

Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

## Χαρακτηρισμός των Χρονικών Μεταβολών του Ασύρματου Διαύλου υπό την Επίδραση Κινούμενων Ατόμων στο Εσωτερικό Αεροσκάφους

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεοφάνη Γ. Μπεκρή

Επιβλέπων : Φίλλιπος Κωνσταντίνου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010



Εθνικό Μετσοβίο Πολύτεχνειο Σχολή Ηλεκτρολογών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Συστηματών Μεταδοσής Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών

## Χαρακτηρισμός των Χρονικών Μεταβολών του Ασύρματου Διαύλου υπό την Επίδραση Κινούμενων Ατόμων στο Εσωτερικό Αεροσκάφους

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θεοφάνη Γ. Μπεκρή

Επιβλέπων : Φίλιππος Κωνσταντίνου Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την  $31^\eta\, M$ ήνα Έτος.

.... Φίλλιπος Κωνσταντίνου Καθηγητής ΕΜΠ ..... Αθανάσιος Παναγόπουλος Λέκτορας ΕΜΠ ..... Ιωάννης Κανελλόπουλος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

..... Θεοφάνη Γ. Μπεκρή

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Θεοφάνη Γ. Μπεκρή, 2010. 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

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο χαρακτηρισμός των χρονικών μεταβολών του ασύρματου διαύλου υπό την επίδραση κινούμενων ατόμων στο εσωτερικό χώρο ενός αεροσκάφους. Συγκεκριμένα, γίνεται η μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύος σε συνδυασμό με την κίνηση ενός ή περισσότερων ατόμων στον διάδρομο ενός αεροσκάφους προσομοιώνοντας την κίνηση των επιβατών και εξετάζεται η επίδραση τους στον ασύρματο δίαυλο μέσα στο αεροσκάφος.

Η μοντελοποίηση του ασύρματου διαύλου περιλαμβάνει την στατιστική επεξεργασία των διαλείψεων που υφίσταται λόγω της ανθρώπινης κίνησης και εξάγονται χρήσιμες στατιστικές παράμετροι, όπως ο χρόνος συνοχής, η διασπορά Doppler καθώς και 2<sup>ης</sup> τάξης στατιστικές παράμετροι που εξαρτώνται από την ταχύτητα κίνησης του ατόμου.

Η μοντελοποίηση του ασύρματου διαύλου μπορεί να βοηθήσει στο σωστό σχεδιασμό ενός δικτύου που θα καλύπτει ικανοποιητικά των εσωτερικό χώρο του αεροσκάφους και θα λαμβάνει υπόψη τις χρονικές μεταβολές που υφίσταται ο δίαυλος.

#### Λέξεις κλειδιά

Χρονικές μεταβολές σήματος, χρόνος συνοχής, διασπορά Doppler, ρυθμός διέλευσης κατωφλίου, μέση διάρκεια διαλείψεων.

#### Abstract

The purpose of this diploma thesis is to determine the characteristics of temporal variations of a radio signal induced by the movement of people inside of an aircraft. We have measured the received signal in various scenarios of moving one or more people in the aisle of the aircraft. Thus, we have managed to simulate the moving of the passengers through a flight. In the received signal we have measured the temporal variations induced by people at three different frequency bands 1.8, 2.1  $\kappa \alpha t$  2.45 GHz.

The characteristics of the received signal that we examine were mainly the fast and slow fadings. Additionally, we examined the fading statistics like the Coherence Time, Doppler spread, Level Crossing Rate and Average Fade Duration that all depend on the speed and the number of people. The Knowledge of these characteristics of the received signal will help for the future development of technology for in-cabin wireless networks.

#### Key words

Temporal Variations; Coherence Time; Doppler Spread; Level Crossing Rate; Average Fade Durations.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου ο οποίος με ενέπνευσε να ασχοληθώ με τον τομέα των τηλεπικοινωνιών, καθώς και τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής τον κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο και τον Ιωάννη Κανελλόπουλο.

Επιπλέον, θα ήθελα ιδιαιτέρως να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κ. Νεκτάριο Μωραΐτη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.

Θέλω ακόμη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Δημήτρη που χάρη στην διαρκή του υποστήριξη και υπομονή κατάφερα να πετύχω την διεκπεραίωση των σπουδών μου. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όσους στάθηκαν δίπλα μου, με στήριξαν πνευματικά και με βοήθησαν να φτάσω σε αυτό το σημείο.

## Πίνακας Περιεχομένων

Abstract       7         Ευχαριστίες       8         Πίνακας Περιεχομένων       9         Πίνακας Σχημάτον       10         Κατάλογος Πινάκων       14         Κεφάλαιο 1°       15         Εισαγωγή       15         1.1 Αεροναυτικά συστήματα επικοινωνίας       15         1.2 Προηγούμενος μελέτες       18         Κεφάλαιο 2°       8         Βασικές Αρχές Ασύρματης Διάδοσης       25         2.1 Μηχανισμοί διάδοσης       25         2.2 Είδη διάλείνεων       26         2.2 Διαλείνεις μεγάλης κλίμακας       26         2.2 Διαλείνεις μεγάλης κλίμακας       26         2.2 Είδη διάλείνεων       26         2.2 Είδη διάλείνεων       26         2.2 Είδη διάλείνεων       26         2.4 Συνάφτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανύμενου σήματος       30         2.4 Συνάφτηση κατανομής διάλείνεων και Μαστματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανύμενου σήματος       35         2.5 Δυνάφτηση κατανομής διάλείνεων και Μείδλουσας του σήματος       35         2.5 Δυνάφτηση κατανομής διάλείνεων και Μείδλουσας του σήματος       36         2.6 Φ Ρυθμός Διέλευσης Κατοφλίου της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6 β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περήγρωλου του συμαθαλώμενων διάλων       <	Περίληψη	5
Ευχαριστίες	Abstract	7
Πίνακας Τερμεριφίνον       9         Πίνακας Σχημάτον       10         Κατάλογος Πινάκον       14         Κεφάλαιο 1°       15         Είσαγογή       15         1.1 Λεροναντικά συστήματα επικοινωνίας       15         1.2 Προηγούμενες μελέτες       18         Κεφάλαιο 1°       18         Βασικές Αρχές Ασύρματης Διάδοσης       25         2.1 Ποηγούμενες μελέτες       26         2.2 ειδη διαλείψεων       26         2.2 ειδη διαλείψεων       26         2.2 ειδη διαλείψεων       26         2.2 ειδη διαλείψεων       26         2.3 Ευνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου σήματος       27         2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       35         2.5 Συνάρτηση κατανομής δυλείψεων καγleigh       35         2.5 Δυνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       35         2.5 Δυνάρτηση κατανοψής διαλείψεων καγleigh       35         2.5 Δυνάρτηση κατανοψής διαλείψεων καγleigh       36         2.6 Αυθψός Διέλευσης Καταφλίου της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.5 Δυνάρτηση καταναψήδι διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6 Διέλευσης Καταφίων της πριβάλλουσας του σήματος       37         2.6 Διάρκεια Διάλείψεων τη	Ευχαριστίες	8
Πίνακας Σχημάτων       10         Κατάλογος Πινάκον       14         Κεφάλαιο 1°       Εισαγωγή       15         Εισαγωγή       15         1.1 Αεροναυτικά συστήματα επικοινωνίας       15         1.2 Προηγούμενες μελέτες       18         Κεφάλαιο 2°       25         2.1 Προηγούμενες μελέτες       18         Κεφάλαιο 2°       25         2.1 Μηχανισμοί διάδοσης       25         2.2 Ιώπλείψεων       26         2.2.β Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας       26         2.2.β Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας       27         2.2.β Διαλείψεις μικρής κλίμακας       27         2.2.β Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας       27         2.3 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου σήματος       30         2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απότασης       35         2.5 Συναρτήσεις κατανομής διαλείψεων πείραπος       35         2.5 Δυνάρτηση κατανομής διαλείψεων Νείαπ       36         2.5 Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Νείαπ       36         2.6 Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6 Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6 βιάση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6 βιάση Διάρκει	Πίνακας Περιεχομένων	9
Κατάλογος Πινάκων       14         Κεφάλαιο 1°       15         Εισαγωγή       15         1.1 Λεροναυτικά συστήματα επικοινωνίας       15         1.2 Προηγούμενες μελέτες       18         Κεφάλαιο 2°       26         Βασικές Αρχές Λσύρματης Διάδοσης       25         2.1 Μηχανισμοί διάδοσης       26         2.2 Είδη διαλείψεων       26         2.2.2 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας       26         2.2.2 Διαλείψεις μεγής κλίμακας       27         2.2.β.1 Κατηγοριοποίηση των διαλείψεων μικρής κλίμακας       28         2.3 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου σήματος       30         2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       35         2.5 Συναρτήσεις κατανομής διαλείψεων Rayleigh.       35         2.5.3 Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh.       35         2.5.4 Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος.       37         2.6.4 Νυψμός Διέλευσης Κατωφλίου της περιβάλλουσας του σήματος.       37         2.6.5 Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος.       37         2.7 Παράμετροι για τον χαρακτηρισμό χρονικά μεταβαλλόμενων διάδλων.       38         2.8 Το μοντέλο Suzuki       40         2.9 Το μοντέλο Suzuki       40         2.9 Το μοντέλο Suz	Πίνακας Σχημάτων	10
Κεφάλαιο 1°       15         Εισαγωγή	Κατάλογος Πινάκων	14
Κεφάλαιο 1°       15         Εισαγωγή		
Ι       1       Λεροναντικά συστήματα επκοινωνίας       15         1       Λεροναντικά συστήματα επκοινωνίας       15         1       Γιροηγούμενες μελέτες       18         Κεφάλαιο 2"       Βασικές Αρχές Λσύρματης Διάδοσης       25         2.1       Μηχανσμοί διάδοσης       26         2.2       2.2       Είδη διαλείψειον       26         2.2       2.2       Διαλείψειον       26         2.2       Διαλείψεις μκγά ης κλίμακας       26         2.2       Διαλείψεις μκγής κλίμακας       26         2.2       Διαλείψεις μκγής κλίμακας       26         2.2       Διαλείψεις μκγής κλίμακας       28         2.3       Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του δαλείψεων μικρής κλίμακας       28         2.3       Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       30         2.4       Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου σήματος       35         2.5       Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων και είσαπ       36         2.5       Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων και αλαλείμεων       36         2.6       Ρυθμός Διέλευσης Κατανομίου της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6       Ματορτικά Διδείψεωσης Καταφλίου της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6	Κεφάλαιο 1°	
1.1       Αεροναστικά συστήματα επικοινωνίας       15         1.2       Προηγούμενες μελέτες       18         Κεφάλαιο 2°       Βασικές Αρχές Ασύρματης Διάδοσης       25         2.1       Μηχανισμοἱ διάδοσης       25         2.2       Είδη διαλείψεων       26         2.2.α       Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας       26         2.2.β       Λιαλείψεις μεγάλης κλίμακας       27         2.2.β       Λιαλείψεις μεγάλης κλίμακας       27         2.2.β       Ι Κατηγοριοποίηση τον διαλείψεων μικρής κλίμακας       28         2.3       Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       30         2.4       Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       35         2.5.α       Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rician       36         2.6.β       Διάλευσης Καταφλίου και Μείση Διάρκεια Διαλείψεων       36         2.6.β       Μετοφήλαιο Της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6.β       Ματοφικεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.7       Παρύμεςο μέλευσης Κατοφλίου της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.7       Παρύμεςο Ιτώρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.7       Παρύμος Διέλευσης Κατοφλίου και Μεσήσεων της περιβάλλουσας του σήματος       37	Εισαγωγή	15
1.2 Προηγούμενες μελέτες       18         Κεφάλαο 2"       25         2.1 Μηχανισμοί διάδοσης       25         2.2 Είδη διαλείψεου       26         2.2.α Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας       26         2.2.α Διαλείψεις μεγής κλίμακας       26         2.2.β Διαλείψεις μεγής κλίμακας       26         2.2.β Διαλείψεις μεγής κλίμακας       27         2.2.β Διαλείψεις μεγής κλίμακας       28         2.3 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου       36         σήματος       30         2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       35         2.5.Σ Συναρτήσεις κατανομής του λαμβανόμενου σήματος       35         2.5.α Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       35         2.5.β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rician       36         2.6 Ρυθμός Διέλευσης Καταφλίου και Μέση Διάρκεια Διαλείψεων       36         2.6 Δ βάση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6 β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       38         2.8 Το μοντέλο Suzuki       40         2.9 Το μοντέλο Loo       43         Κεφάλαιο 3"       45         3.1 Περιγραφή μέρρου και μεθοδολογία μέτρησης       45         3.2 Περιγραφή μάρου και μεθοδολογία μέτρησης       45 <td>1.1 Αεροναυτικά συστήματα επικοινωνίας</td> <td>15</td>	1.1 Αεροναυτικά συστήματα επικοινωνίας	15
Κεφάλαιο 2°       25         Baarkéς Αρχές Ασύματης Διάδοσης	1.2 Προηγούμενες μελέτες	18
Βασικές Αρχές Ασύρματης Διάδοσης       25         2.1 Μηχανοιριοί διάδοσης       25         2.2 Είδη διαλείψεων       26         2.2. μαλείψεως μεγάλης κλίμακας       26         2.2. β Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας       27         2.2. β Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας       28         2.3 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου       30         2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       30         2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       35         2.5 Συναρτήσεις κατανομής του λαμβανόμενου σήματος       35         2.5. Δυνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       35         2.5. β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       35         2.5. β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       36         2.6. α Ρυθμός Διέλευσης Καταφλίου της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6. β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6. β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6. β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6. β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       36         2.6. β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6. β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37	Κεφάλαιο 2°	
2.1 Μηχανισμοί διάδοσης	Βασικές Αρχές Ασύρματης Διάδοσης	25
2.2 Είδη διαλείψεων	2.1 Μηχανισμοί διάδοσης	25
2.2.α Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας	2.2 Είδη διαλείψεων	26
2.2.β Διαλείψεις μικρής κλίμακας	2.2.α Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας	26
2.2.β.1 Κατηγοριοποίηση των διαλείψεων μικρής κλίμακας	2.2.β Διαλείψεις μικρής κλίμακας	27
2.3 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου σήματος	2.2.β.1 Κατηγοριοποίηση των διαλείψεων μικρής κλίμακας	28
σήματος       30         2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης       35         2.5 Συναρτήσεις κατανομής του λαμβανόμενου σήματος       35         2.5 Δυνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       35         2.5.β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       36         2.5.β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       36         2.5.β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh       36         2.6 Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου και Μέση Διάρκεια Διαλείψεων       36         2.6.α Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.6.β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος       37         2.7 Παράμετροι για τον χαρακτηρισμό χρονικά μεταβαλλόμενων διαύλων.       38         2.8 Το μοντέλο Suzuki       40         2.9 Το μοντέλο Loo       43         Κεφάλαιο 3°       Μετρητικό Σύστημα και Μεθοδολογία Μετρήσεων.       45         3.1 Περιγραφή μετρητικού συστήματος.       45         3.2 Περιγραφή μετρητικού συστήματος.       45         3.1 Δεισαγωγή       51         4.1 Εισαγωγή       51         4.2 Επεξεργασία Συνολικό Σήματος - Γρήγορες και Αργές Διαλείψεις       55         4.3 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενου Σήματος       76         4.4.1 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενου Σήμα       76 </td <td>2.3 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου</td> <td></td>	2.3 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου	
2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης	σήματος	30
2.5 Συναρτήσεις κατανομής του λαμβανόμενου σήματος	2.4 Συνάρτηση αυτοσυσγέτισης συναρτήσει της απόστασης	35
2.5.α Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh	2.5 Συναρτήσεις κατανομής του λαμβανόμενου σήματος	35
2.5.β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rician	2.5.α Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh	35
2.6 Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου και Μέση Διάρκεια Διαλείψεων	2.5.β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rician	36
2.6.α Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου της περιβάλλουσας του σήματος	2.6 Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου και Μέση Διάρκεια Διαλείψεων	36
2.6 β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος	2.6.α Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου της περιβάλλουσας του σήματος	
2.7 Παράμετροι για τον χαρακτηρισμό χρονικά μεταβαλλόμενων διαύλων. 38 2.8 Το μοντέλο Suzuki	2.6.β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος	
2.8 Το μοντέλο Suzuki       40         2.9 Το μοντέλο Loo       43         Κεφάλαιο 3°       43         Μετρητικό Σύστημα και Μεθοδολογία Μετρήσεων       45         3.1 Περιγραφή μετρητικού συστήματος       45         3.2 Περιγραφή μετρητικού συστήματος       45         3.2 Περιγραφή χώρου και μεθοδολογία μέτρησης       49         Κεφάλαιο 4°       51         Επεξεργασία Μετρήσεων και Αποτελέσματα       51         4.1 Εισαγωγή       51         4.2 Επεξεργασία Συνολικού Σήματος – Γρήγορες και Αργές Διαλείψεις       55         4.3 Υπολογισμός Χρόνου Συνοχής (Coherence Time) και Φάσματος Doppler (Doppler Spectrum)       71         4.4 Υπολογισμός Κατανομών του Λαμβανόμενου Σήματος       76         4.4.1 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενο Σήμα       76         4.4.2 Υπολογισμός Κατανομών για τις Γρήγορες Διαλείψεις       80         4.4.3 Υπολογισμός Κατανομών για τις Αργές Διαλείψεις       80         4.5 Στατιστικά Διαλείψεων       87         Κεφάλαιο 5°       92         Βιβλιογραφία       94	2.7 Παράμετροι για τον γαρακτηρισμό γρονικά μεταβαλλόμενων διαύλων.	
2.9 Το μοντέλο Loo       43         Κεφάλαιο 3°       45         Μετρητικό Σύστημα και Μεθοδολογία Μετρήσεων       45         3.1 Περιγραφή μετρητικού συστήματος       45         3.2 Περιγραφή χώρου και μεθοδολογία μέτρησης       49         Κεφάλαιο 4°       51         Επεξεργασία Μετρήσεων και Αποτελέσματα       51         4.1 Εισαγωγή       51         4.2 Επεξεργασία Συνολικού Σήματος – Γρήγορες και Αργές Διαλείψεις       55         4.3 Υπολογισμός Χρόνου Συνοχής (Coherence Time) και Φάσματος Doppler (Doppler Spectrum)       71         4.4 Υπολογισμός Κατανομών του Λαμβανόμενου Σήματος       76         4.4.1 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενου Σήματος       76         4.4.2 Υπολογισμός Κατανομών για τις Γρήγορες Διαλείψεις       80         4.5 Στατιστικά Διαλείψεων       87         Κεφάλαιο 5°       87         Γενικά Συμπεράσματα       92         Βιβλιογραφία       94	2.8 Το μοντέλο Suzuki	40
Κεφάλαιο 3° Μετρητικό Σύστημα και Μεθοδολογία Μετρήσεων	2.9 Το μοντέλο Loo	43
Μετρητικό Σύστημα και Μεθοδολογία Μετρήσεων	Κεφάλαιο 3°	
3.1       Περιγραφή μετρητικού συστήματος	Μετρητικό Σύστημα και Μεθοδολογία Μετρήσεων	45
3.2       Περιγραφή χώρου και μεθοδολογία μέτρησης	3.1 Περιγραφή μετρητικού συστήματος	45
Κεφάλαιο 4 <sup>0</sup> Επεξεργασία Μετρήσεων και Αποτελέσματα	3.2 Περιγραφή γώρου και μεθοδολογία μέτρησης	49
<ul> <li>Επεξεργασία Μετρήσεων και Αποτελέσματα</li></ul>	Κεφάλαιο 4°	
4.1 Εισαγωγή	Επεζεργασία Μετρήσεων και Αποτελέσματα	
<ul> <li>4.2 Επεξεργασία Συνολικού Σήματος – Γρήγορες και Αργές Διαλείψεις</li></ul>	4.1 Εισαγωνή	
<ul> <li>4.3 Υπολογισμός Χρόνου Συνοχής (Coherence Time) και Φάσματος Doppler (Doppler Spectrum)</li> <li>4.4 Υπολογισμός Κατανομών του Λαμβανόμενου Σήματος</li> <li>76</li> <li>4.4.1 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενο Σήμα</li> <li>76</li> <li>4.4.2 Υπολογισμός Κατανομών για τις Γρήγορες Διαλείψεις</li> <li>80</li> <li>4.4.3 Υπολογισμός Κατανομών για τις Αργές Διαλείψεις</li> <li>84</li> <li>4.5 Στατιστικά Διαλείψεων</li> <li>87</li> <li>Κεφάλαιο 5°</li> <li>Γενικά Συμπεράσματα</li> <li>92</li> </ul>	4.2 Επεξεργασία Συνολικού Σήματος – Γρήγορες και Αργές Διαλείψεις	
Spectrum)       71         4.4 Υπολογισμός Κατανομών του Λαμβανόμενου Σήματος       76         4.4.1 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενο Σήμα       76         4.4.2 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενο Σήμα       76         4.4.3 Υπολογισμός Κατανομών για τις Γρήγορες Διαλείψεις       80         4.4.3 Υπολογισμός Κατανομών για τις Γρήγορες Διαλείψεις       80         4.5 Στατιστικά Διαλείψεων       87         Κεφάλαιο 5°       76         Γενικά Συμπεράσματα       92         Βιβλιογραφία       94	4.3 Υπολογισμός Χρόνου Συνογής (Coherence Time) και Φάσματος Doppler (Doppler	
4.4 Υπολογισμός Κατανομών του Λαμβανόμενου Σήματος	Spectrum)	71
4.4.1 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενο Σήμα	4 4 Υπολογισμός Κατανομών του Λαμβανόμενου Σήματος	76
4.4.2 Υπολογισμός Κατανομών για τις Γρήγορες Διαλείψεις	4 4 1 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενο Σήμα	76
4.4.3 Υπολογισμός Κατανομών για τις Αργές Διαλείψεις       84         4.5 Στατιστικά Διαλείψεων       87         Κεφάλαιο 5° $Γενικά Συμπεράσματα$ 92         Βιβλιογραφία.       94	4 4 2 Υπολογισμός Κατανομών για τις Γρήγορες Λιαλείψεις	80
4.5 Στατιστικά Διαλείψεων	4 4 3 Υπολογισμός Κατανομών για τις Αργές Διαλείψεις	84
<ul> <li>Κεφάλαιο 5°</li> <li>Γενικά Συμπεράσματα</li></ul>	4 5 Στατιστικά Διαλείψεων	87
Γενικά Συμπεράσματα	<b>Κε</b> φάλαιο 5 <sup>°</sup>	
94	Γενικά Συμπεράσματα	92
Βιβλιογραφία	······································	
	Βιβλιογραφία	94

## Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Σενάριο για τον τρόπο που θα επικοινωνεί το ασύρματο δίκτυο του αεροσκάφους με το επίγειο δίκτ	υο. 16
Σγήμα 1.2 Κέρδος ισγύος συναρτήσει της απόστασης για τρία σημεία λήψης (στήριγμα κεφαλής, γεριών και	10
πελμάτων), (α) όταν δεν υπάργουν επιβάτες, (β) όταν η καμπίνα είναι γεμάτη, [1]	19
Σγήμα 1.3 Ομοαξονικό καλώδιο με τμήματα διαρορής (leaky cable). [2].	20
Σχήμα 1.4 Χαρακτηριστική απόκριση καναλιού (LOS)	
Σχήμα 1.5 Χαρακτηριστικό υπόδεινμα μεγάλης κλίμακας εξασθένηση για LOS σήμα	21
Σχήμα 1.6 Λιακυμάνσεις της τυγαίας μεταβλητής LOS σήμα (12 άνθοωποι)	22
Σχήμα 1.5 Σακοματούς της τοχαίας μοταριτητής, 200 σημα (12 ατορωκοτ)	22
$\Sigma_{r}$ ήμα 1.7 Σεναρία μετακτήσης ανορώτων μέσα στο εργαστηριο	22 V
για τα σενάρια: (c) S1-S3 και (d) S4-S6.	23
Σνήμα 2.1 Τοισδιάστατη μοντελοποίηση των κυμάτων που πορσπίπτουν στον δέκτη	30
Σχήμα 2.1 Τρισσαστατή μοντοκοκοιήση των κοματών κου κροσκατισση στο στοτική σκέδαση δύο διαστάσεων	31
Σχήμα 2.3 Μιναδική περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος για ισοτροπική σκέδαση δύο διαστάσεων (α)	
$2\lambda_{1}$ μμα 2.5 Μητασική κεριραλούου του λαμρανόμενου σηματός για ισοτρολική οκεσασή στο σιαστάσεων (α)	32
Στήμα 2.4 Πιθανότητα άφιξης των κυμάτων στου δέκτη σε συνκεκοιμένο γωμακό του έα	52
Στήμα 2.4 Πιθανότητα άφιξης των κοματών στου δέκτη στα το μουτά) ο στάδασης Pioion	55
$\Sigma_{\rm r}$ $\Sigma_{\rm$	33
2χημα 2.0 Μηγαδική περιραλλουδα του λαμρανόμενου δηματός για το μοντελό δκεσασής Κισιαί (α) απόλυτη τιμή της συνάστησης αυτοσυσγέτισης και (β) Φ Π Ι	34
Σνήμα 2.7 Σνηματικό διάνοαμμα της γεωνήτοιας για την δημιουογία της σειοάς Suzuki	
$\Sigma_{r}$ ήμα 2.7 $\Sigma_{r}$ ήματικό διαγραμμα της γεννήτριας για την δημιουργία της δείρας Suzuki	1
	44
Σγήμα 3.1 Μετρητικό σύστημα.	45
Στήμα 3.2 Λογισμικό κατανραφής μετρήσεων. LABVIEW	
$\Sigma$ χήμα 3.3 Συναοτήσεις βαθμονόμησης που μετατοέπουν τα volts που	48
Σχήμα 3.4 Εσωτερικός χώρος του Boeing737 και θέσεις πομπού-δέκτη για τα διάφορα σενάρια μέτρησης	49
Σχήμα 4.1 Μπλοκ διάγραμμα της γενίκευσης της Μεθόδου Lee.	52
Σχήμα 4.2 (a) Κατά εκτίμηση του στοιχείου διάλειψης μεγάλης κλίμακας στο λαμβανόμενο σήμα r(y), (b)	
υπολογισμός του στοιχείου διάλειψης μικρής κλίμακας	53
Σχήμα 4.3 Επίδραση της επιλογής παραθύρου 2L στην ακρίβεια του υπολογισμού της μέσης τιμής	54
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα	56
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε	
συχνότητα 1.8 GHz	56
Σχήμα 4.6 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση	56
Σχήμα 4.7 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με	3
κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.	57
Σχήμα 4.8 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε	
συχνότητα 1.8 GHz	57
Σχήμα 4.9 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό	57
Σχήμα 4.10 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο μ	31
υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz	58
Σχήμα 4.11 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε	
συχνότητα 1.8 GHz	58
Σχήμα 4.12 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την	58
Σχήμα 4.13 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων	<i>'</i> με
κανονική ταγύτητα σε συγνότητα 1.8 GHz.	 
Σγήμα 4.14 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων	<i>'</i> με
κανονική ταγύτητα σε συγνότητα 1.8 GHz.	59
Σγήμα 4.15 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με	59
Σχήμα 4.16 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμο	ων
με κανονική ταγύτητα σε συγγότητα 1.8 GHz	60
Σχήμα 4.17 Διάνραμμα των νρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τοιών ατόμων με κανονική τανύτητο	ι σε
συννότητα 1.8 GHz	60
Σχήμα 4.18 Διάνοαμμα του συνολικού σήματος σε συνάοτηση με	60
Σχήμα 4.19 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο μ	55
γαμηλή ταχύτητα σε συγγότητα 21 GHz	61

Σχήμα 4.20 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz61	1
Σχήμα 4.21 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα	
άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	l
Σχημά 4.22 Διαγραμμά του συνολικού σημάτος και των άργων διαλειψεών με σεναριό μετρησεών ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	2
Σχήμα 4.23 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	2
Σχήμα 4.24 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση62	2
Σχήμα 4.25 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	3
Σχήμα 4.26 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	3
Σχήμα 4.27 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	3
Σχήμα 4.28 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με	1
κανονική ταχυτήτα σε συχνυτήτα 2.1 0112	t
συχνότητα 2.1 GHz	1
ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	1
Σχήμα 4.31 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	5
Σχήμα 4.32 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz	5
Σχήμα 4.33 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την	5
Σχήμα 4.34 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz	5
Σχήμα 4.35 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συγνότητα 2.45 GHz	5
Σχήμα 4.36 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συγγότητα 2.45 GHz	۔ ۲
Σχήμα 4.37 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με	, _
κανονικη ταχυτητα σε συχνοτητα 2.45 GHz	/
2χημά 4.38 Διαγραμμά των γρηγορών οιαλειψεών με σεναριό μετρησεών ενα ατόμο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz	7
Σχήμα 4.39 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz67	7
Σχήμα 4.40 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με	2
Σχήμα 4.41 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συγγότητα 2.45 GHz	R
Στήμα 4.42 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση	ŝ
Σχήμα 4.43 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz	)
Σχήμα 4.44 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε	5
50χνοτητα 2.45 Οττ2	, )
Σχήμα 4.46 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων	
με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz	)
2χημά 4.47 Διαγραμμά των γρηγορών οιαλειψεών με σεναριό μετρησεών τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz	)
Σχήμα 4.48 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση	)
Σχήμα 4.49 Διάγραμμα του χρόνου συνοχής για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 1.8GHz	2
2χημα 4.50 Διαγραμμα του χρονου συνοχης για ολα τα σεναρια μετρησεών σε συχνοτητα 2.1GHz	2
Δχημα 4.51 Διαγραμμα του χρονου συνοχης για ολα τα σεναρια μετρησεών σε συχνοτητα 2.450Hz	) 1
$\Delta \chi_{1}$ μα 4.52 Διαγραμμα του φασματός Dopplet για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 1.80Hz	+ 1
Ζλημα 4.55 Διαγραμμα του φασματός Doppler για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 2.1 GHz	† 5
Σχήμα 4.55 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 1), Ravleigh και Weibull για 1.8GHz	, 7
Σχήμα 4.56 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 2),	r
Rayleigh και Weibull για 1.8GHz	7

Σχήμα 4.57 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 3),
Σχήμα 4.58 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 4),
Rayleigh και Weibull για 1.8GHz77
Σχήμα 4.59 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 5), Rayleigh και Weibull για 1.8GHz
Σχήμα 4.60 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 1), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz
Σχήμα 4.61 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 2), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz
Σχήμα 4.62 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 3), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz
Σχήμα 4.63 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 4), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz
Σχήμα 4.64 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 5), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz
Σχήμα 4.65 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 1), Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz
Σχήμα 4.66 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 2), Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz
Σχήμα 4.67 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 3), Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.
Σχήμα 4.68 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 4) Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.
Σχήμα 4.69 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 5) Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.
Σχήμα 4.70 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1), Ricean και Weibull
Σχήμα 4.71 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2), Ricean και Weibull
Σχήμα 4.72 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3), Ricean και Weibull
Σχήμα 4.73 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4), Ricean και Weibull
για 1.0012. Σχήμα 4.74 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5), Ricean και Weibull via 1 8GHz.
Σχήμα 4.75 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1), Ricean και Weibull για 2.1GHz.
Σχήμα 4.76 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2), Ricean και Weibull για 2.1GHz 82
Σχήμα 4.77 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3), Ricean και Weibull via 2.1GHz 82
Σχήμα 4.78 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4), Ricean και Weibull via 2.1GHz 82
Σχήμα 4.79 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5), Ricean και Weibull
Σχήμα 4.80 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1), Ricean και Weibull
Σχήμα 4.81 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2), Ricean και Weibull
για 2.45 GHz. Σχήμα 4.82 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3), Ricean και Weibull για 2.45 GHz.
Σχήμα 4.83 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4), Ricean και Weibull για 2.45 GHz
Σχήμα 4.84 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5), Ricean και Weibull
Σχήμα 4.85 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 1.8 GHz 84
Σχήμα 4.86 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 1.8 GHz 84
Σχήμα 4.87 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για
1.8 GHz

Σχήμα 4.88 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 1.8 GHz
Σχήμα 4.89 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις
Σχήμα 4.90 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz
Σχήμα 4.91 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz
Σχήμα 4.92 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz
Σχήμα 4.93 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz
Σχήμα 4.94 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5)
Σχήμα 4.95 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz
Σχήμα 4.96 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz
Σχήμα 4.97 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz
Σχήμα 4.98 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz
Σχήμα 4.99 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz
Σχήμα 4.100 Διάγραμμα απεικόνισης του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 1.8 GHz
Σχήμα 4.101 Διάγραμμα απεικόνισης του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 2.1 GHz
Σχήμα 4.102 Διάγραμμα απεικόνισης του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συγνότητα 2.45 GHz
Σχήμα 4.103 Διάγραμμα απεικόνισης της Μέσης Διάρκειας Διάλειψης για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συγνότητα 1.8 GHz
Σχήμα 4.104 Διάγραμμα απεικόνισης της Μέσης Διάρκειας Διάλειψης για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 2.1 GHz
Σχήμα 4.105 Διάγραμμα απεικόνισης της Μέσης Διάρκειας Διάλειψης για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 2.45 GHz91

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Στατιστικές Παράμετροι των χρονικών εξασθενήσεων	24
Πίνακας 2.1 Παράμετροι της λογαριθμικής-κανονικής Κατανομής	40
Πίνακας 3.1 Ρυθμίσεις του Αναλυτή Φάσματος (Spectrum Analyzer).	46
Πίνακας 3.2 Υπολογισμός ζεύξης του συστήματος μέτρησης	46
Πίνακας 3.3 Ο χρόνος καταγραφής, η ταχύτητα των ατόμων και η μέγιστη ολίσθηση Doppler για 1.8 GHz	49
Πίνακας 3.4 Ο χρόνος καταγραφής, η ταχύτητα των ατόμων και η μέγιστη ολίσθηση Doppler για 2.1 GHz	50
Πίνακας 3.5 Ο χρόνος καταγραφής, η ταχύτητα των ατόμων και η μέγιστη ολίσθηση Doppler για 2.45 GHz	50
Πίνακας 4.1 Στατιστικά για όλες τις συχνότητες για την επιλογή του κατάλληλου παραθύρου σύμφωνα με την γενίκευσης της Μεθόδου Lee [23]	55
Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων για γρόνο συνογής και Doppler σε συγνότητα 1.8 GHz	71
Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων για γρόνο συνογής και Doppler σε συγνότητα 2.1 GHz	71
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων για χρόνο συνοχής και Doppler σε συχνότητα 2.45 GHz.	71
Πίνακας 4.5 Τιμές παραμέτρων για τις κατανομές Rayleigh και Weibull για 1.8 GHz.	76
Πίνακας 4.6 Τιμές παραμέτρων για τις κατανομές Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz.	76
Πίνακας 4.7 Τιμές παραμέτρων για τις κατανομές Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.	76
Πίνακας 4.8 Τιμές παραμέτρων για τις κατανομές Rician και Weibull για 1.8 GHz.	80
Πίνακας 4.9 Τιμές παραμέτρων για τις κατανομές Rician και Weibull για 2.1 GHz	80
Πίνακας 4.10 Τιμές παραμέτρων για τις κατανομές Rician και Weibull για 2.45 GHz	80
Πίνακας 4.11 Στατιστικά διαλείψεων για συχνότητα 1.8 GHz	87
Πίνακας 4.12 Στατιστικά διαλείψεων για συχνότητα 2.1 GHz	87
Πίνακας 4.13 Στατιστικά διαλείψεων για συχνότητα 2.45 GHz	87

# 1

## Εισαγωγή

#### 1.1 Αεροναυτικά συστήματα επικοινωνίας

Είναι εμφανής η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση μεγαλύτερου εύρους ζώνης στα ασύρματα συστήματα μετάδοσης και η παροχή υπηρεσιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης πληροφορίας. Αυτή η τάση δεν θα μπορούσε να λείπει και από τον χώρο αεροπορικών μεταφορών. Τελευταία όλο και περισσότερες αεροπορικές εταιρίες παρέχουν στους επιβάτες υπηρεσίες πρόσβασης σε δεδομένα και προσωπικής επικοινωνίας. Ενώ στο παρελθόν χρησιμοποιούνταν ταχύτητες λίγων kb/s σήμερα είναι δυνατόν η διάθεση ταχυτήτων που φτάνουν μερικά Mb/s. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας εξέλιξης στην επικοινωνία "πάνω από τα σύννεφα" είναι η διευκόλυνση των επιβατών με την παροχή ενός διαύλου επικοινωνίας και πρόσβασης σε πληροφορίες που μπορούν να απολαύσουν κατά την διάρκεια όλης της πτήσης, η διευκόλυνση του προσωπικού κατά των εργασιών συντήρησης με το στήσιμο ασύρματου δικτύου αισθητήρων που θα παρέχουν χρήσιμες και κρίσιμες πληροφορίες για την κατάσταση του αεροσκάφους. Επιπλέον, η πρόσθετη ασφάλεια που ενδεχομένως προσφέρουν, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το προσωπικό του αεροσκάφους και τέλος μπορεί αποδειχθεί μια πιο φτηνή λύση υλοποίησης ενός δικτύου μέσα στο αεροσκάφος σε αντιδιαστολή με το πιο ακριβό ενσύρματο δίκτυο. Μελέτες έχουν δείξει πως η ανάγκη για υπηρεσίες ευρείας ζώνης μέσα στο αεροσκάφος είναι υπαρκτή και παρουσιάζει μια κατεύθυνση προς εφαρμογές ψυχαγωγίας. Αυτό μπορεί να γίνει περισσότερο κατανοητό αν αναλογιστούμε την συνεχώς αυξανόμενη χρήση και εξοικείωση των ανθρώπων με φορητές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, PDA, Laptops κ.τ.λ.

Σήμερα οι παρεχόμενες αεροναυτικές επικοινωνίες στους επιβάτες βασίζονται στην απλή τηλεφωνία χρησιμοποιώντας ένα απλό τηλέφωνο προσαρτημένο στο κάθισμα. Η αποδοχή αυτού του μέσου από τους επιβάτες είναι μικρή λόγω του ενδοιασμού που δείχνουν στην χρησιμοποίηση πιστωτικών καρτών, στην μη φιλική χρήση που παρουσιάζουν και στο υψηλό κόστος που έχουν. Διάφορες υπηρεσίες παρέχονται σήμερα όπως το Inmarsat Aero σύστημα για αεροπορικές δορυφορικές κινητές επικοινωνίες (AMSS, aeronautical mobile satellite services) και άλλα συστήματα για πρόσβαση στο επίγειο δίκτυο (AMTS, aeronautical mobile terrestrial services) όπως το Βόρειο Αμερικανικό Επίγειο Σύστημα (NATS, North American Terrestrial System). Επί του παρόντος, το AMSS παρέχει κανάλι φωνής δυο κατευθύνσεων, fax, και υπηρεσίες δεδομένων που καλύπτουν θεωρητικά κάθε μέρος του πλανήτη.

Τα υπάρχοντα συστήματα είναι περιορισμένα ως προς το εύρος ζώνης και η τάση για διαδικτυακές εφαρμογές που καταναλώνουν σημαντικό εύρος ζώνης δεν μπορεί να ικανοποιηθεί με τα σημερινά δεδομένα. Η προσπάθεια σήμερα στρέφεται προς δυο κατευθύνσεις:

- προς την βελτίωση της τεχνολογικής υποδομής του αεροσκάφους για την παροχή φιλικής προς τον χρήστη υπηρεσιών προσωπικής επικοινωνίας και πολυμεσικών εφαρμογών
- προς την βελτίωση του τμήματος αεροσκάφος-δορυφόρος για να επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης

Η ESA (European Space Agency) είναι αυτή που τυπικά χρηματοδοτεί σχετικά προγράμματα για την μελέτη, σχεδίαση και υλοποίηση εφαρμογών αεροναυτικών επικοινωνιών όπως τα BRAHMSS/THELES και ABROAD προγράμματα.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή συμπληρώνει αυτές τις δραστηριότητες με προγράμματα που στόχο έχουν την ολοκλήρωση των αεροναυτικών επικοινωνιών με τις υπάρχουσες επίγειες. Γενικά αυτά τα προγράμματα έχουν σαν στόχο την παροχή υπηρεσιών ευρείας ζώνης στους επιβάτες παρόμοιες με αυτές που είναι διαθέσιμες στα επίγεια συστήματα επικοινωνίας βασιζόμενες σε πολυεπίπεδα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης, που θα ολοκληρώνουν υπηρεσίες όπως UMTS, IEEE 802.11x ασύρματου δικτύου (WLAN) και Bluetooth και το οποία θα συνυπάρχουν με τυχόν IP LAN ενσύρματα δίκτυα.

Η διασύνδεση του αεροσκάφους με το επίγειο δίκτυο γίνεται δια μέσω δορυφόρων. Προσπάθειες γίνονται για την αύξηση των ρυθμών μετάδοσης σε αυτό το τμήμα του διαύλου επικοινωνίας. Σήμερα χρησιμοποιούνται ομοιοκατευθυντικές κεραίες στη ζώνη συχνοτήτων L (1-2 GHz) αλλά λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου εύρους οι ρυθμοί μετάδοσης που μπορούν να επιτευχθούν δεν ξεπερνούν τα 500 kb/s, έτσι είναι αναγκαία η χρησιμοποίηση και άλλων ζωνών όπως οι Ka (12-18 GHz), K (18-27 GHz) και Ku (27-40 GHz) δορυφορικές ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται επίσης για την αναλογική και ψηφιακή τηλεόραση και μπορούν να λειτουργήσουν επικουρικά στην L-ζώνη με την Ku-ζώνη να χρησιμοποιείται για την κάτω-ζεύξη (downlink) ενώ η L-ζώνη για την άνω-ζεύξη (uplink).

Είναι αναγκαία επίσης η σχεδίαση καλύτερων κεραιών με καλύτερα χαρακτηριστικά και μεγαλύτερο κέρδος για την ζώνη Ku και πάνω, και κάποιες εταιρίες έχουν κινηθεί σ' αυτήν την κατεύθυνση όπως η Connexion<sup>TM</sup> της Boeing που χρησιμοποιεί τέτοιους δορυφόρους στη ζώνη Ku για την παροχή επικοινωνίας δυο κατευθύνσεων (full duplex) και οι αεροπορικές εταιρίες Lufthansa και SAS έχουν δοκιμάσει τέτοιες προσεγγίσεις.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αρχιτεκτονική πάνω στην οποία θα βασίζονται οι αεροναυτικές επικοινωνίες. Βασικά μέρη που συνθέτουν την υποδομή αυτή είναι:

- το τμήμα ασύρματης πρόσβασης GSM/UMTS, WLAN, Bluetooth και το τυπικό ενσύρματο IP LAN τα οποία θα συνυπάρχουν αρμονικά
- το δορυφορικό τμήμα (satellite segment) για την διασύνδεση του αεροσκάφους με τους επίγειους τηλεπικοινωνιακούς φορείς. Οι διάφορες υπηρεσίες στο αεροσκάφος πρέπει να ολοκληρώνονται και να αλληλοσυνδέονται με την βοήθεια ολοκληρωτή υπηρεσιών (SI - Service Integrator) που θα επιτρέπει τον διαχωρισμό και την μεταφορά των διάφορων υπηρεσιών πάνω σε ένα ή περισσότερους δορυφορικούς φορείς.
- και τέλος το τμήμα εξυπηρέτησης υπηρεσιών (Aircom Service Provider) που θα υποστηρίζει τις ολοκληρωμένες υπηρεσίες του αεροσκάφους. Θα φροντίζει για την πρόσβαση στις επίγειες ασύρματες κινητές επικοινωνίες, σταθερή τηλεφωνία και διαδίκτυο.



Σχήμα 1.1 Σενάριο για τον τρόπο που θα επικοινωνεί το ασύρματο δίκτυο του αεροσκάφους με το επίγειο δίκτυο.

Σε αυτό το σενάριο το αεροσκάφος θεωρείται σαν μια κυψέλη με τον δικό της σταθμό βάσης που επικοινωνεί με το πλησιέστερα διαθέσιμο γεωστατικό δορυφόρο, ο οποίος με την σειρά του λειτουργεί σαν επαναλήπτης επιτρέποντας την διασύνδεση με τους επίγειους σταθμούς. Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι η ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα των προσωπικών ηλεκτρικών συσκευών που φέρουν οι επιβάτες και που μπορεί να προκαλέσουν παρεμβολή στα συστήματα του αεροσκάφους. Αυτό το πρόβλημα αποφεύγεται με τους κανονισμούς που ισχύουν για το διαμοιρασμό του διαθέσιμου εύρους ζώνης στις διάφορες εφαρμογές. Μέχρι σήμερα, από δοκιμές που έχουν γίνει, δεν έχει παρατηρηθεί κάποια παρεμβολή που να προκαλείται από τέτοιες συσκευές, ακόμη και σε μη κρίσιμα συστήματα του αεροσκάφους που επιτελούν βασικές λειτουργίες.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές πως για την σχεδίαση και υλοποίηση των υποσχόμενων υπηρεσιών είναι αναγκαία και απαραίτητη η μελέτη και ο χαρακτηρισμός του διαύλου επικοινωνίας στο εσωτερικό ενός αεροσκάφους. Στη παρούσα εργασία επιχειρείται ο χαρακτηρισμός των χρονικών μεταβολών του σήματος υπό την επίδραση κινούμενων ατόμων στον κεντρικό διάδρομο ενός αεροσκάφους. Συγκεκριμένα γίνεται η μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύος σε συνδυασμό με την κίνηση ενός ή περισσότερων ατόμων και με διαφορετικές ταχύτητες στον διάδρομο ενός αεροσκάφους προσομοιώνοντας την κίνηση των επιβατών και εξετάζεται η επίδραση τους στον ασύρματο δίαυλο μέσα στο αεροσκάφος. Εξετάζεται επίσης και η επίδραση της ταχύτητας των κινούμενων σκεδαστών στον ασύρματο δίαυλο.

Η μοντελοποίηση του ασύρματου διαύλου περιλαμβάνει την στατιστική επεξεργασία των διαλείψεων που υφίσταται λόγω της ανθρώπινης κίνησης και εξάγονται χρήσιμες στατιστικές παράμετροι, όπως ο χρόνος συνοχής, η διασπορά Doppler καθώς και 2<sup>ης</sup> τάξης στατιστικές παράμετροι που εξαρτώνται από την ταχύτητα κίνησης του ατόμου όπως ο ρυθμός διέλευσης κατωφλίου και η μέση διάρκεια των διαλείψεων. Επίσης εξάγονται οι στατιστικές κατανομές των γρήγορων και των αργών διαλείψεων του λαμβανόμενου σήματος υπό την επίδραση των κινούμενων ατόμων και συγκρίνονται με τις θεωρητικές κατανομές Rayleigh, Rician, Lognormal κλπ. Η μοντελοποίηση του ασύρματου διαύλου μπορεί να βοηθήσει στο σωστό σχεδιασμό ενός δικτύου που θα καλύπτει ικανοποιητικά των εσωτερικό χώρο του αεροσκάφους και θα λαμβάνει υπόψη τις χρονικές μεταβολές που υφίσταται ο δίαυλος.

#### 1.2 Προηγούμενες μελέτες

Πολλές μελέτες έχουν γίνει σχετικά με την ανάπτυξη και εκμετάλλευση των προσωπικών ασύρματων υπηρεσιών στο εσωτερικό χώρο ενός αεροσκάφους. Σχεδόν όλες οι μελέτες αυτές έχουν επικεντρωθεί σε: (i) ανάλυση συστήματος και δοκιμές πεδίου για την κινητή τηλεφωνία, ασύρματου Bluetooth και LAN δικτύων, (ii) στην προσομοίωση του εσωτερικού χώρου του αεροσκάφους με χρήση έτοιμων εργαλείων πρόβλεψης RF κάλυψης, (iii) μετρήσεις ραδιοκάλυψης και (iv) χαρακτηρισμός διαύλου ευρείας ζώνης μετρώντας τις κρουστικές αποκρίσεις του χρησιμοποιώντας κατάλληλη συσκευή μέτρησης. Η κατανόηση της συμπεριφοράς του διαύλου στο εσωτερικό ενός αεροσκάφους στις υψηλές συχνότητες δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης πολυμεσικών εφαρμογών και παροχής διαδικτυακών υπηρεσιών για τους επιβάτες εν ώρα πτήσης. Επίσης διευκολύνεται και η καλύτερη λειτουργία και συντήρηση του αεροσκάφους χρησιμοποιώντας δίκτυα αισθητήρων τα οποία θα συνδέονται ασύρματα.

Προηγούμενες έρευνες έχουν επικεντρωθεί σε αστικά, βιομηχανικά περιβάλλοντα και σε περιβάλλοντα γραφείου. Ωστόσο η καμπίνα του αεροσκάφους λόγω της ιδιαίτερης γεωμετρίας και της υψηλής πυκνότητας εμποδίων που βρίσκονται στο χώρο είναι πολύ διαφορετικό περιβάλλον από τα προαναφερόμενα.

Σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο [1] έγινε μια προσπάθεια χαρακτηρισμού του διαύλου στην ζώνη συχνοτήτων 3.0-10.6 GHz σε ένα Boeing 737-200. Μελετήθηκαν τα χαρακτηριστικά μεγάλης κλίμακας του διαύλου και έγιναν μετρήσεις με άδεια καμπίνα, με μισογεμάτη καμπίνα και με σχεδόν γεμάτη καμπίνα ώστε να μελετηθεί η επίδραση που έχει η ανθρώπινη παρουσία σε διάφορες παραμέτρους του διαύλου που εξήχθησαν από τις μετρήσεις. Οι παράμετροι αυτές είναι 1) η χωρική εξάρτηση των απωλειών διάδοσης, 2) η εξάρτηση των απωλειών διάδοσης από την συχνότητα, 3) ο λόγος της ενέργειας της απευθείας συνιστώσας (LOS) προς τις σκεδασμένες, 4) η RMS διασπορά καθυστέρησης και 5) η θέση και η κατανομή των πόλων της συνάρτησης που προκύπτει από το μοντέλο του διαύλου στο πεδίο συχνοτήτων.

Το αεροπλάνο στο οποίο ελήφθησαν οι μετρήσεις είναι μήκους 21 m, πλάτους 3.54 m και ύψους 2.2 m. Ελήφθησαν μετρήσεις σε διάταξη σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint) δηλαδή έχουμε μια κεντρική κεραία εκπομπής που τοποθετείται σε τρία σημεία του ταβανιού της καμπίνας και πολλές κεραίες λήψης που τοποθετούνται στο στήριγμα τις κεφαλής, στο στήριγμα του χεριών ή στο στήριγμα των ποδιών της κάθε θέσης. Το πλήθος των μετρήσεων που συλλέχθηκαν ήταν γύρω στις 1000 κρουστικές αποκρίσεις. Το μοντέλο για τις απώλειες διάδοσης όπως έχει υιοθετηθεί από την ΙΕΕΕ 802.15.4α είναι:

$$P_p(d,f) = k \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2\kappa}$$
(1.1)

όπου d και f είναι η απόσταση και η συχνότητα αντίστοιχα,  $d_0$  και  $f_c$  είναι η απόσταση και συχνότητα αναφοράς αντίστοιχα, n και  $\kappa$  είναι συντελεστές απόστασης και συχνότητας αντίστοιχα και k είναι μια σταθερά.

Οι απώλειες διάδοσης αυξάνουν με την αύξηση της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη, με την αύξηση της συχνότητας και με την παρουσία εμποδίων (αντικείμενα, άνθρωποι).

Από τις μετρήσεις που ελήφθησαν παρατηρήθηκε ότι οι απώλειες διάδοσης και ο συντελεστής απωλειών διάδοσης (n) αυξάνονταν όταν ο δέκτης τοποθετούταν σε χαμηλότερη θέση και όταν η πυκνότητα των ανθρώπων καθισμένων μέσα στην καμπίνα γινόταν μεγαλύτερη. Οι τιμές που βρέθηκαν για το συντελεστή n κυμαίνονταν από 2.1 έως 2.6 για σημεία λήψης πάνω στο στήριγμα κεφαλής, από 2.2 έως 2.5 για τα σημεία λήψης πάνω στο στήριγμα των χεριών και από 1.7 έως 2.2 για τις μετρήσεις στα στηρίγματα των πελμάτων.



Σχήμα 1.2 Κέρδος ισχύος συναρτήσει της απόστασης για τρία σημεία λήψης (στήριγμα κεφαλής, χεριών και πελμάτων), (α) όταν δεν υπάρχουν επιβάτες, (β) όταν η καμπίνα είναι γεμάτη, [1].

Αν και το παραπάνω μοντέλο που προτείνεται από την IEEE802.4α για την μοντελοποίηση των απωλειών διάδοσης υποδηλώνει ανεξαρτησία της παραμέτρου κ από την απόσταση, στην μελέτη αυτή παρατηρήθηκε χωρική εξάρτηση της παραμέτρου αυτής σε όλες τις περιπτώσεις μετρήσεων. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε αύξηση της παραμέτρου κ σε σχέση με την απόσταση με διαφορετικούς ρυθμούς ανάλογα με την θέση τοποθέτησης του δέκτη.

Σχετικά με τα προφίλ καθυστέρησης ισχύος παρατηρήθηκε ότι είναι περισσότερο πιθανό να έχουμε απευθείας συνιστώσα στο δέκτη όταν ο δέκτης είναι τοποθετημένος στο ύψος της κεφαλής του επιβάτη. Στο επίπεδο των χεριών του επιβάτη, οι θέσεις που βρίσκονται κοντά στο διάδρομο, έχουν κάποια δυνατότητα να έχουν απευθείας ζεύξη με τον πομπό ενώ όταν ο δέκτης τοποθετείται στο σημείο στηρίγματος των πελμάτων συνήθως δεν υπάρχει μια τέτοια LOS διαδρομή. Επίσης μια αύξηση στην τιμή της RMS διασποράς καθυστέρησης παρατηρήθηκε όταν ο δέκτης μεταπηδά από το ύψος της κεφαλής προς χαμηλότερες θέσεις.

Από τις αθροιστικές πιθανότητες που υπολογίστηκαν για τον λόγο της απευθείας συνιστώσας προς τις σκεδασμένες συνιστώσες (K-factor) παρατηρήθηκε πως τα σημεία στο ύψος της κεφαλής παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές αυτού του λόγου επιβεβαιώνοντας ότι οι θέσεις αυτές έχουν την καλύτερη ζεύξη με την κεραία εκπομπής.

Μια άλλη μελέτη που διερευνά τα χαρακτηριστικά του διαύλου στο εσωτερικό ενός αεροσκάφους [2], βασίζεται σε μετρήσεις στενής ζώνης. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε αεροπλάνο τύπου Airbus A319 στο Αμβούργο της Γερμανίας, έχοντας τους εξής σκοπούς: (i) την μελέτη των χαρακτηριστικών διάδοσης στο εσωτερικό αεροπλάνου και (ii) την αποτίμηση της παρεμβολής που παράγεται από το δίκτυο της καμπίνας ως προς τα επίγεια δίκτυα. Η όλη έρευνα επικεντρώθηκε στις GSM, UMTS και ISM ζώνες συχνοτήτων με σκοπό την παροχή αεροναυτικού συστήματος επικοινωνίας σε επιβάτες αεροπλάνου με κινητό IP μέσω WLAN και Bluetooth (που και τα δυο δουλεύουν στην ISM ζώνη) και προσωπικής κινητής τηλεφωνίας για υπηρεσίες GSM ή UMTS.

Το μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ίδιο για το εσωτερικό και για το εξωτερικό του αεροπλάνου και αποτελούταν από μια κεραία εκπομπής η οποία τροφοδοτούνταν από μια γεννήτρια και από μια κεραία λήψης η οποία συνδέονταν με ένα αναλυτή φάσματος. Ως κεραίες εκπομπής χρησιμοποιήθηκαν κεραίες με κυκλική πόλωση εκτός από μια περίπτωση που χρησιμοποιήθηκε κεραία γνωστή ως "καλώδιο διαρροής" (leaky cable), ενώ για την προσομοίωση των τερματικών των χρηστών χρησιμοποιήθηκαν κυρίως κεραίες με γραμμική πόλωση.



Σχήμα 1.3 Ομοαξονικό καλώδιο με τμήματα διαρροής (leaky cable), [2].

Οι μετρήσεις στο εσωτερικό του αεροπλάνου έδειξαν ότι η λαμβανόμενη ισχύς ελαττώνεται καθώς η συχνότητα εκπομπής αυξάνεται αφού οι απώλειες διάδοσης αυξάνουν με την συχνότητα. Ύστερα από μια σειρά δοκιμών και μετρήσεων με διαφορετικού τύπου κεραίες εξήχθη το συμπέρασμα ότι μια ομοιοκατευθυντική κεραία με ισχύ εκπομπής στα 6 dBm είναι αρκετή ώστε να παρέχει κάλυψη σε όλη την καμπίνα του αεροσκάφους. Αυτή η επιλογή προτιμάται από τη χρήση κατευθυντικών κεραιών είτε στην αρχή είτε στο τέλος της καμπίνας, εξαιτίας της ευαισθησίας της λαμβανόμενης ισχύς στην θέση των επιβατών συγκρινόμενη με τον προσανατολισμό που παρουσιάζουν οι κατευθυντικές κεραίες. Από την άλλη ένα "καλώδιο διαρροής" (leaky cable) δίνει μια πιο ομοιόμορφη κάλυψη.

Τέλος από τις μετρήσεις που γίνανε με την παρουσία ατόμων μέσα στην καμπίνα βρέθηκε ότι στην περίπτωση που τα άτομα είναι καθισμένα η λαμβανόμενη ισχύ αποκλίνει κατά ±7 dB από την τιμή της άδειας καμπίνας, ενώ η παρουσία όρθιων ατόμων στο διάδρομο εισάγει μια επιπλέον απώλεια της τάξης των 0.5 έως 1 dB για κάθε άτομο. Σημειώνεται ότι οι κεραίες εκπομπής και λήψης ήταν τοποθετημένες έτσι ώστε παρόλο την παρουσία όρθιων ατόμων να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ τους. Εάν η οπτική αυτή επαφή δεν διατηρείται πιθανώς να αναμένονται μεγαλύτερες τιμές των μετρούμενων απωλειών που οφείλονται στην παρουσία των ατόμων.

Μια άλλη ενδιαφέρουσα μελέτη σχετικά με τον χαρακτηρισμό και την επιλογή μοντέλου για τις χρονικές μεταβολές σε Ultra Wideband (UWB) κανάλι εξαιτίας της κίνησης ανθρώπων στον διάδρομο ενός τυπικού χώρου εργασίας πραγματοποιήθηκε στο [21]. Στην συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα στο οποίο έγιναν μετρήσεις καθώς γκρουπ ανθρώπων περπατούσαν προς το τέλος του διαδρόμου και πίσω, εμποδίζοντας περιστασιακά την απευθείας μετάδοση του σήματος (LOS). Τα μέλη του γκρουπ αποτελούνταν από ένα, τέσσερις και δώδεκα ανθρώπους οι οποίοι κινούνταν όχι σε σειρά αλλά γέμιζαν τον διάδρομο τυχαία. Το πείραμα αυτό ανταποκρίνεται στις συνθήκες όπου ένας χρήστης WLAN στέκεται μέσα σε πλήθος. Στο Σχήμα 1.4 βλέπουμε την συλλογή των μετρήσεων.



Σχήμα 1.4 Χαρακτηριστική απόκριση καναλιού (LOS).

Αρχικά, μελετήθηκε η αργή χρονική εξέλιξη της μέσης ισχύος κατά την λήψη του απευθείας σήματος (LOS) με την παρουσία των ανθρώπων. Όταν θεωρούμε χωρικά μεταβαλλόμενα ραδιοσήματα, η εκτίμηση της συνιστώσας των αργών διαλείψεων λαμβάνεται από τον υπολογισμό του μέσου όρου της ληφθείσας ισχύος σε μια περιοχή περίπου από 20 έως 40 μήκη κύματος [22]. Αντίστοιχα στην συγκεκριμένη μελέτη όπου υπήρχε χρονικά μεταβαλλόμενος δίαυλος, οι διακυμάνσεις των γρήγορων διαλείψεων εξαλείφθηκαν χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο διάρκειας Τ των 1.28 sec. Αυτή την χρονική περίοδο, η μέγιστη 'επιμήκυνση' του σήματος που σκεδάζεται από έναν άνθρωπο που κινείται με ταχύτητα ν τιμής 1 ms<sup>-1</sup> είναι :

$$2 \cdot \mathbf{v} \cdot \mathbf{T} \approx 38 \,\lambda$$

όπου λ είναι το μήκος κύματος στην κεντρική συχνότητα 4.5 GHz.

Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζεται η συνολική επίδραση του ενός, τεσσάρων και δώδεκα ανθρώπων καθώς περπατάνε ανάμεσα στον πομπό και δέκτη.

![](_page_20_Figure_4.jpeg)

Σχήμα 1.5 Χαρακτηριστικό υπόδειγμα μεγάλης κλίμακας εξασθένηση για LOS σήμα.

Γενικά, η κίνηση ενός ανθρώπου ανάμεσα στον LOS δίαυλο, δημιουργεί μια εξασθένηση στην μέση ισχύ περίπου 8 dB και το φαινόμενο σκίασης διαρκεί για περίπου 4 sec. Η διάρκεια αυτή αυξάνεται με την αύξηση του πλήθους των ατόμων και φτάνει περίπου τα 15 sec στο γκρουπ των δώδεκα ανθρώπων. Σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη εξασθένιση της μέση ισχύς φτάνει στα 15 dB. Βέβαια αυτή η αύξηση της εξασθένισης ήταν αναμενόμενη με την αύξηση των ανθρώπων καθώς όσα περισσότερα σώματα εμποδίζουν το απευθείας σήμα ταυτόχρονα, τόσο το σήμα υποβάλλεται σε πιο μεγάλη εξασθένηση.

Καμία σημαντική αλλαγή δεν παρατηρήθηκε στο μοτίβο της μεγάλης κλίμακας διαλείψεων όταν μειώθηκε το αναλυόμενο εύρος ζώνης, αν και θεωρητικά μειώνοντας το εύρος ζώνης θα έπρεπε να οδηγηθούμε σε αύξηση του αριθμού των πολλαπλών διαδρομών που επηρεάζουν την κύρια καθυστέρηση δέσμης.

Για την μελέτη των αργών διαλείψεων και για την ανάλυση του φάσματος του λαμβανόμενου σήματος, αρχικά απομονώθηκε η τυχαία μεταβλητή. Και εδώ για να υπολογιστεί το πλάτος χρησιμοποιήθηκε παράθυρο διάρκειας 1.28 sec και στο πραγματικό και φανταστικό μέρος του σήματος και η φάση του υπολογίστηκε από τις μετρούμενες περιόδους στο σταθερό περιβάλλον. Στο Σχήμα 1.6 απεικονίζονται οι διακυμάνσεις του πλάτους και της φάσης του τυχαίου στοιχείου το οποίο εξήχθηκε από το λαμβανόμενο σήμα μέσω του κύριου μονοπατιού, όταν περπατούσαν και οι δώδεκα άνθρωποι.

![](_page_21_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 1.6 Διακυμάνσεις της τυχαίας μεταβλητής, LOS σήμα (12 άνθρωποι).

Μελετώντας την χρονική εξασθένιση της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής (Cumulative Distribution Function - CDF) καθώς και με την διαδικασία Kolmogorv-Smirnov βρέθηκε ότι σχεδόν σε όλες τις μετρήσεις, η κατανομή που ακολουθεί το πλάτος της εξασθένισης της τυχαίας μεταβλητής είναι πολύ κοντά στην Rayleigh κατανομή, ανεξάρτητα από το πλήθος των ανθρώπων που κινούνται.

Επιπλέον, μια εργασία σε μετρήσεις και χαρακτηρισμό καναλιών σε εσωτερικό χώρο στα 60 GHz για ασύρματα τοπικά δίκτυα έχει πραγματοποιηθεί στο [25]. Στην συγκεκριμένη εργασία έλαβαν μετρήσεις και για απευθείας σήμα (LOS) χωρίς εμπόδια και σε σήμα με εμπόδια (NLOS) και εξήγαγαν στατιστικά στοιχεία για τις διαλείψεις στο σταθερό περιβάλλον του εργαστηρίου καθώς επίσης ανέλυσαν και την επίδραση που έχει η κίνηση των ανθρώπων μέσα στον ίδιο χώρο στην χρονική μεταβολή των διαλείψεων.

Όσο αφορά τις μετρήσεις όπου συμμετείχαν άνθρωποι, τοποθετώντας τον δέκτη σε δύο διαφορετικά μέρη (F1,F2) μέσα στο εργαστήριο, τα σενάρια με τα οποία πραγματοποιήθηκαν είναι (i) όταν ένας άνθρωπος περπατούσε αργά (S1,S4) (ii) όταν ένας άνθρωπος περπατούσε γρήγορα (S2,S5), (iii) όταν δύο άνθρωποι περπατούν ανάμεσα στον πομπό και δέκτη (S3,S6). Συγκεντρωτικά τα σενάρια παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.7.

![](_page_21_Figure_5.jpeg)

Σχήμα 1.7 Σενάρια μετακίνησης ανθρώπων μέσα στο εργαστήριο.

Στο Σχήμα 1.8 απεικονίζονται οι στατιστικές παράμετροι Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου (Level Crossing Rate - LCR) και Μέση Διάρκεια Διάλειψης (Average Fade Duration - AFD) για όλα τα σενάρια μετρήσεων και με στάθμες που κυμαίνονται από -30 έως 5 dB. Όπως παρατηρούμε στα διαγράμματα του Σχήματος 1.8 εμφανίζεται μια καθαρή διεύρυνση των καμπυλών του LCR καθώς η ταχύτητα του ανθρώπου αυξάνεται (συγκρίνοντας τις καμπύλες S1,S2 και S4,S5) και στις δυο θέσεις (F1 και F2).

![](_page_22_Figure_0.jpeg)

Σχήμα 1.8 Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου για τα σενάρια: (a) S1-S3 και (b) S4-S6. Μέση Διάρκεια Διαλείψεων για τα σενάρια: (c) S1-S3 και (d) S4-S6.

Οι μέγιστες τιμές του LCR τις οποίες βρίσκουμε στις καμπύλες S2 και S5 (οι οποίες αντιστοιχούν και στην μέγιστη ταχύτητα των ανθρώπων) φαίνεται στο Σχήμα 1.8 (a) και (b) είναι αντίστροφα ανάλογες σε σχέση με τις καμπύλες του AFD S2 και S5 που απεικονίζουν την μικρότερη χρονική διάρκεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8 (c) και (d). Οι μέγιστες τιμές του LCR βρίσκονται μεταξύ των 165 και 278 Hz όσο αφορά την πρώτη θέση (F1) και μεταξύ 204 και 357 Hz για την δεύτερη θέση (F2). Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν κατά προσέγγιση στις μέγιστες τιμές του LCR τις οποίες θα είχαμε εάν είχαμε λαμβανόμενο σήμα από ένα κινητό τερματικό σταθμό το οποίο κινείται με ταχύτητα 1-1.3 m/s σε σχέση με σταθερό τερματικό σταθμός στα 60 GHz κάτω από συνθήκες εξασθένησης Rayleigh.

Αυτές οι γρήγορες διακυμάνσεις είναι που συνεισφέρουν στα φαινόμενα διάθλασης/ανάκλασης πάνω στο ανθρώπινο σώμα. Συνεπώς αυτές οι μεταβολές στο σήμα που προκαλούνται από τους ανθρώπους που μετακινούνται είναι γρηγορότερες από αυτές που προκαλούνται από τα ακίνητα αντικείμενα (όπως τοίχοι, γραφεία ή ντουλάπες) και αυτό συμβαίνει επειδή το ανθρώπινο σώμα είναι αρκετά ηλεκτρισμένο στα 60 GHz όπου το μήκος κύματος είναι μόνο 5 mm.

Επιπλέον από το Σχήμα 1.8 παρατηρούμε ότι η πιο σημαντική παράμετρος που δημιουργεί τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις στο σήμα είναι η ταχύτητα των ανθρώπων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα τόσο μεγαλύτερες διακυμάνσεις θα έχουμε και στο σήμα. Το πλήθος των ανθρώπων που περπατούν παίζει σημαντικό ρόλο στην αύξηση και διεύρυνση των καμπυλών του LCR. Αυτό είναι προφανές εάν συγκρίνουμε την καμπύλη S3 με την καμπύλη S1 στο Σχήμα 1.8 (a). Εντούτοις, οι αλλαγές γίνονται λιγότερο αντιληπτές πέρα των τριών ανθρώπων.

Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε και τον λόγο που έχουμε διαφορετικές καμπύλες όσο αναφορά τις δύο διαφορετικές θέσεις μετρήσεων. Όπως παρατηρούμε έχουμε αύξηση του LCR στην δεύτερη θέση (S4-S6) σε σχέση με το πρώτο σετ καμπυλών (S1-S3). Η διαφορά αυτή έχει μέση τιμή 59 εξασθένισης/sec. Αυτό οφείλεται στο περιβάλλοντα χώρο και στο γεγονός ότι στην πρώτη θέση μετρήσεων υπάρχει περισσότερος ανοιχτός χώρος και επιπλέον υπάρχουν πιο λίγα εμπόδια κοντά στο μονοπάτι που περπατούν οι άνθρωποι (ξύλινες ντουλάπες). Σε αντίθεση με την δεύτερη θέση μετρήσεων όπου ο χώρος είναι πιο περιορισμένος και υπάρχουν πιο πολλά εμπόδια κοντά στο μονοπάτι που περπατούν οι άνθρωποι. Οπότε, υπάρχουν πολλαπλές ανακλάσεις ανάμεσα στο ανθρώπινο σώμα και στις ξύλινες και μεταλλικές ντουλάπες καθώς ο άνθρωπος περνά κοντά από αυτές. Στον πίνακα 1.4 βλέπουμε τις τιμές των LCR και AFD και τις τιμές των σταθμών για -5 dB και -10 dB για όλα τα σενάρια μετρήσεων.

Scenario	AFD (ms)		LCR (Hz)			Coh. Time (ms)	Spec. Width (Hz)	
	-5 dB	-10 dB	-5 dB	-10 dB	Max	0.5 correlation	-3 dB	-10 dB
S1	1.6	0.9	145	92	165	52	3.1	12.2
S2	1.0	0.5	236	142	278	40	5.4	16.6
S3	1.4	0.7	193	135	202	32	8.2	20.1
S4	1.1	0.6	246	172	258	58	3.8	11.1
S5	0.8	0.4	341	238	357	48	5.5	13.7
S6	1.2	0.6	224	156	234	39	7.4	17.5

Πίνακας 1.1 Στατιστικές Παράμετροι των χρονικών εξασθενήσεων.

## 2

## Βασικές Αρχές Ασύρματης Διάδοσης

#### 2.1 Μηχανισμοί διάδοσης

Η λαμβανόμενη ισχύς στη κεραία του δέκτη προκύπτει σαν το αποτέλεσμα της διανυσματικής άθροισης διαφόρων ραδιοκυμάτων που καταφθάνουν στο δέκτη από διάφορες κατευθύνσεις και με διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις. Ο μηχανισμός αυτός αναφέρεται ως πολυδιαδρομική διάδοση (multipath propagation) και προκαλεί διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος για μικρές μετατοπίσεις του δέκτη που οφείλεται στην ενισχυτική και αφαιρετική συμβολή των πολυδιαδρομικών συνιστωσών.

Πιο συγκεκριμένα, το λαμβανόμενο σήμα είναι το αποτέλεσμα της απευθείας συνιστώσας, που υπάρχει όταν ικανοποιούνται συνθήκες οπτικής επαφής, και άλλων συνιστωσών που προκύπτουν από ανακλάσεις, περιθλάσεις και σκεδάσεις των μεταδιδόμενων κυμάτων. Έτσι εκτός από την απευθείας συνιστώσα, θα φτάσει στο δέκτη και ένα σύνολο καθυστερημένων ως προς το χρόνο συνιστωσών.

- Η ανάκλαση (reflection) συμβαίνει όταν το μεταδιδόμενο κύμα προσκρούει σε λεία επιφάνεια μεγάλων διαστάσεων συγκριτικά με το μήκος κύματος του σήματος.
- Η περίθλαση (diffraction) συμβαίνει όταν ανάμεσα στον πομπό και δέκτη υπάρχει μεγάλο, συγκριτικά με το λ, τεχνητό ή φυσικό εμπόδιο, το οποίο προκαλεί την εμφάνιση δευτερευόντων κυμάτων πίσω από αυτό. Αυτός ο μηχανισμός διάδοσης εξηγεί το γεγονός της μεταφοράς της ενέργειας από τον πομπό στον δέκτη ακόμη και όταν δεν υπάρχει άμεση οπτική επαφή.
- Η σκέδαση (scattering) συμβαίνει όταν ένα σήμα προσπίπτει σε μια μεγάλη τραχεία επιφάνεια, ή σε επιφάνεια της οποίας οι διαστάσεις είναι της τάξης του λ ή μικρότερες, με αποτέλεσμα η ανακλώμενη ενέργεια να διασκορπίζεται σε όλες τις κατευθύνσεις.

Σε περιβάλλον εσωτερικών χώρων συνηθισμένοι σκεδαστές είναι τα έπιπλα και τα διάφορα μικροαντικείμενα που υπάρχουν. Στο εσωτερικό αεροσκαφών που μελετάμε, σκεδαστές είναι τα διάφορα μικροαντικείμενα των επιβατών, οι ίδιοι οι επιβάτες, τα καθίσματα κλπ. Αποτέλεσμα των παραπάνω μηχανισμών είναι ότι το εκπεμπόμενο σήμα μπορεί να φθάσει στον δέκτη από διαφορετικούς δρόμους. Οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες καταφθάνουν με χαρακτηριστικά (πλάτος, φάση και χρόνο άφιξης) ολισθημένα ως προς εκείνα της απευθείας συνιστώσας με αποτέλεσμα στο σημείο που συμβάλλουν να εκδηλώνουν αθροιστική ή αφαιρετική συμβολή προκαλώντας την κατά τόπου μεταβολή της τιμής ισχύος. Η μεταβολή του πλάτους ή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος για μικρές μετατοπίσεις του δέκτη, είναι γνωστή ως φαινόμενο διαλείψεων (fading).

Στην περίπτωση που ο πομπός και ο δέκτης είναι ακίνητοι, λέμε ότι έχουμε στατική πολυδιαδρομική διάδοση, ενώ στην περίπτωση που ο δέκτης, ο πομπός ή οι άνθρωποι κινούνται, λέμε ότι έχουμε ένα δυναμικό περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει συνεχής αλλαγή στο ηλεκτρικό μήκος των μονοπατιών διάδοσης και άρα οι σχετικές ολισθήσεις φάσης μεταξύ των συνισταμένων κυμάτων μεταβάλλονται με τη θέση.

#### 2.2 Είδη διαλείψεων

Γενικά, από άποψη κλίμακας, διακρίνουμε δύο είδη διαλείψεων που χαρακτηρίζουν τον δίαυλο σε ένα ασύρματο σύστημα κινητών επικοινωνιών, τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large-scale fading) και τις διαλείψεις μικρής κλίμακας (small-scale fading).

Οι μεγάλης κλίμακας διαλείψεις εκφράζουν τη μέση εξασθένηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας της απομάκρυνσης του δέκτη από τον πομπό και εμπεριέχουν τα δύο από τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά της διάδοσης: τις απώλειες διάδοσης (path loss), δηλαδή την μεταβολή της εξασθένισης σε σχέση με την απόσταση, και την σκίαση, δηλαδή την τυχαία μεταβολή της εξασθένισης για δεδομένη απόσταση λόγω της ύπαρξης κάποιου εμποδίου. Η στατιστική ανάλυση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας παρέχει έναν τρόπο υπολογισμού των απωλειών διάδοσης (mean path loss) και των μεταβολών του σήματος γύρω από την μέση τιμή.

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας του διαύλου αναφέρονται στην μεγάλη μεταβολή των χαρακτηριστικών του λαμβανόμενου σήματος (πλάτους και φάσης), για μικρές μετατοπίσεις στον χώρο του κινούμενου δέκτη, της τάξης του λ/2. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας οφείλονται:

- στην χρονική διασπορά του σήματος (time spreading) λόγω της πολυδιαδρομικής διάδοσης του μεταδιδόμενου σήματος και
- στον χρονικά μεταβαλλόμενο (time variant) δίαυλο, αφενός λόγω της κίνησης του δέκτη, και αφετέρου λόγω των κινούμενων σκεδαστών που συμμετέχουν στην διάδοση.

Οι μικρής κλίμακας διαλείψεις χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις γρήγορες διακυμάνσεις που παρατηρούνται στο πλάτος του λαμβανόμενου σήματος κατά τη διάρκεια ενός μικρού χρονικού διαστήματος ή μιας μικρής διανυόμενης από το δέκτη απόστασης. Κατά τη διάρκεια αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι η επίδραση των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας αγνοείται.

#### 2.2.α Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας περιγράφονται από την σχέση που συνδέει τις απώλειες διάδοσης με την απόσταση. Σε πολλές συνηθισμένες εφαρμογές οι μέσες απώλειες διάδοσης ( $\overline{L}(d)$ ), συναρτήσει της απόστασης d μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι ανάλογες της n-oστής δύναμης της απόστασης σε σχέση με μια απόσταση αναφοράς  $d_0$ :

$$\overline{L}(d) \propto \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \tag{2.1}$$

Οι απώλειες διάδοσης  $\overline{L}(d)$  εκφράζονται συνήθως σε dB και δίνονται από την σχέση:

$$\overline{L}(d) = L_{FS}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right)$$
(2.2)

Η απόσταση αναφοράς  $d_0$  αντιστοιχεί σε ένα σημείο που βρίσκεται στο μακρινό πεδίο της κεραίας. Οι απώλειες διάδοσης που δίνονται από την σχέση (2.2), είναι μέσες απώλειες διάδοσης για μια δεδομένη απόσταση d. Η τιμή του εκθέτη n εξαρτάται από την συχνότητα, τα ύψη των κεραιών και το περιβάλλον διάδοσης. Οι απώλειες διάδοσης  $L_{FS}(d_0)$  στο σημείο αναφοράς  $d_0$  από τον πομπό, προκύπτουν συνήθως από μετρήσεις ή υπολογίζονται από τις απώλειες ελευθέρου χώρου:

$$L_{FS}(d_0) = \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right)^2$$
(2.3)

όπου λ το μήκος κύματος. Η σχέση (2.2), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση των μέσων απωλειών διάδοσης σε εσωτερικούς χώρους τόσο για θέσεις οπτικής επαφής όσο και για θέσεις μη οπτικής επαφής. Για την μοντελοποίηση των απωλειών διάδοσης σε θέσεις μη οπτικής επαφής σε εσωτερικούς χώρους μπορεί να χρησιμοποιηθούν και μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τις επιπλέον απώλειες που εισάγουν τα διάφορα εμπόδια που παρεμβάλλονται, δίνοντας μια πιο ακριβή περιγραφή του μοντέλου αλλά αυτό ξεφεύγει από το σκοπό της παρούσας εργασίας.

#### 2.2.β Διαλείψεις μικρής κλίμακας

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας του διαύλου, που οφείλονται αφενός στην πολυδιαδρομική διάδοση κι αφετέρου στην κίνηση του δέκτη και των σκεδαστών, προκαλούν συνέπειες όπως:

- πολύ γρήγορες μεταβολές της λαμβανόμενης ισχύος κατά τη διάρκεια μιας μικρής μετατόπισης του δέκτη ή ενός μικρού χρονικού διαστήματος,
- τυχαία διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation) εξαιτίας των διαφορετικών ολισθήσεων Doppler που υφίστανται οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες,
- χρονική διασπορά η οποία προκαλείται από τις διαφορετικές καθυστερήσεις διάδοσης των συνιστωσών.

Οι φυσικοί παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν τις διαλείψεις μικρής κλίμακας στον δίαυλο είναι:

- Η πολυδιαδρομική διάδοση. Η παρουσία ανακλαστήρων και σκεδαστών στον δίαυλο δημιουργεί ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον το οποίο διασπείρει την ενέργεια του σήματος σε πλάτος, φάση και χρόνο.
- Η ταχύτητα του κινούμενου δέκτη. Η σχετική κίνηση μεταξύ του σταθμού βάσης και του δέκτη έχει σαν αποτέλεσμα την τυχαία διαμόρφωση συχνότητας λόγω της διαφορετικής ολίσθησης Doppler σε κάθε μια από τις εκδόσεις του σήματος. Η ολίσθηση Doppler μπορεί να είναι θετική ή αρνητική ανάλογα με το αν ο δέκτης πλησιάζει η απομακρύνεται από το σταθμό βάσης.
- Η κίνηση των σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης. Όταν τα αντικείμενα που υπάρχουν στον δίαυλο κινούνται, εισάγουν χρονικά μεταβαλλόμενη ολίσθηση Doppler στις διαφορετικές εκδόσεις του σήματος. Αν τα αντικείμενα κινούνται γρηγορότερα από τον δέκτη, επικρατεί το φαινόμενο των διαλείψεων μικρής κλίμακας. Διαφορετικά η κίνησή τους μπορεί να αγνοηθεί και πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μόνο την ταχύτητα του δέκτη.
- Το εύρος ζώνης του σήματος. Αν το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συνοχής του διαύλου (coherence bandwidth), το λαμβανόμενο σήμα θα υποστεί αλλοιώσεις, αλλά η ισχύς του δεν θα εξασθενήσει πολύ σε μια μικρή περιοχή. Το εύρος ζώνης συνοχής είναι ένα μέτρο της μέγιστης διαφοράς συχνότητας για την οποία τα σήματα είναι απόλυτα συσχετισμένα ως προς το πλάτος. Αν το μεταδιδόμενο σήμα είναι στενής ζώνης συγκρινόμενο με τον δίαυλο, το πλάτος του θα μεταβάλλεται γρήγορα, αλλά το σήμα δεν θα παραμορφώνεται με το χρόνο.

Οι μικρής κλίμακας διαλείψεις οι οποίες οφείλονται στην χρονική διασπορά του σήματος χωρίζονται σε δυο υποκατηγορίες:

- διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading) και
- $\epsilon\pi i\pi\epsilon\delta\epsilon\varsigma \,\delta i\alpha\lambda\epsilon i\psi\epsilon i\varsigma$  (frequency non-selective or flat fading).

Ενώ οι δύο υποκατηγορίες διαλείψεων μικρής κλίμακας οι οποίες οφείλονται στην χρονική μεταβολή του διαύλου είναι:

- γρήγορες διαλείψεις (fast fading) και
- αργές διαλείψεις (slow fading)

Σημειώνουμε πως η χρονική διασπορά του διαύλου οφείλεται στον μηχανισμό πολυδιαδρομικής διάδοσης ενώ η χρονική μεταβολή του διαύλου προκαλείται από την κίνηση είτε του δέκτη είτε των σκεδαστών.

#### 2.2.β.1 Κατηγοριοποίηση των διαλείψεων μικρής κλίμακας

Συνοπτικά αναφέρουμε ότι η χρονική διασπορά του διαύλου, που προκαλείται από τον μηχανισμό της πολυδιαδρομικής διάδοσης, οφείλεται για τις επίπεδες ή επιλεκτικές ως προς την συχνότητα διαλείψεις, ενώ η χρονική μεταβολή του διαύλου προκαλεί τις αργές ή γρήγορες διαλείψεις που παρατηρούνται στο σήμα.

Σε δίαυλο στενής ζώνης, που απασχολεί και την παρούσα εργασία, δεν τίθεται θέμα διαλείψεων επιλεκτικών ως προς την συχνότητα γιατί λόγω του μικρού εύρους ζώνης του σήματος όλες οι συχνότητες επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο και ως εκ τούτου το σήμα υφίσταται επίπεδες διαλείψεις σε συνδυασμό με γρήγορες ή αργές διαλείψεις.

Έτσι οι διαλείψεις που εκδηλώνονται σε δίαυλο στενής ζώνης, και προκαλούνται από την χρονική μεταβολή του διαύλου, διακρίνονται σε γρήγορες διαλείψεις και αργές διαλείψεις.

• Γρήγορες διαλείψεις

Είναι η διαλείψεις που προκύπτουν όταν η χρονική διάρκεια στην οποία ο δίαυλος συμπεριφέρεται με συσχετισμένο τρόπο (ή αλλιώς παραμένει αμετάβλητος), είναι μικρότερη από την χρονική διάρκεια του μεταδιδόμενου συμβόλου. Το αποτέλεσμα των διαλείψεων αυτών είναι η παραμόρφωση του σήματος βασικής ζώνης με αποτέλεσμα την απώλεια χρήσιμης πληροφορίας. Ο μηχανισμός αυτός δεν είναι εύκολο να αναστραφεί και εισάγει αμείωτο ρυθμό λαθών. Για τον λόγω αυτό πρέπει να φροντίζεται να μην ικανοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις που δείχνουν τις συνθήκες που οδηγούν στις γρήγορες διαλείψεις.

1. 
$$B_{S} < f_{D}$$

2. 
$$T_s > T_c$$

Πρακτικά οι γρήγορες διαλείψεις εμφανίζονται όταν έχουμε κίνηση σκεδαστών ή του δέκτη με μεγάλες ταχύτητες ή όταν ο ρυθμός μετάδοσης είναι πολύ χαμηλός.

Αργές διαλείψεις

Είναι οι διαλείψεις που προκύπτουν όταν ο ρυθμός με τον οποίο μεταβάλλεται η κρουστική απόκριση του διαύλου είναι πολύ χαμηλότερος από τον ρυθμό του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή ο δίαυλος μπορεί να θεωρηθεί στατικός (χρονικά αμετάβλητος) για το χρονικό διάστημα που ορίζει ο χρόνος συνοχής. Στο πεδίο της συχνότητας, οι αργές διαλείψεις υφίστανται όταν η διασπορά Doppler είναι πολύ μικρότερη από το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος. Έτσι ένα σήμα υφίσταται αργές διαλείψεις όταν:

1. 
$$B_S > f_D$$
  
2.  $T < T$ 

$$2. T_S < T_C$$

Από τις πάνω σχέσεις μπορούμε να δούμε ότι η ολίσθηση Doppler  $f_D$  θέτει ένα κάτω όριο στον ρυθμό μετάδοσης ώστε να αποφύγουμε τις γρήγορες διαλείψεις. Το αποτέλεσμα των αργών διαλείψεων είναι η ελάττωση του SNR. Όταν δεν ικανοποιούνται οι παραπάνω συνθήκες τότε το σήμα υφίσταται γρήγορες διαλείψεις, οι οποίες εισάγουν μια τυχαία διαμόρφωση συχνότητας με αποτέλεσμα να περιορίζουν σημαντικά την απόδοση του συστήματος.

• Επίπεδες Διαλείψεις

Οι δίαυλοι επίπεδων διαλείψεων προκαλούν ισχυρές διαλείψεις και μπορεί να απαιτούν ισχύ εκπομπής κατά 20-30 dB μεγαλύτερη σε σχέση με συστήματα στα οποία οι δίαυλοι δεν παρουσιάζουν διαλείψεις. Το πλάτος του μεταδιδόμενου σήματος στον δίαυλο μεταβάλλεται σύμφωνα με την κατανομή Rayleigh. Συμπερασματικά, ένα σήμα θα υποστεί επίπεδες διαλείψεις όταν ισχύουν οι συνθήκες:

1. 
$$B_C > B_S$$
  
2.  $T_S > \sigma_\tau$ 

όπου  $T_s$ η διάρκεια παλμού του μεταδιδόμενου σήματος, και  $B_s$  το εύρος ζώνης του.

Επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις

Στην περίπτωση που το εύρος ζώνης του διαύλου  $B_C$ , είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης  $B_S$  του μεταδιδόμενου σήματος, τότε οι φασματικές συνιστώσες του σήματος δεν επηρεάζονται όλες με τον ίδιο τρόπο από τον δίαυλο, και προκαλούνται στο λαμβανόμενο σήμα διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Μερικές από τις φασματικές συνιστώσες του σήματος θα βρίσκονται εκτός του εύρους ζώνης συνοχής του διαύλου και θα επηρεάζονται διαφορετικά και ανεξάρτητα σε σύγκριση με εκείνες τις συνιστώσες που θα βρίσκονται μέσα στο εύρος συσχέτισης του διαύλου.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες η κρουστική απόκριση του διαύλου έχει διασπορά καθυστέρησης μεγαλύτερη από  $T_s = 1/B_s$  και το λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από πολλαπλές εκδοχές του μεταδιδόμενου σήματος, οι οποίες έχουν υποστεί εξασθένιση και εμφανίζουν χρονική καθυστέρηση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το λαμβανόμενο σήμα στον δέκτη να είναι παραμορφωμένο σε σχέση με το σήμα που αρχικά μεταδόθηκε από τον πομπό.

Οι δίαυλοι που προκαλούν στο μεταδιδόμενο σήμα διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα είναι επίσης γνωστοί και ως δίαυλοι ευρείας ζώνης καθώς το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης της κρουστικής απόκρισης του διαύλου. Ο δίαυλος επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο το πλάτος και την φάση των διαφόρων συνιστωσών του εκπεμπόμενου σήματος, με αποτέλεσμα την χρονικά μεταβαλλόμενη εξασθένιση του λαμβανόμενου σήματος. Συμπερασματικά, ένα σήμα θα υποστεί διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα όταν:

1.  $B_{s} > B_{c}$ 

2.  $T_s < \sigma_\tau$ 

Στην πράξη, ένας δίαυλος θεωρείται επιλεκτικός ως προς την συχνότητα όταν  $T_s \leq 10\sigma_{\tau}$ , αν και αυτό εξαρτάται από το συγκεκριμένο είδος διαμόρφωσης που έχει χρησιμοποιηθεί.

#### 2.3 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και Φασματική Πυκνότητα Ισχύος του λαμβανόμενου σήματος

Γενικεύοντας, θεωρούμε διάδοση και στις τρεις διαστάσεις, με τον δέκτη να κινείται, με ταχύτητα u ως προς τους σκεδαστές, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Το λαμβανόμενο σήμα στην κεραία του δέκτη, θα είναι η υπέρθεση N επιπέδων κυμάτων που καταφθάνουν με γωνία  $\alpha_n$  στο οριζόντιο και  $\beta_n$ στο κατακόρυφο επίπεδο. Κάθε επίπεδο κύμα έχει πλάτος  $c_n$ , και φάση  $\theta_n$ . Οι παράμετροι  $c_n$ ,  $\theta_n$ ,  $\alpha_n$ και  $\beta_n$  είναι τυχαίες και στατιστικά ανεξάρτητες μεταβλητές. Στην περίπτωση που  $\beta_n = 0$  έχουμε διάδοση μόνο στις δύο διαστάσεις, που είναι γνωστό και ως μοντέλο του Clarke.

![](_page_29_Figure_2.jpeg)

Σχήμα 2.1 Τρισδιάστατη μοντελοποίηση των κυμάτων που προσπίπτουν στον δέκτη.

Οι φάσεις  $\theta_n$  υποθέτουμε ότι είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα [0,2 $\pi$ ]. Σε οποιοδήποτε σημείο λήψης ( $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$ ) το λαμβανόμενο σήμα θα δίνεται από την σχέση:

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N} r_n(t)$$
 (2.4)

Υποθέτοντας την μετάδοση ενός αδιαμόρφωτου φέροντος, θα έχουμε  $\tilde{s}(t) = 1$ . Επίσης, θεωρούμε την κίνηση του δέκτη πάνω στο επίπεδο x-y, με κατεύθυνση πάνω στον άξονα x. Το λαμβανόμενο ζωνοπερατό σήμα θα δίνεται από την σχέση:

$$r(t) = g_{t}(t)\cos 2\pi f_{c}t - g_{\rho}(t)\sin 2\pi f_{c}t$$
(2.5)

όπου

$$g_{I}(t) = \sum_{n=1}^{N} c_{n} \cos(2\pi f_{D,n} + \theta_{n})$$
(2.6)

και

$$g_{\varrho}(t) = \sum_{n=1}^{N} c_n \sin(2\pi f_{D,n} + \theta_n)$$
(2.7)

είναι οι συμφασικές και ορθογωνικές συνιστώσες του λαμβανόμενου ζωνοπερατού σήματος. Η ολίσθηση Doppler, που προκαλείται στο n-οστό προσπίπτων επίπεδο κύμα λόγω της κίνησης του δέκτη, θα δίνεται από την σχέση:

$$f_{D_n} = f_m \cos(\alpha_n) \cos(\beta_n) \tag{2.8}$$

Για μεγάλο αριθμό N προσπιπτόντων κυμάτων, με την βοήθεια του κεντρικού οριακού θεωρήματος τα  $g_i(t)$  και  $g_o(t)$  μπορούν να θεωρηθούν σαν κανονικές στοχαστικές ανελίξεις. Άρα η r(t), είναι κανονική στοχαστική ανέλιξη που χαρακτηρίζεται πλήρως από την μέση τιμή της και την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Όμως, λόγω της υπόθεσης ότι οι φάσεις  $\theta_n$  είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες στο διάστημα  $[0,2\pi]$ , προκύπτει  $E\{g_i(t)\} = E\{g_o(t)\} = 0$ , με αποτέλεσμα η μέση τιμή του λαμβανόμενου σήματος  $E\{r(t)\}$ , να είναι επίσης μηδέν.

Στην συνέχεια, υποθέτοντας ότι το λαμβανόμενο ζωνοπερατό σήμα r(t) είναι διαδικασία στατική υπό την ευρεία έννοια (WSS: Wide Sense Stationary), η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης θα δίνεται από την σχέση :

$$\phi_{rr}(\tau) = \phi_{g,g_{0}}(\tau)\cos 2\pi f_{c}t - \phi_{g,g_{0}}(\tau)\sin 2\pi f_{c}t$$
(2.9)

όπου  $\phi_{g,g_{\ell}}(\tau) = \phi_{g_{\varrho}g_{\varrho}}(\tau)$  και  $\phi_{g,g_{\varrho}}(\tau) = \phi_{g_{\varrho}g_{\ell}}(-\tau)$ . Οι επιμέρους συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης προκύπτουν θεωρώντας την φάση  $\theta_n$  ομοιόμορφα κατανεμημένη σε διάστημα  $[0, 2\pi]$ . Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης  $\phi_{g,g_{\ell}}(\tau)$  θα δίνεται από την σχέση :

$$\phi_{g_{j}g_{j}}(\tau) = E\{g_{i}(t)g_{i}(t+\tau)\} = \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{N} \iint_{\alpha_{n}} \iint_{\beta_{n}} c_{n}^{2} \cos\left[2\pi f_{m}\tau \cos(\alpha_{n})\cos(\beta_{n})\right] p(\alpha_{n})p(\beta_{n})p(c_{n})d\alpha_{n}d\beta_{n}dc_{n}$$
(2.10)

Στην σχέση (2.10) με  $c_n^2$  συμβολίζεται η ισχύς κάθε n-οστού προσπίπτοντος κύματος. Η μέση τιμή της ισχύος θα προκύπτει:

$$\overline{P}_{r} = \sum_{n=1}^{N} \int_{c_{n}} c_{n}^{2} p(c_{n}) dc_{n} = \sum_{n=1}^{N} \frac{P_{r}}{N}$$
(2.11)

με αποτέλεσμα η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της συμφασικής συνιστώσας του λαμβανόμενου σήματος να δίνεται από την σχέση:

$$\phi_{g_{i}g_{i}}(\tau) = \frac{\overline{P}_{r}}{2} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos\left[2\pi f_{m}\tau\cos(\alpha_{n})\cos(\beta_{n})\right] p(\alpha_{n})p(\beta_{n})d\alpha_{n}d\beta_{n}$$
(2.12)

Με αντίστοιχο τρόπο η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μεταξύ της συμφασικής και ορθογωνικής συνιστώσας θα δίνεται από την σχέση:

$$\phi_{g_{,g_{0}}}(\tau) = \frac{\overline{P}_{r}}{2} \int_{0}^{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin\left[2\pi f_{m}\tau\cos(\alpha_{n})\cos(\beta_{n})\right] p(\alpha_{n})p(\beta_{n})d\alpha_{n}d\beta_{n}$$
(2.13)

Στις σχέσεις (2.12) και (2.13), με  $P_r$  συμβολίζεται η μέση ισχύς του λαμβανόμενου σήματος,  $f_m$  είναι η μέγιστη συχνότητα Doppler λόγω της κίνησης του δέκτη,  $\alpha_n$  και  $\beta_n$  είναι οι γωνίες άφιξης των επίπεδων κυμάτων στον δέκτη για το οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο αντίστοιχα, ενώ τέλος  $p(\alpha_n)$  και  $p(\beta_n)$  είναι οι πιθανότητες άφιξης των κυμάτων στον δέκτη για τις αντίστοιχες γωνίες.

Για τον υπολογισμό των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης της συμφασικής και ορθογωνικής συνιστώσας του λαμβανόμενου σήματος, αρκεί να γνωρίζουμε την ταχύτητα του δέκτη, από την οποία θα προκύψει η μέγιστη συχνότητα Doppler, και τις πιθανότητες άφιξης των κυμάτων στον δέκτη. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε διάδοση μόνο στις δύο διαστάσεις στο επίπεδο x-y, με αποτέλεσμα στις σχέσεις (2.12) και (2.13), να έχουμε  $\beta_n = 0$  και  $p(\beta_n) = \delta(\beta_n)$ . Επίσης υποθέτουμε ότι τα επίπεδα κύματα στο επίπεδο αυτό φθάνουν από όλες τις κατευθύνσεις με ίση πιθανότητα  $p(\theta) = \overline{P_r}/2\pi$ , με  $\theta \in [0, 2\pi]$ . Το μοντέλο αυτό προτάθηκε αρχικά από τον Clarke, και αναφέρεται συνήθως ως μοντέλο ισοτροπικής σκέδασης δύο διαστάσεων (2-D isotropic scattering) και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2.

![](_page_30_Figure_12.jpeg)

Σχήμα 2.2 Πιθανότητα άφιξης των κυμάτων στον δέκτη για ισοτροπική σκέδαση δύο διαστάσεων.

Το Σχήμα 2.2 απεικονίζει την πιθανότητα άφιξης  $p(\theta)$  των κυμάτων συναρτήσει της γωνίας άφιξης  $\theta$ , ενώ  $\overline{P}_r$  είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς. Με βάση το προτεινόμενο μοντέλο η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της συμφασικής συνιστώσας θα δίνεται από την σχέση :

$$\phi_{g_{g_{g_{r}}}}(\tau) = \frac{\overline{P}_{r}}{2} J_{0}(2\pi f_{m}\tau)$$
(2.14)

όπου  $J_0(x)$  είναι η συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης. Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης προκύπτει  $\phi_{s,s_0}(\tau) = 0$ .

Η Φασματική Πυκνότητα Ισχύος (Φ.Π.Ι.) των  $g_{I}(t)$  και  $g_{\varrho}(t)$  μπορούν να υπολογιστούν λαμβάνοντας τον μετασχηματισμό Fourier των  $\phi_{g_{g_{g_{e}}}}(\tau)$  και  $\phi_{g_{g_{e}}}(\tau)$  αντίστοιχα. Η Φ.Π.Ι. της συνάρτησης  $\phi_{g_{g_{e}}}(\tau)$  προκύπτει με μετασχηματισμό Fourier της σχέσης (2.14), λαμβάνοντας :

$$S_{g_{i}g_{i}}(f) = \begin{cases} \frac{\overline{P}_{r}}{2\pi f_{m}} \frac{1}{\sqrt{1 - (f/f_{m})^{2}}}, & |f| \le f_{m} \\ 0 & \alpha\lambda\lambda\omega\dot{\nu} \end{cases}$$
(2.15)

ενώ  $S_{g,g_{\varrho}}(f) = 0$ . Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της μιγαδικής περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος  $g(t) = g_{I}(t) + jg_{\varrho}(t)$  είναι:

$$\phi_{gg}(\tau) = \phi_{g_{g_{i}}}(\tau) + j\phi_{g_{i}g_{o}}(\tau)$$
(2.16)

και η αντίστοιχη Φ.Π.Ι. δίνεται από την σχέση:

$$S_{gg}(f) = S_{g_1g_1}(f) + jS_{g_1g_2}(f)$$
(2.17)

η οποία ονομάζεται και φασματική πυκνότητα ισχύος Doppler ή συνάρτηση διασποράς Doppler. Στο Σχήμα 2.3, απεικονίζονται η κανονικοποιημένη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης  $\phi_{gg}(\tau)$ , συναρτήσει της κανονικοποιημένης χρονικής καθυστέρησης  $f_m \tau$ , καθώς επίσης και η κανονικοποιημένη Φ.Π.Ι.  $S_{gg}(f)$  σαν συνάρτηση της κανονικοποιημένης συχνότητας  $f/f_m$ .

![](_page_31_Figure_10.jpeg)

**Σχήμα 2.3** Μιγαδική περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος για ισοτροπική σκέδαση δύο διαστάσεων (α) συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και (β) Φ.Π.Ι.

Από το Σχήμα 2.3 παρατηρούμε ότι η Φ.Π.Ι. της μιγαδικής περιβάλλουσας περιορίζεται σε ένα διάστημα συχνοτήτων  $|f| \le f_m$  ενώ η  $S_{ss}(f)$  τείνει στο άπειρο για  $f = \pm f_m$ . Στην πραγματικότητα όμως, η Φ.Π.Ι. δεν τείνει ποτέ στο άπειρο και αυτό γιατί η διάδοση των κυμάτων είναι σε τρεις διαστάσεις και όχι σε δύο όπως έχουμε υποθέσει με βάση την πιθανότητα άφιξης των κυμάτων.

Σε περίπτωση που στον δέκτη χρησιμοποιούμε κατευθυντική κεραία, η ισοτροπική σκέδαση περιορίζεται σε έναν συγκεκριμένο γωνιακό τομέα α, ο οποίος θα ισούται με το συνολικό εύρος

δέσμης της κεραίας. Το συγκεκριμένο μοντέλο σκέδασης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει την πιθανότητα άφιξης των κυμάτων σε δύο ή τρεις διαστάσεις απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4. Η συνάρτηση πιθανότητας  $p(\theta)$ , θα εκφράζεται:

![](_page_32_Figure_1.jpeg)

Σχήμα 2.4 Πιθανότητα άφιξης των κυμάτων στον δέκτη σε συγκεκριμένο γωνιακό τομέα.

Μια πολύ καλή προσέγγιση για την μοντελοποίηση της πιθανότητας άφιξης των κυμάτων είναι η περίπτωση που θεωρούμε μια ισχυρή απευθείας συνιστώσα και μια συνιστώσα σκεδαζόμενων κυμάτων. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται Rician και απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.

![](_page_32_Figure_4.jpeg)

Σχήμα 2.5 Πιθανότητα άφιξης των κυμάτων στον δέκτη για το μοντέλο σκέδασης Rician.

Η γωνιακή πιθανότητα άφιξης των κυμάτων για το μοντέλο σκέδασης Rician, θα δίνεται από την σχέση:

$$p(\theta) = \overline{P}_{r} \left\{ \frac{1}{K+1} \hat{p}(\theta) + \frac{K}{K+1} \delta(\theta - \theta_{0}) \right\}$$
(2.19)

όπου  $\hat{p}(\theta)$  είναι η πιθανότητα άφιξης των σκεδαζόμενων κυμάτων,  $\theta_0$  είναι η γωνία άφιξης της απευθείας συνιστώσας και *K* είναι ο λόγος ισχύος της απευθείας συνιστώσας προς την σκεδαζόμενη ισχύ. Θεωρώντας σαν πιθανότητα άφιξης των σκεδαζόμενων κυμάτων  $\hat{p}(\theta) = 1/2\pi$ , με  $\theta \in [0, 2\pi]$ , οι συναρτήσεις  $\phi_{s,s_0}(\tau)$  και  $\phi_{s,s_0}(\tau)$ , για διάδοση μόνο στο οριζόντιο επίπεδο θα δίνονται από τις σχέσεις :

$$\phi_{g_{g_{r}}}(\tau) = \frac{1}{K+1} \frac{\overline{P}_{r}}{2} J_{0}(2\pi f_{m}\tau) + \frac{K}{K+1} \frac{\overline{P}_{r}}{2} \cos(2\pi f_{m}\tau\cos\theta_{0})$$
(2.20)

$$\phi_{g_{g_{g_{e}}}}(\tau) = \frac{K}{K+1} \frac{\overline{P}_{r}}{2} \sin(2\pi f_{m}\tau\cos\theta_{0})$$
(2.21)

Αντίστοιχα η Φ.Π.Ι. θα αποτελείται από μια διακριτή συνιστώσα λόγω της απευθείας ακτίνας και μια συνεχή συνιστώσα λόγω της ομοιόμορφης κατανομής των αφικνούμενων κυμάτων. Η Φ.Π.Ι. θα δίνεται από την σχέση :

$$S_{gg}(f) = \begin{cases} \frac{1}{K+1} \frac{\overline{P}_{r}}{2\pi f_{m}} \frac{1}{\sqrt{1 - (f/f_{m})^{2}}} + \frac{K}{K+1} \frac{\overline{P}_{r}}{2} \delta(f - f_{m} \cos \theta_{0}), & 0 \le |f| \le f_{m} \\ 0 & \alpha \lambda \lambda o \psi \end{cases}$$
(2.22)

Η  $S_{ss}(f)$  θα έχει την ίδια μορφή με αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.(β), μόνο που θα έχει επιπλέον και μια διακριτή συνιστώσα σε συχνότητα  $f_m \cos \theta_0$ . Για παράδειγμα θεωρούμε περίπτωση όπου έχουμε γωνία άφιξης της απευθείας συνιστώσας  $\theta_0 = \pi/3$ . Στο Σχήμα 2.6, απεικονίζονται η απόλυτη τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης  $|\phi_{ss}(\tau)|$ , συναρτήσει της κανονικοποιημένης χρονικής καθυστέρησης  $f_m \tau$ , καθώς επίσης και η κανονικοποιημένη Φ.Π.Ι.  $S_{ss}(f)$  σαν συνάρτηση της κανονικοποιημένης συχνότητας Doppler  $f/f_m$ , που προκύπτουν από τις σχέσεις (2.20), (2.21) και (2.22). Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι:

$$\left|\phi_{gg}(\tau)\right| = \left|\phi_{g,g_{i}}(\tau) + j\phi_{g,g_{0}}(\tau)\right| = \sqrt{\phi_{g,g_{i}}^{2}(\tau) + \phi_{g,g_{0}}^{2}(\tau)}$$
(2.23)

Η απόλυτη τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης της μιγαδικής περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος, καθώς και η Φ.Π.Ι. έχουν υπολογιστεί για διαφορετικές τιμές του K, ενώ όταν K = 0, ο δίαυλος υπόκειται σε διαλείψεις Rayleigh.

![](_page_33_Figure_3.jpeg)

**Σχήμα 2.6** Μιγαδική περιβάλλουσα του λαμβανόμενου σήματος για το μοντέλο σκέδασης Rician (α) απόλυτη τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και (β) Φ.Π.Ι.

Από το Σχήμα 2.6(α) είναι φανερό ότι με αύξηση του K, η απόλυτη τιμή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης αυξάνεται ανάλογα, υποδηλώνοντας ότι στην διάδοση συμμετέχει αποκλειστικά η απευθείας συνιστώσα, ενώ η συνεισφορά των σκεδαζόμενων κυμάτων είναι αμελητέα. Τέλος, στο Σχήμα 2.6(β) η κρουστική συνιστώσα που προκύπτει στην θέση 0.5 είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης της απευθείας συνιστώσας που προσπίπτει στον δέκτη με γωνία  $\theta_0 = \pi/3$ . Επομένως με βάση την σχέση (2.22) η κανονικοποιημένη συχνότητα Doppler θα προκύψει  $f/f_m = \cos(\pi/3) = 0.5$ .

#### 2.4 Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης συναρτήσει της απόστασης

Σε πολλά ασύρματα συστήματα, ειδικά για συχνότητες VHF και πάνω, χρησιμοποιείται χωρική διαφορικότητα κεραιών (space diversity) σαν ένας τρόπος να εξομαλυνθεί το έντονο φαινόμενο των διαλείψεων. Αυτό στηρίζεται στο σκεπτικό ότι άμα λάβουμε δύο ασυσχέτιστα δείγματα (εκδοχές) από μια τυχαία διαδικασία τότε αυτά θα παρουσιάζουν διαλείψεις που δεν σχετίζονται μεταξύ τους. Έτσι η πιθανότητα δύο ή περισσότερα δείγματα να είναι χαμηλότερα από κάποιο επίπεδο τιμής συγχρόνως, είναι πολύ μικρότερη από την πιθανότητα το κάθε δείγμα χωριστά να έχει τιμή μικρότερη από το ίδιο αυτό επίπεδο. Σαν αποτέλεσμα επιτυγχάνουμε καλύτερη συμπεριφορά ως προς τις διαλείψεις στο λαμβανόμενο σήμα όταν χρησιμοποιούμε διαφορική λήψη.

Ο χρονικός διαχωρισμός - όπου η ελάχιστή του τιμή ισοδυναμεί με τον χρόνο συνοχής - που απαιτείται για να έχουμε ασυσχέτιστα δείγματα δίνεται από την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Ο χωρικός διαχωρισμός μπορεί να προκύψει με κατάλληλο μετασχηματισμό τις χρονικής μεταβλητής. Συγκεκριμένα η σχέση που συνδέει τον χρόνο με την απόσταση δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_m \tau = \frac{x}{\lambda} \tag{2.24}$$

όπου τ είναι η χρονική καθυστέρηση,  $f_m$  η μέγιστη συχνότητα Doppler, x η απόσταση και λ το μήκος κύματος του σήματος. Μπορούμε να πούμε πως το  $f_m \tau$  εκφράζει την κανονικοποιημένη χρονική καθυστέρηση ενώ το x/λ εκφράζει την κανονικοποιημένη απόσταση. Από τον μετασχηματισμό αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την χωρική συνοχή (spatial coherence), που είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο σημείων ώστε τα δείγματα που λαμβάνουμε συγχρόνως από τα σημεία αυτά να παραμένουν ασυσχέτιστα. Στην πράξη μια απόσταση διαχωρισμού 0.2λ είναι επαρκής για να εξασφαλίσουμε επαρκώς ασυσχέτιστα δείγματα.

#### 2.5 Συναρτήσεις κατανομής του λαμβανόμενου σήματος

#### 2.5.α Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rayleigh

Στην περίπτωση που το σήμα στο δέκτη προκύπτει σαν το άθροισμα πολλών επίπεδων κυμάτων με περίπου ίδιο πλάτος τότε είναι γνωστό ότι το σήμα ακολουθεί την κατανομή Rayleigh [10]. Η κατανομή Rayleigh εκφράζεται από την σχέση:

$$p_a(x) = \frac{x}{b_0} \exp\left(-\frac{x^2}{2b_0}\right)$$
 (2.25)

όπου  $2b_0$  είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς ( $\overline{P}_r$ ). Η πιθανότητα το σήμα να μην υπερβαίνει κάποια τιμή R θα δίνεται από την σχέση:

$$P(x \le R) = \int_0^R p_a(x) dx = 1 - e^{-\rho^2}$$
(2.26)

με:

$$\rho = \frac{R}{\sqrt{2b_0}} = \frac{R}{\sqrt{\overline{P_r}}}$$
(2.27)

Η υπόθεση της άφιξης πολλών πολυδιαδρομικών συνιστωσών παρόμοιου πλάτους ισχύει σε πολλά περιβάλλοντα διάδοσης γιατί συχνά δεν υπάρχει άμεση οπτική επαφή μεταξύ του πομπού και δέκτη.

#### 2.5.β Συνάρτηση κατανομής διαλείψεων Rician

Στις περιπτώσεις που μεταξύ πομπού και δέκτη υπάρχουν συνθήκες οπτικής επαφής ή στο σύνολο των συνιστωσών που συνθέτουν το σήμα υπάρχει μια επικρατούσα συνιστώσα, τότε η κατανομή που θα ακολουθεί το σήμα θα είναι η κατανομή Rician, η έκφραση της οποίας δίνεται από την σχέση:

$$p_{a}(x) = \frac{x}{b_{0}} \exp\left(-\frac{x^{2} - s^{2}}{2b_{0}}\right) I_{0}\left(\frac{xs}{b_{0}}\right)$$
(2.28)

όπου  $I_0$ () είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξεως,  $s^2$  η ισχύς της επικρατούσας (ισχυρής) συνιστώσας και  $2b_0$  η μέση τιμή των άλλων σκεδασμένων συνιστωσών.

Ο παράγοντας K (Rician factor) ορίζεται σαν ο λόγος της ισχύος της επικρατούσας συνιστώσας  $s^2$ , προς την ισχύ της σκεδασμένης ακτινοβολίας  $2b_0$ , και σε dB εκφράζεται από την σχέση:

$$K(dB) = 10\log\left(\frac{s^2}{2b_0}\right)$$
(2.29)

Από την σχέση (2.11) βλέπουμε ότι για s = 0, που σημαίνει απουσία ισχυρής συνιστώσας, η κατανομή Rician μετατρέπεται σε κατανομή Raleigh. Στην πράξη, όταν ο παράγοντας  $K \rightarrow 0$ , τότε η κατανομή τείνει στην Rayleigh. Ενώ όταν K >> 1, τότε η κατανομή τείνει στην κανονική κατανομή (Gauss) με μέση τιμή s.

Η πιθανότητα το σήμα να μην υπερβαίνει κάποιο επίπεδο ισχύος R σε dB, προκύπτει από το ολοκλήρωμα [12]:

$$P(x \le R) = \int_{0}^{R} p_{a}(x) dx = 1 - Q\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)\rho^{2}}\right)$$
(2.30)

όπου Q(a,b) είναι η συνάρτηση Marqum-Q, ενώ το  $\rho$  δίνεται από την σχέση (2.9).

Η ύπαρξη ισχυρής ή απευθείας συνιστώσας, που προσπίπτει στον δέκτη οπό γωνία  $\gamma_n$  σχετικά με το διάνυσμα της ταχύτητας κίνησης του δέκτη (βλέπε Σχήμα 2.1), προκαλεί την εμφάνιση μιας κρουστικής συνιστώσας στο φασματικό περιεχόμενο του RF σήματος στην συχνοτική θέση  $f_c + f_m \cos \gamma_n$ , ενώ στο φασματικό περιεχόμενο της περιβάλλουσας ή του σήματος βασικής ζώνης (συνάρτηση Φ.Π.Ι της περιβάλλουσας) θα έχουμε την εμφάνιση κορυφών στις συχνότητες  $f_m(1 \pm \cos \gamma_n)$ .

#### 2.6 Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου και Μέση Διάρκεια Διαλείψεων

Δύο πολύ βασικές στατιστικές παράμετροι 2<sup>ης</sup> τάξης που αφορούν τις διαλείψεις της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος είναι ο Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου - Ρ.Δ.Κ. (δηλαδή πόσο συχνά η περιβάλλουσα διασχίζει ένα συγκεκριμένο επίπεδο) και η Μέση Διάρκεια Διαλείψεων - Μ.Δ.Δ. (πόσο χρόνο η περιβάλλουσα παραμένει κάτω από ένα καθορισμένο επίπεδο). Οι ποσότητες αυτές είναι στατιστικές παράμετροι 2<sup>ης</sup> τάξης γιατί δεν επηρεάζονται μόνο από το περιβάλλον διάδοσης αλλά και από την ταχύτητα του κινούμενου δέκτη ή των σκεδαστών. Οι παράμετροι Ρ.Δ.Κ. και Μ.Δ.Δ. είναι χρήσιμες για τον σχεδιασμό ελέγχου λαθών και τεχνικών διαφορικότητας (diversity). Κι αυτό γιατί είναι δυνατόν να συνδυάσουν τον χρονικό ρυθμό μεταβολής του λαμβανόμενου σήματος σε σχέση με κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος και την ταχύτητα του δέκτη ή των σκεδαστών.
#### 2.6.α Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου της περιβάλλουσας του σήματος

Ο Ρ.Δ.Κ. της περιβάλλουσας L<sub>R</sub> για ένα συγκεκριμένο επίπεδο R, ορίζεται ως ο ρυθμός με τον οποίο η περιβάλλουσα διασχίζει ένα επίπεδο R, με θετική ή αρνητική κατεύθυνση. Η περιβάλλουσα θεωρείται κανονικοποιημένη στην RMS τιμή του σήματος. Ο Ρ.Δ.Κ. δίνεται από την σχέση:

$$L_{R} = \sqrt{2\pi(K+1)} f_{m} \rho e^{-K - (K+1)\rho^{2}} I_{0} \left( 2\rho \sqrt{K(K+1)} \right)$$
(2.31)

όπου K είναι ο λόγος ισχύος της απευθείας προς τις σκεδαζόμενες συνιστώσες,  $f_m$  είναι η μέγιστη συχνότητα Doppler,  $I_0(\cdot)$  είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης και  $\rho$  δίνεται από την σχέση (2.9).

Για διαλείψεις Rayleigh (K = 0) η συνάρτηση του P.Δ.K. θα δίνεται από την σχέση:

$$L_R = \sqrt{2\pi} f_m \rho e^{-\rho^2} \tag{2.32}$$

Ο Ρ.Δ.Κ. εξαρτάται από την ταχύτητα του δέκτη ή των σκεδαστών, λόγω της παραμέτρου  $f_m$  που υπάρχει στις σχέσεις υπολογισμού. Η περιβάλλουσα του σήματος σπάνια υπόκειται σε διαλείψεις μεγάλου βάθους ( $\rho < -20$  dB), έχοντας χαμηλό Ρ.Δ.Κ., ενώ διαλείψεις που έχουν μικρότερο βάθος ( $\rho > -10$  dB) εμφανίζονται συχνότερα (υψηλό Ρ.Δ.Κ.). Επίσης ο Ρ.Δ.Κ. μειώνεται καθώς η τιμή του K αυξάνεται ενώ οι διαλείψεις παρουσιάζουν αρκετά μικρότερο βάθος. Έτσι η περιβάλλουσα του σήματος δεν υπόκειται σε μεγάλο αριθμό διαλείψεων αφού η συνεισφορά των κινούμενων σκεδαστών, που δημιουργούν και τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις, είναι πολύ μικρή σε σχέση με την σταθερή απευθείας συνιστώσα που προκαλεί ελάχιστες διακυμάνσεις.

#### 2.6.β Μέση Διάρκεια Διαλείψεων της περιβάλλουσας του σήματος

Η Μ.Δ.Δ. είναι η μέση χρονική διάρκεια που η περιβάλλουσα του σήματος παραμένει κάτω από ένα καθορισμένο επίπεδο R. Παρόλο που η σ.π.π. της διάρκειας των διαλείψεων της περιβάλλουσας είναι άγνωστη, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση διάρκεια τους. Θεωρώντας ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα μήκους T και  $t_i$  την χρονική διάρκεια της i-οστής διάλειψης κάτω από το επίπεδο R, η πιθανότητα το επίπεδο της λαμβανόμενης περιβάλλουσας να είναι μικρότερο από R είναι:

$$P(x \le R) = \frac{1}{T} \sum_{i} t_i$$
(2.33)

end  $\eta$  M.D.D. ba eínai:

$$\bar{t} = \frac{P(x \le R)}{L_R} \tag{2.34}$$

Εάν η περιβάλλουσα έχει συνάρτηση κατανομής Rician, τότε από την σχέση (2.12), η Μ.Δ.Δ. θα προκύπτει:

$$\bar{t} = \frac{1 - Q\left(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)\rho^2}\right)}{\sqrt{2\pi(K+1)} f_m \rho e^{-K - (K+1)\rho^2} I_0\left(2\rho\sqrt{K(K+1)}\right)}$$
(2.35)

ενώ εάν η περιβάλλουσα έχει κατανομή Rayleigh (K = 0), τότε η Μ.Δ.Δ. θα δίνεται από την σχέση:

$$\bar{t} = \frac{e^{\rho^2} - 1}{\rho f_m \sqrt{2\pi}}$$
(2.36)

Είναι φανερό ότι η Μ.Δ.Δ παρουσιάζει συμπεριφορά αντιστρόφως ανάλογη του Ρ.Δ.Κ., δηλαδή η τιμή της αυξάνεται καθώς η τιμή του K αυξάνεται, με αποτέλεσμα η περιβάλλουσα του σήματος να μην μένει για μεγάλο χρονικό διάστημα σε διάλειψη. Γενικά, για μεγάλες τιμές του K οι διαλείψεις έχουν μικρό βάθος και διαρκούν περισσότερο, ενώ για μικρές του K οι διαλείψεις έχουν μεγάλο βάθος και διαρκούν λιγότερο.

Η Μ.Δ.Δ. του σήματος είναι χρήσιμη γιατί βοηθά στο να καθορίσουμε τον πιθανό αριθμό των bits που μπορεί να χαθούν κατά την διάρκεια μιας διάλειψης. Επίσης μπορεί να περιγράψει την εκρηκτικότητα των λανθασμένων bits, σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο δίαυλο, που χρησιμοποιείται για σχεδιασμό ψηφιακής παρεμβολής (interleaving design).

Η Μ.Δ.Δ. εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του δέκτη και μειώνεται καθώς η μέγιστη ολίσθηση Doppler αυξάνεται λόγω της παραμέτρου  $f_m$  που υπάρχει στις σχέσεις υπολογισμού. Εάν υπάρχει συγκεκριμένο περιθώριο διάλειψης σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών, είναι κατάλληλο να εκτιμήσουμε την επίδοση του δέκτη καθορίζοντας ένα ρυθμό για τον οποίο το σήμα εισόδου πέφτει κάτω από ένα δεδομένο επίπεδο R και πόσο χρόνο παραμένει κάτω από το επίπεδο αυτό. Έτσι μπορούμε να συσχετίσουμε το σηματοθορυβικό λόγο (SNR: Signal-to-Noise Ratio) κατά την διάρκεια μιας διάλειψης με το στιγμιαίο ρυθμό λαθών (BER: Bit Error Rate) που υφίσταται.

#### 2.7 Παράμετροι για τον χαρακτηρισμό χρονικά μεταβαλλόμενων διαύλων.

Αν ο πομπός, ο δέκτης καθώς και όλοι οι άλλοι σκεδαστές που παρεμβάλλονται στο δίαυλο είναι ακίνητοι, το πλάτος και η φάση του λαμβανόμενου σήματος θα παραμένουν σταθερά, για ένα δεδομένο σημείο, και ο δίαυλος χαρακτηρίζεται ως χρονικά αμετάβλητος. Εφόσον τα χαρακτηριστικά του διαύλου θα εξαρτώνται από την θέση που βρίσκεται κάθε φορά ο πομπός και ο δέκτης, η χρονική μεταβολή των χαρακτηριστικών του διαύλου ισοδυναμεί με την μεταβολή τους λόγω χωρικής μεταβολής (κίνησης).

Οι κυριότερες παράμετροι που περιγράφουν την χρονικά μεταβαλλόμενη φύση του διαύλου, σε μια περιοχή μικρής κλίμακας, είναι:

- Ο χρόνος συνοχής  $T_c$  (Coherence Time)
- Η ολίσθηση Doppler ή διασπορά Doppler,  $f_D$  (Doppler Spread)

Ο χρόνος συνοχής προκύπτει από την συνάρτηση χρονικής συσχέτισης ή αυτοσυσχέτισης και μας παρέχει πληροφορίες για την ταχύτητα διαλείψεων του διαύλου. Η τιμή του  $T_c$  προκύπτει για συγκεκριμένη τιμή του επιπέδου συσχέτισης που συνήθως λαμβάνεται 0.5 (50%). Ο χρόνος συνοχής είναι ένα στατιστικό μέτρο της χρονικής διάρκειας στην οποία η κρουστική απόκριση του διαύλου παραμένει αμετάβλητη. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης προσδιορίζει ποσοτικά την ομοιότητα της κρουστικής απόκρισης του διαύλου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Έτσι ο χρόνος συνοχής είναι η χρονική διάρκεια κατά την οποία δύο διαφορετικές εκδοχές του σήματος παραμένουν συσχετισμένες. Η γνώση της παραμέτρου αυτής είναι χρήσιμη για την αποτίμηση της επίδοσης διάφορων τεχνικών ψηφιακής κωδικοποίησης και της παρεμβολής. Επίσης δίνει πληροφορίες για την εγγενή χρονική διαφορικότητα (time diversity) του διαύλου.

Το εύρος ζώνης του σήματος βασικής ζώνης  $(B_s)$  είναι ουσιαστικά το εύρος ζώνης της περιβάλλουσας του σήματος που περιέχει και την πληροφορία. Το αντίστροφο της τιμής αυτής μας δίνει προσεγγιστικά την διάρκεια του παλμού  $(T_s)$  του σήματος πληροφορίας, όταν έχουμε ψηφιακή μετάδοση. Όταν η διάρκεια του παλμού του σήματος πληροφορίας είναι μεγαλύτερη από το χρόνο  $T_c$ , τότε ο δίαυλος θα μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της μετάδοσης προκαλώντας παραμόρφωση του σήματος στον δέκτη με αποτέλεσμα να είναι εξαιρετικά δύσκολη η αποδιαμόρφωσή του.

Η φασματική πυκνότητα ισχύος (Φ.Π.Ι) προκύπτει μετασχηματίζοντας κατά Fourier της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Αυτή μας δίνει πληροφορίες για την φασματική εξάπλωση που προκαλείται στο σήμα λόγω του φαινομένου Doppler. Η διασπορά Doppler προκύπτει από την Φ.Π.Ι σαν το εύρος συχνοτήτων όπου η συνάρτηση είναι διάφορη του μηδενός.

Η διασπορά Doppler ( $f_D$ ) και ο χρόνος συνοχής ( $T_c$ ) είναι αντίστροφα μεγέθη και μια προσεγγιστική σχέση που τα συνδέει είναι [9]:

$$T_c \approx \frac{1}{f_D} \tag{2.37}$$

Όταν, για τον υπολογισμό του χρόνου συνοχής, θεωρούμε επίπεδο συσχέτισης 0.5, ή σχέση που συνδέει τον χρόνο συνοχής με την διασπορά Doppler είναι η ακόλουθη [9]:

$$T_c = \frac{9}{16\pi f_D} \tag{2.38}$$

Μια κοινή πρακτική για τις σύγχρονες ψηφιακές επικοινωνίες είναι να χρησιμοποιήσουμε σαν σχέση που συνδέει τον χρόνο συνοχής με την διασπορά Doppler το γεωμετρικό μέσο των δύο παραπάνω σχέσεων. Έτσι η σχέση που προκύπτει είναι:

$$T_c = \frac{0.423}{f_D}$$
(2.39)

Όπως προκύπτει από τα προαναφερόμενα, ο δίαυλος θα είναι σταθερός ή ίδιων χαρακτηριστικών κατά την χρονική περίοδο που ορίζεται από τον χρόνο συνοχής. Για να αποφύγουμε προβλήματα που προκύπτουν από την χρονική μεταβολή του διαύλου θα πρέπει να φροντίζουμε η διάρκεια του συμβόλου να είναι μικρότερη από τον χρόνο συνοχής ή αντίστοιχα το εύρος ζώνης του σήματος βασικής ζώνης να είναι μεγαλύτερο από την διασπορά Doppler. Τότε λέμε ότι έχουμε να κάνουμε με αργές διαλείψεις η οποίες επιδρούν μόνο στο σηματοθορυβικό λόγο (SNR) το οποίο μπορεί να αντιμετωπιστεί εύκολα. Στην περίπτωση που η διάρκεια του εκπεμπόμενου συμβόλου είναι μεγαλύτερο από του η διάρκεια του εκπεμπόμενου συμβόλου είναι μεγαλύτερο το σήμα θα υποστεί παραμόρφωση με αποτέλεσμα η επανάκτησή του να γίνει δύσκολη. Στο πεδίο της συχνότητας αυτό ισοδυναμεί με το εύρος ζώνης του σήματος βασικής ζώνης να είναι μικρότερο από την διασπορά Doppler. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι το σήμα υφίσταται γρήγορες διαλείψεις.

#### 2.8 Το μοντέλο Suzuki

Η βασική υπόθεση του μοντέλου Suzuki είναι ότι το απευθείας σήμα είναι εντελώς σκιασμένο (μη οπτική επαφή). Συνεπώς, το λαμβανόμενο σήμα προέρχεται μόνο από την διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Η μέση ισχύς των πολλαπλών διαδρομών είναι σταθερή μόνο σε μικρά τμήματα της διαδρομής του κινητού σταθμού, ενώ σε μεγάλα τμήματα κυμαίνεται σε πιο χαμηλές τιμές, εξαιτίας του φαινομένου της σκίασης.

Εδώ θα προσπαθήσουμε να διαμορφώσουμε από κοινού τις αργές και γρήγορες διαλείψεις που παρουσιάζονται στο λαμβανόμενο σήμα. Οι παραπάνω υποθέσεις μπορούν να μεταφραστούν σε ένα συνδυασμό από Rayleigh και λογαριθμική-κανονική (Lognormal) κατανομή. Αυτή η μικτή κατανομή συνήθως ονομάζεται Suzuki Katavoμή. Σε αυτή την περίπτωση, τοπικά, οι αποκλίσεις του πλάτους του σήματος ακολουθούν την κατανομή Rayleigh με την παράμετρο σ, δηλαδή,

$$f(\mathbf{r} \mid \boldsymbol{\sigma}) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) (\mathbf{r} \ge 0)$$
(2.40)

Αυτό ισχύει για μικρές διακυμάνσεις στην διαδρομή του κινητού σταθμού, τις οποίες ονομάζουμε μικρές περιοχές, και αντιστοιχούν σε μερικές δεκάδες των εκατοντάδων μήκη κυμάτων. Η διατύπωση  $f(\mathbf{r} \mid \sigma)$  αναφέρεται στην υπό συνθήκη κατανομή του r σε συνδυασμό με το σ. Η παράμετρος σ έχει λογαριθμική-κανονική κατανομή σε μεγάλη κλίμακας περιοχές ή μεγαλύτερα τμήματα της διαδρομής.

Η λογαριθμική-κανονική κατανομή μια τυχαίας μεταβλητής x είναι στενά συνδεδεμένη με τον λογάριθμο της, δηλαδή η X = ln(x), η οποία ακολουθεί μια κανονική ή Gaussian κατανομή. Οι λογαριθμική-κανονική κατανομές δημιουργούνται από τον πολλαπλασιασμό πολλαπλών τυχαίων μεταβλητών, όπως προβλέπεται από το κεντρικό οριακό θεώρημα για τα πρόσθετα αποτελέσματα, το οποίο δίνει στην Gaussian κατανομή την ανύψωση. Κατά συνέπεια, εάν το λαμβανόμενο σήμα υποβάλλεται σε μια πολλαπλασιαστική αλληλουχία των τυχαίων εξασθενητών, το προκύπτον σήμα θα κατανεμηθεί κατά λογαριθμική-κανονική κατανομή.

Λαμβάνοντας υπόψη μια τυχαία μεταβλητή Χ, η οποία ακολουθεί Gaussian κατανομή, της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function – PDF) δίνεται από την σχέση:

$$p(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{X-m}{\sigma}\right)^2\right)$$
(2.41)

όπου *m* είναι η μέση τιμή και σ η τυπική απόκλιση, εάν η τυχαία μεταβλητή x είναι τέτοια ώστε X = ln(x), τότε το x ακολουθεί την λογαριθμική-κανονική κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας :

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - m}{\sigma}\right)^2\right)$$
(2.42)

Όπως βλέπουμε από την παραπάνω σχέση, οι παράμετροι της Gaussian κατανομής συχνά αναφέρονται ως οι παράμετροι της λογαριθμική-κανονικής κατανομής. Οι πραγματικοί παράμετροι της λογαριθμικής-κανονικής κατανομής είναι αρκετά πιο περίπλοκοι όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Παράμετροι της λογαριθμικής-κανονικής Κατανομής.

$exp(m - \sigma^2)$
exp(m)
$\exp(m + \sigma^2/2)\sqrt{\exp(\sigma^2) - 1}$
$exp(m + \sigma^2)$
$\exp(m + \sigma^2/2)$

Αυτή η κατανομή θα μας δώσει την δυνατότητα να περιγράψουμε ισχύ, τάση ή δυνάμεις πεδίου σε γραμμικές μονάδες, οι οποίες όταν αναπαριστούνται σε λογαριθμικές μονάδες έχουν κανονική κατανομή. Δεν μας ενδιαφέρει να εκφράσουμε τις τάσεις ή την ισχύ σε Nepers αλλά σε dB. Αυτό σημαίνει ότι για τον υπολογισμό θα πρέπει να αλλάξουμε ελαφρώς την έκφραση του λογαριθμικούκανονικού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας κάνοντας χρήση των δεκαδικών λογαρίθμων με να το πολλαπλασιάσουμε με ένα παράγοντα 10 ή 20, το οποίο εξαρτάται εάν το πλάτος του σήματος που μας ενδιαφέρει είναι σε ισχύ ή σε τάση. Έτσι η λογαριθμική-κανονική κατανομή όταν η μεταβλητή είναι ισχύς, δίνεται από την σχέση :

$$f(p) = \frac{4.343}{p\sqrt{2\pi\Sigma}} \exp\left(-\frac{\left[10\log p - M\right]^2}{2\Sigma^2}\right)$$
(2.43)

Ενώ όταν είναι τάση, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας είναι :

$$f(v) = \frac{8.686}{v\sqrt{2\pi\Sigma}} \exp\left(-\frac{[20\log v - M]^2}{2\Sigma^2}\right)$$
(2.44)

όπου η μέση τιμή, M και η τυπική απόκλιση  $\Sigma$  είναι σε dB.

Ας επιστρέψουμε όμως στην Suzuki κατανομή, με παράμετρο σ, θεωρώντας ότι έχει σταθερή τιμή σε μια μικρή περιοχή και μεταβάλλεται σύμφωνα με την λογαριθμική-κανονική κατανομή σε μεγάλες περιοχές, δηλαδή,

$$f(\sigma) = \frac{8.686}{\Sigma \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left[20 \log \sigma - M\right]^2}{2\Sigma^2}\right)$$
(2.45)

Γράφοντας ολόκληρη την σχέση και εξαλείφοντας τη μεταβλητή σ με ολοκλήρωση, μας δίνει :

$$f(r) = \int_{0}^{\infty} f(r|\sigma) f(\sigma) d\sigma = \frac{8.686r}{\Sigma\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\sigma^{3}} \exp\left(-\frac{\left[20\log\sigma - M\right]^{2}}{2\Sigma^{2}}\right) \exp\left(-\frac{r^{2}}{2\sigma^{2}}\right) d\sigma \quad (r \ge 0) \quad (2.46)$$

Η κατανομή Suzuki, η οποία έχει δυο παραμέτρους, απλοποιείται σε Rayleigh κατανομή όταν η τυπική απόκλιση γίνεται μηδέν, δηλαδή,  $\Sigma = 0$ . Για να παράγουμε την κατανομή Suzuki, λαμβάνουμε υπόψη την έκφραση του παραστατικού μιγαδικού, δηλαδή,

$$r_{\rm T} \exp(j\varphi_{\rm T}) = r_{\rm M} \exp(j\varphi_{\rm M})$$
(2.47)

όπου Τ είναι το συνολικό και Μ οι πολλαπλές διαδρομές και όπου η κύρια διαφορά του με την παραγωγή της Rayleigh είναι ότι η παράμετρος σ δεν είναι πλέον σταθερή αλλά κυμαίνεται σύμφωνα με την λογαριθμική-κανονική κατανομή και η συνοχή χρόνου/απόστασης είναι μεγαλύτερη από ότι οι διαλείψεις της Rayleigh, δηλαδή μεταβάλλεται πιο αργά.



Σχήμα 2.7 Σχηματικό διάγραμμα της γεννήτριας για την δημιουργία της σειράς Suzuki.

Στο Σχήμα 2.7 βλέπουμε μια γεννήτρια σειρών όπου διέρχονται από ένα φίλτρο τύπου Clarke/Jakes. Η κύρια διαφορά βρίσκεται στο γεγονός ότι η παράμετρος σ οδηγείται από μια γεννήτρια λογαριθμικής-κανονικής σειράς. Στην συνέχεια, αυτό βασίζεται σε μια γεννήτρια Gaussian συν μια αντιλογαριθμική λειτουργία που μετατρέπει τις σειρές σε λογαριθμική-κανονική. Στο Σχήμα 2.7 βλέπουμε ουσιαστικά την αναπαράσταση κυκλώματος του μοντέλου Suzuki: δυο Gaussian σειρές με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία τυπική απόκλιση δημιουργούν μιγαδικό σήμα και διέρχονται από μοναδιαίου κέρδους, βαθυπερατό φίλτρου που εξομοιώνει το Clarke/Jakes φάσμα. Μετά την διαμόρφωση του Doppler, η κατάληξη των σύνθετων σειρών πολλαπλασιάζεται με το  $\sigma$ , όπου  $2\sigma^2$  είναι η ενεργός τιμή στο τετράγωνο της συνδεμένης κατανομής Rayleigh, η οποία περιγράφει τις διαλείψεις λόγω της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή του  $\sigma$  μεταβάλλεται αργά καθώς ο κινητός σταθμός κινείται. Πως οι μεταβολές του σ παράγονται, το αναλύουμε παρακάτω.

Η επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας πρέπει να βασίζεται στο ότι απαιτείται για την πιο γρήγορη από τις δύο διαδικασίες, δηλαδή για την εξασθένηση λόγω πολλαπλών διαδρομών. Όπως γνωρίζουμε, απαιτείται τουλάχιστον δύο φορές η μέγιστη συχνότητα Doppler,  $f_m$ . Καθορίζουμε το ποσοστό δειγματοληψίας σύμφωνα με ένα τμήμα του μήκους κύματος, F. Το ελάχιστο τμήμα του μήκους κύματος που απαιτείται το ονομάζουμε δείγμα τμήματος  $d_s$ , στον χώρο του χρόνου λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα του κινητού σταθμού, V. Έτσι,  $t_s = d_s/V$ . Επιπλέον, γνωρίζουμε ότι  $d_s = \lambda/F$ , άρα η συχνότητα δειγματοληψίας (Hz) δίνεται από την σχέση :

$$f_s = \frac{V}{d_s} = \frac{FV}{\lambda} = Ff_{\max}$$
(2.48)

και όπως γνωρίζουμε από το θεώρημα δειγματοληψίας, το F πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 2.

Οι σειρές και από τις δύο γραμμές (αργές και γρήγορες διαλείψεις), οι οποίες έχουν το ίδιο ρυθμό δειγματοληψίας, μπορούν να πολλαπλασιαστούν για να παράγουν την κατανομή Suzuki, η οποία διατηρεί και των δύο ρυθμών τις αλλαγές των φαινομένων της σκίασης και πολλαπλών διαδρομών, καθώς και το φάσμα του Doppler σε πολλαπλή διαδρομή. Οι αργές διαλείψεις θα δείξουν ένα πολύ στενότερο φάσμα, για το οποίο δεν θα μπορούμε να αναγνωρίσουμε κανένα γνωστό μοντέλο. Σε κάθε περίπτωση, αυτό το στενό φάσμα δεν θα είναι αξιοπρόσεκτο μέσα στο ευρύτερο φάσμα πολλαπλών διαδρομών.

#### 2.9 Το μοντέλο Loo

Στο μοντέλο Loo προσπαθούμε να εξομοιώσουμε ένα κανάλι και που υπάρχουν πιο ήπιες συνθήκες. Με τον όρο πιο ήπιες συνθήκες, εννοούμε ότι το απευθείας σήμα υφίσταται, είτε επειδή δεν είναι μπλοκαρισμένο, είτε επειδή είναι μερικώς σκιασμένο. Το μοντέλο Loo είναι επίσης μια μικτή κατανομή, η οποία έχει τρεις παραμέτρους, σε αντίθεση με τις δυο παραμέτρους που έχει η κατανομή Suzuki. Συνεπώς η κατανομή Loo είναι πιο ευπροσάρμοστη, εις βάρος βεβαίως της απαίτησης μιας πιο σύνθετης διαδικασίας, για την εξαγωγή παραμέτρων από τα δεδομένα.

Αυτή η κατανομή χρησιμοποιείται συχνά στην μοντελοποίηση των επίγειων κινητών δορυφορικών καναλιών. Το μοντέλο υποθέτει ότι έχουμε αργές μεταβολές (λόγω σκίασης) του απευθείας σήματος μαζί με σταθερή διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας συνδυαστικά την Rice και την λογαριθμική-κανονική (Lognormal) κατανομή.

Η κατανομή Loo βασίζεται στην κατανομή Rice. Οι μεταβολές του λαμβανόμενου σήματος θεωρούνται ότι μεταβάλλονται σύμφωνα με την Rician κατανομή με παραμέτρους α και σ, δηλαδή :

$$f(\mathbf{r} \mid \alpha) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + \alpha^2}{2\sigma^2}\right) \mathbf{I}_0\left(\frac{r\alpha}{\sigma^2}\right), (\mathbf{r} \ge 0)$$
(2.49)

Αυτό ισχύει για μικρά τμήματα της διαδρομής. Για μεγαλύτερα τμήματα, το πλάτος του απευθείας σήματος θεωρείται ότι μεταβάλλεται σύμφωνα με την λογαριθμική-κανονική κατανομή, δηλαδή,

$$f(\alpha) = \frac{8.686}{\Sigma \alpha \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{[20\log \alpha - M]^2}{2\Sigma^2}\right), (r \ge 0)$$
(2.50)

όπου M και  $\Sigma$  είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κανονικής κατανομής (σε συνδυασμό με την λογαριθμική-κανονική) για το πλάτος του απευθείας σήματος (A=20 log( $\alpha$ )) εκφρασμένο σε dB.

Κατά συνέπεια στην κατανομή Loo θεωρούμε ότι το σύνθετο λαμβανόμενο σήμα αποτελείται από το άθροισμα δύο παραστατικών μιγαδικών,

$$r_{\rm T} \exp(j\varphi_{\rm T}) = r_{\rm D} \exp(j\varphi_{\rm D}) + r_{\rm M} \exp(j\varphi_{\rm M})$$
(2.51)

όπου Τ εκφράζει το συνολικό, D είναι το απευθείας σήμα και M είναι η διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, το πλάτος του απευθείας σήματος έχει λογαριθμική-κανονική κατανομή εξαιτίας του φαινομένου της σκίασης και την παράμετρο των πολλαπλών διαδρομών,  $\sigma$ , η οποία παραμένει σταθερή καθόλη την διάρκεια. Η συνολική κατανομή, δηλαδή για μεγαλύτερα τμήματα της διαδρομής δίνεται από την σχέση,

$$f(r) = \int_{0}^{\infty} f(r|\alpha) f(\alpha) d\alpha = \frac{8.686r}{\sigma^{2} \Sigma \sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{r^{2} + \alpha^{2}}{2\sigma^{2}}\right) \exp\left(-\frac{\left[20\log\alpha - M\right]^{2}}{2\Sigma^{2}}\right) I_{0}\left(\frac{r\alpha}{\sigma^{2}}\right) d\alpha$$

$$(r \ge 0) \quad (2.52)$$

όπου *M* και Σ είναι σε dB και το  $MP(dB) = 10 \log 2\sigma^2$  είναι στο τετράγωνο η ενεργός τιμή του στοιχείου των πολλαπλών διαδρομών εκφρασμένο σε dB. Η κατανομή Loo είναι αρκετά ευπροσάρμοστη καθώς περιλαμβάνει, ως ειδικές περιπτώσεις, την κανονική και την Rice κατανομή για μεγάλες τιμές του *α* και την Rayleigh κατανομή για πολύ μικρές τιμές του *α*. Αυτή η ιδιότητα καθιστά αυτή την κατανομή έγκυρη για ένα πολύ ευρύ φάσμα συνθηκών από απευθείας σήμα (LOS) έως πολύ εμποδιζόμενο σήμα.

Στο Σχήμα 2.8 βλέπουμε την γεννήτρια της σειράς Loo: δυο Gaussian σειρές με μηδενική μέση τιμή και μοναδιαία τυπική απόκλιση δημιουργούν μιγαδικό σήμα και διέρχονται μέσω βαθυπερατού και U-shaped φίλτρου που εξομοιώνει το Clarke φάσμα. Μετά την διαμόρφωση του Doppler, η κατάληξη των σύνθετων σειρών πολλαπλασιάζεται με το σ.



(Doppler shift of direct signal)

Σχήμα 2.8 Υλοποίηση του μοντέλου Loo με Clarke/Jakes, διαμόρφωση Doppler.

Η πιο χαμηλή γραμμή στο Σχήμα 2.8 δείχνει την εξομοίωση των μεταβολών του πλάτους και της φάσης του απευθείας σήματος. Στο πρώτο βήμα παράγεται η M (dB) μέση τιμή και  $\Sigma$  (dB) η τυπική απόκλιση των Gaussian σειρών. Οι σειρές μετατρέπονται σε γραμμικές μονάδες (λογαριθμικήκανονική κατανομή) υπολογίζοντας τον αντίστροφο λογάριθμό. Το πλάτος του απευθείας σήματος υποβάλλεται σε διαλείψεις εξαιτίας της σκίασης, οι οποίες είναι πιο αργές από ότι αυτές που δημιουργούνται εξαιτίας των πολλαπλών διαδρομών. Ο ρυθμός αλλαγής αυτών των αργών διαλείψεων χαρακτηρίζεται από την παράμετρο που ονομάζεται χρόνος συσχέτισης (correlation time)  $t_{corr}$  ή από την απόσταση που ταξίδευσε, την παράμετρο που ονομάζεται από τα μεγέθη των αντικειμένων που προκαλούν εμπόδιο, δηλαδή αρκετά μέτρα. Η γεννήτρια της λογαριθμικής - κανονικής σειράς (η γραμμή που βρίσκεται χαμηλά στο Σχήμα 2.8) παράγει ασυσχέτιστα δείγματα τα οποία απέχουν  $L_{corr}$ 

Την ίδια στιγμή, οι γρήγορες διαλείψεις παράγονται με υψηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας για τον υπολογισμό του εύρου ζώνης του Doppler, δηλαδή, ±  $f \max = \pm V/\lambda$ . Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να εφαρμοστεί στις αργές διαλείψεις, ένα συνδυασμένος ρυθμός μετατροπής με διαδικασία παρεμβολής, επιτρέποντας έτσι την μιγαδική πρόσθεση των απευθείας και πολλαπλών διαδρομών που εκτελείται στο τέλος της αλυσίδας. Εδώ η δειγματοληψία εφαρμόζεται στην διανυμένη απόσταση χρησιμοποιώντας ένα τμήμα του μήκους κύματος, *F*. Στο επόμενο βήμα, εισάγονται οι μεταβολές της φάσης του απευθείας σήματος. Θεωρούνται ότι έχω γραμμική μεταβολή και δίνουν αύξηση σε μια σταθερή φασματική γραμμή Doppler, η οποία εξαρτάται από την τροχιά του κινητού σταθμού και από τις γωνίες άφιξης, αζιμουθιανή και ανύψωσης, όσο αφορά την τροχιά του κινητού σταθμού, δηλαδή,

$$f_{\text{Direct signal}} = (V/\lambda)\cos\varphi\,\cos\theta = f_{\max}\cos\varphi\cos\theta$$
 (2.53)

όπου  $\varphi$  και  $\theta$  είναι η αζιμουθιανή γωνία και η γωνία ανύψωσης αντίστοιχα. Εάν περιοριστούμε στο οριζόντιο επίπεδο και μειώσουμε την εξάρτηση της γωνίας  $\theta$ , δηλαδή,

$$f_{\text{Direct signal}} = (V/\lambda) \cos\varphi = f_{\text{max}} \cos\varphi$$
 (2.54)

Η σταθερή αύξηση της φάση δίνεται από την σχέση,

$$\Delta \varphi = 2\pi \ \frac{\cos(\phi)}{F} \tag{2.55}$$

Όπου η παράμετρος Δφ πολλαπλασιάζεται με ένα αριθμό δειγμάτων [n] για να παράγει την τρέχουσα φάση. Τέλος, στο Σχήμα 2.8 βλέπουμε ότι έχουμε προαιρετικά και ένα αρχικό όρο της φάσης,  $\varphi_0$ .

# 3

## Μετρητικό Σύστημα Και Μεθοδολογία Μετρήσεων

#### 3.1 Περιγραφή μετρητικού συστήματος

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται τόσο το μετρητικό μας σύστημα, όσο ο χώρος και ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις στο εσωτερικό του αεροπλάνου. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα του μετρητικού συστήματος που χρησιμοποιήθηκε:



Σχήμα 3.1 Μετρητικό σύστημα.

Από την πλευρά εκπομπής, η ισχύς εξόδου του πομπού ήταν 0 dBm πριν από την κεραία, ενώ τα κέρδη των κεραιών εκπομπής ήταν τα εξής: 7.5 dBi για την επίπεδη κεραία (planar antenna) που εξέπεμπε σε συχνότητα 1.8 GHz, 0 dBi για την δικωνική ομοιοκατευθυντική κεραία όταν εξέπεμπε σε συχνότητα 2.1 GHz και 0 dBi όταν εξέπεμπε σε συχνότητα 2.45 GHz.

Το σύστημα του δέκτη ήταν τοποθετημένο πάνω σε μια ειδικά σχεδιασμένη κινητή μονάδα μέτρησης (καροτσάκι) η οποία ήταν κατάλληλη για την διευκόλυνση της μετακίνησης στους διαδρόμους των αεροσκαφών όπου διεξήχθησαν οι μετρήσεις.

Ο δέκτης έχει ευαισθησία -90 dBm, ενώ τα κέρδη της κεραίας-δέκτη είναι: 1.64 dBi, 1.63 dBi, 0.75 dBi για τις συχνότητες 1.8, 2.1 και 2.45 GHz αντίστοιχα. Το λαμβανόμενο σήμα, αφού ενισχυθεί από έναν ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) με κέρδη 26.3 dB, 28.1 dB και 26.2 dB (για τις συχνότητες 1.8, 2.1, 2.45 GHz αντίστοιχα), καταγράφεται σε ένα αναλυτή φάσματος (spectrum analyzer) στον οποίο έχουμε τις ρυθμίσεις που φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

Οι συνολικές μετρούμενες απώλειες του συστήματος από καλώδια, συνδετήρες κ.τ.λ. ήταν 3.7 dB, 4.7 dB, και 5.3 dB, ενώ οι μέγιστες απώλειες διάδοσης που μπορούσαν να μετρηθούν από το σύστημα ήταν 122 dB, 115 dB και 112 dB (για συχνότητες εκπομπής 1.8, 2.1, 2.45 GHz αντίστοιχα).

Πίνακας 3.1 Ρυθμίσεις του Αναλυτή Φάσματος (Spectrum Analyzer).					
Επίπεδο αναφοράς (Reference level)	-10 dBm				
Εξασθένηση (Attenuation)	0 dB				
Εύρος συχνότητας (Span)	0				
Διαχωρισμός Εύρους Ζώνης (Resolution	300 KHz				
Bandwidth)					
Απεικόνιση Εύρους Ζώνης	100 KHz				
(Video Bandwidth)					
Sweep	50 msec				

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τον υπολογισμό ζεύξης (link budget) του συστήματος μέτρησης όπου περιέχονται συγκεντρωμένα όλα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά.

Πομπός							
Ισχύς εξόδου		0 dBm					
Συχνότητα	1.8 GHz	2.1 GHz	2.45 GHz				
Κέρδος κεραίας	7.5 dBi	0 dBi	0 dBi				
EIRP	7.5 dBm	0 dBm	0 dBm				
Δέκτης							
Ευαισθησία δέκτη		-90 dBm					
Κέρδος κεραίας	1.64 dBi	1.63 dBi	0.75 dBi				
Κέρδος ενισχυτή χαμηλού	26.3 dB	28.1 dB	26.2 dB				
θορύβου(LNA)							
Συνολικές απώλειες	3.7 dB	4.7 dB	5.3 dB				
συστήματος							
Μετρούμενες Απώλειες	122 dB	115 dB	112 dB				
Διάδοσης							

Πίνακας 3.2 Υπολογισμός ζεύξης του συστήματος μέτρησης.

Η βίντεο έξοδος του αναλυτή φάσματος (Auxiliary Video Output) συνδέεται στην αναλογική είσοδο μιας κάρτας A/D και δειγματοληπτείται η τάση του εισερχόμενου σήματος με συχνότητα δειγματοληψίας (scan rate) 1000 δείγματα ανά δευτερόλεπτο (1 kHz) και τα δείγματα αποθηκεύονται σε ένα φορητό υπολογιστή.

Για την καταγραφή και απεικόνιση του λαμβανόμενου από τον δέκτη σήματος συναρτήσει του χρόνου, χρησιμοποιήσαμε το λογισμικό πακέτο LABVIEW, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2. Επίσης είχαμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε τις διαλείψεις του σήματος κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Το κυρίως λογισμικό περιέχει μια διαδικασία κατά την οποία γίνεται η μετατροπή των τιμών τάσης από την έξοδο του δέκτη σε τιμές ισχύος μέσω μιας συνάρτησης, η οποία προκύπτει από την διαδικασία βαθμονόμησης (calibration) του δέκτη.



Σχήμα 3.2 Λογισμικό καταγραφής μετρήσεων, LABVIEW.

Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία βαθμονόμησης, εφαρμόζεται στην είσοδο του δέκτη ένα σήμα από μια γεννήτρια ξεκινώντας από -90 dBm έως 0 dBm, και συγχρόνως μετράται η έξοδος του δέκτη (σε Volts) σε συνάρτηση με την μεταβολή της ισχύος της γεννήτριας (σε dBm). Έτσι προκύπτει μια σχέση αντιστοίχησης των τιμών τάσεως του δέκτη με τις τιμές ισχύος της γεννήτριας. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ της ισχύος εισόδου στον δέκτη ως προς την τάση εξόδου, καθώς επίσης και η προσαρμογή (fitting) στα μετρούμενα δεδομένα, της πολυωνυμικής συνάρτησης που μας επιτρέπει την μετατροπή των τιμών τάσεως σε Volts που συλλέγονται από την κάρτα δειγματοληψίας σε αντίστοιχες μονάδες ισχύος dBm, για τις αντίστοιχες συχνότητες εκπομπής.



**Σχήμα 3.3** Συναρτήσεις βαθμονόμησης που μετατρέπουν τα volts που καταγράφει το LABVIEW σε dBm, για τις τρεις συχνότητες.

#### 3.2 Περιγραφή χώρου και μεθοδολογία μέτρησης

To Boeing 737-400 είναι ένα αεροσκάφος για μικρές αποστάσεις, με χωρητικότητα 156 επιβατών και έχει μόνο οικονομικής θέσης καθίσματα. Οι διαστάσεις του αεροσκάφους είναι συνολικά ύψος 11.15 m, μήκος 38.4 m, μέγιστο πλάτος και ύψος καιπίνας 3.54 m και 2.2 m αντίστοιγα, και 22 m μήκος είναι ο χώρος των επιβατών. Η καμπίνα του Boeing 737-400 αποτελείται από 26 σειρές καθισμάτων, με 6 καθίσματα σε κάθε σειρά. Οι θέσεις ονομάζονται Α, Β και C από το παράθυρο προς τον διάδρομο, από την αριστερή πλευρά του διαδρόμου (κοιτάζοντας την κατεύθυνση πτήσης) και D,E, και F από τον διάδρομο προς το παράθυρο από την δεξιά πλευρά του διαδρόμου. Ο διάδρομος έχει πλάτος 0.5 m και το ύψος του κάθε καθίσματος είναι 1.15 m από το πάτωμα. Η απόσταση μεταξύ των καθισμάτων (από το κέντρο του καθενός) είναι 43 cm και τα καθίσματα έχουν υφασμάτινο κάλυμμα. Η απόσταση ανάμεσα στις σειρές είναι 81 cm. Τα ντουλαπάκια για τα προσωπικά αντικείμενα των επιβατών βρίσκονται 1.68 m από το πάτωμα, 1.16 m το ένα από το άλλο και 45 cm πάνω από τους επιβάτες. Η κάτοψη του εσωτερικού χώρου που πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Όλες οι παρακάτω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και για τις τρεις διαφορετικές συχνότητες εκπομπής με το ύψος του πομπού και του δέκτη να είναι 1.7 m. Ο δέκτης τοποθετήθηκε σε ευθεία απόσταση 21 m από τον πομπό, ο οποίος εξακολουθεί να βρίσκεται στην ίδια θέση που υποδεικνύει το Σχήμα 3.4, παρέχοντας την δυνατότητα οπτικής επαφής (LOS) ανάμεσα στις δυο κεραίες. Το άτομο που κινείται όμως καλύπτει περπατώντας 20 m.

Υπό αυτές τις συνθήκες, πραγματοποιήθηκαν πέντε σενάρια κίνησης για κάθε συχνότητα εκπομπής ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη, που περιλαμβάνουν :

- ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα (Σενάριο 1)
- ένα άτομο με κανονική ταχύτητα (Σενάριο 2)
- ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα (Σενάριο 3)
- δύο άτομα με κανονική ταχύτητα (Σενάριο 4)
- τρία άτομα με κανονική ταχύτητα (Σενάριο 5)

Έτσι λάβαμε τις μετρήσεις που απαιτούνται για να μελετήσουμε την συμπεριφορά του διαύλου στην περίπτωση όπου υπάρχουν κινούμενοι σκεδαστές (άτομα) στον χώρο μεταξύ των κεραιών του πομπού και του δέκτη αντίστοιχα.



Σχήμα 3.4 Εσωτερικός χώρος του Boeing737 και θέσεις πομπού-δέκτη για τα διάφορα σενάρια μέτρησης.

Στους παρακάτω πίνακες απεικονίζεται για κάθε σενάριο μετρήσεων ο χρόνος καταγραφής, η ταχύτητα των ατόμων και η μέγιστη ολίσθηση Doppler. Η μέγιστη ολίσθηση Doppler λόγω της ύπαρξης κινούμενου σκεδαστή ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη δίνεται από την σχέση 2V/λ.

Πίνακας 3.3	Ο χρόνος	; καταγραφής, τ	ι ταχύτητα το	ον ατόμων και	η μέγιστη	ολίσθηση	Doppler yı	α 1.8 GHz.
-------------	----------	-----------------	---------------	---------------	-----------	----------	------------	------------

1.8 GHz	T [s]	V [m/s]	f <sub>m</sub> [Hz]
Σενάριο 1	26.79	0.75	8.96
Σενάριο 2	17.51	1.14	13.71
Σενάριο 3	12.10	1.65	19.83
Σενάριο 4	19.60	1.02	12.24
Σενάριο 5	20.30	0.99	11.82

11			are prest near	
	2.1 GHz	T [s]	V [m/s]	f <sub>m</sub> [Hz]
	Σενάριο 1	25.91	0.77	10.81
	Σενάριο 2	17.82	1.12	15.71
	Σενάριο 3	13.66	1.46	20.50
	Σενάριο 4	17.85	1.12	15.69
	Σενάριο 5	20.37	0.98	13.75

Πίνακας 3.4 Ο χρόνος καταγ<u>ραφής, η ταχύτητα των ατόμων και η μέγιστη ο</u>λίσθηση Doppler για 2.1 GHz

Πίνακας 3.5 Ο χρόνος καταγραφής, η ταχύτητα των ατόμων και η μέγιστη ολίσθηση Doppler για 2.45 GHz

2.45 GHz	T [s]	V [m/s]	f <sub>m</sub> [Hz]
Σενάριο 1	23.30	0.86	14.02
Σενάριο 2	18.67	1.07	17.50
Σενάριο 3	12.67	1.58	25.78
Σενάριο 4	18.91	1.06	17.27
Σενάριο 5	20.44	0.98	15.98

Συνεπώς, από τους πίνακες βλέπουμε ότι για την συχνότητα 1.8 GHz, η μέγιστη ολίσθηση Doppler είναι 19.83 Hz άρα η μέγιστη διασπορά Doppler είναι 39.66 Hz. Για την συχνότητα 2.1 GHz η μέγιστη ολίσθηση Doppler είναι 20.50 Hz, άρα η μέγιστη διασπορά Doppler είναι 41 Hz και τέλος για την συχνότητα 2.45 GHz, η μέγιστη ολίσθηση Doppler είναι 25.78 Hz και η μέγιστη διασπορά Doppler είναι 51.56 Hz. Συνεπώς καλύπτουμε και για τις τρεις συχνότητες την προϋπόθεση, η μέγιστη διασπορά Doppler να είναι πολύ μικρότερη από την συχνότητα δειγματοληψίας (scan rate), που για τις συγκεκριμένες μετρήσεις είναι 1000 δείγματα ανά δευτερόλεπτο (1 kHz).

# 4

## Επεξεργασία Μετρήσεων

### Και

## Αποτελέσματα

#### 4.1 Εισαγωγή

Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήσαμε την μελέτη που παρουσιάζεται στο [23], όπου γενικεύουν την μέθοδο Lee έτσι ώστε να μπορεί να γίνει ανάλυση της μεταβλητότητας ενός σήματος. Η γενικευμένη μέθοδος Lee μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε κανάλι διάδοσης και σε κάθε ζώνη συχνοτήτων, επιπλέον βασίζεται σε δείγματα μετρήσεων, γεγονός που μας επιτρέπει να κάνουμε εκτίμηση από τις τιμές των μέσων τιμών, χωρίς να απαιτείται να γνωρίζουμε από πριν, την κατάλληλη συνάρτηση κατανομής του καναλιού διάδοσης. Επίσης, βελτιώνει την ακρίβεια του υπολογισμό του μέσου όρου του διαστήματος που πρέπει να πάρουμε. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τιμές διαφέρουν αρκετά σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν από ένα Rayleigh κανάλι και αποδεικνύουν ότι η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και όταν υπάρχει έντονη διαφοροποίηση μεταξύ αργών και γρήγορων διαλείψεων. Τέλος, η γενίκευση της μεθόδου Lee συμπληρώνει τα αποτελέσματα των Lee και Parsons και κάνει καλύτερο τον χαρακτηρισμό της πιθανής χωρικής μεταβλητότητας. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται ένα μπλοκ διάγραμμα όπου συνοψίζεται η γενίκευση της μεθόδου Lee.



Σχήμα 4.1 Μπλοκ διάγραμμα της γενίκευσης της Μεθόδου Lee.

Η στάθμη ενός σήματος αναλύεται ως ο συνδυασμός της στάθμης της μέσης ισχύς και η τοπική μεταβλητότητα γύρω από την στάθμη της μέσης τιμής. Συνεπώς ένα σήμα r(y) είναι ο συνδυασμός της μικρής κλίμακας διαλείψεων r<sub>0</sub>(y) (ή γρήγορων μεταβολών στο λαμβανόμενο σήμα) ουσιαστικά «υπερτιθέμενο» πάνω στη μεγάλη κλίμακα διαλείψεων m(y), όπου y είναι η απόσταση που απέχει ο δέκτης. Η σχέση είναι :

$$\mathbf{r}(\mathbf{y}) = \mathbf{m}(\mathbf{y}) \cdot \mathbf{r}_0(\mathbf{y}) \tag{4.1}$$

Το σήμα μεγάλης κλίμακας μπορεί να ανακτηθεί ως μια σειρά τοπικών μέσων τιμών κατά μήκος της διαδρομής και αναπαριστά τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας στο λαμβανόμενο σήμα. Αυτές οι τοπικές μέσες τιμές υπολογίζονται σε κάθε τμήμα, βγάζοντας τον μέσο όρο από τα δείγματα του σήματος που βρίσκονται στο διάστημα του κάθε τμήματος. Όταν γίνει ο υπολογισμός των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας, τις αφαιρούμε από το λαμβανόμενο σήμα και έτσι βρίσκουμε τις διαλείψεις της μικρής κλίμακας. Για την ακρίβεια, οι διαλείψεις της μικρής κλίμακας r<sub>0</sub>(y) κανικοποιούνται σε σχέση με την στάθμη της μέση τιμής m(y). Έτσι μπορούμε να ξεχωρίσουμε τις αργές από τις γρήγορες διαλείψεις και να τις αναλύσουμε ξεχωριστά, όπως απεικονίζεται στα Σχήμα 4.2(a) και (b).



Σχήμα 4.2 (a) Κατά εκτίμηση του στοιχείου διάλειψης μεγάλης κλίμακας στο λαμβανόμενο σήμα r(y), (b) υπολογισμός του στοιχείου διάλειψης μικρής κλίμακας.

Σύμφωνα με την μέθοδο Lee για τον υπολογισμό των τοπικών μέσων πρέπει αρχικά να υπολογίσουμε το κατάλληλο μήκος του μέσου παραθύρου 2L, το ελάχιστο αριθμό δειγμάτων N και τέλος την απόσταση d μεταξύ δυο ασυσχέτιστων δειγμάτων. Όπου οι τοπικές μέσες τιμές προκύπτουν από τον υπολογισμό της μέσης τιμής τουλάχιστον N πεδίων στιγμιαίων τιμών, τα οποία απέχουν d απόσταση και βρίσκονται μέσα σε παράθυρο 2L. Η επιλογή του παραθύρου 2L είναι κρίσιμης σημασίας, στην μέθοδο του Lee. Εάν η τιμή του παραθύρου 2L είναι πολύ μικρή, τότε οι γρήγορες μεταβολές του σήματος r(y) θα εμφανίζονται στην μεγάλη κλίμακα διαλείψεων μετά την επεξεργασία της μέσης τιμής, ενώ εάν η τιμή του παραθύρου 2L είναι πολύ μεγάλη κλίμακα διαλείψεων θα είναι πολύ ομαλό και κατά συνέπεια το σήμα μικρής κλίμακας διαλείψεων θα περιέχει κομμάτια από τις αργές διαλείψεις. Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζεται την επιρροή του σωστού παραθύρου 2L, στην ακρίβεια του υπολογισμού της μέσης τιμή ( $\hat{m}_2$ ) που προκύπτει όταν το παράθυρο που έχει επιλεχτεί είναι πολύ στενό και η τιμή ( $\hat{m}_3$ ) όταν το παράθυρο είναι πολύ μεγάλο.



Σχήμα 4.3 Επίδραση της επιλογής παραθύρου 2L στην ακρίβεια του υπολογισμού της μέσης τιμής.

Το κριτήριο για την σωστή επιλογή του παραθύρου σύμφωνα με τον Lee [24], βασίζεται στο γεγονός ότι 68% των εκτιμούμενων μέσων τιμών βρίσκονται μέσα στην περιοχή του 1 dB γύρω από την πραγματική τιμή της μέσης τιμής, δηλαδή,

$$1 \sigma_{\hat{m}} \text{ Spread} = 1 \text{ dB}$$
 (4.2)

Το επόμενο βήμα μετά την επιλογή του 2L είναι να βρούμε την τιμή της απόστασης d ανάμεσα σε ασυσχέτιστα δείγματα. Η τιμή αυτή βρίσκεται από την τιμή του πρώτου μηδενικού συντελεστή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Ενώ, για την τιμή του ελάχιστου αριθμού δειγμάτων επιλέγεται η τιμή των δειγμάτων που εμφανίζονται περισσότερο. Και οι τρεις αυτοί παράμετροι πρέπει να ικανοποιούν την παρακάτω σχέση:

$$N \cdot d \le 2L \tag{4.3}$$

#### 4.2 Επεξεργασία Συνολικού Σήματος - Γρήγορες και Αργές Διαλείψεις

Ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία, επεξεργαστήκαμε τις μετρήσεις, με χρήση του προγράμματος MATLAB<sup>®</sup> και όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.1 καταλήξαμε ότι το κατάλληλο παράθυρο για να προχωρήσουμε την επεξεργασία μετρήσεων είναι 2λ.

1800 MHz										
Scenario	t (s)	V (m/s)	F <sub>s</sub> (samples/s)	T <sub>s</sub> (ms)	dT <sub>0</sub> (ms)	dT <sub>0</sub> (samples)	N	N×dT <sub>0</sub> (samples)	Window Length (s)	
1	26.79	0.75	563.98	1.77	46.10	26.0	12	312.0	0.6	
2	17.51	1.14	555.40	1.80	25.21	14.0	8	112.0	0.2	
3	12.10	1.65	562.64	1.78	24.88	14.0	18	252.0	0.4	
4	19.60	1.02	567.70	1.76	35.23	20.0	17	340.0	0.6	
5	20.30	0.99	571.13	1.75	45.52	26.0	32	832.0	1.5	
	-			2100	MHz			-		
Scenario	t (s)	V (m/s)	F <sub>s</sub> (samples/s)	T <sub>s</sub> (ms)	dT <sub>0</sub> (ms)	dT <sub>0</sub> (samples)	N	N×dT <sub>0</sub> (samples)	Window Length (s)	
1	25.91	0.77	572.83	1.75	47.13	27.0	85	2295.0	4.0	
2	17.82	1.12	525.65	1.90	38.05	20.0	43	860.0	1.6	
3	13.66	1.46	554.10	1.80	21.66	12.0	74	888.0	1.6	
4	17.85	1.12	537.93	1.86	29.74	16.0	67	1072.0	2.0	
5	20.37	0.98	553.26	1.81	48.80	27.0	75	2025.0	3.7	
	-			2450	MHz			-		
Scenario	t (s)	V (m/s)	F <sub>s</sub> (samples/s)	T <sub>s</sub> (ms)	dT <sub>0</sub> (ms)	dT <sub>0</sub> (samples)	N	N×dT <sub>0</sub> (samples)	Window Length (s)	
1	23.30	0.86	555.97	1.80	32.4	18.0	48	864.0	1.6	
2	18.67	1.07	551.53	1.81	29.0	16.0	40	640.0	1.2	
3	12.67	1.58	560.46	1.78	19.6	11.0	57	627.0	1.1	
4	18.91	1.06	547.54	1.83	29.2	16.0	48	768.0	1.4	
5	20.44	0.98	548.34	1.82	41.9	23.0	72	1656.0	3.0	
AV	ERAGES	5	555.2	1.8	34.3	19.1	46.4	902.9	1.6	

Πίνακας 4.1 Στατιστικά για όλες τις συχνότητες για την επιλογή του κατάλληλου παραθύρου σύμφωνα με την γενίκευσης της Μεθόδου Lee [23].

Υπολογίσαμε την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος και λάβαμε τον χρόνο εκείνο για τον οποίο μηδενίζεται ο συντελεστής αυτοσυσχέτισης. Έτσι προκύπτει ο χρόνος αποσυσχέτισης των δειγμάτων dT<sub>0</sub> σε ms. Υπολογίσαμε επίσης τον αριθμό των δειγμάτων N σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράψαμε προηγουμένως. Σε μέσες τιμές η τιμή του παραθύρου προκύπτει 1.6λ αλλά στρογγυλοποιείται στην τιμή 2λ στην συνέχεια της επεξεργασίας. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε χρονικό παράθυρο 1.6 sec.

Στην συνέχεια επεξεργαστήκαμε τις μετρήσεις και στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται το συνολικό σήμα μαζί με τις αργές διαλείψεις, οι γρήγορες διαλείψεις καθώς και το συνολικό σήμα σε σχέση με την ενεργό του τιμή, για τις τρεις συχνότητες και κάθε ένα από τα πέντε σενάρια μετρήσεων.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.6 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.

Από τα Σχήματα 4.4 και 4.6 παρατηρούμε τις διαλείψεις που προκαλεί το ανθρώπινο σώμα στο σήμα που λαμβάνουμε. Στο Σχήμα 4.5 που απεικονίζονται οι γρήγορες διαλείψεις παρατηρούμε ότι είναι αρκετά ομαλές χωρίς «βυθίσματα», γεγονός που σημαίνει ότι καταφέραμε να αφαιρέσουμε επιτυχώς τις αργές διαλείψεις από το λαμβανόμενο σήμα και κατά συνέπεια η επιλογή του παραθύρου 2λ ήταν σωστή για την επεξεργασία των μετρήσεων.



Σχήμα 4.7 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.8 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.9 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.

Από τα Σχήματα 4.7 και 4.9 παρατηρούμε ότι οι διαλείψεις στο λαμβανόμενο σήμα είναι ακόμα πιο πολλές σε σχέση με τα αποτελέσματα στα Σχήματα 4.4 και 4.6. Συνεπώς παρατηρούμε ότι, όχι μόνο το ανθρώπινο σώμα δημιουργεί τις διαλείψεις αλλά και η ταχύτητα του ανθρώπου είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στο φαινόμενο των διαλείψεων. Στο Σχήμα 4.8 που απεικονίζονται οι γρήγορες διαλείψεις, επίσης παρατηρούμε ότι είναι αρκετά ομαλές χωρίς «βυθίσματα», γεγονός που σημαίνει ότι καταφέραμε να αφαιρέσουμε επιτυχώς τις αργές διαλείψεις από το λαμβανόμενο σήμα όπως και προηγουμένως.



Σχήμα 4.10 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.11 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.12 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.

Από τα Σχήματα 4.10 και 4.12 παρατηρούμε ότι οι διαλείψεις στο λαμβανόμενο σήμα είναι σχεδόν παρόμοιες σε σχέση με τα Σχήματα 4.7 και 4.9. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας επηρεάζει το δυναμικό εύρος των διαλείψεων μέχρι κάποιο όριο, από το όριο και πέρα, προφανώς η επιρροή είναι ελάχιστη.



Σχήμα 4.13 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.14 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz

Από τα Σχήματα 4.13 και 4.15 παρατηρούμε ότι όταν περπατάνε δύο άτομα έχουμε κυρίως ένα «βύθισμα» στο λαμβανόμενο σήμα. Εάν τα συγκρίνουμε με τα Σχήματα 4.7 και 4.9 όπου το σενάριο μετρήσεων είναι ένα άτομο με κανονική ταχύτητα παρατηρούμε ότι με τα δύο άτομα μπορεί να έχουμε μόνο ένα «βύθισμα», αλλά έχουμε μεγαλύτερη εξασθένιση του λαμβανόμενου σήματος. Αυτό είναι ένα αναμενόμενο αποτέλεσμα, αφού το ανθρώπινο σώμα σκιάζει το λαμβανόμενο σήμα και στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε δύο σώματα ανάμεσα στην απευθεία συνιστώσα πομπού και δέκτη.



Σχήμα 4.16 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.17 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 1.8 GHz.

Από τα Σχήματα 4.16 και 4.18 παρατηρούμε ότι όταν περπατάνε τρία άτομα έχουμε παρόμοιο λαμβανόμενο σήμα με ένα κυρίως «βύθισμα», όπως και στα προηγούμενα Σχήματα 4.13 και 4.15. Εδώ η εξασθένιση του λαμβανόμενου σήματος είναι μεγαλύτερη λόγω της σκίασης που προκαλούν τα επιπλέον σώματα στον δίαυλο. Η αύξηση αυτή φθάνει και τα 10 dB.



Σχήμα 4.19 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.20 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.21 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.

Από τα Σχήματα 4.19 και 4.21 σε σύγκριση με τα Σχήματα 4.4 και 4.6 όπου το σενάριο μετρήσεων είναι το ίδιο αλλά η συχνότητα είναι μεγαλύτερη, παρατηρούμε ότι έχουμε πολύ πιο έντονες διαλείψεις καθώς αυξάνεται η συχνότητα και ακόμα μεγαλύτερη εξασθένιση του σήματος που λαμβάνουμε. Οι γρήγορες διαλείψεις έχουν παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση που ξεπερνά πολλές φορές τα 30 dB όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.20.



Σχήμα 4.22 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.23 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.24 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.

Από τα Σχήματα 4.22 και 4.24 παρατηρούμε ότι οι διαλείψεις στο λαμβανόμενο σήμα είναι ακόμα πιο έντονες σε σχέση με τα Σχήματα 4.19 και 4.21. Συνεπώς παρατηρούμε, όπως και στην χαμηλότερη συχνότητα, ότι όχι μόνο το ανθρώπινο σώμα δημιουργεί τις διαλείψεις αλλά και η ταχύτητα του είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο φαινόμενο των διαλείψεων.



Σχήμα 4.25 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.26 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.27 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.

Από τα Σχήματα 4.25 και 4.27 παρατηρούμε ότι οι διαλείψεις στο λαμβανόμενο σήμα είναι σχεδόν παρόμοιες σε σχέση με τα Σχήματα 4.22 και 4.24. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας επηρεάζει τις διαλείψεις μέχρι κάποιο όριο, από το όριο και πέρα, προφανώς η επιρροή είναι ελάχιστη.



Σχήμα 4.28 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4. 29 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.30 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz

Από τα Σχήματα 4.28 και 4.30 παρατηρούμε ότι όταν περπατάνε δύο άτομα έχουμε αρκετά «βυθίσματα» στο λαμβανόμενο σήμα. Εάν τα συγκρίνουμε με τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.22 και 4.24 όπου το σενάριο μετρήσεων είναι ένα άτομο με κανονική ταχύτητα παρατηρούμε ότι με τα δύο άτομα μπορεί να έχουμε αρκετά «βυθίσματα», αλλά έχουμε περίπου την ίδια εξασθένιση του λαμβανόμενου σήματος. Οι γρήγορες διαλείψεις αυξάνονται σε σχέση με την ύπαρξη ενός ατόμου και η διακύμανση αγγίζει τα 40 dB.



Σχήμα 4.31 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.32 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.33 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.1 GHz.

Από τα Σχήματα 4.31 και 4.33 παρατηρούμε ότι όταν περπατάνε τρία άτομα έχουμε ακόμα περισσότερα «βυθίσματα» του λαμβανόμενου σήματος, σε σύγκριση με τα Σχήματα 4.28 και 4.30. Οι αργές διαλείψεις που προκαλεί η σκίσαση της απευθείας συνιστώσας από τα τρία άτομα είναι αρκετά έντονη όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.31.



25

10

Received Signal. Fast variations for 2.45 GHz - Σενάριο 1

Σχήμα 4.34 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.

Σχήμα 4.35 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.36 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.

Από τα Σχήματα 4.34 και 4.36 σε σύγκριση με τα Σχήματα 4.19 και 4.21 όπου το σενάριο μετρήσεων είναι το ίδιο αλλά η συχνότητα είναι μεγαλύτερη, παρατηρούμε ότι υπάρχει διαφορά στις διαλείψεις καθώς αυξάνεται η συχνότητα και το λαμβανόμενο σήμα παρουσιάζει ελαφρά μεγαλύτερη εξασθένιση.



Σχήμα 4.37 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.38 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.39 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.

Από τα Σχήματα 4.37 και 4.39 παρατηρούμε ότι οι διαλείψεις στο λαμβανόμενο σήμα είναι ακόμα πιο πολλές σε σχέση με τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.34 και 4.36 αλλά με μικρότερο πλάτος. Συνεπώς παρατηρούμε, όπως και στην χαμηλότερη συχνότητα, ότι όχι μόνο το ανθρώπινο σώμα δημιουργεί τις διαλείψεις αλλά και η ταχύτητα του ανθρώπου είναι ένας σημαντικός παράγοντας στο φαινόμενο των διαλείψεων.



Σχήμα 4.40 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.41 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.42 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.

Από τα Σχήματα 4.40 και 4.42 παρατηρούμε ότι οι διαλείψεις στο λαμβανόμενο σήμα είναι σχεδόν παρόμοιες σε σχέση με τα Σχήματα 4.37 και 4.39. Συνεπώς, παρατηρούμε ότι η αύξηση της ταχύτητας επηρεάζει τις διαλείψεις μέχρι κάποιο όριο, από το όριο και πέρα, προφανώς η επιρροή είναι ελάχιστη, όπως είχαμε παρατηρήσει και στις χαμηλότερες συχνότητες.



Σχήμα 4.43 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.44 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.45 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων δύο ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.

Από τα Σχήματα 4.43 και 4.45 παρατηρούμε ότι όταν περπατάνε δύο άτομα έχουμε αρκετές ομοιότητες στο λαμβανόμενο σήμα σε σύγκριση με τα Σχήματα 4.37 και 4.39 όπου το σενάριο μετρήσεων είναι ένα άτομο με κανονική ταχύτητα.



Σχήμα 4.46 Διάγραμμα του συνολικού σήματος και των αργών διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.47 Διάγραμμα των γρήγορων διαλείψεων με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.48 Διάγραμμα του συνολικού σήματος σε συνάρτηση με την ενεργό του τιμή με σενάριο μετρήσεων τριών ατόμων με κανονική ταχύτητα σε συχνότητα 2.45 GHz.

Από τα Σχήματα 4.46 και 4.48 παρατηρούμε ότι όταν περπατάνε τρία άτομα έχουμε ακόμα περισσότερα «βυθίσματα» του λαμβανόμενου σήματος τα πρώτα πέντε δευτερόλεπτα, σε σύγκριση με τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.43 και 4.45, ενώ στη συνέχεια τα παρουσιάζουν περίπου την ίδια συμπεριφορά. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι έχουμε περίπου την ίδια εξασθένιση του λαμβανόμενου σήματος με τα προηγούμενα διαγράμματα. Οπότε συμπεραίνουμε ότι τα τρία άτομα επηρεάζουν το σήμα περισσότερο όταν βρίσκονται κοντά στον πομπό, ενώ στην συνέχεια καθώς περπατούν έχουν την ίδια επιρροή στο λαμβανόμενο σήμα που έχουν και τα δύο άτομα.

## 4.3 Υπολογισμός Χρόνου Συνοχής (Coherence Time) και Φάσματος Doppler (Doppler Spectrum)

Στην συνέχεια υπολογίσαμε την ταχύτητα των ανθρώπων, την συχνότητα, τον χρόνο συνοχής και το Doppler. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 4.2, 4.3, 4.4 και για τις τρεις συχνότητες.

1.8 GH	z	V [m/s]	f <sub>m</sub> [Hz]	T₀ [ms]	B <sub>-10</sub> [Hz]	B <sub>-3</sub> [Hz]
Σενάρια	<b>)</b> 1	0.75	8.96	46.10	32.27	6.88
Σενάρια	2 (	1.14	13.71	25.21	47.72	32.27
Σενάρια	) 3	1.65	19.83	24.88	79.12	49.18
Σενάρια	) 4	1.02	12.24	35.23	34.93	25.78
Σενάρια	5	0.99	11.82	45.52	39.60	30.96

	<i>.</i>	-			
Πίνακας 4.7 Δποτελέσμα	τα επεξεργασίας	μετοήσεων για	α νοόνο συνονής	$\kappa \alpha_1$ Donnler $\sigma_2$	$\sigma www.ommall.8 GHz$
IIIvukus 4.2 Anoteneopo	in cheseppionius	μειρησεων γι		Kut Doppier oc	002v0tijtu 1.0 0112.

Πίνακας 4.3 Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων για χρόνο συνοχής και Doppler σε συχνότητα 2.1 GHz.

moteneoputu enegepyuolus perpiloear ylu poro ouropijs kui Doppiel de outro									
2.1 GHz	V [m/s]	f <sub>m</sub> [Hz]	T₀ [ms]	B <sub>-10</sub> [Hz]	B <sub>-3</sub> [Hz]				
Σενάριο 1	0.77	10.81	47.13	41.41	25.45				
Σενάριο 2	1.12	15.71	38.05	52.63	35.16				
Σενάριο 3	1.46	20.50	21.66	80.91	50.86				
Σενάριο 4	1.12	15.69	29.74	53.32	17.34				
Σενάριο 5	0.98	13.75	48.80	46.74	12.43				

Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα επεξεργασίας μετρήσεων για χρόνο συνοχής και Doppler σε συχνότητα 2.45 GHz.

2.45 GHz	V [m/s]	f <sub>m</sub> [Hz]	T₀ [ms]	B <sub>-10</sub> [Hz]	B <sub>-3</sub> [Hz]
Σενάριο 1	0.86	14.02	32.38	44.89	29.05
Σενάριο 2	1.07	17.50	29.01	57.36	36.08
Σενάριο 3	1.58	25.78	19.63	74.70	29.29
Σενάριο 4	1.06	17.27	29.22	54.00	32.88
Σενάριο 5	0.98	15.98	41.95	51.41	17.14

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της ταχύτητας ο χρόνος συνοχής του διαύλου μειώνεται ενώ αντίστροφα η διασπορά Doppler αυξάνεται (Σενάρια 1-3). Στην περίπτωση που κινούνται δύο ή τρία άτομα σημαντικό ρόλο παίζει η ταχύτητα και όχι ο αριθμός των ατόμων. Για παράδειγμα στην συχνότητα 1.8 GHz, τα Σενάρια 4 και 5 παρουσιάζουν σχεδόν ίδους χρόνους συνοχής με το Σενάριο 1 που έχουν την ίδια ταχύτητα κίνησης. Οι παραπάνω πίνακες προκύπτουν από τα διαγράμματα που ακολουθούν.



Σχήμα 4.49 Διάγραμμα του χρόνου συνοχής για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 1.8GHz.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 4.49, όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ατόμου τόσο μειώνεται ο χρόνος συνοχής. Το φαινόμενο αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς ο χρόνος συνοχής εξαρτάται από την ταχύτητα του κινούμενου σκεδαστή και είναι αντιστρόφως ανάλογες ποσότητες. Επιπλέον, όταν έχουμε δύο και τρία άτομα ο χρόνος συνοχής είναι κατά πολύ μεγαλύτερος δείχνοντας ότι ο σημαντικότερος παράγοντας είναι η ταχύτητα και όχι το πλήθος των ατόμων.



Σχήμα 4.50 Διάγραμμα του χρόνου συνοχής για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 2.1GHz.
Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 4.50, έχουμε αρκετά διαφορετική συμπεριφορά του χρόνου συνοχής σε σύγκριση με την συχνότητα των 1.8 GHz. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ατόμου τόσο αυξάνεται ο χρόνος συνοχής. Φυσικά όταν έχουμε δύο και τρία άτομα ο χρόνος συνοχής είναι κατά πολύ μεγαλύτερος.



Σχήμα 4.51 Διάγραμμα του χρόνου συνοχής για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 2.45GHz.

Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 4.51, έχουμε μια κοινή συμπεριφορά μεταξύ των σεναρίων.



Σχήμα 4.52 Διάγραμμα του φάσματος Doppler για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 1.8GHz.



Σχήμα 4.53 Διάγραμμα του φάσματος Doppler για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.54 Διάγραμμα του φάσματος Doppler για όλα τα σενάρια μετρήσεων σε συχνότητα 2.45 GHz.

Όπως παρατηρούμε από τα Σχήματα 4.52, 4.53 και 4.54 για όλες τις συχνότητες, καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ατόμου μεγαλώνει το φάσμα Doppler. Επιπλέον, υπάρχει εμφανής διαφορά στο φάσμα Doppler μεταξύ του Σεναρίου 3 και των υπολοίπων. Από αυτό το φαινόμενο, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η ταχύτητα του ατόμου σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο Doppler. Υποθέτουμε ότι καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ατόμου, έχουμε περισσότερες ανακλώμενες και περιθλώμενες συνιστώσες πάνω στο ανθρώπινο σώμα, οι οποίες συνεισφέρουν στο συνολικό λαμβανόμενο σήμα και οι οποίες υπόκεινται στο φαινόμενο Doppler.

### 4.4 Υπολογισμός Κατανομών του Λαμβανόμενου Σήματος

#### 4.4.1 Υπολογισμός Κατανομών για Συνολικό Λαμβανόμενο Σήμα

Υπολογίσαμε με χρήση του προγράμματος MATLAB<sup>®</sup> για το συνολικό λαμβανόμενο σήμα τις κατανομές Rayleigh, Rician, Lognormal και Weibull. Από όλες τις κατανομές αυτές προκύπτει ότι το συνολικό λαμβανόμενο σήμα ακολουθεί αξιόπιστα την κατανομή Rayleigh και Weibull. Αυτό φαίνεται και από τους Πίνακες 4.5, 4.6 και 4.7 όπου έχει υπολογιστεί ο παράκοντας K σε dB για την Rician κατανομή και είναι φανερό ότι η τιμή του είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα η κατανομή να ακολουθεί καλύτερα την Rayleigh. Οι τιμές των παραμέτρων βρίσκονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 4.5, 4.6 και 4.7 και για τις τρεις συχνότητες. Στην περίπτωση της κατανομής Rician αν ο παράγοντας K είναι μικρότερος από 3 dB θεωρείται ότι λαμβάνει τα χαρακτηριστικά της Rayleigh κατανομής.

		5 5 0	
1.8 GHz	K <sub>f</sub> (dB)	a (Volt)	b (Volt)
Σενάριο 1	-6.3	1.06	3.47
Σενάριο 2	-5.4	1.06	3.17
Σενάριο 3	-3.0	1.05	2.69
Σενάριο 4	2.6	1.04	2.61
Σενάριο 5	-1.0	1.02	2.18

Πίνακας 4.5 Τιμές παραμέτρων για τις κατανομές Rayleigh και Weibull για 1.8 GHz.

Πίνακας 4.6 Τιμές παραμέτρων για τις κατανομές Rayleigh και Weibull	για 2.1 (	JΗz.
---	-----------	------

2.1 GHz	K <sub>f</sub> (dB)	a (Volt)	b (Volt)
Σενάριο 1	-∞	0.97	1.75
Σενάριο 2	-∞	0.99	1.88
Σενάριο 3	-∞	0.96	1.73
Σενάριο 4	-∞	0.97	1.74
Σενάριο 5	-∞	0.97	1.78

|--|

2.45 GHz	K <sub>f</sub> (dB)	a (Volt)	b (Volt)	
Σενάριο 1	-8	1.00	1.95	
Σενάριο 2	-3.4	1.05	2.72	
Σενάριο 3	1.5	1.03	2.42	
Σενάριο 4	-3.0	1.04	2.65	
Σενάριο 5	-5.2	1.00	2.02	

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι κατανομές Rayleigh και Weibull για όλες τις συχνότητες και όλα τα σενάρια μετρήσεων. Από τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.55 έως 4.59 για την συχνότητα 1.8 GHz, βλέπουμε ότι οι μετρήσεις ακολουθούν καλύτερα την κατανομή Weibull. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί η κατανομή Weibull είναι απόλυτα προσαρμοζόμενη με δύο μεταβλητές παραμέτρους. Ενώ από τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.60 έως 4.64 για την συχνότητα 2.1 GHz, βλέπουμε ότι οι μετρήσεις ακολουθούν και τις δύο κατανομές Weibull και Rayleigh. Τέλος, για τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.65 έως 4.69 για την συχνότητα 2.45 GHz, οι μετρήσεις ακολουθούν και τις δύο κατανομές στα σενάρια μετρήσεων 2,3 και 4 οι μετρήσεις ακολουθούν καλύτερα την κατανομή Weibull.



Σχήμα 4.55 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 1), Rayleigh και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.56 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 2), Rayleigh και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.57 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 3), Rayleigh και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.58 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 4), Rayleigh και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.59 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 5), Rayleigh και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.60 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 1), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.61 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 2), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.62 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 3), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.63 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 4), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.64 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 5), Rayleigh και Weibull για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.65 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 1), Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.66 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 2), Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.67 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 3), Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.68 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 4), Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.69 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις μετρήσεις του συνολικού σήματος (σενάριο μετρήσεων 5), Rayleigh και Weibull για 2.45 GHz.

# 4.4.2 Υπολογισμός Κατανομών για τις Γρήγορες Διαλείψεις

Υπολογίσαμε με χρήση του προγράμματος MATLAB<sup>®</sup> για τις γρήγορες διαλείψεις τις κατανομές Rayleigh, Rician, Lognormal και Weibull. Από όλες τις κατανομές αυτές προκύπτει ότι οι γρήγορες διαλείψεις ακολουθούν αξιόπιστα την κατανομή Rician και Weibull. Αυτό φαίνεται και από τους Πίνακες 4.8, 4.9 και 4.10 όπου έχει υπολογιστεί ο παράκοντας K σε dB για την Rician κατανομή Οι τιμές των παραμέτρων βρίσκονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 4.8, 4.9 και 4.10 και για τις τρεις συχνότητες.

1.8 GHz	K <sub>f</sub> (dB)	a (Volt)	b (Volt)
Σενάριο 1	12.1	1.06	6.03
Σενάριο 2	12.6	1.06	6.44
Σενάριο 3	11.9	1.06	6.00
Σενάριο 4	12.2	1.06	6.15
Σενάριο 5	10.2	1.06	4.51

Πίνακας 4	1.8	Γιμές	παρο	ιμέτι	οων η	/ια τις	: κατανο	μές	Rician	και	Weibull	για 1	1.8 (	GHz.
								F	• - • • • •			1		

Πίνακας 4.9	Τιμές παραμέτρα	ν νια τις κατανομ	éc Rician και	Weibull v	1a 2 1 GHz
IIII unus 1.7	i mes napapeipe	n fiù tis kutuvop	icy morall Rul	werbull y	tu 2.1 OIIZ

2.1 GHz	K <sub>f</sub> (dB)	a (Volt)	b (Volt)
Σενάριο 1	4.6	1.04	2.53
Σενάριο 2	3.8	1.05	2.75
Σενάριο 3	3.0	1.04	2.59
Σενάριο 4	4.8	1.05	2.93
Σενάριο 5	4.1	1.05	2.79

Πίνακας 4.1(	) Τιμές παραμέτρων για	τις κατανομές Rician και	Weibull yia 2.45 GHz
--------------	------------------------	--------------------------	----------------------

2.45 GHz	K <sub>f</sub> (dB)	a (Volt)	b (Volt)	
Σενάριο 1	5.3	1.06	3.06	
Σενάριο 2	6.3	1.06	3.36	
Σενάριο 3	6.8	1.06	3.40	
Σενάριο 4	6.4	1.06	3.33	
Σενάριο 5	5.8	1.06	3.17	

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι κατανομές Ricean και Weibull για όλες τις συχνότητες και όλα τα σενάρια μετρήσεων. Από τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.70 έως 4.74 για την συχνότητα 1.8 GHz, βλέπουμε ότι οι γρήγορες διαλείψεις ακολουθούν καλύτερα την κατανομή Weibull. Το ίδιο ισχύει και για τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.75 έως 4.79 για την συχνότητα 2.1 GHz, όπου επίσης βλέπουμε ότι οι γρήγορες διαλείψεις ακολουθούν καλύτερα την κατανομή Weibull. Τέλος, το ίδιο παρατηρούμε και για τα διαγράμματα στα Σχήματα 4.80 έως 4.84 για την συχνότητα 2.45 GHz.



Σχήμα 4.70 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1), Ricean και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.71 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2), Ricean και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.72 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3), Ricean και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.73 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4), Ricean και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.74 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5), Ricean και Weibull για 1.8GHz.



Σχήμα 4.75 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1), Ricean και Weibull για 2.1GHz.



Σχήμα 4.76 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2), Ricean και Weibull για 2.1GHz.



Σχήμα 4.77 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3), Ricean και Weibull για 2.1GHz.



Σχήμα 4.78 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4), Ricean και Weibull για 2.1GHz.



Σχήμα 4.79 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5), Ricean και Weibull για 2.1GHz.



Σχήμα 4.80 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1), Ricean και Weibull για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.81 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2), Ricean και Weibull για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.82 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3), Ricean και Weibull για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.83 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4), Ricean και Weibull για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.84 Διάγραμμα με τις κατανομές από τις γρήγορες διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5), Ricean και Weibull για 2.45 GHz.

## 4.4.3 Υπολογισμός Κατανομών για τις Αργές Διαλείψεις

Υπολογίσαμε με χρήση του προγράμματος MATLAB<sup>®</sup> για τις αργές διαλείψεις τις κατανομές Rayleigh, Rician, Lognormal και Weibull. Από όλες τις κατανομές αυτές προκύπτει ότι οι αργές διαλείψεις ακολουθούν αξιόπιστα την κατανομή Lognormal. Οι παράμετροι μ και σ της κατανομής Lognormal παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο συγκεντρωτικά μαζί με τα υπόλοιπα στατιστικά στοιχεία των γρήγορων διαλείψεων. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται η λογαριθμική-κανονική κατανομή για όλες τις συχνότητες και όλα τα σενάρια μετρήσεων.



Σχήμα 4.85 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 1.8 GHz.



Σχήμα 4.86 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 1.8 GHz.



Σχήμα 4.87 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 1.8 GHz.



Σχήμα 4.88 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 1.8 GHz.



Σχήμα 4.89 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 1.8 GHz.



Σχήμα 4.90 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.91 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.92 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.93 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz.



**Σχήμα 4.94** Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.1 GHz.



Σχήμα 4.95 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 1) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.96 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 2) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.97 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 3) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.98 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 4) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz.



Σχήμα 4.99 Διάγραμμα με τις αργές διαλείψεις (σενάριο μετρήσεων 5) και λογαριθμική-κανονική κατανομή για 2.45 GHz.

#### 4.5 Στατιστικά Διαλείψεων

Στους παρακάτω πίνακες υπολογίζονται τα στατιστικά των διαλείψεων για όλες τις συχνότητες και όλα τα σενάρια μετρήσεων. Οι τιμές των παραμέτρων μ, σ, max, min, DR, 90% percentile είναι τα στατιστικά στοιχεία των γρήγορων διαλείψεων.

Πινακας 4.11 Στατιστικα διαλείψεων για συχνότητα 1.8 GHz.									
1.8 GHz	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5				
V [m/s]	0,75	1,14	1,65	1,02	0,99				
f <sub>m</sub> [Hz]	8,96	13,71	19,83	12,24	11,82				
P <sub>r</sub> [dBm]	-42,27	-42,63	-43,87	-46,17	-45,81				
μ [dB]	-0,12	-0,11	-0,11	-0,09	-0,16				
σ [dB]	1,50	1,43	1,56	1,53	1,86				
max [dB]	4,80	4,91	5,16	5,17	7,92				
min [dB]	-8,75	-6,34	-7,15	-7,75	-12,55				
DR [dB]	13,54	11,25	12,31	12,92	20,47				
90% [dB]	1,75	1,70	1,83	1,71	1,94				
MM_Slow [dB]	-42,15	-42,52	-43,75	-46,09	-45,65				
SS_Slow [dB]	2,44	2,64	3,33	3,74	5,12				

Πίνακας 4.12 Στατιστικά διαλείψεων για συχνότητα 2.1 GHz.

2.1 GHz	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5
V [m/s]	0,77	1,12	1,46	1,12	0,98
f <sub>m</sub> [Hz]	10,81	15,71	20,50	15,69	13,75
P <sub>r</sub> [dBm]	-59,81	-57,57	-59,13	-56,70	-57,10
μ [dB]	-0,75	-0,54	-0,67	-0,50	-0,52
σ [dB]	4,33	3,83	3,98	3,51	3,61
max [dB]	10,29	10,21	12,05	10,92	11,76
min [dB]	-35,38	-34,67	-30,66	-30,04	-27,85
DR [dB]	45,67	44,88	42,71	40,96	39,61
90% [dB]	3,88	3,63	3,53	3,19	3,40
MM_Slow [dB]	-59,06	-57,03	-58,46	-56,20	-56,58
SS_Slow [dB]	4,39	4,12	5,08	5,30	5,21

Πίνακας 4.13 Στατιστικά διαλείψεων για συχνότητα 2.45 GHz							
2.45 GHz	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4	Σενάριο 5		
V [m/s]	0,86	1,07	1,58	1,06	0,98		
f <sub>m</sub> [Hz]	14,02	17,50	25,78	17,27	15,98		
P <sub>r</sub> [dBm]	-62,65	-61,30	-60,71	-61,82	-60,65		
μ [dB]	-0,47	-0,38	-0,42	-0,42	-0,49		
σ [dB]	3,25	3,19	2,90	2,91	3,15		
max [dB]	9,72	9,33	9,72	8,83	9,19		
min [dB]	-33,90	-33,92	-28,38	-27,85	-30,08		
DR [dB]	43,61	43,25	38,10	36,68	39,28		
90% [dB]	3,06	2,94	2,56	2,80	2,83		
MM_Slow [dB]	-62,19	-60,91	-60,29	-61,40	-60,17		
SS Slow [dB]	4.61	2.76	3.55	2.96	4.59		

Στην συνέχεια απεικονίζονται οι στατιστικές παράμετροι Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου (Level Crossing Rate - LCR) και Μέση Διάρκεια Διάλειψης (Average Fade Duration -AFD) για όλες τις συχνότητες και όλα τα σενάρια μετρήσεων.



Σχήμα 4.100 Διάγραμμα απεικόνισης του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.101 Διάγραμμα απεικόνισης του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.102 Διάγραμμα απεικόνισης του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 2.45 GHz.

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα στο Σχήμα 4.100, για την συχνότητα 1.8 GHz, όσο αυξάνονται τα άτομα, τόσο μειώνεται ο Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου και την χαμηλότερη τιμή την βρίσκουμε όταν κινούνται με κανονική ταχύτητα τρία άτομα. Την μέγιστη τιμή την πετυχαίνουμε όταν κινείται ένα άτομο με κανονική ταχύτητα. Αυτό δείχνει ότι και ο Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα και όχι από τον αριθμό τον ατόμων. Παρατησρούμε οι μέγιστες τιμές πρκύπτουν για τα τρια πρώτα σενάρια. Από το διάγραμμα στο Σχήμα 4.101, για την συχνότητα 2.1 GHz, παρατηρούμε ότι την μέγιστη τιμή του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου την πετυχαίνουμε όταν κινούνται δύο άτομα με κανονική ταχύτητα, ενώ την χαμηλότερη τιμή όταν κινείται ένα άτομο με κανονική ταχύτητα, ενώ την χαμηλότερη τιμή συχνότητα 2.45 GHz, παρατηρούμε ότι την μέγιστη τιμή του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου την πετυχαίνουμε όταν κινείται ένα άτομο με κανονική ταχύτητα, ενώ την χαμηλότερη τιμή όταν κινείται όνα κινείται ένα άτομο με κανοική ταχύτητα, ενώ την χαμηλότερη τιμή συχνότητα 2.45 GHz, παρατηρούμε ότι την μέγιστη τιμή του Ρυθμού Διέλευσης Κατωφλίου την πετυχαίνουμε όταν κινείται ένα άτομο με κανοική ταχύτητα, ενώ σο αυξάνονται τα άτομα μειώνεται ο Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου την πετυχαίνουμε όταν κινείται ένα άτομο με κανοική ταχύτητα, ενώ σο αυξάνονται τα άτομα μειώνεται ο Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου.



**Σχήμα 4.103** Διάγραμμα απεικόνισης της Μέσης Διάρκειας Διάλειψης για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 1.8 GHz.



Σχήμα 4.104 Διάγραμμα απεικόνισης της Μέσης Διάρκειας Διάλειψης για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 2.1 GHz.



Σχήμα 4.105 Διάγραμμα απεικόνισης της Μέσης Διάρκειας Διάλειψης για όλα τα σενάρια μετρήσεων στην συχνότητα 2.45 GHz.

Όπως παρατηρούμε από το διάγραμμα στο Σχήμα 4.103, για την συχνότητα 1.8 GHz, όσο αυξάνονται τα άτομα, τόσο μεγαλώνει η Μέση Διάρκεια Διάλειψης. Την μέγιστη τιμή την πετυχαίνουμε όταν κινούνται τρία άτομα με κανονική ταχύτητα. Αυτό συμβαίνει επειδή η Μέση Διάρκεια Διάλειψης είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον Ρυθμό Διέλευσης Κατωφλίου. Επίσης παρατηρούμε ότι υπάρχει μια μέιωση της τιμής της Μέσης Διάρκειας όσο αυξάνεται η ταχύτητα των ατόμων. Από το διάγραμμα στο Σχήμα 4.104, για την συχνότητα 2.1 GHz, παρατηρούμε ότι την μέγιστη τιμή την πετυχαίνουμε όταν κινούνται τρία άτομα με κανονική ταχύτητα, το αντίστροφο δηλαδή από τον Ρυθμό Διέλευσης Κατωφλίου και επιπλέον παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ατόμου η καμπύλη μειώνεται. Τέλος από το διάγραμμα στο Σχήμα 4.105, για την συχνότητα 2.45 GHz, παρατηρούμε ότι την μέγιστη τιμή την μέγιστη τιμή την μέγιστη τιμή την πετυχαίνουμε όταν κινούνται η Μέση Διάρκεια Διάλειψης. Συνεπώς, όπως και ο Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου, έτσι και η Μέση Διάρκεια Διάλειψης. Συνεπώς, όπως και ο Ρυθμός Διέλευσης Κατωφλίου, έτσι και η Μέση Διάρκεια Διάλειψης.

Γενικά

5

# Συμπεράσματα

Μέσα από αυτή την διπλωματική εργασία προσπαθήσαμε να χαρακτηρίσουμε τις χρονικές μεταβολές που προκαλεί στο λαμβανόμενο σήμα, τόσο το ανθρώπινο σώμα όσο και η ταχύτητα με την οποία κινείται ο άνθρωπος.

Όπως είδαμε και στα διαγράμματα 4.4 έως 4.18, για την συχνότητα μετρήσεων 1.8 GHz :

- καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανθρώπου, αυξάνονται οι διαλείψεις και μεγαλώνει η εξασθένηση στο λαμβανόμενο σήμα,
- στα σενάρια μετρήσεων με δύο και με τρία άτομα, οι διαλείψεις έχουν την ίδια περίπου μορφή,
- όταν είναι τρία τα άτομα έχουμε μεγαλύτερη εξασθένιση του σήματος,
- και στα πέντε όμως σενάρια μετρήσεων, την μέγιστη εξασθένιση την λαμβάνουμε όταν τα άτομα βρίσκονται περίπου στην μέση της διαδρομής.

Για την συχνότητα μετρήσεων 2.1 GHz παρατηρήσαμε τα παρακάτω :

- καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανθρώπου, αυξάνονται οι διαλείψεις,
- οι διαλείψεις είναι «έντονες» καθόλη την διάρκεια της διαδρομής και στα πέντε σενάρια μετρήσεων,
- το δυναμικό εύρος σε αυτή την συχνότητα, όπως απεικονίζεται και στους πίνακες 4.11 και 4.12, κυμαίνεται σε διπλάσιες τιμές από 39 έως 45 dB, σε σχέση με την συχνότητα 1.8 GHz, που κυμαίνεται από 11 έως 20 dB.

Για την συχνότητα 2.45 GHz, παρατηρούμε :

- πιο έντονες διαλείψεις, παρουσιάζονται στο πρώτο σενάριο μετρήσεων όπου περπατά ένα άτομο με χαμηλή ταχύτητα.και ιδιαίτερα στο πρώτο μισό της διαδρομής,
- στα υπόλοιπα σενάρια μετρήσεων έχουμε λιγότερο «έντονες» διαλείψεις στην μέση της διαδρομής και πιο «έντονες» στα δύο άκρα της διαδρομής,
- ομοίως και σε αυτή την συχνότητα το δυναμικό εύρος κυμαίνεται σε υψηλές τιμές από 36 έως 44 dB.

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρούμε στον χρόνο συνοχής και για τις τρεις συχνότητες. Όπως βλέπουμε και στους πίνακες 4.2 έως 4.4, παρατηρούμε ότι :

- όσο αυξάνεται η ταχύτητα, τόσο μειώνεται ο χρόνος συνοχής,
- όταν όμως αυξήσουμε το πλήθος των ατόμων, ο χρόνος συνοχής αυξάνεται στις συχνότητες 1.8 και 2.45 GHz κατά 10 ms περίπου, ενώ στην συχνότητα 2.1 GHz κατά 19 ms.

Συνεπώς, πιο σημαντική παράμετρος στον χρόνο συνοχής είναι το πλήθος των ατόμων.

Αντίστοιχα, για την διασπορά Doppler παρατηρούμε στα διαγράμματα 4.52 έως 4.54 :

- όταν αυξάνεται η ταχύτητα, αυξάνεται και η διασπορά Doppler,
- υπάρχει εμφανής διαφορά στο φάσμα Doppler μεταξύ του σεναρίου όπου περπατά ένα άτομο με υψηλή ταχύτητα και των υπολοίπων. Από αυτό το φαινόμενο, παρατηρούμε αυτό το οποίο ήδη γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα του ατόμου σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο Doppler. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ατόμου, έχουμε περισσότερες ανακλώμενες και περιθλώμενες συνιστώσες πάνω στο ανθρώπινο σώμα, οι οποίες συνεισφέρουν στο συνολικό λαμβανόμενο σήμα και οι οποίες υπόκεινται στο φαινόμενο Doppler,
- την μεγαλύτερη τιμή την λαμβάνουμε στην συχνότητα 2.1 GHz.

Το συνολικό λαμβανόμενο σήμα από όλες τις κατανομές Rayleigh, Rician, Lognormal και Weibull ακολουθεί αξιόπιστα για την συχνότητα 1.8 GHz, την κατανομή Weibull. Για την συχνότητα 2.1 GHz, βλέπουμε ότι οι μετρήσεις ακολουθούν και τις δύο κατανομές Weibull και Rayleigh, ενώ για την συχνότητα 2.45 GHz, οι μετρήσεις ακολουθούν και τις δύο κατανομές Weibull και Rayleigh στα σενάρια μετρήσεων 1 και 5, ενώ στα σενάρια μετρήσεων 2,3 και 4 οι μετρήσεις ακολουθούν καλύτερα την κατανομή Weibull. Οι γρήγορες διαλείψεις ακολουθούν καλύτερα την κατανομή Weibull σε όλες τις συχνότητες, ενώ οι αργές διαλείψεις για όλες τις συχνότητες ακολουθούν αξιόπιστα την κατανομή Lognormal.

Από τα διαγράμματα 4.100 έως 4.102 παρατηρούμε για τον Ρυθμό Διέλευσης Κατωφλίου:

- στις συχνότητες 1.8 και 2.45 GHz πετυχαίνουμε τις υψηλότερες τιμές με την μέγιστη ταχύτητα των ατόμων, ενώ στην συχνότητα 2.1 GHz, την πετυχαίνουμε με τα δύο άτομα,
- από όλες τις συχνότητες μετρήσεων, στην συχνότητα 1.8 GHz έχουμε την υψηλότερη τιμή στον Ρυθμό Διέλευσης Κατωφλίου.

Συνεπώς παρατηρούμε ότι στον Ρυθμό Διέλευσης Κατωφλίου ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας εκτός από την ταχύτητα του ατόμου είναι και η συχνότητα.

Από τα διαγράμματα 4.103 έως 4.105 παρατηρούμε για την Μέση Διάρκεια Διάλειψης:

- υπάρχει μια μείωση της τιμής της Μέσης Διάρκειας Διαλείψεων όσο αυξάνεται η ταχύτητα των ατόμων,
- την υψηλότερη τιμή την έχουμε στην συχνότητα 2.45 GHz.

Όπως συμπεραίνουμε, το ανθρώπινο σώμα έχει ιδιαίτερη επίδραση στο λαμβανόμενο σήμα, ιδίως σε εσωτερικούς χώρους. Συνεπώς, για να μπορούμε να επιτύχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα ασύρματης μετάδοσης, πρέπει να γίνεται ιδιαίτερη μελέτη και πρόβλεψη των κινήσεων των ανθρώπων, και της επίδρασης τους στο λαμβανόμενο σήμα ώστε να επιτύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα.

# Βιβλιογραφία

- J. Chuang, H. Ni Xin; Huang, S. Chiu, and D. G. Michelson, "UWB radiowave propagation within the passenger cabin of a boeing 737-200 aircraft," *in Proc. VTC'07-Spring*, pp. 496-500, 22-25 Apr. 2007.
- [2] N. R. Díaz, "Narrowband measurements in an airbus A319 for in-cabin wireless personal communications via satellite," *in Proc. ASMS'03*, 10-11 Jul. 2003.
- [3] S. H. Chen, and S. K. Jeng, "SBR image approach for radio wave propagation in tunnels with and without traffic," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 45, no. 3, pp. 570-578, Aug. 1996.
- [4] M. Lienard, and P. Degauque, "Propagation in wide tunnels at 2 GHz: a statistical analysis," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 47, no. 4, pp. 1322-1328, Nov. 98.
- [5] H. M. El-Sallabi, and J. Tervonen, "Characterization of radio wave propagation in tunnels for microcellular communications," *in Proc. APS 2000*, pp. 91-94, 06-08 Nov. 2000.
- [6] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel*. 2<sup>nd</sup> ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2000.
- [7] Νεκτάριος Μωραϊτης, Χαρακτηρισμός Διαύλου Εσωτερικών Χώρων στην Χιλιοστομετρική Ζώνη Συχνοτήτων για την Ανάπτυζη Ασύρματων Συστημάτων Ευρείας Ζώνης. Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π. 2004.
- [8] A. Jahn, et al., "Evolution of aeronautical communications for personal and multimedia services," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, pp. 36-43, Jul. 2003.
- T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Englwood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.
- [10] S. O. Rice, "Mathematical analysis of random noise," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 23, pp. 292-332, 1944.
- [11] R. H. Clarke, "A statistical theory of mobile radio reception," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 47, no. 6, pp. 957-1000, 1968.
- [12] G. L. Stuber, *Principles of Mobile Communication*. Kluwer, 2001.
- [13] R. J. C. Bultitude, "Measurement, characterization and modeling of 800/900 MHz indoor radio channel for digital communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 25, no. 6, pp. 5-12, June 1987.
- [14] T. S. Rappaport, and C. D. McGillem, "UHF fading in factories," *IEEE J. Select. Area Commun.*, vol. 7, no. 1, pp. 40-48, Jan. 1989.
- [15] C. Cerasoli, "RF propagation in tunnel environments," in Proc. MILCOM'04, vol.1, pp. 363-369, 31 Oct.-3 Nov. 2004.
- [16] G. A. Breit, H. Hachem, J. Forrester, and P. Guckian, "RF propagation characteristics of incabin CDMA mobile phone networks," *in Proc. DASC'05*, vol. 2, 2005.
- [17] RTCA, 2004, *Guidance on Allowing Transmitting Portable Electronic Devices (T-PEDs) on Aircraft*, DO-294, Washington D.C.
- [18] D. M. J. Devasirvatham, C. Banerjee, M. J. Krain, and D. A. Rappaport, "Multi-frequency radiowave propagation measurements in the portable radio environment," *in Proc.*

SUPERCOMM/ICC'90, vol. 4, pp. 1334-1340, 1990.

- [19] G. Hankins, L. Vahala, and J. H. Beggs, "Electromagnetic propagation prediction inside aircraft cabins," *in Proc. Int. Symp. Antennas and Propagat.*, pp. 2227-2230, 20-25 June 2004.
- [20] G. Hankins, L. Vahala, and J. H. Beggs, "802.11ab propagation prediction inside a B777," in Proc. WCACEM'05, pp. 837-840, 2005.
- [21] P. Pagani, and P. Pajusco, "Characterization and modeling of temporal variations on an ultrawideband radio link," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 54, no. 11, pp. 3198-3206, Nov. 2006.
- [22] W. C. Y. Lee, "Estimate of local average power of a mobile radio signal," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 22-27, Feb. 1998.
- [23] D. de la Vega, et al., "Generalization of Lee method for the analysis of the signal variability," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 2Feb. 2009.
- [24] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*. Indianapolis, IN: Sams, 1986.
- [25] N. Moraitis, and P. Constantinou, "Indoor channel measurements and characterization at 60 GHz for wireless local area network applications," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 52, no. 12, pp. 3180-3189, Dec. 2004.