέση τιμή της κατανομής :

$$E[x] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \tag{7.9}$$

Η παράμετρος σ της κατανομής Rayleigh υπολογίζεται με τη μέθοδο των ροπών. Εξισώνεται η μέση τιμή του δείγματος μ , που είναι το άθροισμα των 51 τιμών διαιρεμένο δια 51, με τη μέση τιμή της κατανομής και γίνεται επίλυση ως προς σ που δίνει τη βέλτιστη τιμή της διασποράς. Επομένως είναι :

$$E[x] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma = \mu \Longrightarrow \sigma = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\mu$$
(7.10)

Συγκεκριμένα στο υπό εξέταση δείγμα προκύπτει :

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{51} r_j}{51} = 2.4926 \cdot 10^{-3} \Longrightarrow \sigma = 1.9893 \cdot 10^{-3}$$

Το εύρος των 51 μετρήσεων χωρίζεται σε k=4 υποδιαστήματα μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής του δείγματος. Στη συνέχεια υπολογίζουμε σε κάθε διάστημα τις πειραματικές και τις θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης των τιμών. Οι μεν πειραματικές υπολογίζονται απευθείας, οι δε αναμενόμενες προκύπτουν από την εκάστοτε ολοκλήρωση στο i υποδιάστημα :

$$E_i = 51 \cdot \int_i p_R(r) dr \tag{7.11}$$

με παράμετρο σ αυτή που προσδιορίστηκε παραπάνω. Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του συγκεκριμένου δείγματος είναι :

$$r_{\min} = 7.6121 \cdot 10^{-4}$$

 $r_{\max} = 3.8731 \cdot 10^{-3}$

Για λόγους ευκολίας όλοι οι σχετικοί μαθηματικοί υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα MATLAB. Συγκεντρώνουμε τους υπολογισμούς για το συγκεκριμένο δείγμα στον ακόλουθο πίνακα :

Διάστημα <i>i</i>	Παρατηρούμενες μετρήσεις Ο _i	Αναμενόμενες μετρήσεις <i>Ε</i> i	$X^{2} = \sum_{i=1}^{4} \frac{(O_{i} - E_{i})^{2}}{E} = 5.0808$
1	6	7.4787	$\sum_{i=1}^{n} E_i$
2	14	16.4757	
3	17	14.8064	$X_{2,a}^2 = 5.991$
4	14	8.2058	

Πίνακας (7.7) : Αναλυτικός έλεγχος X^2 για διαλείψεις Rayleigh

Άρα, ισχύει $X^2 \prec X^2_{k-2,a}$ με επίπεδο σημαντικότητας α=0.10 και η υπόθεση ότι οι τιμές της έντασης περιβάλλουσας για d=2 cm ακολουθούν κατανομή Rayleigh είναι αποδεκτή. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 4-1-1=2 επειδή μια παράμετρος προέκυψε από το πειραματικό δείγμα.

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο δουλεύουμε για τις υπόλοιπες 20 τιμές d από 1 έως 5 cm για να εξάγουμε τα αντίστοιχα κριτήρια X^2 . Τα συνολικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα (7.8).

Απόσταση <i>d</i> (cm)	X^2 test	Όριο αποδοχής
1	3.6244	
1.2	4.5951	
1.4	3.9641	
1.6	5.3254	
1.8	4.5367	
2	5.0808	
2.2	5.7275	
2.4	5.9389	
2.6	4.1242	
2.8	4.8197	
3	3.7993	5.991
3.2	2.8748	
3.4	2.7773	
3.6	3.6752	
3.8	4.5411	
4	4.4301	
4.2	4.3193	
4.4	4.2266	
4.6	4.1344	
4.8	8.6449	
5	6.1577	

Πίνακας (7.8) : Αποτελέσματα ελέγχων X^2

Παρατηρούμε ότι σχεδόν σε όλες οι περιπτώσεις (19 από τις 21, ποσοστό άνω του 90%) ισχύει η υπόθεση που κάνουμε ότι ακολουθείται Rayleigh αφού $X^2 \prec X_{k-2,a}^2 = 5.991$ και μάλιστα ο μέσος όρος των κριτηρίων X^2 είναι αρκετά

ικανοποιητικός :
$$\frac{\sum_{1}^{21} X^2}{21} = 4.6342$$
.

Στη συνέχεια στο σχήμα (7.8) παρουσιάζονται η θεωρητική και η πειραματική (προκύπτει από τις προσομοιώσεις) αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (CDF). Επιλέγονται ενδεικτικά οι αποστάσεις 1 cm, 2.6 cm και 5 cm μεταξύ κεφαλιού και κεραίας δέκτη. Η σύγκριση αυτή δείχνει φανερά ότι οι δύο καμπύλες συγκλίνουν ικανοποιητικά. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο, καθώς πέρα από τις συνθήκες εσωτερικού χώρου και την παρουσία του βιολογικού σκεδαστή, πρόκειται για μια ασύρματη ζεύξη μη οπτικής επαφής (NLOS).



Σχήμα (7.8α) : Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητούκεφαλιού 1 cm



Σχήμα (7.8β) : Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητούκεφαλιού 2.6 cm



Σχήμα (7.8γ) : Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητούκεφαλιού 5 cm

Στην τελευταία γραφική παράσταση παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση, αφού σε d=5 cm προέκυψε $X_{test}^2 = 6.1577$ που είναι λίγο μεγαλύτερο από το κρίσιμο όριο.

7.3.3 Εξάρτηση λαμβανόμενου σήματος από την απόσταση d

Παραθέτουμε τα διαγράμματα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας σε σχέση με την απόσταση *d* του πομπού από τον βιολογικό σκεδαστή.



Σχήμα (7.9α) : Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-6 έως x=-5.82m



Σχήμα (7.9β) : Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.80 έως x=-5.62m



Σχήμα (7.9γ) : Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του *d* για x=-5.60 έως x=-5.42m



Σχήμα (7.9δ) : Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του *d* για x=-5.40 έως x=-5.22m



Σχήμα (7.9ε) : Διάγραμμα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας συναρτήσει του d για x=-5.20 έως x=-5m

Από τα διαγράμματα αυτά είναι φανερό πως το λαμβανόμενο σήμα που μετράται στο δέκτη αυξάνει καθώς ο χρήστης απομακρύνει από το κεφάλι του το κινητό. Το γεγονός αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το ότι ο βιολογικός σκεδαστής 'εμποδίζει' λιγότερο την κεραία του κινητού καθώς απομακρύνεται από αυτό. Γενικά μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ότι η σχέση που συνδέει την περιβάλλουσα με την απόσταση είναι γραμμική στις περισσότερες περιπτώσεις. Αυτό γίνεται αμέσως αντιληπτό, αν επικεντρωθούμε σε μικρότερα διαστήματα μεταβολής της απόστασης d, για παράδειγμα σε εύρος 1 cm μόνο. Ωστόσο, η κλίση που παρουσιάζουν οι καμπύλες είναι πολύ μικρή, γεγονός που οφείλεται στο μικρό εύρος τιμών του κανονικοποιημένου λαμβανόμενου σήματος. Παρατηρούμε ότι για μεταβολή του d από 1 ως 5 cm η περιβάλλουσα αυξάνεται κατά μέσο όρο μόνο κατά ένα παράγοντα 2 και σε πολλές περιπτώσεις ακόμα λιγότερο.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο το πρόγραμμα προσομοίωσης SuperNEC λαμβάνει υπόψη του τους εξής μηχανισμούς : ανάκλαση, περίθλαση, σκέδαση και συνδυασμούς αυτών. Επίσης, το πρόγραμμα προφανώς περιλαμβάνει όλες τις απώλειες διαδρομής καθώς και την επίδραση της τοπολογίας στο διάγραμμα ακτινοβολίας των κεραιών. Συνεπώς, στην περίπτωση της διάταξης που έχουμε προσομοιώσει λαμβάνονται όλοι οι παραπάνω παράγοντες υπόψη. Ωστόσο, ο βιολογικός σκεδαστής δεν προσομοιώνει ανθρώπινο ομοίωμα ολοκληρωμένα αφού το SuperNEC δε λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της απορρόφησης. Συγκεκριμένα οι διηλεκτρικές πλάκες (UTD plates) του SuperNEC δεν εισάγουν παράγοντα απορρόφησης, με αποτέλεσμα οι μετρήσεις που πήραμε να έχουν σημαντικό σφάλμα. Άλλωστε, μελέτες ερευνητών έχουν δείξει ότι ο παράγοντας της απορρόφησης που εισάγει η παρουσία ανθρώπου δίπλα σε πομπό είναι σημαντική και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ακτινοβολούμενη ισχύ προς το δέκτη. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια εισάγουμε τον παράγοντα απορρόφησης στις μετρήσεις μας, ώστε να περιοριστεί το σφάλμα.

7.3.4 Παράγοντας απορρόφησης παρουσία ανθρώπου

Είναι γνωστό ότι ένα συντονισμένο δίπολο σε περιβάλλον ελεύθερου χώρου εκπέμπει μέγιστη δυνατή ισχύ που ιδανικά είναι ίση με την ισχύ τροφοδοσίας P_{in} . Η παρουσία του βιολογικού σκεδαστή δίπλα στη διπολική κεραία περιορίζει την ισχύ που τελικά εκπέμπεται προς το δέκτη, επειδή ένα ποσοστό της απορροφάται από τον άνθρωπο. Δηλαδή, ενώ η κεραία τροφοδοτείται με ισχύ P_{in} , η ακτινοβολούμενη προς το δέκτη ισχύς είναι $P_{rad} < P_{in}$. Αυτός ο μηχανισμός εκφράζεται από την αποδοτικότητα δ που είναι ο λόγος της ακτινοβολούμενης ισχύος προς την ισχύ εισόδου :

$$\delta = \frac{P_{rad}}{P_{in}} \tag{7.12}$$

Η μελέτη της συμπεριφοράς του μεγέθους της αποδοτικότητας έγινε με βάση δημοσιεύσεις ερευνητών που έχουν μελετήσει την επίδραση της παρουσίας του ανθρώπου δίπλα σε κεραία-πομπό. Ένα μέγεθος που αποδείχτηκε ιδιαίτερα χρήσιμο και δημοφιλές στις διάφορες μελέτες του φαινομένου είναι ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης (SAR, specific absorption rate). Αυτός ορίζεται ως εξής :

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho} \tag{7.13}$$

όπου

 σ : η αγωγιμότητα του υλικού

Ε : η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του υλικού

 ρ : η πυκνότητα του υλικού

Κάποια κοινά συμπεράσματα από τις ποικίλες πηγές πάνω στο φαινόμενο της εκπομπής σήματος δίπλα σε άνθρωπο αξίζουν να αναφερθούν :

- Η αποδοτικότητα (radiation efficiency) δ είναι συνήθως κατά προσέγγιση γραμμικά ανάλογη με την απόσταση d, ειδικά σε αποστάσεις μέχρι 5 cm.
- Ο ειδικός ρυθμός απορρόφησης SAR μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση d (αντίστροφη σχέση).
- Ισοδύναμα ο SAR και η ισχύς που απορροφάται από το χρήστη έχουν όμοια συμπεριφορά σαν μεγέθη.

- Η απορρόφηση ισχύος γίνεται κατά κύριο λόγο από το κεφάλι που βρίσκεται πλάι της κεραίας (85% περίπου) και μόνο ένα μικρό ποσοστό απορροφάται από το υπόλοιπο σώμα (15%).
- Καθώς ανεβαίνουμε σε συχνότητες άνω των 900 MHz ο ρυθμός απορρόφησης τείνει σε μεγαλύτερες τιμές.

Ο H.R.Chuang [2] χρησιμοποιεί τη μέθοδο των συζευγμένων ολοκληρωτικών εξισώσεων (CIE, Coupled Integral Equations) σε συνδυασμό με τη μέθοδο των ροπών, για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας και της απορρόφησης ισχύος από το ανθρώπινο σώμα για την περίπτωση διπόλου που λειτουργεί στα 840 MHz. Από τους υπολογισμούς αυτούς προκύπτουν τα δεδομένα του πίνακα (7.9). Τα δεδομένα αυτά εξετάζουν την εξάρτηση της απορροφούμενης ισχύος από την ακριβή απόσταση *d* της κεραίας πομπού από το κεφάλι.

<i>d</i> (cm)	ακτινοβολούμενη ισχύς (watt)	απορροφούμενη ισχύς (watt)	Peak SAR (mW/g)	αποδοτικότητα δ
1	0.291	0.720	2.241	0.291
2	0.427	0.590	1.501	0.427
3	0.505	0.510	0.777	0.505
4	0.634	0.384	0.530	0.634
5	0.723	0.289	0.356	0.723
Ελεύθερος	4			4
χώρος	I	-	-	Ι

Πίνακας (7.9) : Υπολογισμοί ισχύος και αποδοτικότητας H.R.Chuang

Το συμπέρασμα από αυτόν τον πίνακα είναι ότι η αποδοτικότητα μπορεί να εκφραστεί από τη γραμμική σχέση $\delta = 0.11d + 0.19$ όπου d σε cm. Πράγματι, το αποτέλεσμα της παραδοχής μας είναι πολύ κοντά στο πείραμα :

<i>d</i> (cm)	αποδοτικότητα δ (Chuang)	δ=0.11 <i>d</i> +0.19	Σφάλμα %
1	0.291	0.3	3.09
2	0.427	0.41	3.98
3	0.505	0.52	2.97
4	0.634	0.63	0.63
5	0.723	0.74	2.35

Πίνακας (7.10) : Προσέγγιση της αποδοτικότητας δ

Στη συνέχεια, μας ενδιαφέρει η εξαγωγή μιας παρόμοιας σχέσης για την αποδοτικότητα στα 1800 MHz που είναι η συχνότητα της προσομοίωσής μας. Σύμφωνα με τον Ν.Kuster αλλά και πολλά πειράματα όπως αυτό του H.R.Chuang προκύπτει ότι το μέγεθος *peak SAR* είναι αντίστροφα ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης *d* μεταξύ κεραίας-πομπού και σκεδαστή.

Συγκεκριμένα, ένας σαφής προσδιορισμός του μεγέθους πραγματοποιείται από τον N.Kuster [3] και περιγράφεται από τη σχέση :

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} \frac{\mu\omega}{\sqrt{\sigma^2 + \varepsilon^2 \omega^2}} (1 + c_{corr} \gamma_{pw})^2 \frac{1}{4\pi^2} \frac{I^2}{d^2}$$
(7.14)

όπου

σ : η αγωγιμότητα του βιολογικού σκεδαστή

ε : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του βιολογικού σκεδαστή

μ : η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του βιολογικού σκεδαστή

ρ : η πυκνότητα του υλικού (βιολογικός ιστός)

ω : η κυκλική συχνότητα

Ι : το ρεύμα τροφοδοσίας της κεραίας

 γ_{pw} : ο συντελεστής ανάκλασης επίπεδου κύματος για το μαγνητικό πεδίο που ισούται με :

$$\gamma_{pw} = \frac{2\left|\sqrt{(\varepsilon - \sigma/i\omega)}\right|}{\left|\sqrt{(\varepsilon - \sigma/i\omega)} + \sqrt{\varepsilon_0}\right|} - 1$$
(7.15)

c_{corr} : ένας διορθωτικός συντελεστής που υπολογίζεται εμπειρικά :

$$c_{corr} = \begin{cases} 1 & \eta \alpha \, d \ge 0.08 \, \lambda / \gamma_{pw} \\ \sin(\frac{\pi}{2} \frac{\gamma_{pw}}{0.08} \frac{d}{\lambda}) & \eta \alpha \, d \prec 0.08 \, \lambda / \gamma_{pw} \end{cases}$$
(7.16)

Σκοπός είναι να καταλήξουμε σε μια σχέση που θα προσδιορίζει την αποδοτικότητα στη συχνότητα των 1800 MHz με βάση την ήδη υπάρχουσα σχέση στα 840 MHz του H.R.Chuang. Αναφέρθηκε προηγουμένως ότι η αποδοτικότητα δ είναι πρακτικά ανάλογη της απόστασης d, ενώ το μέγεθος peak SAR είναι αντιστρόφως ανάλογο του d^2 :

$$\frac{\delta \propto d}{\sqrt{SAR}} \propto d$$

Άρα, για τις δύο συχνότητες που μας ενδιαφέρουν ισχύει με σχετικά μικρό σφάλμα :

$$\delta_{1800} = \sqrt{\frac{\text{SAR}_{840}}{\text{SAR}_{1800}}} \cdot \delta_{840}$$
(7.17)

Ο λόγος των ειδικών ρυθμών απορρόφησης (*peak SAR*) στις δυο διαφορετικές συχνότητες υπολογίζεται από τη σχέση (7.14) για κάθε απόσταση *d* κεραίαςβιολογικού σκεδαστή. Τα μεγέθη που αλλάζουν με τη μεταβολή της συχνότητας φαίνονται στον πίνακα (7.11) :

	840 MHz	1800 MHz
ω (rad/s)	5.2779·10 ⁹	1.1310·10 ¹⁰
λ (m)	0.3571	0.16667
σ (S/m)	0.97	1.4
3	41.5	40

Πίνακας (7.11) : Μεταβολές λόγω συχνότητας

Σύμφωνα με αυτά τα μεγέθη προκύπτουν οι 21 λόγοι των ειδικών ρυθμών απορρόφησης, οι οποίοι παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα (7.12).

<i>d</i> (cm)	peak SAR ₈₄₀ / peak SAR ₁₈₀₀	(peak <i>SAR</i> ₈₄₀ / peak <i>SAR</i> ₁₈₀₀) ^{1/2}
1	0.438302	0.662044
1.2	0.434489	0.659158
1.4	0.439303	0.662799
1.6	0.452858	0.672947
1.8	0.475874	0.689836
2	0.503905	0.709863
2.2	0.530274	0.728199
2.4	0.554564	0.744691
2.6	0.576460	0.759250
2.8	0.595627	0.771769
3	0.611756	0.782149
3.2	0.624627	0.790333
3.4	0.634061	0.796279
3.6	0.639857	0.799911
3.8	0.641954	0.801221
4	0.641963	0.801226
4.2	0.641988	0.801241
4.4	0.641953	0.801220
4.6	0.641971	0.801231
4.8	0.642017	0.801260
5	0.642000	0.801249

Πίνακας (7.12) : Λόγοι των SAR σε κάθε απόσταση d

Σημειώνουμε ότι σε αυτούς τους υπολογισμούς είχαμε αμετάβλητα τα μεγέθη της σχετικής μαγνητικής διαπερατότητας και της πυκνότητας που αφορούν το βιολογικό σκεδαστή :

$$\mu = 1 \kappa \alpha i \rho = 1000 \text{kg/m}^3$$

Επίσης, για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα στις δυο συχνότητες υποθέσαμε ίδιο ρεύμα τροφοδοσίας (*I*=100mA).

Από τον πίνακα (7.12) παρατηρούμε αυτό που ήταν αναμενόμενο :

$$\frac{SAR_{840}}{SAR_{1800}} \prec 1 \quad \text{kat} \quad \sqrt{\frac{SAR_{840}}{SAR_{1800}}} \prec 1$$

δηλαδή ότι στην υψηλότερη συχνότητα το *peak SAR* και φυσικά η απορρόφηση είναι μεγαλύτερα για την ίδια ισχύ τροφοδοσίας. Είναι φανερό ότι η αποδοτικότητα στα 1800 MHz θα είναι χαμηλότερη.

Τελικά, αυτή η προσεγγιστική ανάλυση μας παρέχει έναν συντελεστή κατά τον οποίον μειώνεται η αποδοτικότητα δ, αφού ταυτόχρονα αυξάνεται η απορρόφηση. Η σχέση (7.17) σε συνδυασμό με την προσέγγιση του H.R.Chuang για το δ_{840} παρέχει τη νέα γραμμική εξάρτηση του δ από την απόσταση d στα 1800 MHz. Τα αποτελέσματα βρίσκονται στον πίνακα (7.13) :

<i>d</i> (cm)	δ ₈₄₀ =0.11 <i>d</i> +0.19 (Chuang)	(peak <i>SAR</i> ₈₄₀ / peak <i>SAR</i> ₁₈₀₀) ^{1/2}	δ_{1800}
1	0.3	0.662044	0.19861
1.2	0.322	0.659158	0.21225
1.4	0.344	0.662799	0.22800
1.6	0.366	0.672947	0.24630
1.8	0.388	0.689836	0.26766
2	0.41	0.709863	0.29104
2.2	0.432	0.728199	0.31458
2.4	0.454	0.744691	0.33809
2.6	0.476	0.759250	0.36140
2.8	0.498	0.771769	0.38434
3	0.52	0.782149	0.40672
3.2	0.542	0.790333	0.42836
3.4	0.564	0.796279	0.44910
3.6	0.586	0.799911	0.46875
3.8	0.608	0.801221	0.48714
4	0.63	0.801226	0.50477
4.2	0.652	0.801241	0.52241
4.4	0.674	0.801220	0.54002
4.6	0.696	0.801231	0.55766
4.8	0.718	0.801260	0.57530
5	0.74	0.801249	0.59292

Πίνακας (7.13) : Προσδιορισμός δ στα 1800 MHz

Επιβεβαιώνεται και πάλι ότι η αποδοτικότητα είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης *d*, αρκεί αυτή να κρατιέται σε χαμηλές τιμές μέχρι 5 cm. Πράγματι, για *d* από 1 έως 5 cm προκύπτει ότι και στη συχνότητα των 1800 MHz η αποδοτικότητα εκφράζεται με ελάχιστο σφάλμα από τη γραμμική σχέση :

$$\delta = 0.086d + 0.11037$$

7.3.5 Εισαγωγή της αποδοτικότητας στις μετρήσεις

Για την ολοκληρωμένη στατιστική μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πρέπει να γίνει κατάλληλη τροποποίησή τους ώστε να ληφθεί υπόψη η απορρόφηση που εισάγει η παρουσία του βιολογικού σκεδαστή. Υπενθυμίζουμε ότι το πρόγραμμα προσομοίωσης SuperNEC δεν παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής παραμέτρου απορρόφησης στα UTD plates. Η τροποποίηση αυτή πραγματοποιείται απλά με την αξιοποίηση της αποδοτικότητας δ που προσδιορίσαμε για συχνότητα 1800 MHz στον πίνακα (7.13). Συγκεκριμένα, σε κάθε απόσταση d οι τιμές της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας σήματος λήψης που φαίνονται στον πίνακα (7.5) πολλαπλασιάζονται με την αντίστοιχη αποδοτικότητα δ₁₈₀₀. Οι τελικές τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα (7.14).

Πίνακας (7.14) : Κανονικοποιημένες τιμές περιβάλλουσας με απορρόφηση

	1		
Δποσταση		m	
111001001			

										Απ	οσταση α	(m)									
	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
-6	3.474E-04	4.296E-04	5.165E-04	6.087E-04	7.091E-04	8.158E-04	9.239E-04	1.033E-03	1.142E-03	1.251E-03	1.343E-03	1.456E-03	1.558E-03	1.670E-03	1.766E-03	1.867E-03	1.976E-03	2.074E-03	2.180E-03	2.301E-03	2.422E-03
-5.9	3.116E-04	3.844E-04	4.612E-04	5.429E-04	6.317E-04	7.257E-04	8.209E-04	9.169E-04	1.013E-03	1.110E-03	1.199E-03	1.298E-03	1.388E-03	1.486E-03	1.570E-03	1.658E-03	1.754E-03	1.840E-03	1.932E-03	2.037E-03	2.303E-03
-5.9	5 1.862E-04	2.354E-04	2.888E-04	3.466E-04	4.102E-04	4.783E-04	5.479E-04	6.186E-04	6.906E-04	7.629E-04	8.482E-04	9.244E-04	9.934E-04	1.067E-03	1.133E-03	1.201E-03	1.274E-03	1.341E-03	1.412E-03	1.492E-03	1.670E-03
-5.9	1.423E-04	1.964E-04	2.542E-04	3.160E-04	3.834E-04	4.558E-04	5.300E-04	6.054E-04	6.821E-04	7.593E-04	8.451E-04	9.267E-04	1.002E-03	1.082E-03	1.154E-03	1.229E-03	1.309E-03	1.382E-03	1.460E-03	1.548E-03	1.466E-03
-5.9	2.944E-04	3.728E-04	4.560E-04	5.446E-04	6.408E-04	7.433E-04	8.474E-04	9.526E-04	1.059E-03	1.165E-03	1.258E-03	1.369E-03	1.470E-03	1.579E-03	1.675E-03	1.776E-03	1.883E-03	1.981E-03	2.087E-03	2.206E-03	2.181E-03
-5.9	4.016E-04	4.919E-04	5.876E-04	6.896E-04	8.006E-04	9.185E-04	1.038E-03	1.158E-03	1.279E-03	1.400E-03	1.505E-03	1.631E-03	1.744E-03	1.868E-03	1.975E-03	2.087E-03	2.209E-03	2.319E-03	2.437E-03	2.572E-03	2.737E-03
-5.8	3.826E-04	4.581E-04	5.395E-04	6.273E-04	7.238E-04	8.270E-04	9.319E-04	1.038E-03	1.146E-03	1.253E-03	1.357E-03	1.469E-03	1.570E-03	1.680E-03	1.776E-03	1.877E-03	1.986E-03	2.084E-03	2.190E-03	2.310E-03	2.588E-03
-5.8	2.376E-04	2.815E-04	3.327E-04	3.908E-04	4.569E-04	5.288E-04	6.030E-04	6.796E-04	7.582E-04	8.376E-04	9.312E-04	1.016E-03	1.093E-03	1.177E-03	1.251E-03	1.329E-03	1.412E-03	1.488E-03	1.570E-03	1.662E-03	1.856E-03
-5.8	1.077E-04	1.590E-04	2.156E-04	2.770E-04	3.442E-04	4.165E-04	4.910E-04	5.672E-04	6.451E-04	7.236E-04	8.075E-04	8.907E-04	9.682E-04	1.051E-03	1.126E-03	1.204E-03	1.286E-03	1.362E-03	1.444E-03	1.534E-03	1.458E-03
-5.8	2.933E-04	3.718E-04	4.550E-04	5.434E-04	6.394E-04	7.419E-04	8.460E-04	9.514E-04	1.058E-03	1.165E-03	1.256E-03	1.367E-03	1.469E-03	1.579E-03	1.676E-03	1.777E-03	1.885E-03	1.984E-03	2.091E-03	2.211E-03	2.198E-03
-5.8	4.392E-04	5.300E-04	6.267E-04	7.296E-04	8.423E-04	9.627E-04	1.085E-03	1.208E-03	1.332E-03	1.456E-03	1.567E-03	1.695E-03	1.812E-03	1.939E-03	2.049E-03	2.165E-03	2.289E-03	2.402E-03	2.524E-03	2.663E-03	2.845E-03
-5.7	4.344E-04	5.113E-04	5.947E-04	6.853E-04	7.859E-04	8.942E-04	1.004E-03	1.116E-03	1.229E-03	1.342E-03	1.457E-03	1.576E-03	1.683E-03	1.798E-03	1.899E-03	2.006E-03	2.121E-03	2.224E-03	2.337E-03	2.464E-03	2.750E-03
-5.7	2.752E-04	3.195E-04	3.717E-04	4.314E-04	5.001E-04	5.754E-04	6.532E-04	7.337E-04	8.162E-04	8.998E-04	9.991E-04	1.088E-03	1.170E-03	1.259E-03	1.337E-03	1.419E-03	1.507E-03	1.588E-03	1.675E-03	1.772E-03	1.967E-03
-5.7	9.907E-05	1.480E-04	2.026E-04	2.621E-04	3.273E-04	3.976E-04	4.702E-04	5.444E-04	6.202E-04	6.971E-04	7.749E-04	8.559E-04	9.313E-04	1.013E-03	1.085E-03	1.161E-03	1.242E-03	1.316E-03	1.395E-03	1.483E-03	1.403E-03
-5.7	2 3.107E-04	3.870E-04	4.676E-04	5.532E-04	6.462E-04	7.455E-04	8.464E-04	9.481E-04	1.051E-03	1.154E-03	1.240E-03	1.346E-03	1.443E-03	1.548E-03	1.640E-03	1.736E-03	1.839E-03	1.932E-03	2.033E-03	2.147E-03	2.145E-03
-5.7	4.772E-04	5.690E-04	6.661E-04	7.696E-04	8.826E-04	1.003E-03	1.125E-03	1.247E-03	1.371E-03	1.493E-03	1.606E-03	1.732E-03	1.846E-03	1.970E-03	2.077E-03	2.189E-03	2.311E-03	2.420E-03	2.537E-03	2.672E-03	2.869E-03
-5.6	4.743E-04	5.566E-04	6.448E-04	7.398E-04	8.444E-04	9.563E-04	1.069E-03	1.183E-03	1.298E-03	1.412E-03	1.532E-03	1.651E-03	1.757E-03	1.874E-03	1.974E-03	2.079E-03	2.193E-03	2.295E-03	2.405E-03	2.531E-03	2.819E-03
-5.6	3.084E-04	3.633E-04	4.240E-04	4.907E-04	5.649E-04	6.453E-04	7.268E-04	8.098E-04	8.941E-04	9.788E-04	1.079E-03	1.168E-03	1.249E-03	1.337E-03	1.414E-03	1.494E-03	1.580E-03	1.658E-03	1.742E-03	1.838E-03	2.011E-03
-5.6	1.979E-04	2.501E-04	3.062E-04	3.664E-04	4.321E-04	5.027E-04	5.745E-04	6.476E-04	7.214E-04	7.955E-04	8.646E-04	9.419E-04	1.013E-03	1.090E-03	1.157E-03	1.227E-03	1.303E-03	1.371E-03	1.444E-03	1.526E-03	1.430E-03
-5.6	4.175E-04	4.947E-04	5.757E-04	6.617E-04	7.555E-04	8.552E-04	9.558E-04	1.057E-03	1.159E-03	1.259E-03	1.343E-03	1.447E-03	1.539E-03	1.641E-03	1.728E-03	1.820E-03	1.918E-03	2.007E-03	2.102E-03	2.212E-03	2.223E-03
-5.6	5.898E-04	6.837E-04	7.830E-04	8.885E-04	1.004E-03	1.127E-03	1.250E-03	1.374E-03	1.498E-03	1.621E-03	1.739E-03	1.865E-03	1.977E-03	2.098E-03	2.203E-03	2.313E-03	2.432E-03	2.539E-03	2.654E-03	2.787E-03	2.998E-03
-5.5	5.826E-04	6.688E-04	7.604E-04	8.586E-04	9.667E-04	1.082E-03	1.198E-03	1.314E-03	1.430E-03	1.545E-03	1.670E-03	1.790E-03	1.896E-03	2.013E-03	2.112E-03	2.216E-03	2.330E-03	2.431E-03	2.540E-03	2.667E-03	2.952E-03
-5.5	4.074E-04	4.666E-04	5.303E-04	5.996E-04	6.766E-04	7.596E-04	8.431E-04	9.276E-04	1.013E-03	1.098E-03	1.197E-03	1.287E-03	1.367E-03	1.455E-03	1.530E-03	1.609E-03	1.694E-03	1.770E-03	1.853E-03	1.948E-03	2.108E-03
-5.5	2.663E-04	3.151E-04	3.680E-04	4.255E-04	4.891E-04	5.574E-04	6.270E-04	6.976E-04	7.691E-04	8.404E-04	9.040E-04	9.784E-04	1.046E-03	1.119E-03	1.183E-03	1.250E-03	1.322E-03	1.386E-03	1.456E-03	1.534E-03	1.436E-03
-5.5	4.311E-04	5.033E-04	5.800E-04	6.619E-04	7.518E-04	8.475E-04	9.440E-04	1.041E-03	1.139E-03	1.235E-03	1.317E-03	1.416E-03	1.505E-03	1.602E-03	1.686E-03	1.773E-03	1.868E-03	1.953E-03	2.045E-03	2.150E-03	2.165E-03
-5.5	5.926E-04	6.820E-04	7.770E-04	8.786E-04	9.899E-04	1.109E-03	1.228E-03	1.348E-03	1.468E-03	1.587E-03	1.704E-03	1.826E-03	1.935E-03	2.055E-03	2.157E-03	2.264E-03	2.380E-03	2.484E-03	2.597E-03	2.727E-03	2.942E-03
-5.4	5.783E-04	6.606E-04	7.482E-04	8.423E-04	9.464E-04	1.058E-03	1.169E-03	1.282E-03	1.395E-03	1.507E-03	1.627E-03	1.743E-03	1.847E-03	1.961E-03	2.058E-03	2.160E-03	2.271E-03	2.370E-03	2.478E-03	2.601E-03	2.883E-03
-5.4	4.044E-04	4.607E-04	5.217E-04	5.878E-04	6.616E-04	7.413E-04	8.216E-04	9.031E-04	9.852E-04	1.067E-03	1.159E-03	1.245E-03	1.322E-03	1.407E-03	1.479E-03	1.555E-03	1.638E-03	1.711E-03	1.790E-03	1.881E-03	2.039E-03
-5.4	2.501E-04	2.924E-04	3.387E-04	3.895E-04	4.459E-04	5.069E-04	5.691E-04	6.322E-04	6.962E-04	7.603E-04	8.184E-04	8.851E-04	9.453E-04	1.010E-03	1.068E-03	1.127E-03	1.191E-03	1.249E-03	1.310E-03	1.380E-03	1.277E-03
-5.4	2 3.705E-04	4.330E-04	5.003E-04	5.725E-04	6.521E-04	7.371E-04	8.230E-04	9.100E-04	9.974E-04	1.084E-03	1.160E-03	1.249E-03	1.329E-03	1.417E-03	1.493E-03	1.572E-03	1.658E-03	1.735E-03	1.818E-03	1.913E-03	1.924E-03
-5.4	4.931E-04	5.716E-04	6.558E-04	7.464E-04	8.462E-04	9.529E-04	1.060E-03	1.169E-03	1.279E-03	1.388E-03	1.497E-03	1.609E-03	1.710E-03	1.820E-03	1.915E-03	2.015E-03	2.123E-03	2.220E-03	2.324E-03	2.445E-03	2.655E-03
-5.3	5.304E-04	6.081E-04	6.904E-04	7.780E-04	8.744E-04	9.771E-04	1.080E-03	1.184E-03	1.288E-03	1.390E-03	1.503E-03	1.609E-03	1.703E-03	1.806E-03	1.894E-03	1.986E-03	2.086E-03	2.175E-03	2.272E-03	2.383E-03	2.651E-03
-5.3	3.398E-04	3.943E-04	4.521E-04	5.139E-04	5.819E-04	6.543E-04	7.272E-04	8.004E-04	8.738E-04	9.467E-04	1.026E-03	1.102E-03	1.169E-03	1.243E-03	1.306E-03	1.371E-03	1.442E-03	1.504E-03	1.571E-03	1.648E-03	1.786E-03
-5.3	2.823E-04	3.218E-04	3.637E-04	4.082E-04	4.571E-04	5.087E-04	5.604E-04	6.121E-04	6.635E-04	7.139E-04	7.534E-04	8.045E-04	8.492E-04	8.986E-04	9.401E-04	9.831E-04	1.030E-03	1.070E-03	1.113E-03	1.163E-03	1.032E-03
-5.3	2 4.692E-04	5.283E-04	5.906E-04	6.567E-04	7.290E-04	8.057E-04	8.817E-04	9.579E-04	1.034E-03	1.108E-03	1.174E-03	1.249E-03	1.313E-03	1.386E-03	1.446E-03	1.510E-03	1.579E-03	1.639E-03	1.706E-03	1.783E-03	1.806E-03
-5.3	5.831E-04	6.588E-04	7.387E-04	8.239E-04	9.175E-04	1.017E-03	1.116E-03	1.216E-03	1.316E-03	1.414E-03	1.515E-03	1.615E-03	1.703E-03	1.801E-03	1.883E-03	1.969E-03	2.063E-03	2.146E-03	2.237E-03	2.342E-03	2.551E-03
-5.2	5.216E-04	5.939E-04	6.707E-04	7.528E-04	8.432E-04	9.397E-04	1.036E-03	1.134E-03	1.231E-03	1.342E-03	1.433E-03	1.533E-03	1.621E-03	1.718E-03	1.800E-03	1.886E-03	1.980E-03	2.063E-03	2.153E-03	2.257E-03	2.518E-03
-5.2	3.223E-04	3.733E-04	4.279E-04	4.863E-04	5.507E-04	6.193E-04	6.882E-04	7.575E-04	8.271E-04	9.031E-04	9.711E-04	1.043E-03	1.107E-03	1.177E-03	1.237E-03	1.299E-03	1.367E-03	1.426E-03	1.490E-03	1.563E-03	1.714E-03
-5.2	2.252E-04	2.561E-04	2.889E-04	3.239E-04	3.622E-04	4.027E-04	4.431E-04	4.840E-04	5.244E-04	5.500E-04	5.926E-04	6.328E-04	6.679E-04	7.066E-04	7.390E-04	7.722E-04	8.081E-04	8.389E-04	8.718E-04	9.092E-04	7.801E-04
-5.2	2 4.162E-04	4.631E-04	5.125E-04	5.651E-04	6.227E-04	6.838E-04	7.444E-04	8.054E-04	8.659E-04	9.223E-04	9.794E-04	1.039E-03	1.090E-03	1.146E-03	1.193E-03	1.243E-03	1.297E-03	1.345E-03	1.396E-03	1.456E-03	1.470E-03
-5.2	5.532E-04	6.182E-04	6.871E-04	7.610E-04	8.427E-04	9.297E-04	1.017E-03	1.104E-03	1.192E-03	1.289E-03	1.370E-03	1.458E-03	1.535E-03	1.621E-03	1.693E-03	1.769E-03	1.851E-03	1.924E-03	2.004E-03	2.096E-03	2.293E-03
-5.1	5.309E-04	5.970E-04	6.678E-04	7.441E-04	8.288E-04	9.193E-04	1.010E-03	1.102E-03	1.193E-03	1.299E-03	1.385E-03	1.479E-03	1.561E-03	1.653E-03	1.731E-03	1.812E-03	1.901E-03	1.979E-03	2.065E-03	2.163E-03	2.419E-03
-5.1	3.630E-04	4.121E-04	4.649E-04	5.221E-04	5.858E-04	6.539E-04	7.227E-04	7.920E-04	8.616E-04	9.372E-04	1.005E-03	1.077E-03	1.142E-03	1.212E-03	1.272E-03	1.335E-03	1.403E-03	1.463E-03	1.528E-03	1.710E-03	1.777E-03
-5.1	1.774E-04	2.033E-04	2.314E-04	2.618E-04	2.956E-04	3.315E-04	3.678E-04	4.045E-04	4.412E-04	4.693E-04	5.055E-04	5.431E-04	5.763E-04	6.124E-04	6.429E-04	6.746E-04	7.080E-04	7.369E-04	7.674E-04	7.020E-04	7.317E-04
-5.1	2.922E-04	3.237E-04	3.580E-04	3.948E-04	4.360E-04	4.797E-04	5.233E-04	5.676E-04	6.117E-04	6.519E-04	6.937E-04	7.374E-04	7.753E-04	8.168E-04	8.517E-04	8.885E-04	9.284E-04	9.629E-04	1.000E-03	9.875E-04	1.017E-03
-5.1	4.612E-04	5.117E-04	5.667E-04	6.265E-04	6.934E-04	7.652E-04	8.373E-04	9.104E-04	9.835E-04	1.064E-03	1.135E-03	1.210E-03	1.276E-03	1.348E-03	1.410E-03	1.475E-03	1.546E-03	1.609E-03	1.678E-03	1.863E-03	1.927E-03
-5.0	5.066E-04	5.630E-04	6.247E-04	6.922E-04	7.679E-04	8.496E-04	9.321E-04	1.016E-03	1.100E-03	1.194E-03	1.278E-03	1.365E-03	1.443E-03	1.529E-03	1.602E-03	1.680E-03	1.764E-03	1.839E-03	1.920E-03	2.183E-03	2.264E-03
-5.0	4.047E-04	4.499E-04	4.994E-04	5.539E-04	6.157E-04	6.826E-04	7.509E-04	8.202E-04	8.900E-04	9.672E-04	1.038E-03	1.112E-03	1.179E-03	1.252E-03	1.315E-03	1.381E-03	1.452E-03	1.516E-03	1.586E-03	1.804E-03	1.875E-03
-5.0	1.956E-04	2.187E-04	2.443E-04	2.731E-04	3.061E-04	3.422E-04	3.797E-04	4.180E-04	4.568E-04	4.927E-04	5.322E-04	5.742E-04	6.122E-04	6.546E-04	6.904E-04	7.282E-04	7.681E-04	8.035E-04	8.415E-04	8.971E-04	9.372E-04
-5.0	2 1.185E-04	1.351E-04	1.536E-04	1.742E-04	1.971E-04	2.215E-04	2.465E-04	2.720E-04	2.978E-04	3.184E-04	3.432E-04	3.686E-04	3.910E-04	4.154E-04	4.359E-04	4.571E-04	4.791E-04	4.979E-04	5.174E-04	4.259E-04	4.367E-04
-5	3.231E-04	3.593E-04	3.993E-04	4.433E-04	4.927E-04	5.459E-04	5.998E-04	6.547E-04	7.099E-04	7.728E-04	8.270E-04	8.837E-04	9.338E-04	9.889E-04	1.036E-03	1.085E-03	1.139E-03	1.186E-03	1.237E-03	1.379E-03	1.426E-03

(m) (m)

Ακολουθούν τα νέα διαγράμματα μεταβολής της κανονικοποιημένης περιβάλλουσας με απορρόφηση σε σχέση με την απόσταση *d* του πομπού από τον βιολογικό σκεδαστή.



Σχήμα (7.10α) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-60 έως x=-5.82m



Σχήμα (7.10β) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.80 έως x=-5.62m



Σχήμα (7.10γ) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του dμε απορρόφηση για x=-5.6 έως x=-5.42m



Σχήμα (7.10δ) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.40 έως x=-5.22m



Σχήμα (7.10ε) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.20 έως x=-5m

Παρατηρούμε ότι οι νέες καμπύλες που εμπεριέχουν και τον παράγοντα απορρόφησης εξακολουθούν να αυξάνονται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει του d, ωστόσο η κλίση τους είναι αρκετά αυξημένη. Σε μικρές αποστάσεις d από το βιολογικό σκεδαστή η απορρόφηση είναι μεγάλη, ενώ η αποδοτικότητα μικρή με αποτέλεσμα η ακτινοβολούμενη ισχύς προς το δέκτη να μειώνεται και να περιορίζει το λαμβανόμενο σήμα. Το αντίθετο συμβαίνει σε μεγαλύτερες αποστάσεις d. Συνέπεια όλων αυτών είναι οι τιμές της λαμβανόμενης περιβάλλουσας να αποκτούν ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών. Για μεταβολή του d από 1 έως 5 cm η περιβάλλουσα αυξάνεται κατά έναν παράγοντα 7, ενώ χωρίς την απορρόφηση ο αντίστοιχος παράγοντας ήταν μικρότερος του 2.

7.3.6 Στατιστική μελέτη της απόστασης d

Όπως φάνηκε στα παραπάνω διαγράμματα η απόσταση d του πομπού από το κεφάλι του χρήστη συνδέεται άμεσα με το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη. Επειδή η ακριβής απόσταση του κεφαλιού από την κεραία αποτελεί τυχαία μεταβλητή, μας ενδιαφέρει η στατιστική συμπεριφορά της.

Μελέτες και πειράματα που εξετάζουν την μεταβολή της απόστασης του κινητού από το κεφάλι του χρήστη κάτω από διαφορετικές συνθήκες, καταλήγουν πως η τυχαία μεταβλητή της απόστασης συμπεριφέρεται σύμφωνα με το στατιστικό μοντέλο του Rayleigh. Η μορφή του μοντέλου αυτού υπονοεί ότι οι πιο πιθανές τιμές της απόστασης βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο διάστημα τιμών. Συνήθως μέση απόσταση της κεραίας του κινητού από το κεφάλι του χρήστη θεωρείται η τιμή 2.5 cm. Επίσης είναι προφανές ότι η τυχαία αυτή μεταβλητή δεν παίρνει τιμές κάτω από 1 cm, καθώς η κεραία δεν έρχεται σε επαφή με το κεφάλι λόγω της θέσης της πάνω στη συσκευή.

Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε πώς συμπεριφέρεται η περιβάλλουσα του σήματος στην περίπτωση που η απόσταση d του κινητού από το χρήστη μεταβάλλεται, ενώ ο βιολογικός σκεδαστής παραμένει σταθερός σε ένα κάθε φορά σημείο από το (-6,0) έως το (-5,0). Η απόσταση της κεραίας του κινητού τηλεφώνου από το κεφάλι του βιολογικού σκεδαστή λαμβάνεται σύμφωνα με την κατανομή Rayleigh, η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει την τυχαία συμπεριφορά του χρήστη κινητού τηλεφώνου. Πιο συγκεκριμένα, με τη βοήθεια του προγράμματος ΜΑΤLAB υλοποιείται πρόγραμμα το οποίο λαμβάνει κατά Rayleigh 40 τυχαίες τιμές για την απόσταση d, σε κάθε θέση x, οι οποίες αντιστοιχούν σε κάποια τιμή περιβάλλουσας. Έτσι, λοιπόν, προκύπτει ένα δείγμα 40 τιμών περιβάλλουσας για τις 51 διαφορετικές θέσεις x. Όπως έχει ήδη αναπτυχθεί, ισχύει γραμμική σχέση μεταξύ αποδοτικότητας και απόστασης d και αυτό θα αναγκάσει τις 40 τιμές του δείγματος να ακολουθήσουν κατανομή Rayleigh, αφού η επιλογή τους έγινε κατά Rayleigh με μέση τιμή 2,6 cm. Για να διαπιστωθεί αυτή η σκέψη γίνεται έλεγχος προσαρμογής X² με 2 βαθμούς ελευθερίας (4 υποδιαστήματα). Τα αποτελέσματα ενός ελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα (7.15).

Θέση <i>x</i> (m)	X^2 test	Θέση <i>x</i> (m)	X^2 test
-6	7.0165	-5.48	0.9502
-5.98	1.0080	-5.46	3.9575
-5.96	2.0542	-5.44	8.7106
-5.94	1.0754	-5.42	0.9423
-5.92	0.9239	-5.4	5.7775
-5.9	3.9224	-5.38	1.2526
-5.88	2.6894	-5.36	1.4909
-5.86	2.9546	-5.34	5.0494
-5.84	10.3391	-5.32	0.5096
-5.82	5.2760	-5.3	3.6534
-5.8	12.0720	-5.28	2.9626
-5.78	4.0310	-5.26	3.1506
-5.76	1.3851	-5.24	5.6776
-5.74	4.5280	-5.22	5.2600
-5.72	3.0376	-5.2	5.6014
-5.7	15.1269	-5.18	11.7279
-5.68	6.5104	-5.16	3.6335
-5.66	0.6807	-5.14	9.5573
-5.64	1.9165	-5.12	3.6374
-5.62	13.8127	-5.1	0.6327
-5.6	3.7992	-5.08	3.3436
-5.58	2.2414	-5.06	5.8070
-5.56	13.0131	-5.04	4.8919
-5.54	3.1376	-5.02	5.1433
-5.52	6.2107	-5	1.0035
-5.5	1.9592		

Πίνακας (7.15) : έλεγχος X^2 για Rayleigh

Μέσος όρος
$$X^2 = \frac{\sum_{1}^{51} X^2}{51} = 4.6087 ≺ 5.991$$

Ο μέσος όρος των 51 ελέγχων παρέχει ένα σχετικά ασφαλές συμπέρασμα για το αν ακολουθείται κατανομή Rayleigh και όπως είναι φανερό αυτό συμβαίνει με επίπεδο σημαντικότητας α=0.10. Αν εξετάσουμε πιο αναλυτικά τον πίνακα, θα δούμε ότι σε ποσοστό άνω του 78% των περιπτώσεων είναι αποδεκτή η κατανομή Rayleigh, ενώ υπάρχουν και κάποια 'ατυχή' ή άστοχα αποτελέσματα με πολύ χειρότερο κριτήριο X². Αυτό οφείλεται σαφώς στο τυχαίο της διαδικασίας. Υπενθυμίζουμε ότι το δείγμα προκύπτει από την κλήση μιας συνάρτησης του MATLAB 40 φορές για κάθε θέση x. Προφανώς, ένας άλλος έλεγχος θα είχε διαφορετικά αποτελέσματα.

7.4 Έλεγχος VeCa για το συνολικό φαινόμενο

Μετά την επαλήθευση της κατανομής Rayleigh για τις διαλείψεις του λαμβανόμενου σήματος και τη μοντελοποίηση της τυχαίας μεταβλητής *d* και ταυτόχρονα της αποδοτικότητας *δ*, είμαστε σε θέση να μελετήσουμε το συνολικό φαινόμενο που προσεγγίστηκε με τη συγκεκριμένη προσομοίωση. Ο άνθρωποςχρήστης έχει δίπλα στο κεφάλι του σε απόσταση *d* το κινητό που αποτελεί την κεραία-πομπό. Η απόσταση *d*, που στην πραγματικότητα μεταβάλλεται τυχαία, παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 5 cm με κατανομή Rayleigh. Το σύστημα άνθρωποςκεραία κινητού διανύει με σταθερή ταχύτητα απόσταση 1 μέτρου πάνω σε ευθεία μέσα στη διάταξη εσωτερικού χώρου της προσομοίωσης. Ο σταθμός βάσης, που στην περίπτωσή μας είναι ο δέκτης στην άλλη πλευρά του δωματίου, παραμένει ακίνητος και λαμβάνει ένα τυχαίο σήμα. Το λαμβανόμενο αυτό σήμα και η διακύμανσή του εκφράζει πλήρως τα φαινόμενα διαλείψεων στη NLOS ζεύξη εσωτερικού χώρου καθώς και την επίδραση του βιολογικού σκεδαστή πλάι στην κεραία πομπού. Πρακτικά, η στατιστική επεξεργασία της παραπάνω διαδικασίας πραγματοποιείται απλά μέσω ενός τυχαίου δείγματος που προκύπτει με τη βοήθεια του ΜΑΤLAB.



Σχήμα (7.11) : Απεικόνιση της κίνησης του χρήστη.

Όπως φαίνεται στο σχήμα (7.11) ο χρήστης με το κινητό ξεκινά από τη θέση x=-6 m και με σταθερό βήμα 2 cm καταλήγει μετά από 50 διαδοχικές θέσεις στη συντεταγμένη x=-5 m. Σε κάθε μια θέση x από τις 51 συνολικά επιλέγεται και μια απόσταση d με τυχαίο τρόπο από το μαθηματικό πρόγραμμα με κατανομή Rayleigh μέσης τιμής d=2.4 cm. Έτσι, σε κάθε θέση x αντιστοιχεί μια δεδομένη τιμή λαμβανόμενου σήματος και προκύπτει ένα δείγμα 51 τιμών που προσεγγίζει ικανοποιητικά την αληθινή κίνηση του χρήστη στο δωμάτιο. Η κατανομή που τυχόν ακολουθεί αυτό το δείγμα δείχνει τη στατιστική συμπεριφορά του λαμβανόμενου σήματος στις ειδικές συνθήκες της προσομοίωσής μας, δηλαδή σε ζεύξη εσωτερικού χώρου μη οπτικής επαφής παρουσία βιολογικού σκεδαστή. Σε NLOS συνθήκες η κατανομή αυτή θα ήταν σχεδόν σίγουρα η Rayleigh, όμως η παρουσία του βιολογικού σκεδαστή κάνει πιο αναμενόμενη την κατανομή VeCa. Φυσικά το δείγμα που παρέχει κάθε φορά το πρόγραμμα MATLAB είναι διαφορετικό αφού εισάγεται η τυχαία επιλογή απόστασης d κατά Rayleigh. Πραγματοποιούμε έναν πρώτο έλεγχο στο πρώτο τυχαίο δείγμα που προέκυψε με τον τρόπο που αναφέραμε.

θέση x	απόσταση d	λαμβανόμενο σήμα			
(m)	κατά Rayleigh (cm)				
-6	2.6	1.1421E-03			
-5.98	2.8	1.1101E-03			
-5.96	1.8	4.1018E-04			
-5.94	4.8	1.5481E-03			
-5.92	1.8	6.4074E-04			
-5.9	2	9 1854F-04			
-5.88	16	6.2725E-04			
-5.86	32	1 0158E-03			
-5.84	2	4 1647F-04			
-5.82	- 2	7 4191F-04			
-5.8	12	5.3001E-04			
-5.78	3.2	1 5758E-03			
-5.76	2 4	7 3370E-04			
-5.70	1.8	3 2726E-04			
-5.74	2.4	9.4815E-04			
-5.72	2.4	9:48132-04			
-5.7	2.0	1.4933E-03			
-5.00	1.0	8.4443E-04			
-5.00	1.0	4.9065E-04			
-5.64	3.4	1.0129E-03			
-5.62	1.4	5.7572E-04			
-5.6	2.4	1.3744E-03			
-5.58	1	5.8264E-04			
-5.56	1.2	4.6655E-04			
-5.54	1.6	4.2546E-04			
-5.52	1.2	5.0332E-04			
-5.5	2.6	1.4677E-03			
-5.48	1.2	6.6061E-04			
-5.46	3.2	1.2452E-03			
-5.44	2.8	7.6026E-04			
-5.42	2	7.3707E-04			
-5.4	3.2	1.6092E-03			
-5.38	2.4	1.1839E-03			
-5.36	2	6.5435E-04			
-5.34	1.2	3.2180E-04			
-5.32	2.8	1.1077E-03			
-5.3	3.4	1.7033E-03			
-5.28	2	9.3971E-04			
-5.26	4	1.2994E-03			
-5.24	2	4.0271E-04			
-5.22	2.4	8.0543E-04			
-5.2	3.2	1.4582E-03			
-5.18	1.8	8.2878E-04			
-5.16	3.4	1.1416E-03			
-5.14	2.6	4.4117E-04			
-5.12	4.2	9.2836E-04			
-5.1	2	7.6520E-04			
-5.08	2.4	1.0157E-03			
-5.06	1.6	5.5393E-04			
-5.04	1	1.9558F-04			
-5.02	2.8	3 1839F-04			
-5	1.8	4.9269F-04			
U U					

Πίνακας (7.16) : Παραγωγή τυχαίου δείγματος

Σύμφωνα με τον πίνακα (7.16) προκύπτει ένα δείγμα 51 τιμών κανονικοποιημένου λαμβανόμενου σήματος, του οποίου μελετάται η στατιστική συμπεριφορά. Οι δυο κατανομές που εξετάζονται είναι η κατανομή Rayleigh και η κατανομή VeCa. Η πρώτη έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$p_{R}(r) = \frac{r}{\sigma^{2}} e^{\frac{r^{2}}{2\sigma^{2}}}, \quad r \ge 0$$
 (7.18)

και μέση τιμή :

$$E[x] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \tag{7.19}$$

όπου σ^2 η τυπική απόκλιση της κατανομής που είναι και η μοναδική της παράμετρος. Η παράμετρος σ προκύπτει εξισώνοντας τη σχέση (7.19) με τη μέση τιμή μ του υπό μελέτη δείγματος :

$$E[x] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma = \mu \Longrightarrow \sigma = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\mu$$
(7.20)

οπότε

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{51} r_j}{51} = 8.5281 \cdot 10^{-4} \implies \sigma = 6.8061 \cdot 10^{-4}$$

Αντίστοιχα, η κατανομή VeCa έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$f_x^C(x) = \frac{\mathbf{x} \cdot \mathbf{K}_0 \left(\frac{x}{\sigma_1 \sigma_2}\right)}{\sigma_1^2 \sigma_2^2}$$
(7.21)

και μέση τιμή :

$$\mathbf{E}[\mathbf{x}] = \frac{\pi}{2}\sigma_1 \sigma_2 \tag{7.22}$$

όπου $K_0(z)$ η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel δευτέρου είδους, σ_1 η παράμετρος της 'πρώτης' κατανομής Rayleigh που ακολουθούν οι διαλείψεις σε ζεύξη NLOS και σ_2 η παράμετρος της 'δεύτερης' κατανομής Rayleigh που αναφέρεται στην απόσταση d και την αποδοτικότητα δ. Υπενθυμίζουμε ότι η κατανομή VeCa προκύπτει ως συνδυασμός δυο κατανομών Rayleigh. Παρόμοια υπολογίζουμε τα εξής :

$$\mathbf{E}[\mathbf{x}] = \frac{\pi}{2}\sigma_1\sigma_2 = \mu \Longrightarrow \sigma_1\sigma_2 = \frac{2}{\pi}\mu \tag{7.23}$$

άρα :

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{51} r_j}{51} = 8.5281 \cdot 10^{-4} \Longrightarrow \sigma_1 \sigma_2 = 5.4319 \cdot 10^{-4}$$

Το εύρος των 51 τιμών χωρίζεται σε k=5 υποδιαστήματα μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής του δείγματος. Στη συνέχεια υπολογίζουμε σε κάθε διάστημα τις πειραματικές και τις θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης των τιμών. Οι μεν πειραματικές υπολογίζονται απευθείας, οι δε αναμενόμενες προκύπτουν από την εκάστοτε ολοκλήρωση στο *i* υποδιάστημα :

$$E_{Rayleigh} = 51 \cdot \int_{i} p_{R}(r) dr$$
(7.24)

$$E_{VeCa} = 51 \cdot \int_{i} f_x^C(x) dx \tag{7.25}$$

με παραμέτρους διασποράς αυτές που προσδιορίστηκαν παραπάνω. Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του συγκεκριμένου δείγματος είναι :

$$r_{\min} = 1.9558 \cdot 10^{-4}$$

 $r_{\max} = 1.7033 \cdot 10^{-3}$

Οι μαθηματικοί υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα MATLAB. Συγκεντρώνουμε τους υπολογισμούς για το συγκεκριμένο δείγμα στον ακόλουθο πίνακα :

Διάστημα i	Παρατηρούμενες μετρήσεις Ο _i	Αναμενόμενες μετρήσεις Ε _i κατά VeCa	Αναμενόμενες μετρήσεις Ε _i κατά Rayleigh	$X_{VeCa}^{2} = \sum_{i=1}^{5} \frac{(O_{i} - E_{i})^{2}}{E_{i}} = 3.7855$
1	12	13.9917	7.7715	$(O - E)^2$
2	14	14.8113	16.9033	$X_{Rayleigh}^{2} = \sum_{i=1}^{2} \frac{(O_{i} - E_{i})}{E_{i}} = 8.0083$
3	10	9.7054	14.8073	
4	8	5.6934	7.8974	$X_{3,a}^2 = 7.815$
5	6	3.1748	2.8029	

Πίνακας (7.17) : Αναλυτικός έλεγχος X^2 για VeCa και Rayleigh

Οι βαθμοί ελευθερίας είναι 5-2=3 επειδή μια παράμετρος προέκυψε από το πειραματικό δείγμα. Παρατηρούμε ότι ισχύει $X_{VeCa}^2 \prec X_{k-2,a}^2$ με επίπεδο σημαντικότητας α=0.10 για την κατανομή VeCa, ενώ ισχύει $X_{Rayleigh}^2 \succ X_{k-2,a}^2$ για την κατανομή Rayleigh. Η υπόθεσή μας ότι ακολουθείται κατανομή VeCa είναι αποδεκτή. Για το συγκεκριμένο έλεγχο και επίπεδο σημαντικότητας α=0.10 ο έλεγχος X^2 για τη Rayleigh ξεπερνά για λίγο το κρίσιμο όριο. Βέβαια, το δείγμα είναι αποτέλεσμα προσομοίωσης του MATLAB και στηρίζεται σε μια τυχαία διαδικασία. Για να εξασφαλίσουμε την αξιοπιστία του αποτελέσματος της μελέτης αυτής επαναλάβαμε τη διαδικασία πολλές φορές. Σε μερικές από αυτές προκύπτει ότι ακολουθείται και η κατανομή Rayleigh, αλλά σχεδόν πάντα ο έλεγχος X^2 για τη

VeCa είναι καλύτερος. Παραθέτουμε τους μέσους όρους των ελέγχων για 1000 'τρεξίματα' όπου είναι φανερή η καλύτερη σύγκλιση της κατανομής VeCa :

$$\overline{X_{VeCa}^2} = 5.6578 \qquad \overline{X_{Rayleigh}^2} = 9.9119$$

Η σύγκριση των δυο κατανομών και των πειραματικών τιμών για τον έλεγχο που ήδη αναφέραμε φαίνεται καλύτερα στο σχήμα (7.12) με τις καμπύλες αθροιστικής πιθανότητας (CDF). Στη συνέχεια στο σχήμα (7.13) παρουσιάζονται οι καμπύλες των αντίστοιχων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (PDF).



Σχήμα (7.13) : Σύγκριση των PDF.

Περισσότερο στη σύγκριση των CDF και λιγότερο σε αυτή των PDF οι διαφορές μεταξύ των μοντέλων που αντιπροσωπεύει η κάθε καμπύλη είναι μικρές. Αυτό συμβαίνει γιατί το κριτήριο ελέγχου που επιλέχτηκε ήταν αυστηρό. Έτσι, η κατανομή Rayleigh μπορεί με βάση τη στατιστική να απορρίφθηκε, ωστόσο δεν απέχει πάρα πολύ από την περιγραφή του συγκεκριμένου πειράματος. Βέβαια, όπως φαίνεται καλύτερα και στο σχήμα (7.13) η κατανομή VeCa είναι αυτή που προσεγγίζει ακόμα περισσότερο το δείγμα τιμών του πειράματος και γι' αυτό άλλωστε δεχτήκαμε και στατιστικά ότι αυτή περιγράφει ικανοποιητικά το φαινόμενο. Μια επιπλέον παρατήρηση για τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (PDF) είναι ότι ουσιαστικά η κατανομή VeCa μοιάζει με μια εκδοχή της Rayleigh μετατοπισμένη προς τα αριστερά και με μικρότερη κορυφή. Ένα σημαντικό μέρος των μετρήσεών μας είχαν τιμές κοντά στο ελάχιστο (δηλαδή προς τα αριστερά του άξονα), γι' αυτό και ικανοποιούνται καλύτερα από το μοντέλο της VeCa.

7.5 Συμπέρασμα

Η επαλήθευση της στατιστικής κατανομής VeCa για το λαμβανόμενο σήμα είναι το κυριότερο συμπέρασμα αυτής της μελέτης. Το νέο αυτό στατιστικό μοντέλο, που στηρίζεται στο συνδυασμό δυο κατανομών Rayleigh, αποδείχτηκε ότι περιγράφει επιτυχώς το φαινόμενο της προσομοίωσής μας. Διευκρινίζεται ότι η εν λόγω κατανομή ισχύει με ακρίβεια στις ιδιαίτερα συγκεκριμένες συνθήκες του πειράματος, δηλαδή για ραδιοζεύξη μη οπτικής επαφής σε εσωτερικό χώρο (περιβάλλον βραχυχρόνιων διαλείψεων) και παρουσία βιολογικού σκεδαστή δίπλα στην κεραία εκπομπής. Αν και οι συνθήκες είναι δεδομένες, προσεγγίζουν αναμφισβήτητα τις πραγματικές συνθήκες ενός σύγχρονου συστήματος κινητών επικοινωνιών στο εσωτερικό κάποιου κτιρίου, γι' αυτό το λόγο το στατιστικό μοντέλο της VeCa αξιολογείται ως εξαιρετικά χρήσιμο. Ασφαλώς, οι ήδη γνωστές κατανομές όπως η Rayleigh δεν καταργούνται. Απλά γίνεται σαφές ότι έχουν μεγαλύτερη ισχύ σε πιο γενικές περιπτώσεις, όπως NLOS διάδοση σε ανοικτό περιβάλλον χωρίς ενόχληση από ισχυρό σκεδαστή στο κοντινό πεδίο της κεραίας εκπομπής. Η αξία της VeCa εντοπίζεται σε αυτό ακριβώς το σημείο, στο ότι διαθέτει πιο εξειδικευμένο αλλά και ταυτόχρονα πιο πρακτικό πεδίο εφαρμογής.

7.6 Αντίστροφο Πείραμα

Αν θεωρήσουμε ότι μια κεραία διατηρεί τις ιδιότητές της είτε λειτουργεί σαν πομπός είτε σαν δέκτης και εκμεταλλευτούμε αυτή την αμοιβαιότητα, μπορούμε να μετατρέψουμε την προσομοίωση σε μια πιο αληθοφανή διαδικασία. Η διάταξη του εσωτερικού χώρου παραμένει όπως πριν, δηλαδή έχουμε να κάνουμε με δωμάτιο στη μέση του οποίου υπάρχει τοίχος που εμποδίζει την οπτική επαφή των δυο κεραιών. Στο δεξί τμήμα του δωματίου τοποθετείται ο πομπός μόνος του εκπέμποντας μέσω συντονισμένης κεραίας διπόλου. Στην αντίθετη πλευρά βρίσκεται η κεραία του δέκτη που παίζει το ρόλο της ασύρματης-κινητής συσκευής με το βιολογικό σκεδαστή δίπλα της που ουσιαστικά είναι ο χρήστης. Η νέα διάταξη παρουσιάζεται στο σχήμα (7.14).



Σχήμα (7.14α) : Κάτοψη της διάταξης εσωτερικού χώρου.



Σχήμα (7.14β) : Πλάγια όψη της διάταξης εσωτερικού χώρου.

Τα δίπολα του δέκτη και του πομπού, που προσομοιώνονται με snwire και sndipole αντίστοιχα, συντονίζονται για αντίστροφα μήκη σε σχέση με το προηγούμενο πείραμα, δηλαδή 0.0763 m για τον πομπό και 0.0735 m για το δέκτη. Υπενθυμίζουμε ότι ο πομπός βρίσκεται τώρα στη θέση (6,0,1.6) χωρίς την παρουσία του βιολογικού σκεδαστή και έχει αντίσταση εισόδου Z_{in} =70.6560+*j*0.1899 Ω. Αντίστοιχα, ο δέκτης έχει τοποθετηθεί αρχικά στη θέση (-6,0,1.6) και σε απόσταση *d* από το χρήστηβιολογικό σκεδαστή. Για *d*=2.6 cm συντονίζεται σε Z_{in} =50.860+*j*2.392 Ω. Αυτό σημαίνει ότι η αντίσταση τερματισμού του δέκτη πρέπει να μεταβληθεί σε *R*=50 Ω.

Όπως και στο κανονικό πείραμα μεταβάλλονται η θέση του δέκτη καθώς και η απόσταση *d* και μετράται το ρεύμα στο κεντρικό αγώγιμο τμήμα του δέκτη. Η λαμβανόμενη περιβάλλουσα που θα μελετηθεί στατιστικά προκύπτει, όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, από τον τύπο :

$$r(t) = I\sqrt{\frac{R}{2}} = 5I$$

(7.26)

7.6.1 Μετρήσεις και επεξεργασία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

Στον πίνακα (7.18) παρατίθενται τα αριθμητικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Υπενθυμίζουμε τα μεγέθη που μεταβάλλονται :

- συντεταγμένη x, που παίρνει τιμές από -6 έως -5 και εκφράζει την κίνηση του ανθρώπου στο δωμάτιο για ένα μέτρο,
- απόσταση d, που παίρνει τιμές μεταξύ 1 και 5 cm και εκφράζει την απόσταση μεταξύ του κεφαλιού του χρήστη και της κεραίας της ασύρματης τηλεφωνικής συσκευής.

Πίνακας (7.18) : Μετρήσεις προσομοίωσης Ι (Α) στο αντίστροφο πείραμα

											Απά	όσταση d	(m)									
		0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
	-6	2.095E-05	2.448E-05	2.777E-05	3.077E-05	3.344E-05	3.580E-05	3.788E-05	3.972E-05	4.136E-05	4.285E-05	4.422E-05	4.550E-05	4.671E-05	4.786E-05	4.897E-05	5.006E-05	5.114E-05	5.222E-05	5.278E-05	5.386E-05	5.495E-05
	-5.98	1.797E-05	2.108E-05	2.399E-05	2.666E-05	2.905E-05	3.118E-05	3.306E-05	3.473E-05	3.624E-05	3.761E-05	3.888E-05	4.005E-05	4.116E-05	4.222E-05	4.324E-05	4.424E-05	4.524E-05	4.622E-05	4.679E-05	4.774E-05	4.871E-05
	-5.96	9.238E-06	1.104E-05	1.289E-05	1.469E-05	1.638E-05	1.795E-05	1.939E-05	2.071E-05	2.193E-05	2.307E-05	2.414E-05	2.514E-05	2.609E-05	2.699E-05	2.787E-05	2.873E-05	2.957E-05	3.041E-05	3.143E-05	3.221E-05	3.299E-05
	-5.94	6.238E-06	8.591E-06	1.084E-05	1.295E-05	1.489E-05	1.666E-05	1.826E-05	1.971E-05	2.103E-05	2.225E-05	2.338E-05	2.445E-05	2.546E-05	2.642E-05	2.735E-05	2.825E-05	2.914E-05	3.001E-05	3.124E-05	3.209E-05	3.295E-05
	-5.92	1.760E-05	2.111E-05	2.439E-05	2.738E-05	3.005E-05	3.241E-05	3.448E-05	3.632E-05	3.796E-05	3.944E-05	4.080E-05	4.206E-05	4.325E-05	4.439E-05	4.548E-05	4.655E-05	4.761E-05	4.866E-05	4.945E-05	5.051E-05	5.158E-05
	-5.9	2.501E-05	2.893E-05	3.262E-05	3.598E-05	3.897E-05	4.161E-05	4.392E-05	4.596E-05	4.777E-05	4.941E-05	5.091E-05	5.230E-05	5.361E-05	5.485E-05	5.606E-05	5.725E-05	5.842E-05	5.960E-05	6.025E-05	6.142E-05	6.261E-05
	-5.88	2.443E-05	2.742E-05	3.034E-05	3.305E-05	3.552E-05	3.772E-05	3.968E-05	4.144E-05	4.303E-05	4.448E-05	4.582E-05	4.708E-05	4.827E-05	4.941E-05	5.052E-05	5.161E-05	5.270E-05	5.380E-05	5.459E-05	5.565E-05	5.674E-05
	-5.86	1.526E-05	1.643E-05	1.783E-05	1.933E-05	2.083E-05	2.229E-05	2.368E-05	2.500E-05	2.625E-05	2.743E-05	2.856E-05	2.964E-05	3.067E-05	3.166E-05	3.263E-05	3.360E-05	3.455E-05	3.550E-05	3.673E-05	3.764E-05	3.855E-05
	-5.84	3.572E-06	5.735E-06	8.057E-06	1.033E-05	1.247E-05	1.445E-05	1.626E-05	1.792E-05	1.945E-05	2.086E-05	2.217E-05	2.340E-05	2.456E-05	2.567E-05	2.674E-05	2.777E-05	2.878E-05	2.977E-05	3.104E-05	3.201E-05	3.297E-05
	-5.82	1.692E-05	2.049E-05	2.384E-05	2.691E-05	2.967E-05	3.211E-05	3.426E-05	3.617E-05	3.787E-05	3.941E-05	4.082E-05	4.214E-05	4.337E-05	4.455E-05	4.569E-05	4.679E-05	4.789E-05	4.897E-05	4.968E-05	5.078E-05	5.188E-05
	-5.8	2.730E-05	3.115E-05	3.482E-05	3.817E-05	4.117E-05	4.381E-05	4.613E-05	4.818E-05	5.000E-05	5.165E-05	5.315E-05	5.456E-05	5.588E-05	5.714E-05	5.836E-05	5.956E-05	6.075E-05	6.194E-05	6.265E-05	6.384E-05	6.505E-05
	-5.78	2.776E-05	3.063E-05	3.347E-05	3.613E-05	3.857E-05	4.076E-05	4.272E-05	4.448E-05	4.608E-05	4.754E-05	4.890E-05	5.018E-05	5.139E-05	5.256E-05	5.370E-05	5.483E-05	5.595E-05	5.708E-05	5.807E-05	5.918E-05	6.031E-05
	-5.76	1.745E-05	1.849E-05	1.978E-05	2.120E-05	2.264E-05	2.407E-05	2.545E-05	2.676E-05	2.802E-05	2.922E-05	3.036E-05	3.147E-05	3.253E-05	3.355E-05	3.456E-05	3.556E-05	3.654E-05	3.795E-05	3.891E-05	3.986E-05	4.082E-05
	-5.74	2.781E-06	4.961E-06	7.251E-06	9.463E-06	1.155E-05	1.347E-05	1.523E-05	1.684E-05	1.832E-05	1.968E-05	2.094E-05	2.213E-05	2.325E-05	2.432E-05	2.534E-05	2.634E-05	2.731E-05	2.841E-05	2.936E-05	3.029E-05	3.121E-05
	-5.72	1.900E-05	2.243E-05	2.561E-05	2.847E-05	3.101E-05	3.323E-05	3.517E-05	3.687E-05	3.837E-05	3.971E-05	4.093E-05	4.205E-05	4.312E-05	4.413E-05	4.511E-05	4.606E-05	4.700E-05	4.746E-05	4.842E-05	4.937E-05	5.034E-05
	-5.7	3.045E-05	3.428E-05	3.784E-05	4.104E-05	4.386E-05	4.631E-05	4.843E-05	5.027E-05	5.188E-05	5.332E-05	5.463E-05	5.584E-05	5.698E-05	5.806E-05	5.912E-05	6.016E-05	6.119E-05	6.185E-05	6.289E-05	6.393E-05	6.499E-05
	-5.68	3.015E-05	3.322E-05	3.614E-05	3.882E-05	4.121E-05	4.332E-05	4.516E-05	4.679E-05	4.824E-05	4.956E-05	5.076E-05	5.189E-05	5.296E-05	5.399E-05	5.499E-05	5.598E-05	5.697E-05	5.805E-05	5.904E-05	6.003E-05	6.103E-05
	-5.66	1.827E-05	1.994E-05	2.167E-05	2.337E-05	2.497E-05	2.646E-05	2.782E-05	2.907E-05	3.023E-05	3.130E-05	3.231E-05	3.328E-05	3.419E-05	3.507E-05	3.593E-05	3.678E-05	3.762E-05	3.896E-05	3.979E-05	4.060E-05	4.142E-05
	-5.64	9.918E-06	1.203E-05	1.407E-05	1.595E-05	1.766E-05	1.920E-05	2.057E-05	2.178E-05	2.287E-05	2.386E-05	2.477E-05	2.561E-05	2.641E-05	2.717E-05	2.791E-05	2.862E-05	2.931E-05	2.995E-05	3.066E-05	3.135E-05	3.205E-05
	-5.62	2.666E-05	2.982E-05	3.270E-05	3.524E-05	3.744E-05	3.930E-05	4.088E-05	4.222E-05	4.337E-05	4.437E-05	4.527E-05	4.608E-05	4.685E-05	4.758E-05	4.829E-05	4.899E-05	4.968E-05	4.988E-05	5.060E-05	5.134E-05	5.208E-05
	-5.6	3.838E-05	4.194E-05	4.521E-05	4.808E-05	5.055E-05	5.264E-05	5.439E-05	5.588E-05	5.715E-05	5.827E-05	5.926E-05	6.018E-05	6.104E-05	6.186E-05	6.267E-05	6.348E-05	6.429E-05	6.429E-05	6.572E-05	6.658E-05	6.745E-05
	-5.58	3.738E-05	4.032E-05	4.305E-05	4.548E-05	4.758E-05	4.938E-05	5.091E-05	5.222E-05	5.337E-05	5.439E-05	5.531E-05	5.618E-05	5.699E-05	5.779E-05	5.857E-05	5.935E-05	6.014E-05	6.120E-05	6.201E-05	6.284E-05	6.368E-05
	-5.56	2.482E-05	2.649E-05	2.813E-05	2.964E-05	3.100E-05	3.222E-05	3.329E-05	3.425E-05	3.511E-05	3.591E-05	3.665E-05	3.735E-05	3.802E-05	3.868E-05	3.932E-05	3.997E-05	4.061E-05	4.176E-05	4.243E-05	4.309E-05	4.375E-05
n)	-5.54	1.516E-05	1.676E-05	1.834E-05	1.983E-05	2.119E-05	2.241E-05	2.349E-05	2.444E-05	2.529E-05	2.606E-05	2.676E-05	2.741E-05	2.803E-05	2.862E-05	2.920E-05	2.976E-05	3.032E-05	3.069E-05	3.126E-05	3.183E-05	3.240E-05
Ξ	-5.52	2.808E-05	3.083E-05	3.339E-05	3.565E-05	3.761E-05	3.929E-05	4.071E-05	4.191E-05	4.294E-05	4.383E-05	4.463E-05	4.535E-05	4.603E-05	4.670E-05	4.734E-05	4.797E-05	4.860E-05	4.878E-05	4.943E-05	5.011E-05	5.080E-05
x L	-5.5	3.881E-05	4.202E-05	4.499E-05	4.761E-05	4.987E-05	5.179E-05	5.342E-05	5.479E-05	5.597E-05	5.701E-05	5.793E-05	5.879E-05	5.959E-05	6.038E-05	6.115E-05	6.192E-05	6.269E-05	6.341E-05	6.421E-05	6.504E-05	6.588E-05
ŝĠ	-5.48	3.674E-05	3.941E-05	4.192E-05	4.418E-05	4.614E-05	4.783E-05	4.928E-05	5.054E-05	5.164E-05	5.262E-05	5.352E-05	5.436E-05	5.516E-05	5.594E-05	5.671E-05	5.748E-05	5.826E-05	5.916E-05	5.998E-05	6.081E-05	6.165E-05
◙	-5.46	2.383E-05	2.533E-05	2.680E-05	2.818E-05	2.943E-05	3.055E-05	3.155E-05	3.244E-05	3.326E-05	3.401E-05	3.471E-05	3.537E-05	3.602E-05	3.664E-05	3.726E-05	3.788E-05	3.850E-05	3.932E-05	3.996E-05	4.060E-05	4.123E-05
	-5.44	1.318E-05	1.440E-05	1.565E-05	1.685E-05	1.795E-05	1.896E-05	1.986E-05	2.066E-05	2.138E-05	2.203E-05	2.262E-05	2.318E-05	2.369E-05	2.420E-05	2.468E-05	2.516E-05	2.563E-05	2.603E-05	2.650E-05	2.698E-05	2.745E-05
	-5.42	2.360E-05	2.595E-05	2.817E-05	3.017E-05	3.191E-05	3.343E-05	3.472E-05	3.582E-05	3.677E-05	3.760E-05	3.834E-05	3.902E-05	3.964E-05	4.026E-05	4.085E-05	4.144E-05	4.202E-05	4.242E-05	4.302E-05	4.363E-05	4.426E-05
	-5.4	3.159E-05	3.445E-05	3.716E-05	3.961E-05	4.176E-05	4.363E-05	4.524E-05	4.663E-05	4.785E-05	4.892E-05	4.989E-05	5.079E-05	5.163E-05	5.246E-05	5.326E-05	5.405E-05	5.485E-05	5.562E-05	5.644E-05	5.728E-05	5.813E-05
	-5.38	3.379E-05	3.638E-05	3.878E-05	4.088E-05	4.266E-05	4.418E-05	4.546E-05	4.653E-05	4.746E-05	4.827E-05	4.900E-05	4.967E-05	5.030E-05	5.092E-05	5.153E-05	5.215E-05	5.277E-05	5.355E-05	5.419E-05	5.486E-05	5.554E-05
	-5.36	1.939E-05	2.100E-05	2.251E-05	2.386E-05	2.503E-05	2.604E-05	2.692E-05	2.768E-05	2.836E-05	2.896E-05	2.951E-05	3.002E-05	3.051E-05	3.098E-05	3.145E-05	3.191E-05	3.238E-05	3.302E-05	3.349E-05	3.397E-05	3.444E-05
	-5.34	1.707E-05	1.812E-05	1.903E-05	1.976E-05	2.031E-05	2.073E-05	2.103E-05	2.123E-05	2.136E-05	2.144E-05	2.149E-05	2.152E-05	2.154E-05	2.156E-05	2.160E-05	2.163E-05	2.167E-05	2.157E-05	2.164E-05	2.171E-05	2.179E-05
	-5.32	3.105E-05	3.296E-05	3.463E-05	3.600E-05	3.709E-05	3.792E-05	3.855E-05	3.901E-05	3.934E-05	3.958E-05	3.976E-05	3.990E-05	4.003E-05	4.016E-05	4.030E-05	4.044E-05	4.061E-05	4.066E-05	4.086E-05	4.109E-05	4.135E-05
	-5.3	3.788E-05	4.034E-05	4.257E-05	4.446E-05	4.602E-05	4.729E-05	4.831E-05	4.912E-05	4.978E-05	5.033E-05	5.079E-05	5.122E-05	5.161E-05	5.200E-05	5.239E-05	5.279E-05	5.321E-05	5.370E-05	5.416E-05	5.465E-05	5.517E-05
	-5.28	3.229E-05	3.455E-05	3.664E-05	3.847E-05	4.003E-05	4.133E-05	4.244E-05	4.336E-05	4.415E-05	4.484E-05	4.547E-05	4.604E-05	4.658E-05	4.711E-05	4.764E-05	4.817E-05	4.920E-05	4.944E-05	5.001E-05	5.060E-05	5.121E-05
	-5.26	1.755E-05	1.896E-05	2.029E-05	2.148E-05	2.253E-05	2.344E-05	2.425E-05	2.496E-05	2.558E-05	2.615E-05	2.668E-05	2.717E-05	2.764E-05	2.810E-05	2.856E-05	2.901E-05	2.978E-05	3.007E-05	3.052E-05	3.099E-05	3.145E-05
	-5.24	1.318E-05	1.379E-05	1.429E-05	1.466E-05	1.489E-05	1.503E-05	1.510E-05	1.510E-05	1.506E-05	1.499E-05	1.491E-05	1.481E-05	1.472E-05	1.463E-05	1.457E-05	1.450E-05	1.397E-05	1.423E-05	1.419E-05	1.416E-05	1.414E-05
	-5.22	2.742E-05	2.876E-05	2.992E-05	3.084E-05	3.153E-05	3.203E-05	3.237E-05	3.258E-05	3.270E-05	3.276E-05	3.277E-05	3.276E-05	3.274E-05	3.273E-05	3.274E-05	3.276E-05	3.274E-05	3.278E-05	3.286E-05	3.295E-05	3.308E-05
	-5.2	3.540E-05	3.726E-05	3.895E-05	4.038E-05	4.155E-05	4.247E-05	4.321E-05	4.379E-05	4.425E-05	4.463E-05	4.495E-05	4.524E-05	4.552E-05	4.578E-05	4.608E-05	4.638E-05	4.705E-05	4.713E-05	4.749E-05	4.788E-05	4.831E-05
	-5.18	3.230E-05	3.406E-05	3.570E-05	3.715E-05	3.838E-05	3.941E-05	4.029E-05	4.103E-05	4.166E-05	4.223E-05	4.274E-05	4.322E-05	4.368E-05	4.413E-05	4.460E-05	4.507E-05	4.604E-05	4.623E-05	4.675E-05	4.729E-05	4.785E-05
	-5.16	1.989E-05	2.097E-05	2.203E-05	2.300E-05	2.386E-05	2.463E-05	2.532E-05	2.593E-05	2.649E-05	2.701E-05	2.750E-05	2.797E-05	2.842E-05	2.888E-05	2.933E-05	2.978E-05	3.055E-05	3.084E-05	3.131E-05	3.178E-05	3.227E-05
	-5.14	6.916E-06	7.081E-06	7.261E-06	7.430E-06	7.587E-06	7.730E-06	7.880E-06	8.020E-06	8.156E-06	8.290E-06	8.423E-06	8.557E-06	8.695E-06	8.839E-06	8.986E-06	9.133E-06	9.190E-06	9.345E-06	9.497E-06	9.645E-06	9.788E-06
	-5.12	1.755E-05	1.818E-05	1.877E-05	1.927E-05	1.966E-05	1.994E-05	2.016E-05	2.031E-05	2.040E-05	2.045E-05	2.048E-05	2.050E-05	2.050E-05	2.050E-05	2.052E-05	2.056E-05	2.056E-05	2.061E-05	2.067E-05	2.075E-05	2.084E-05
	-5.1	2.801E-05	2.907E-05	3.010E-05	3.103E-05	3.182E-05	3.249E-05	3.306E-05	3.354E-05	3.394E-05	3.430E-05	3.462E-05	3.493E-05	3.522E-05	3.551E-05	3.582E-05	3.615E-05	3.660E-05	3.695E-05	3.731E-05	3.770E-05	3.812E-05
	-5.08	3.027E-05	3.132E-05	3.237E-05	3.335E-05	3.422E-05	3.498E-05	3.567E-05	3.629E-05	3.685E-05	3.738E-05	3.788E-05	3.836E-05	3.884E-05	3.933E-05	3.982E-05	4.033E-05	4.104E-05	4.157E-05	4.213E-05	4.270E-05	4.330E-05
	-5.06	2.405E-05	2.476E-05	2.549E-05	2.617E-05	2.680E-05	2.739E-05	2.794E-05	2.845E-05	2.895E-05	2.944E-05	2.992E-05	3.040E-05	3.088E-05	3.138E-05	3.189E-05	3.240E-05	3.308E-05	3.362E-05	3.417E-05	3.474E-05	3.532E-05
	-5.04	1.151E-05	1.176E-05	1.201E-05	1.225E-05	1.248E-05	1.271E-05	1.295E-05	1.318E-05	1.344E-05	1.371E-05	1.399E-05	1.429E-05	1.461E-05	1.494E-05	1.528E-05	1.561E-05	1.603E-05	1.639E-05	1.675E-05	1.712E-05	1.749E-05
	-5.02	3.689E-06	3.857E-06	4.097E-06	4.341E-06	4.550E-06	4.709E-06	4.826E-06	4.905E-06	4.943E-06	4.947E-06	4.932E-06	4.900E-06	4.852E-06	4.795E-06	4.739E-06	4.697E-06	4.687E-06	4.635E-06	4.585E-06	4.538E-06	4.495E-06
	-5	1.735E-05	1.779E-05	1.831E-05	1.883E-05	1.932E-05	1.976E-05	2.017E-05	2.055E-05	2.088E-05	2.119E-05	2.147E-05	2.175E-05	2.201E-05	2.227E-05	2.253E-05	2.280E-05	2.321E-05	2.349E-05	2.377E-05	2.407E-05	2.438E-05

Για σταθερή απόσταση μεταξύ του κινητού-δέκτη και του χρήστη το λαμβανόμενο σήμα υφίσταται βραχυχρόνιες διαλείψεις διανύοντας απόσταση 1 m, από το σημείο (-6,0) προς το (-5,0). Οι διαλείψεις τώρα κυμαίνονται από 20 έως 25 dB περίπου και φαίνονται παρακάτω.



x (m)

Σχήμα (7.15α) : Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση δέκτη-κεφαλιού 1 cm



Σχήμα (7.15β) : Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση δέκτη-κεφαλιού 2.6 cm



x (m)

Σχήμα (7.15γ) : Λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη για κίνηση παράλληλα στον άξονα x και σταθερή απόσταση δέκτη-κεφαλιού 5 cm

Σημειώνουμε ότι επειδή ο πομπός βρίσκεται μόνος του μακριά από σκεδαστές, η ακτινοβολούμενη ισχύς προς το δέκτη είναι σταθερή με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται κανονικοποίηση των μετρήσεων της προσομοίωσης.

7.6.2 Έλεγχος διαλείψεων Rayleigh στο αντίστροφο πείραμα

Και στην αντίστροφη περίπτωση θα επαληθεύσουμε ότι καθώς κινείται το σύστημα χρήστης-κινητό το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη ακολουθεί κατανομή Rayleigh. Υπάρχουν 21 διαφορετικές αποστάσεις d μεταξύ της κεραίας πομπού και του βιολογικού σκεδαστή. Σε κάθε μια από αυτές αντιστοιχούν 51 τιμές x, που εκφράζουν 51 διαφορετικές αποστάσεις του δέκτη από τον πομπό. Θα εφαρμόσουμε αρχικά το κριτήριο X^2 για το σύνολο τιμών περιβάλλουσας που προκύπτει στην τυχαία θέση d=2 cm και με τον ίδιο τρόπο θα συνεχίσουμε και στις υπόλοιπες θέσεις. Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές της έντασης της περιβάλλουσας του σήματος για όλες τις θέσεις x και για σταθερό d=2 cm.

Θέση <i>x</i> (m)	Λαμβανόμενη περιβάλλουσα	Θέση <i>x</i> (m)	Λαμβανόμενη περιβάλλουσα			
-6	1.790E-04	-5.48	2.392E-04			
-5,98	1.559E-04	-5.46	1.528E-04			
-5,96	8.975E-05	-5.44	9.480E-05			
-5,94	8.330E-05	-5.42	1.672E-04			
-5,92	1.621E-04	-5.4	2.182E-04			
-5,9	2.081E-04	-5.38	2.209E-04			
-5,88	1.886E-04	-5.36	1.302E-04			
-5,86	1.115E-04	-5.34	1.037E-04			
-5,84	7.225E-05	-5.32	1.896E-04			
-5,82	1.606E-04	-5.3	2.365E-04			
-5,8	2.191E-04	-5.28	2.067E-04			
-5,78	2.038E-04	-5.26	1.172E-04			
-5,76	1.204E-04	-5.24	7.515E-05			
-5,74	6.735E-05	-5.22	1.602E-04			
-5,72	1.662E-04	-5.2	2.124E-04			
-5,7	2.316E-04	-5.18	1.971E-04			
-5,68	2.166E-04	-5.16	1.232E-04			
-5,66	1.323E-04	-5.14	3.865E-05			
-5,64	9.600E-05	-5.12	9.970E-05			
-5,62	1.965E-04	-5.1	1.625E-04			
-5,6	2.632E-04	-5.08	1.749E-04			
-5,58	2.469E-04	-5.06	1.370E-04			
-5,56	1.611E-04	-5.04	6.355E-05			
-5,54	1.121E-04	-5.02	2.355E-05			
-5,52	1.965E-04	-5	9.880E-05			
-5,5	2.590E-04					

Πίνακας (7.19) : Τιμές περιβάλλουσας για d=2 cm στο αντίστροφο πείραμα

Σύμφωνα με τον πίνακα (7.19) έχουμε ένα δείγμα με n=51 τιμές, οι οποίες ενδεχομένως να ακολουθούν κατανομή Rayleigh με τη γνωστή σ.π.π. :

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad r \ge 0$$
(7.27)

όπου σ^2 η τυπική απόκλιση της κατανομής που είναι και η μοναδική της παράμετρος. Γνωστή είναι και η μέση τιμή της κατανομής :

$$E[x] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \tag{7.28}$$

Η παράμετρος σ της κατανομής Rayleigh υπολογίζεται με τη μέθοδο των ροπών. Εξισώνεται η μέση τιμή του δείγματος μ, που είναι το άθροισμα των 51 τιμών

διαιρεμένο δια 51, με τη μέση τιμή της κατανομής και γίνεται επίλυση ως προς σ που δίνει τη βέλτιστη τιμή της διασποράς. Επομένως είναι :

$$E[x] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma = \mu \Longrightarrow \sigma = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\mu$$
(7.29)

Συγκεκριμένα στο υπό εξέταση δείγμα προκύπτει :

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{51} r_j}{51} = 1.557 \cdot 10^{-4} \implies \sigma = 1.243 \cdot 10^{-4}$$

Το εύρος των 51 μετρήσεων χωρίζεται σε k=5 υποδιαστήματα μεταξύ της ελάχιστης και μέγιστης τιμής του δείγματος. Στη συνέχεια υπολογίζουμε σε κάθε διάστημα τις πειραματικές και τις θεωρητικές συχνότητες εμφάνισης των τιμών. Οι μεν πειραματικές υπολογίζονται απευθείας, οι δε αναμενόμενες προκύπτουν από την εκάστοτε ολοκλήρωση στο *i* υποδιάστημα : $51 \cdot \int_{i} p_{R}(r) dr$ με παράμετρο σ αυτή που

προσδιορίστηκε παραπάνω. Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή του συγκεκριμένου δείγματος είναι :

$$r_{\min} = 2.355 \cdot 10^{-5}$$
$$r_{\max} = 2.632 \cdot 10^{-4}$$

Για λόγους ευκολίας όλοι οι σχετικοί μαθηματικοί υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα MATLAB. Συγκεντρώνουμε τους υπολογισμούς για το συγκεκριμένο δείγμα στον ακόλουθο πίνακα :

Διάστημα i	Παρατηρούμενες μετρήσεις Ο _i	Αναμενόμενες μετρήσεις Ε _i	$V_{2}^{2} = \sum_{i=1}^{5} (O_{i} - E_{i})^{2}$ 2.0705
1	4	5.0038	$X = \sum_{i=1}^{n} \frac{E_i}{E_i} = 3.0795$
2	12	12.2536	<i>μ−1 Ι</i>
3	14	13.6082	$Y^2 = 7.815$
4	11	10.3620	$A_{3,a} = 7.813$
5	10	5.9144	

Πίνακας (7.20) : Αναλυτικός έλεγχος X^2 για διαλείψεις Rayleigh

Άρα, ισχύει $X^2 \prec X^2_{k-2,a}$ με επίπεδο σημαντικότητας α=0.10 και η υπόθεση ότι οι τιμές της έντασης περιβάλλουσας για d=2 cm ακολουθούν κατανομή Rayleigh είναι αποδεκτή. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι κατά τα γνωστά 5-1-1=3.

Ακριβώς με τον ίδιο τρόπο δουλεύουμε για τις υπόλοιπες 20 τιμές y από 1 έως 5 cm για να εξάγουμε τα αντίστοιχα κριτήρια X^2 . Τα συνολικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα (7.21).

Απόσταση <i>d</i> (cm)	X^2 test	Όριο αποδοχής
1	6.4786	
1.2	3.4780	
1.4	3.2722	
1.6	4.0644	
1.8	2.0509	
2	3.0795	
2.2	3.1327	
2.4	6.1952	
2.6	5.5381	
2.8	6.4536	
3	6.9142	7.815
3.2	6.6228	
3.4	6.3560	
3.6	6.1081	
3.8	5.8890	
4	8.3847	
4.2	10.3775	
4.4	8.1296	
4.6	11.5870	
4.8	10.6242	
5	11.9940	

Πίνακας (7.21) : Αποτελέσματα ελέγχων X^2

Παρατηρούμε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις (15 από τις 21, ποσοστό άνω του 70%) ισχύει η υπόθεση που κάνουμε ότι ακολουθείται Rayleigh αφού $X^2 \prec X_{k-2,a}^2 = 7.815$ και μάλιστα ο μέσος όρος των κριτηρίων X^2 είναι αρκετά ικανοποιητικός :

$$\frac{\sum_{1}^{21} X^2}{21} = 6.5110$$

Στη συνέχεια στο σχήμα (7.16) παρουσιάζονται η θεωρητική και η πειραματική αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (CDF) σε ενδεικτικές αποστάσεις *d*.


Σχήμα (7.16α) : Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητούκεφαλιού 1 cm



Σχήμα (7.16β) : Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητούκεφαλιού 2.6 cm



Σχήμα (7.16γ) : Πειραματική και θεωρητική CDF για απόσταση κινητούκεφαλιού 5 cm

Ακολουθούν τα διαγράμματα μεταβολής της περιβάλλουσας σε σχέση με την απόσταση *d* του πομπού από τον βιολογικό σκεδαστή.



Σχήμα (7.17α) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του dγια x=-6 έως x=-5.82m



Σχήμα (7.17β) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του dγια x=-5.80 έως x=-5.62m



Σχήμα (7.17γ) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του dγια x=-5.60 έως x=-5.42m



Σχήμα (7.17δ) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του dγια x=-5.40 έως x=-5.22m



Σχήμα (7.17ε) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του dγια x=-5.20 έως x=-5m

Η κλίση που παρουσιάζουν οι καμπύλες είναι πολύ μικρή, γεγονός που οφείλεται στο μικρό εύρος τιμών του λαμβανόμενου σήματος. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο το γεγονός αυτό οφείλεται στην αδυναμία του προγράμματος προσομοίωσης SuperNEC να λάβει υπόψη του την απορρόφηση που εισάγει η παρουσία του βιολογικού σκεδαστή. Για το λόγο αυτό εισάγουμε τον παράγοντα απορρόφησης στις μετρήσεις μας όπως αυτός υπολογίστηκε προηγουμένως στον πίνακα (7.13) για συχνότητα 1800 MHz. Σημειώνουμε ότι η παρουσία του βιολογικού σκεδαστή δίπλα στο δέκτη περιορίζει τη λαμβανόμενη ισχύ λόγω απορρόφησης κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στο αρχικό πείραμα.

Συνεπώς, σε κάθε απόσταση d οι τιμές της περιβάλλουσας σήματος λήψης που φαίνονται στον πίνακα (7.18) πολλαπλασιάζονται με την αντίστοιχη αποδοτικότητα δ_{1800} . Οι τελικές τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα (7.22).

Πίνακας (7.22) : Τιμές περιβάλλουσας με απορρόφηση στο αντίστροφο πείραμα

		Aπ όσταση d (m)																			
	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
-6	2.080E-05	2.598E-05	3.166E-05	3.789E-05	4.475E-05	5.210E-05	5.958E-05	6.714E-05	7.474E-05	8.234E-05	8.993E-05	9.745E-05	1.049E-04	1.122E-04	1.193E-04	1.263E-04	1.336E-04	1.410E-04	1.472E-04	1.549E-04	1.629E-04
-5.98	1.785E-05	2.237E-05	2.735E-05	3.283E-05	3.888E-05	4.537E-05	5.200E-05	5.871E-05	6.549E-05	7.228E-05	7.907E-05	8.578E-05	9.242E-05	9.895E-05	1.053E-04	1.117E-04	1.182E-04	1.248E-04	1.305E-04	1.373E-04	1.444E-04
-5.9	9.174E-06	1.172E-05	1.469E-05	1.809E-05	2.192E-05	2.612E-05	3.050E-05	3.501E-05	3.963E-05	4.433E-05	4.909E-05	5.384E-05	5.859E-05	6.326E-05	6.788E-05	7.251E-05	7.724E-05	8.211E-05	8.764E-05	9.265E-05	9.780E-05
-5.94	6.195E-06	9.117E-06	1.236E-05	1.595E-05	1.993E-05	2.424E-05	2.872E-05	3.332E-05	3.800E-05	4.276E-05	4.755E-05	5.237E-05	5.717E-05	6.192E-05	6.662E-05	7.130E-05	7.612E-05	8.103E-05	8.711E-05	9.231E-05	9.768E-05
-5.9	1.748E-05	2.240E-05	2.780E-05	3.372E-05	4.022E-05	4.716E-05	5.423E-05	6.140E-05	6.859E-05	7.579E-05	8.297E-05	9.008E-05	9.712E-05	1.040E-04	1.108E-04	1.175E-04	1.244E-04	1.314E-04	1.379E-04	1.453E-04	1.529E-04
-5.9	2 484E-05	3.070E-05	3 719E-05	4 431E-05	5 215E-05	6.055E-05	6 908E-05	7 769E-05	8.632E-05	9 495E-05	1.035E-04	1 120E-04	1 204E-04	1 286E-04	1 365E-04	1 445E-04	1 526E-04	1 609E-04	1.680E-04	1 767E-04	1 856E-04
-5.8	2.426E-05	2 910E-05	3 459E-05	4 070E-05	4 754E-05	5.489E-05	6 241E-05	7.005E-05	7 776E-05	8 548E-05	9 318E-05	1 008E-04	1 084E-04	1 158E-04	1 231E-04	1 303E-04	1 377E-04	1 453E-04	1 522E-04	1 601E-04	1 682E-04
-5.8	1 515E-05	1 7//E-05	2.033E-05	2 380E-05	2 788E-05	3 244E-05	3 725E-05	4 226E-05	4 743E-05	5 271E-05	5.808E-05	6 3/8E-05	6.887E-05	7.420E-05	7 9/8E-05	8 480E-05	9.025E-05	9 585E-05	1.024E-04	1.001E 04	1 1/3E-0/
-5.9	2 5 4 7 5 0 6	6.096E.06	0.1955.06	1 2725 05	1 6605 05	2 102E 05	2 EEOE 0E	2 020E 05	2 5155 05	4 000E 05		6.012E.05	6.007 E-05	6 016E 05	6 E12E 0E	7 000E 05	7 6175 06	0.000E-00			0.774E.05
-5.9	1 6905 05	0.000L-00	3.103L-00	2 21/E 05	2 071E 05	4 672E 05	2.330L-03	5.029L-05	5.515E-05	7 5725 05	4.300L-03	0.0265.05	0.720E.05	1 044E 04	1 112E 04	1 1015 04	1 2515 04	1 2225 04	1 2055 04	9.200L-00	1 E20E 04
-5.0	1.660E-05	2.175E-05	2.716E-05	3.314E-05	3.97 IE-05	4.073E-05	5.369E-05	0.114E-05	0.043E-05	7.573E-05	0.301E-05	9.020E-05	9.739E-05	1.044E-04	1.113E-04	1.101E-04	1.201E-04	1.322E-04	1.303E-04	1.401E-04	1.536E-04
-5.0	2.711E-05	3.306E-05	3.969E-05	4.701E-05	5.510E-05	6.3/5E-05	7.256E-05	8.145E-05	9.035E-05	9.926E-05	1.081E-04	1.169E-04	1.255E-04	1.339E-04	1.421E-04	1.503E-04	1.587E-04	1.672E-04	1.747E-04	1.836E-04	1.928E-04
-5.76	2.757E-05	3.251E-05	3.816E-05	4.449E-05	5.162E-05	5.931E-05	6.719E-05	7.519E-05	8.327E-05	9.136E-05	9.944E-05	1.075E-04	1.154E-04	1.232E-04	1.308E-04	1.384E-04	1.461E-04	1.541E-04	1.619E-04	1.702E-04	1.788E-04
-5.70	1.733E-05	1.962E-05	2.255E-05	2.611E-05	3.030E-05	3.503E-05	4.003E-05	4.524E-05	5.063E-05	5.615E-05	6.174E-05	6.740E-05	7.305E-05	7.863E-05	8.418E-05	8.975E-05	9.544E-05	1.025E-04	1.085E-04	1.147E-04	1.210E-04
-5.74	2.762E-06	5.265E-06	8.266E-06	1.165E-05	1.546E-05	1.960E-05	2.396E-05	2.847E-05	3.310E-05	3.782E-05	4.258E-05	4.740E-05	5.221E-05	5.700E-05	6.172E-05	6.648E-05	7.134E-05	7.671E-05	8.186E-05	8.713E-05	9.253E-05
-5.72	1.887E-05	2.380E-05	2.920E-05	3.506E-05	4.150E-05	4.836E-05	5.532E-05	6.233E-05	6.933E-05	7.631E-05	8.324E-05	9.006E-05	9.683E-05	1.034E-04	1.099E-04	1.162E-04	1.228E-04	1.281E-04	1.350E-04	1.420E-04	1.492E-04
-5.7	3.024E-05	3.638E-05	4.314E-05	5.054E-05	5.870E-05	6.739E-05	7.618E-05	8.498E-05	9.375E-05	1.025E-04	1.111E-04	1.196E-04	1.279E-04	1.361E-04	1.440E-04	1.518E-04	1.598E-04	1.670E-04	1.754E-04	1.839E-04	1.927E-04
-5.6	2.994E-05	3.525E-05	4.120E-05	4.781E-05	5.515E-05	6.304E-05	7.103E-05	7.910E-05	8.717E-05	9.524E-05	1.032E-04	1.111E-04	1.189E-04	1.265E-04	1.339E-04	1.413E-04	1.488E-04	1.567E-04	1.646E-04	1.727E-04	1.809E-04
-5.6	1.814E-05	2.116E-05	2.470E-05	2.878E-05	3.342E-05	3.850E-05	4.376E-05	4.914E-05	5.463E-05	6.015E-05	6.571E-05	7.128E-05	7.677E-05	8.220E-05	8.751E-05	9.283E-05	9.827E-05	1.052E-04	1.109E-04	1.168E-04	1.228E-04
-5.64	9.849E-06	1.277E-05	1.604E-05	1.964E-05	2.363E-05	2.794E-05	3.235E-05	3.682E-05	4.133E-05	4.585E-05	5.037E-05	5.485E-05	5.930E-05	6.368E-05	6.798E-05	7.223E-05	7.656E-05	8.087E-05	8.549E-05	9.018E-05	9.502E-05
-5.6	2.647E-05	3.165E-05	3.728E-05	4.340E-05	5.011E-05	5.719E-05	6.430E-05	7.137E-05	7.837E-05	8.527E-05	9.206E-05	9.869E-05	1.052E-04	1.115E-04	1.176E-04	1.236E-04	1.298E-04	1.347E-04	1.411E-04	1.477E-04	1.544E-04
-5.6	3.811E-05	4.451E-05	5.154E-05	5.921E-05	6.765E-05	7.660E-05	8.555E-05	9.446E-05	1.033E-04	1.120E-04	1.205E-04	1.289E-04	1.371E-04	1.450E-04	1.526E-04	1.602E-04	1.679E-04	1.736E-04	1.832E-04	1.915E-04	2.000E-04
-5.5	3.712E-05	4.279E-05	4.908E-05	5.601E-05	6.368E-05	7.186E-05	8.008E-05	8.828E-05	9.644E-05	1.045E-04	1.125E-04	1.203E-04	1.280E-04	1.354E-04	1.427E-04	1.498E-04	1.571E-04	1.652E-04	1.729E-04	1.808E-04	1.888E-04
-5.5	2.465E-05	2.811E-05	3.207E-05	3.650E-05	4.149E-05	4.689E-05	5.236E-05	5.790E-05	6.344E-05	6.901E-05	7.453E-05	8.000E-05	8.537E-05	9.066E-05	9.577E-05	1.009E-04	1.061E-04	1.128E-04	1.183E-04	1.239E-04	1.297E-04
-5.54	1.505E-05	1.779E-05	2.091E-05	2.442E-05	2.836E-05	3.261E-05	3.695E-05	4.131E-05	4.570E-05	5.008E-05	5.442E-05	5.871E-05	6.294E-05	6.708E-05	7.112E-05	7.511E-05	7.920E-05	8.287E-05	8.716E-05	9.156E-05	9.605E-05
-5.5	2.788E-05	3.272E-05	3.806E-05	4.390E-05	5.033E-05	5.717E-05	6.403E-05	7.085E-05	7.759E-05	8.423E-05	9.076E-05	9.713E-05	1.034E-04	1.095E-04	1.153E-04	1.211E-04	1.269E-04	1.317E-04	1.378E-04	1.441E-04	1.506E-04
<u>-</u> -5.5	3.854E-05	4.459E-05	5.129E-05	5.863E-05	6.674E-05	7.536E-05	8.402E-05	9.262E-05	1.011E-04	1.096E-04	1.178E-04	1.259E-04	1.338E-04	1.415E-04	1.489E-04	1.563E-04	1.637E-04	1.712E-04	1.790E-04	1.871E-04	1.953E-04
.5.4	3.648E-05	4.182E-05	4.779E-05	5.441E-05	6.175E-05	6.960E-05	7.751E-05	8.544E-05	9.331E-05	1.011E-04	1.088E-04	1.164E-04	1.239E-04	1.311E-04	1.381E-04	1.451E-04	1.522E-04	1.597E-04	1.672E-04	1.749E-04	1.828E-04
õ -5.40	2.366E-05	2.688E-05	3.055E-05	3.470E-05	3.939E-05	4.446E-05	4.962E-05	5.484E-05	6.010E-05	6.536E-05	7.059E-05	7.576E-05	8.088E-05	8.588E-05	9.075E-05	9.560E-05	1.006E-04	1.062E-04	1.114E-04	1.168E-04	1.222E-04
-5.4	1.309E-05	1.528E-05	1.784E-05	2.075E-05	2.402E-05	2.759E-05	3.124E-05	3.492E-05	3.863E-05	4.234E-05	4.600E-05	4.965E-05	5.320E-05	5.672E-05	6.011E-05	6.350E-05	6.695E-05	7.028E-05	7.389E-05	7.761E-05	8.138E-05
-5.4	2.344E-05	2.754E-05	3.211E-05	3.715E-05	4.271E-05	4.865E-05	5.461E-05	6.055E-05	6.644E-05	7.226E-05	7.797E-05	8.357E-05	8.901E-05	9.436E-05	9.950E-05	1.046E-04	1.098E-04	1.145E-04	1.200E-04	1.255E-04	1.312E-04
-5.4	3 137E-05	3 656E-05	4 236E-05	4 878E-05	5 589E-05	6.349E-05	7 116E-05	7 883E-05	8 646E-05	9 401E-05	1 015E-04	1 088E-04	1 159E-04	1 230E-04	1 297E-04	1 364F-04	1 433E-04	1 502E-04	1.574E-04	1 648E-04	1 723E-04
-5.3	3 356E-05	3.861E-05	4 421E-05	5.034E-05	5 709E-05	6.429E-05	7 150E-05	7 866E-05	8 576E-05	9 276E-05	9 965E-05	1.064E-04	1 129E-04	1 193E-04	1 255E-04	1 316E-04	1 378E-04	1 446E-04	1 511E-04	1 578E-04	1 647E-04
-5.3	1 926E-05	2 229E-05	2 566E-05	2 938E-05	3 350E-05	3 789E-05	4 234E-05	4 679E-05	5 125E-05	5 565E-05	6.001E-05	6.430E-05	6.851E-05	7 261E-05	7.660E-05	8 054E-05	8 458E-05	8 916E-05	9 338E-05	9 771E-05	1 021E-04
-5.3	1.626E-05	1 923E-05	2 169E-05	2.000E 00	2 718E-05	3.017E-05	3 308E-05	3 589E-05	3 860E-05	4 120E-05	4 370E-05	4 609E-05	4.837E-05	5.053E-05	5 261E-05	5.459E-05	5.660E-05	5.824E-05	6.034E-05	6 245E-05	6.460E-05
-5.3	3.083E-05	3 408E-05	2.103E-05	4.433E-05	4.064E-05	5.518E-05	6.064E-05	6.504E-05	7 100E-05	7.606E-05	9.086E-05	9.546E-05	9.090E-05	0.413E-05	0.816E-05	1.021E-04	1.061E-04	1.0085-04	1 130E-04	1 1925-04	1 2265-04
-53	3.762E-05	1 281E-05	4 853E-05	4.433L-05	4.304L-03	6.882E-05	7 500F-05	8 303E-05	8 995E-05	9.672E-05	1.033E-04	1.007E-04	1 159E-03	1 210E-04	1 276E-04	1.021E-04	1 300E-04	1.050E-04	1.139L-04	1.102L-04	1.220L-04
-5.2	3.70ZE-05	3.667E-05	4.177E-05	4 738E-05	5 357E-05	6.014E-05	6.675E-05	7 330E-05	7.078E-05	9.617E-05	0.247E-05	0.861E-05	1.0465-04	1 1045-04	1.160E-04	1.2165-04	1.2855-04	1.3355-04	1 3045-04	1.0720-04	1.5195-04
-5.2	1 743E-05	2.012E-05	2 212E-05	2.645E-05	3.015E-05	3 411E-05	3.814E-05	1.330E-03	1.970L-05	5.025E-05	5.426E-05	5.810E-05	6 207E-05	6 586E-05	6 056E-05	7 322E-05	7 770E-05	9 110E-05	8 510E-05	8.01/E-05	0.324E-05
-5.2	1.7432-05	1 4625 05	1 6205 05	1 9055 05	1 002E 05	3.411L-03	2 275E 05	4.213L-03	4.022L-05	2 001E 05	2 0225 05	2 1725 05	2 20FE 05	2 420E 05	2 5405 05	2 6605 05	2 640E 05	2 0425 05	2.0575.05	4.072E.05	4 102E 05
-3.2	0.700E-05	1.403E-05	2 4445 05	1.000E-00	1.993E-05	2.107E-05	2.373E-03	2.0000	2.721E-00	2.00 IE-05	3.032E-03	3.172E-05	3.303E-05	3.429E-00	3.349E-03	3.000E-05	3.049E-03	3.042E-03	3.937E-03	4.073E-05	4.192E-03
-5.2	2.723E-05	3.052E-05	3.411E-05	3.796E-05	4.220E-05	4.001E-05	5.091E-05	5.507E-05	5.909E-05	0.295E-05	0.004E-05	7.017E-05	7.352E-05	1.071E-05	7.974E-05	0.200E-UD	0.002E-00	0.001E-00	9.102E-05	9.476E-05	9.607E-05
-5.2	3.515E-05	3.954E-05	4.440E-05	4.973E-05	5.561E-05	6.180E-05	6.797E-05	7.402E-05	7.996E-05	8.5//E-05	9.141E-05	9.690E-05	1.022E-04	1.073E-04	1.122E-04	1.171E-04	1.229E-04	1.2/3E-04	1.324E-04	1.377E-04	1.432E-04
-5.10	3.208E-05	3.615E-05	4.070E-05	4.575E-05	5.136E-05	5.735E-05	6.337E-05	6.936E-05	7.528E-05	8.115E-05	8.692E-05	9.257E-05	9.808E-05	1.034E-04	1.086E-04	1.137E-04	1.203E-04	1.248E-04	1.304E-04	1.360E-04	1.419E-04
-5.10	1.975E-05	2.225E-05	2.511E-05	2.832E-05	3.193E-05	3.584E-05	3.983E-05	4.383E-05	4.787E-05	5.191E-05	5.592E-05	5.991E-05	6.382E-05	6.769E-05	7.144E-05	7.516E-05	7.980E-05	8.327E-05	8.730E-05	9.142E-05	9.567E-05
-5.14	6.868E-06	7.515E-06	8.278E-06	9.150E-06	1.015E-05	1.125E-05	1.239E-05	1.356E-05	1.474E-05	1.593E-05	1.713E-05	1.833E-05	1.952E-05	2.072E-05	2.189E-05	2.305E-05	2.400E-05	2.523E-05	2.648E-05	2.774E-05	2.902E-05
-5.12	1.743E-05	1.929E-05	2.140E-05	2.373E-05	2.631E-05	2.902E-05	3.171E-05	3.433E-05	3.686E-05	3.930E-05	4.165E-05	4.391E-05	4.603E-05	4.805E-05	4.998E-05	5.189E-05	5.370E-05	5.565E-05	5.763E-05	5.969E-05	6.178E-05
-5.1	2.782E-05	3.085E-05	3.431E-05	3.821E-05	4.258E-05	4.728E-05	5.200E-05	5.670E-05	6.133E-05	6.591E-05	7.040E-05	7.481E-05	7.909E-05	8.323E-05	8.725E-05	9.124E-05	9.560E-05	9.977E-05	1.040E-04	1.084E-04	1.130E-04
-5.0	3.006E-05	3.324E-05	3.690E-05	4.107E-05	4.580E-05	5.090E-05	5.611E-05	6.135E-05	6.659E-05	7.183E-05	7.703E-05	8.216E-05	8.722E-05	9.218E-05	9.699E-05	1.018E-04	1.072E-04	1.122E-04	1.175E-04	1.228E-04	1.284E-04
-5.0	2.388E-05	2.628E-05	2.906E-05	3.223E-05	3.587E-05	3.986E-05	4.395E-05	4.809E-05	5.231E-05	5.657E-05	6.085E-05	6.511E-05	6.934E-05	7.355E-05	7.767E-05	8.177E-05	8.641E-05	9.078E-05	9.528E-05	9.993E-05	1.047E-04
-5.04	1.143E-05	1.248E-05	1.369E-05	1.509E-05	1.670E-05	1.850E-05	2.037E-05	2.228E-05	2.429E-05	2.635E-05	2.845E-05	3.061E-05	3.281E-05	3.502E-05	3.722E-05	3.940E-05	4.187E-05	4.425E-05	4.670E-05	4.925E-05	5.185E-05
-5.02	3.663E-06	4.093E-06	4.671E-06	5.346E-06	6.089E-06	6.853E-06	7.591E-06	8.292E-06	8.932E-06	9.507E-06	1.003E-05	1.049E-05	1.090E-05	1.124E-05	1.154E-05	1.185E-05	1.224E-05	1.251E-05	1.278E-05	1.305E-05	1.333E-05
-5	1.723E-05	1.888E-05	2.087E-05	2.319E-05	2.586E-05	2.875E-05	3.173E-05	3.474E-05	3.773E-05	4.072E-05	4.366E-05	4.658E-05	4.942E-05	5.220E-05	5.488E-05	5.754E-05	6.063E-05	6.343E-05	6.628E-05	6.924E-05	7.228E-05

Ακολουθούν τα νέα διαγράμματα μεταβολής της περιβάλλουσας με απορρόφηση σε σχέση με την απόσταση *d* του πομπού από τον βιολογικό σκεδαστή.



Σχήμα (7.18α) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-6 έως x=-5.82m



Σχήμα (7.18β) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.80 έως x=-5.62m



Σχήμα (7.18γ) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του *d* με απορρόφηση για *x*=-5.6 έως *x*=-5.42m



Σχήμα (7.18δ) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.40 έως x=-5.22m



Σχήμα (7.18ε) : Διάγραμμα μεταβολής της περιβάλλουσας συναρτήσει του d με απορρόφηση για x=-5.20 έως x=-5m

Φυσικά οι νέες καμπύλες που εμπεριέχουν και τον παράγοντα απορρόφησης εξακολουθούν να αυξάνονται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει του *d* με αυξημένη όμως κλίση.

7.6.3 Στατιστική μελέτη της απόστασης d

Όπως φάνηκε στα παραπάνω διαγράμματα η απόσταση d του πομπού από το κεφάλι του χρήστη συνδέεται άμεσα με το λαμβανόμενο σήμα στο δέκτη. Υπενθυμίζουμε ότι η ακριβής απόσταση του κεφαλιού από την κεραία αποτελεί τυχαία μεταβλητή και μελέτες που εξετάζουν την μεταβολή της καταλήγουν πως συμπεριφέρεται σύμφωνα με το στατιστικό μοντέλο του Rayleigh. Συνήθως μέση απόσταση της κεραίας του κινητού από το κεφάλι του χρήστη θεωρείται η τιμή 2.5 cm, ενώ είναι αδύνατο να παίρνει τιμές κάτω από 1 cm, καθώς η κεραία δεν έρχεται σε επαφή με το κεφάλι λόγω της θέσης της πάνω στη συσκευή.

Στη συνέχεια εξετάζουμε πώς συμπεριφέρεται η περιβάλλουσα του σήματος στην περίπτωση που η απόσταση d του κινητού από το χρήστη μεταβάλλεται, ενώ ο βιολογικός σκεδαστής παραμένει σταθερός σε ένα κάθε φορά σημείο από το (-6,0) έως το (-5,0). Η απόσταση d λαμβάνεται σύμφωνα με την κατανομή Rayleigh, η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει την τυχαία συμπεριφορά του χρήστη κινητού τηλεφώνου. Σε κάθε θέση x, με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB, λαμβάνονται κατά Rayleigh 40 τυχαίες τιμές για την απόσταση d οι οποίες αντιστοιχούν σε κάποια τιμή περιβάλλουσας. Έτσι, προκύπτει ένα δείγμα 40 τιμών περιβάλλουσας για τις 51 διαφορετικές θέσεις x. Λόγω της γραμμικής σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας και απόστασης d αναμένεται οι 40 τιμές του δείγματος να ακολουθούν κατανομή Rayleigh, αφού η επιλογή τους έγινε κατά Rayleigh με μέση τιμή 2,6 cm. Η επαλήθευση γίνεται με έλεγχο προσαρμογής X^2 με 2 βαθμούς ελευθερίας (4 υποδιαστήματα). Τα αποτελέσματα ενός ελέγχου παρουσιάζονται στον πίνακα (7.23).

Θέση <i>x</i> (m)	X^2 test	Θέση <i>x</i> (m)	X^2 test			
-6	3.7175	-5.48	7.0405			
-5.98	3.6088	-5.46	3.4004			
-5.96	5.2726	-5.44	0.0435			
-5.94	5.5017	-5.42	17.8517			
-5.92	1.4587	-5.4	3.4583			
-5.9	5.2178	-5.38	10.3700			
-5.88	0.9133	-5.36	2.0846			
-5.86	14.2532	-5.34	1.9438			
-5.84	1.9359	-5.32	4.0594			
-5.82	2.9355	-5.3	3.3890			
-5.8	4.2323	-5.28	5.3217			
-5.78	0.7608	-5.26	3.3353			
-5.76	2.1320	-5.24	0.6723			
-5.74	8.7160	-5.22	8.3657			
-5.72	2.6778	-5.2	0.8408			
-5.7	9.7762	-5.18	1.4851			
-5.68	2.8061	-5.16	2.9770			
-5.66	4.1876	-5.14	13.1741			
-5.64	1.6893	-5.12	0.1141			
-5.62	0.8704	-5.1	1.2340			
-5.6	2.8318	-5.08	5.3516			
-5.58	5.4417	-5.06	1.8363			
-5.56	4.2233	-5.04	4.6950			
-5.54	6.4236	-5.02	1.7776			
-5.52	1.2071	-5	7.8603			
-5.5	2.7612					
Μέσος όρος $X^2 = \frac{\sum_{1}^{51} X^2}{51} = 4.2791 \prec 5.991$						

Πίνακας (7.23) : έλεγχος X^2 για Rayleigh

Το συμπέρασμα είναι ότι ακολουθείται κατανομή Rayleigh με επίπεδο σημαντικότητας α=0.10. Αν εξετάσουμε πιο αναλυτικά τον πίνακα, θα δούμε ότι σε ποσοστό άνω του 80% των περιπτώσεων είναι αποδεκτή η κατανομή Rayleigh, ενώ υπάρχουν και κάποια άστοχα αποτελέσματα με κακό αποτέλεσμα X^2 .

7.6.4 Έλεγχος VeCa για το αντίστροφο πείραμα

Στο σημείο αυτό είμαστε σε θέση να μελετήσουμε το συνολικό φαινόμενο που προσεγγίστηκε με τη συγκεκριμένη προσομοίωση ακριβώς όπως έγινε και στο αρχικό πείραμα. Η απόσταση *d* λαμβάνει τιμές μεταξύ 1 και 5 cm με κατανομή Rayleigh, ενώ το σύστημα άνθρωπος-δέκτης διανύει με σταθερή ταχύτητα απόσταση 1 μέτρου πάνω σε ευθεία μέσα στο δωμάτιο της προσομοίωσης. Ο σταθμός βάσης-πομπός παραμένει ακίνητος στην άλλη πλευρά του δωματίου. Αυτό που ενδιαφέρει είναι η στατιστική συμπεριφορά του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη.

Ο χρήστης με το κινητό ξεκινά από τη θέση x=-6 m και με σταθερό βήμα 2 cm καταλήγει μετά από 50 διαδοχικές θέσεις στη συντεταγμένη x=-5 m. Σε κάθε μια θέση x από τις 51 συνολικά επιλέγεται και μια απόσταση d με τυχαίο τρόπο από το μαθηματικό πρόγραμμα MATLAB με κατανομή Rayleigh μέσης τιμής d=2.4 cm. Έτσι, σε κάθε θέση x αντιστοιχεί μια δεδομένη τιμή λαμβανόμενου σήματος και προκύπτει ένα δείγμα 51 τιμών που προσεγγίζει ικανοποιητικά την αληθινή κίνηση του χρήστη στο δωμάτιο. Η κατανομή που τυχόν ακολουθεί αυτό το δείγμα δείχνει τη στατιστική συμπεριφορά του λαμβανόμενου σήματος στις ειδικές συνθήκες της προσομοίωσής μας, δηλαδή σε ζεύξη εσωτερικού χώρου μη οπτικής επαφής παρουσία βιολογικού σκεδαστή. Το δείγμα που παρέχει κάθε φορά το πρόγραμμα MATLAB είναι διαφορετικό αφού εισάγεται η τυχαία επιλογή απόστασης d κατά Rayleigh. Ένα τυχαίο δείγμα παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

θέση <i>x</i> (m)	απόσταση <i>d</i> κατά Rayleigh (cm)	λαμβανόμενο σήμα
-6	3.2	9.7452E-05
-5.98	2.2	5.2000E-05
-5.96	2	2.6121E-05
-5.94	3	4.7546E-05
-5.92	3.2	9.0084E-05
-5.9	3.2	1.1202E-04
-5.88	2.6	7.7755E-05
-5.86	2.2	3.7246E-05
-5.84	2.8	4.0087E-05
-5.82	1.4	2.7178E-05
-5.8	1.6	4.7006E-05
-5.78	1.8	5.1618E-05
-5.76	1.8	3.0299E-05
-5.74	2.6	3.3104E-05
-5.72	2.8	7.6311E-05
-5.7	2.2	7.6176E-05
-5.68	1.8	5.5151E-05
-5.66	2.8	6.0149E-05
-5.64	2.6	4.1326E-05
-5.62	3.2	9.8694E-05
-5.6	2	7.6602E-05
-5.58	2.6	9.6440E-05
-5.56	2	4.6887E-05
-5.54	2.6	4.5699E-05
-5.52	2.6	7.7593E-05
-5.5	1.8	6.6741E-05

Πίνακας (7.24) : Παραγωγή τυχαίου δείγματος

-5.48	1	3.6485E-05
-5.46	1.8	3.9386E-05
-5.44	2.2	3.1238E-05
-5.42	2.6	6.6443E-05
-5.4	3	1.0146E-04
-5.38	1.6	5.0344E-05
-5.36	3.4	6.8510E-05
-5.34	1.2	1.9230E-05
-5.32	1.8	4.9638E-05
-5.3	1.4	4.8530E-05
-5.28	2.2	6.6754E-05
-5.26	1.6	2.6453E-05
-5.24	2.2	2.3751E-05
-5.22	2.8	6.2955E-05
-5.2	2	6.1802E-05
-5.18	2	5.7349E-05
-5.16	1.2	2.2254E-05
-5.14	2.4	1.3557E-05
-5.12	2	2.9017E-05
-5.1	1.8	4.2585E-05
-5.08	3.2	8.2159E-05
-5.06	2.6	5.2313E-05
-5.04	1.8	1.6702E-05
-5.02	3.2	1.0495E-05
-5	2	2.8755E-05

Το δείγμα 51 τιμών λαμβανόμενου σήματος που προέκυψε ελέγχεται ως προς την προσαρμογή του στις κατανομές Rayleigh και VeCa. Επαναλαμβάνεται η γνωστή διαδικασία.

Η παράμετρος σ για την κατανομή Rayleigh προκύπτει εξισώνοντας τη θεωρητική σχέση (7.19) της μέσης τιμής με τη μέση τιμή μ που προκύπτει από το δείγμα :

$$E[x] = \sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma = \mu \Longrightarrow \sigma = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\mu$$

οπότε

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{51} r_j}{51} = 5.2852 \cdot 10^{-5} \implies \sigma = 4.2180 \cdot 10^{-5}$$

Αντίστοιχα, για την κατανομή VeCa προκύπτουν τα εξής :

$$\mathbf{E}[\mathbf{x}] = \frac{\pi}{2}\sigma_1\sigma_2 = \mu \Longrightarrow \sigma_1\sigma_2 = \frac{2}{\pi}\mu$$

άρα

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^{51} r_j}{51} = 5.2852 \cdot 10^{-5} \Longrightarrow \sigma_1 \sigma_2 = 3.3664 \cdot 10^{-5}$$

Παρουσιάζουμε στον επόμενο πίνακα έναν τυχαίο έλεγχο και για τις δυο κατανομές ταυτόχρονα. Τα υποδιαστήματα είναι *k*=5 και οι βαθμοί ελευθερίας 3.

Διάστημα i	Παρατηρούμενες μετρήσεις Ο _i	Αναμενόμενες μετρήσεις Ε _i κατά VeCa	Αναμενόμενες μετρήσεις Ε _i κατά Rayleigh	$X_{VeCa}^{2} = \sum_{i=1}^{5} \frac{(O_{i} - E_{i})^{2}}{E_{i}} = 3.0008$
1	12	14.7481	8.4214	$\sum_{i=1}^{5} (O_i - E_i)^2$
2	15	15.1290	17.8013	$X_{Rayleigh}^{2} = \sum_{i=1}^{n} \frac{E_{i}}{E_{i}} = 5.7124$
3	12	9.5942	14.7275	
4	7	5.4478	7.2086	$X_{3,a}^2 = 7.815$
5	5	2.9407	2.2814	-,-

Πίνακας (7.25) : Αναλυτικός έλεγχος X^2 για VeCa και Rayleigh

Παρατηρούμε ότι ισχύει $X_{test}^2 \prec X_{k-2,a}^2$ με επίπεδο σημαντικότητας α=0.10 τόσο για την κατανομή VeCa όσο και για την κατανομή Rayleigh. Η υπόθεσή μας ότι ακολουθείται κατανομή VeCa είναι αποδεκτή. Επίσης, ο έλεγχος X^2 για τη Rayleigh επιβεβαιώνει ότι το δείγμα ακολουθεί και την κατανομή αυτή, αλλά είναι φανερό ότι υπερτερεί η κατανομή VeCa. Για να γενικευτεί το συμπέρασμά μας εκτελούμε 1000 ελέγχους και καταγράφουμε τις τιμές στις οποίες συγκλίνουν τα αποτελέσματα X^2 για τις δυο κατανομές :

$$\overline{\frac{X_{VeCa}^2}{X_{Rayleigh}^2}} = 5.1693$$

$$\overline{X_{Rayleigh}^2} = 9.8119$$

Ο μέσος όρος των ελέγχων X^2 για την κατανομή Rayleigh είναι μεγαλύτερος της κρίσιμης τιμής και γι' αυτό απορρίπτεται. Ωστόσο, σε αρκετές περιπτώσεις ο έλεγχος αυτός είναι εντός του αποδεκτού ορίου, καθώς η προσομοίωσή μας αναφέρεται σε συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLOS). Η κατανομή VeCa είναι αυτή που περιγράφει καλύτερα το φαινόμενο, διότι λαμβάνει υπόψη και την παρουσία του βιολογικού σκεδαστή.

Η σύγκριση των δυο κατανομών και των πειραματικών τιμών για τον έλεγχο που ήδη αναφέραμε φαίνεται στο σχήμα (7.19) με τις καμπύλες αθροιστικής πιθανότητας :





ή ισοδύναμα στο σχήμα (7.20) με τις καμπύλες των αντίστοιχων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (PDF) :



Σχήμα (7.20) : Σύγκριση των PDF.

7.7 Επίλογος

Η επαλήθευση της στατιστικής κατανομής VeCa επιτεύχθηκε και στις δυο προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Και στις δυο διατάξεις που μελετήθηκαν υπήρχε ζεύξη σε εσωτερικό χώρο (δωμάτιο) μη οπτικής επαφής με επίδραση της παρουσίας βιολογικού σκεδαστή δίπλα στην κεραία του κινητού. Αποδείχτηκε ότι η κατανομή VeCa είναι αυτή που μοντελοποιεί ιδανικά το λαμβανόμενο σήμα σε κάθε αντίστοιχη περίπτωση που ισχύουν οι δεδομένες συνθήκες. Αυτό που άλλαξε στις δυο προσομοιώσεις ήταν ο ρόλος του πομπού και του δέκτη ο οποίος αντιστράφηκε. Αρχικά θεωρήθηκε ως πομπός το κινητό και ως δέκτης ο ακίνητος σταθμός βάσης, ενώ στη συνέγεια ο δέκτης αποτελούσε τη συσκευή που λάμβανε σήμα από τον σταθερό πομπό. Το λαμβανόμενο σήμα, και συγκεκριμένα η λαμβανόμενη περιβάλλουσα στο δέκτη, εμφάνισε και στις δυο περιπτώσεις παρόμοια συμπεριφορά με μικρές αποκλίσεις. Το σημαντικό είναι ότι σε καμία περίπτωση το συνολικό φαινόμενο δεν απομακρύνθηκε από το στατιστικό μοντέλο της VeCa. Αυτό επιβεβαιώνει και την αρχική μας σκέψη ότι η κεραία-δίπολο στην προσομοίωση διατηρεί τις ιδιότητες της είτε λειτουργεί σαν πομπός είτε σαν δέκτης και επομένως ισχύει μια σταθερή αμοιβαιότητα στα φαινόμενα διάδοσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] F.E. Vellis and C.N. Capsalis, "A Model for the Statistical Characterization of Fast Fading in the Presence of a User", *Wireless Personal Communications* 15:207-219, 2000.

[2] H.R. Chuang, "Human Operator Coupling Effects on Radiation Characteristics of a Portable Communication Dipole Antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.42, No.4, April 1994.

[3] N. Kuster and Q. Balzano, "Energy Absorption Mechanism by Biological Bodies in the Near Field of Dipole Antennas above 300 MHz", *IEEE Transactions on vehicular technology*, Vol.41, No.1, February 1992.

[4] Χ. Καψάλης-Π. Κωττής, "Κεραίες – Ασύρματες Ζεύζεις", 2003.

[5] N. Blaunstein, J.B. Andersen, "Multipath Phenomena in Cellular Networks", 2002

[6] Μ.Ε. Θεολόγου, "Δίκτυα Κινητών Και Προσωπικών Επικοινωνιών", 2002

[7] Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications (Principles and Practice)"

[8] C. Balanis, "Antenna Theory, Analysis And Design (2nd edition)"

[9] S.R. Saunders, "Antennas And Propagation For Wireless Communication Systems"

[10] Kazimierz Siwiak, "*Radiowave Propagation And Antennas For Personal Communications (2nd edition)*", 1998.

[11] Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, "Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική", Εκδόσεις Συμεών, 1999.

[12] A. Fourie and D. Nitch, "SuperNEC : Antenna and Indoor-Propagation Simulation Program", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol.42, No.3, June 2000.

[13] Φ. Κωνσταντίνου, "Κινητές Επικοινωνίες – Μοντέλα Ραδιοκάλυψης", 2002

[14] K.Meier, "The Dependence of Electromagnetic Energy Absorption upon Human-Head Modeling at 1800 MHz", *IEEE Transactions on Microwave Theory*, Vol.45, No.11, November 1997.

[15] E.F.T. Martijn and M.H.A.J. Herben, "Characterization of Radio Wave Propagation Into Buildings at 1800 MHz", Vol.2, 2003.

[16] H. Hashemi, "The Indoor Propagation Channel", *Proceedings of the IEEE*, Vol.81, No.7, July 1993.

[17] B.W. Lindgren, "Statistical Theory", Third Edition, Macmillan, 1968.

[18] T. Sarkar, Z. Ji, K. Kim, A. Medouri and M. Salazar-Palma, "A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol.45, No.3, June 2003.

[19] V. Nikolopoulos, M. Fiacco, S. Stavrou and S.R. Saunders, "Narrowband Fading Analysis of Indoor Distributed Antenna Systems", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol.2, 2003.