ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΠΙΔΟΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΑ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Μ. ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ

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

Αθήνα, Μάιος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΕΠΙΔΟΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΕΞΑΙΡΕΤΙΚΑ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Μ. ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Συμβουλευτική επιτροπή : Ιωάννης Κανελλόπουλος
Χρήστος Καψάλης
Παναγιώτης Κωττής

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 10η Μαΐου 2012

…….	…….	…….
Ιωάννης Κανελλόπουλος	Χρήστος Καψάλης	Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.
…….	…….	…….
Φίλιππος Κωνσταντίνου	Μιχαήλ Θεολόγου	Αθανάσιος Παναγόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Λέκτορας Ε.Μ.Π.

…….
Αθανάσιος Κανάτας
Αναπληρωτής Καθηγητής Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Μάιος 2012

…….

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Μ. ΓΕΩΡΓΙΑΔΟΥ

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

Copyright © Ευαγγελία Μ. Γεωργιάδου, 2012

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.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα, στην εποχή των συνεχώς αυξανόμενων εφαρμογών της τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας, ένας από τους πιο πολύτιμους και περιορισμένους φυσικούς πόρους είναι πλέον το εύρος ζώνης. Οι σύγχρονοι χρήστες απαιτούν υψηλής χωρητικότητας υπηρεσίες, μεγάλες ταχύτητες μετάδοσης και εξελιγμένη ποιότητα επικοινωνίας. Ο πολλαπλασιασμός των υπηρεσιών που οδηγεί σε κορεσμό του συμβατικού ραδιοφάσματος, σε συνδυασμό με την ανάγκη υλοποίησης δικτύων πολύ ευρείας ζώνης, έχει σαν αποτέλεσμα την αξιοποίηση ολοένα υψηλότερων φερουσών συχνοτήτων λειτουργίας.

Ωστόσο η διάδοση πάνω από τα 10GHz και ειδικότερα στις ζώνες Ka (27/40GHz) και V (40/75GHz) όπου αναμένεται να λειτουργήσουν πολλά τηλεπικοινωνιακά συστήματα, επηρεάζεται καταλυτικά από την παρουσία της γήινης ατμόσφαιρας. Η ανομοιογένεια και απορροφητικότητα του μέσου μετάδοσης προκαλεί μια σειρά από μηχανισμούς που δρουν δυσμενώς στα χιλιοστομετρικά μήκη κύματος. Πιο συγκεκριμένα, παράγοντες όπως τα σύννεφα, η ομίχλη, το χιόνι, το χαλάζι, οι παγοκρύσταλλοι, οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί, αλλά κυρίως η βροχή, εξασθενούν και αποπολώνουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Σε συχνότητες δε που βρίσκονται κοντά στις γραμμές συντονισμού του οξυγόνου (O_2) και των υδρατμών (H_2O) παρατηρούνται επιπλέον φαινόμενα απορρόφησης.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή μελετά προβλήματα διάδοσης σε συχνότητες της Ka, της V και της EHF (30-300GHz) ζώνης, μοντελοποιώντας το ασύρματο κανάλι και τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Εκτιμά τη σπουδαιότητα και το μέγεθος των συνδυασμένων επιπτώσεων διαφορετικών μετεωρολογικών παραγόντων στη λειτουργία των συστημάτων και εξετάζει τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων υπό συνθήκες βροχής. Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα με τα οποία ασχολείται είναι αφενός επίγεια συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης FWA (Fixed Wireless Access), αφετέρου επίγεια συστήματα πολύ ευρείας ζώνης UWB (Ultra-WideBand) που κάνουν χρήση εξαιρετικά στενών παλμών για τη μετάδοση της πληροφορίας, καθώς και ευρυζωνικά στρατοσφαιρικά δίκτυα σταθερών επικοινωνιών που υλοποιούνται μέσω εναέριων σταθμών HAPS (High Altitude Platform Stations).

Πιο αναλυτικά, στο πρώτο κομμάτι της διατριβής προτείνεται ένα νέο εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης βροχής σε επίγειες ζεύξεις οπτικής επαφής δικτύων σταθερής ασύρματης πρόσβασης, η καινοτομία του οποίου έγκειται στη θεώρηση Pruppacher-Pitter για το σχήμα των βροχοσταγόνων. Η ανάλυση ξεκινά με εφαρμογή της μεθόδου των βοηθητικών πηγών MAS (Method of

Auxiliary Sources) στο πρόβλημα σκέδασης επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος από σταγόνα βροχής και τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα επίγειων ζεύξεων.

Στη συνέχεια μελετώνται προβλήματα διάδοσης παλμών UWB σε εξωτερικό χώρο, επιχειρώντας συνδυασμένες εκφράσεις για την επίδραση τόσο των αερίων της ατμόσφαιρας μέσω του μοντέλου διάδοσης χιλιοστομετρικών κυμάτων MPM (Millimetre-wave Propagation Model) όσο και της συνεισφοράς της βροχής για σταγόνες Pruppacher-Pitter. Εκτιμάται η παλμική διαταραχή και η σπουδαιότητα της ενσωμάτωσης του παράγοντα βροχής στο μοντέλο καθαρού ουρανού.

Τέλος εξετάζεται η επίδοση σχημάτων διπλής διαφορικής λήψης θέσης σε στρατοσφαιρικά δίκτυα. Η καινοτομία του προτεινόμενου μοντέλου εστιάζεται στην αποτίμηση της ολικής απόσβεσης που προκαλείται από τη δράση πολλαπλών πηγών ταυτόχρονης ατμοσφαιρικής εξασθένησης, υιοθετώντας παράλληλα το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων για την περιγραφή της βροχής. Εφαρμογή της μεθόδου σε ποικίλες τοπολογίες οδηγεί σε πολύτιμα συμπεράσματα για τη βέλτιστη σχετική τοποθέτηση του εναλλακτικού δέκτη στην περιοχή κάλυψης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας.

ABSTRACT

Bandwidth has become one of the most valuable and limited resources of modern telecommunications applications. Today's users' demands for high capacity, high data rates and advanced quality of service, along with the congestion of the conventional radiospectrum, have led to the exploitation of higher operational frequencies.

Nevertheless, propagation in frequencies above 10GHz, and especially in the Ka (27/40GHz) and V (40/75GHz) bands, where many future systems are expected to operate, is dramatically affected by the earth's atmosphere. The inhomogeneity and absorbency of the transmitting medium causes a series of deteriorating mechanisms to millimetre wavelengths. Atmospheric elements such as clouds, fog, snow, hail, ice, tropospheric scintillation, and primarily rain, attenuate and depolarize the electromagnetic radiation. Moreover, in frequencies close to the resonant absorption lines of oxygen (O_2) and water vapour (H_2O) additional absorption phenomena are observed.

The PhD thesis in hand studies propagation problems of the Ka, V and EHF (30-300GHz) band, and introduces new atmospheric models for wireless channels. An estimation of the combined meteorological effects to the system's operation is attempted, and fade mitigation techniques in the presence of rain are investigated. Terrestrial Fixed Wireless Access (FWA) systems, Ultra Wide Band (UWB) systems utilizing very short pulses for data transmission, as well as fixed broadband stratospheric networks implemented through High Altitude Platform Stations (HAPS) are involved in the analysis.

A new empirical model for the calculation of the exceedance probability of a rain attenuation threshold along terrestrial line-of-sight (LOS) FWA links is introduced in the first part of the thesis. The innovation of the model lies in the adoption of the Pruppacher-Pitter approach for the raindrop shape. The analysis starts with the application of the Method of Auxiliary Sources (MAS) to the problem of electromagnetic scattering of a plane wave by a raindrop, while the results of the proposed methodology are compared against experimental data for terrestrial FWA links.

Next, outdoor propagation problems of UWB pulses are studied, and combined expressions for the effects of atmospheric gases, through the Millimetre wave Propagation Model (MPM), and rain contribution for Pruppacher-Pitter raindrops are proposed. The induced pulse distortion and the importance of the incorporation of the rain factor to the clear sky model are estimated.

Finally, the performance of double site diversity schemes in stratospheric networks using HAPS is examined. The novelty of the proposed model is the estimation of the total signal degradation, taking into account multiple sources of simultaneous atmospheric attenuation on one hand, while adopting the convective raincell model for the description of the rain medium on the other. The introduced methodology is applied to various topologies, leading to valuable conclusions for the optimum relative placement of the alternative receiver in the area coverage of the stratospheric platform.

Στα παιδιά μου.

Με την ευχή να αναζητήσουν τη γνώση.

Προλογικο Σημειωμα

Το παρόν σύγγραμμα είναι το αποτέλεσμα της δικής μου ερευνητικής πορείας στο χώρο της επιστήμης των τηλεπικοινωνιών. Περικλείει τους καρπούς μιας μακρόχρονης προσπάθειας για μελέτη, γνώση και κατανόηση των τηλεπικοινωνιακών αρχών και προβλημάτων, και επιδιώκει την πρόταση συνδυαστικών ή βελτιωτικών λύσεων για δεδομένα προβλήματα ασύρματης διάδοσης.

Η ανά χείρας διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στον Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών, υπό την επίβλεψη του καθηγητή ΕΜΠ κ. Ι. Δ. Κανελλόπουλου.

Κατά τη διάρκεια της ερευνητικής ετούτης προσπάθειας, σημαντικό ρόλο έπαιξαν αρκετοί άνθρωποι στους οποίους και οφείλω ειλικρινείς ευχαριστίες. Πρώτος από αυτούς ο επιβλέπων Καθηγητής μου κ. Ιωάννης Κανελλόπουλος, που υπήρξε καταλύτης στην περάτωση του στόχου μου, τόσο με την προσωπική του καθοδήγηση, παρότρυνση και συμβουλή, όσο και μέσα από το πρωτοποριακό επιστημονικό του έργο. Η εμπιστοσύνη που μου έδειξε όλα αυτά τα χρόνια, η αγάπη και η συμπαράσταση με την οποία με περιέβαλλε, έθεσαν γερές τις βάσεις για τη δημιουργία ενός αρμονικού και παραγωγικού κλίματος συνεργασίας. Η βαθιά γνώση, η σωστή του κρίση αλλά και οι υψηλές ανθρώπινες αξίες που τον χαρακτηρίζουν αποτέλεσαν για μένα πολύτιμη βοήθεια και αρωγή σε κομβικά προβλήματα της διαδρομής. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τα υπόλοιπα μέλη της επιβλέπουσας τριμελούς επιτροπής μου, καθηγητές ΕΜΠ κ. Χρήστο Καψάλη και κ. Παναγιώτη Κωττή, που συνέβαλλαν μέσα από τα προπτυχιακά και μεταπτυχιακά τους μαθήματα στην επιστημονική μου κατάρτιση ως ηλεκτρολόγο μηχανικό.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες και ευγνωμοσύνη χρωστάω στον Λέκτορα ΕΜΠ κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, χωρίς τη καθοριστική συμβολή και παραίνεση του οποίου δε θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Το ενδιαφέρον, το ήθος, το ανήσυχο πνεύμα, η οξύτητα της σκέψης, η επιστημονική ευρύτητα και το ερευνητικό του πάθος υπήρξαν ανεκτίμητος σύμμαχος της προσπάθειάς μου, αλλά και πρότυπο για την μετέπειτα πορεία μου. Οι συζητήσεις μαζί του οδηγούσαν πάντα σε καίριες λύσεις και άνοιγαν νέες προοπτικές και διαστάσεις στην κάθε μου αναζήτηση. Ο ρόλος του ήταν και είναι πολλαπλός, ως μέντορας, ως σύμβουλος και ως φίλος.

Ευχαριστώ ακόμα όλους τους συναδέλφους και φίλους από την ερευνητική ομάδα Ασύρματων και Δορυφορικών Επικοινωνιών για τα όμορφα χρόνια της επιστημονικής μας συνύπαρξης. Ειδικότερα αξίζει αναφορά στους Δρ. Παντελή Αράπογλου, Δρ. Σωτήρη

Κανελλόπουλο, Δρ. Βασίλη Σακαρέλλο, Δρ. Δημήτρη Σκραπαρλή, Δρ. Μάρκο Αναστασόπουλο, Δρ. Θανάση Δρούγκα, αλλά και στον Δρ. Θεόδωρο Κρητικό για τις πάντα εύστοχες παρατηρήσεις του.

Κλείνοντας, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Μιχάλη και Βούλα, για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, για τις θυσίες, την αγάπη και την εμπιστοσύνη τους. Τους στενούς μου φίλους που είναι πάντα δίπλα μου, σε κάθε διαδρομή. Τον σύντροφο της ζωής μου Αριστείδη για όλο το κοινό μας παρελθόν και μέλλον. Πάνω απ' όλους τον Αιμίλιο, τον Πλάτωνα και τον νεογέννητο μικρό μας, αστείρευτες πηγές έμπνευσης, δύναμης και αισιοδοξίας. Ας είναι η περάτωση αυτής της διατριβής παράδειγμα για να οδεύουν με επιμονή προς την ολοκλήρωση κάθε μελλοντικής τους επιδίωξης.

Κέλλυ Γεωργιάδου

Αθήνα, Μάιος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΊΛΗΨΗ ..... *i*

ABSTRACT ..... *iii*

ΠΡΟΛΟΓΙΚΌ ΣΗΜΕΊΩΜΑ ..... *vii*

ΠΕΡΙΕΧΌΜΕΝΑ ..... *ix*

ΚΕΦΆΛΑΙΟ -1- *1*

ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΊΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΆ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΆ ΑΣΎΡΜΑΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΏΝ ΔΙΚΤΎΩΝ ΥΨΗΛΏΝ ΣΥΧΝΟΤΉΤΩΝ *1*

1.1 ΔΙΚΤΥΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ **1**

1.1.1 ΕΠΙΓΕΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 2

1.1.2 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ 3

1.1.3 ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ 3

1.2 ΕΚΧΩΡΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ **4**

1.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ **7**

1.3.1 ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ BWA 8

1.3.2 ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 10

1.4 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ **11**

1.4.1 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 11

1.4.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ 12

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1 ..... **15**

ΚΕΦΆΛΑΙΟ -2- *17*

ΔΊΚΤΥΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΏΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΏΝ *17*

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ **17**

2.2 ΠΑΡΟΧΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΑ **18**

2.3 ΤΥΠΟΙ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ **20**

2.4 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ **22**

2.5 ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ **23**

2.6 ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ **24**

2.7 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΡΑΔΙΟΚΑΛΥΨΗΣ **25**

2.8 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ **27**

2.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ **27**

2.10 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ **28**

2.11 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ **29**

2.12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2 ..... **32**

ΚΕΦΆΛΑΙΟ -3- *35*

ΦΑΙΝΌΜΕΝΑ ΔΙΆΔΟΣΗΣ Η/Μ ΚΥΜΆΤΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΠΌΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΊΗΣΗ ΑΣΎΡΜΑΤΟΥ ΔΙΑΎΛΟΥ *35*

3.1 ΔΙΑΛΕΙΨΕΙΣ Η/Μ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑ 35

3.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΣΕ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΆΝΩ ΤΩΝ 10GHz 36

3.3 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΙΣ (ΒΡΟΧΗ) 38

3.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΒΡΟΧΗΣ 38
3.3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ 39
3.3.3 ΕΙΔΙΚΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΒΡΟΧΗΣ 41
3.3.4 ΕΝΕΡΓΟ ΎΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ – ΥΠΟΘΕΣΗ CRANE 42
3.3.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΒΡΟΧΗΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟΥ ΡΑΔΙΟΔΡΟΜΟΥ 44

3.4 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΕΡΙΑ 49

3.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΆΜΒΛΥΝΣΗΣ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ 54

3.5.1 ΈΛΕΓΧΟΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ 55
3.5.2 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΙΜΗ ΕΚΠΟΜΠΗ 56
3.5.3 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ 57

3.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3 59

ΚΕΦΆΛΑΙΟ -4- 63

ΠΙΘΑΝΌΤΗΤΑ ΕΚΤΌΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΊΑΣ ΔΙΚΤΎΩΝ ΣΤΑΘΕΡΉΣ ΑΣΎΡΜΑΤΗΣ ΠΡΌΣΒΑΣΗΣ .. 63

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 63

4.2 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΡΟΧΗΣ 65

4.2.1 ΣΧΗΜΑ ΣΤΑΓΟΝΑΣ 66
4.2.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ 69

4.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ (METHOD OF AUXILIARY SOURCES, MAS) 71

4.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ 71
4.3.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ 72

4.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΒΡΟΧΗΣ ΣΕ ΜΙΑ ΕΠΙΓΕΙΑ ΖΕΥΞΗ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ 76

4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 82

4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 87

4.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4 87

ΚΕΦΆΛΑΙΟ -5- 93

ΠΡΟΒΛΉΜΑΤΑ ΠΑΛΜΙΚΉΣ ΔΙΆΔΟΣΗΣ ΣΕ ΔΊΚΤΥΑ ΣΤΑΘΕΡΉΣ ΑΣΎΡΜΑΤΗΣ ΠΡΌΣΒΑΣΗΣ 93

5.1 ΧΡΗΣΗ ΠΑΛΜΩΝ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 93

5.2 ΠΑΛΜΟΙ ΕΥΡΕΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ UWB 96

5.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΠΑΛΜΩΝ 99

5.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ 102

5.4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ 102
5.4.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥ ΣΤΕΝΟΥ ΓΚΑΟΥΣΣΙΑΝΟΥ ΠΑΛΜΟΥ 105

5.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 108

5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 120

5.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5 120

ΚΕΦΆΛΑΙΟ -6- 125

ΔΙΠΛΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 125

6.1 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ 125

6.2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΑΠΟΣΒΕΣΕΙΣ 127

6.2.1 ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΕΡΙΑ 128

6.2.2 ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΣΥΝΝΕΦΑ 131

6.2.3 ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΟΥΣ 133

6.3 ΔΙΠΛΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΛΗΨΗ ΘΕΣΗΣ 134

6.4 ΕΠΙΔΟΣΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙ ΔΙΠΛΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΛΗΨΗ ΘΕΣΗΣ 135

6.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 137

6.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ 141

6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 148

6.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6 149

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -7- 153

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 153

7.1 ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ 153

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ 155

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Α- 157

ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ 157

Α.1 ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ 157

Α.2 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ 158

Α.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ 159

Α.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ 161

Α.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α 162

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Β- 163

ΓΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ 163

Β.1 ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ 163

Β.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β 164

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Γ- 165

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΒΡΟΧΗΣ 165

Γ.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ H_1 165

Γ.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΚΡΑΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ 166

Γ.1.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΟΠΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΤΡΟΠΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ 167

Γ.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ H_{12} 168

Γ.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΚΡΑΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ 169

Γ.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΟΠΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΤΡΟΠΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ 169

Γ.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Γ 169

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Δ- 171

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΌΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΏΝ ΠΑΡΑΜΈΤΡΩΝ ΒΡΟΧΌΠΤΩΣΗΣ 171

Δ.1 ΧΑΡΤΕΣ ΒΡΟΧΗΣ 171

Δ.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Δ 174

ΠΑΡΆΡΤΗΜΑ -Ε- 175

ΕΜΠΕΙΡΙΚΌΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΌΣ ΠΛΆΤΟΥΣ ΣΚΈΔΑΣΗΣ Η/Μ ΚΎΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΔΙΑΔΊΔΕΤΑΙ ΣΕ ΜΈΣΟ ΒΡΟΧΉΣ 175

Ε.1 ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ 175

Ε.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Ε 180

ΚΑΤΆΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΉΣΕΩΝ 181

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -1-

ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

1.1 ΔΙΚΤΥΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών γνωρίζουν στις μέρες μας ραγδαία ανάπτυξη. Καθώς οι απαιτήσεις των χρηστών για προηγμένες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες αυξάνονται διαρκώς, τα εγγενή χαρακτηριστικά του ενσύρματου τρόπου μετάδοσης καθιστούν τα παραδοσιακά δίκτυα λιγότερο ευέλικτα και αποδοτικά. Το καλώδιο και η οπτική ίνα είναι λύσεις που προϋποθέτουν μεγάλο κόστος εγκατάστασης και η εξυπηρέτηση απομακρυσμένων χρηστών είναι συνήθως απαγορευτική. Αντιθέτως, η ασύρματη διάδοση είναι ικανή να παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και υπηρεσίες πολύ ευρείας ζώνης που δεν εξαρτώνται από σταθερές υποδομές, λύνοντας έτσι το πρόβλημα διανομής απευθείας στις τερματικές εγκαταστάσεις. Πρωταρχικός στόχος των σύγχρονων ασύρματων δικτύων αποτελεί πλέον η σύγκλιση πολλαπλών ετερογενών ευρυζωνικών υπηρεσιών, π.χ. Internet υψηλής ταχύτητας, τηλεφωνία, τηλεόραση, Βίντεο-κατά-Απαίτηση (Video-on-Demand, VoD) και υπηρεσίες ευρείας εκπομπής, όπως ορίζει η τελευταία τάση στην τηλεπικοινωνιακή αγορά.

Ο βασικότερος διαχωρισμός των δικτύων ασύρματων επικοινωνιών έχει να κάνει με τη διαδρομή των μεταδιδόμενων σημάτων από τον πομπό στον δέκτη. Έτσι διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες συστημάτων, τα Επίγεια Ασύρματα Δίκτυα (Terrestrial Wireless Networks) που υλοποιούνται με τη βοήθεια επίγειων σταθμών βάσης, και τα Δορυφορικά Δίκτυα (Satellite Networks) που κάνουν χρήση δορυφορικών σταθμών. Μια τρίτη, ενδιάμεση κατηγορία που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, αποτελούν τα

Στρατοσφαιρικά Δίκτυα (Stratospheric Networks) που παρέχουν τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες από εναέριες πλατφόρμες που βρίσκονται στη στρατόσφαιρα.

1.1.1 ΕΠΙΓΕΙΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

Στην περίπτωση των Επίγειων Ασύρματων Δικτύων, τα πρότυπα του Ασύρματου Τοπικού Βρόχου (Wireless Local Loop, WLL) περιγράφουν Κινητά Δίκτυα (Mobile Networks), Σταθερά Ασύρματα Δίκτυα (Fixed Wireless Access, FWA, Networks) και Υποδομές Δικτύου Κορμού (Backhaul Networks).

Τα Κινητά Δίκτυα εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό κινούμενων χρηστών και υλοποιούνται είτε ως κυψελωτά (cellular) είτε ως μη δομημένα (ad-hoc) δίκτυα. Περιλαμβάνουν τα Δίκτυα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA), τα Δίκτυα Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA), και τα ευρέως διαδεδομένα Δίκτυα Κινητής Τηλεφωνίας GSM (Global System for Mobile communications) και UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Η ανάγκη για υποστήριξη διαφορετικών τύπων υπηρεσιών από τα ανωτέρω ικανοποιείται μέσα από τη συνεχή ανάπτυξη νέων προτύπων και την αναβάθμιση των υποδομών τους σε δίκτυα τρίτης (3G) και τέταρτης (4G) γενιάς.

Τα Σταθερά Ασύρματα Δίκτυα Ευρείας Ζώνης (Broadband Fixed Wireless Access Networks, BFWA) χρησιμοποιούνται για την παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης στον τελικό χρήστη. Επιτρέπουν τη διασύνδεση νέων χρηστών σε ένα υπάρχον δίκτυο, υλοποιώντας τοπολογίες πλέγματος (mesh networks) και κλιμακωτές αρχιτεκτονικές που επεκτείνονται ανάλογα με τη ζήτηση. Η πρώτη γενιά δικτύων BFWA αντιστοιχούσε σε Μικροκυματική Μετάδοση προς Πολλαπλά Σημεία (Microwave Multipoint Distribution Service, MMDS) με χρήση συχνοτήτων κάτω των 10GHz, ενώ η δεύτερη γενιά αφορούσε υπηρεσίες Τοπικής Μετάδοσης προς Πολλαπλά Σημεία (Local Multipoint Distribution Service, LMDS), αυξημένο προσφερόμενο εύρος ζώνης και συχνότητες λειτουργίας άνω των 10GHz. Στην ίδια κατηγορία ανήκουν τα Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (Wireless Local Area Networks, WLAN) που ορίζονται από το πρότυπο IEEE 802.11, καθώς και τα Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (Wireless Metropolitan Area Networks, WMAN) με το πρότυπο WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) ή IEEE 802.16 που κυριαρχεί πλέον στον Ασύρματο Τοπικό Βρόχο.

Τα Ασύρματα Δίκτυα Κορμού (Backhaul Networks) διασυνδέουν τους Σταθμούς Βάσης (Base Stations) με τον Πυρήνα του Δικτύου (Core Network), επιτυγχάνοντας

αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης χάρη στις εξαιρετικά υψηλές συχνότητες λειτουργίας τους.

1.1.2 ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

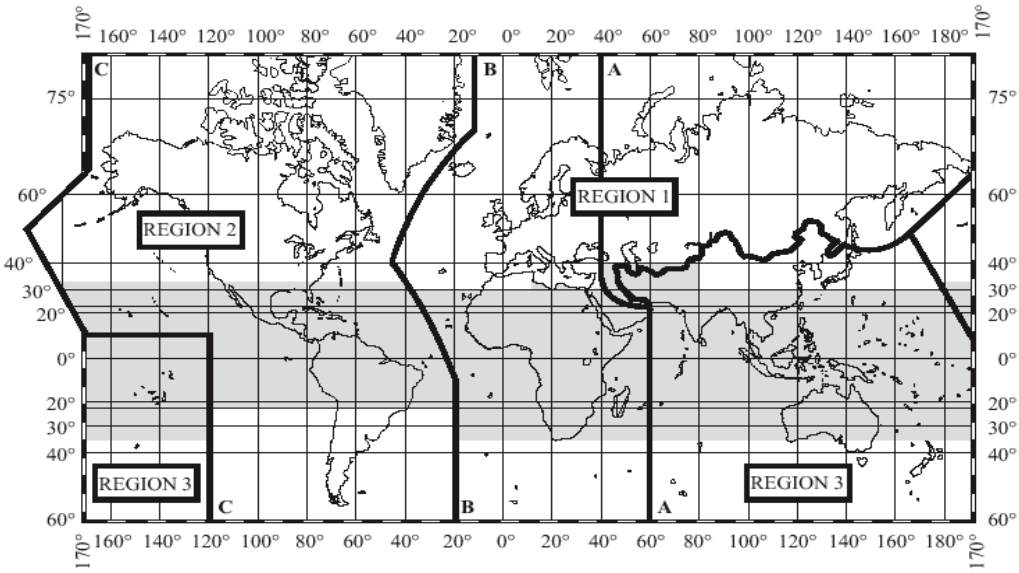
Από την άλλη μεριά, η κατηγορία των Δορυφορικών Δικτύων παρέχει υπηρεσίες τόσο σε σταθερούς όσο και σε κινητούς χρήστες, με κυριότερο χαρακτηριστικό τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών. Τα δορυφορικά συστήματα περιγράφονται κυρίως από τα πρότυπα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Βίντεο μέσω Δορυφόρου (Digital Video Broadcasting-Satellite, DVB-S), ενώ οι αντίστοιχοι δορυφόροι έχουν πια εξελιχθεί από απλούς αναμεταδότες σε τηλεπικοινωνιακούς κόμβους με πολλαπλές δυνατότητες επεξεργασίας σήματος. Διακρίνονται σε Δορυφόρους Χαμηλής Τροχιάς (Low Earth Orbit satellites, LEO), Δορυφόρους Μέσης Τροχιάς (Medium Earth Orbit satellites, MEO) και Γεωστατικούς Δορυφόρους (Geostationary Earth Orbit satellites, GEO). Όσον αφορά στο επίγειο κομμάτι, τα τελευταία χρόνια ραγδαία είναι η ανάπτυξη δορυφορικών δικτύων με Τερματικά Πολύ Μικρού Ανοίγματος (Very Small Aperture Terminals, VSAT), σε αντίθεση με τους συμβατικούς ογκώδεις επίγειους σταθμούς εκπομπής και λήψης.

1.1.3 ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Τέλος, η “υβριδική” τεχνολογία των Στρατοσφαιρικών Δικτύων παρέχει ασύρματες ευρυζωνικές υπηρεσίες από Εναέριες Πλατφόρμες (High Altitude Platform Stations, HAPS), γνωστές και ως Στρατοσφαιρικές Πλατφόρμες ή Πλατφόρμες Μεγάλου Υψομέτρου, και συνδυάζει πολλά από τα πλεονεκτήματα των επίγειων και των δορυφορικών συστημάτων. Οι πλατφόρμες λειτουργούν σε ψευδο-στατική θέση, σε υψόμετρο 20-50km από την επιφάνεια της γης, και δρουν ως σταθμοί βάσης ή κόμβοι αναμετάδοσης, υλοποιώντας ζεύξεις είτε Σημείου-προς-Σημείο (Point-to-Point, PTP) είτε Σημείου-προς-Πολλαπλά σημεία (Point-to-Multipoint, PTMP). Δεδομένου ότι μεγάλο κομμάτι της παρούσας διατριβής αφορά θέματα στρατοσφαιρικών δικτύων, στο Κεφάλαιο 2 ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση της σχετικά νέας αυτής τηλεπικοινωνιακής τεχνολογίας.

1.2 ΕΚΧΩΡΗΣΗ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΖΩΝΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Καθώς τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα επεκτείνονται συνεχώς, απαραίτητη είναι η ύπαρξη ενός ρυθμιστικού πλαισίου για τον έλεγχο χρήσης του διαθέσιμου ραδιοφάσματος σε παγκόσμια κλίμακα. Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU [1]) θεσμοθετεί την εκχώρηση των ζωνών συχνοτήτων στις εκάστοτε υπηρεσίες και μεριμνά για την αποδοτική διαχείριση του φάσματος, του πιο πολύτιμου αλλά και περιορισμένου πλέον φυσικού πόρου. Στόχος της είναι η ομαλή συνύπαρξη και λειτουργία όλων των ετερογενών ασύρματων δικτύων αλλά και η ανάπτυξη τεχνικών και λειτουργικών προτύπων για τις διεθνείς τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες. Για τη διευκόλυνση της εκχώρησης συχνοτήτων ο κόσμος έχει διαιρεθεί σε τρεις περιοχές (regions), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1 [2].



Σχήμα 1.1: Παγκόσμιος χάρτης της ITU.

○ <u>Περιοχή 1 (Region 1)</u>: Ευρώπη, Αφρική, Μέση Ανατολή και οι χώρες της πρώην Σοβιετικής Ένωσης. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή 1 οριοθετείται ανατολικά από τη γραμμή Α και δυτικά από τη γραμμή Β, εξαιρώντας το κομμάτι της Ισλαμικής Δημοκρατίας του Ιράν που βρίσκεται ανάμεσα στις δύο αυτές γραμμές. Περιλαμβάνει ακόμα την Αρμενία, το Αζερμπαϊτζάν, τη Γεωργία, το Καζακστάν, τη Μογγολία, το Ουζμπεκιστάν, το Κυργκικστάν, τη Ρωσική Ομοσπονδία, το Τατζικιστάν, το Τουρκμενιστάν, την Τουρκία και την Ουκρανία, καθώς και την εδαφική έκταση βόρεια της Ρωσίας που βρίσκεται μεταξύ των ζωνών Α και C.

- Περιοχή 2 (Region 2): Αμερική. Η περιοχή αυτή οριοθετείται ανατολικά από τη γραμμή Β και δυτικά από τη γραμμή C.
- Περιοχή 3 (Region 3): Υπόλοιπο Ασίας που δεν περιλαμβάνεται στην περιοχή 1 και Ωκεανία. Η περιοχή αυτή οριοθετείται ανατολικά από τη γραμμή C και δυτικά από τη γραμμή Α.

Κάθε ζώνη συχνοτήτων είναι δυνατό είτε να εκχωρείται αποκλειστικά σε μια υπηρεσία είτε να τη μοιράζονται από κοινού περισσότερες. Οι εκχωρήσεις διακρίνονται σε εκχωρήσεις πρωτεύουσας και δευτερεύουσας προτεραιότητας. Στην περίπτωση της από κοινού χρήσης μιας ζώνης συχνοτήτων από μια πρωτεύουσα και μια δευτερεύουσα υπηρεσία, η δευτερεύουσα υποχρεούται να μην προκαλεί παρεμβολές στην πρωτεύουσα. Ωστόσο όταν και οι δύο υπηρεσίες που μοιράζονται το φάσμα είναι πρωτεύουσας ή δευτερεύουσας προτεραιότητας, τότε πρέπει να ληφθεί μέριμνα από τους χρήστες προκειμένου να μην λειτουργεί το ένα σύστημα εις βάρος του άλλου. Στην πράξη παρατηρείται κάποιες φορές (π.χ. σε επείγουσες καταστάσεις) το φαινόμενο της μη τήρησης της εκχώρησης συχνότητας που έχει ορίσει η ITU, όπου κατά παρέκκλιση και μετά από αίτηση της συγκεκριμένης χώρας είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί κάποιο άλλο εύρος συχνοτήτων για μια δεδομένη υπηρεσία. Η υπηρεσία αυτή υποχρεούται να μην προκαλεί παρεμβολές αλλά και να μην διεκδικεί προστασία από παρεμβολές που προέρχονται από σταθμούς που λειτουργούν σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις συστάσεις της ένωσης.

Οι βασικότερες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που ορίζονται από την ITU φαίνονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες που ορίζονται από την ITU.

Κατηγορία Υπηρεσίας	**Τύπος Υπηρεσίας**
Σταθερές Υπηρεσίες (Fixed Service, **FS**)	Ραδιοζεύξεις μεταξύ επίγειων σταθμών
	Σταθερές Δορυφορικές Υπηρεσίες (Fixed Satellite Service, **FSS**), παρέχουν δορυφορικές ζεύξεις μεταξύ επίγειων σταθμών
	Υψηλής Πυκνότητας Σταθερές Υπηρεσίες μέσω Στρατοσφαιρικών Πλατφόρμων (High Density Fixed Service via High Altitude Platform Stations, **HDFS via HAPS**)
Υπηρεσίες Ευρείας	Εκπομπές επίγειων πομπών προς απευθείας λήψη από το κοινό

Εκπομπής (Broadcasting Service, **BS**)	Δορυφορικές Υπηρεσίες Ευρείας Εκπομπής (Broadcasting Satellite Service, **BSS**)
Κινητές Υπηρεσίες (Mobile Service, **MS**)	Ζεύξεις μεταξύ ραδιοσταθμών σε οχήματα ξηράς, αεροσκάφη, πλοία ή συσκευές χειρός, αλλά και σταθερών σταθμών που επικοινωνούν απευθείας με τους παραπάνω
	Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες (Mobile Satellite Service, **MSS**), παρέχουν δορυφορικές ζεύξεις μεταξύ κινητών ραδιοσταθμών ή κινητών και σταθερών επίγειων σταθμών
	Ναυτιλιακές Κινητές Υπηρεσίες (Maritime Mobile Service, **MMS**) Ναυτιλιακές Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες (Maritime Mobile Satellite Service, **MMSS**) Αεροναυτικές Κινητές Υπηρεσίες (Aeronautical Mobile Service, **AMS**) Αεροναυτικές Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες (Aeronautical Mobile Satellite Service, **AMSS**) Κινητές Υπηρεσίες μεταξύ Σταθμών Ξηράς (Land Mobile Service, **LMS**) Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες μεταξύ Σταθμών Ξηράς (Land Mobile Satellite Service, **LMSS**)
Ερασιτεχνικές Υπηρεσίες (Amateur Service, **AmS**)	Ερασιτεχνικές Υπηρεσίες (Amateur Service, **AmS**) Ερασιτεχνικές Δορυφορικές Υπηρεσίες (Amateur Satellite Service, **AmSS**)
Τεχνικές και Ερευνητικές Υπηρεσίες	Διαστημικές Ερευνητικές Υπηρεσίες (Space Research Service, **SRS**) Δορυφορικές Υπηρεσίες Εξερεύνησης της Γης (Earth Exploration Satellite Service, **EESS**) Δορυφορικές Μετεωρολογικές Υπηρεσίες (Meteorological Satellite Service, **MetSS**) Υπηρεσίες Ραδιοαστρονομίας (Radio Astronomy Service, **RAS**) Υπηρεσίες Διαστημικής Λειτουργίας (Space Operation Service, **SOS**)
	Υπηρεσίες Ραδιοεντοπισμού (Radiodetermination Service, **RDS**) Δορυφορικές Υπηρεσίες Ραδιοεντοπισμού (Radiodetermination Satellite Service, **RDSS**)
Δια-δορυφορικές Υπηρεσίες (Inter-Satellite Service, **ISS**)	Απευθείας ζεύξεις μεταξύ δορυφόρων, όπου οι εκχωρημένες ζώνες συχνοτήτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανεξαρτήτως υπηρεσίας

Ο Πίνακας 1.2 συνοψίζει τις κυριότερες ζώνες συχνοτήτων από 1 έως 300GHz, καθώς και τις αντίστοιχες αναθέσεις σε τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες, σύμφωνα με την ITU.

Πίνακας 1.2: Εκχωρήσεις συχνοτήτων της ITU.

Ζώνη	Εύρος Συχνοτήτων	Υπηρεσίες
L	1/2GHz	FS, MS, BS MSS HDFS via HAPS
S	2/4GHz	BS MSS, BSS
C	4/8GHz	FS FSS, MSS
X	8/12GHz	FS FSS
Ku	12/18GHz	FS, MS FSS , MSS, BSS
K	18/27GHz	BSS
Ka	27/40GHz	FS, MS FSS, MSS, BSS HDFS via HAPS
V	40/75GHz	FS, MS FSS HDFS via HAPS
W	75/110GHz	FSS
mm	110/300GHz	FSS

1.3 ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Η ταχεία εμπορική εξάπλωση των ευρυζωνικών ασύρματων δικτύων, γέννησε γρήγορα την ανάγκη προτυποποίησης των τεχνικών προδιαγραφών τους, ώστε πάροχοι και κατασκευαστές να διευκολύνονται προς την ανάπτυξη αποδοτικότερων συστημάτων και οικονομικότερων τερματικών συσκευών. Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή μερικών από τα πιο διαδεδομένα επίγεια και δορυφορικά διεθνή πρότυπα.

1.3.1 ΠΡΟΤΥΠΑ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ BWA

Τα Ευρυζωνικά Δίκτυα Ασύρματης Πρόσβασης (Broadband Wireless Access, BWA) χαρακτηρίζονται από την οικογένεια προτύπων IEEE 802 του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE [3]), αλλά και από το πρότυπο BRAN (Broadband Radio Access Networks) του Ευρωπαϊκού Τηλεπικοινωνιακού Οργανισμού Προτυποποίησης (European Telecommunications Standards Institute, ETSI [4]).

1.3.1.1 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.11

Το πρότυπο IEEE 802.11 [5] αποτελεί το καθιερωμένο πρότυπο της βιομηχανίας στο χώρο των ασύρματων τοπικών δικτύων WLAN. Αποτελεί, ουσιαστικά, επέκταση στην ασύρματη περιοχή του προτύπου 802.3 [6] που αφορά το Ethernet, το συνηθέστερο πρωτόκολλο ενσύρματης δικτύωσης υπολογιστών. Είναι ευρύτερα γνωστό ως πρότυπο WiFi (Wireless Fidelity).

Στην αρχική του μορφή το 802.11 όριζε συχνότητα λειτουργίας τα 2.4GHz και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων 1-2Mbps. Το 802.11a αφορά συχνότητα 5GHz και επεκτείνει το ρυθμό μετάδοσης στα 54Mbps, χρησιμοποιώντας Ορθογωνική Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Στο 802.11b ο ρυθμός μετάδοσης ανεβαίνει στα 11Mbps σε σχέση με το αρχικό πρότυπο στη ζώνη των 2.4GHz, μέσα από την τεχνολογία Απλωμένου Φάσματος DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum). Οι εκδόσεις 802.11d και 802.11e επιτρέπουν παγκόσμια περιαγωγή (global roaming) και βελτιωμένη Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS), αντιστοίχως. Το 802.11g επιτυγχάνει μετάδοση μέχρι 54Mbps στη ζώνη των 2.4GHz. Το 802.11h λύνει θέματα παρεμβολών του 802.11a, κάνοντας χρήση Δυναμικής Επιλογής Συχνότητας (Dynamic Frequency Selection, DFS) και Ελέγχου Ισχύος Εκπομπής (Transmit Power Control, TPC). Το 802.11i ενισχύει το επίπεδο ασφάλειας των WLAN εφαρμογών. Τέλος το 802.11n υπόσχεται ακόμα υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης, χάρη στην εφαρμογή τεχνικών MIMO (Multiple Input Multiple Output).

1.3.1.2 Το Πρότυπο IEEE 802.16

Το πρότυπο IEEE 802.16 [7] αφορά ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα WMAN και είναι εμπορικά γνωστό με την επωνυμία WiMAX. Η πιο δημοφιλής του έκδοση είναι το 802.16e που εισάγει την έννοια της κινητικότητας στα παραπάνω δίκτυα.

Η αρχική προτυποποίηση 802.11 όριζε την ευρυζωνική ασύρματη μετάδοση σημείου προς πολλαπλά σημεία στη ζώνη συχνοτήτων 10-66GHz, υπό την προϋπόθεση Οπτικής Επαφής (Line-of-Sight, LOS), και αναφερόταν ως επί το πλείστον σε δίκτυα LMDS. Το **802.16.2** θεσμοθέτησε τη συνύπαρξη διαφορετικών ευρυζωνικών συστημάτων ασύρματης πρόσβασης. Το **802.16a** αφορά μετάδοση σημείου προς πολλαπλά σημεία στα 2-11GHz, χωρίς Οπτική Επαφή (Non-Line-of-Sight, NLOS), και στο φυσικό επίπεδο εφαρμόζει διαμόρφωση OFDM και Ορθογωνική Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA). Το **802.16c** τροποποιεί περαιτέρω το αρχικό πρότυπο για το εύρος 10-66GHz. Το **802.16d** έχει σκοπό την ευθυγράμμιση του 802.16 με το αντίστοιχο HiperMAN (High Performance Metropolitan Area Network) πρότυπο του ETSI. Τέλος το **802.16e**, που είναι γνωστό και ως Mobile WiMAX, προβλέπει δυνατότητες εξυπηρέτησης κινητών χρηστών και αυξημένη ποιότητα υπηρεσίας στα 2-6GHz.

1.3.1.3 Το Πρότυπο ETSI BRAN

Το ευρωπαϊκό ινστιτούτο ETSI μέσω της ομάδας BRAN έχει εκδώσει διάφορα πρότυπα για ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Τα δημοφιλέστερα από αυτά είναι τα εξής.

Το πρότυπο **HiperMAN** [8] (High Performance Metropolitan Area Network), όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτελεί την ευρωπαϊκή εναλλακτική στο WiMAX. Αφορά συστήματα BWA και συχνότητες λειτουργίας 2-11GHz, δεν προϋποθέτει οπτική επαφή, ενώ επιτρέπει δικτυακές τοπολογίες πλέγματος αλλά και σημείου προς πολλαπλά σημεία. Έχει αναπτυχθεί σε στενή συνεργασία με το πρότυπο IEEE 802.16 ώστε να διασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα των αντίστοιχων συστημάτων.

Τα πρότυπα **HiperLAN** (High Performance Local Area Network) αναπτύχθηκαν παράλληλα με τα πρότυπα IEEE 802.11 για τοπικά δίκτυα ασύρματης πρόσβασης WLAN. Το **HiperLAN/1** [9] ορίζει ρυθμούς μετάδοσης 32kbps για ήχο, 2Mbps για βίντεο και 10Mbps για δεδομένα, συχνότητα λειτουργίας 2.4GHz, και υποστηρίζει χρήστες χαμηλής

κινητικότητας σε ακτίνα 50m. Το **HiperLAN/2** [10] χρησιμοποιεί τη ζώνη 5GHz για παροχή ταχυτήτων έως 54Mbps, δίνοντας έμφαση στην ποιότητα υπηρεσίας και την ασφάλεια. Προδιαγράφει την εξυπηρέτηση κινητών χρηστών στην περιοχή κάλυψης, που μπορεί να είναι εσωτερικός χώρος ακτίνας 50m ή εξωτερικός χώρος ακτίνας 150m.

Το πρότυπο **HiperACCESS** [11] αφορά οικιακές και μικρές επιχειρησιακές σταθερές εφαρμογές εξωτερικών χώρων ακτίνας κάλυψης έως 5km, σε αστικές και αγροτικές περιοχές, με ρυθμούς μετάδοσης 25Mbps στα 40.5-43.5GHz.

Το πρότυπο **HiperLINK** χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση διαφορετικών κόμβων HiperACCESS ή/και σημείων πρόσβασης HiperLAN με ζεύξεις υψηλών ταχυτήτων. Παρέχει σταθερές συνδέσεις σημείου προς σημείο, για αποστάσεις έως 150m, και ρυθμό μετάδοσης 155Mbps.

1.3.2 ΠΡΟΤΥΠΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Κυρίαρχα πρότυπα στις δορυφορικές επικοινωνίες είναι τα πρότυπα Ψηφιακής Ευρυεκπομπής Βίντεο μέσω Δορυφόρου DVB-S του οργανισμού ETSI. Σε αυτά περιγράφονται η διαμόρφωση και κωδικοποίηση των ψηφιακών Σταθερών Δορυφορικών Υπηρεσιών (FSS) και Δορυφορικών Υπηρεσιών Ευρείας Εκπομπής (BSS).

1.3.2.1 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DVB-S

Το πρότυπο DVB-S [12] ορίζει την παροχή δορυφορικών υπηρεσιών Απευθείας στο Σπίτι (Direct To Home, DTH). Είναι συμβατό με υπηρεσίες MPEG2 (Moving Pictures Experts Group 2) για τη μετάδοση οπτικών και ηχητικών δεδομένων σε ψηφιακή συμπιεσμένη μορφή. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ή BPSK (Binary Phase Shift Keying), ενώ για τη μείωση των λαθών αξιοποιεί τεχνικές Πρόσθιας Διόρθωσης FEC (Forward Error Correction).

1.3.2.2 ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ DVB-S2

Το πρότυπο DVB-S2 [13] περιλαμβάνει νέα σχήματα προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, που επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ευελιξία, αύξηση της απόδοσης και της

χωρητικότητας, και ικανότητα διαχείρισης διαφοροποιημένων ροών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα η τεχνική ACM (Adaptive Coding Modulation) που χρησιμοποιεί, επιτρέπει τη δυναμική αλλαγή του ρυθμού κωδικοποίησης και του είδους διαμόρφωσης ανάλογα με την κατάσταση του διαύλου και τις εκάστοτε απαιτήσεις κίνησης. Το DVB-S2 εστιάζει κατά κύριο λόγο στην υποστήριξη του Διαδικτυακού Πρωτοκόλλου (Internet Protocol, IP) για την ανταλλαγή δεδομένων, παρά στις υπηρεσίες ευρυεκπομπής όπως το DVB-S. Παρέχει έτσι μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα IP εφαρμογών μέσω δορυφόρου.

1.3.2.3 Το Πρότυπο DVB-RCS

Το πρότυπο DVB-RCS (DVB-Return Channel via Satellite) [14] αναφέρεται στη διαδραστική ψηφιακή ευρυεκπομπή με δίαυλο επιστροφής μέσω δορυφόρου. Το καινοτόμο σύστημα καναλιών επιστροφής διευκολύνει την αμφίδρομη επικοινωνία υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Το πρότυπο DVB-RCS χρησιμοποιεί το σύστημα δεδομένων DVB/MPEG-2 για την προωστική σύνδεση, εφαρμόζοντας διαμόρφωση QPSK, καθώς και το σχέδιο πολλαπλής πρόσβασης MF-TDMA (Multiple Frequency-TDMA) για τη σύνδεση επιστροφής. Το MF-TDMA υλοποιεί δυναμική ανάθεση εύρους ζώνης στο Δορυφορικό Διαδραστικό Τερματικό (Satellite Interactive Terminal, SIT), επιτρέποντάς του να επικοινωνεί με τον κεντρικό κόμβο σε συγκεκριμένες θυρίδες χρόνου/συχνότητας.

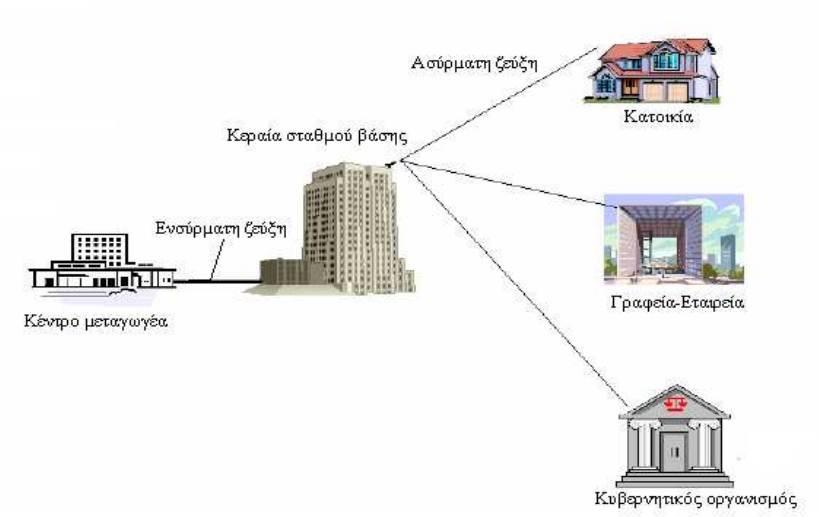
1.4 Αρχιτεκτονικές Ασυρματων Δικτυων

Παρακάτω ακολουθεί μια περιγραφή της αρχιτεκτονικής των διαφορετικών τύπων ασύρματων δικτύων.

1.4.1 Τοπολογια Επιγειων Δικτυων

Τα σταθερά ασύρματα δίκτυα ευρείας ζώνης BFWA υλοποιούνται κυρίως σε τοπολογία σημείου προς πολλαπλά σημεία PTMP, περιλαμβάνοντας σταθμούς βάσης, τερματικούς σταθμούς, και ενίοτε επαναλήπτες. Οι σταθμοί βάσης έχουν κεραίες ευρείας δέσμης, που διαιρούνται σε έναν ή περισσότερους τομείς για την παροχή κάλυψης 360°. Για την εξυπηρέτηση μιας περιοχής απαιτούνται παραπάνω από ένας σταθμοί βάσης, που

συζευγνύονται μέσω ραδιοζεύξεων ή οπτικής ίνας, χωρίς οι τελευταίες ζεύξεις να αποτελούν μέρος του BFWA δικτύου. Η δρομολόγηση στον κατάλληλο σταθμό βάσης είναι λειτουργία του δικτύου κορμού. Οι τερματικοί σταθμοί χρησιμοποιούν κατευθυντικές κεραίες, προσανατολισμένες σε έναν σταθμό, και μοιράζονται το ραδιοκανάλι με τη βοήθεια διαφόρων μεθόδων, όπως διαίρεση συχνότητας, διαίρεση χρόνου ή διαίρεση κώδικα. Η βασική δομή είναι αυτή ενός κυψελωτού δικτύου, με συνήθη διαχωρισμό των κυψελών σε τομείς 90°, όπου οι σταθμοί βάσης είναι υπερυψωμένοι (π.χ. εγκατάσταση σε οροφές κτιρίων), και βρίσκονται σε οπτική επαφή με τους σταθερούς τερματικούς χρήστες. Μια γενικευμένη εικόνα της παραπάνω τοπολογίας φαίνεται στο Σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Αρχιτεκτονική δικτύου BFWA.

1.4.2 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Τα δορυφορικά δίκτυα αποτελούνται από το διαστημικό κομμάτι (space segment) και το επίγειο κομμάτι (ground segment).

1.4.2.1 ΤΟ ΔΙΑΣΤΗΜΙΚΟ ΚΟΜΜΑΤΙ

Το διαστημικό κομμάτι περιλαμβάνει το δορυφόρο, αλλά και τους επίγειους σταθμούς παρακολούθησης, τηλεμετρίας και ελέγχου του τελευταίου. Ο δορυφορικός αναμεταδότης λαμβάνει το σήμα που εκπέμπεται από τον επίγειο σταθμό εκπομπής, το οποίο έχει υποστεί αποσβέσεις και παρεμβολές κατά την εναέρια μετάδοσή του. Στη

συνέχεια το σήμα αποδιαμορφώνεται, αποκωδικοποιείται και αφού απαλλαχθεί από το θόρυβο και τις παρεμβολές, διαμορφώνεται και επανεκπέμπεται προς τον επίγειο σταθμό λήψης. Απαραίτητη κρίνεται η ενίσχυση του εξασθενημένου σήματος, καθώς και η μετατροπή συχνότητας προκειμένου να αποφευχθούν παρεμβολές μεταξύ των προς τα άνω (uplink) και προς τα κάτω (downlink) ζεύξεων.

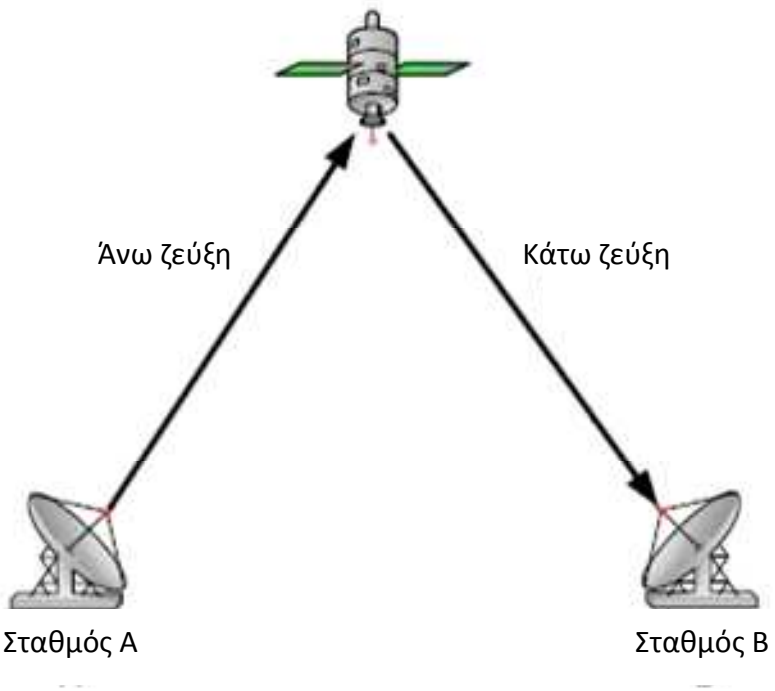
Το ύψος της τροχιάς που ακολουθεί ο δορυφόρος γύρω από τη Γη χαρακτηρίζει το δορυφορικό σύστημα. Η πιο διαδεδομένη τροχιά είναι η γεωσύγχρονη (geosynchronous earth orbit, GSO) και γεωστατική GEO, με ύψος 35.786km πάνω από τον ισημερινό. Στην περίπτωση αυτή η ταχύτητα του δορυφόρου ταυτίζεται με την ταχύτητα περιστροφής της Γης, με αποτέλεσμα ο δορυφόρος να φαίνεται ως σταθερό σημείο στον ουρανό από έναν επίγειο παρατηρητή. Η περιοχή κάλυψης ενός γεωστατικού δορυφόρου είναι περίπου το ένα τρίτο της γήινης επιφάνειας και καλύπτει τις πλέον πυκνοκατοικημένες περιοχές του πλανήτη, με γεωγραφικό πλάτος -75° με +75°. Η σταθερή γεωμετρία του συστήματος διευκολύνει την παρακολούθηση του δορυφόρου και τις σχετικές διαχειριστικές λειτουργίες. Ωστόσο το μεγάλο ύψος περιστροφής οδηγεί σε σημαντική εξασθένηση και μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις των σημάτων (της τάξεως των 250msec), απαγορευτικές για αμφίδρομες εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Επιπλέον στη γεωστατική τροχιά επικρατεί ήδη συνωστισμός τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων, καθώς η ελάχιστη γωνιακή τους απόσταση δεν μπορεί να είναι μικρότερη της 1°.

Από την άλλη, οι δορυφόροι μέσης τροχιάς MEO λειτουργούν σε ύψος 8.000-20.000km πάνω από τη Γη. Οι τροχιές τους είναι ελλειπτικές, σε αντίθεση με τις κυκλικές γεωστατικές, και απαιτούνται περισσότεροι του ενός δορυφόροι σε 2 ή 3 διαφορετικές τροχιές για παροχή κάλυψης σε δεδομένη περιοχή.

Τέλος, οι δορυφόροι χαμηλής τροχιάς LEO περιστρέφονται σε ύψος 500-2.000km, με μεγάλες ταχύτητες, πραγματοποιώντας συνήθως μια πλήρη περιστροφή γύρω από τη Γη σε λιγότερο από 2 ώρες. Λειτουργούν σε αστερισμούς, δηλαδή μεγάλα σύνολα LEO δορυφόρων που εξυπηρετούν μια περιοχή κάλυψης, επειδή κάθε ένας από αυτούς είναι ορατός από ένα σταθερό σημείο μόνο για μερικά λεπτά. Ως εκ τούτου, σημαντικές είναι οι διαχειριστικές απαιτήσεις του συστήματος όσον αφορά τη στόχευση των κεραιών, τις συνεχείς διαπομπές και αναδρομολογήσεις.

1.4.2.2 Το Επιγειο Κομματι

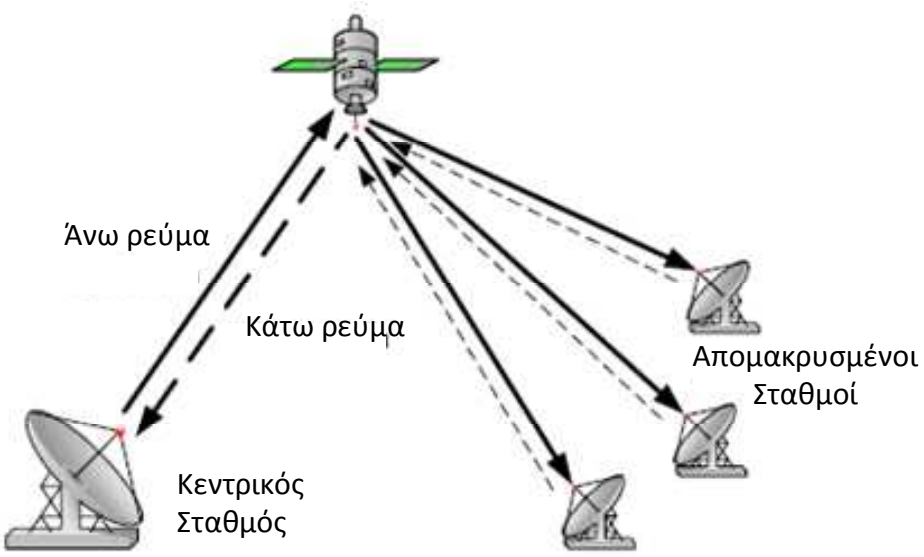
Το επίγειο κομμάτι αποτελείται από τους επίγειους σταθμούς, οι οποίοι συνδέονται με τον εξοπλισμό του χρήστη μέσω επίγειου δικτύου. Περιλαμβάνουν τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό για την εκπομπή και λήψη των σημάτων, συστήματα ανίχνευσης και σκόπευσης, εγκαταστάσεις παρακολούθησης και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σήματα που καταφθάνουν από τους χρήστες στην είσοδο του επίγειου πομπού πολυπλέκονται και διαμορφώνονται. Το σήμα που πρόκειται να μεταδοθεί αλλάζει συχνότητα, ενισχύεται και εκπέμπεται από την κεραία του σταθμού στο δορυφορικό αναμεταδότη. Αντιστοίχως κατά τη διαδικασία λήψης από το δορυφόρο, το σήμα οδηγείται στη βαθμίδα ενίσχυσης χαμηλού θορύβου, μετατρέπεται η συχνότητά του, αποδιαμορφώνεται, αποκωδικοποιείται και προωθείται στους τελικούς χρήστες.



Σχήμα 1.3: Τοπολογία δορυφορικού δικτύου.

Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται η τοπολογία μιας απλής δορυφορικής ζεύξης μεταξύ δύο επίγειων σταθμών Α και Β. Ωστόσο όλο και περισσότερο έδαφος κερδίζει στις μέρες μας η ανάπτυξη δικτύων πολύ μικρού τερματικού εξοπλισμού VSAT, ο οποίος τοποθετείται κατευθείαν στις εγκαταστάσεις του τελικού χρήστη και παίζει το ρόλο του επίγειου σταθμού. Τα δίκτυα αυτά βασίζονται σε κλιμακωτή αρχιτεκτονική και επιτρέπουν την αυτόματη είσοδο απομακρυσμένων χρηστών σε ένα υπάρχον δίκτυο. Ενσωματώνουν

προηγμένες τεχνολογίες προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και εξελιγμένες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης. Στη συνήθη τοπολογία τους, η ύπαρξη ενός κεντρικού σταθμού (HUB) εξυπηρετεί την κίνηση μεταξύ των τερματικών, παρέχοντας παράλληλα διαχειριστικές λειτουργίες στο δίκτυο. Η εν λόγω τοπολογία αστέρα φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Εναλλακτικά, τα VSAT τερματικά μπορούν να επικοινωνούν απευθείας μέσω του δορυφορικού αναμεταδότη, οπότε μιλάμε για τοπολογία πλέγματος.



Σχήμα 1.4: Τοπολογία αστέρα δικτύου VSAT.

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1

[1] International Telecommunications Union, www.itu.int

[2] ITU-R Radio Regulations, “Frequency Allocations,” Volume 1, Chapter II, Article 5.

[3] Institute of Electrical and Electronics Engineers, www.ieee.org

[4] European Telecommunications Standards Institute, www.etsi.org

[5] IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks, www.ieee802.org/11/

[6] IEEE Ethernet Working Group, www.iee802.org/3/

[7] The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access Standards, www.ieee802.org/16/

[8] ETSI TS 102 177, “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HiperMAN; Physical (PHY) layer,” v1.5.1, (2010-05).

[9] EN 300 652, “Braodband Radio Access Networks (BRAN); HIgh PErformance Radio Local Area Network (HIPERLAN) Type 1; Functional specification”.

[10] ETSI TS 101 475-2, “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERLAN Type 2; Physical (PHY) layer,” v1.3.1, (2001-10).

[11] ETSI TS 101 999, “Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPERACCESS; PHY protocol specification,” v1.1.1, (2002-04).

[12] ETSI EN 300 421, “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite services,” v1.1.2, (1997-08).

[13] ETSI EN 302 307, “Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2),” v1.2.1, (2009-08).

[14] ETSI EN 301 790, “Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems,” v1.5.1, (2009-05).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -2-

ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

2.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες HAPS (High Altitude Platform Stations) προτάθηκαν μόλις το 1997 για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών ευρείας ζώνης. Ωστόσο τα αερόστατα, στα οποία στηρίζεται κατά ένα μεγάλο ποσοστό η τεχνολογία αυτή, έχουν ιστορία πολλών αιώνων που ξεκινά από την αρχαία Κίνα. Στη Δύση, τέτοιου είδους μπαλόνια ζεστού αέρα έκαναν την εμφάνισή τους αρχικά στη Γαλλία το 1783, ενώ στα 1900 πραγματοποιήθηκε η πρώτη πτήση του θρυλικού Zeppelin LZ1. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα αναπτύχθηκε η τεχνολογία των αερόπλοιων ηλίου (He) και το 1932 το πρώτο επανδρωμένο αερόστατο πέταξε ως τη στρατόσφαιρα σε υψόμετρο 16940m. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι μια πρώιμη μορφή παροχής επικοινωνιών από τη στρατόσφαιρα έλαβε χώρα πριν το 1962 που τέθηκε σε τροχιά ο δορυφόρος Telstar. Το 1960, τηλεφωνήματα μεγάλων αποστάσεων έγιναν μέσω της ανάκλασης σημάτων από το Echo, ένα γιγαντιαίο μπαλόνι που είχε σκοπό την παθητική αναμετάδοση εκπομπών από τα εργαστήρια Bell στο Crawford Hill.

Μολονότι η τεχνολογία των αερόστατων δεν είναι καινούργια, η εφαρμογή τους για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς ήταν μέχρι σήμερα ιδιαίτερα περιορισμένη. Οι βασικότερες δυσκολίες στη χρήση τους προέρχονταν από την αδυναμία σταθερότητας και ικανοποιητικού ελέγχου θέσης για μεγάλες χρονικές περιόδους σε περιβάλλον με ανέμους. Οι εν λόγω πλατφόρμες προβλέπεται να λειτουργήσουν στη στρατόσφαιρα, σε υψόμετρο όπου οι ροές των ανέμων είναι συνήθως ήπιες και σταθερές για τις περισσότερες περιοχές της υφηλίου. Ο συνδυασμός της εξελισσόμενης τεχνολογίας των αερόπλοιων, (που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων βελτιωμένα υλικά κατασκευής και ηλιακές κυψέλες), και της

αυξανόμενης ζήτησης για νέες υπηρεσίες, καθιστούν τα στρατοσφαιρικά δίκτυα μια άκρως ελκυστική εναλλακτική λύση.

Το πρώτο σχετικό εγχείρημα έγινε το 1987 με το πρόγραμμα SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) στο Ερευνητικό Κέντρο Επικοινωνιών του Καναδά. Ωστόσο η εντατικοποίηση της μελέτης γύρω από την τεχνολογία των HAPS ξεκίνησε ουσιαστικά το 1997, όταν η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών τα αναγνώρισε επίσημα ως μια νέα κατηγορία τηλεπικοινωνιακών σταθμών [1]. Σηματοδότησε έτσι την έξαρση του ενδιαφέροντος γύρω από την πρωτοποριακή ιδέα της παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών από τη στρατόσφαιρα και έδωσε παράλληλα το έναυσμα για τη διεξαγωγή πλήθους μελετών από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα αλλά και τη διεθνή βιομηχανία, ώστε σταδιακά η ιδέα να γίνει πράξη και να τεθεί σε εφαρμογή [2,3,4,5].

Εναλλακτικές ονομασίες που απαντώνται στη βιβλιογραφία για το στρατοσφαιρικό σταθμό είναι, μεταξύ άλλων, οι όροι HALE (High Altitude Long Endurance), SPR (Stratospheric Platform Radio), HAAP (High Altitude Aeronautical Platform), HALO (High Altitude Long Operation), UAV (Unmanned Aeronautical Vehicle) και Stratospheric Satellite.

2.2 ΠΑΡΟΧΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΑ

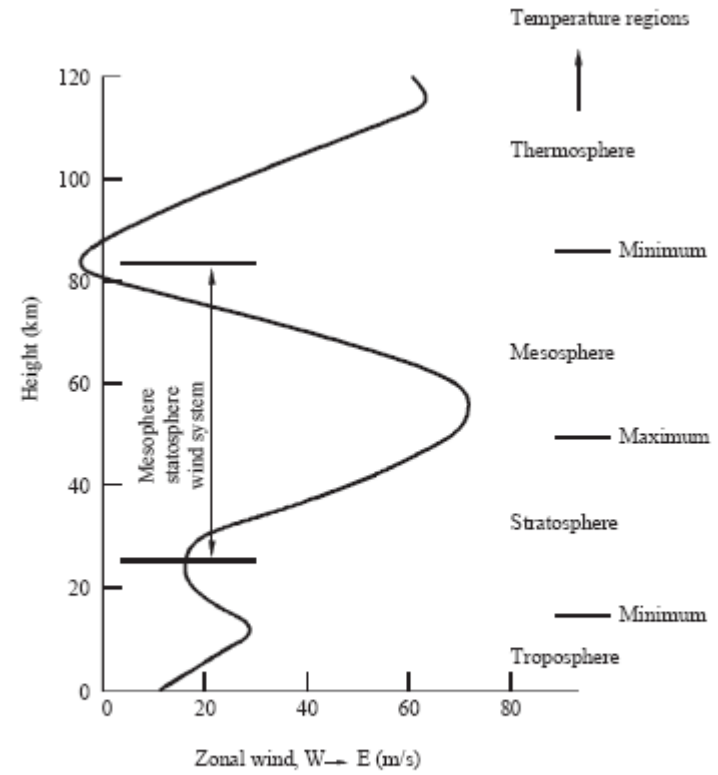
Η βασική ιδέα της τεχνολογίας των HAPS συνοψίζεται στη λειτουργία των εναέριων πλατφόρμων στη στρατόσφαιρα. Το κομμάτι της γήινης ατμόσφαιρας από την επιφάνεια του πλανήτη μας ως το υψόμετρο περίπου των 10km αποτελεί την τροπόσφαιρα και χαρακτηρίζεται από έντονα μετεωρολογικά φαινόμενα όπως σύννεφα και βροχοπτώσεις. Η ατμοσφαιρική πίεση ελαττώνεται από 1000hPa σε περίπου 100hPa στο ύψος της τροπόπαυσης (θεωρητική ζώνη οριοθέτησης, ελαχίστου πάχους). Έπειτα εκτείνεται η στρατόσφαιρα, από τα 10 ως τα 50km ως την στρατόπαυση, με μέση θερμοκρασία της τάξεως των -60°C με -50°C (217K), φθίνουσα ατμοσφαιρική πίεση μέχρι 1hPa και άφθονη ηλιακή ενέργεια εξαιτίας της απουσίας νεφών. Ακολουθεί η μεσόσφαιρα ως τη μεσόπαυση στα 90km με τιμές ατμοσφαιρικής πίεσης φθίνουσες ως 0.001hPa. Από τα 90 μέχρι τα 300km είναι η θερμόσφαιρα, ενώ υψηλότερα εκτείνεται η εξώσφαιρα, μια μεταβατική ζώνη ανάμεσα στη γήινη ατμόσφαιρα και το διάστημα. Στον Πίνακα 2.1 φαίνεται η ελάττωση της ατμοσφαιρικής πυκνότητας και πίεσης καθώς ανεβαίνουμε ψηλότερα στη στρατόσφαιρα.

Παρότι το προφίλ των επικρατούντων ανέμων διαφοροποιείται από τόπο σε τόπο και από εποχή σε εποχή, συνήθως παρουσιάζει μια μορφή πολύ κοντά σε αυτή του

Σχήματος 2.1. Στο υψόμετρο των 17 με 25km ελαχιστοποιείται τοπικά η μέση ταχύτητα των ανέμων και των αναταράξεων που ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα σταθερότητας στην πλατφόρμα [6]. Το συγκεκριμένο υψόμετρο είναι επίσης ασφαλές από άποψη εναέριας κυκλοφορίας, καθώς όλα τα πολιτικά και τα περισσότερα στρατιωτικά αεροσκάφη πετούν σε ύψη χαμηλότερα των 55.000ft.

Πίνακας 2.1: Ατμοσφαιρική πυκνότητα και πίεση στη στρατόσφαιρα.

Υψόμετρο (km)	Ατμοσφαιρική πυκνότητα (kg/m^3)	Ατμοσφαιρική πίεση (hpa)
0	1.22	1013
15	0.195	121
20	0.0889	55.3
25	0.0401	25.5
30	0.0184	12
50	0.00103	0.798



General magnitude of zonal winds in the upper atmosphere, illustrated by a height profile for 45° N in January.
(COSPAR International Reference Atmosphere. Aka demie-Verlag, 1972)

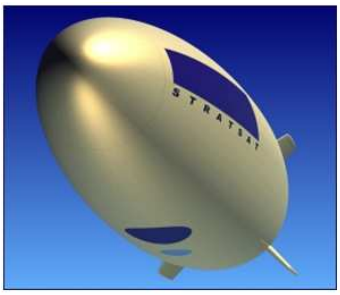
Σχήμα 2.1: Τυπική καμπύλη για την ταχύτητα του ανέμου στις ζώνες της γήινης ατμόσφαιρας.

2.3 ΤΥΠΟΙ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ

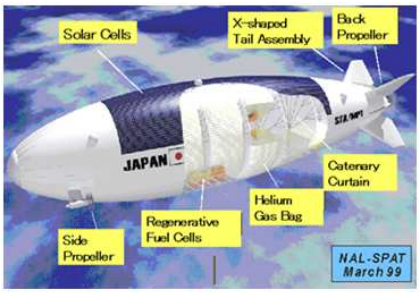
Τρεις είναι οι βασικότεροι τύποι στρατοσφαιρικών πλατφόρμων που φέρονται υποψήφιες για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών.

- Μη επανδρωμένα αερόπλοια που λειτουργούν με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων και έλικας ώστε να επιτυγχάνεται η σταθερότητα της θέσης, ενώ πετούν αντίθετα προς τους επικρατούντες ανέμους σε ύψη 3 έως 22km. Η απαραίτητη κινητήρια δύναμη για την προώθησή τους προέρχεται από ελαφριές ηλιακές κυψέλες, με τυπικό βάρος λιγότερο από 400g/m^2, που καλύπτουν το επάνω μέρος της επιφάνειας του αερόπλοιου. Επιπλέον κατά τη διάρκεια της ημέρας αποθηκεύουν ενέργεια σε επαναφορτιζόμενα ηλεκτρικά στοιχεία καύσιμης ύλης (fuel cells), τα οποία τίθενται σε λειτουργία για την εξυπηρέτηση των αναγκών της νύχτας. Ενδεικτικές τιμές για τις διαστάσεις αυτών των αερόπλοιων είναι 150 με 200m σε μήκος, ενώ εκτιμάται ότι θα έχουν τη δυνατότητα υποστήριξης φορτίου περίπου 1000 με 2000kg. Το αναμενόμενο βάρος τους φτάνει τους 30 τόνους και οφείλεται ως επί το πλείστον στο βάρος του φυσικού καυσίμου που μεταφέρουν. Η διάρκεια ζωής τους υπολογίζεται στα 5 χρόνια.
- Μη επανδρωμένα αεροσκάφη ηλιακής ενέργειας με άνοιγμα φτερών ως 70m και ωφέλιμο φορτίο 50-300kg. Έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν κάτω από την άτρακτο 125 περίπου μικροκυματικές κεραίες, σε ύψος 16 με 19km πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ο αναμενόμενος χρόνος παραμονής τους στη στρατόσφαιρα είναι περίπου 6 μήνες.
- Επανδρωμένα αεροσκάφη με πιλότους που εκτελούν 8ωρες βάρδιες. Φέρουν ωφέλιμο φορτίο 1000kg και επιτυγχάνουν ψευδο-σταθερότητα θέσης πετώντας σε κυκλική κατά προσέγγιση τροχιά ακτίνας μικρότερης των 10km.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται κάποιες στρατοσφαιρικές πλατφόρμες που έχουν σχεδιαστεί για την παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Στον Πίνακα 2.2 ακολουθεί μια συγκριτική απεικόνιση των διαφορετικών τύπων.



Stratsat,
Advanced Technology Group
UK



Stratospheric Platform,
Yokosuka Radio Communications Research Center
JAPAN

Galileo,
USA

Σχήμα 2.2: Μη επανδρωμένα αερόπλοια.

Heliplat,
HELINET project
EU

Pathfinder plus,
AeroVironment NASA
USA

Helios - SkyTower,
AeroVironment NASA
USA

Σχήμα 2.3: Μη επανδρωμένα αεροσκάφη.

HALO Proteus,
Angel Technologies Corporation
USA

Predator B,
NASA
USA

Σχήμα 2.4: Επανδρωμένα αεροσκάφη.

Πίνακας 2.2: Σύγκριση στρατοσφαιρικών πλατφόρμων.

	Μη επανδρωμένα αερόπλοια	**Μη επανδρωμένα αεροσκάφη**	**Επανδρωμένα αεροσκάφη**
Μέγεθος	150-200m μήκος	35-70m άνοιγμα φτερών	30m μήκος
Βάρος	≈30τόνοι	≈1τόνος	≈2-5τόνοι
Πηγή ισχύος	ηλιακές κυψέλες + κυψέλες καυσίμου	ηλιακές κυψέλες + κυψέλες καυσίμου	φυσικό καύσιμο

Φιλικότητα προς το περιβάλλον	ναι	ναι	όχι
Διάρκεια πτήσης	≈5χρόνια	≈6μήνες	≈8ώρες
Διατήρηση θέσης (ακτίνα)	≈1km	≈3km	≤10km
Ωφέλιμο φορτίο	1000-2000kg	50-300kg	≈1000kg
Ισχύς εκπομπής	≈10kW	≈3kW	≈20kW

2.4 ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ

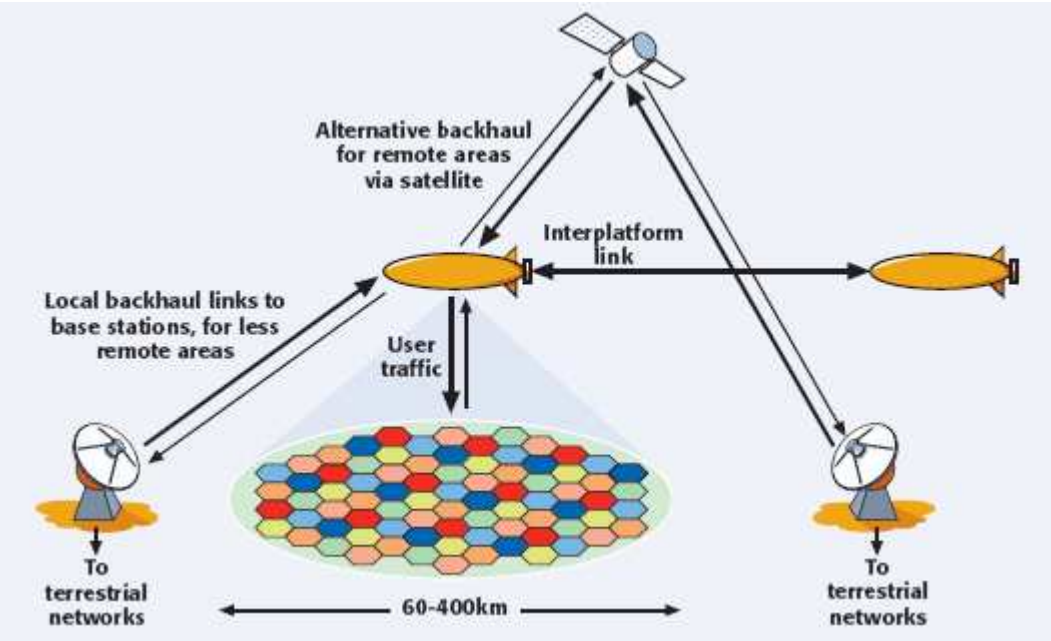
Είναι σαφές ότι για να εξασφαλιστεί η επιτυχημένη λειτουργία των στρατοσφαιρικών σταθμών δεν αρκεί η εξέλιξη της τεχνολογίας των χρησιμοποιούμενων αεροσκαφών. Απαραίτητη είναι η ανάπτυξη ενός επίγειου συστήματος υποστήριξης για την αιώρηση, την πρόσδεση, τη συντήρηση και την επιθεώρηση των πλατφόρμων. Αξιόπιστα συστήματα πλοήγησης, συστήματα ελέγχου απογείωσης, ανύψωσης και προσγείωσης, συστήματα ανίχνευσης και ελέγχου θέσης πρέπει οπωσδήποτε να περιλαμβάνονται στην επίγεια υποδομή, προκειμένου να έχουμε ένα ασφαλές και αποδοτικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο. Ο τηλεχειρισμός και η χρήση GPS (Global Positioning System) ενδέχεται να συμβάλλουν στη σωστή και προβλέψιμη λειτουργία των εναέριων πλατφόρμων, ενώ σημαντικό ρόλο θα παίξει η έγκαιρη πρόγνωση των καιρικών συνθηκών στην περιοχή πτήσης τους. Με τη βοήθεια των σημάτων τηλεμετρίας πρέπει να παρακολουθείται διαρκώς η κατάσταση του εξοπλισμού που βρίσκεται πάνω στο αεροσκάφος και να δίνονται οι αντίστοιχες εντολές σε περιπτώσεις ανωμαλιών ή επικίνδυνων ατμοσφαιρικών φαινομένων. Οι αποφάσεις για δυνατότητα απογείωσης ή ανάγκη προσγείωσης και επισκευής μπορούν να ληφθούν μόνο εφόσον υπάρχει επαρκής γνώση της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειώσουμε ότι τα ρεύματα του αέρα δρουν προωστικά στην τροπόπαυση, δηλαδή στη μεταβατική ζώνη μεταξύ τροπόσφαιρας και στρατόσφαιρας, βοηθώντας την πλατφόρμα να κερδίσει ύψος. Όταν αυτή φτάσει περίπου στα 20km χρειάζεται να ληφθεί μέριμνα για τη μεταφορά και σταθεροποίησή της στην προβλεπόμενη θέση. Θεωρώντας μια μέγιστη ταχύτητα ανέμου της τάξης των 20m/sec, η ακρίβεια που μπορεί να επιτευχθεί είναι ακτίνας 1km σε οριζόντιο επίπεδο και ±1km σε κατακόρυφο

επίπεδο, η οποία είναι βέβαια συνάρτηση της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας και των αντίστοιχων μοντέλων κίνησης.

2.5 ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΖΕΥΞΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΗΡΕΣΙΕΣ

Υπηρεσίες μπορούν να προσφέρονται στους χρήστες μέσω των απευθείας ζεύξεων με την πλατφόρμα (uplink και downlink) και των ζεύξεων μεταξύ της πλατφόρμας και του υπάρχοντος επίγειου δικτύου οπτικών ινών. Δια-πλατφορμικές (inter-platform) ζεύξεις χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός δικτύου από HAPS, ενώ υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης ζεύξης μεταξύ πλατφόρμας και δορυφόρου σε περίπτωση που αυτό κρίνεται σκόπιμο. Ένα σχηματικό σενάριο επικοινωνίας φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Σενάριο στρατοσφαιρικών ζεύξεων.

Οι παρεχόμενες τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες από τη στρατόσφαιρα μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: υπηρεσίες υψηλού ρυθμού δεδομένων για σταθερά τερματικά και υπηρεσίες χαμηλού ρυθμού δεδομένων για κινητούς χρήστες [7]. Στην πρώτη κατηγορία εμπίπτουν ευρυζωνικές εφαρμογές όπως διαδραστικό βίντεο, βιντεο-τηλεφωνία, δικτυακή τηλεόραση, τηλεδιάσκεψη, υψηλής ταχύτητας σύνδεση στο internet, υπηρεσίες ευρυεκπομπής και πολυμέσων, που υποστηρίζονται μέσα από πλήρως αμφίδρομα ψηφιακά κανάλια ρυθμού έως 155Mbps. Η δεύτερη κατηγορία αφορά

λειτουργία κινητών κυψελωτών υπηρεσιών IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000), για την εξυπηρέτηση μεγάλων αραιοκατοικημένων περιοχών ή μικρών περιοχών με αυξημένη πυκνότητα κινητών χρηστών.

Οι στρατοσφαιρικοί σταθμοί μπορούν επίσης να παρέχουν εφαρμογές τηλεπισκόπησης, παρακολούθησης επίγειων περιοχών και συλλογής περιβαλλοντικών δεδομένων. Η εγγενής δυνατότητά τους να μετακινούνται και να επανατίθενται σε λειτουργία πάνω από δεδομένα σημεία εξυπηρέτησης, επιτρέπει την αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων με αυξημένες τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις, όπως μεγάλες αθλητικές διοργανώσεις ή φυσικές καταστροφές. Δυνατή είναι ακόμα η αναμετάδοση δορυφορικών σημάτων και η παροχή επικοινωνίας σε πλωτά μέσα κατά μήκος των ωκεανών. Βασικό χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των στρατοσφαιρικών εφαρμογών αποτελεί η δυναμική παροχή εύρους ζώνης (bandwidth on demand) όποτε και όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο.

2.6 ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU έχει κατατάξει την υπηρεσία των στρατοσφαιρικών επικοινωνιών στις υψηλής πυκνότητας σταθερές υπηρεσίες HDFS, διευκρινίζοντας ότι κάνει χρήση σταθμών τοποθετημένων στη στρατόσφαιρα.

Σύμφωνα με τις αποφάσεις και τους κανονισμούς του Τομέα Ραδιοεπικοινωνιών της Ένωσης (ITU Radiocommunication Sector, ITU-R) τα στρατοσφαιρικά δίκτυα μπορούν να λειτουργούν στις παρακάτω ζώνες συχνοτήτων.

- 1885-1980MHz, 2010-2025MHz και 2110-2170MHz στις περιοχές 1 και 3. Η ανάθεση των ζωνών αυτών δεν είναι αποκλειστική ούτε έχει προτεραιότητα έναντι σε άλλες υπηρεσίες που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες.
- 1885-1980MHz και 2110-2160MHz στην περιοχή 2. Ομοίως η ανάθεση αυτή δεν είναι αποκλειστική ούτε με προτεραιότητα.
- 27.50-28.35GHz για την προς τα κάτω ζεύξη στο Μπουτάν, την Κορέα, τη Ρωσία, την Ινδονησία, το Ιράν, την Ιαπωνία, το Καζακστάν, το Λεσότο, τη Μαλαισία, τις Μαλδίβες, τη Μογγολία, το Μυανμάρ, το Ουζμπεκιστάν, το Πακιστάν, τις Φιλιππίνες, το Κιργιστάν, τη Σρι Λάνκα, την Ταϊλάνδη και το Βιετνάμ. Η λειτουργία των στρατοσφαιρικών δικτύων στις

παραπάνω συχνότητες οφείλει να μην παρενοχλεί άλλες σταθερές υπηρεσίες ούτε και να διεκδικεί προστασία παρεμβολών από αυτές.

- 31.0-31.3GHz για την προς τα άνω ζεύξη στο Μπουτάν, την Κορέα, τη Ρωσία, την Ινδονησία, το Ιράν, την Ιαπωνία, το Καζακστάν, το Λεσότο, τη Μαλαισία, τις Μαλδίβες, τη Μογγολία, το Μυανμάρ, το Ουζμπεκιστάν, το Πακιστάν, τις Φιλιππίνες, το Κιργιστάν, τη Σρι Λάνκα, την Ταϊλάνδη και το Βιετνάμ. Και εδώ πρέπει να περιορίζονται οι παρεμβολές προς άλλα συστήματα σταθερών υπηρεσιών, ενώ δεν προβλέπεται αντίστοιχη προστασία για τα στρατοσφαιρικά δίκτυα.
- 47.2-47.5GHz για την προς τα κάτω ζεύξη σε όλον τον κόσμο εκτός από τις χώρες όπου υπάρχει η ανάθεση 27.50-28.35GHz.
- 47.9-48.2GHz για την προς τα άνω ζεύξη σε όλον τον κόσμο εκτός από τις χώρες όπου υπάρχει η ανάθεση 31.0- 31.3GHz.

Η παγκόσμια ανάθεση στη ζώνη συχνοτήτων γύρω από τα 2.1GHz [8], με συνολικό εύρος ζώνης 50/60MHz, αφορά την παροχή υπηρεσιών σε κινητούς χρήστες, με τις πλατφόρμες να αποτελούν εναλλακτική λύση των σταθμών βάσης κινητής τηλεφωνίας. Οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες μπορούν να λειτουργήσουν ως σταθμοί βάσης ενσωματωμένοι στο επίγειο δίκτυο IMT-2000, εξασφαλίζοντας μεγάλες περιοχές κάλυψης υψηλής πυκνότητας με ελάχιστη υποδομή δικτύου. Από τη άλλη μεριά, η ζώνη γύρω από τα 30GHz [9] για 40 χώρες παγκοσμίως προορίζεται για σταθερές υπηρεσίες με εύρος ζώνης 300MHz. Παρομοίως η ανάθεση στη V ζώνη περί τα 47-48GHz [10] για τον υπόλοιπο κόσμο ορίζει διαθέσιμο φάσμα 300MHz ανά κατεύθυνση για σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες, υπηρεσίες τηλεμετρίας και ελέγχου της πλατφόρμας.

2.7 ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΡΑΔΙΟΚΑΛΥΨΗΣ

Η επιφάνεια κάλυψης μιας στρατοσφαιρικής πλατφόρμας ορίζεται ως ο γεωμετρικός τόπος των σημείων πάνω στη γη απ' όπου η πλατφόρμα "φαίνεται" υπό γωνία ανύψωσης μεγαλύτερη μιας προκαθορισμένης τιμής. Η συνολική περιοχή κάλυψης διαιρείται σύμφωνα με την ITU σε τρεις ζώνες [11]. Η ύπαρξη των ζωνών αυτών εξασφαλίζει την παροχή ενιαίων και ομοιόμορφων ευρυζωνικών υπηρεσιών στην ευρεία περιοχή που κείται κάτω από την πλατφόρμα.

○ Ζώνη Αστικής Κάλυψης UAC (Urban Area Coverage): Οι γωνίες ανύψωσης των επίγειων σταθμών ως προς την πλατφόρμα κυμαίνονται μεταξύ 30° και 90°. Στη ζώνη UAC η περιοχή κάλυψης εκτείνεται έως τα 36 ή 43km από το σημείο ναδίρ ακριβώς κάτω από την πλατφόρμα, για ύψος πτήσης 21 και 25km αντίστοιχα. Οι χρήστες της αστικής ζώνης μπορούν να έχουν φορητές τερματικές συσκευές με εύρος δέσμης περίπου 11°, ή κεραίες κέρδους 26dBi, και διαστάσεων 10cm επί 10cm. Τα τερματικά αυτά χρειάζονται κατά προσέγγιση 0.15W εκπεμπόμενης RF ισχύος. Οι κεραίες στον εναέριο σταθμό πρέπει να έχουν κέρδος 30dBi (1W RF ισχύος ανά κανάλι).

○ Ζώνη Προαστικής Κάλυψης SAC (Suburban Area Coverage): Οι γωνίες ανύψωσης των επίγειων σταθμών είναι μεταξύ 15° και 30°. Η περιοχή κάλυψης στην περίπτωση αυτή εκτείνεται από τα όρια της ζώνης UAC έως τα 76.5 ή 90.5km, για υψόμετρο λειτουργίας 21 και 25km αντιστοίχως. Στα τερματικά απαραίτητη είναι η χρήση κατευθυντικών κεραιών υψηλότερου κέρδους (41dBi) με ισχύ εκπομπής 0.2W. Οι ίδιες κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στις ζώνες UAC για σταθερή εγκατάσταση σε οροφές κτιρίων. Η εναέρια πλατφόρμα έχει όπως και πριν κεραίες κέρδους 30dBi.

○ Ζώνη Αγροτικής Κάλυψης RAC (Rural Area Coverage): Οι γωνίες ανύψωσης κυμαίνονται από 5° ως 15° και η περιοχή κάλυψης υπολογίζεται ότι φτάνει από τα όρια της ζώνης SAC ως τα 203 ή 234km, ανάλογα αν η πλατφόρμα βρίσκεται στα 21 ή 25km. Η αγροτική ζώνη αναμένεται να αφιερωθεί στην υψηλής ταχύτητας, σημείου προς σημείο πρόσβαση και στην κάλυψη ευρέων περιοχών κάνοντας χρήση χαμηλότερων συχνοτήτων, μεταξύ 800MHz και 5GHz, καθώς η εξασθένηση που προκαλείται από τη βροχή και άλλα ατμοσφαιρικά φαινόμενα στα 47/48GHz είναι πολύ μεγάλη.

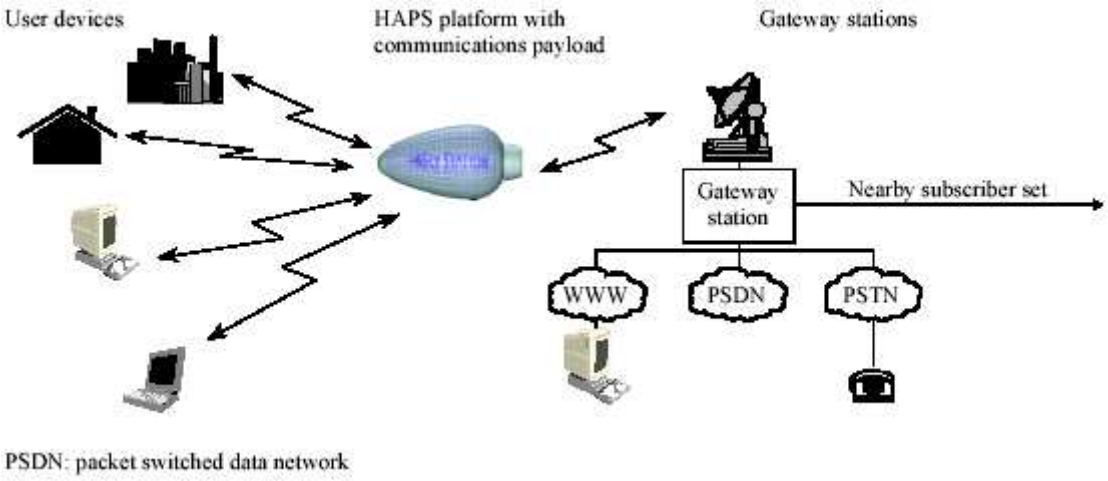
Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των τριών ζωνών της περιοχής κάλυψης ενός στρατοσφαιρικού σταθμού.

Πίνακας 2.3: Ζώνες κάλυψης στρατοσφαιρικού σταθμού.

Περιοχή κάλυψης	**Γωνία ανύψωσης (°)**	**Ακτίνα στο έδαφος (km)**	
		Πλατφόρμα στα 21km	**Πλατφόρμα στα 25km**
UAC	90-30	0-36	0-43
SAC	30-15	36-76.5	43-90.5
RAC	15-5	76.5-203	90.5-234

2.8 ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Η συνήθης τοπολογία ενός στρατοσφαιρικού δικτύου HAPN (High Altitude Platform Network) είναι τοπολογία αστέρα [11], με την πλατφόρμα να λειτουργεί ως ο κύριος εξυπηρετητής (HUB), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Το εναέριο φορτίο προβάλλει πολλαπλές σημειακές δέσμες στο έδαφος, παρέχοντας τηλεπικοινωνιακή κάλυψη σε μια κυκλική περιοχή με διάμετρο εξαρτώμενη από τις γωνίες ανύψωσης των τερματικών.



Σχήμα 2.6: Τοπολογία στρατοσφαιρικού δικτύου.

Οι τερματικοί χρήστες έχουν φορητές συσκευές που επικοινωνούν απευθείας με την πλατφόρμα. Μια τερματική συσκευή περιέχει την κεραία και μια μονάδα ψηφιακής διεπαφής (digital interface unit). Η επικοινωνία από χρήστη-σε-χρήστη (user-to-user) δρομολογείται απευθείας μέσω της πλατφόρμας και ενός ασύγχρονου ATM (Asynchronous Transfer Mode) διακόπτη.

Οι πυλαίοι σταθμοί (gateways) επιτρέπουν την πρόσβαση των χρηστών στα υπάρχοντα δημόσια δίκτυα τηλεφωνίας και δεδομένων, όπως το Δημόσιο Τηλεφωνικό Δίκτυο Μεταγωγής (Public Switched Telephone Network, PSTN) και το Internet. Η σχεδίαση του δικτύου είναι τέτοια ώστε η τοποθέτηση των πυλαίων σταθμών να γίνεται σε οποιοδήποτε σημείο της περιοχής κάλυψης, με στόχο τη μείωση της απαιτούμενης επίγειας υποδομής.

2.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΑΕΡΙΑΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Η επικοινωνία με τα τερματικά των χρηστών χρησιμοποιεί TDM (Time Division Multiplexing) QPSK διαμόρφωση και εύρος ζώνης 11MHz στην κάτω ζεύξη και 2.2MHz στην άνω ζεύξη. Η επικοινωνία με τους πυλαίους σταθμούς γίνεται με χρήση διαμόρφωσης 64-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) και εύρος ζώνης 88MHz (11MHz ανά φέρον). Και στις δύο περιπτώσεις υποθέτουμε δυνατότητα χρήσης φάσματος 2x100MHz. Αν το διαθέσιμο φάσμα είναι 2x300MHz, το εύρος ζώνης της κάτω ζεύξης αυξάνει αντίστοιχα στα 33MHz. Τυπικά χαρακτηριστικά εκπομπής και κέρδους κεραιών της εναέριας πλατφόρμας δίνονται στον Πίνακα 2.4.

Πίνακας 2.4: Παράμετροι εκπομπής στρατοσφαιρικής πλατφόρμας.

Επικοινωνία προς	Ισχύς εκπομπής (dBW)	Μέγιστο κέρδος κεραίας (dBi)
UAC	1.3	30
SAC	1.3	30
RAC	3.5	41
Gateway (UAC)	0	35
Gateway (SAC)	9.7	38

2.10 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΓΕΙΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ

Οι αντίστοιχες παράμετροι για τους επίγειους σταθμούς δίνονται στον Πίνακα 2.5. Στην άνω ζεύξη τα τερματικά των χρηστών κάνουν χρήση TDMA πολλαπλών φερόντων με QPSK διαμόρφωση, ενώ οι πυλαίοι σταθμοί υιοθετούν παρόμοιες τεχνικές με αυτές της πλατφόρμας.

Πίνακας 2.5: Παράμετροι εκπομπής επίγειων σταθμών.

Επικοινωνία προς	Ισχύς εκπομπής (dBW)	Μέγιστο κέρδος κεραίας (dBi)
UAC	- 8.2	23
SAC	- 7	38
RAC	- 1.5	38
Gateway (UAC)	1.7	46
Gateway (SAC)	13.4	46

2.11 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Ολοκληρώνοντας την περιγραφή της τεχνολογίας των στρατοσφαιρικών δικτύων, κρίνεται σκόπιμη μια συγκριτική ανάλυση των σημείων όπου τα δίκτυα αυτά υπερτερούν είτε υστερούν έναντι των επίγειων ασύρματων και δορυφορικών δικτύων επικοινωνιών.

Σε σχέση με τα επίγεια ασύρματα, βασικότερο πλεονέκτημα των στρατοσφαιρικών δικτύων είναι η μεγάλη περιοχή κάλυψης που επιτυγχάνεται από μια μόνο πλατφόρμα, χάρη στο μεγάλο ύψος λειτουργίας της. Επιπλέον οι στρατοσφαιρικές ζεύξεις λειτουργούν με υψηλές γωνίες ανύψωσης, που στην αστική ζώνη μπορούν να φθάσουν ακόμα και τις 90°, σε αντίθεση με τις ζεύξεις επίγειων δικτύων. Έτσι εξασφαλίζεται η διάδοση οπτικής επαφής (LOS), καθώς τα στρατοσφαιρικά κύματα διανύουν μια ως επί το πλείστον χωρίς εμπόδια διαδρομή μεταξύ πλατφόρμας και επίγειων τερματικών. Ως εκ τούτου σε συνθήκες καθαρού ουρανού η απόσβεση είναι ανάλογη του τετραγώνου της διανυόμενης απόστασης (20dB/δεκάδα) και ακολουθεί κατανομή Rice. Αντιθέτως, οι επίγειες μεταδόσεις χαρακτηρίζονται από πολυδιαδρομική διάδοση και σκέδαση, ενώ επηρεάζονται σημαντικά από τη μορφολογία του εδάφους και τις ανθρώπινες κατασκευές. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει απευθείας ισχυρή συνιστώσα λαμβανόμενου σήματος και η απόσβεση είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόστασης (40dB/δεκάδα), ακολουθώντας κατανομή Rayleigh. Η επίδραση της βροχής είναι σφοδρή και για τα δύο συστήματα, ωστόσο καθώς η παρουσία της περιορίζεται περίπου στα 5km από τη γήινη επιφάνεια, οι στρατοσφαιρικές ζεύξεις πλήττονται μόνο στο κατώτερο τμήμα τους. Τέλος, η παροχή υπηρεσιών από τη στρατόσφαιρα δεν απαιτεί την εγκατάσταση μεγάλης επίγειας υποδομής. Μια εναέρια πλατφόρμα ισοδυναμεί με σημαντικό αριθμό επίγειων σταθμών βάσης, χωρίς να εκπέμπει ακτινοβολία κοντά στη γήινη επιφάνεια. Ακόμα, οι υψηλές συχνότητες λειτουργίας των στρατοσφαιρικών συστημάτων υποστηρίζουν πιο αποτελεσματικά εφαρμογές με μεγάλο εύρος ζώνης.

Από την άλλη μεριά, οι στρατοσφαιρικές επικοινωνίες αντιμετωπίζουν σημαντικά ενεργειακά προβλήματα, που προκύπτουν από την αδυναμία τροφοδοσίας τους μέσω της υπάρχουσας επίγειας υποδομής. Παρουσιάζουν δε αυξημένη λειτουργική πολυπλοκότητα λόγω της ανάγκης σταθεροποίησης της πλατφόρμας, καθώς και προβλήματα στόχευσης των κεραιών που προκύπτουν από την αδυναμία απολύτου ελέγχου θέσης της. Αμφίβολη είναι η δυνατότητα κάλυψης εσωτερικών χώρων (indoor coverage) από τα στρατοσφαιρικά συστήματα, ενώ ο χρόνος ζωής τους είναι σίγουρα μικρότερος από το χρόνο ζωής των επίγειων υποδομών.

Η σύγκριση μεταξύ δορυφορικών και στρατοσφαιρικών δικτύων, δείχνει τα τελευταία να πλεονεκτούν κυρίως ως προς τις καθυστερήσεις διάδοσης. Το μεγάλο ύψος τροχιάς των δορυφόρων επιφέρει καθυστέρηση των μεταδιδόμενων σημάτων που φθάνει τα 250-300msec, τιμή απαγορευτική για διαδραστικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Η εγγύτητα των στρατοσφαιρικών πλατφόρμων στην επιφάνεια της γης, οδηγεί σε αντίστοιχες καθυστερήσεις της τάξεως των 0.35msec. Παράλληλα οι αποσβέσεις ελευθέρου χώρου είναι πολύ μεγαλύτερες στα δορυφορικά σήματα λόγω της πολλαπλάσιας απόστασης που διανύουν. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι στα 2GHz ο προϋπολογισμός ζεύξης ενός στρατοσφαιρικού συστήματος πλεονεκτεί κατά 34dB σε σχέση με έναν LEO δορυφόρο και κατά 66dB σε σχέση με έναν GEO. Οι παραπάνω αποσβέσεις καθιστούν απαραίτητη τη δορυφορική εκπομπή σε υψηλές στάθμες ισχύος, σε αντίθεση με τις χαμηλές απαιτήσεις ισχύος των στρατοσφαιρικών επικοινωνιών. Αυξημένη χωρητικότητα προκύπτει στα στρατοσφαιρικά δίκτυα από τα εξαιρετικά μικρά μεγέθη κυψελών που επιτυγχάνονται με τον υψηλό ρυθμό επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Οι κυψέλες που σχηματίζονται από τους δορυφόρους στη γήινη επιφάνεια είναι υποχρεωτικά πολύ μεγαλύτερες, της τάξεως κάποιων δεκάδων ή εκατοντάδων km, την ώρα που η τυπική στρατοσφαιρική κυψέλη δεν ξεπερνά σε διάμετρο τα 10km. Άλλα σημεία υπεροχής των στρατοσφαιρικών δικτύων είναι η δυνατότητα παροχής υπηρεσιών σε δεδομένη περιοχή από μια μόνο πλατφόρμα, και η σταδιακή επέκταση του συστήματος σύμφωνα με τις απαιτήσεις κάλυψης και χωρητικότητας, την ώρα που τα συστήματα δορυφόρων χαμηλής τροχιάς απαιτούν την πλήρη ανάπτυξή τους προτού τεθούν σε λειτουργία. Οι πλατφόρμες μπορούν ακόμη να επαναφέρονται στη γη για έλεγχο, συντήρηση ή επισκευή, ώστε να εξασφαλίζεται σωστή λειτουργία και διαρκής αναβάθμιση του ωφέλιμου φορτίου, πράγμα αδύνατο στην περίπτωση των δορυφόρων. Αυξημένη φιλικότητα προς το περιβάλλον παρουσιάζουν τα στρατοσφαιρικά δίκτυα καθώς εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια, ενώ η εκτόξευση των δορυφόρων επιβαρύνει την ατμόσφαιρα με καύσιμη ύλη. Τέλος, το κόστος υλοποίησης παρότι δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια, αναμένεται να είναι σημαντικά χαμηλότερο από το κόστος των δορυφορικών συστημάτων, καθότι τα στρατοσφαιρικά δίκτυα δεν απαιτούν μηχανισμό εκτόξευσης ούτε βαριά επίγεια υποδομή. Κάνουν χρήση μικρών, φθηνών τερματικών συσκευών και εναέριων κεραιών με πολύ μικρότερες διαστάσεις από τα παραβολικά κάτοπτρα που κουβαλούν οι δορυφορικοί αναμεταδότες.

Στον αντίποδα, το ύψος τροχιάς των δορυφόρων εξασφαλίζει εξαιρετικά μεγάλες περιοχές κάλυψης. Η εξυπηρέτηση αντίστοιχης έκτασης από τη στρατόσφαιρα απαιτεί μεγάλο αριθμό εναέριων πλατφόρμων. Τα ενεργειακά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι

πλατφόρμες και ο περιορισμένος χρόνος ζωής τους σε σχέση με τους δορυφόρους είναι δύο επιπλέον μειονεκτήματα των στρατοσφαιρικών επικοινωνιών.

Στον Πίνακα 2.6 ακολουθεί συνοπτική αντιπαράθεση [12] των βασικότερων χαρακτηριστικών όπου διαφοροποιούνται τα τρία είδη ασύρματων δικτύων.

Πίνακας 2.6: Σύγκριση επίγειων, δορυφορικών, στρατοσφαιρικών δικτύων.

	Επίγεια Ασύρματα	**Δορυφορικά**	**Στρατοσφαιρικά**
Καθυστερήσεις διάδοσης	χαμηλές	υψηλές για GEO και MEO	χαμηλές
Εύρος γεωγραφικής κάλυψης	λίγα km ανά σταθμό βάσης	>1000km για LEO, 1/3 της γης για GEO	έως 200km ανά πλατφόρμα
Τυπική διάμετρος κυψέλης	0.1-1km	50km για LEO, >400km για GEO	1-10km
Χρόνος εγκατάστασης	χρονοβόρα εγκατάσταση επίγειας υποδομής	μεγάλος	ταχεία εγκατάσταση
Επεκτασιμότητα	σταδιακή ανάπτυξη για πλήρη κάλυψη	LEO/MEO: παροχή υπηρεσιών μόνο όταν εγκατασταθεί πλήρως το σύστημα	δυνατή η παροχή υπηρεσιών από μια μόνο πλατφόρμα
Χαρακτηριστικά διαύλου	δίαυλος με διαλείψεις Rayleigh, απώλειες έως 40dB/δεκάδα	δίαυλος ελευθέρου χώρου με διαλείψεις Rice, απώλειες 20dB/δεκάδα	δίαυλος ελευθέρου χώρου με διαλείψεις Rice, απώλειες 20dB/δεκάδα
Πολυπλοκότητα	κινητά τερματικά	σύνθετες τροχιές LEO/MEO	αστάθεια πλατφόρμας
Θέματα υγείας / περιβάλλοντος	τερματικά χαμηλής ισχύος, εκπομπές από σταθμούς βάσης	τερματικά υψηλής ισχύος λόγω μεγάλων απωλειών	τερματικά χαμηλής ισχύος
Κάλυψη εσωτερικών χώρων	ικανοποιητική	αδύνατη	πιθανή
Κόστος	κυμαινόμενο	υψηλό	πιθανώς μικρότερο από το κόστος επίγειου συστήματος με πολλούς σταθμούς βάσης

2.12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2

[1] ITU Radio Regulations 1.66A.

[2] G.M.Djuknic, J.Freidenfelds, Y.Okunev, "Establishing Wireless Communications Services via High-Altitude Aeronautical Platforms: A Concept Whose Time Has Come?," IEEE Communications Magazine, vol.35, no.9, pp. 128-135, September 1997.

[3] D.Grace, N.E.Daly, T.C.Tozer, A.G.Burr, and D.A.J.Pearce, "Providing Multimedia Communications Services from High Altitude Platforms," International Journal of Satellite Communications, Wiley InterScience, vol.19, no.6, pp.559-580, November/December 2001.

[4] R.Miura, M.Suzuki, "Preliminary Flight Test Program on Telecom and Broadcasting using High Altitude Platform Stations," Wireless Personal Communications, An International Journal, Kluwer Academic Publishers, vol.24, no.2, pp.341-361, January 2003.

[5] D.Grace, J.Thornton, G.Chen, G.White, T.Tozer, "Improving the System Capacity of Broadband Services using Multiple High-Altitude Platforms," IEEE Trans. On Wireless Communications, vol.4, no.2, pp.700-709, March 2005.

[6] Recommendation ITU-R F.1569, "Technical and operational characteristics for the fixed service using high altitude platform stations in the bands 27.5-28.35GHz and 31-31.3GHz," (05/2002).

[7] S.Karapantazis and F.-N.Pavlidou, "Broadband Communications via High-Altitude Platforms: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume 7, No.1, First Quarter 2005.

[8] ITU Resolution 221, "Use of high altitude platform stations providing IMT-2000 in the bands 1885-1980MHz, 2010-2025MHz and 2110-2170MHz in Regions 1 and 3 and 1885-1980MHz and 2110-2160MHz in Region 2," Rev.WRC-03.

[9] ITU-R Resolution 145, "Potential use of the bands 27.5-28.35GHz and 31-31.3GHz by high altitude platform stations (HAPS) in the fixed service," Rev.WRC-03.

[10] ITU Resolution 122, "Use of the bands 47.2-47.5GHz and 47.9-48.2GHz by high altitude platform stations (HAPS) in the fixed service and by other services and the potential use of bands in the range 18-32GHz by HAPS in the fixed service," Rev.WRC-03.

[11] Recommendation ITU-R F.1500, "Preferred characteristics of systems in the fixed service using high altitude platforms operating in the bands 47.2-47.5 GHz and 47.9-48.2 GHz," (05/2000).

[12] S.Karapantazis and F.-N.Pavlidou, “Can Stratospheric Vehicles Help Ease the Growing Demand for Efficient High-Speed Wireless Communications?,” IEE Communications Engineer, pp.18-23, Apr/May 2004.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -3-

ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ Η/Μ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΥΡΜΑΤΟΥ ΔΙΑΥΛΟΥ

3.1 ΔΙΑΛΕΙΨΕΙΣ Η/Μ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΑ

Τα μεταδιδόμενα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στα συστήματα τηλεπικοινωνιών υπόκεινται σε απώλειες της ισχύος τους κατά τη διάδοση, οι οποίες είναι εν γένει σταθερές με το χρόνο. Πέρα όμως από τη σταθερή απώλεια διάδοσης παρατηρείται το φαινόμενο της χρονικής διακύμανσης της στάθμης λήψης του κύματος σε δεδομένες χρονικές στιγμές. Η διακύμανση αυτή ονομάζεται διάλειψη (fade) και συχνά προκαλεί μεγάλη απόσβεση στο διαδιδόμενο κύμα. Οι κυριότερες αιτίες διαλείψεων που επηρεάζουν τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, οφείλονται στα μετεωρολογικά φαινόμενα και συναντώνται στα κατώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας και συγκεκριμένα στην τροπόσφαιρα [1]. Η επίδραση του μέσου διάδοσης είναι πολύ σημαντική και συνεπώς η ένταση των διαλείψεων αυξάνει με τη συχνότητα του φέροντος, ενώ λόγω του μεγάλου αριθμού των παραγόντων που συμβάλλουν στη δημιουργία τους, οι διαλείψεις αποτελούν τυχαίο φαινόμενο και αντιμετωπίζονται μόνο με στατιστική ανάλυση. Στα συστήματα που λειτουργούν πάνω από τα 10GHz, οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις και η απορρόφηση των αερίων της ατμόσφαιρας αποτελούν τις βασικότερες αιτίες διαλείψεων. Στην περιοχή κάτω των 10GHz κυριαρχούν φαινόμενα πολλαπλών διοδεύσεων (multipath propagation), κατά τα οποία πολλαπλές εκδοχές του εκπεμπόμενου σήματος φθάνουν στο δέκτη μέσω διαφορετικών διαδρομών. Οι διαδρομές αυτές προκύπτουν είτε από ανακλάσεις, περιθλάσεις και σκεδάσεις του σήματος στο έδαφος και στις ανθρώπινες κατασκευές, είτε από ανακλάσεις στα εσωτερικά στρώματα της ατμόσφαιρας λόγω χωροχρονικών μεταβολών του δείκτη διάθλασης [2]. Στην τελευταία περίπτωση οι διαλείψεις

παρουσιάζουν ταχείες μεταβολές και ονομάζονται γρήγορες διαλείψεις (fast fading), σε αντίθεση με τις αργές διαλείψεις (slow fading) των σημάτων που προκαλούν οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Παρότι τα δύο διαφορετικά είδη διαλείψεων μελετώνται συνήθως ξεχωριστά, πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι υπάρχει έντονη συσχέτιση μεταξύ τους [3].

Προκειμένου να μελετηθούν οι διαλείψεις σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα είναι απαραίτητος ο ορισμός μιας στάθμης απόσβεσης αναφοράς, η υπέρβαση της οποίας θεωρείται διάλειψη. Η στάθμη αυτή αναφέρεται ως απόσβεση ελευθέρου χώρου (free space path loss) και για δορυφορικές ή στρατοσφαρικές επικοινωνίες αντιστοιχεί στη διάδοση υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (clear sky propagation), ήτοι χωρίς την ύπαρξη ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων ή ασυνεχειών του δείκτη διάθλασης. Επιπλέον, το περιθώριο διαλείψεων (fade margin) F (dB) μιας ζεύξης εκφράζει ένα προκαθορισμένο κατώφλι απόσβεσης, η υπέρβαση του οποίου οδηγεί το δέκτη σε αδυναμία ανάκτησης του σήματος. Έτσι η πιθανότητα διακοπής της λειτουργίας μιας ζεύξης (outage probability, OP) ορίζεται ως

$$OP = \Pr\left[A \geq F\right] \tag{3.1}$$

3.2 Παραγοντες που Επηρεαζουν τη Διαδοση σε Συχνοτητες Άνω των 10GHz

Καθώς τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα μεταβαίνουν σε ολοένα υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας, οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις ανάγονται στον βασικό ρυθμιστικό παράγοντα σχεδιασμού των ζεύξεων, αποτελώντας το επικρατέστερο ίσως αίτιο διάλειψης. Ειδικότερα στις ζώνες Ku και Ka, όπου το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με τη διάμετρο των σταγόνων της βροχής, η επίδραση της τελευταίας είναι καθοριστική. Άλλα φαινόμενα που παρενοχλούν τις ασύρματες μεταδόσεις είναι η απορρόφηση των αερίων (gaseous absorption), η απόσβεση των νεφών και της ομίχλης (cloud and fog attenuation), η απόσβεση του επιπέδου τήξης πάγου (melting layer attenuation), οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί (tropospheric scintillations) και η αποπόλωση (depolarizarion).

Η απορρόφηση των αερίων προκαλεί σπινθηρισμό που οφείλεται στην απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από το οξυγόνο και τους υδρατμούς, με την απορρόφηση του οξυγόνου να θεωρείται χωρικά σταθερή ενώ των υδρατμών να εξαρτάται από το ποσοστό της παρουσίας τους στην ατμόσφαιρα. Αφορά κυρίως ζεύξεις άνω των

30GHz καθώς σε χαμηλότερες συχνότητες η προκαλούμενη απόσβεση είναι αρκετά χαμηλότερη της βροχής. Μια μεθοδολογία εκτίμησης της απορρόφησης αερίων δίνεται στη σύσταση ITU-R P.676 [4].

Η απόσβεση από τα σύννεφα και την ομίχλη οφείλεται στο ήδη υγροποιημένο περιεχόμενο των νεφών και αφορά τις χρονικές στιγμές που η συγκέντρωσή τους στην περιοχή ενδιαφέροντος είναι σημαντική αλλά δεν έχει ακόμη μετασχηματισθεί σε βροχή. Για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιούνται ειδικοί χάρτες συγκέντρωσης του υγρού στοιχείου των νεφών για συγκεκριμένο ποσοστό του χρόνου, σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.840 [5].

Το επίπεδο τήξης πάγου είναι ένα επίπεδο πάχους 500 περίπου μέτρων γύρω από την ισόθερμη των 0°C, όπου ο πάγος και το χιόνι μετασχηματίζονται σε βροχή. Η παρουσία αυτού του επιπέδου είναι πιο έντονη σε περιοχές με χαμηλούς ρυθμούς βροχόπτωσης. Σε αντίθετη περίπτωση θεωρείται ότι έχει συμπεριφορά παρόμοια της βροχής, οπότε η συμπεριφορά του συγκεκριμένου χώρου ενσωματώνεται στα μοντέλα πρόβλεψης της προκαλούμενης απόσβεσης λόγω βροχής [6].

Οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί, δηλαδή το φαινόμενο της διακύμανσης στην ισχύ και τη φάση του σήματος, αποτελεί έναν πρόσθετο μηχανισμό εισαγωγής απόσβεσης στο διαδιδόμενο σήμα [7,8]. Οι σπινθηρισμοί οφείλονται στη μεταβολή του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας και συνεπάγονται διακυμάνσεις στο πλάτος και τη φάση του σήματος, οι οποίες αυξάνουν με τη συχνότητα και το μήκος της διαδρομής, ενώ μειώνονται με το εύρος δέσμης των κεραιών.

Η χρήση ορθογωνίων πολώσεων συνεπάγεται βέλτιστη αξιοποίηση του διαθέσιμου φάσματος καθώς οδηγεί σε διπλασιασμό του διαθέσιμου εύρους ζώνης για δεδομένες συχνότητες λειτουργίας. Η ύπαρξη μη σφαιρικών σκεδαστών (σταγόνες βροχής, παγοκρύσταλλοι) προκαλεί μερική αποπόλωση λόγω στροφής της πόλωσης του διαδιδόμενου ραδιοκύματος. Ως αποτέλεσμα αυτού, μέρος της ισχύος του σήματος σε μια πόλωση παρεμβάλλεται στο ορθογώνια πολωμένο σήμα [9,10]. Ποσοτική θεώρηση του μεγέθους της αποπόλωσης πραγματοποιείται μέσω του παράγοντα XPD (Cross Polar Discrimination), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της λαμβανόμενης ισχύος κατά την επιθυμητή πόλωση P_W προς την παρεμβαλλόμενη ισχύ από την ορθογώνια πόλωση P_I και εκφράζεται σε dB μέσω της σχέσης,

$$XPD = 10\log\frac{P_W}{P_I} \tag{3.2}$$

Η αποπόλωση αυξάνεται με τη συχνότητα λειτουργίας και το ρυθμό βροχόπτωσης. Η σύσταση ITU-R P.530 [11] περιγράφει μια μέθοδο υπολογισμού της αποπόλωσης που οφείλεται σε υδρομετεωρίτες.

Παρακάτω αναλύεται διεξοδικά η επίδραση του φαινομένου της βροχής και των αερίων της ατμόσφαιρας στη διάδοση των Η/Μ κυμάτων.

3.3 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΚΑΤΑΚΡΗΜΝΙΣΕΙΣ (ΒΡΟΧΗ)

3.3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΒΡΟΧΗΣ

Η βροχή υποβιβάζει την ισχύ του μεταδιδόμενου σήματος με διάφορους μηχανισμούς. Αφενός οι σταγόνες της βροχής δρουν ως στοιχειώδεις αγώγιμοι σκεδαστές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, σκεδάζοντας το προσπίπτον κύμα προς ανεπιθύμητες κατευθύνσεις και αφετέρου απορροφούν ενέργεια από αυτό, την οποία αποδίδουν στο περιβάλλον ως θερμότητα, υποβιβάζοντας τη στάθμη ισχύος στο σημείο λήψης. Επιπλέον εισάγουν αποπόλωση και αύξηση της θερμοκρασίας ουράνιου θορύβου στην περιοχή του δέκτη. Καθώς η βροχή αποτελεί τυχαία χωροχρονική διαδικασία, η προσέγγισή της μπορεί να γίνει μόνο μέσω στατιστικής ανάλυσης.

Σε μικροσκοπικό επίπεδο τη βροχή απαρτίζει μεγάλος αριθμός σταγόνων των οποίων το σχήμα, το μέγεθος, ο προσανατολισμός, η κατεύθυνση και η ταχύτητα είναι τυχαίες μεταβλητές. Η απόσταση μεταξύ των σταγόνων θεωρείται ότι είναι αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με τη διάμετρό τους. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με μελέτες των Pruppacher και Pitter [12] οι σταγόνες βροχής έχουν σχήμα πεπλατυσμένου σφαιροειδούς, όπως αυτό διαμορφώνεται από την ισορροπία των δυνάμεων που ενεργούν πάνω τους κατά την επίδραση της βαρύτητας σε ιξώδες μέσο. Οι θεωρητικές προσεγγίσεις έρχονται σε ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα [13]. Η οριακή ταχύτητα της σταγόνας κοντά στο έδαφος έχει υπολογιστεί από τους Gunn και Kinzer [14] και έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται από το μέγεθος της σταγόνας και την πυκνότητα του αέρα.

Η κατανομή του μεγέθους των σταγόνων βροχής (rain drop size distribution) εκφράζει το ποσοστό των σταγόνων με ακτίνα ισόογκης σφαίρας στο διάστημα $\left[\overline{a}, \overline{a} + d\overline{a}\right]$ ανά μονάδα όγκου ατμόσφαιρας, όπου $\overline{a}$ η ακτίνα σφαίρας ίσου όγκου με τη σταγόνα βροχής. Διάφορες κατανομές έχουν προταθεί για το μέγεθος των σταγόνων, οι δημοφιλέστερες εκ των οποίων είναι οι κατανομές Laws-Parsons [15], Marshall-Palmer [16], Ulbrich [17] και Ajayi-Olsen [18].

Η θερμοκρασία των σταγόνων της βροχής έχει μικρή επίδραση στην εξασθένηση του σήματος για συχνότητες άνω των 15GHz. Αντιθέτως στην περιοχή 11-14GHz η απόσβεση είναι πολύ ευαίσθητη σε μεταβολές της θερμοκρασίας [19,20,21].

Κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης οι σταγόνες εμφανίζουν τυχαία γωνία κλίσης ως προς τον ορίζοντα (canting angle), η οποία εξαρτάται από την ένταση και την κατεύθυνση του πνέοντος ανέμου και παίζει σημαντικό ρόλο στην αποπόλωση του σήματος.

Σε μακροσκοπικό επίπεδο, το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων (convective raincell model) που υιοθετείται στην παρούσα μελέτη περιγράφει ικανοποιητικά τη χωρική κατανομή του μέσου βροχής και παρέχει τη δυνατότητα πρόβλεψης της απόσβεσης που αυτή εισάγει. Μετρήσεις ραντάρ έχουν δείξει ότι υπάρχουν εν γένει δύο μορφές βροχής. Η βροχή στρωσιγενούς τύπου (stratiform rain) που χαρακτηρίζεται από μέτρια ένταση και χωρική ομοιομορφία του ρυθμού βροχόπτωσης, και η βροχή συνεκτικού τύπου (convective rain) που χαρακτηρίζεται από ισχυρό ρυθμό βροχόπτωσης (βροχοπυρήνες) και μεγάλη χωρική ανομοιογένεια. Οι βροχοπυρήνες (rain cells) εμφανίζονται συγκεντρωμένοι σε περιορισμένες εκτάσεις λίγων δεκάδων χιλιομέτρων που περιβάλλονται από μεγαλύτερες περιοχές στρωσιγενούς βροχής, και είναι υπεύθυνοι για τις υψηλές αποσβέσεις των ραδιοκυμάτων. Στο εσωτερικό των βροχοπυρήνων ο ρυθμός βροχόπτωσης υπερβαίνει παντού ένα κατώφλι, συνήθως τα 5mm/h. Το σχήμα και οι διαστάσεις τους ποικίλει ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή και την εποχή. Στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά μοντέλα για την προσομοίωση των βροχοπυρήνων το περίγραμμά τους θεωρείται συνήθως κυκλικό ή ελλειπτικό. Από την άλλη μεριά μετρήσεις ραντάρ στο κατακόρυφο επίπεδο έχουν δείξει ότι η βροχή είναι προσεγγιστικά ομοιόμορφη κατά τον κατακόρυφο άξονα ανεξάρτητα από το ρυθμό βροχόπτωσης [22].

3.3.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΣΗΜΕΙΑΚΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Για τον προσδιορισμό της απόσβεσης βροχής απαραίτητη είναι η γνώση της κατανομής της τυχαίας μεταβλητής R (mm/hr), που εκφράζει το ύψος νερού που φτάνει σε ένα σημείο στο έδαφος ανά μονάδα χρόνου και ονομάζεται σημειακή ένταση ή ρυθμός βροχόπτωσης (rainfall rate). Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών ITU έχει συγκεντρώσει μακροχρόνιες μετρήσεις στατιστικών παραμέτρων βροχόπτωσης από το Ευρωπαϊκό Κέντρο Μέσης Κλίμακας Πρόγνωσης Καιρικών Συνθηκών (European Center of Medium-range Weather Forecast, ECMWF) για όλη την υφήλιο δημιουργώντας τους χάρτες βροχής (rainmaps) (βλ. Παράρτημα Δ). Η χρήση των παραπάνω χαρτών επιτρέπει την αξιόπιστη

πρόβλεψη της στάθμης του ρυθμού βροχόπτωσης που υπερβαίνεται σε μια τοποθεσία για δεδομένα χρονικά ποσοστά, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται στη σύσταση P.837 της ITU-R [23]. Επιπλέον, διάφορες μελέτες έχουν γίνει με σκοπό τη μαθηματική προσέγγιση της κατανομής υπέρβασης της τυχαίας μεταβλητής R. Έτσι αποδεικνύεται ότι η τελευταία πλησιάζει τη λογαριθμοκανονική κατανομή στην Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική [24] και την κατανομή γάμμα στην Αφρική, τη Νότια Αμερική, την Νότια Ασία και άλλες υποτροπικές και τροπικές περιοχές [25].

Εστιάζοντας στην περίπτωση της λογαριθμοκανονικής κατανομής, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αυτής έχει ως εξής [26],

$$f_R(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, R\, S_r} \exp\left[-\left(\frac{\ln R - \ln R_m}{\sqrt{2}\, S_r} \right)^2 \right] \tag{3.3}$$

όπου R_m και S_r είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής $\ln R$. Η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης βροχόπτωσης r εκφράζεται από το ολοκλήρωμα της $f_R(R)$ από r έως $+\infty$,

$$\Pr[R \geq r] = \int_r^{+\infty} f_R(R)\, dR = \frac{1}{2}\, erfc\left(\frac{\ln r - \ln R_m}{\sqrt{2}\, S_r} \right) \tag{3.4}$$

όπου $erfc(x)$ η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος.

$$erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{+\infty} \exp\left(-z^2\right) dz \tag{3.5}$$

Για την περίπτωση κατανομής Γάμμα η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας έχει την έκφραση [26],

$$f_R(R) = \frac{\beta_R^{\upsilon_R}}{\Gamma(\upsilon_R)} R^{\upsilon_R - 1}\, e^{-\beta_R R} \tag{3.6}$$

όπου υ_R και β_R είναι παράμετροι που υπολογίζονται από κατάλληλες πειραματικές καμπύλες. Η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης βροχής r προκύπτει,

$$\Pr[R \geq r] = 1 - \frac{\gamma(\upsilon_R, \beta_R\, r)}{\Gamma(\upsilon_R)} \tag{3.7}$$

όπου $\Gamma(x)$ η συνάρτηση Γάμμα και $\gamma(a,x)$ η ατελής συνάρτηση γάμμα.

$$\gamma(a,x) = \int_0^x t^{a-1}\, e^{-t}\, dt \tag{3.8}$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1}\, e^{-t}\, dt \tag{3.9}$$

3.3.3 ΕΙΔΙΚΗ ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΒΡΟΧΗΣ

Η απόσβεση A (dB) του μεταδιδόμενου σήματος που οφείλεται στη βροχόπτωση και εισάγεται κατά μήκος του ραδιοδρόμου της ζεύξης, ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος C_{CS} του επιθυμητού σήματος που λαμβάνει ο σταθμός λήψης σε συνθήκες καθαρού ουρανού, προς την ισχύ C που λαμβάνει ο ίδιος σταθμός υπό την επίδραση της βροχής. Εκφράζεται από τη σχέση,

$$A = 10 \log\left(\frac{C_{CS}}{C}\right) \text{ (dB)} \tag{3.10}$$

Ο υπολογισμός της απόσβεσης A που εισάγει η βροχή, γίνεται μέσω της ειδικής απόσβεσης A_0 (dB/km), δηλαδή της εξασθένησης ανά μονάδα μήκους που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα από χωρικά ομογενές μέσο βροχής.

$$A = \int_0^{L} A_0\, dl \tag{3.11}$$

Η ολοκλήρωση γίνεται κατά μήκος ενός απλού ραδιοβήματος μήκους L και επιβάλλεται από τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχής. Η ειδική απόσβεση συνδέεται με την ένταση βροχόπτωσης ως εξής [19].

$$A_0 = k\, R^{a} \tag{3.12}$$

Οι συντελεστές k και a είναι συναρτήσεις της συχνότητας λειτουργίας, της πόλωσης του κύματος τ (0°, 45°, 90° για οριζόντια, κυκλική, κατακόρυφη πόλωση) και της γωνίας ανύψωσης ϑ της ζεύξης [27]. Εξαρτώνται ακόμη από την κατανομή μεγέθους σταγόνας της βροχής και από την απόκλιση της διεύθυνσης κατακρήμνισης της σταγόνας σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα.

$$k = \frac{k_H + k_V + (k_H - k_V)\cos^2\vartheta\, \cos(2\tau)}{2} \tag{3.13}$$

$$a = \frac{k_H\, a_H + k_V\, a_V + (k_H\, a_H - k_V\, a_V)\cos^2\vartheta\, \cos(2\tau)}{2\,k} \tag{3.14}$$

Οι παράγοντες $k_{H,V}$ και $a_{H,V}$ που αντιστοιχούν σε οριζόντια ή κατακόρυφη πόλωση υπολογίζονται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που προτείνεται στη σύσταση P.838 της ITU-R [28]. Προσεγγιστικές εκφράσεις για σφαιροειδές σχήμα σταγόνων και κατανομή μεγέθους σταγόνων Laws-Parsons ή Ajayi-Olsen δίνονται παρακάτω. Στην περίπτωση της κατανομής Laws-Parsons που έχει εφαρμογή σε εύκρατες περιοχές, και για συχνότητες 10 με 30GHz ισχύει,

$$\left.\begin{aligned} k_H &= 8.9789 \cdot 10^{-5}\ f^{2.24060558} \\ k_V &= 7.3682 \cdot 10^{-5}\ f^{2.25740612} \\ a_H &= 1.7681577 - 0.2206576 \ln f \\ a_V &= 1.61107 - 0.18141203 \ln f \end{aligned}\right\} \tag{3.15}$$

Αντιστοίχως η κατανομή μεγέθους σταγόνων Ajayi-Olsen που εφαρμόζεται σε τροπικές περιοχές, μέσω γραμμικής παλινδρόμησης [29] για συχνότητες 10 με 30GHz δίνει,

$$\left.\begin{aligned} k_H &= 1.93082 \cdot 10^{-4}\ f^{2.04115} \\ k_V &= 1.4435 \cdot 10^{-4}\ f^{2.08455} \\ a_H &= 1.7071 - 0.20769 \ln f \\ a_V &= 1.6248 - 0.05898 \ln f \end{aligned}\right\} \tag{3.16}$$

Η απλοποιημένη παραδοχή για τη σφαιρικότητα των σταγόνων μαζί με την παράβλεψη της γωνίας κλίσης ως προς τον ορίζοντα, οδηγούν σε σφάλματα στον υπολογισμό των παραμέτρων k και a. Τα τελευταία χρόνια η προσπάθεια ακριβούς λύσης του προβλήματος Η/Μ σκέδασης από το μοντέλο σταγόνας Pruppacher-Pitter, έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερη αξιοπιστία πρόβλεψης των τιμών k και a.

3.3.4 ΕΝΕΡΓΟΎΨΟΣ ΒΡΟΧΗΣ – ΥΠΟΘΕΣΗ CRANE

Η απόσβεση σε dB μιας ζεύξης μήκους L που βρίσκεται υπό την επίδραση χωρικά ομογενούς βροχής (στρωσιγενούς τύπου) προκύπτει από το γινόμενο,

$$A = A_0\ L = k\ R^a\ L \tag{3.17}$$

Ωστόσο στην περίπτωση βροχής συνεκτικού τύπου είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η χωρική ανομοιογένεια του μέσου στο οριζόντιο επίπεδο. Στο κατακόρυφο επίπεδο το πρόβλημα απλοποιείται χάρη στην υπόθεση Crane [30] που περιγράφεται παρακάτω.

Η κατακόρυφη δομή του μέσου βροχής χαρακτηρίζεται από δύο περιοχές. Στην ανώτερη κυριαρχούν οι παγοκρύσταλλοι και το χιόνι που δε συνεισφέρουν σημαντικά στην

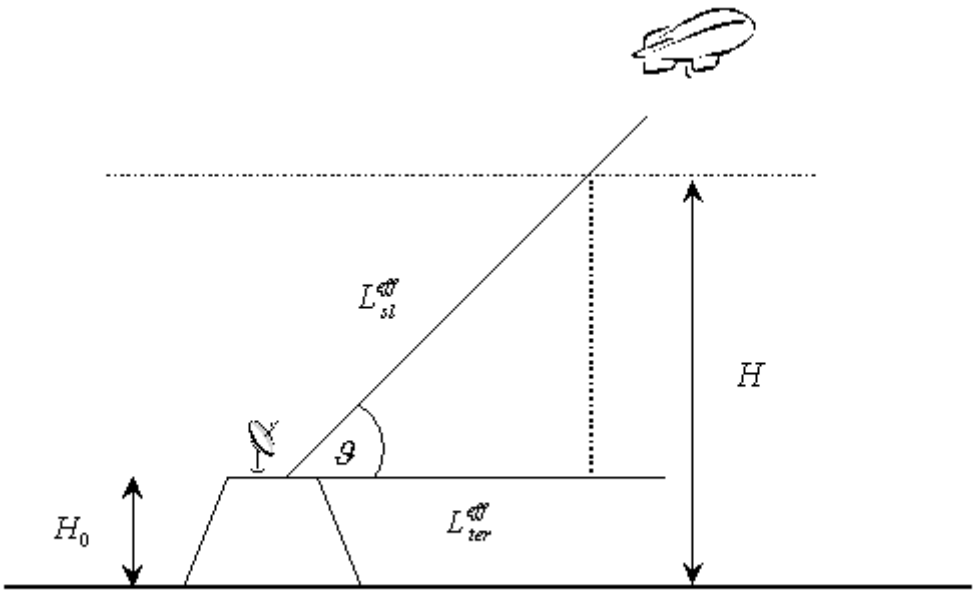
απόσβεση των ραδιοκυμάτων, τουλάχιστον έως τα 60GHz [31]. Στην κατώτερη περιοχή η βροχή εμφανίζεται με τη μορφή υδροσταγονιδίων και εκεί προκαλούνται τα σημαντικότερα προβλήματα στη ραδιοδιάδοση. Τις δύο περιοχές διαχωρίζει η ισόθερμη των 0°C, το ύψος H (km) της οποίας καλείται ενεργό ύψος βροχής και διαφοροποιείται από τόπο σε τόπο [32],

$$H = \begin{cases} 4.8, & |lat| \le 30^\circ \\ 7.8 - 0.1|lat|, & |lat| > 30^\circ \end{cases} \tag{3.18}$$

όπου lat το γεωγραφικό πλάτος σε μοίρες. Ως ενεργό μήκος ζεύξης L_{sl}^{eff} (km) ορίζεται το μήκος του κεκλιμένου ραδιοδρόμου που βρίσκεται υπό βροχή, από το σημείο εκπομπής ως την ισόθερμη των 0 °C.

$$L_{sl}^{eff} = \begin{cases} \dfrac{H - H_0}{\sin\vartheta}, & \vartheta \ge 10^\circ \\ \sqrt{(R_E + H)^2 - (R_E + H_0)^2 \cos^2\vartheta} - (R_E + H_0)\sin\vartheta, & \vartheta < 10^\circ \end{cases} \tag{3.19}$$

H_0 (km) είναι το υψόμετρο του σημείου εκπομπής, ϑ (°) η γωνία ανύψωσης και R_E (≅ 6378km) η μέση ακτίνα της γης.



Σχήμα 3.1: Ενεργό ύψος βροχής H και ενεργό μήκος ζεύξης L_{sl}^{eff} .

Συνεπώς ο υπολογισμός της απόσβεσης βροχής μιας ζεύξης περιορίζεται στο ενεργό μήκος αυτής. Αν επιπλέον δεχτούμε την υπόθεση Crane, ότι δηλαδή η ένταση

βροχόπτωσης είναι ομοιόμορφη κατά τον κατακόρυφο άξονα μέχρι το όριο του ενεργού ύψους βροχής [22], καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως οι αποσβέσεις κατά μήκος του ενεργού μήκους ζεύξης και της αντίστοιχης επίγειας προβολής είναι μεγέθη ανάλογα μεταξύ τους. Πιο αναλυτικά, για τα μήκη L των ζεύξεων και τις αποσβέσεις A αυτών ισχύει,

$$L_{ter}^{eff} = L_{sl}^{eff} \cos\vartheta \tag{3.20}$$

$$A_{ter} = A_{sl} \cos\vartheta \tag{3.21}$$

3.3.5 Μοντελοποιηση Κατανομης Αποσβεσης Βροχης κατα Μηκος Κεκλιμενου Ραδιοδρομου

Το **μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων** παρέχει έναν τρόπο πρόβλεψης της κατανομής υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης σε παγκόσμια κλίμακα. Λόγω της χωρικής ανομοιογένειας που παρουσιάζει η βροχή συνεκτικού τύπου, η ειδική απόσβεση δεν παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος της ζεύξης και η σχέση (3.17) παίρνει τη μορφή,

$$A_{ter} = \int_0^{L_{ter}^{eff}} A_0 \, dl = \int_0^{L_{ter}^{eff}} k \left[R(l)\right]^a dl \tag{3.22}$$

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητη η θεώρηση μιας στατιστικής κατανομής για τα μεγέθη της σημειακής έντασης βροχόπτωσης R και της απόσβεσης βροχής A_{ter}.

3.3.5.1 Μοντελο Λογαριθμοκανονικης Κατανομης

Η κατανομή που υιοθετείται σύμφωνα με το μοντέλο του Lin [24] είναι η λογαριθμοκανονική, για περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής, με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας την (3.3) για την τυχαία μεταβλητή R. Αντιστοίχως η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τυχαίας μεταβλητής A_{ter} είναι,

$$f_{A_{ter}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, x\, S_a} \exp\left[-\left(\frac{\ln x - \ln A_m}{\sqrt{2}\, S_a}\right)^2\right] \tag{3.23}$$

όπου A_m, S_a η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της $\ln A_{ter}$. Για τη μέση τιμή της τ.μ. A_{ter} ισχύει,

$$\mu_a = E\left[A_{ter}\right] = \int_0^{L_{ter}^{eff}} k\, E\left[R(z)^a\right] \mathrm{d}z = k\, E\left[R(z)^a\right] L_{ter}^{eff} \tag{3.24}$$

και για τη διακύμανση,

$$\begin{aligned}\sigma_a^2 = E\left[A_{ter}{}^2\right] - \mu_a^2 &= E\left[\int_0^{L_{ter}^{eff}} k\, R(z)^a \,\mathrm{d}z \int_0^{L_{ter}^{eff}} k\, R(z')^a \,\mathrm{d}z'\right] = \\ &= \int_0^{L_{ter}^{eff}}\int_0^{L_{ter}^{eff}} k^2\, E\left[R(z)^a\, R(z')^a\right] \mathrm{d}z\, \mathrm{d}z' - \mu_a^2\end{aligned} \tag{3.25}$$

Για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης σ_a, απαραίτητος είναι ο ορισμός του σημειακού συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των $[R(z)]^a$ και $[R(z')]^a$, δηλαδή του συντελεστή συσχέτισης της ειδικής απόσβεσης βροχής ρ_0,

$$\rho_0\left(|z - z'|\right) = \frac{E\left[(R(z))^a (R(z'))^a\right] - E^2\left[R^a\right]}{E\left[\left(R^a\right)^2\right] - E^2\left[R^a\right]} \tag{3.26}$$

Με βάση τις (3.24)-(3.26) η έκφραση για τη διακύμανση σ_a^2 γίνεται,

$$\sigma_a^2 = k^2 \left\{E\left[R^{2a}\right] - E^2\left[R^a\right]\right\} \int_0^{L_{ter}^{eff}}\int_0^{L_{ter}^{eff}} \rho_0\left(|z - z'|\right) \mathrm{d}z\, \mathrm{d}z' \tag{3.27}$$

Κάνοντας χρήση της σχέσης (Α.2) του Παραρτήματος Α για $n = a$ και $n = 2a$, προκύπτει,

$$E\left[R^a\right] = \exp\left(a\, R_m + \frac{a^2\, S_r{}^2}{2}\right) \tag{3.28}$$

$$E\left[R^{2a}\right] = \exp\left(2\, a\, R_m + 2\, a^2 S_r{}^2\right) \tag{3.29}$$

Αντικατάσταση των (3.28), (3.29) στις (3.24), (3.27) αντιστοίχως συνεπάγεται,

$$\mu_a = k \exp\left(a\, R_m + \frac{a^2\, S_r{}^2}{2}\right) L_{ter}^{eff} \tag{3.30}$$

$$\sigma_a^2 = k^2 \exp\left(2\, a\, R_m + a^2 S_r{}^2\right)\left[\exp\left(a^2\, S_r{}^2\right) - 1\right] \int_0^{L_{ter}^{eff}}\int_0^{L_{ter}^{eff}} \rho_0\left(|z - z'|\right) dz\, dz' \tag{3.31}$$

Είναι φανερό ότι για τον υπολογισμό της σ_a^2 είναι απαραίτητη η έκφραση του σημειακού συντελεστή αυτοσυσχέτισης της ειδικής απόσβεσης βροχής ρ_0. Μια ημιεμπειρική έκφραση που προσεγγίζει ικανοποιητικά τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα σε περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής έχει προταθεί από τον Lin [24].

$$\rho_0\left(\Delta z = \left|z - z'\right|\right) = \begin{cases} \dfrac{G}{\sqrt{G^2 + \Delta z^2}}, & \Delta z \le D_r \\ \dfrac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^{\,2}}}, & \Delta z > D_r \end{cases} \tag{3.32}$$

Ο συντελεστής παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η σταθερά G (km) εκφράζει την απόσταση στην οποία ισχύει $\rho_0 = 1/\sqrt{2}$ και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος lat και την εποχή. Συνήθως χρησιμοποιούμε τις εξής τυπικές τιμές,

$$G = \begin{cases} 1, & \left|lat\right| \le 23^\circ \\ 1.5, & 23^\circ < \left|lat\right| \le 50^\circ \\ 1.75, & \left|lat\right| > 50^\circ \end{cases} \tag{3.33}$$

Τέλος, η παράμετρος D_r αντιστοιχεί στη μέγιστη διάσταση του βροχοπυρήνα που κυμαίνεται μεταξύ 20 και 35km, σύμφωνα με τη σχέση,

$$D_r = 20\,G \tag{3.34}$$

Το διπλό ολοκλήρωμα

$$H_1 = \int_0^{L_{ter}^{eff}} \int_0^{L_{ter}^{eff}} \rho_0\left(|\,z - z'\,|\right) \mathrm{d}z\,\mathrm{d}z' \tag{3.35}$$

της σχέσης (3.31) μπορεί πλέον να υπολογιστεί αναλυτικά ως εξής, σύμφωνα με το Παράρτημα Γ.

$$H_1 = \begin{cases} 2\,L_{ter}^{eff}\,G \sinh^{-1}\left(\dfrac{L_{ter}^{eff}}{G}\right) + 2\,G^2\left(1 - \sqrt{\left(\dfrac{L_{ter}^{eff}}{G}\right)^2 + 1}\right), & L_{ter}^{eff} \le D_r \\ 2\,L_{ter}^{eff}\,G \sinh^{-1}\left(\dfrac{D_r}{G}\right) + 2\,G^2\left(1 - \sqrt{\left(\dfrac{D_r}{G}\right)^2 + 1}\right) + \dfrac{G\left(L_{ter}^{eff} - D_r\right)^2}{\sqrt{G^2 + D_r^{\,2}}}, & L_{ter}^{eff} > D_r \end{cases} \tag{3.36}$$

Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατός ο υπολογισμός των στατιστικών παραμέτρων A_m και S_a της κατανομής της απόσβεσης A_{ter}, σύμφωνα με τις σχέσεις (Α.3), (Α.4) του Παραρτήματος Α.

$$S_a = \sqrt{\ln\left\{1 + \frac{H_1}{L_{ter}^{eff\,2}}\left[\exp\left(a^2\,S_r^{\,2}\right) - 1\right]\right\}} \tag{3.37}$$

$$A_m = k\, R_m{}^{a}\, L_{ter}^{eff} \exp\left(\frac{a^2 S_r{}^2 - S_a{}^2}{2} \right) \tag{3.38}$$

Η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης x_{ter} στην επίγεια προβολή του ενεργού μήκους ζεύξης προκύπτει τότε ολοκληρώνοντας τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας από x_{ter} έως $+\infty$. Η τελευταία δε εκφράζει ταυτόχρονα και την πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης $x_{sl} = x_{ter} / \cos\vartheta$ κατά μήκους του κεκλιμένου ραδιοδρόμου L_{sl}^{eff}.

$$\Pr\left[A_{sl} \geq x_{sl}\right] = \Pr\left[A_{ter} \geq x_{ter}\right] = \int_{x_{ter}}^{+\infty} f_{A_{ter}}(x)\, dx = \frac{1}{2}\, erfc\left(\frac{\ln x_{ter} - \ln A_m}{\sqrt{2}\, S_a} \right) \tag{3.39}$$

Αν επιπλέον ορίσουμε την ανηγμένη κανονική τυχαία μεταβλητή

$$U = \frac{\ln A_{ter} - \ln A_m}{S_a} \tag{3.40}$$

η κατανομή υπέρβασης παίρνει τη μορφή,

$$\Pr\left[A_{sl} \geq x_{sl}\right] = \Pr\left[A_{ter} \geq x_{ter}\right] = \frac{1}{2}\, erfc\left(\frac{u}{\sqrt{2}} \right), \text{ όπου } u = \frac{\ln x_{ter} - \ln A_m}{S_a} \tag{3.41}$$

3.3.5.2 Μοντελο Γαμμα Κατανομης

Αν τώρα θεωρηθεί το μοντέλο της κατανομής Γάμμα σύμφωνα με τους Morita-Higutti [25] για τροπικές και υποτροπικές περιοχές, η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τ.μ. του ρυθμού βροχόπτωσης R δίνεται από την (3.6). Η αντίστοιχη συνάρτηση για την τ.μ. της απόσβεσης βροχής A_{ter} είναι,

$$f_{A_{ter}}(x) = \frac{\beta_A^{\upsilon_A}}{\Gamma(\upsilon_A)}\, x^{\upsilon_A - 1}\, e^{-\beta_A x} \tag{3.42}$$

Η διαδικασία για τον υπολογισμό των παραμέτρων υ_A και β_A είναι ανάλογη με εκείνη που ακολουθήθηκε στο λογαριθμοκανονικό μοντέλο, υιοθετώντας όμως μια διαφορετική έκφραση για τον σημειακό συντελεστή συσχέτισης της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής [25].

$$\rho_0\left(\Delta z = |z - z'|\right) = \exp\left(-c\sqrt{\Delta z}\right) \tag{3.43}$$

Η σταθερά c κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 0.3km$^{-1/2}$. Το αντίστοιχο διπλό ολοκλήρωμα $H_1 = \int_0^{L_{ter}^{eff}} \int_0^{L_{ter}^{eff}} \rho_0(|z - z'|)\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}z'$ προκύπτει με αναλυτικό υπολογισμό, σύμφωνα με το Παράρτημα Γ.

$$H_1 = 4\,\frac{c^2\,L_{ter}^{eff} - 6 + 2\left(3 + 3\,c\,\sqrt{L_{ter}^{eff}} + c^2\,L_{ter}^{eff}\right)\exp\left(-c\,\sqrt{L_{ter}^{eff}}\right)}{c^4} \tag{3.44}$$

Έχοντας διαθέσιμο τον παράγοντα H_1 μπορεί κανείς να υπολογίσει τη μέση τιμή μ_a και την τυπική απόκλιση σ_a της απόσβεσης A_{ter} από τις (3.24), (3.27). Σύμφωνα με τη σχέση (B.3) του Παραρτήματος Β για $n = a$ και $n = 2\,a$ προκύπτει,

$$E\left[R^a\right] = \frac{\Gamma(\upsilon_R + a)}{\beta_R^{\,a}\,\Gamma(\upsilon_R)} \tag{3.45}$$

$$E\left[R^{2\,a}\right] = \frac{\Gamma(\upsilon_R + 2\,a)}{\beta_R^{\,2\,a}\,\Gamma(\upsilon_R)} \tag{3.46}$$

όπου υ_R και β_R είναι οι αντίστοιχες παράμετροι του ρυθμού βροχόπτωσης. Τελικά έχουμε,

$$\mu_a = k\,\frac{\Gamma(\upsilon_R + a)}{\beta_R^{\,a}\,\Gamma(\upsilon_R)}\,L_{ter}^{eff} \tag{3.47}$$

$$\sigma_a^{\,2} = \frac{k^2\,H_1}{\beta_R^{\,2\,a}\,\Gamma(\upsilon_R)}\left[\Gamma(\upsilon_R)\Gamma(\upsilon_R + 2\,a) - \Gamma^2(\upsilon_R + 2\,a)\right] \tag{3.48}$$

και οι στατιστικές παράμετροι υ_A και β_A προκύπτουν,

$$\upsilon_A = \frac{L_{ter}^{eff\,2}\,\Gamma^2(\upsilon_R + a)}{H_1\left[\Gamma(\upsilon_R)\Gamma(\upsilon_R + 2\,a) - \Gamma^2(\upsilon_R + a)\right]} \tag{3.49}$$

$$\beta_A = \frac{\beta_R^{\,a}\,L_{ter}^{eff}\,\Gamma(\upsilon_R)\Gamma(\upsilon_R + a)}{k\,H_1\left[\Gamma(\upsilon_R)\Gamma(\upsilon_R + 2\,a) - \Gamma^2(\upsilon_R + a)\right]} \tag{3.50}$$

Εν τέλει, η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης υπολογίζεται με βάση τον τύπο (B.7) του Παραρτήματος Β.

$$\Pr\left[A_{sl} \geq x_{sl}\right] = \Pr\left[A_{ter} \geq x_{ter}\right] = 1 - \frac{\gamma(\upsilon_a, \beta_A\,x_{ter})}{\Gamma(\upsilon_a)} \tag{3.51}$$

3.4 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΕΡΙΑ

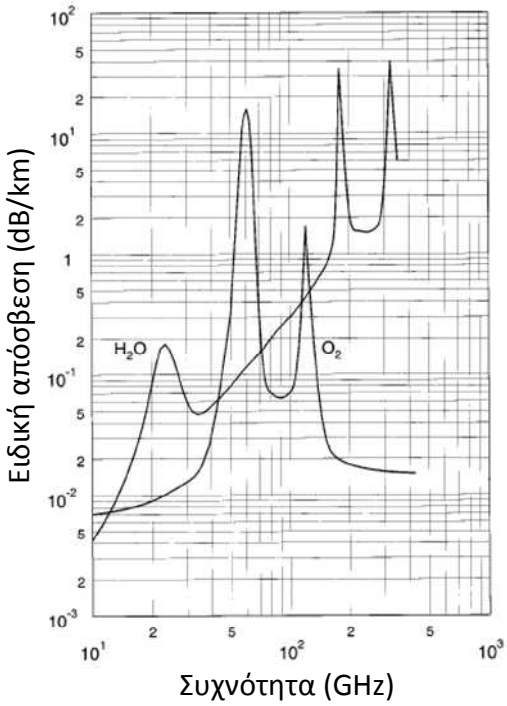
Πέρα από τη βροχή, ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας εξασθένησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κυρίως σε συχνότητες που ξεπερνούν τα 20GHz είναι η απορρόφηση από τα ατμοσφαιρικά αέρια. Πιο συγκεκριμένα, τα μόρια του οξυγόνου O_2, των υδρατμών H_2O και των αιωρούμενων υδροσταγονιδίων (hydrosols) θεωρούνται κυρίαρχη αιτία απορρόφησης κατά τη διάδοση διαμέσου της ατμόσφαιρας. Η ένταση της ατμοσφαιρικής απορρόφησης εξαρτάται μεταξύ άλλων από τις συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας, υγρασίας και πυκνότητας του αέρα που επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος [33].

Αναλυτικότερα, το μόριο του νερού παρουσιάζει μη μηδενική ηλεκτρική διπολική ροπή και το μόριο του οξυγόνου αντίστοιχη μαγνητική διπολική ροπή. Όταν αλληλεπιδρούν με ραδιοκύματα ορισμένων συχνοτήτων οι παραπάνω ροπές προκαλούν εξαναγκασμένες περιστροφές των μορίων που οδηγούν σε απώλεια μέρους της ενέργειας του διαδιδόμενου πεδίου. Η απορρόφηση μεγιστοποιείται στις συχνότητες συντονισμού των αερίων. Σε μεγάλα υψόμετρα, όπου η ατμοσφαιρική πίεση είναι χαμηλή, η απώλεια ενέργειας περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή γύρω από τις συχνότητες συντονισμού. Τα μέγιστα του συντονισμού δεν είναι πολύ απότομα και το εύρος τους είναι μικρό εξαιτίας των φαινομένων Doppler που γεννά η μοριακή κίνηση. Αντιθέτως, σε χαμηλά υψόμετρα που χαρακτηρίζονται από υψηλή ατμοσφαιρική πίεση, η εξασθένηση είναι αυξημένη λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας του αέρα και οι περιοχές συντονισμού διευρύνονται λόγω των συχνών συγκρούσεων μεταξύ των μορίων.

Οι υδρατμοί εμφανίζουν 30 μέγιστα απορρόφησης μέχρι τα 1000GHz από φαινόμενα μοριακού συντονισμού. Τα πρώτα 3 πιο σημαντικά από αυτά βρίσκονται στα 22, 183 και 323GHz. Στο Σχήμα 3.2 φαίνεται η ειδική απόσβεση σε μηδενικό υψόμετρο, θεωρώντας ατμοσφαιρική πίεση 1atm (=1013.6mb), θερμοκρασία 20°C και πυκνότητα υδρατμών 7.5g/m^3 (που αντιστοιχεί σε 40% περίπου σχετική υγρασία). Η χρήση των παραπάνω συχνοτήτων πρέπει να αποφεύγεται κατά το σχεδιασμό των ραδιοζεύξεων, καθώς η εξασθένηση παρουσιάζει μεγάλη εξάρτηση από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας.

Από την άλλη μεριά, το μόριο του οξυγόνου συντονίζεται σε 48 διαφορετικές συχνότητες έως τα 1000GHz. Οι πιο σημαντικές από αυτές βρίσκονται στην περιοχή των 60GHz, όπου για χαμηλά υψόμετρα πολλά διακριτά τοπικά μέγιστα λόγω μοριακών συγκρούσεων ενώνονται σε μια συνεχή καμπύλη απόσβεσης. Μια επιπλέον μεμονωμένη

γραμμή απορρόφησης εμφανίζεται στα 119GHz, με μέγιστη τιμή σε μηδενικό υψόμετρο 1.7dB/km. Η ειδική απόσβεση του οξυγόνου στο Σχήμα 3.2 αντιστοιχεί όπως και πριν σε ατμοσφαιρική πίεση 1atm και θερμοκρασία 20°C. Η μέγιστη εξασθένηση φτάνει τα 15.5dB/km στα 60GHz, ενώ στην ίδια περιοχή συχνοτήτων η εξασθένηση από τους υδρατμούς μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα (περίπου 0.1dB/km).



Σχήμα 3.2: Ειδική απόσβεση (dB/km) λόγω απορρόφησης των αερίων στα χιλιοστομετρικά μήκη κύματος.

Ένα ευρέως αποδεκτό μοντέλο διάδοσης χιλιοστομετρικών κυμάτων που λαμβάνει υπόψη τους παραπάνω μηχανισμούς απόσβεσης είναι το χιλιοστομετρικό μοντέλο διάδοσης MPM (Millimeter-wave Propagation Model) που αναπτύχθηκε από τον Liebe [34]. Μέσω αυτού παρέχεται η δυνατότητα πρόβλεψης διαφόρων παραγόντων διάδοσης, όπως οι συντελεστές εξασθένησης και καθυστέρησης, κάνοντας χρήση μετεωρολογικών δεδομένων για συχνότητες μέχρι 1000GHz. Οι μεταβλητές που εμπλέκονται στο μοντέλο περιλαμβάνουν τη βαρομετρική πίεση P (kPa), την απόλυτη θερμοκρασία T (K), τη σχετική υγρασία RH (%) και τη συγκέντρωση των σταγονιδίων w (g/m^3). Η τελευταία λαμβάνεται ίση προς 0.001g/m^3 για νέφωση τύπου clusters, 0.01g/m^3 για ελαφριά ομίχλη (καταχνιά), 0.1g/m^3 για ομίχλη, 1g/m^3 για νέφη τύπου σωρείτη και 5g/m^3 για συνεκτικά σύννεφα. Άλλα μεγέθη που χρησιμοποιούνται είναι η αντίστροφη παράμετρος σχετικής θερμοκρασίας ϑ, η μερική πίεση των υδρατμών e (kPa) και η πίεση ξηρού αέρα p (kPa), που ορίζονται ως εξής.

$$\vartheta = \frac{300}{T} \tag{3.52}$$

$$e = \frac{RH\,\vartheta^5\,10^{10-9.834\,\vartheta}}{41.51} \tag{3.53}$$

$$p = P - e \tag{3.54}$$

Ο πυρήνας του μοντέλου είναι ο προσδιορισμός σε μακροσκοπικό επίπεδο της αλληλεπίδρασης μεταξύ ακτινοβολίας και απορροφητών, που εκφράζεται με τη βοήθεια του μιγαδικού δείκτη διάθλασης N (ppm ≡ 10^{-6} parts per million). Ο δείκτης διάθλασης αποτελείται από έναν όρο ανεξάρτητο της συχνότητας N_0 και επιπλέον όρους που αντιστοιχούν στη διασπορά $N'(f)$ και την απορρόφηση $N''(f)$.

$$N = N_0 + N'(f) + j\,N''(f) \tag{3.55}$$

Έτσι ορίζονται οι παράγοντες εξασθένησης α (dB/km), αλλαγής φάσης β (deg/km) και καθυστέρησης τ (psec/km), όπου f είναι η συχνότητα σε GHz.

$$\alpha = 0.1820\,f\,N''(f) \tag{3.56}$$

$$\beta = 1.2008\,f\left[N_0 + N'(f)\right] \tag{3.57}$$

$$\tau = 3.3356\left[N_0 + N'(f)\right] \tag{3.58}$$

Ο ανεξάρτητος όρος N_0, που εκφράζει τη διαθλαστικότητα του αέρα, υπολογίζεται μέσω της σχέσης,

$$N_0 = \left(2.588\,p + 2.39\,e\right)\vartheta + N_v \tag{3.59}$$

όπου N_v είναι η συνεισφορά από το φάσμα των υδρατμών.

$$N_v = 41.6\,e\,\vartheta^2 \tag{3.60}$$

Οι υπόλοιποι όροι εμπεριέχουν την πληροφορία για n_a=48 γραμμές συντονισμού του οξυγόνου και n_b=30 γραμμές συντονισμού των υδρατμών, καθώς και για το συνεχές φάσμα ξηρού αέρα N_p, υδρατμών N_e και αιωρούμενων υδροσταγονιδίων N_w. Στις σχέσεις (3.61) και (3.62), το S (kHz) συμβολίζει την ισχύ των γραμμών, ενώ τα F' και F'' (GHz^{-1}) το πραγματικό και φανταστικό μέρος της συνάρτησης του σχήματος των γραμμών.

$$N''(f) = \sum_{i=1}^{n_a}\left(S\,F''\right)_i + N_p'' + \sum_{i=1}^{n_b}\left(S\,F''\right)_i + N_e'' + N_w'' \tag{3.61}$$

$$N'(f)=\sum_{i=1}^{n_a}(S\,F')_i+N_p{}'+\sum_{i=1}^{n_b}(S\,F')_i+N_e{}'+N_w{}' \tag{3.62}$$

Οι συναρτήσεις σχήματος γραμμών προσεγγίζονται με τη βοήθεια της τροποποιημένης συνάρτησης Van Vleck-Weisskopf ως εξής,

$$F''(f)=\left(\frac{1}{X}+\frac{1}{Y}\right)\frac{\gamma\,f}{v_0}-\delta\left(\frac{v_0-f}{X}+\frac{v_0+f}{Y}\right)\frac{f}{v_0} \tag{3.63}$$

$$F'(f)=\frac{Z-f}{X}+\frac{Z+f}{Y}-\frac{2}{v_0}+\delta\left(\frac{1}{X}-\frac{1}{Y}\right)\frac{\gamma\,f}{v_0} \tag{3.64}$$

όπου

$$X=(v_0-f)^2+\gamma^2 \qquad (\mathrm{GHz}^2) \tag{3.65}$$

$$Y=(v_0+f)^2+\gamma^2 \qquad (\mathrm{GHz}^2) \tag{3.66}$$

$$Z=\frac{v_0{}^2+\gamma^2}{v_0} \qquad (\mathrm{GHz}) \tag{3.67}$$

Επιπλέον, v_0 (GHz) είναι οι κεντρικές συχνότητες των γραμμών συντονισμού. Οι όροι ισχύος S (kHz), εύρους γ (GHz) και διόρθωσης δ υπολογίζονται για τις γραμμές οξυγόνου και υδρατμών σύμφωνα με τα παρακάτω, όπου οι φασματοσκοπικοί συντελεστές a_1 έως a_6 και b_1 έως b_3 παίρνονται από αντίστοιχους πίνακες [34].

$$\left.\begin{aligned} S_{O_2}&=a_1\;p\,\vartheta^3\;\exp[a_2\,(1-\vartheta)]\\ S_{H_2O}&=b_1\;e\,\vartheta^{3.5}\;\exp[b_2\,(1-\vartheta)]\end{aligned}\right\} \tag{3.68}$$

$$\left.\begin{aligned} \gamma_{O_2}&=a_3\left(p\,\vartheta^{0.8-a_4}+1.1\,e\,\vartheta\right)\\ \gamma_{H_2O}&=b_3\left(p\,\vartheta^{0.8}+4.80\,e\,\vartheta\right)\end{aligned}\right\} \tag{3.69}$$

$$\left.\begin{aligned} \delta_{O_2}&=a_5\;p\,\vartheta^{a_6}\\ \delta_{H_2O}&=0\end{aligned}\right\} \tag{3.70}$$

Το συνεχές φάσμα ξηρού αέρα και υδρατμών είναι απαραίτητο να προστεθεί στις γραμμές συντονισμού O_2 και H_2O για να προβλεφθεί σωστά η ατμοσφαιρική εξασθένηση των χιλιοστομετρικών κυμάτων ιδίως στις περιοχές των “παραθύρων” ανάμεσα στις γραμμές. Η προκαλούμενη απορρόφηση αυξάνει μονοτονικά με τη συχνότητα. Ειδικότερα για τον ξηρό αέρα έχουμε,

$$N_p''(f) = \left(\frac{2\,a_0}{\gamma_0 \left[1 + \left(\frac{f}{\gamma_0} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{f}{60} \right)^2 \right]} + a_p\, p\, \vartheta^{2.5} \right) f\, p\, \vartheta^2 \tag{3.71}$$

$$N_p'(f) = a_0 \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{\gamma_0} \right)^2} - 1 \right] p\, \vartheta^2 \tag{3.72}$$

όπου

$$\gamma_0 = 5.6 \cdot 10^{-3} \left(p + 1.1\, e \right) \vartheta^{0.8} \tag{3.73}$$

$$a_0 = 3.07 \cdot 10^{-4} \tag{3.74}$$

$$a_p \cong 1.40 \left(1 - 1.2 \cdot 10^{-5}\, f^{1.5} \right) 10^{-10} \tag{3.75}$$

Για τους υδρατμούς το συνεχές φάσμα λαμβάνεται ως,

$$N_e''(f) = \left(b_f\, p + b_e\, e\, \vartheta^3 \right) f\, e\, \vartheta^{2.5} \tag{3.76}$$

$$N_e'(f) \cong b_0\, f^{2.05}\, e\, \vartheta^{2.4} \tag{3.77}$$

όπου

$$b_f = 1.40 \cdot 10^{-6} \tag{3.78}$$

$$b_e = 5.41 \cdot 10^{-5} \tag{3.79}$$

$$b_0 = 6.47 \cdot 10^{-6} \tag{3.80}$$

Τέλος, τα αιωρούμενα υδροσταγονίδια στην ομίχλη και τα σύννεφα συνεισφέρουν στην απορρόφηση της ακτινοβολίας. Εφόσον οι ακτίνες τους δεν ξεπερνούν τα 50μm, η προσέγγιση Rayleigh της θεωρίας σκέδασης του Mie είναι εφαρμόσιμη στον υπολογισμό της διαθλαστικότητας N_w'' και N_w',

$$N_w''(f) = \frac{4.50\, w}{\varepsilon''} \left(1 + \eta^2 \right) \tag{3.81}$$

$$N_w'(f) \cong 2.4 \cdot 10^{-3}\, w\, \varepsilon' \tag{3.82}$$

όπου

$$\eta = \frac{2+\varepsilon'}{\varepsilon''} \tag{3.83}$$

$$\varepsilon'' = \frac{\left(185 - \frac{113}{\vartheta}\right) f\,\tau}{1+\left(f\,\tau\right)^2} \tag{3.84}$$

$$\varepsilon' = 4.9 + \frac{185 - \frac{113}{\vartheta}}{1+\left(f\,\tau\right)^2} \tag{3.85}$$

$$\tau = 4.17\times 10^{-5}\ \vartheta\ \exp\left(7.13\,\vartheta\right) \tag{3.86}$$

Τα ε'' και ε' αντιστοιχούν στο φανταστικό και πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς του νερού.

Έτσι, σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης χιλιοστομετρικών κυμάτων MPM [34], η συσσωρευτική ατμοσφαιρική εξασθένηση A (dB) κατά μήκος μιας ζεύξης μήκους L (km) υπολογίζεται μέσω του παράγοντα εξασθένησης α (dB/km).

$$A = \int_0^L \alpha(x)\,dx \tag{3.87}$$

Παρομοίως, από τον παράγοντα καθυστέρησης τ (psec/km) προκύπτει η συσσωρευτική καθυστέρηση T (psec) της διαδρομής.

$$T = \int_0^L \tau(x)\,dx \tag{3.88}$$

3.5 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΆΜΒΛΥΝΣΗΣ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι οι διαλείψεις συνιστούν σημαντικό πρόβλημα υποβάθμισης της ποιότητας μιας ζεύξης. Καθώς μάλιστα ο αποδεκτός χρόνος αποκοπής (outage time) των σύγχρονων επικοινωνιών γίνεται όλο και πιο μικρός, γεννιέται η ανάγκη για συστήματα με μεγάλα περιθώρια διαλείψεων. Επειδή το κόστος τέτοιων συστημάτων είναι συχνά απαγορευτικό, η αύξηση της διαθεσιμότητας και της ποιότητας των ζεύξεων επιτυγχάνεται στην πράξη με την εφαρμογή αντιμέτρων κατά των διαλείψεων, γνωστές και ως τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων (fade mitigation techniques, FMTs). Η πλειονότητα των τεχνικών που περιγράφονται στη συνέχεια, έχουν αναπτυχθεί για

δορυφορικά δίκτυα της Ka και Ku μπάντας, είναι όμως επεκτάσιμες σε επίγεια και στρατοσφαιρικά δίκτυα λαμβάνοντας υπόψη την εκάστοτε διαφοροποιημένη γεωμετρία του συστήματος [35]. Διακρίνονται εν γένει τρεις κατηγορίες: οι τεχνικές που βασίζονται στον έλεγχο της ενεργού ισοτροπικά ακτινοβολούμενης ισχύος (effective isotropic radiated power, EIRP, control), οι τεχνικές προσαρμογής των παραμέτρων μετάδοσης (adaptive transmission), και οι τεχνικές διαφορικής λήψης (diversity reception) [36].

3.5.1 Έλεγχος Ενεργου Ισοτροπικα Ακτινοβολουμενης Ισχυος

Η τεχνική ελέγχου της ισχύος EIRP συνίσταται στην κατάλληλη προσαρμογή της ισχύος του εκπεμπόμενου σήματος ώστε να αντισταθμίζονται οι απώλειες διάδοσης. Ο αυτόματος έλεγχος ισχύος άνω ζεύξης (automatic uplink power control, AUPC) αναφέρεται στη ρύθμιση της ισχύος εκπομπής από τον επίγειο σταθμό προς τη στρατοσφαιρική πλατφόρμα ή το δορυφόρο. Αντίστοιχα ο αυτόματος έλεγχος ισχύος κάτω ζεύξης (automatic downlink power control, ADPC) αναφέρεται στην εναέρια βαθμίδα εκπομπής και υποστηρίζει το σήμα προς τον επίγειο δέκτη. Ένα πιθανό πρόβλημα που μπορεί να προκύψει από την αύξηση ισχύος άνω ζεύξης είναι η παρεμβολή γειτονικού διαύλου, είτε προς εναέριους σταθμούς που λειτουργούν σε γειτονικές συχνότητες, είτε προς επίγεια μικροκυματικά συστήματα μέσω των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας του επίγειου σταθμού εκπομπής.

Στα σχήματα ανοιχτού βρόχου (open loop schemes) είναι απαραίτητη κάποια εκτίμηση της απόσβεσης, με χρήση ενός σήματος φάρου που αποστέλλεται από τον δέκτη στον πομπό, καθώς οι αποσβέσεις άνω και κάτω ζεύξης θεωρούνται συσχετισμένες. Από την άλλη, στα σχήματα κλειστού βρόχου (closed loop schemes) η απόφαση τροποποίησης της ισχύος βασίζεται στη σύγκριση του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη με ένα δεδομένο κατώφλι και στην αποστολή της ανάλογης εντολής στον πομπό.

Εναλλακτικά είναι δυνατό να μην τροποποιείται η ισχύς του σήματος αλλά το κέρδος της κεραίας εκπομπής στο δορυφόρο, γεγονός που προϋποθέτει τη χρήση ευφυών κεραιών. Η τελευταία μέθοδος παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται εκτίμηση της απόσβεσης, αλλά μόνο μια μικρής διάρκειας πρόβλεψη καιρού που επιτυγχάνεται μέσω δορυφορικών εικόνων [37].

3.5.2 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΙΜΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

Η προσαρμογή των παραμέτρων μετάδοσης του σήματος περιλαμβάνει μετατροπές στη διαμόρφωση, την κωδικοποίηση και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων προκειμένου να αντιμετωπισθούν οι δυσμενείς επιδράσεις των ατμοσφαιρικών φαινομένων. Η τεχνική αυτή εφαρμόζει συνήθως σχήματα με μικρές απαιτήσεις εύρους ζώνης σε συνθήκες καθαρού ουρανού και σχήματα με μικρές απαιτήσεις ισχύος υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες [38].

Τα **συστήματα προσαρμοστικής διαμόρφωσης (adaptive modulation systems)** στηρίζονται στην εφαρμογή διαφορετικού σχήματος ψηφιακής διαμόρφωσης κατά τη διάρκεια γεγονότων διάλειψης, ώστε να εξασφαλίζεται η επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας. Στα δορυφορικά λόγου χάρη συστήματα, η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη διαμόρφωση είναι η ψηφιακή διαμόρφωση φάσης PSK (phase sift keying). Σχήματα μεγάλης τάξης όπως 8-PSK, 16-PSK ή 64-PSK χρησιμοποιούνται υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, προκειμένου να αυξηθεί η αποδοτικότητα του διαθέσιμου φάσματος. Καθώς αυτά τα σχήματα είναι πιο επιρρεπή στα σφάλματα, η μετάβαση σε QPSK ή BPSK διαμόρφωση όταν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι άσχημες εξασφαλίζει τη βελτίωση του λαμβανόμενου σηματοθορυβικού λόγου.

Τα **συστήματα προσαρμοστικής κωδικοποίησης (adaptive coding systems)** χρησιμοποιούν τεχνικές ανίχνευσης και διόρθωσης λαθών προκειμένου να ελαττώσουν την πιθανότητας λήψης εσφαλμένου ψηφίου (Bit Error Probability, BEP), που επιδεινώνεται με την ισχυρή βροχόπτωση. Το τίμημα για βελτίωση της πιθανότητας λάθους είναι το μεγαλύτερο εύρος ζώνης που απαιτείται για την έλευση πλεονάζουσας πληροφορίας κωδικοποίησης από τον πομπό στον δέκτη. Στην κατηγορία αυτή ανήκει η πρόσθια διόρθωση λαθών (Forward Error Correction, FEC), ένας αλγόριθμος ανοιχτού βρόχου που αποκωδικοποιεί πληροφορία στον δέκτη χωρίς να λαμβάνει καθόλου ανάδραση από τον πομπό. Μερικά δημοφιλή σχήματα προσαρμοστικής κωδικοποίησης είναι οι συνελικτικοί κώδικες RCPC (Rate Compatible Punctured Convolutional codes), με ή χωρίς αλυσιδωτή (concatenated) κωδικοποίηση Reed-Solomon (RS), οι συνελικτικοί turbo κώδικες και οι block turbo κώδικες.

Τα **συστήματα μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (variable transmission rate systems)** είναι ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης των ατμοσφαιρικών αποσβέσεων. Στα εν λόγω συστήματα ένας κατάλληλος αλγόριθμος ελέγχου χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του σήματος, την πρόβλεψη της ποιότητάς του και την επιλογή του κατάλληλου σχήματος μετάδοσης. Όταν υπάρχει πρόβλεψη για βαθιές διαλείψεις, ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας ελαττώνεται κατά ένα παράγοντα 2, 4 ή 8. Πιο συγκεκριμένα η ροή

πληροφορίας βασικής ζώνης κωδικοποιείται με ένα ψευδοτυχαίο κώδικα θορύβου (pseudorandom noise, PN, code) σταθερού ρυθμού ρολογιού, και μετέπειτα διαμορφώνεται κατά PSK. Ο ρυθμός λανθασμένων ψηφίων (Bit Error Rate, BER) διατηρείται σχεδόν στατικός, ενώ ο ρυθμός μετάδοσης αλλάζει καθώς μεταβάλλεται ο λόγος του ρυθμού δεδομένων και του ρυθμού ρολογιού του κώδικα PN. Στον δέκτη, το σήμα αποδιαμορφώνεται και αποκωδικοποιείται κατάλληλα.

3.5.3 ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Η διαφορική προστασία αποτελεί ίσως τον πιο αποτελεσματικό τρόπο μετριασμού των επιπτώσεων από τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και ιδιαίτερα τη βροχή. Υπονοεί τη λήψη του μεταδιδόμενου σήματος μέσω εναλλακτικών διαδρομών, που δεν έχουν επηρεαστεί σημαντικά από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, είτε αυτές οι διαδρομές αναφέρονται σε διαφορετική τοποθεσία λήψης, είτε σε διαφορετικό χρόνο μετάδοσης, είτε σε διαφορετική συχνότητα μετάδοσης. Η αρχή πίσω από την τεχνική της διαφορικής προστασίας είναι ότι τα καιρικά φαινόμενα και οι αντίστοιχες αποσβέσεις τείνουν να είναι λιγότερο συσχετισμένα όσο η χωρική, χρονική ή φασματική απόστασή τους μεγαλώνει [39].

Η **διαφορική λήψη χρόνου (time diversity)** στηρίζεται στην επαναλαμβανόμενη μετάδοση των σημάτων όταν η επίδοση του καναλιού πέφτει κάτω από ένα δεδομένο κατώφλι, εξαιτίας των καιρικών συνθηκών. Εφαρμόζεται μόνο σε υπηρεσίες που ανέχονται χρονική καθυστέρηση (π.χ. βίντεο ή δεδομένα), αλλά όχι σε υπηρεσίες φωνής. Η τεχνική αυτή έχει σημαντική εξάρτηση από τη διάρκεια των βροχοπτώσεων και χρειάζεται να αναθέσει επιπλέον χρονικούς πόρους στα υπό διάλειψη φέροντα ώστε να αυξηθεί η διαθεσιμότητα του δικτύου.

Η **διαφορική λήψη συχνότητας (frequency diversity)** κάνει χρήση εναλλακτικών χαμηλότερων ζωνών συχνοτήτων για τη μετάδοση των σημάτων υπό συνθήκες βροχής. Μια προϋπόθεση για αυτή την ολίσθηση συχνότητας είναι η διαθεσιμότητα εφεδρικών καναλιών σε δύο λειτουργικές συχνότητες (π.χ. 48GHz και 2GHz για τα στρατοσφαιρικά δίκτυα). Ένα άλλο μειονέκτημα είναι το περιορισμένο εύρος ζώνης στις χαμηλότερες μπάντες, που είναι απαγορευτικό για κάποιες υπηρεσίες (π.χ. υπηρεσίες πολυμέσων).

Η **διαφορική λήψη θέσης (site diversity)** βασίζεται στην ύπαρξη ενός (διπλή διαφορική προστασία) ή περισσότερων (πολλαπλή διαφορική προστασία) εναλλακτικών επίγειων σταθμών που βρίσκονται απομακρυσμένοι από τον κύριο σταθμό. Καθώς η βροχή εμφανίζεται χωρικά ανομοιογενής μέσα στην ακτίνα του βροχοπυρήνα, αν σε δεδομένη

στιγμή η προς τα κάτω ζεύξη από τον δορυφόρο ή τη στρατοσφαιρική πλατφόρμα προς τον κύριο σταθμό λήψης υποβιβάζεται σημαντικά από έντονη βροχόπτωση, είναι αρκετά απίθανο μια ζεύξη προς έναν εναλλακτικό δέκτη λίγα χιλιόμετρα μακριά να υποφέρει από το ίδιο ποσό εξασθένησης [40]. Έτσι χρησιμοποιείται κατάλληλος αλγόριθμος είτε για την επιλογή της διαδρομής με τον υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο, είτε για τη δημιουργία συνδυασμού από όλα τα ληφθέντα σήματα των διαφορετικών διαδρομών, ώστε να αναπαραχθεί επιτυχώς η επιθυμητή πληροφορία. Συνήθη κριτήρια για τον υπολογισμό του τελικού σήματος είναι,

(α) ο συνδυασμός επιλογής (selection combining): επιλογή του λαμβανόμενου σήματος με τον υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο,

(β) ο συνδυασμός μεταγωγής (switched combining): μεταγωγή στη ζεύξη με τον εναλλακτικό σταθμό όταν ο σηματοθορυβικός λόγος της ζεύξης αναφοράς είναι μικρότερος από ένα προκαθορισμένο κατώφλι,

(γ) συνδυασμός ίσου κέρδους (equal gain combining): τα λαμβανόμενα σήματα αθροίζονται κατά σύμφωνο τρόπο,

(δ) συνδυασμός μεγίστου λόγου (maximal ratio combining): πριν αθροιστούν καθένα από τα λαμβανόμενα σήματα πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο συντελεστή βάρους ανάλογα με το σηματοθορυβικό του λόγο.

Το σχήμα αυτό της διαφορικής προστασίας προϋποθέτει την επίγεια διασύνδεση του κύριου και των εναλλακτικών σημείων λήψης (είτε ενσύρματα, είτε ασύρματα σε χαμηλή συχνότητα που δεν επηρεάζεται από τη βροχή) και παρουσιάζει το μειονέκτημα αυξημένης απώλειας ελευθέρου χώρου, όταν τα σήματα πρέπει να διανύσουν μεγαλύτερες εναλλακτικές διαδρομές [41]. Παρόλα αυτά παραμένει το πιο δημοφιλές και αποτελεσματικό αντίμετρο κατά των έντονων ατμοσφαιρικών διαλείψεων σε δορυφορικά και στρατοσφαιρικά δίκτυα επικοινωνιών.

Τέλος, η **διαφορική λήψη τροχιάς (orbital diversity)** αναφέρεται στη δυνατότητα επιλογής ενός δορυφορικού επίγειου σταθμού μεταξύ δύο ή περισσότερων διαφορετικών δορυφόρων, κατά τρόπο αντίστοιχο με τη διαφορική λήψη θέσης. Η χρήση εναλλακτικών δορυφόρων που θεωρούνται ήδη σε τροχιά καθιστά τη μέθοδο πιο οικονομική, καθώς δεν απαιτείται η εγκατάσταση επιπλέον επίγειων σταθμών. Εν τούτοις η αποτελεσματικότητά της περιορίζεται από τη μεγαλύτερη συσχέτιση των διαλείψεων κατά μήκος των εναλλακτικών ραδιοδρόμων, καθώς η γωνιακή απόσταση των δορυφόρων είναι συνήθως μικρή εξαιτίας του παρατηρούμενου κορεσμού των δορυφορικών τροχιών.

3.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

[1] R.K.Crane, "Electromagnetic Wave Propagation through Rain," New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.

[2] H.R.Anderson, "Fixed Broadband Wireless System Design," John Wiley & Sons Ltd., ISBN 0-470-84438-8, 2003.

[3] B.Gremont, M.Filip, P.Galois, and S.Bate, "Comparative analysis and performance of two predictive fade detection schemes for Ka-Band countermeasures," IEEE J. Select. Areas Commun., vol.17, no.2, February 1999.

[4] Recommendation ITU-R P.676-8, "Attenuation by atmospheric gases," (10/2009).

[5] Recommendation ITU-R P.840-4, "Attenuation due to clouds and fog," (10/2009).

[6] J.E.Allnutt, A.Dissanayake, and F.Haidara, "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths," IEEE Trans. Antennas and Prop., vol.AP-45, pp.1546-1558, 1997.

[7] Recommendation ITU-R P.618-10, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," (10/2009).

[8] T.J.Mousley, and E.Vilar, "Experimental and theoretical statistics of microwave amplitude scintillations on satellite down-links," IEEE Trans. Antenn. Propagat., vol.30, no.6, pp.1099-1106, June 1982.

[9] J.D.Kanellopoulos, and R.H.Clarke, "A study of the joint statistics of rain depolarization and attenuation applied to the prediction of radio link performance," Radio Sci., vol.16, no.2, pp.203-211, Feb. 1981.

[10] J.D.Kanellopoulos, and R.H.Clarke, "Prediction of cross-polarization discrimination statistics for propagation through spatially non uniform rain," Radio Sci., vol.16, no.2, pp.197-201, Feb.1981.

[11] Recommendation ITU-R P.530-13, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," (10/2009).

[12] H.R.Pruppacher, and R.L.Pitter, "A semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops," *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol.28, pp.86-94, June 1971.

[13] H.R.Pruppacher, and K.Beard, "A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air," Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96, pp.247-256, 1970.

[14] R.Gunn, and G.D.Kinzer, "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air," Jour. Meteor., vol.6, no.4, pp.243-248, 1949.

[15] J.O.Laws, and D.A.Parsons, “The relation of raindrop-size intensity,” *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol.24, pp.452-460, 1943.

[16] J.S.Marshall, and W.McK.Palmer, “The distribution of raindrops with size,” *Jour. Meteorol.*, vol.5, pp.165-166, 1948.

[17] C.W.Ulbrich, “Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution,” Jour. Climate Appl. Meteor., vol.22, pp.1764-1775, 1983.

[18] G. Olalere Ajayi, and Roderic L. Olsen, “Modeling of a tropical raindrop size distribution for microwave and millimeter wave applications,” *Radio Science*, vol.20, no.2, pp.193-202, March 1985.

[19] R.L.Olsen, D.V.Rogers, and D.B.Hodge, “The aR^b relation in the calculation of rain attenuation,” *IEEE Trans. Ant. and Prop.*, AP-26, no.2, pp.318-329, 1978.

[20] S.A.J.Upton, B.G.Evans, and A.R.Holt, “Variations with model parameters of earth/space attenuation derived from radiometer and radar measurements,” presented at URSI Commission F Open Symposium on Effects of the Lower Atmosphere on Radio Frequencies above 10GHz, Lennoxville, Que, 1980.

[21] P.T.Thompson, A.W.Dissanayake, and P.A.Watson, “The frequency dependence of microwave propagation through rainfall,” AGARD Conf. Proc., 284, pp.5.1-5.9, 1980.

[22] W.L.Stutzman, and W.K.Dishman, “A simple model for the estimation of rain-induced attenuation along earth-space paths at millimeter wavelengths,” Radio Science, 17 (6), 1465-1476, 1982.

[23] Recommendation ITU-R P.837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modeling,” (08/2007).

[24] S.H.Lin, “A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths,” *Bell Syst. Tech. Jour.*, vol.54, no.6, pp.1051-1083, 1975.

[25] K.Morita, and I.Higutti, “Prediction methods of rain attenuation distributions of micro and millimeter waves,” *Rev. of ECL*, vol.24, no.7-8, pp.651-668, 1976.

[26] A.Papoulis, “Probability, random variables and stochastic processes,” McGraw-Hill, 1991.

[27] W.L.Nowland, R.L.Olsen, and I.P.Shkarofsky, “Theoretical relationship between rain depolarization and attenuation,” Electron. Letters, 13, pp.676, 1977.

[28] Recommendation ITU-R P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction methods,” (03/2005).

[29] W.Zhang, S.I.Karhu, and E.T.Salonen, "Prediction of radiowave attenuations due to a melting layer precipitation," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.42, pp.492-500, 1994.

[30] R.K.Crane, "Propagation Handbook for Wireless Communication System Design," CRC Press LLC, 2003.

[31] R.K.Crane, "Prediction of attenuation by rain," *IEEE Trans. Commun*., COM-28, no.9, pp.1717-1733, 1980.

[32] Recommendation ITU-R P.839-3, "Rain height model for precipitation methods," (02/2001).

[33] Filippo Giannetti, Marco Luise, and Ruggero Reggiannini, "Mobile and Personal Communications in the 60GHz Band: A Survey," *Wireless Personal Communications*, vol.10, pp.207-243, 1999.

[34] H.J.Liebe, "An updated model for millimeter wave propagation in moist air," *Radio Sci*., vol.20, pp.1069-1089, 1985.

[35] M.Vazquez-Castro, F.Perez-Fontan, and B.Arbesser-Rastburg, "Channel modeling for satellite and HAPS system design," Wireless Communications and Mobile Computing, 2:285-300, 2002.

[36] A.D.Panagopoulos, P.-D.M.Arapoglou, and P.G.Cottis, "Satellite communications at Ku, Ka and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques," IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol.6, no.3, pp.2-14, Third Quarter 2004.

[37] P.F.Hartigan, A.P.Gallois, "The use of satellite imagery for forecasting rain attenuation," 8th ICAP, Edinburgh, UK, March-April, 1993.

[38] Recommendation ITU-R S.1061-1, "Utilization of fade countermeasure strategies and techniques in the fixed-satellite service," (01/2007).

[39] Ι.Δ.Κανελλόπουλος, "Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον," Εκδόσεις ΕΜΠ, 2001.

[40] T.Konefal, C.Spillard, and D.Grace, "Site diversity for high-altitude platforms: a method for the prediction of joint site attenuation statistics," Microwaves, Antennas and Propagation, IEE Proceedings, vol.149, no.2, pp.124-128, 2002.

[41] A.D.Panagopoulos, E.M.Georgiadou, and J.D.Kanellopoulos, "Selection combining site diversity performance in High Altitude Platform networks," IEEE Communications Letters, vol.11, no.10, pp.787-789, 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -4-

ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΚΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης (Fixed Wireless Access, FWA) στηρίζουν τη λειτουργία τους σε ευρυζωνικές μεταδόσεις οπτικής επαφής (line-of-sight, LOS), ενδεχόμενες κυψελοειδείς διατάξεις και υψηλές συχνότητες λειτουργίας. Αποτελούν την απάντηση στις σύγχρονες απαιτήσεις για αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης και προηγμένες υπηρεσίες ευρείας ζώνης, αφού μπορούν να παρέχουν στους χρήστες πληθώρα πολυμεσικών και αλληλοδραστικών εφαρμογών. Ανάμεσα σε αυτές είναι το γρήγορο ασύρματο internet, η ψηφιακή τηλεφωνία, η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας, το βίντεο κατά παραγγελία (video-on-demand), η βιντεο-διάσκεψη κτλ. [1,2].

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποδοτικότητα των παραπάνω δικτύων, είναι απαραίτητη η κατά το δυνατόν πιο ακριβής εκτίμηση των φαινομένων διάδοσης που αναφέρονται στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα άνω των 10GHz, και ειδικότερα της απορρόφησης και σκέδασης από τους υδρομετεωρίτες που είναι οι κύριοι παράγοντες απόσβεσης. Στο παρόν Κεφάλαιο, η διατριβή προτείνει μια μέθοδο μοντελοποίησης του ασύρματου καναλιού που οδηγεί σε υπολογισμό της πιθανότητας εκτός λειτουργίας (outage probability) μιας FWA επίγειας ζεύξης. Το πρόβλημα της ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης από διηλεκτρικούς σκεδαστές έχει μελετηθεί εκτενώς κατά τις περασμένες δεκαετίες από πολλές ερευνητικές ομάδες που συνέβαλαν στον ακριβή υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης βροχής. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε τις εργασίες των Oguchi [3,4] μέσω των τεχνικών Boundary-perturbation technique και Point matching technique, Morrison και Cross [5] μέσω της τεχνικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων στις οριακές

συνθήκες, Holt et al. [6] μέσω της γενικής ολοκληρωτικής μεθόδου Fredholm, Li et al. [7] μέσω επεκτάσεων των συναρτήσεων σφαιρικών κυμάτων, Lin και Chen [8] μέσω σχηματισμού εξισώσεων χωρικών ολοκληρωμάτων.

Στο παρόν εδάφιο χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου των βοηθητικών πηγών (Method of Auxiliary Sources, MAS) [9] στο πρόβλημα σκέδασης επιπέδου κύματος [10]. Η καινοτομία της μεθοδολογίας έγκειται στην υιοθέτηση της προσέγγισης Pruppacher-Pitter [11] για το σχήμα των σταγόνων βροχής, που ουσιαστικά αποτελούν το βασικότερο μηχανισμό εξασθένησης, θεωρώντας ότι αυτό είναι συνάρτηση της διαμέτρου κάθε σταγόνας. Εργασίες για τον υπολογισμό της ειδικής απόσβεσης βροχής έχουν πραγματοποιηθεί και στο παρελθόν από τους Olsen et al. [12] και Moupfouma [13], κάνοντας όμως χρήση απλοποιημένων μοντέλων για το σχήμα των σταγόνων. Η πιο συνήθης θεώρηση είναι το σχήμα πεπλατυσμένου σφαιροειδούς για σταγόνες όχι πολύ μεγάλου μεγέθους [14]. Πιο πρόσφατα οι Li et al. [15] πρότειναν μια διαφορετική συναρτησιακή προσέγγιση του σχήματος μιας ρεαλιστικής βροχοσταγόνας για τον υπολογισμό της απόσβεσης βροχής.

Η μέθοδος MAS υπολογίζει τα αναπτυσσόμενα ηλεκτρομαγνητικά πεδία θεωρώντας υποθετικές, ισοδύναμες σημειακές πηγές σε επιφάνειες κατάλληλα τοποθετημένες σε σχέση με τα όρια του σκεδαστή. Άλλες ισοδύναμες μέθοδοι με τη MAS έχουν αναπτυχθεί ανεξάρτητα και είναι γνωστές με διαφορετικά ονόματα, όπως οι Generalized Multipole Technique [16] και Discrete Singularity Method [17,18]. Κοινός παρονομαστής όλων των παραπάνω μεθόδων είναι ότι η λύση του προβλήματος συνοριακών τιμών βασίζεται στη θεώρηση επιφανειακών ρευμάτων σε υποθετικές επιφάνειες τοποθετημένες σε δεδομένη απόσταση από την πραγματική επιφάνεια του σκεδαστή όπου οφείλουν να ικανοποιούνται οι οριακές συνθήκες.

Οι προκύπτουσες τιμές του πλάτους σκέδασης ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται σε μέσο βροχής, υπολογίζονται για διαφορετικές τιμές γωνίας πόλωσης και συχνότητες από 10 έως 50GHz. Στη συνέχεια εφαρμόζεται ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt μη γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων [19], που οδηγεί τελικά σε απλές εύχρηστες εκφράσεις του μιγαδικού πλάτους σκέδασης, συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας και της ακτίνας μιας σφαίρας ισόογκης με τη σταγόνα βροχής. Οι εκφράσεις αυτές αποτελούν σημαντικό υπολογιστικό εργαλείο στα χέρια των μηχανικών, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της ειδικής απόσβεσης βροχής και συνεπακόλουθα της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης εξασθένησης.

Συγκεκριμένα εφαρμόζουμε τον τύπο Ishimaru [20] που συσχετίζει την ειδική απόσβεση βροχής με το φανταστικό μέρος του πλάτους σκέδασης, μέσω απλοποιημένης προσέγγισης της έκφρασης Van de Hulst [21]. Σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική [22], στην παρούσα διατριβή δεν χρησιμοποιούμε την εμπειρική σχέση αR^b [12], η οποία εκφράζει την ειδική απόσβεση συναρτήσει της έντασης βροχόπτωσης R, και των παραμέτρων α και b. Οι τελευταίες παράμετροι εξαρτώνται από τα ηλεκτρικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επίγειας ζεύξης [23], τη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής, τη θερμοκρασία και τη γωνία πόλωσης, και ο υπολογισμός τους είναι συχνά λιγότερο ακριβής από την υιοθετούμενη εδώ θεωρητική προσέγγιση.

Όσον αφορά στην κατανομή μεγέθους των βροχοσταγόνων, προτείνεται η εφαρμογή των μοντέλων Marshall-Palmer [24] για εύκρατες, είτε Ajayi-Olsen [25] για τροπικές περιοχές. Έτσι προκύπτουν αναλυτικές εκφράσεις της ειδικής απόσβεσης βροχής, από τις οποίες μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί η πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης βροχόπτωσης κατά μήκος της επίγειας FWA ζεύξης. Δεδομένου ότι η χωρική κατανομή της βροχής δεν είναι ομογενής, η κατανομή της προκαλούμενης απόσβεσης βροχής εκτιμάται μέσω εμπειρικών παραγόντων μειωμένου μήκους ζεύξης (path reduction factors), που προκύπτουν από προσεγγίσεις πειραματικών δεδομένων απόσβεσης. Για το σκοπό αυτό θέτουμε σε εφαρμογή τα μοντέλα Garcia-Lopez και Peiro [26] και ITU-R P.530 [27], που δίνουν το ισοδύναμο μήκος (effective path length) της υπό εξέταση ζεύξης.

Το ολοκληρωμένο μοντέλο υπολογισμού της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης εξασθένησης βροχής συγκρίνεται τελικά με πειραματικά δεδομένα επίγειων ζεύξεων οπτικής επαφής συστημάτων σταθερής ασύρματης πρόσβασης από τη βάση δεδομένων Study Group 3 Databank DBSG5 της ITU-R [28].

4.2 ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΡΟΧΗΣ

Τα μοντέλα που περιγράφουν το μέσο βροχής σε μικροσκοπικό επίπεδο είναι ένα βασικό εργαλείο για την πρόβλεψη της αξιοπιστίας ενός συστήματος ασύρματης επικοινωνίας που λειτουργεί σε συχνότητες πάνω από 10GHz. Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται κάποια από τα κύρια μοντέλα που υιοθετούνται στις υπολογιστικές εφαρμογές του Κεφαλαίου 4, σε σχέση με το σχήμα και την κατανομή μεγέθους σταγόνας των βροχοσταγόνων.

4.2.1 ΣΧΗΜΑ ΣΤΑΓΟΝΑΣ

Υπάρχουν τρία βασικά μοντέλα που περιγράφουν τη μορφή των σταγόνων της βροχής. Το σφαιρικό και το σφαιροειδές μοντέλο παρουσιάζουν αξονική συμμετρία γύρω από τον οριζόντιο άξονα, ενώ το μοντέλο Pruppacher-Pitter εμφανίζει παραμόρφωση. Κατά κανόνα οι σταγόνες ξεκινούν έχοντας σφαιρική μορφή. Στη συνέχεια οι μεσαίου μεγέθους σταγόνες καταλήγουν σε σφαιροειδή μορφή και οι πιο μεγάλες σε μέγεθος σταγόνες αποκτούν παραμόρφωση που περιγράφεται από το μοντέλο Pruppacher-Pitter.

4.2.1.1 ΣΦΑΙΡΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το σφαιρικό μοντέλο είναι το πιο απλό. Η σταγόνα σύμφωνα με αυτό έχει το σχήμα σφαίρας και η ακτίνα $\overline{a}$ σφαίρας ίσου όγκου είναι ίση με την πραγματική ακτίνα a της σταγόνας.

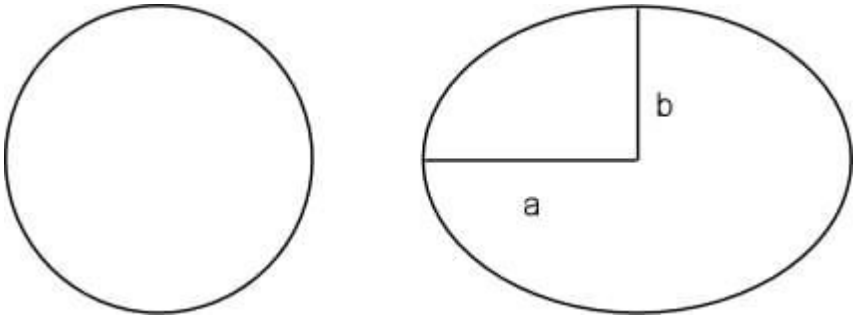
$$\overline{a} = a \tag{4.1}$$

4.2.1.2 ΣΦΑΙΡΟΕΙΔΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟ

Το σφαιροειδές μοντέλο είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο στο οποίο η μορφή της σταγόνας είναι αυτή του Σχήματος 4.1. Η σταγόνα θεωρείται σφαιροειδής και η ακτίνα σφαίρας ίσου όγκου είναι ίση με,

$$\overline{a} = \left(a^2\ b\right)^{1/3} \tag{4.2}$$

όπου a, b ο μεγάλος και ο μικρός ημιάξονας του σφαιροειδούς.



Σχήμα 4.1: Μορφή σταγόνας βροχής σύμφωνα με το σφαιρικό και το σφαιροειδές μοντέλο.

4.2.1.3 ΜΟΝΤΕΛΟ PRUPPACHER-PITTER

Το πιο ολοκληρωμένο φυσικό μοντέλο που περιγράφει τη μορφή μιας σταγόνας νερού που πέφτει με την οριακή της ταχύτητα στον αέρα παρουσιάστηκε το 1970 από τους H.R.Pruppacher και R.L.Pitter [11]. Σύμφωνα με αυτό, μια σταγόνα δημιουργείται μέσα στα σύννεφα με συνεχείς συγκρούσεις και ενώσεις με άλλες σταγόνες, με συνέπεια την αύξηση του όγκου και της μάζας της μέχρι που η δομή της γίνεται ασταθής και διασπάται σε μικρότερες σταγόνες. Η διαδικασία δημιουργίας και διάσπασης των σταγόνων έχει τη μορφή χιονοστιβάδας. Παλιότερα πειράματα είχαν δείξει ότι η μορφή της σταγόνας, που είναι συνάρτηση του μεγέθους της, είναι ο καθοριστικός παράγοντας για τη δομική ευστάθεια της σταγόνας κατά την πτώση της σε ατμόσφαιρα από αέρα. Οι Pruppacher και Pitter συμπλήρωσαν τα υπάρχοντα ατελή φυσικά μοντέλα με φυσικές παραμέτρους, που έως τότε είχαν αμεληθεί ή παρερμηνευθεί, και κατέληξαν σε μια ολική εξίσωση ισορροπίας των δυνάμεων που ασκούνται γύρω από μια σταγόνα. Έτσι αν η σταγόνα είναι της μορφής που φαίνεται στο Σχήμα 4.2, όπου παρουσιάζεται η κατακόρυφη τομή που διέρχεται από το κέντρο μάζας, η εξίσωση που περιγράφει την ισορροπία πίεσης σε μια τυχαία θέση επάνω στην επιφάνειά της είναι,

$$\sigma\left[\frac{1}{R_1(\vartheta)}+\frac{1}{R_2(\vartheta)}\right]=P_i(\vartheta)-P_e(\vartheta) \tag{4.3}$$

όπου σ είναι η επιφανειακή τάση του νερού, $R_1(\vartheta), R_2(\vartheta)$ οι κύριες ακτίνες καμπυλότητας της σταγόνας, ϑ η πολική γωνία που ξεκινά από την ημιευθεία που ορίζεται από την κατακόρυφο που έχει ως αρχή το κέντρο βάρους της σταγόνας, $P_i(\vartheta)$ η εσωτερική και $P_e(\vartheta)$ η εξωτερική πίεση της σταγόνας. Η εσωτερική πίεση περιγράφεται από την εξίσωση,

$$P_i(\vartheta)=P_i(\vartheta=\pi)+g(\rho_w-\rho_a)(r_0+r\cos\vartheta)+P_{ic}(\vartheta) \tag{4.4}$$

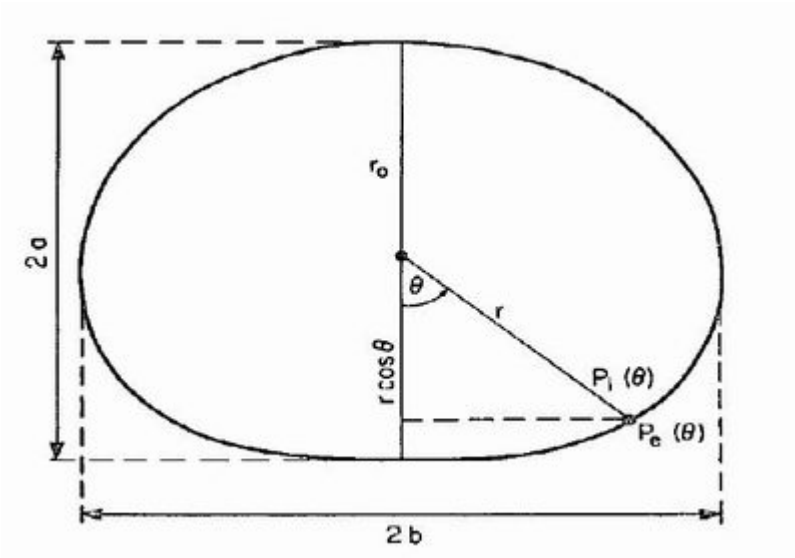
όπου

$$P_i(\vartheta=\pi)=P_e(\vartheta=\pi)+\frac{2\sigma}{R(\vartheta=\pi)} \tag{4.5}$$

P_{ic} είναι η συνεισφορά στην εσωτερική πίεση από την εσωτερική κυκλοφορία, ρ_a, ρ_w οι πυκνότητες του αέρα και του νερού αντίστοιχα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και r το μέτρο του ακτινικού διανύσματος σε ένα σημείο της επιφάνειας της σταγόνας. Ισχύει ότι

$r_0 = r(\vartheta = \pi)$. Από αντικατάσταση των πιο πάνω πιέσεων στην εξίσωση ισορροπίας προκύπτει,

$$\sigma\left[\frac{1}{R_1(\vartheta)}+\frac{1}{R_2(\vartheta)}\right]= \\ = g\left(\rho_w-\rho_a\right)\left(r_0+r\cos\vartheta\right)-\left(P_e(\vartheta)-P_\infty\right)+P_{ic}(\vartheta)+\left(P_i(\vartheta=\pi)-P_\infty\right) \tag{4.6}$$



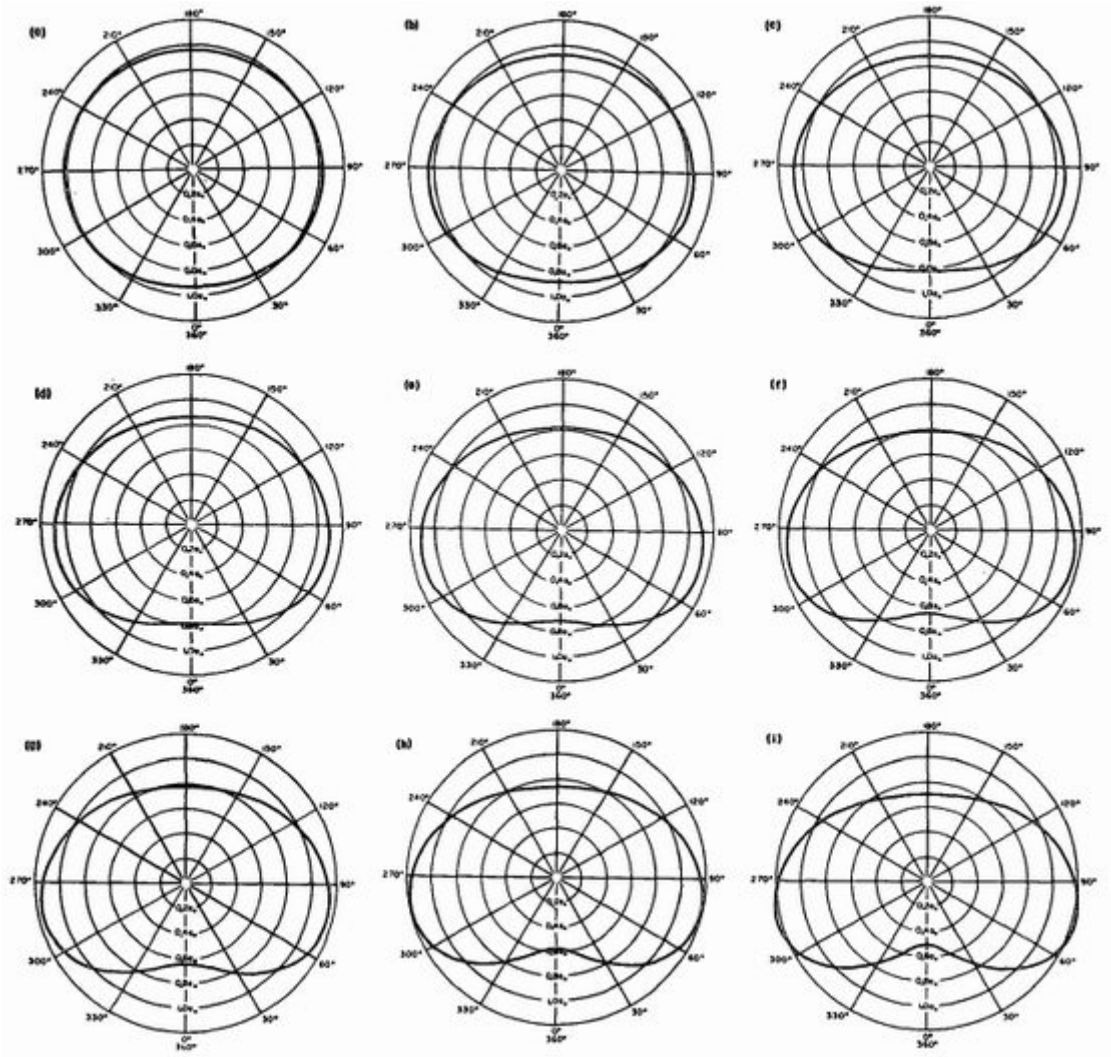
Σχήμα 4.2: Κατακόρυφη δομή σταγόνας της βροχής σύμφωνα με το μοντέλο των Pruppacher και Pitter.

Στην πιο πάνω εξίσωση ο όρος που βρίσκεται στα αριστερά είναι ο όρος που αναφέρεται στις κύριες καμπυλότητες και οι όροι που βρίσκονται στα δεξιά είναι, με τη σειρά, ο όρος της υδροστατικής πίεσης στο εσωτερικό της σταγόνας, ο όρος της αεροδυναμικής πίεσης στην επιφάνεια της σταγόνας, η συνεισφορά στην εσωτερική πίεση από την εσωτερική κυκλοφορία και η επιπλέον εσωτερική πίεση στην κορυφή της σταγόνας.

Ο όρος της υδροστατικής πίεσης μπορεί να υπολογιστεί θεωρώντας ότι η παραμόρφωση της σταγόνας είναι μικρή και ότι οι όροι που την περιγράφουν είναι μόνο όροι διαταραχής πρώτης τάξης. Έτσι με αυτή τη συνθήκη, η επιφάνεια της σταγόνας μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση [11],

$$r(\vartheta)=\overline{a}\left(1+\sum_{n=0}^{9}c_n\cos(n\vartheta)\right) \tag{4.7}$$

όπου οι σταθερές παραμόρφωσης c_n αναλύονται στο [29]. Χαρακτηριστικές μορφές των σταγόνων για διάφορες ακτίνες ισόογκης σφαίρας, όπως αυτές προκύπτουν από το μοντέλο Pruppacher-Pitter, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Μορφή σταγόνων βροχής για $\overline{a}$ =0.11, 0.14, 0.18, 0.20, 0.25, 0.29, 0.30, 0.35, 0.40cm, σύμφωνα με το μοντέλο Pruppacher-Pitter.

4.2.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ

Κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης, οι σταγόνες της βροχής που πέφτουν δεν έχουν όλες το ίδιο μέγεθος. Μέσω στατιστικής ανάλυσης μπορούν να προκύψουν κατανομές που συσχετίζουν το μέγεθος των σταγόνων με την ένταση βροχόπτωσης. Οι κατανομές αυτές δίνουν το ποσοστό των σταγόνων σε έναν όγκο V, που έχουν ισόογκη ακτίνα από $\overline{a}$ έως $\overline{a} + d\overline{a}$. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατανομές μεγέθους σταγόνας είναι αυτές των Marshall-Palmer [24] και Ajayi-Olsen [25], που αναφέρονται κυρίως σε εύκρατες και τροπικές περιοχές αντίστοιχα.

4.2.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ MARSHALL-PALMER

Η κατανομή πιθανότητας που περιγράφει το μέγεθος των σταγόνων που πέφτουν κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης σύμφωνα με τους Marshall-Palmer δίνεται από την παρακάτω σχέση [24],

$$n(\overline{a}) = N_0 \exp(-\Lambda\, \overline{a}) \tag{4.8}$$

όπου

$$N_0 = 0.16 \tag{4.9}$$

$$\Lambda = 82\, R^{-0.21} \tag{4.10}$$

και R είναι η ένταση της βροχής σε mm/hr.

4.2.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ AJAYI-OLSEN

Η κατανομή πιθανότητας που περιγράφει το μέγεθος των σταγόνων που πέφτουν κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης σύμφωνα με τους Ajayi-Olsen είναι η λογαριθμική συνάρτηση κανονικής κατανομής. Η κατανομή αυτή ισχύει κυρίως στις τροπικές και υποτροπικές περιοχές και δίνεται από την παρακάτω σχέση [25],

$$n(D) = \frac{N_t}{\sigma\, D\, \sqrt{2\,\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln D - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \tag{4.11}$$

όπου

$$D = 2\, \overline{a} \tag{4.12}$$

$$N_t = A_0\, R^{B_0} \tag{4.13}$$

$$\mu = A_\mu + B_\mu \ln R \tag{4.14}$$

$$\sigma^2 = A_\sigma + B_\sigma \ln R \tag{4.15}$$

Οι παράμετροι $A_0, B_0, A_\mu, B_\mu, A_\sigma, B_\sigma$ εξαρτώνται από την υπό εξέταση τοποθεσία [25]. R είναι η ένταση της βροχής σε mm/hr.

4.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ (METHOD OF AUXILIARY SOURCES, MAS)

Συνεχίζοντας κρίνεται απαραίτητη μια σύντομη επισκόπηση της Μεθόδου των Βοηθητικών Πηγών.

4.3.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ – ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

Η Μέθοδος των Βοηθητικών Πηγών είναι μια μέθοδος επίλυσης προβλημάτων συνοριακών τιμών, με ανάπτυξη της γενικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης σε θεμελιώδεις ή ιδιόμορφες λύσεις. Αντίθετα από άλλες μεθόδους, η γενική λύση δεν αναπτύσσεται σε συναρτήσεις που εκ των προτέρων ικανοποιούν τις οριακές συνθήκες.

Η μέθοδος των βοηθητικών πηγών προέκυψε ως αποτέλεσμα μακρόχρονης εργασίας και συνένωσης άλλων μαθηματικών μεθόδων. Η αρχή έγινε στη Δημοκρατία της Γεωργίας (πρώην Σοβιετική Ένωση) από μαθηματικούς και φυσικούς ερευνητές, στους οποίους οφείλει την ονομασία της [30,31,32,33]. Η ίδια μέθοδος αναπτύχθηκε ανεξάρτητα και από άλλες ερευνητικές ομάδες ανά τον κόσμο, με διαφορετικές ονομασίες, όπως "The Current Model Method" ή “The Discrete Singularity Method” [34,35,36,16]. Στην αρχή ήταν γνωστή με ονόματα όπως: “The Method of Generalized Fourier Series” (MGFR), “The Method of Expansion in Terms of Metaharmonic Functions” (METMF) και “The Method of Expansion by Fundamental Solutions” (MEFS). Αντίστοιχες μέθοδοι σχεδόν ταυτόχρονα και μάλλον ανεξάρτητα αναπτύχθηκαν στην Ιαπωνία από τον Yasuura [37] και στις ΗΠΑ από τους Richmond [38], Millar [39] και Waterman [40] με εφαρμογές στην ακουστική περίθλαση, στη θεωρία της ελαστικότητας στην επιφάνεια επαφής ανομοιογενών μέσων, σε προβλήματα περίθλασης στην υδροδυναμική. Παράλληλα, οι Silvester και Pelosi [41] στον τομέα του ηλεκτρομαγνητισμού, εφάρμοσαν τη μέθοδο στην ανάλυση ομογενών κυματοδηγών.

Η MAS σήμερα αποτελεί μια ισχυρή αριθμητική μέθοδο που χρησιμοποιείται κυρίως στην επίλυση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης από αγώγιμες και διηλεκτρικές επιφάνειες. Διαθέτει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως αριθμητική ευστάθεια, υπολογιστική ακρίβεια και ευκολία στην υλοποίηση, ενώ επιπλέον, αν και αριθμητική, η MAS ενέχει στοιχεία φυσικής αντίληψης και κατανόησης του εκάστοτε προβλήματος μοντελοποίησης.

Η βασική ιδέα της MAS συνοψίζεται στο γεγονός ότι, το πρόβλημα συνοριακών τιμών δεν διατυπώνεται με αγνώστους τις συνεχείς επιφανειακές κατανομές ισοδύναμων ρευμάτων, που ρέουν στις ίδιες επιφάνειες όπου επιβάλλονται οι αντίστοιχες συνοριακές συνθήκες, αλλά με αγνώστους διακριτά, νοητά ρεύματα, τις βοηθητικές πηγές (auxiliary sources), που βρίσκονται σε κάποια απόσταση από τα φυσικά σύνορα του προς μοντελοποίηση συστήματος. Οι βοηθητικές πηγές θεωρείται ότι κατέχουν ένα άγνωστο αρχικά, βάρος - διπολική ροπή και αφού αυτό υπολογιστεί με χρήση οριακών συνθηκών, το τελικό πεδίο συντίθεται με υπέρθεση. Έτσι αν έχουμε ένα εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο (incident field) του οποίου εν γένει γνωρίζουμε τη μορφή και έναν λείο σκεδαστή (είτε αγωγός είτε διηλεκτρικό) οποιασδήποτε γεωμετρίας, χωρίς γωνιακά σημεία, οπότε το πεδίο θα είναι παραγωγίσιμο παντού, η MAS μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το συνολικό Η/Μ πεδίο παντού στο χώρο. Ο σκεδαστής ακτινοβολείται από γνωστό εξωτερικά επιβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο $\vec{E}^{inc}$ και $\vec{H}^{inc}$, το οποίο συνοπτικά συμβολίζουμε με $\vec{F}^{inc}$.

Παρακάτω παρουσιάζονται σε γενικές γραμμές τα βασικά χαρακτηριστικά και η μορφή της υλοποίησης που προκύπτει με τη μέθοδο των βοηθητικών πηγών για δύο γενικευμένα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης.

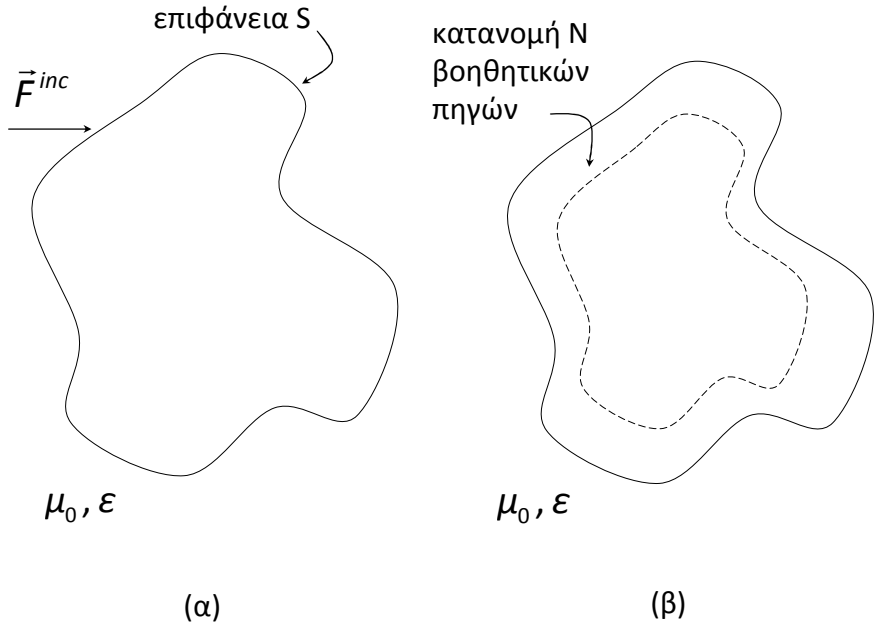
4.3.2 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Τα προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης είναι από τα σημαντικότερα προβλήματα της εφαρμοσμένης ηλεκτροδυναμικής. Από φυσικής πλευράς, παρουσιάζονται σε περιπτώσεις όπου μελετάται η διάδοση ενός Η/Μ κύματος σε μέσο με ασυνέχειες. Τα φαινόμενα σκέδασης του κύματος που οφείλονται σε αυτές τις ασυνέχειες μπορούν να εκφραστούν με τη μορφή προβλημάτων συνοριακών τιμών. Σκοπός της ανάλυσης είναι η εύρεση του δευτερεύοντος Η/Μ πεδίου που παράγεται σε κάθε περιοχή του χώρου με διαφορετικές ιδιότητες, όταν είναι γνωστό το αρχικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και η γεωμετρία του συστήματος.

Στην πραγματική επιφάνεια θεωρούμε διακριτά σημεία (collocation points) στα οποία απαιτούμε την ικανοποίηση των οριακών συνθηκών. Στη φανταστική επιφάνεια θεωρούμε σημεία στα οποία τοποθετούνται βοηθητικές πηγές. Εισάγοντας τις εικονικές άγνωστες ποσότητες στις οριακές συνθήκες, μπορούμε να τις προσδιορίσουμε και στη συνέχεια να κατασκευάσουμε από αυτές, το πεδίο παντού στο χώρο.

4.3.2.1 Περιπτωση Α: Τελεια Αγωγιμος Σκεδαστης

Ο σκεδαστής είναι τέλεια αγώγιμο σώμα (perfect electric conductor) χωρίς γωνιακά σημεία, μέσα σε άπειρο, ομοιογενή, ισοτροπικό και γραμμικό χώρο διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ε και μαγνητικής διαπερατότητας μ_0. Έχει φυσική εξωτερική επιφάνεια S, που φαίνεται στο Σχήμα 4.4(α) και ακτινοβολείται από εξωτερικά επιβαλλόμενο πεδίο $\vec{F}^{inc}$.



Σχήμα 4.4: (α) Τέλεια αγώγιμος σκεδαστής, (β) Κατανομή βοηθητικών πηγών.

Το σκεδαζόμενο πεδίο βρίσκεται αφαιρώντας το σκεδαστή και τοποθετώντας υποθετικές βοηθητικές πηγές στο εσωτερικό του σκεδαστή με κατανομή που ακολουθεί τη γεωμετρία του (Σχήμα 4.4(β)). Οι βοηθητικές πηγές ακτινοβολούν σε άπειρο, ομοιογενή, ισοτροπικό και γραμμικό χώρο διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ε και μαγνητικής διαπερατότητας μ_0. Η έκφραση του σκεδαζόμενου πεδίου προκύπτει από την εξίσωση,

$$\vec{F}^{sc} = \sum_i W_i \vec{F}_i \tag{4.16}$$

όπου $\vec{F}_i$ το εκπεμπόμενο πεδίο της i-οστής βοηθητικής πηγής και W_i άγνωστοι συντελεστές βάρους που προσδιορίζονται αριθμητικά επιβάλλοντας τις κατάλληλες συνοριακές συνθήκες σε διακριτά σημεία πάνω στο φυσικό σύνορο του χωρίου (επιφάνεια S). Πιο συγκεκριμένα, οι συνοριακές αυτές συνθήκες είναι η ισότητα των εφαπτομενικών

συνιστωσών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου πάνω στην S. Στην προκειμένη περίπτωση που το πεδίο μέσα στην επιφάνεια S είναι μηδενικό, αυτό ισοδυναμεί με μηδενισμό του ολικού εφαπτόμενου πεδίου $\hat{\eta} \times \left(\vec{F}\right)\Big|_S = 0$, όπου $\hat{\eta}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια του σκεδαστή και με κατεύθυνση προς τα έξω. Το κάθε διακριτό σημείο πάνω στο οποίο θα παρθεί η κάθε οριακή συνθήκη προκύπτει αν προβάλλουμε την αντίστοιχη βοηθητική πηγή πάνω στην S. Η εφαρμογή των οριακών συνθηκών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αλγεβρικού συστήματος εξισώσεων ως προς W_i, η λύση του οποίου μας δίνει τα άγνωστα βάρη και κατ' επέκταση το άγνωστο σκεδαζόμενο πεδίο $\vec{F}^{sc}$. Επομένως το συνολικό πεδίο είναι,

$$\vec{F} = \vec{F}^{inc} + \vec{F}^{sc} \tag{4.17}$$

4.3.2.2 Περιπτωση Β: Διηλεκτρικος Σκεδαστης

Ο σκεδαστής είναι ομογενής, ισοτροπικός και γραμμικά διηλεκτρικός. Έχει διηλεκτρική επιτρεπτότητα ε, μαγνητική διαπερατότητα μ_0, εξωτερική επιφάνεια S και βρίσκεται σε άπειρο ελεύθερο χώρο. Ο σκεδαστής ακτινοβολείται από γνωστό εξωτερικά επιβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο $\vec{F}^{inc}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5(α).

Το πεδίο στην περιοχή I είναι $\vec{F}^{I}$ και στην περιοχή II είναι $\vec{F}^{II}$, και υπολογίζονται ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό του πεδίου στην περιοχή I αφαιρούμε το σκεδαστή και τοποθετούμε κατανομή βοηθητικών πηγών στο εσωτερικό του χώρου, η οποία ακολουθεί τη γεωμετρία του σκεδαστή (Σχήμα 4.5(β)). Οι βοηθητικές πηγές ακτινοβολούν σε άπειρο, ομοιογενή, ισοτροπικό και γραμμικό χώρο διηλεκτρικής επιτρεπτότητας ε_0 και μαγνητικής διαπερατότητας μ_0. Το σκεδαζόμενο πεδίο δίνεται από τη σχέση,

$$\vec{F}^{sc} = \sum_i W_i^{(1)} \vec{F}_i^{(1)} \tag{4.18}$$

Το συνολικό πεδίο στην περιοχή I είναι,

$$\vec{F}^{I} = \vec{F}^{inc} + \vec{F}^{sc} \tag{4.19}$$

όπου $\vec{F}_i^{(1)}$ το εκπεμπόμενο πεδίο της i-οστής βοηθητικής πηγής της κατανομής (1) και $W_i^{(1)}$ άγνωστοι συντελεστές βάρους για την κατανομή (1).

Για τον υπολογισμό του πεδίου στην περιοχή II αφαιρούμε πάλι το σκεδαστή και τοποθετούμε την κατανομή των βοηθητικών πηγών στο εξωτερικό αυτή τη φορά του χώρου, η οποία κατανομή περιβάλλει την επιφάνεια που κάποτε βρισκόταν ο σκεδαστής. Οι

βοηθητικές πηγές ακτινοβολούν σε άπειρο, ομοιογενή, ισοτροπικό και γραμμικό χώρο, γεμάτο από το υλικό του διηλεκτρικού σκεδαστή, δηλαδή με διηλεκτρική επιτρεπτότητα ε και μαγνητική διαπερατότητα μ_0 (Σχήμα 4.5(γ)). Το συνολικό πεδίο στην περιοχή ΙΙ είναι,

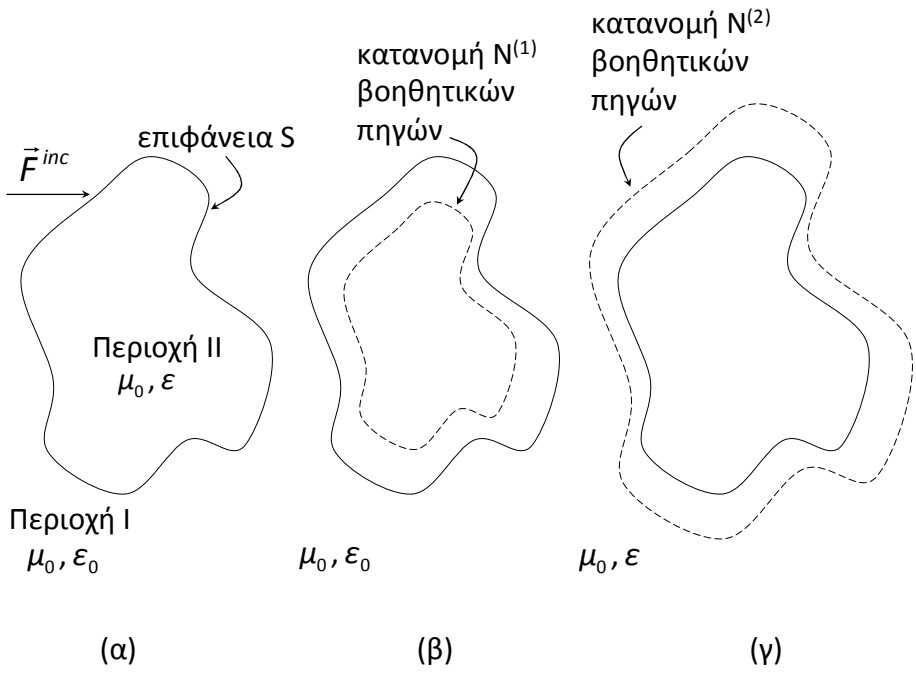
$$\vec{F}^{II} = \sum_i W_i^{(2)} \vec{F}_i^{(2)} \tag{4.20}$$

όπου $\vec{F}_i^{(2)}$ το εκπεμπόμενο πεδίο της i-οστής βοηθητικής πηγής της κατανομής (2) και $W_i^{(2)}$ άγνωστοι συντελεστές βάρους για την κατανομή (2).

Στη συνέχεια επιβάλλουμε πάνω σε διακριτά σημεία της επιφάνειας S τις οριακές συνθήκες περί ισότητας εφαπτομενικών συνιστωσών ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, που αναφέρονται στις περιοχές Ι και ΙΙ και εκφράζονται συνοπτικά από την εξίσωση,

$$\hat{\eta} \times \left(\vec{F}^{I} - \vec{F}^{II}\right)\Big|_S = \hat{\eta} \times \left(\vec{F}^{sc} + \vec{F}^{inc} - \vec{F}^{II}\right)\Big|_S = 0 \tag{4.21}$$

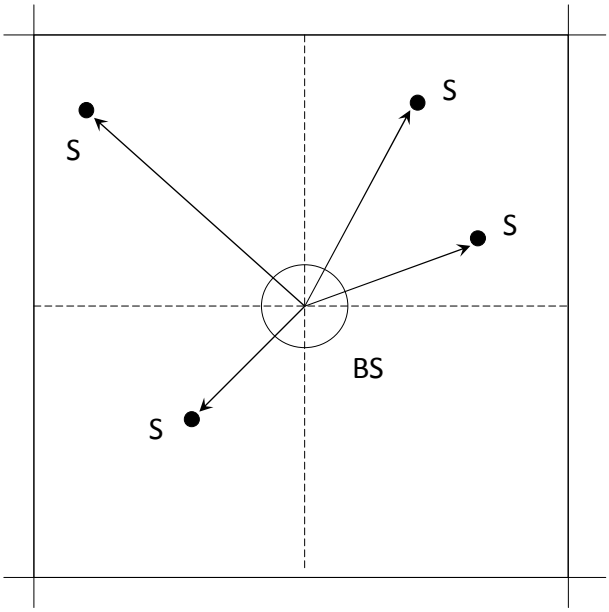
όπου $\hat{\eta}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια του διηλεκτρικού σκεδαστή και με κατεύθυνση προς τα έξω. Οι οριακές συνθήκες επιβάλλονται σε $N = \left(N^{(1)} + N^{(2)}\right)/2$ επιλεγμένα σημεία πάνω στην S. Έτσι προκύπτει ένα συζευγμένο γραμμικό αλγεβρικό σύστημα ως προς τους άγνωστους συντελεστές βάρους $W_i^{(1)}$ και $W_i^{(2)}$.



Σχήμα 4.5: (α) Διηλεκτρικός σκεδαστής, (β) Κατανομή βοηθητικών πηγών στην περιοχή Ι, (γ) Κατανομή βοηθητικών πηγών στην περιοχή ΙΙ.

4.4 Υπολογισμος της Αποσβεσης Βροχης σε μια Επιγεια Ζευξη Σταθερης Ασυρματης Προσβασης

Η δομική μονάδα ενός δικτύου σταθερής ασύρματης πρόσβασης περιλαμβάνει τον σταθμό βάσης (base station, BS) που εξυπηρετεί έναν αριθμό σταθερών συνδρομητών (subscribers, S) στην περιοχή κάλυψής του. Το σύστημα συχνά ακολουθεί κυψελωτή δομή με σχήμα επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων για τη βέλτιστη εκμετάλλευση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Το Σχήμα 4.6 αναπαριστά μια κυψέλη ορθογωνικού σχήματος χωρισμένη σε τομείς των 90°.



Σχήμα 4.6: Δομή κυψέλης δικτύου σταθερής ασύρματης πρόσβασης.

Η απόσβεση κατά τη διάδοση σε δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης μπορεί να περιγραφεί από τη γενική σχέση,

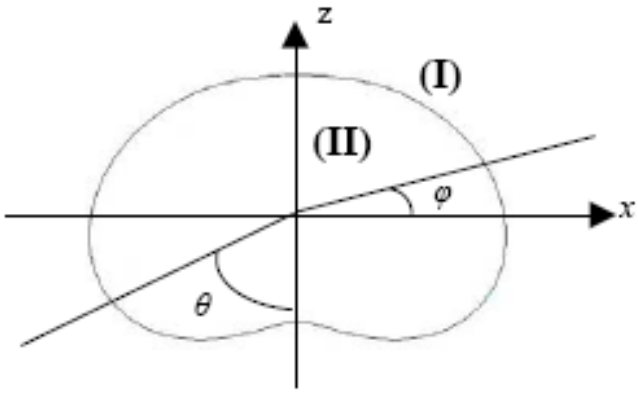
$$PathLoss \propto 10^{A/10}\, L^{m} \tag{4.22}$$

όπου L (km) το μήκος της ζεύξης και m = 2 ο εκθέτης απωλειών ελευθέρου χώρου, εφόσον θεωρούμε διάδοση οπτικής επαφής. Η τυχαία μεταβλητή A (dB) εκφράζει την εξασθένηση που εισάγεται από τη βροχή. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε δικτύου, αυτό τίθεται εκτός λειτουργίας όταν η αντίστοιχη απόσβεση A ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι A_M.

Η αντίστοιχη πιθανότητα ονομάζεται πιθανότητα διακοπής λειτουργίας OP (outage probability) του συστήματος.

$$OP = \Pr[A > A_M] \tag{4.23}$$

Η απόσβεση βροχής δημιουργείται όταν κατά τη διάδοση του επιπέδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος $(\vec{E}^{inc}, \vec{H}^{inc})$ στον κενό χώρο (ε_0, μ_0), αυτό προσπίπτει σε ένα πολύ μεγάλο πλήθος σταγόνων βροχής. Στο συγκεκριμένο εδάφιο εξετάζουμε αρχικά την περίπτωση μιας σταγόνας, της οποίας η επιφάνεια S περιγράφεται από την εξίσωση (4.7) κατά Pruppacher-Pitter [11]. Η ανάλυση σύμφωνα με τη μέθοδο των βοηθητικών πηγών, απαιτεί το διαχωρισμό του προβλήματος σε δύο επιμέρους προβλήματα, ένα για την περιοχή (I) εξωτερικά της επιφάνειας S και ένα για την περιοχή (II) εσωτερικά της S, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7. (Καθώς εξετάζουμε επίγειες μεταδόσεις, θεωρούμε πρόσπτωση και σκέδαση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος κατά μήκος του άξονα x σε σχέση με τη σταγόνα, οπότε στο Σχήμα 4.7 λαμβάνεται $\vartheta = 90^\circ$, $\varphi = 0^\circ$).



Σχήμα 4.7: Γεωμετρία προβλήματος σκέδασης Η/Μ κύματος από σταγόνα βροχής κατά P-P.

Κατά την εξέταση της εξωτερικής περιοχής (I), ο σκεδαστής αντικαθίσταται από κενό χώρο και μια άγνωστη υποθετική επιφανειακή κατανομή ρεύματος $\vec{J}_{si}$ θεωρείται πάνω σε λεία αναλυτική επιφάνεια S_{in} που περικλείεται στην S και είναι ισομορφική με την τελευταία. Το συνολικό πεδίο $\vec{F}^{I}$ εξωτερικά της σταγόνας και πάνω σε αυτή εκφράζεται από τη σχέση,

$$\vec{F}^{I} = \left(\vec{E}^{inc} + \vec{E}(\vec{J}_{si}), \vec{H}^{inc} + \vec{H}(\vec{J}_{si})\right) \tag{4.24}$$

όπου $\left(\vec{E}\left(\vec{J}_{si}\right),\vec{H}\left(\vec{J}_{si}\right)\right)$ είναι το πεδίο που ακτινοβολείται στον κενό χώρο από τη ρευματική κατανομή $\vec{J}_{si}$.

Κατά τρόπο ανάλογο, για τη μελέτη της εσωτερικής περιοχής (II) θεωρούμε ότι ο χώρος εξωτερικά της σταγόνας είναι γεμάτος με το ίδιο ομοιογενές υλικό του σκεδαστή (ε,μ) [42]. Όπως και πριν, υιοθετούμε μια άγνωστη υποθετική επιφανειακή κατανομή ρεύματος $\vec{J}_{sout}$ που ρέει σε ισομορφική επιφάνεια S_{out} εξωτερικά της S. Το πεδίο επάνω και εσωτερικά της S είναι $\vec{F}^{II}$.

$$\vec{F}^{II}=\left(\vec{E}\left(\vec{J}_{sout}\right),\vec{H}\left(\vec{J}_{sout}\right)\right) \tag{4.25}$$

Το επόμενο βήμα είναι η εφαρμογή των οριακών συνθηκών πάνω στην επιφάνεια S για τις δύο ισοδύναμες περιπτώσεις,

$$\left.\begin{aligned}\hat{\eta}\times\left(\left(\vec{E}^{inc}+\vec{E}\left(\vec{J}_{si}\right)\right)-\vec{E}\left(\vec{J}_{sout}\right)\right)=0\\ \hat{\eta}\times\left(\left(\vec{H}^{inc}+\vec{H}\left(\vec{J}_{si}\right)\right)-\vec{H}\left(\vec{J}_{sout}\right)\right)=0\end{aligned}\right\} \tag{4.26}$$

όπου $\hat{\eta}$ είναι το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα στην επιφάνεια S, με φορά προς τα έξω. Το Η/Μ πεδίο $\left(\vec{E}\left(\vec{J}_{si}\right),\vec{H}\left(\vec{J}_{si}\right)\right)$ είναι το ζητούμενο σκεδαζόμενο πεδίο που διεγείρεται εξωτερικά της S, ενώ το Η/Μ πεδίο στο εσωτερικό της σταγόνας είναι $\left(\vec{E}\left(\vec{J}_{sout}\right),\vec{H}\left(\vec{J}_{sout}\right)\right)$. Οι συνεχείς κατανομές ρεύματος $\vec{J}_{si}$ και $\vec{J}_{sout}$ αντικαθίστανται από δύο ομάδες ζευγών εφαπτόμενων διπόλων Hertz [16], με σημεία τοποθέτησης που ισαπέχουν στον κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα της σταγόνας. Έτσι δημιουργείται ένα γραμμικό σύστημα εξισώσεων ως προς τις άγνωστες επιφανειακές πηγές, η λύση του οποίου μας δίνει τελικά το σκεδαζόμενο πεδίο $\left(\vec{E}^{sc},\vec{H}^{sc}\right)$. Η ηλεκτρική συνιστώσα σκέδασης που διεγείρεται στο μακρινό πεδίο μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση,

$$\vec{E}^{sc}=\vec{E}_{sc_amp}\frac{e^{-j\,k_0\,r}}{r}=\left[\hat{\varepsilon}_h\;SA_h\left(\overline{a},f\right)+\hat{\varepsilon}_v\;SA_v\left(\overline{a},f\right)\right]\frac{e^{-j\,k_0\,r}}{r} \tag{4.27}$$

όπου r η διεύθυνση διάδοσης, $k_0=2\,\pi/\lambda_0$ ο κυματαριθμός ελευθέρου χώρου, SA_h, SA_v τα πλάτη σκέδασης οριζόντιας και κατακόρυφης πόλωσης, $\hat{\varepsilon}_h$, $\hat{\varepsilon}_v$ τα αντίστοιχα μοναδιαία διανύσματα κάθετα στη διεύθυνση σκέδασης και f η συχνότητα λειτουργίας του συστήματος.

Η ειδική απόσβεση A_0 (dB/km) επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται σε μέσο βροχής, προκύπτει στη συνέχεια από το γενικό τύπο του Ishimaru

[20,21]. Οι οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες του σκεδαζόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι,

$$\vec{E}_{h,v}^{sc} = \exp\left(-j\,K_{h,v}\,r\right) \tag{4.28}$$

όπου

$$K_{h,v} = k_0 + \frac{2\pi}{k_0}\int_{\bar{a}_{\min}}^{\bar{a}_{\max}} SA_{h,v}\left(\bar{a},f\right)n\left(\bar{a}\right)d\bar{a} \tag{4.29}$$

και $\bar{a}_{\min} = 0.025\,cm$, $\bar{a}_{\max} = 0.350\,cm$ η ελάχιστη και μέγιστη ακτίνα της ισόογκης με τη σταγόνα σφαίρας, $n\left(\bar{a}\right)$ η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας του αριθμού των σκεδαστών με ακτίνα σταγόνας μεταξύ $\bar{a}$ και $\bar{a}+d\bar{a}$ ανά μονάδα όγκου. Ακολούθως υπολογίζεται η ειδική απόσβεση βροχής $\left(dB/km\right)$ κατά τον εξής τρόπο [10],

$$\begin{aligned} A_{0\,(h,v)} &= 20\log e^{-\mathrm{Im}\{K_{h,v}\}r} = -8.686\,\mathrm{Im}\left\{K_{h,v}\right\} = \\ &= -8.686\,\lambda_0\int_{\bar{a}_{\min}}^{\bar{a}_{\max}} \mathrm{Im}\left\{SA_{h,v}\left(\bar{a},f\right)\right\}n\left(\bar{a}\right)d\bar{a} \end{aligned} \tag{4.30}$$

όπου $\lambda_0 = 2\pi/k_0$ και από τον ορισμό του A_0 θεωρούμε $r = 1km$.

Μετά από μια διαδικασία παλινδρόμησης στα θεωρητικά αποτελέσματα της μεθόδου MAS, σύμφωνα με τον αλγόριθμο Levenberg-Marquardt για μη γραμμική προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων [19], καταλήγουμε στην ακόλουθη εμπειρική έκφραση για το φανταστικό μέρος του πλάτους σκέδασης,

$$\mathrm{Im}\left\{SA_{h,v}\left(\bar{a},f\right)\right\} = \left(n_{h,v}\,\bar{a}^{t_{h,v}^2} + \rho_{h,v}\right)10^{-6} \tag{4.31}$$

όπου

$$n_{h,v} = \left(t_{h,v}^4\,f^{t_{h,v}^5} + t_{h,v}^6\right)t_{h,v}^1 \tag{4.32}$$

$$\rho_{h,v} = \left(t_{h,v}^4\,f^{t_{h,v}^5} + t_{h,v}^6\right)t_{h,v}^3 \tag{4.33}$$

και οι δείκτες h, v αντιστοιχούν σε οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση. Οι τιμές των εμπλεκόμενων σταθερών για συχνότητες από 10GHz έως 50GHz δίνονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2.

Πίνακας 4.1: Σταθερές t_v^i (i = 1,…,6) για κατακόρυφη πόλωση.

f (GHz), $\bar{a}$ (cm)	t_v^1	t_v^2	t_v^3	t_v^4	t_v^5	t_v^6
$0.025 \le \bar{a} \le 0.075$ $10 \le f \le 50$	-203.29	4.20	6.7e-6	0.70	3.01	-501.02
$0.075 \le \bar{a} \le 0.125$ $10 \le f \le 18$	-1110.37	3.74	0.03	21.33	1.15	-263.29
$0.075 \le \bar{a} \le 0.125$ $18 \le f \le 26$	-135.41	3.01	0.02	0.02	3.45	235.87
$0.125 \le \bar{a} \le 0.175$ $10 \le f \le 26$	-37.02	2.70	0.03	0.28	2.84	213.70
$0.075 \le \bar{a} \le 0.175$ $26 \le f \le 34$	1638.00	1.99	-6.98	-83.51	0.24	160.59
$0.075 \le \bar{a} \le 0.175$ $34 \le f \le 50$	23.37	1.21	-0.73	-5.11	1.32	-86.73
$0.175 \le \bar{a} \le 0.350$ $10 \le f \le 26$	271.79	1.82	-3.40	-16.59	0.71	66.25
$0.175 \le \bar{a} \le 0.350$ $26 \le f \le 50$	143.74	1.88	-0.23	-23.53	0.78	116.77

Πίνακας 4.2: Σταθερές t_h^i (i = 1,…,6) για οριζόντια πόλωση.

f (GHz), $\bar{a}$ (cm)	t_h^1	t_h^2	t_h^3	t_h^4	t_h^5	t_h^6
$0.025 \le \bar{a} \le 0.075$ $10 \le f \le 50$	-244.35	4.32	3e-6	0.73	3.05	-481.32
$0.075 \le \bar{a} \le 0.125$ $10 \le f \le 38$	-97.16	3.12	0.01	1.35	2.38	-202.63
$0.075 \le \bar{a} \le 0.125$ $38 \le f \le 50$	5315.25	0.94	-372.97	589.58	-1.47	-5.24
$0.125 \le \bar{a} \le 0.200$ $10 \le f \le 28$	123.68	2.13	-0.80	-5.14	1.50	116.64

$0.125 \le \bar{a} \le 0.200$ $28 \le f \le 50$	-1551.44	3.32	-2.44	63.69	0.54	-196.57
$0.200 \le \bar{a} \le 0.275$ $10 \le f \le 18$	-1551.44	3.32	-2.44	63.69	0.54	-196.57
$0.200 \le \bar{a} \le 0.275$ $18 \le f \le 50$	136.77	1.86	-0.43	-17.36	0.85	12.99
$0.275 \le \bar{a} \le 0.350$ $10 \le f \le 14$	1601.99	0.20	-1191.16	295.91	-0.46	-117.31
$0.275 \le \bar{a} \le 0.350$ $14 \le f \le 20$	91.64	0.02	-88.17	16934.85	-0.57	-5971.75
$0.275 \le \bar{a} \le 0.350$ $20 \le f \le 50$	-68.96	1.07	8.33	43.61	0.72	-93.41

Μετά από αλγεβρικούς υπολογισμούς, και με θεώρηση της κατανομής Marshall-Palmer [24] για το μέγεθος της σταγόνας, η αρχική σχέση της ειδικής απόσβεσης βροχής καταλήγει στην παρακάτω έκφραση,

$$A_{0\,(h,v)} = -8.686\,\frac{10^3\,\lambda_0\,N_0}{\Lambda}\left\{\begin{array}{r}\dfrac{n_{h,v}}{\Lambda^{t_{h,v}^2}}\left[\gamma\left(t_{h,v}^2+1,\Lambda\,\bar{a}_{\max}\right)-\gamma\left(t_{h,v}^2+1,\Lambda\,\bar{a}_{\min}\right)\right]- \\ -\rho_{h,v}\left[\exp\left(-\Lambda\,\bar{a}_{\max}\right)-\exp\left(\Lambda\,\bar{a}_{\min}\right)\right]\end{array}\right\} \tag{4.34}$$

όπου $\gamma(a,x)$ η ατελής συνάρτηση γάμμα.

$$\gamma(a,x) = \int_0^x e^{-t}\,t^{a-1}\,dt \tag{4.35}$$

Η ολική απόσβεση προκύπτει πολλαπλασιάζοντας την ειδική απόσβεση επί το ενεργό μήκος ζεύξης L_{eff} (km), δηλαδή την ισοδύναμη διαδρομή διάδοσης όπου μπορεί να θεωρηθεί ότι βρέχει ομοιόμορφα.

$$A_{(h,v)} = A_{0\,(h,v)}\,L_{eff} \tag{4.36}$$

Για το L_{eff} θεωρούμε δύο προτεινόμενα μοντέλα, αφενός την έκφραση της σύστασης P.530 της ITU-R [27] και αφετέρου την έκφραση των Garcia-Lopez και Peiro [26]. Σύμφωνα με την ITU το ενεργό μήκος ζεύξης ορίζεται ως,

$$L_{eff,ITU} = \frac{L}{1+\frac{L}{L_0}} \tag{4.37}$$

όπου L (km) το πραγματικό μήκος ζεύξης και

$$L_0 = \begin{cases} 35\exp(-0.015R), & R \le 100\,mm/hr \\ 35\exp(-0.015\cdot 100), & R > 100\,mm/hr \end{cases} \tag{4.38}$$

Από την άλλη μεριά η έκφραση Garcia-Lopez και Peiro έχει ως εξής,

$$L_{eff,G-L} = \frac{L}{a_1 + L\frac{a_2 R + a_3 L + a_4}{a_5}} \tag{4.39}$$

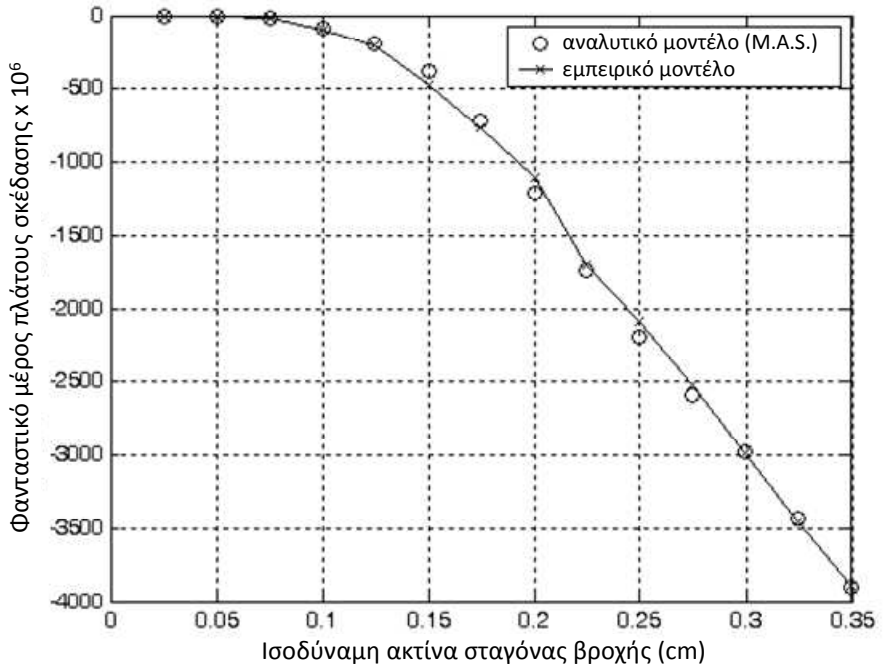
όπου και πάλι L (km) είναι το πραγματικό μήκος ζεύξης και R (mm/hr) η σημειακή ένταση βροχόπτωσης. Οι παράμετροι a_i (i = 1,…,5) ποικίλουν από περιοχή σε περιοχή όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Γεωγραφικές παράμετροι a_i (i = 1,…,5) κατά Garcia-Lopez και Peiro για επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις.

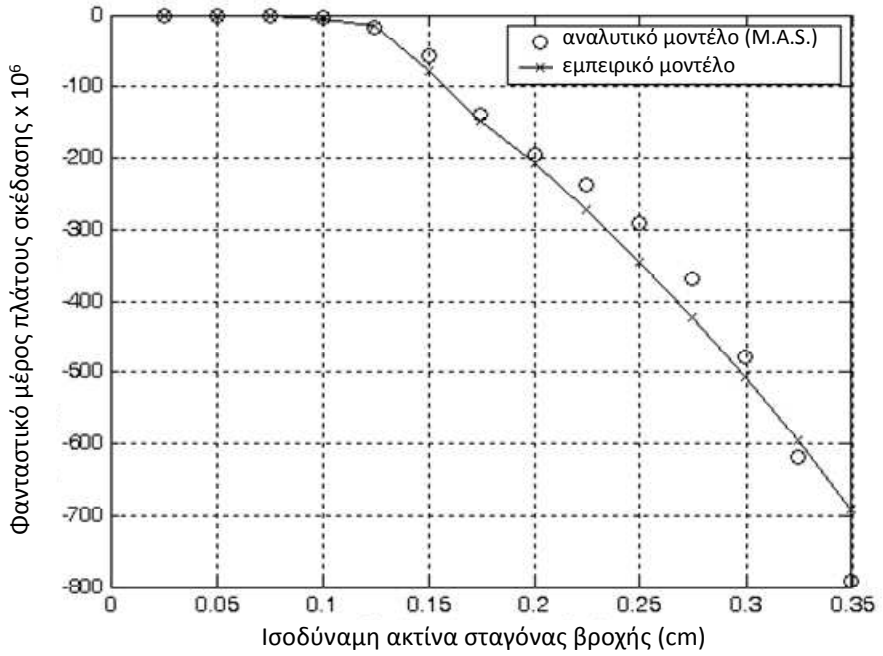
Γεωγραφικές παράμετροι	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Ευρώπη	0.82	8.9	-10.3	602	10000
Ιαπωνία	0.90	2.2	-9.8	700	10000
Η.Π.Α.	0.87	4.9	-4.7	175	10000

4.5 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η επιβεβαίωση του προτεινόμενου μοντέλου επιτυγχάνεται μέσα από εκτεταμένες συγκρίσεις των αποτελεσμάτων του έναντι υπαρχόντων αριθμητικών δεδομένων [43,44]. Στα Σχήματα 4.8 και 4.9 φαίνονται οι τιμές του φανταστικού μέρους του πλάτους σκέδασης από τον εμπειρικό τύπο της διαδικασίας παλινδρόμησης (4.31)-(4.33) σε σχέση με τις ίδιες ακριβείς τιμές από το αναλυτικό μοντέλο της μεθόδου των βοηθητικών πηγών, για οριζόντια και κατακόρυφα πολωμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα αντίστοιχα. Η σύγκλιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την προτεινόμενη μεθοδολογία με τα αντίστοιχα αναλυτικά αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητική.



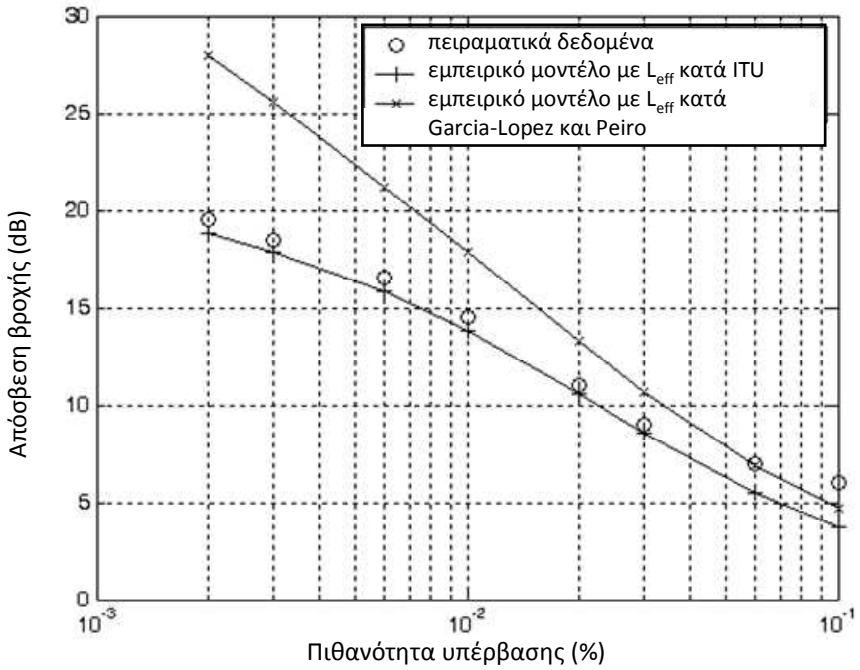
Σχήμα 4.8: Φανταστικό μέρος του πλάτους σκέδασης ως προς ακτίνα ισόογκης σφαίρας, για συχνότητα 20GHz και οριζόντια πόλωση.



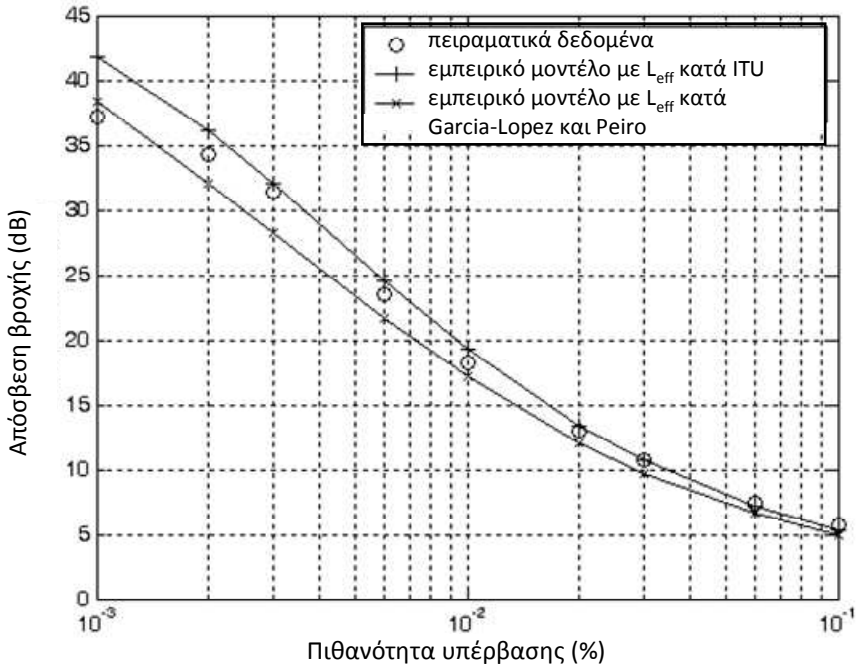
Σχήμα 4.9: Φανταστικό μέρος του πλάτους σκέδασης ως προς ακτίνα ισόογκης σφαίρας, για συχνότητα 10GHz και κατακόρυφη πόλωση.

Στη συνέχεια το μοντέλο εφαρμόζεται σε περιπτώσεις επίγειων ζεύξεων οπτικής επαφής συστημάτων σταθερής ασύρματης πρόσβασης, για την πρόβλεψη της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης βροχής, σε διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες, με στατιστικά χαρακτηριστικά βροχόπτωσης που υπολογίζονται σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P.837 [45]. Τα αποτελέσματα προσεγγίζουν επιτυχώς αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα που έχουν προκύψει από μετρήσεις σειράς ετών στις εν λόγω ζεύξεις και αντλούνται από τη βάση δεδομένων Study Group 3 Databank DBSG5 της ITU-R [28]. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Τα Σχήματα 4.10 και 4.11 αφορούν οριζόντια πολωμένες ζεύξεις, των 10.9GHz με μήκος 8.6km στη Βραζιλία και των 14.92GHz με μήκος 15.3km στην Τσεχία. Οι τρεις καμπύλες της απόσβεσης αντιστοιχούν στα πειραματικά δεδομένα και στο προτεινόμενο μοντέλο με χρήση είτε της έκφρασης ITU, είτε της έκφρασης Garcia-Lopez και Peiro για το ισοδύναμο μήκος ζεύξης. Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, η περίπτωση πρόβλεψης πιθανότητας υπέρβασης με χρήση του μοντέλου ITU για το ισοδύναμο μήκος ζεύξης προσεγγίζει πολύ καλύτερα τα δεδομένα σε όλο το φάσμα τιμών, και στις δύο περιπτώσεις (Βραζιλία και Τσεχία).

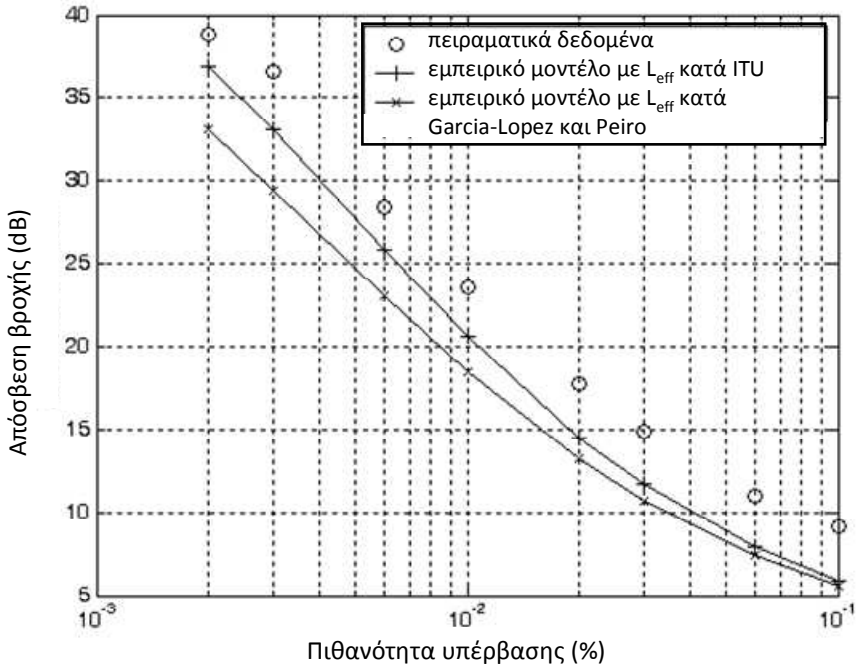


Σχήμα 4.10: Πιθανότητα υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για μια FWA επίγεια ζεύξη μήκους 8.6km, συχνότητας 10.9GHz και οριζόντιας πόλωσης στο Rio de Janeiro (Βραζιλία).

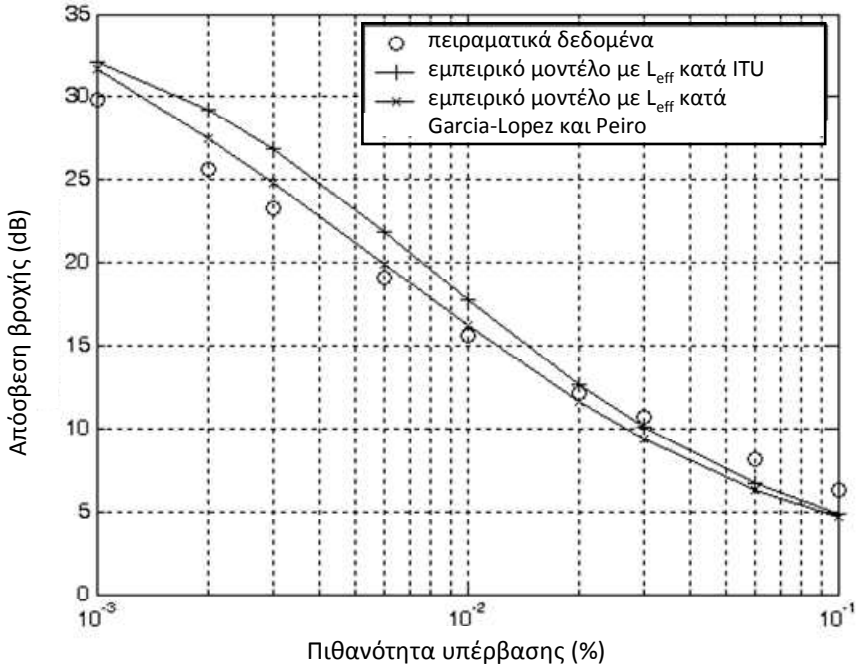


Σχήμα 4.11: Πιθανότητα υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για μια FWA επίγεια ζεύξη μήκους 15.3km, συχνότητας 14.92GHz και οριζόντιας πόλωσης στο Uvaly (Δημοκρατία της Τσεχίας).

Επιπλέον, δύο ζεύξεις κατακόρυφης πόλωσης εξετάζονται στα Σχήματα 4.12 και 4.13. Στην πρώτη περίπτωση, η ζεύξη μήκους 12.65km λειτουργεί στη Ρωσία με συχνότητα 19.3GHz και στη δεύτερη η ζεύξη μήκους 9.5km λειτουργεί στην Ιταλία με συχνότητα 17GHz. Στην περίπτωση της κατακόρυφης πόλωσης, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά κάθε συστήματος, τα πειραματικά δεδομένα προσεγγίζονται καλύτερα άλλοτε από το μοντέλο με ισοδύναμο μήκος ζεύξης κατά ITU [27] (Ρωσία) και άλλοτε κατά Garcia-Lopez και Peiro [26] (Ιταλία). Ωστόσο, σε όλες τις περιπτώσεις η μέθοδος αριθμητικού υπολογισμού της συνάρτησης πιθανότητας υπέρβασης αποδεικνύεται επαρκής, γεγονός που την καθιστά χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των μηχανικών κατά το σχεδιασμό ζεύξεων επίγειας σταθερής ασύρματης πρόσβασης.



Σχήμα 4.12: Πιθανότητα υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για μια FWA επίγεια ζεύξη μήκους 12.65km, συχνότητας 19.3GHz και κατακόρυφης πόλωσης στη Dubna (Ομοσπονδία της Ρωσίας).



Σχήμα 4.13: Πιθανότητα υπέρβασης απόσβεσης λόγω βροχής για μια FWA επίγεια ζεύξη μήκους 9.5km, συχνότητας 17GHz και κατακόρυφης πόλωσης στο Fucine (Ιταλία).

4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάστηκε μια μεθοδολογία υπολογισμού της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης βροχής σε επίγειες ζεύξεις σταθερής ασύρματης πρόσβασης. Η χρησιμότητα ενός τέτοιου μοντέλου είναι μεγάλη, καθώς για συχνότητες λειτουργίας που υπερβαίνουν τα 10GHz και μεταδόσεις οπτικής επαφής, η βροχή είναι ο πιο καθοριστικός παράγοντας υποβιβασμού της απόδοσης, ενώ φαινόμενα όπως η σκίαση και η πολυδιαδρομική διάδοση έχουν σημαντικά μικρότερες επιδράσεις.

Η μέθοδος των βοηθητικών πηγών εφαρμόζεται αρχικά στο πρόβλημα σκέδασης επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος από σταγόνα βροχής Pruppacher-Pitter. Ο ορισμός ενός απλού εμπειρικού τύπου για το φανταστικό μέρος του πλάτους σκέδασης, συναρτήσει της συχνότητας και της ακτίνας μιας σφαίρας ίσου όγκου με τη βροχοσταγόνα, επιτρέπει κατόπιν τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης τεχνικής υπολογισμού της πιθανότητας εκτός λειτουργίας της υπό εξέταση ζεύξης. Η μεθοδολογία βασίζεται στη χρήση των παραπάνω εμπειρικών εκφράσεων για την αριθμητική προσέγγιση της ειδικής απόσβεσης βροχής και της αντίστοιχης συνάρτησης πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης βροχής. Οι καινοτόμες εκφράσεις αφορούν συχνότητες λειτουργίας από 10 έως 50GHz, και οριζόντια ή κατακόρυφα πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζει μεγάλη διακριτική ικανότητα ανάμεσα στις δύο πολώσεις και ικανοποιητική σύγκλιση με πειραματικά δεδομένα επίγειων ζεύξεων.

4.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

[1] A.Nodbotten, “LMDS systems and their application,” *IEEE Comm. Mag.,* vol.38, no.6, pp.150-154, Jun. 2000.

[2] B.Fong, N.Ansari, A.C.M.Fong, G.Y.Fong, and P.B.Rapajic, “On the Scalability of Fixed Broadband Wireless Access Network Deployment,” *IEEE Comm. Mag.,* S12-S18 Suppl. Sept. 2004.

[3] T.Oguchi, “Attenuation of electromagnetic wave due to rain with distorted raindrops,” J. Radio Research Labs, vol.7, pp.467-485, 1960.

[4] T.Oguchi, “Attenuation of electromagnetic wave due to rain with distorted raindrops (Part II),” J. Radio Research Labs, vol.11, pp.19-44, 1964.

[5] J.A.Morrison and M.J.Cross, “Scattering of a plane electromagnetic wave by axisymmetric raindrops,” Bell Syst. Techn. Journ., vol.53, pp.955-1019, 1974.

[6] A.R.Holt, N.K.Uzunoglu and B.G.Evans, “An integral equation solution to the scattering of electromagnetic radiation by dielectric spheroids and ellipsoids,” IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol.AP-26, pp.706-712, 1978.

[7] L.-W.Li, P.-S.Kooi, M.-S.Leong, T.-S.Yeo and M.-Z.Gao, “Microwave attenuation by realistically distorted raindrops: Part I – Theory,” IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol.AP-43, pp.811-822, August 1995.

[8] D.-P.Lin and H.-Y.Chen, “Volume integral equation solution of extinction cross section by raindrops in the range 0.6-100GHz,” IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol.AP-49, pp.494-499, March 2001.

[9] D.I.Kaklamani and H.T.Anastassiu, “Aspects of the Method of Auxiliary Sources (MAS) in computational electromagnetics,” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.44, no.3, pp.48-64, June 2002.

[10] S.A.Kanellopoulos, A.D.Panagopoulos, and J.D.Kanellopoulos, “Calculation of electromagnetic scattering from a Pruppacher-Pitter raindrop using MAS and slant path rain attenuation prediction,” *Int J Infrared Millimeter Waves*, vol.26, no.12, pp.1783-1802, Dec. 2005.

[11] H.R.Pruppacher, and R.L.Pitter, “A semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops,” Journal of the Atmospheric Sciences, vol.28, pp.86-94, June 1970.

[12] R.L.Olsen, D.V.Rogers, and D.B.Hodge, “The aR^b relation in the calculation of rain attenuation,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-26, no.2, pp.318-329, 1978.

[13] F.Moupfouma, “A new theoretical formulation for the calculation of the specific attenuation due to precipitation particles on terrestrial and satellite radio links,” *Int J Satellite Communications*, vol.15, pp.89-99, 1997.

[14] N.K.Uzunoglu, B.G.Evans and A.R.Holt, “Scattering of electromagnetic radiation by precipitation particles and propagation characteristics of terrestrial and space communication systems,” Proc. IEE, vol.124, no.5, May 1977.

[15] L.-W.Li, P.-S.Kooi, M.-S.Leong and T.-S.Yeo, “On the simplified expression of realistic raindrop shapes,” Microwave Opt. Technol. Letters, vol.7, no.4, pp.201-205, 1994.

[16] Y.Leviatan, A.Boag and A.Boag, “Generalized formulations for electromagnetic scattering from perfectly conducting and homogeneous material bodies – Theory and

numerical solution," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.36, no.12, pp. 1722-1734, December 1988.

[17] M.Tsuji, H.Shigesawa and M.Nishimura, "Theoretical and experimental study of three dimensional scattering problems," IEICE Transactions E-74, 9, pp.2848-2854, 1991.

[18] M.Tsuji and H.Shigesawa, "Scattering from perfect conducting cylinders of finite length: calculations by means of multiple equivalent dipoles and experiments," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol.8, pp.471-488, 1994.

[19] D.H.Jacobs, "The state of the art in numerical analysis," London Academic Press, 1977.

[20] A.Ishimaru, "Wave propagation and scattering in random media, Volume I: Single scattering and transport theory; Volume II: Multiple scattering, turbulence, rough surfaces and remote sensing," IEEE Press – Oxford University Press Classic Reissue, 1997.

[21] H.C.Van de Hulst, "Light scattering by small particles," *Wiley, New York*, 1957.

[22] Recommendation ITU-R P.618, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," (10/2009).

[23] Recommendation ITU-R P.838-3, "Specific attenuation model for rain for use in prediction methods," (03/2005).

[24] J.S.Marshall and W.McK.Palmer, "The distribution of raindrops with size," Jour. Meteorol., vol.5, pp.165-166, 1948.

[25] G.O.Ajayi and R.L.Olsen, "Modeling of raindrop size distribution for microwave and millimeter wave applications," Radio Sci., vol.20, pp.193-202, Mar./Apr. 1985.

[26] J.A.Garcia Lopez, and J.Peiro, "Simple rain attenuation prediction technique for terrestrial radio links," *Elec. Letters*, vol.19, pp.879-881, 1983.

[27] Recommendation ITU-R P.530-13, "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems," (10/2009).

[28] International Telecommunication Union, http://www.itu.int/ITU-R/study-groups/software/dbsg5/index.html.

[29] T.Oguchi, "Scattering properties of Pruppacher and Pitter form rain drops and cross polarization due to rain: Calculations at 11, 13, 19.3, and 34.8 GHz," Radio Science, vol.12, no.1, pp.41-51, January-February 1977.

[30] V.D.Kupradze, M.A.Aleksidze, "On one approximate method for solving boundary problems," The BULLETIN of the Georgian Academy of Sciences, 30(1963)5, pp.529-536 (in Russian).

[31] V.D.Kupradze, M.A.Aleksidze, “The method of functional equations for approximate solution of some boundary problems,” Journal of Appl. Math. and Math. Physics, 4(1964)4, pp.683-715 (in Russian).

[32] V.D.Kupradze, “Potential methods in the theory of elasticity,” Fizmatizdat, Moscow 1963, 1-472 (in Russian, English translation available, reprinted in Jerusalem, 1965).

[33] I.N.Vekua, “On the completeness of the system of metaharmonic functions,” Reports of the Acad. of Sciences of USSR, 90(1953)5, pp.715-717 (in Russian).

[34] Y.Leviatan and A.Boag, "Analysis of Electromagnetic Scattering from Dielectric Cylinders Using a Multifilament Current Model", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.35, no.10, pp.1119-1127, 1987.

[35] Y.Leviatan, A.Boag and A.Boag, "Analysis of TE Scattering from Dielectric Cylinders Using a Multifilament Magnetic Current Model", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.36, no.7, pp.1026-1031, 1988.

[36] Y.Leviatan, A.Boag and A.Boag, "Analysis of Electromagnetic Scattering from Dielectrically Coated Conducting Cylinders Using a Multifilament Current Model", *IEEE* Transactions on Antennas and Propagation, vol.36, no.11, pp.1602-1607, 1988.

[37] K.Yasuura, “A view of numerical methods in diffraction problems,” W.V.Tilston and M.Sauzade (Editors), Progress in Radio Science 1966-1969, vol.3, Radio Waves and Circuits, Radio Electronics, URSI, Brussels, pp.257-270, 1971.

[38] J.Richmond, “Scattering by a dielectric cylinder of arbitrary cross section shape,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.13, issue 3, pp.334-341, 1965.

[39] R.F.Millar, “The Rayleigh hypothesis and a related least-squares solution to scattering problems for periodic surfaces and other scatterers,” Radio Science, vol.8, no.8-9, pp.785-796, 1973.

[40] P.C.Waterman, “New formulation of acoustic scattering,” J. Acoust. Soc. Amer., vol.45, issue 6, pp.1417-1429, 1969.

[41] P.P.Silvester and G.Pelosi, “Finite Elements for Wave Problems,” New York: IEEE Press, 1994.

[42] P.S.Ray, “Broadband complex refractive indices of ice and water,” Applied Optics, vol.11, no.8, August 1972.

[43] S.A.Kanellopoulos, K.M.Georgiadou, A.D.Panagopoulos, and J.D.Kanellopoulos, “Empirical formulas of electromagnetic scattering amplitude for the prediction of rain attenuation exceedance probability over a point-to-point link,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol.4A, pp.413-416, July 2005.

[44] E.M.Georgiadou, A.D.Panagopoulos, G.E.Chatzarakis, and J.D.Kanellopoulos, “On the accurate modeling of millimeter wave fixed wireless channels exceedance probability,” International Journal of Infrared and Millimeter Waves, vol.27, no.7, pp.1027-1039, 2006.

[45] Recommendation ITU-R P.837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modeling,” (08/2007).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -5-

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ

5.1 ΧΡΗΣΗ ΠΑΛΜΩΝ ΣΕ ΣΤΑΘΕΡΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Η αυξανόμενη ζήτηση για ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες και η έλλειψη φάσματος στις συμβατικές ζώνες, οδηγεί σήμερα στη χρήση υψίσυχνων χιλιοστομετρικών συχνοτήτων [1,2], που αγγίζουν τη ζώνη EHF (Extremely High Frequency) των 30-300GHz. Οι συχνότητες αυτές προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα μεταξύ των οποίων ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας, η υψηλή κατευθυντικότητα, η χαμηλή ισχύς εκπομπής (λόγω μεγάλου κέρδους κεραίας), η μικρή πιθανότητα παρεμβολής και υποκλοπής (λόγω στενού εύρους δέσμης κεραίας), το μικρό μέγεθος κεραίας και εξοπλισμού, οι ασήμαντες διαλείψεις πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Η υλοποίηση πολυμεσικών εφαρμογών ευρείας ζώνης και υψηλής ταχύτητας στα δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης FWA μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ευρυζωνικών ή παλμικών μεταδόσεων και κατάλληλων σχημάτων διαμόρφωσης. Τέτοιες μεταδόσεις πολύ στενών παλμών αναφέρονται συχνά με τον όρο UWB (Ultra Wide Band), και ενώ χρησιμοποιήθηκαν αρχικά σε εφαρμογές ραντάρ και τηλεπισκόπισης [3,4], πρόσφατα κερδίζουν έδαφος και σε εφαρμογές ψηφιακών ασύρματων επικοινωνιών [5,6].

Σημαντική προσπάθεια έχει καταβληθεί τις τελευταίες δεκαετίες στην έρευνα, τόσο πειραματική όσο και θεωρητική, σχετικά με την αλληλεπίδραση των στενής ζώνης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και της γήινης ατμόσφαιρας. Εκτενείς φασματοσκοπικές μελέτες των μορίων του οξυγόνου και των υδρατμών έχουν συνδράμει στη δημιουργία αξιόπιστων μοντέλων ατμοσφαιρικής διάδοσης, όπως το μοντέλο του Liebe [7]. Αντιθέτως λιγότερη προσοχή έχει δοθεί από τη διεθνή βιβλιογραφία στο πρόβλημα της ευρυζωνικής ή

παλμικής μετάδοσης. Τα χιλιοστομετρικά μήκη κύματος είναι ευάλωτα στην επιρροή των ατμοσφαιρικών μορίων του οξυγόνου και των υδρατμών, όχι μόνο σε σχέση με την προκαλούμενη εξασθένηση, αλλά και εξαιτίας της προκαλούμενης διασποράς στο σήμα, η οποία εισάγει μια επιπλέον καθυστέρηση διάδοσης.

Για στενής ζώνης ή μονοχρωματική ακτινοβολία, οι επιπτώσεις της διασποράς είναι σαφώς υποδεέστερες της ατμοσφαιρικής απορρόφησης. Εντούτοις, κάτι τέτοιο δεν ισχύει σε μεταδόσεις πολύ στενών παλμών, όταν το εύρος ζώνης σήματος είναι συγκρίσιμο με το εύρος συχνότητας όπου η ατμοσφαιρική απορρόφηση και διασπορά υφίστανται αξιοσημείωτες διακυμάνσεις. Στην τελευταία περίπτωση το φάσμα του μεταδιδόμενου παλμού υπόκειται σε διαφορική απόσβεση και διασπορά, που οδηγεί σε διαταραχή του παλμού στον δέκτη. Οι διαταραχές εμφανίζονται με τη διεύρυνση είτε τη συμπίεση του παλμού, μέσω διακύμανσης της ταχύτητας μετάδοσης, καθώς επίσης με μεταβολές στις φάσεις των σημάτων και με ολίσθηση στη συχνότητα μέγιστης ενέργειας του παλμού. Το μέγεθος (και το πρόσημο) των επιπτώσεων εξαρτάται από την εκάστοτε συχνότητα φέροντος που μεταδίδεται.

Η ταχύτητα μετάδοσης και η διαταραχή παλμικών κυμάτων κατά τη διάδοση σε μέσο διασποράς χωρίς απώλειες, εξετάσθηκαν για πρώτη φορά από τον Brillouin [8]. Μετέπειτα οι Trinza και Weber [9] επέκτειναν την ανάλυση συμπεριλαμβάνοντας τις επιπτώσεις της εξασθένησης και την αντίστοιχη ανώμαλη διασπορά κοντά στις γραμμές απορρόφησης. Με τρόπο ανάλογο, ο Vogler [10] είχε νωρίτερα λάβει υπόψη την απορρόφηση και τη διασπορά για τον καθορισμό της διαταραχής ενός τυχαίου παλμού. Στις θεωρήσεις αυτές, γίνονται προσεγγίσεις που ισχύουν σε συχνότητες κοντά στις γραμμές απορρόφησης, σχετικά με τη συνάρτηση του σχήματος της γραμμής που περιγράφει τα αποτελέσματα της συμπίεσης ή διεύρυνσης, ώστε να καταλήξουμε σε κλειστές λύσεις για το ολοκλήρωμα Fourier της συνάρτησης μεταφοράς του ατμοσφαιρικού καναλιού της παλμικής κυματομορφής. Έτσι η απόκριση του παλμού μπορεί να εξετασθεί με λεπτομέρεια. Οι Liebe [11] και Hufford [12] έχουν δείξει παραδείγματα διαταραχών που προκύπτουν στην περιβάλλουσα του ληφθέντος παλμού, χρησιμοποιώντας γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), ενώ οι Glutsyuk et al. [13] υπολόγισαν αριθμητικά το ολοκλήρωμα Fourier για τον ίδιο σκοπό. Πράγματι, στην περιοχή των γραμμών απορρόφησης, οι παλμοί είναι δυνατό να υποστούν σφοδρή διαταραχή, διατηρώντας λίγο μόνο από το αρχικό τους σχήμα, ή ακόμα και να διασπαστούν σε διπλούς παλμούς. Στα ψηφιακά συστήματα επικοινωνιών, τέτοιες επιδράσεις παράγουν ανεπίτρεπτη αύξηση του ρυθμού λαθών και υψηλές διασυμβολικές παρεμβολές.

Μια διαφορετική προσέγγιση στη λύση του ολοκληρώματος Fourier σε κλειστή μορφή υιοθετήθηκε από τον Forrer [14] για παλμικές μεταδόσεις μέσα σε κυματοδηγό. Η τεχνική αυτή, κατάλληλη για αυθαίρετο σχήμα γραμμής, υποθέτει ότι η συνάρτηση μεταφοράς του ατμοσφαιρικού καναλιού μπορεί να προσεγγιστεί από μια πολυωνυμική συνάρτηση της συχνότητας. Η εγκυρότητά της εξαρτάται από τη θεώρηση ότι υψηλότερης τάξεως όροι κατά την ανάλυση μπορούν να παραβλεφθούν. Παρότι η υπόθεση δεν ικανοποιείται αυστηρά κοντά στις γραμμές απορρόφησης, η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει την εξέταση πληθώρας φαινομένων που προκύπτουν από τη διασπορά, όπως για παράδειγμα η επιβολή διαμόρφωσης συχνότητας στη φέρουσα συχνότητα εσωτερικά στον παλμό και η αντίστοιχη μεταβολή στο φάσμα που προκύπτει από την εξαρτώμενη της συχνότητας ταχύτητα διάδοσης.

Αυτός ο τρόπος ανάλυσης επεκτάθηκε στο συνυπολογισμό απορρόφησης και διασποράς από τον Terina [15] για ιονοσφαιρικές ανακλάσεις παλμικών HF (3-6MHz) μεταδόσεων, και μετέπειτα εφαρμόστηκε σε μεταδόσεις οπτικής επαφής κοντά στα 55GHz από τον Medeiros Filho [16].

Στο παρόν εδάφιο ερευνάται το πρόβλημα της διάδοσης πολύ στενών παλμών μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα στο εύρος συχνοτήτων 10 με 60GHz. Η προσέγγιση που ακολουθείται στηρίζεται αφενός στο χιλιοστομετρικό μοντέλο διάδοσης του Liebe [7] για συνθήκες καθαρού ουρανού, αφετέρου στον συνυπολογισμό της επίδρασης της βροχής στη διαταραχή του παλμού. Η προτεινόμενη μοντελοποίηση κάνει χρήση εμπειρικών εκφράσεων του μιγαδικού πλάτους σκέδασης που προκύπτουν μέσω της μεθόδου των βοηθητικών πηγών και υπολογίζει τον μιγαδικό παράγοντα διάδοσης παρουσία βροχής. Η συνδυασμένη επίδραση βροχής και ατμοσφαιρικών αερίων εκτιμάται τόσο κοντά στις γραμμές απορρόφησης H_2O και O_2, όσο και στις συχνότητες των ατμοσφαιρικών παραθύρων διάδοσης. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε παλμούς Gauss προκειμένου να διαπιστωθεί η διεύρυνση ή συμπίεση που αυτοί υφίστανται.

Λίγες πειραματικές μελέτες των ατμοσφαιρικών επιδράσεων στη διάδοση του παλμού αναφέρονται στη βιβλιογραφία. Ο DeLange [17] έκανε μετρήσεις οπτικής επαφής με παλμούς 1watt στα 4GHz, με πλάτος 3dB παλμού 3ns, ενώ οι Linfield et al. [18] ανέφεραν μελέτες παλμών 10watt στα 9GHz, με εύρος 1ns. Οι Glutsyuk et al. [13] επιβεβαίωσαν πειραματικά την παλμική συμπίεση (της τάξεως του -12±4%) για παλμούς 0.5ns μεταδιδόμενους κατά μήκος 1.6km, στο κέντρο της γραμμής απορρόφησης του οξυγόνου στα 118.75GHz και την παλμική διεύρυνση (της τάξεως του 6±4%) σε μια φέρουσα συχνότητα πλησίον της γραμμής απορρόφησης.

5.2 ΠΑΛΜΟΙ ΕΥΡΕΟΣ ΦΑΣΜΑΤΟΣ UWB

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια εκτενέστερη αναφορά στους παλμούς ευρέος φάσματος UWB, των οποίων τα προβλήματα διάδοσης θα μελετήσουμε στη συνέχεια. Ο ακριβής ορισμός ενός συστήματος UWB απαιτεί το εύρος ζώνης 10-dB να είναι μεγαλύτερο του 25% της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας. Συνήθως στα UWB συστήματα η κεντρική συχνότητα ξεπερνά τα 6GHz, οπότε αρκεί το εύρος ζώνης 10-dB να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από 1.5GHz [19].

Τα συστήματα UWB στηρίζονται κατά κύριο λόγο σε παλμικές κυματομορφές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης. Το μεταδιδόμενο σήμα αποτελείται από μια ακολουθία πολύ στενών παλμών στη βασική ζώνη, της τάξεως των nanosecond. Κάθε εκπεμπόμενος παλμός αναφέρεται σαν μονόκυκλος (monocycle) και η πληροφορία που κουβαλά βρίσκεται είτε στη θέση είτε στο πλάτος του παλμού. Στο πεδίο της συχνότητας το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αυξάνει όσο στενεύει η χρονική διάρκεια των παλμών, με αποτέλεσμα να παίρνουμε τελικά σήματα εύρους αρκετών GHz.

Το φασματικό περιεχόμενο ενός UWB σήματος εξαρτάται από το σχήμα της παλμικής κυματομορφής και το πλάτος του παλμού [20]. Τυπικές κυματομορφές που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι ο ορθογωνικός μονόκυκλος (rectangular monocycle), ο Γκαουσσιανός μονόκυκλος (Gaussian monocycle), ο μονόκυκλος ζεύγους Γκαουσσιανών παλμών (Gaussian doublet) και ο μονόκυκλος Rayleigh (Rayleigh monocycle) [21]. Στην ιδανική περίπτωση κάθε μονόκυκλος πρέπει να έχει μηδενική DC συνιστώσα και στο πεδίο της συχνότητας να είναι επίπεδος κατά μήκος δεδομένου εύρους ζώνης που δεν περιλαμβάνει τη μηδενική συχνότητα.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι πιο τυπικές UWB κυματομορφές. Ο ορθογωνικός μονόκυκλος p_R, με εύρος T_p και μοναδιαία ενέργεια είναι η απλούστερη μορφή παλμού, που υλοποιείται με τη βοήθεια της βηματικής συνάρτησης $U(\cdot)$. Παρότι χρήσιμος για ερευνητικούς σκοπούς, δεν προτιμάται στην πράξη λόγω της ισχυρής DC συνιστώσας του.

$$p_R(t) = \sqrt{\frac{1}{T_p}}\left[U(t) - U(t - T_p)\right] \tag{5.1}$$

Ο Γκαουσσιανός μονόκυκλος p_G είναι η δεύτερη παράγωγος ενός παλμού Gauss p_g, μέσης τιμής μ και τυπικής απόκλισης σ.

$$p_g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \tag{5.2}$$

Το χρονικό εύρος της παλμικής κυματομορφής που περιέχει 99.99% της ολικής ενέργειας του μονοκύκλου είναι $T_p = 7\sigma$ με κέντρο στο σημείο $\mu = 3.5\sigma$. Ο παράγοντας A_G καθορίζεται ώστε η ολική ενέργεια του μονοκύκλου να κανονικοποιείται στη μονάδα, δηλ. $\int p_G{}^2(t)\,dt = 1$.

$$p_G(t) = A_G\left[1-\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right]\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \tag{5.3}$$

Το φάσμα του Γκαουσσιανού μονόκυκλου προκύπτει,

$$P_G(f) = A_G\sqrt{2\pi}\,\sigma\,(2\pi\sigma f)^2 \exp\left[-\frac{1}{2}(2\pi\sigma f)^2\right]\exp(-j\,2\pi f\,\mu) \tag{5.4}$$

Ο μονόκυκλος ζεύγους Γκαουσσιανών παλμών είναι ένα διπολικό σήμα που αποτελείται από δύο ανεστραμμένους παλμούς Gauss με ενδιάμεση καθυστέρηση T_w. Για $T_w = 7\sigma$ το εύρος που περιέχει 99.99% της ολικής ενέργειας είναι $T_p = 14\sigma$. Η μαθηματική έκφραση του μονοκύκλου είναι,

$$p_{GD}(t) = A_{GD}\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] - \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu-T_w}{\sigma}\right)^2\right]\right\} \tag{5.5}$$

και ο αντίστοιχος μετασχηματισμός Fourier που καθορίζει το φάσμα του παλμού προκύπτει,

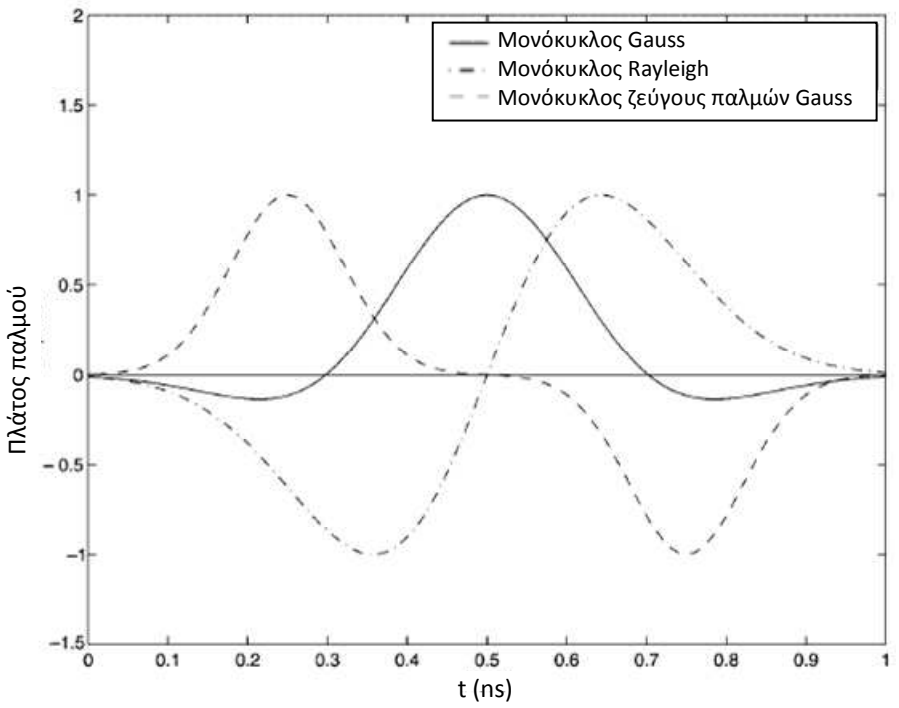
$$\begin{aligned} P_{GD}(f) = 2\,A_{GD}\sqrt{2\pi}\,\sigma\sin(\pi f T_w)\exp\left[-\frac{1}{2}(2\pi\sigma f)^2\right]\times \\ \times\exp\{-j\left[2\pi f\left(\mu+0.5T_w\right)-0.5\pi\right]\} \end{aligned} \tag{5.6}$$

Τέλος, ο μονόκυκλος Rayleigh προκύπτει από την πρώτη παράγωγο ενός παλμού Gauss. Όπως στον Γαουσσιανό μονόκυκλο, το εύρος $T_p = 7\sigma$ κεντραρισμένο στο σημείο $\mu = 3.5\sigma$ περιέχει 99.99% της ολικής ενέργειας της κυματομορφής.

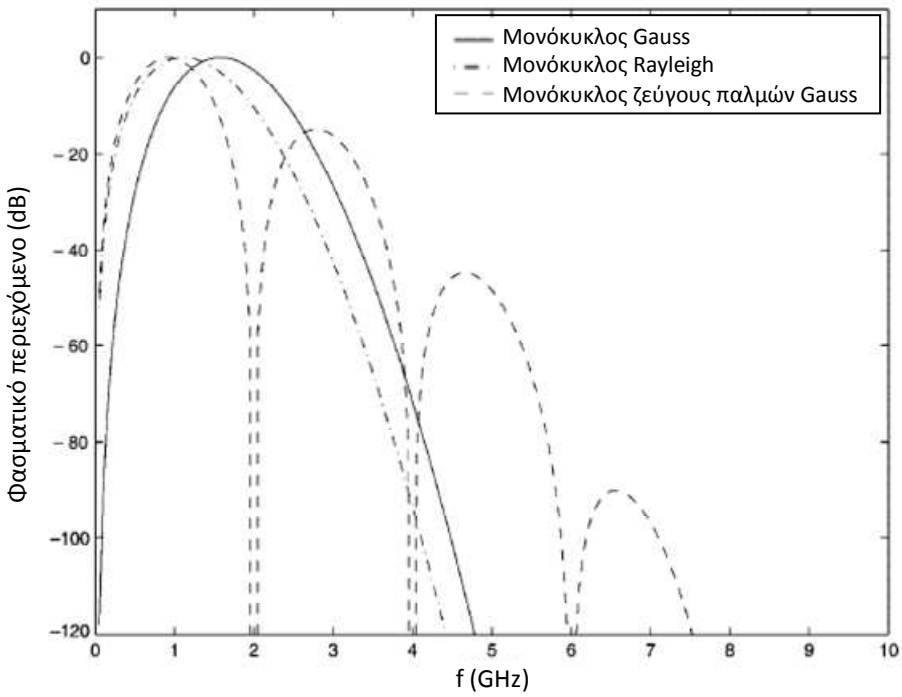
$$p_R(t) = A_R\left(\frac{t-\mu}{\sigma^2}\right)\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \tag{5.7}$$

Στο πεδίο της συχνότητας,

$$P_R(f) = A_R\sqrt{2\pi}\,(2\pi\sigma f)\exp\left[-\frac{1}{2}(2\pi\sigma f)^2\right]\exp[-j\,(2\pi f\,\mu+0.5\pi)] \tag{5.8}$$



(α)



(β)

Σχήμα 5.1: Γκαουσσιανός μονόκυκλος, μονόκυκλος Rayleigh, μονόκυκλος ζεύγους Γκαουσσιανών παλμών με $T_p = 1ns$ και $T_w = 0.5ns$ (α) Κυματομορφές στο πεδίο του χρόνου, (β) Φασματικό περιεχόμενο.

Το Σχήμα 5.1 παρουσιάζει τους μονόκυκλους UWB και το φάσμα τους σε dB, όπου οι μέγιστες τιμές έχουν κανονικοποιηθεί στη μονάδα και στα 0dB αντιστοίχως. Το εύρος

ζώνης 10-dB ορίζεται ως $B_{10dB} = f_H - f_L$, όπου f_H και f_L οι συχνότητες με τιμή φάσματος στο $1/\sqrt{10}$ της μέγιστης, και η κεντρική συχνότητα είναι $f_c = (f_H + f_L)/2$. Στον Πίνακα 5.1 φαίνεται το εύρος ζώνης 10-dB και η κεντρική συχνότητα των μονοκύκλων, όπου $T_w = T_p/2$ για τον μονόκυκλο ζεύγους Γκαυσσιανών παλμών. Παρατηρούμε ότι ο τελευταίος έχει πολύ μεγαλύτερη εκτός ζώνης ακτινοβολία, παρότι το εύρος ζώνης 10-dB είναι μειωμένο.

Πίνακας 5.1: Εύρος ζώνης 10-dB και κεντρική συχνότητα UWB μονοκύκλων.

Μονόκυκλος	B_{10dB}	f_c
Gaussian	$1.11/T_p$	$1.61/T_p$
Rayleigh	$1.11/T_p$	$1.16/T_p$
Gaussian doublet	$0.83/T_p$	$0.94/T_p$

Η μετάδοση των κυματομορφών που αναφέρονται παραπάνω στηρίζεται στις τεχνικές απλωμένου φάσματος, ευθείας ακολουθίας (direct sequence spread spectrum, DS-SS) ή αναπήδησης συχνότητας (time hopping spread spectrum, TH-SS). Τα δεδομένα της πληροφορίας κωδικοποιούνται στην ακολουθία των παλμών, μεταβάλλοντας είτε τη θέση των παλμών (pulse position modulation, PPM), είτε το πλάτος τους (pulse amplitude modulation, PAM), δίνοντας έτσι τέσσερις πιθανούς συνδυασμούς. Σε κάθε περίπτωση ένα bit πληροφορίας "απλώνεται" σε πολλούς μονόκυκλους, γεγονός που επιτυγχάνει κέρδος επεξεργασίας (processing gain) στο σημείο λήψης.

5.3 Προβλήματα Ατμοσφαιρικής Διαδοσης Παλμων

Η ευρυζωνική φύση της τεχνολογίας UWB παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων, όπως αυτά που παρουσιάστηκαν στην αρχή του Κεφαλαίου, ωστόσο πολλές είναι και οι τεχνικές προκλήσεις που προκύπτουν κυρίως από την επίδραση της γήινης ατμόσφαιρας στη διάδοση της υψίσυχνης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Σε συχνότητες χαμηλότερες των 10GHz, ο λόγος της ισχύος λήψης P_r προς την ισχύ εκπομπής P_t για μια ζεύξη οπτικής επαφής, μήκους d και συχνότητας f, δίνεται από την εξίσωση του Friis [22,23],

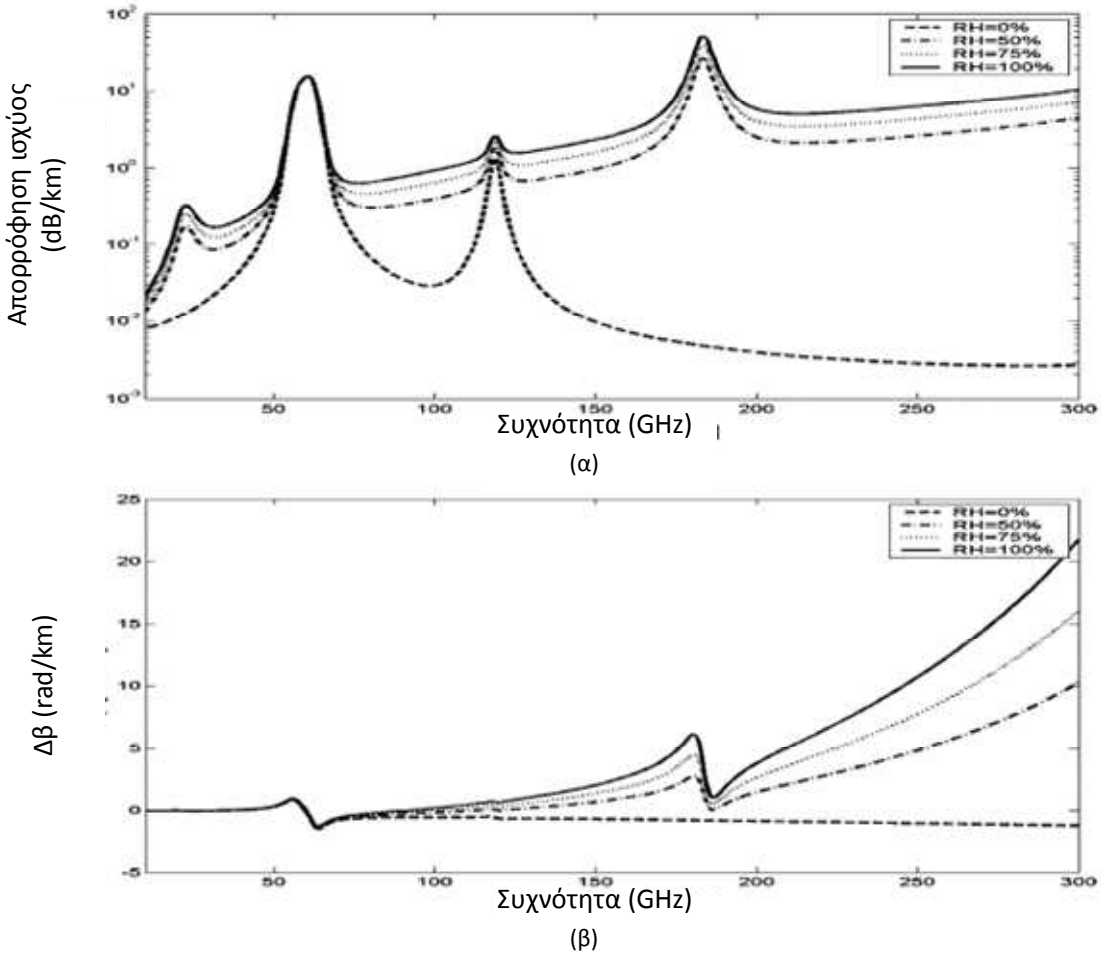
$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \, G_r \left(\frac{c}{4 \, \pi \, f \, d} \right)^2 \tag{5.9}$$

όπου G_t, G_r τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης και c ($\cong 3 \cdot 10^8$m/sec) η ταχύτητα του φωτός. Ο παραπάνω τύπος περιγράφει τη διάδοση των ραδιοκυμάτων με κύρια αιτία υποβιβασμού της ισχύος τις απώλειες ελευθέρου χώρου λόγω περίθλασης. Αντιθέτως, σε υψηλότερες συχνότητες λειτουργίας, μεγάλης σημασίας είναι η απορρόφηση και η διασπορά που υφίσταται το ευρυζωνικό σήμα από ποικίλους ατμοσφαιρικούς μηχανισμούς [24,25].

Εξετάζουμε λοιπόν τα προβλήματα που ανακύπτουν όταν οι παλμοί UWB διαδίδονται μέσα από τη γήινη ατμόσφαιρα. Λόγω του πολύ μεγάλου εύρους ζώνης τους, παύει να είναι δυνατή η θεώρηση σταθερού παράγοντα διάδοσης (propagation factor) και επιβάλλεται να ληφθεί υπόψη η εξάρτησή του από τη συχνότητα. Το μεταδιδόμενο σήμα, που συχνά ανήκει στην EHF (30-300GHz) ζώνη, υπόκειται σε διαφορική απορρόφηση και διασπορά από τις τοπικές γραμμές συντονισμού του O_2 και του H_2O, και από το συνεχές φάσμα του ξηρού αέρα, των υδρατμών και των αιωρούμενων υδροσταγονιδίων. Η διασπορά εμφανίζεται άλλοτε με τη μορφή διεύρυνσης και άλλοτε συμπίεσης του παλμού και μεγιστοποιείται στις περιοχές γύρω από τις γραμμές συντονισμού. Πέρα όμως από τις διαταραχές σε συνθήκες καθαρού ουρανού, ο παλμός επηρεάζεται επίσης από τους υδρομετεωρίτες, όπως η βροχή, τα σύννεφα και η ομίχλη. Ειδικότερα οι βροχοσταγόνες απορροφούν και σκεδάζουν την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, προκαλώντας περαιτέρω μεταβολές στο σήμα. Έτσι, καθώς διαδοχικοί παλμοί διαδίδονται στο ατμοσφαιρικό μέσο, ενδέχεται να προκληθούν φαινόμενα ενδοσυμβολικής παρεμβολής ή αύξηση του ρυθμού λαθών.

Όπως προείπαμε στο Κεφάλαιο 3, ο Liebe [7] έχει αναπτύξει ένα μοντέλο χιλιοστομετρικών κυμάτων (Millimeter-wave Propagation Model, MPM) για την πρόβλεψη παραμέτρων διάδοσης καθαρού ουρανού από μετεωρολογικές μεταβλητές πίεσης, θερμοκρασίας και υγρασίας. Το μοντέλο αυτό, που αποτιμά τη μιγαδική διαθλαστικότητα του αέρα και υπολογίζει χαρακτηριστικά απόσβεσης και καθυστέρησης για συχνότητες έως 1000GHz, εφαρμόζεται στην περίπτωση των παλμικών μεταδόσεων UWB. Στο Σχήμα 2 φαίνονται καμπύλες που έχουν προκύψει από το μοντέλο MPM για διάφορες τιμές σχετικής υγρασίας (Relative Humidity, RH), υποθέτοντας καθαρό ουρανό και απουσία βροχής. Τοπικά μέγιστα απόσβεσης παρατηρούνται στα 22 και 183GHz, που αντιστοιχούν στις γραμμές απορρόφησης του νερού, καθώς και στα 60 και 119GHz, όπου είναι οι γραμμές απορρόφησης του οξυγόνου. Στο ενδιάμεσο αυτών των συχνοτήτων, παρατηρείται

ελάχιστη απόσβεση στις συχνότητες 35 (Ka ζώνη), 94 (W ζώνη), 130 και 220GHz, συχνότητες γνωστές και ως ατμοσφαιρικά "παράθυρα" διάδοσης [24].



Σχήμα 5.2: Μοντέλο διάδοσης χιλιοστομετρικών κυμάτων MPM.

(α) Συντελεστής απορρόφησης, (β) Συντελεστής καθυστέρησης φάσης.

Ο Gibbins [26] μοντελοποίησε τη διάδοση Γκαουσσιανών παλμών μικρότερων του 1ns για συχνότητες 10-200GHz και συνθήκες καθαρού ουρανού, κάνοντας χρήση του μοντέλου MPM. Οι Pinhasi et al. [27] παρουσίασαν μια παρόμοια προσέγγιση για την περιγραφή της διάδοσης πολύ στενών παλμών διαμορφωμένων κατά πλάτος (PAM), με έμφαση στην περιοχή των 60GHz.

Από την άλλη μεριά οι Maitra et al. [28,29] μελέτησαν το πρόβλημα της συνεισφοράς της βροχής κατά τη μετάδοση πολύ στενών παλμών και πρότειναν μια μεθοδολογία συνδυασμού επιπτώσεων βροχής και αερίων. Συγκεκριμένα, θεώρησαν ότι ο εξαρτώμενος από τη συχνότητα παράγοντας διάδοσης αποτελείται από δύο προσθετέους, έναν για συνθήκες καθαρού ουρανού και έναν για μέσο βροχής. Η συνιστώσα βροχής είναι συνάρτηση του πλάτους σκέδασης, για τον υπολογισμό του οποίου οι Maitra et al. [28,29]

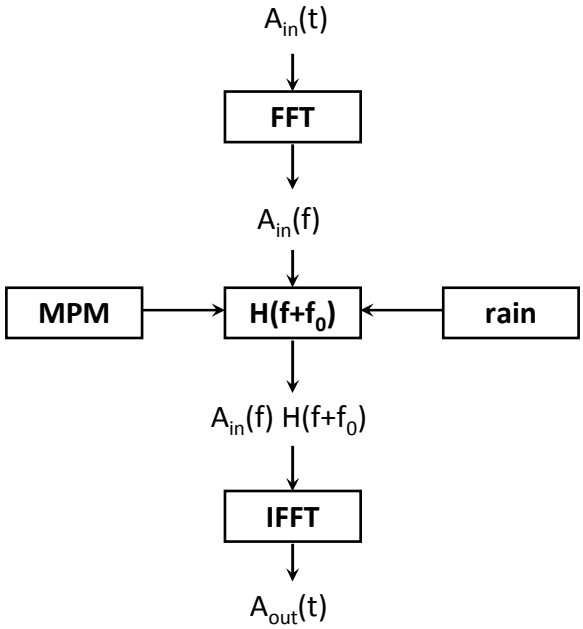
υιοθέτησαν την κλασική θεωρία Mie-Stratton [30] με σφαιρικό σχήμα σταγόνων. Στο [29] παρουσιάζονται αριθμητικά αποτελέσματα των διαταραχών που παθαίνει ένας UWB παλμός με συχνότητα φέροντος 30GHz κατά τη διάδοση σε μέσο βροχής.

Στο παρόν Κεφάλαιο εφαρμόζεται μια διαδικασία πολυωνυμικής προσέγγισης για την παραγωγή εμπειρικών εκφράσεων του μιγαδικού πλάτους σκέδασης από τα αποτελέσματα της μεθόδου MAS στο πρόβλημα σκέδασης ηλεκτρομαγνητικού κύματος από μη σφαιρική σταγόνα βροχής [31], κατά τρόπο ανάλογο με τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στο Κεφάλαιο 4. Το πραγματικό και φανταστικό μέρος του πλάτους σκέδασης χρησιμοποιείται κατόπιν για τον υπολογισμό της συνιστώσας βροχής του παράγοντα διάδοσης κατά την εκπομπή ενός πολύ στενού Γκαουσσιανού παλμού. Παράλληλα η συνιστώσα καθαρού ουρανού του παράγοντα διάδοσης προκύπτει από την υλοποίηση του μοντέλου MPM. Έτσι τελικά εξετάζεται η συνδυασμένη ολική ατμοσφαιρική επίδραση στον παλμό, για όλο το εύρος συχνοτήτων από 10 έως 60GHz, και εκτιμάται η σπουδαιότητα της συνεισφοράς της βροχόπτωσης.

5.4 ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ

5.4.1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Έστω σήμα πληροφορίας με μιγαδική περιβάλλουσα $A_{in}(t)$. Το σήμα αυτό διαμορφώνει φέρον κύμα συχνότητας f_0, που στη συνέχεια εκπέμπεται από τον πομπό κατά μήκος ζεύξης οπτικής επαφής προς τον δέκτη. Στο κύμα επιδρά το ατμοσφαιρικό μέσο διάδοσης, ενώ τελικά το ληφθέν σήμα στον δέκτη αποδιαμορφώνεται ώστε να αναπαραχθεί η αρχική πληροφορία. Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στην ατμόσφαιρα μπορεί συνεπώς να διατυπωθεί σαν ένας μετασχηματισμός μέσα από ένα σύστημα, και η ατμόσφαιρα να μοντελοποιηθεί από μια συνάρτηση μεταφοράς $H(f)$. Το Σχήμα 5.3 αναπαριστά τη διαδικασία υπολογισμού των αποδιαμορφωμένων κυμάτων στο δέκτη ενός ασύρματου τηλεπικοινωνιακού καναλιού, όπου για την ατμοσφαιρική συνάρτηση μεταφοράς χρειάζεται να ληφθούν υπόψη τόσο το χιλιοστομετρικό μοντέλο διάδοσης MPM όσο και ο παράγοντας της βροχόπτωσης.



Σχήμα 5.3: Μοντέλο διάδοσης σήματος μέσα από το ατμοσφαιρικό σύστημα.

Μια γενική έκφραση για τη συνάρτηση μεταφοράς της ατμόσφαιρας είναι η εξής [27].

$$H(f) = \frac{d_0}{d_0 + d} \exp\left[-j\, k(f)\, d\right] \tag{5.10}$$

Στη σχέση (5.10) d_0 είναι μια απόσταση αναφοράς στο μακρινό πεδίο της κεραίας εκπομπής και d η απόσταση που διανύει ο παλμός. Με k συμβολίζεται ο παράγοντας διάδοσης, που εξαρτάται από τη συχνότητα f και αναλύεται σε δύο συντελεστές, το συντελεστή εξασθένησης α και το συντελεστή καθυστέρησης φάσης β.

$$k(f) = \beta(f) - j\, \alpha(f) \tag{5.11}$$

Θεωρώντας τόσο απορρόφηση και διασπορά λόγω ατμοσφαιρικών στοιχείων όσο και απορρόφηση και σκέδαση λόγω βροχής, οι παραπάνω συντελεστές αναλύονται περαιτέρω σε δύο προσθετέους [29], τις συνιστώσες καθαρού ουρανού (clear sky) $\alpha_c(f)$, $\Delta\beta_c(f)$ καθώς και τις συνιστώσες βροχής (rain) $\alpha_r(f)$, $\Delta\beta_r(f)$.

$$\alpha(f) = \alpha_c(f) + \alpha_r(f) \tag{5.12}$$

$$\beta(f) = \frac{2\,\pi\, f}{c} + \Delta\beta(f) = \frac{2\,\pi\, f}{c} + \Delta\beta_c(f) + \Delta\beta_r(f) \tag{5.13}$$

Σύμφωνα με το χιλιοστομετρικό μοντέλο διάδοσης MPM του Liebe [7], οι συντελεστές εξασθένησης και καθυστέρησης φάσης για συνθήκες καθαρού ουρανού

μπορούν να προκύψουν από το μιγαδικό δείκτη διάθλασης $N = N_0 + N'(f) + j\,N''(f)$, (βλ. σχέσεις (3.61), (3.62)).

$$\alpha_c(f) = \frac{2\,\pi\,f}{c}\,N''(f) \tag{5.14}$$

$$\Delta\beta_c(f) = \frac{2\,\pi\,f}{c}\,N'(f) \tag{5.15}$$

Οι αντίστοιχες συνιστώσες βροχής δίνονται από τη σχέση [28,29],

$$\alpha_r(f) + j\,\Delta\beta_r(f) = \lambda \int_{\bar{a}_{\min}}^{\bar{a}_{\max}} SA(\bar{a}, f)\, n(\bar{a})\, d\bar{a} \tag{5.16}$$

όπου λ (m) το μήκος κύματος ακτινοβολίας, SA το πλάτος σκέδασης (scattering amplitude) εξαρτώμενο από πόλωση, συχνότητα και ισοδύναμη ακτίνα σταγόνας βροχής και $n(\bar{a})$ η κατανομή μεγέθους σταγόνας. Για την τελευταία υιοθετούμε την κατανομή Marshall-Palmer [32] που δόθηκε στις σχέσεις (4.8)-(4.10).

Τιμές για το πλάτος σκέδασης σε επίγειες ζεύξεις προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου MAS για σταγόνες βροχής ισοδύναμης ακτίνας 0.025 έως 0.350cm και συχνότητες 10 έως 60GHz [31]. Η διαδικασία πολυωνυμικής προσέγγισης στις παραπάνω τιμές οδηγεί τελικά σε μια εμπειρική πολυωνυμική έκφραση για το πλάτος σκέδασης, της μορφής,

$$SA(\bar{a}_m, f) \cong \sum_{n=0}^{8} p_{m,n}\, f^n + j \sum_{n=0}^{8} q_{m,n}\, f^n \;,\; m = 0,1,2,\ldots,13 \tag{5.17}$$

όπου η συχνότητα f είναι σε GHz και οι ακτίνες της ισόογκης με τη σταγόνα σφαίρας σε cm κυμαίνονται στο παρακάτω εύρος.

$$\bar{a}_m = 0.025\,(m+1)\;,\; m = 0,1,2,\ldots,13 \tag{5.18}$$

Μερικές ενδεικτικές τιμές των συντελεστών $p_{m,n}$ και $q_{m,n}$ φαίνονται στον Πίνακα 5.2 για οριζόντια πόλωση και ακτίνες σταγόνας την ελάχιστη δυνατή (0.025cm), μια ενδιάμεση (0.200cm) και τη μέγιστη δυνατή (0.350cm). Η πλήρης λίστα των συντελεστών τόσο για οριζόντια όσο και για κατακόρυφη πόλωση δίνεται στο Παράρτημα Ε.

Πίνακας 5.2: Αντιπροσωπευτικές τιμές των πολυωνυμικών συντελεστών $p_{m,n}$, $q_{m,n}$ του μιγαδικού πλάτους σκέδασης για m = 0, 7, 13.

	$\overline{a}_0$ = 0.025 cm		$\overline{a}_7$ = 0.200 cm		$\overline{a}_{13}$ = 0.350 cm	
n	$p_{0,n}$	$q_{0,n}$	$p_{7,n}$	$q_{7,n}$	$p_{13,n}$	$q_{13,n}$
0	1.521	-1.653e-1	19771.649	1667.914	-3229.888	56720.225
1	-4.821e-1	3.416e-2	-6527.796	-1325.074	2477.684	-17198.379
2	6.996e-2	-2.912e-3	869.749	283.859	-435.996	2099.481
3	-4.553e-3	1.742e-4	-60.281	-27.895	36.693	-140.583
4	1.968e-4	-1.058e-5	2.417	1.443	-1.738	5.610
5	-5.213e-6	3.727e-7	-5.824e-2	-4.242e-2	4.869e-2	-1.372e-1
6	8.271e-8	-7.576e-9	8.321e-4	7.137e-4	-7.990e-4	2.015e-3
7	-7.197e-10	7.920e-11	-6.499e-6	-6.406e-6	7.096e-6	-1.631e-5
8	2.634e-12	-3.300e-13	2.138e-8	2.380e-8	-2.631e-8	5.598e-8

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω προσεγγίσεις και τον κανόνα του τραπεζίου για τον αριθμητικό υπολογισμό του ολοκληρώματος (5.16), καταλήγουμε σε μια απλουστευμένη έκφραση των συνιστωσών βροχής των συντελεστών εξασθένησης και καθυστέρησης φάσης.

$$\alpha_r(f) + j\,\Delta\beta_r(f) \cong \lambda \frac{\overline{a}_{13} - \overline{a}_0}{2 \cdot 13} \Big[SA(\overline{a}_0, f)\, n(\overline{a}_0) + \\ + 2 \sum_{k=1}^{12} SA(\overline{a}_k, f)\, n(\overline{a}_k) + SA(\overline{a}_{13}, f)\, n(\overline{a}_{13}) \Big] \tag{5.19}$$

5.4.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΠΟΛΥ ΣΤΕΝΟΥ ΓΚΑΟΥΣΣΙΑΝΟΥ ΠΑΛΜΟΥ

Το UWB σήμα που μελετάται στη συνέχεια είναι ένας παλμός Gauss με τυπική απόκλιση σ_{in} της τάξεως των nsec.

$$A_{in}(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\,\sigma_{in}{}^2}\right) \tag{5.20}$$

Στο πεδίο της συχνότητας, ο μετασχηματισμός Fourier του $A_{in}(t)$ προκύπτει,

$$A_{in}(f) = \sqrt{2\,\pi}\;\sigma_{in}\;\exp\left(-2\,\pi^2\;\sigma_{in}{}^2\;f^2\right) \tag{5.21}$$

Θεωρούμε ότι ο αρχικός παλμός διαμορφώνει ένα φέρον συχνότητας f_0. Το διαμορφωμένο σήμα, που έχει τη μορφή,

$$E_{in}(t) = \mathrm{Re}\{A_{in}(t)\exp(j\,2\,\pi\,f_0\,t)\} \tag{5.22}$$

μεταδίδεται κατά μήκος του ραδιοδρόμου και μπορεί να ληφθεί ως είσοδος στο ατμοσφαιρικό σύστημα με συνάρτηση μεταφοράς την $H(f)$. Ο μετασχηματισμός Fourier του μεταδιδόμενου σήματος είναι,

$$E_{in}(f) = \frac{1}{2}A_{in}(f - f_0) + \frac{1}{2}A_{in}^*[-(f + f_0)] \tag{5.23}$$

Συνεπώς το ληφθέν σήμα στο άλλο άκρο της ζεύξης αναπαριστά την έξοδο του συστήματος.

$$\begin{aligned} E_{out}(f) &= E_{in}(f)H(f) = \\ &= \frac{1}{2}A_{in}(f - f_0)H(f) + \frac{1}{2}A_{in}^*[-(f + f_0)]H^*(-f) \end{aligned} \tag{5.24}$$

Καθώς τα $H(f)$, $A_{in}(f)$ είναι μετασχηματισμοί Fourier πραγματικών συναρτήσεων, ισχύει $H^*(-f) = H(f)$ και $A_{in}^*(-f) = A_{in}(f)$. Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier δίνει το διαμορφωμένο ληφθέν σήμα στο πεδίο του χρόνου.

$$E_{out}(t) = \mathrm{Re}\{A_{out}(t)\exp(j\,2\,\pi\,f_0\,t)\} \tag{5.25}$$

Αποδιαμορφώνοντας το $E_{out}(t)$ παίρνουμε το ευρυζωνικό σήμα εξόδου $A_{out}(t)$, που συνδέεται με το αρχικό Γκαουσσιανό $A_{in}(t)$ ως εξής [27].

$$A_{out}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A_{in}(f)\,H(f + f_0)\exp(j\,2\,\pi\,f\,t)\,df \tag{5.26}$$

Προκειμένου να αποτιμηθεί το $A_{out}(t)$, είναι χρήσιμη η ανάλυση του μιγαδικού παράγοντα διάδοσης σε σειρά Taylor γύρω από τη φέρουσα συχνότητα f_0, με τη βοήθεια των πρώτων και δευτέρων παραγώγων των συντελεστών a και b ως προς τη συχνότητα. Η προσέγγιση που γίνεται είναι δευτέρου βαθμού, εφόσον θεωρούμε αμελητέους τους μεγαλύτερης τάξης όρους της σειράς,

$$\alpha(f) \cong \alpha_0 + \alpha'(f - f_0) + \frac{\alpha''}{2}(f - f_0)^2 \tag{5.27}$$

$$\beta(f) \cong \beta_0 + \beta'(f - f_0) + \frac{\beta''}{2}(f - f_0)^2 \tag{5.28}$$

όπου

$$\left.\begin{aligned} \alpha_0 &\equiv \alpha(f_0), \quad \alpha' \equiv \left.\frac{\partial \alpha}{\partial f}\right|_{f_0}, \quad \alpha'' \equiv \left.\frac{\partial^2 \alpha}{\partial f^2}\right|_{f_0} \\ \beta_0 &\equiv \beta(f_0), \quad \beta' \equiv \left.\frac{\partial \beta}{\partial f}\right|_{f_0}, \quad \beta'' \equiv \left.\frac{\partial^2 \beta}{\partial f^2}\right|_{f_0} \end{aligned}\right\} \tag{5.29}$$

Η απόλυτη τιμή της συνάρτησης του παλμού μετά τη διάδοση μπορεί να γραφεί σε κλειστή μορφή, υπό την προϋπόθεση ότι ισχύει,

$$\mathrm{Re}\{\sigma^2\} > 0 \quad \Leftrightarrow \quad \sigma_{in}{}^2 + \frac{\alpha''}{(2\pi)^2} d > 0 \tag{5.30}$$

όπου

$$\sigma^2 = \sigma_{in}{}^2 + \frac{\alpha'' + j\beta''}{(2\pi)^2} d \tag{5.31}$$

και αποδεικνύεται ότι διατηρεί Γκαουσσιανό σχήμα.

$$|A_{out}(t)| = \frac{d_0}{d_0 + d} \frac{\sigma_{in}}{|\sigma|} \exp\left[-\alpha_0 d + \frac{1}{2} \frac{(\alpha' d)^2}{(2\pi\sigma_{in})^2 + \alpha'' d}\right] \exp\left[-\frac{(t - t_d)^2}{2\sigma_{out}{}^2}\right] \tag{5.32}$$

Η παράμετρος t_d συμβολίζει τη χρονική καθυστέρηση που εισάγει το κανάλι και η σ_{out} την τυπική απόκλιση του παλμού εξόδου. Με άλλα λόγια, αν ο αρχικός παλμός έχει το κέντρο του στην αρχή του άξονα των χρόνων, ο τελικός παλμός θα ληφθεί μετατοπισμένος (καθυστερημένος) κατά t_d. Επιπλέον, το εύρος του παλμού θα μεταβληθεί από σ_{in} σε σ_{out}, όπου ανάλογα με τη συχνότητα η τυπική απόκλιση εξόδου μπορεί να είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη του σ_{in}. Η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί σε διεύρυνση του παλμού και η δεύτερη σε συμπίεση αυτού, σχετικά με τον αρχικό παλμό εκπομπής. Οι εκφράσεις για τα t_d και σ_{out} αποδεικνύεται ότι είναι [14,15],

$$t_d = \frac{1}{2\pi}\left[\beta' - \frac{\alpha' \beta'' d}{(2\pi\sigma_{in})^2 + \alpha'' d}\right] d \tag{5.33}$$

$$\sigma_{out}{}^{2} = \sigma_{in}{}^{2} + \frac{\alpha'' d}{(2\pi)^2} + \frac{\left[\frac{\beta'' d}{(2\pi)^2}\right]^2}{\sigma_{in}{}^{2} + \frac{\alpha'' d}{(2\pi)^2}} \tag{5.34}$$

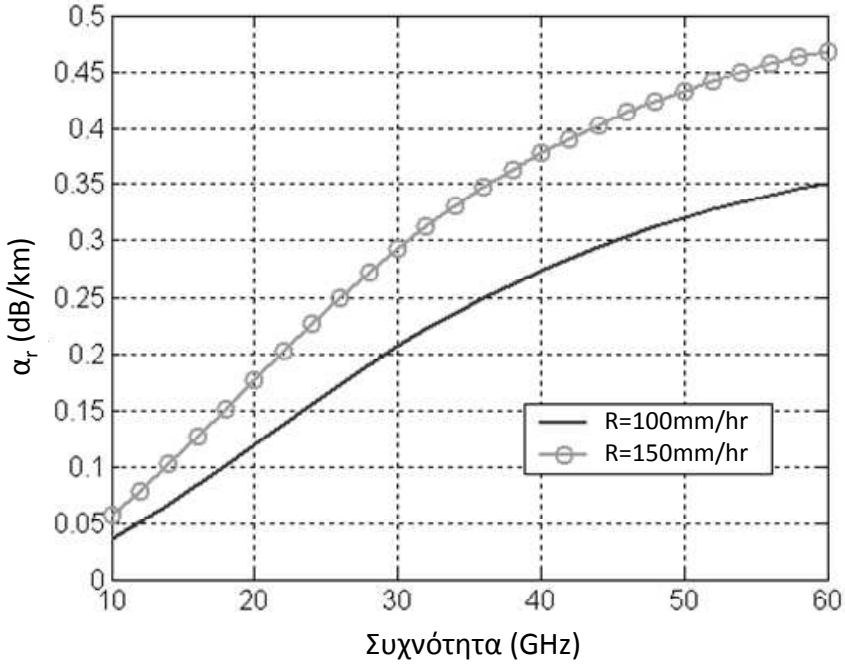
Τελικά η διαταραχή (distortion) εκφράζεται σαν ποσοστό μεταβολής του πλάτους του παλμού. Η ποσότητα αυτή είναι μεγάλης σημασίας στις μεταδόσεις ακολουθίας παλμών UWB καθώς φανερώνει αν υπάρχει παλμική επικάλυψη (overlapping). Όπως φαίνεται από τη σχέση (5.34), είναι συνάρτηση των δευτέρων παραγώγων, ως προς τη συχνότητα, των συντελεστών εξασθένησης και καθυστέρησης φάσης, ενώ επιπλέον εξαρτάται από το αρχικό πλάτος του παλμού και το μήκος της διαδρομής. Η διαταραχή του παλμού ορίζεται ως εξής.

Παλμική διαταραχή (%) $= \frac{\sigma_{out} - \sigma_{in}}{\sigma_{in}} 100\,\% =$

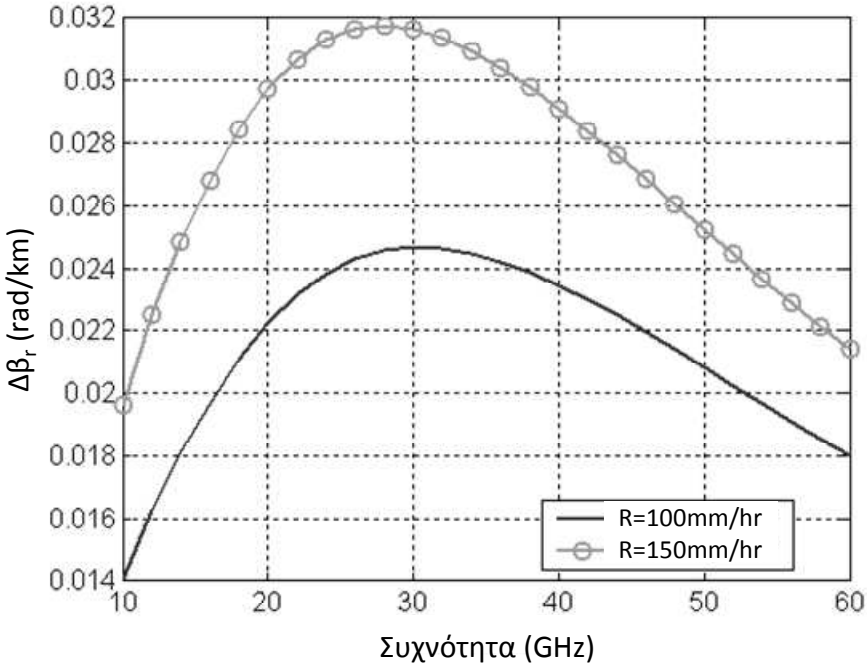
$$= \left(\sqrt{\frac{\left[1 + \frac{\alpha'' d}{(2\pi\sigma_{in})^2}\right]^2 + \left[\frac{\beta'' d}{(2\pi\sigma_{in})^2}\right]^2}{1 + \frac{\alpha'' d}{(2\pi\sigma_{in})^2}}} - 1 \right) 100\,\% \tag{5.35}$$

5.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μια πρώτη εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου γίνεται στη μελέτη της διάδοσης ενός παλμού Gauss με αρχικό εύρος 0.5ns και συχνότητα 60.5GHz, σε ατμοσφαιρικό μέσο παρουσία βροχής [33]. Στα Σχήματα 5.4 και 5.5 φαίνονται οι συνιστώσες βροχής του παράγοντα διάδοσης στο εύρος 10 ως 60GHz, σύμφωνα με τη μεθοδολογία της προηγούμενης ενότητας, για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση αντίστοιχα, για δύο τιμές της έντασης βροχόπτωσης (R=100mm/hr και 150mm/hr). Τόσο η εξασθένηση όσο και η καθυστέρηση φάσης εμφανίζουν αύξηση για υψηλότερους ρυθμούς βροχόπτωσης.

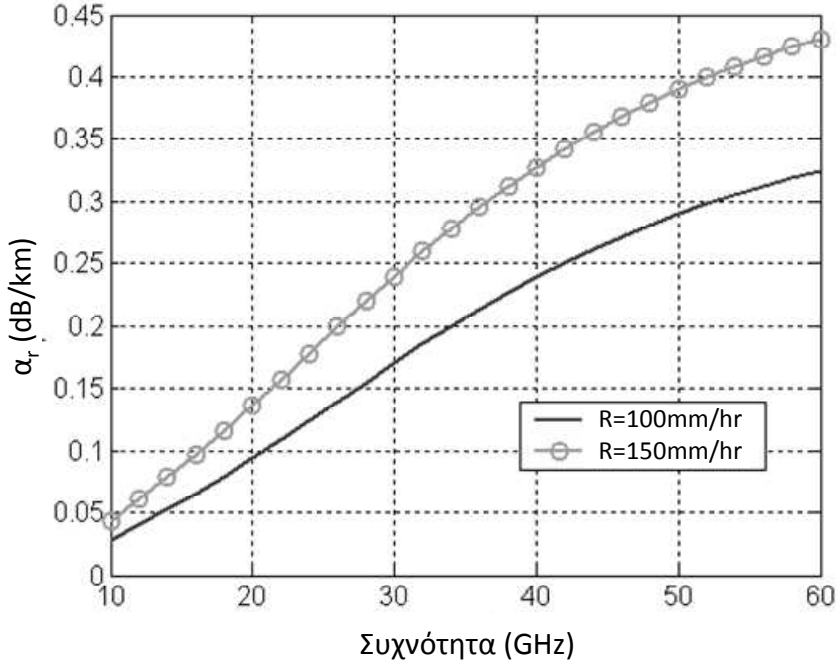


(α)

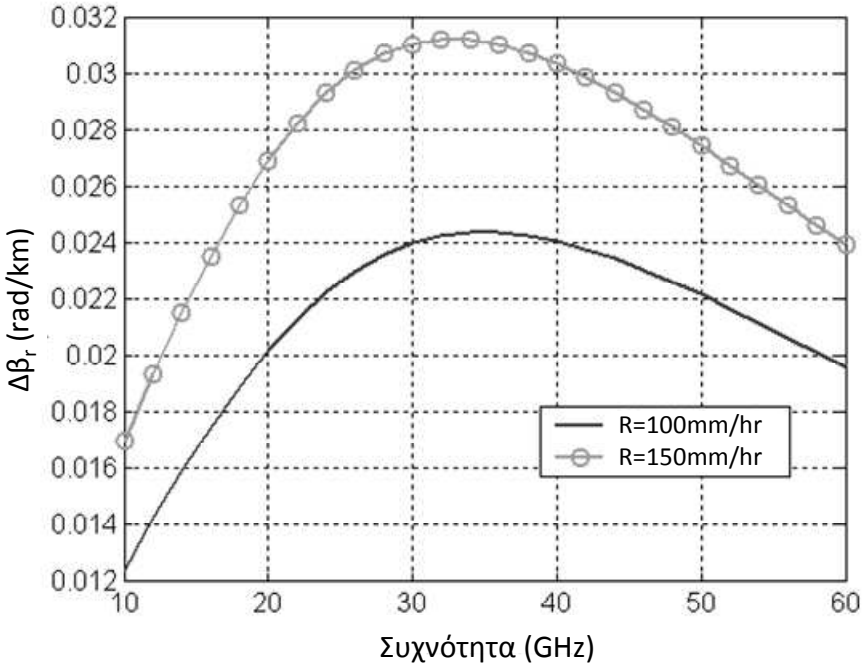


(β)

Σχήμα 5.4: Συνιστώσες βροχής των συντελεστών (α) εξασθένησης και (β) καθυστέρησης φάσης, στο εύρος 10-60GHz για οριζόντια πόλωση.



(α)



(β)

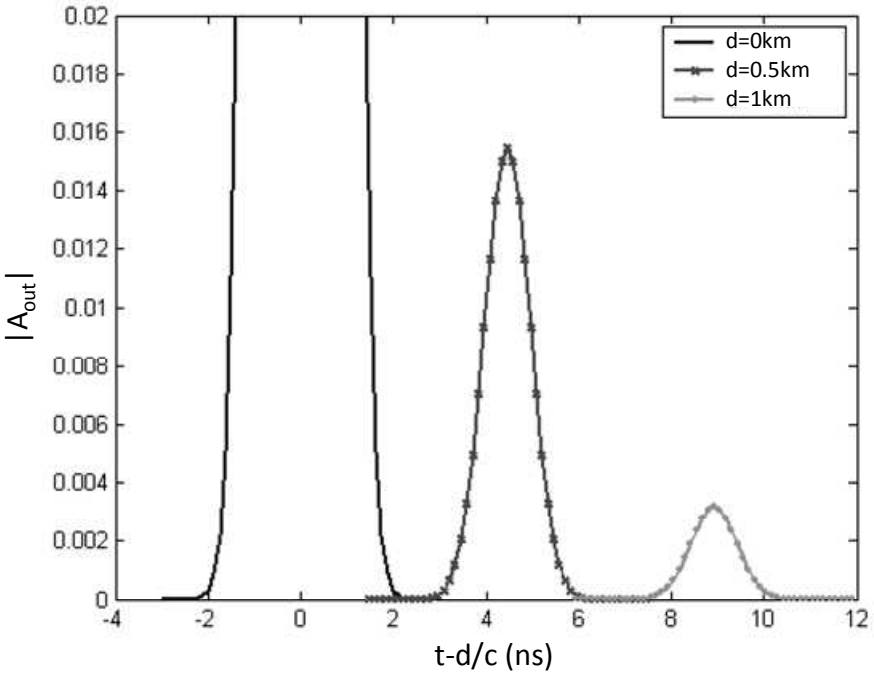
Σχήμα 5.5: Συνιστώσες βροχής των συντελεστών (α) εξασθένησης και (β) καθυστέρησης φάσης, στο εύρος 10-60GHz για κατακόρυφη πόλωση.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι συνιστώσες καθαρού ουρανού του παράγοντα διάδοσης σύμφωνα με το μοντέλο MPM και οι συνιστώσες βροχής για οριζόντια πόλωση και ρυθμό βροχόπτωσης 100mm/hr. Οι εν λόγω τιμές, μαζί με τις πρώτες και δεύτερες παραγώγους τους, δίνονται στον Πίνακα 5.3.

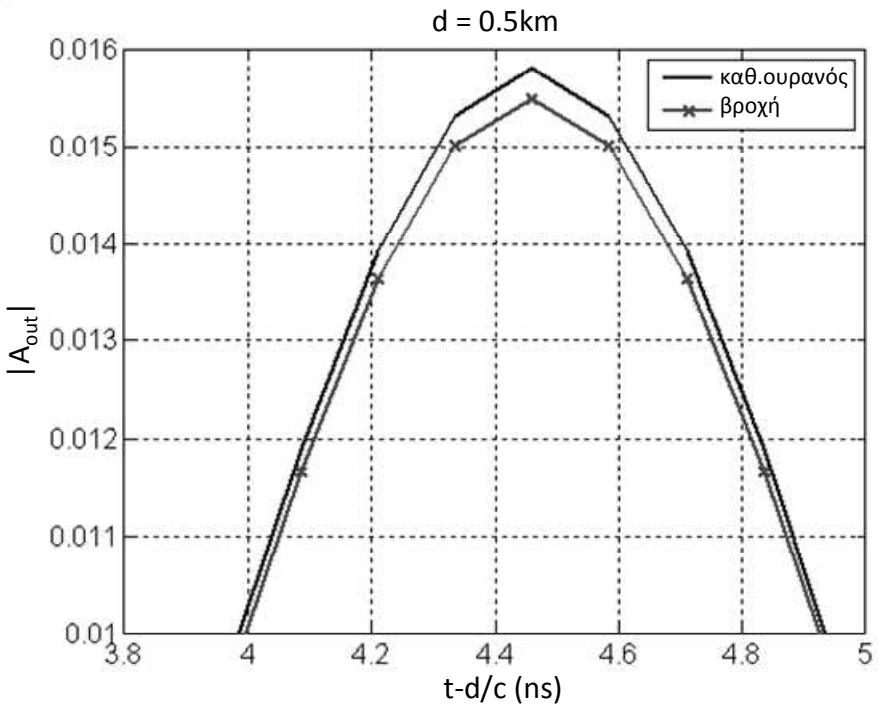
Πίνακας 5.3: Μιγαδικοί παράγοντες διάδοσης.

Συχνότητα $[GHz]$	**60.5**
$jk_c = a_c + j\Delta\beta_c \quad [1/km]$	1.79+ j 2890
$jk_r = a_r + j\Delta\beta_r \quad [1/km]$	0.04+j 0.017
$jk_c' = a_c' + j\Delta\beta_c' \quad [ns/km]$	0+j 56.05
$jk_r' = a_r' + j\Delta\beta_r' \quad [ns/km]$	(2.85-j 2.7) e-4
$jk_c'' = a_c'' + j\Delta\beta_c'' \quad [ns^2/km]$	-0.207-j 0.0484
$jk_r'' = a_r'' + j\Delta\beta_r'' \quad [ns^2/km]$	(7.34-j 1.58) e-6

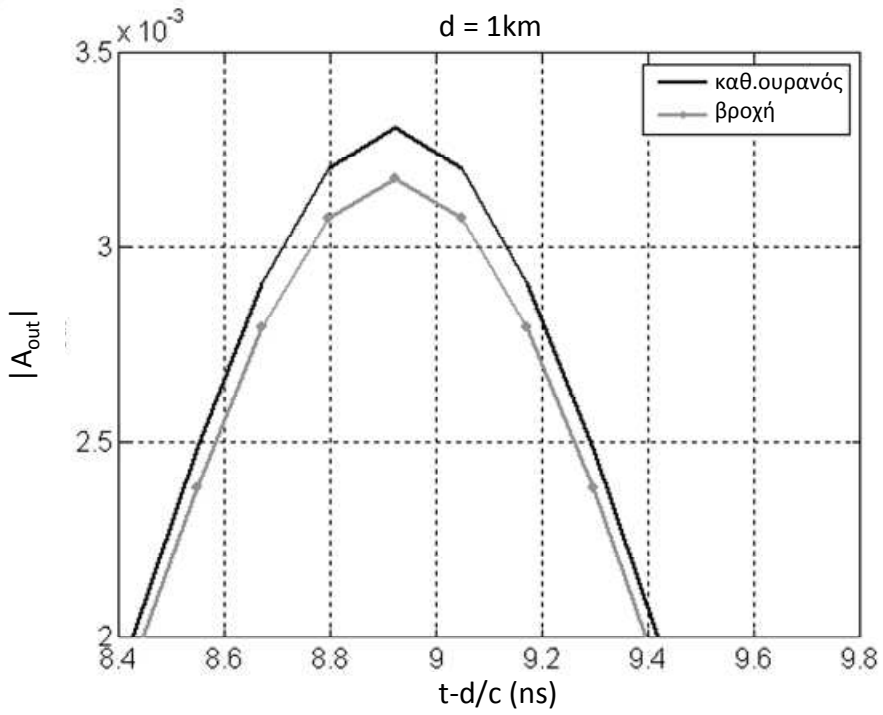
Τελικά με τη βοήθεια της σχέσης (5.32) είναι δυνατή η αναπαράσταση του πλάτους $|A_{out}(t)|$ του Γκαουσσιανού παλμού μετά από τη διάδοσή του κατά μήκος μιας διαδρομής 0.5 ή 1km διαμέσου της ατμόσφαιρας (Σχήμα 5.6). Τόσο η απόσβεση όσο και η καθυστέρηση του παλμού αυξάνεται με το μήκος της διαδρομής. Στα Σχήματα 5.7 και 5.8 έχει γίνει αντιπαράθεση της παλμικής διαταραχής για την περίπτωση καθαρού ουρανού και για την παρουσία βροχής. Για λόγους ευκρίνειας, έχει σχεδιαστεί μόνο το ανώτερο τμήμα του παλμού, το τελικό πλάτος του οποίου εμφανίζεται ελαφρώς συμπιεσμένο $(\sigma_{out} < \sigma_{in})$. Καθώς η συχνότητα λειτουργίας (60.5GHz) βρίσκεται πολύ κοντά στη γραμμή συντονισμού του οξυγόνου (60GHz), κυρίαρχος παράγοντας της παλμικής διαταραχής είναι η μοριακή απορρόφηση, μπροστά στην οποία η συνεισφορά της βροχής δεν εμφανίζεται σημαντική. Ανάλογη συμπεριφορά αναμένεται σε όλες τις συχνότητες που γειτνιάζουν με τις γραμμές απορρόφησης των αερίων, ενώ αντιθέτως η σπουδαιότητα των επιπτώσεων της βροχής τείνει να αυξάνει στις περιοχές των ατμοσφαιρικών “παραθύρων” διάδοσης, όπου τα φαινόμενα καθαρού ουρανού είναι ηπιότερα.



Σχήμα 5.6: Διάδοση Γκαουσσιανού παλμού για οριζόντια πόλωση και ρυθμό βροχόπτωσης 100mm/hr.



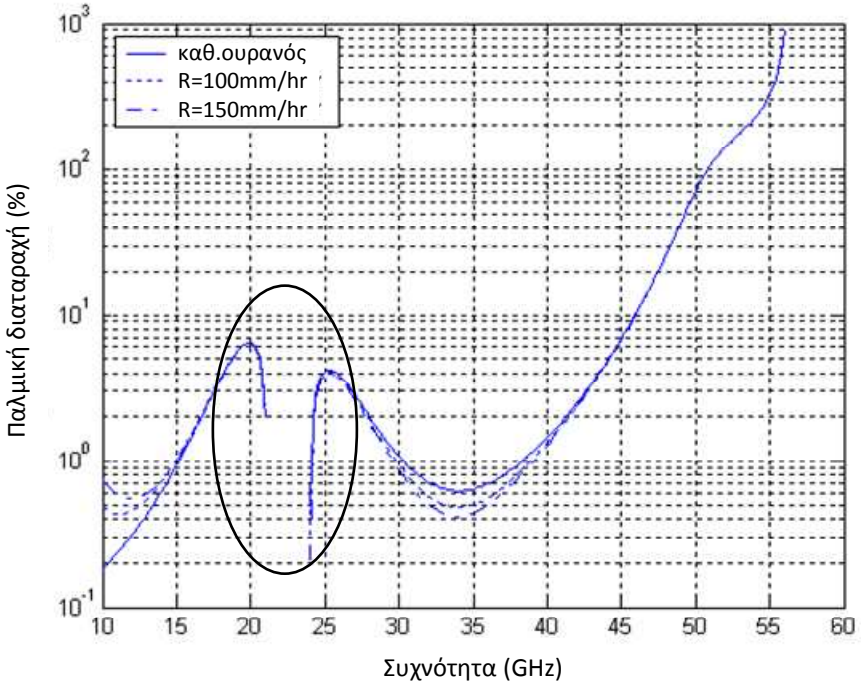
Σχήμα 5.7: Πλάτος του Γκαουσσιανού παλμού μετά από διάδοση κατά μήκος 0.5km.



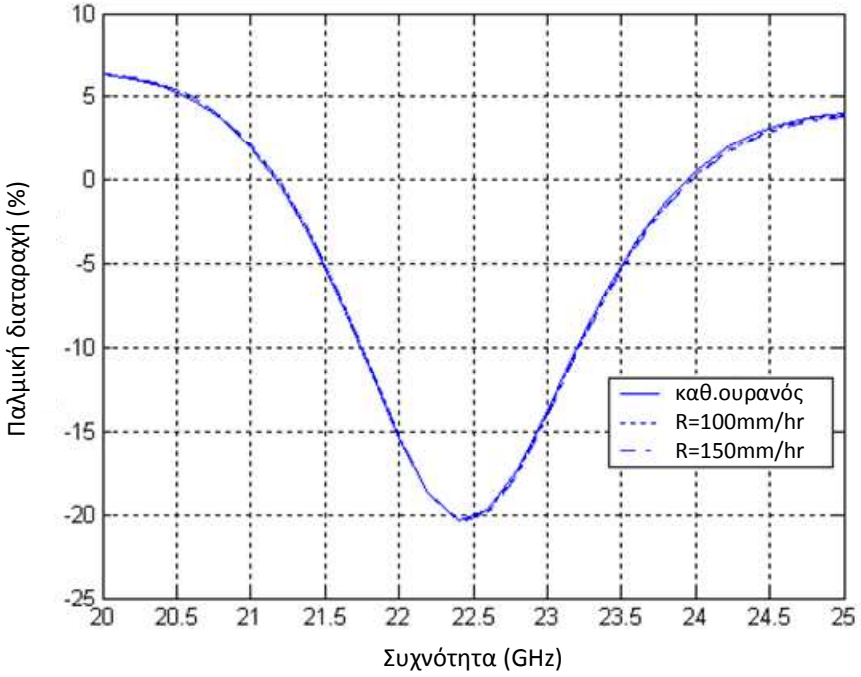
Σχήμα 5.8: Πλάτος του Γκαουσσιανού παλμού μετά από διάδοση κατά μήκος 1km.

Μια δεύτερη εφαρμογή του μοντέλου διάδοσης γίνεται σε έναν παλμό Gauss με τυπική απόκλιση 0.02nsec, που σε επίπεδο 10% (20dB ισχύς) αντιστοιχεί σε πλάτος 0.1nsec. Το μοντέλο MPM υλοποιείται θεωρώντας πίεση 101.3kPa, θερμοκρασία 288K, σχετική υγρασία 60% και μηδενική συγκέντρωση αιωρούμενων υδροσταγονιδίων. Αναλυτικές συναρτήσεις ορίζονται για τις πρώτες και δεύτερες παραγώγους των σταθερών διάδοσης ελευθέρου χώρου, βασιζόμενες στις σχέσεις του Liebe [7]. Οι συντελεστές βροχής υπολογίζονται για εντάσεις βροχόπτωσης 100 και 150mm/hr. Έτσι, η παλμική διαταραχή εκτιμάται για όλο το εύρος συχνοτήτων 10 έως 60GHz, για δύο διαφορετικά μήκη ζεύξης, οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση [34].

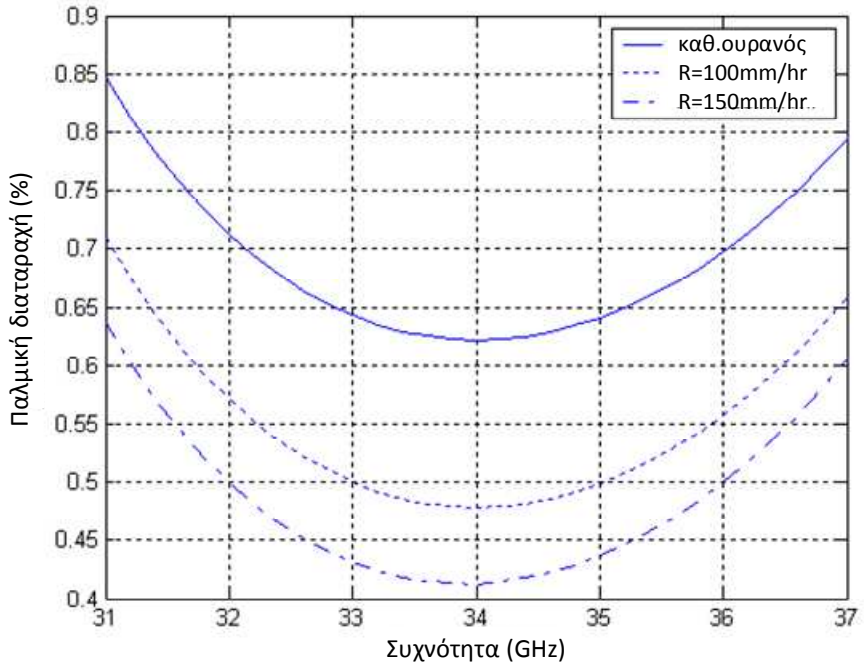
Στην πρώτη περίπτωση το μήκος ζεύξης είναι 2km. Το Σχήμα 5.9 δείχνει τη διαταραχή που υφίσταται ο οριζόντια πολωμένος παλμός τόσο υπό συνθήκες καθαρού ουρανού όσο και όταν βρέχει.


καθ.ουρανός
R=100mm/hr
R=150mm/hr
Παλμική διαταραχή (%)
Συχνότητα (GHz)

(α)


καθ.ουρανός
R=100mm/hr
R=150mm/hr
Παλμική διαταραχή (%)
Συχνότητα (GHz)

(β)

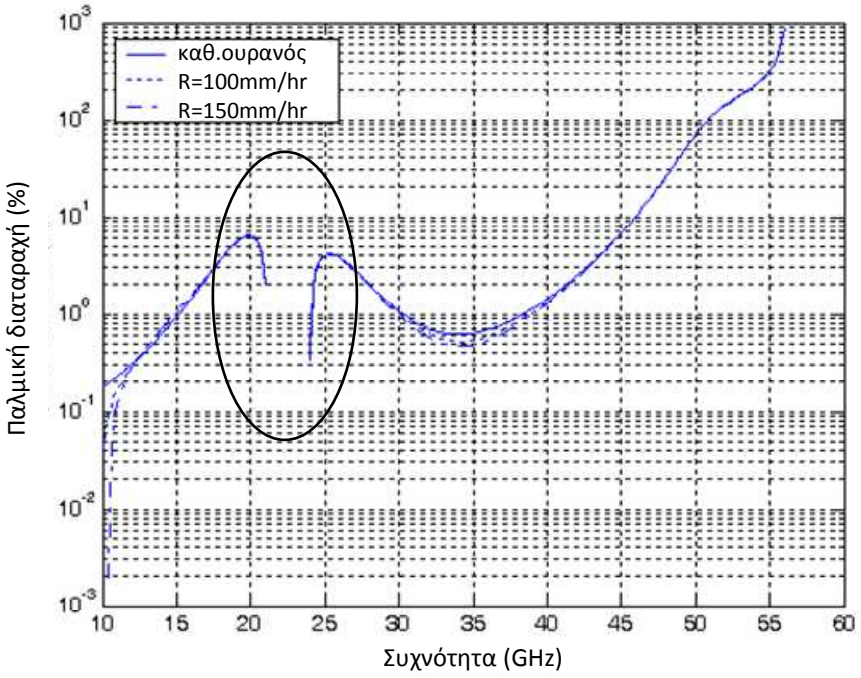


(γ)

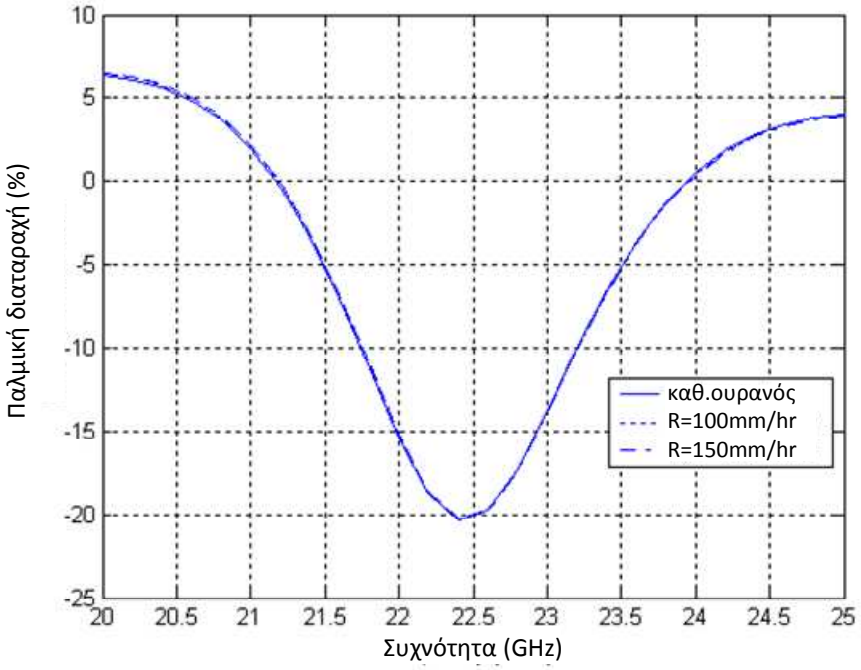
Σχήμα 5.9: Ποσοστιαία παλμική διαταραχή οριζόντια πολωμένου παλμού Gauss με τυπική απόκλιση 0.02nsec κατά τη διάδοση σε μήκος 2km, (α) θετικές τιμές διαταραχής (διεύρυνση παλμού) σε λογαριθμική κλίμακα για συχνότητες 10 ως 60GHz, (β) αρνητικές τιμές διαταραχής (συμπίεση παλμού) σε γραμμική κλίμακα για συχνότητες 20 ως 25GHz, (γ) περιοχή μέγιστης απόκλισης μεταξύ μοντέλου καθαρού ουρανού MPM και ενοποιημένου μοντέλου αερίων-βροχής, περί τα 34GHz.

Το κυκλωμένο κενό του 5.9(α) αναπαριστά την περιοχή αρνητικών τιμών παλμικής διαταραχής, την περιοχή δηλαδή όπου ο παλμός στενεύει κατά τη διάδοση, και για μεγαλύτερη ευκρίνεια φαίνεται στο 5.9(β). Τοπικά ακρότατα της διαταραχής εμφανίζονται κοντά στις γραμμές απορρόφησης των αερίων, σημεία στα οποία η συνεισφορά της βροχής είναι δυσδιάκριτη ακόμα και για ισχυρή βροχόπτωση. Ωστόσο στις συχνότητες των "ατμοσφαιρικών παραθύρων" περί τα 35GHz, όπως και κάτω από τα 12GHz, το ενοποιημένο μοντέλο επιδράσεων αερίων και βροχής παράγει ελαφρώς διαφορετικά αποτελέσματα σε σχέση με το MPM. Το 5.9(γ) εστιάζει στο ελάχιστο των 34GHz, όπου φαίνεται η απόκλιση από το μοντέλο καθαρού ουρανού. Συγκεκριμένα για συνθήκες καθαρού ουρανού η διεύρυνση του οριζόντια πολωμένου παλμού στα 34GHz προκύπτει περίπου 0.62%. Για ρυθμό βροχόπτωσης 100mm/hr η διεύρυνση ελαττώνεται κατά 0.14%, δηλαδή από 0.62% σε 0.48%, ενώ για βροχή 150mm/hr μετριάζεται ακόμα περισσότερο στο 0.41%. Παρόλο που η τελευταία καμπύλη αναφέρεται σε υψηλό ρυθμό βροχόπτωσης, παρατηρούμε ότι η διαταραχή του παλμού παραμένει συνεχώς κάτω από το 1%, γεγονός που επιτρέπει την αναγωγή του ενοποιημένου μοντέλου στο MPM για καθαρό ουρανό.

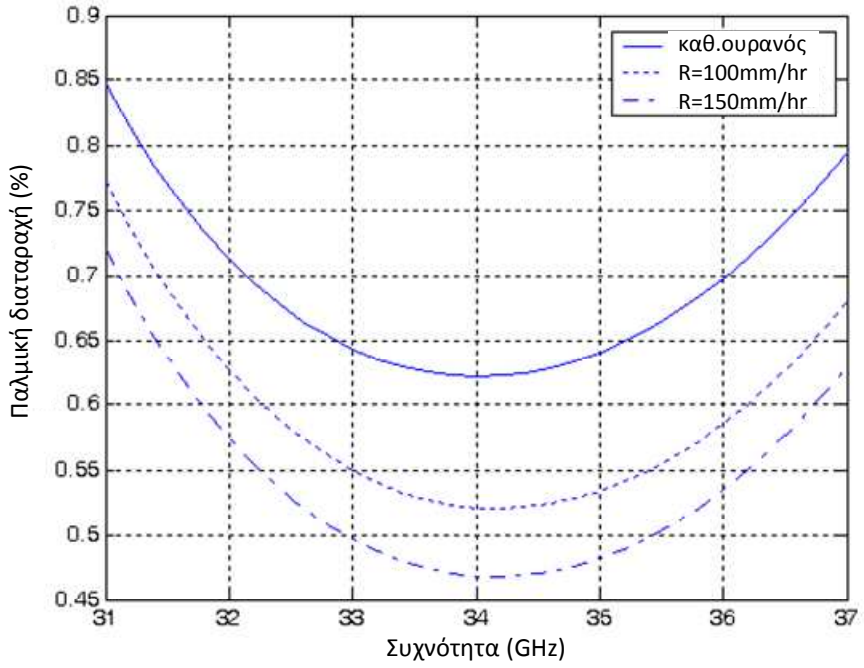
Παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν όταν η παραπάνω ζεύξη είναι κατακόρυφα πολωμένη. Το Σχήμα 5.10 δείχνει την ποσοστιαία διαταραχή ως προς τη συχνότητα για ατμόσφαιρα με και χωρίς βροχή.



(α)



(β)



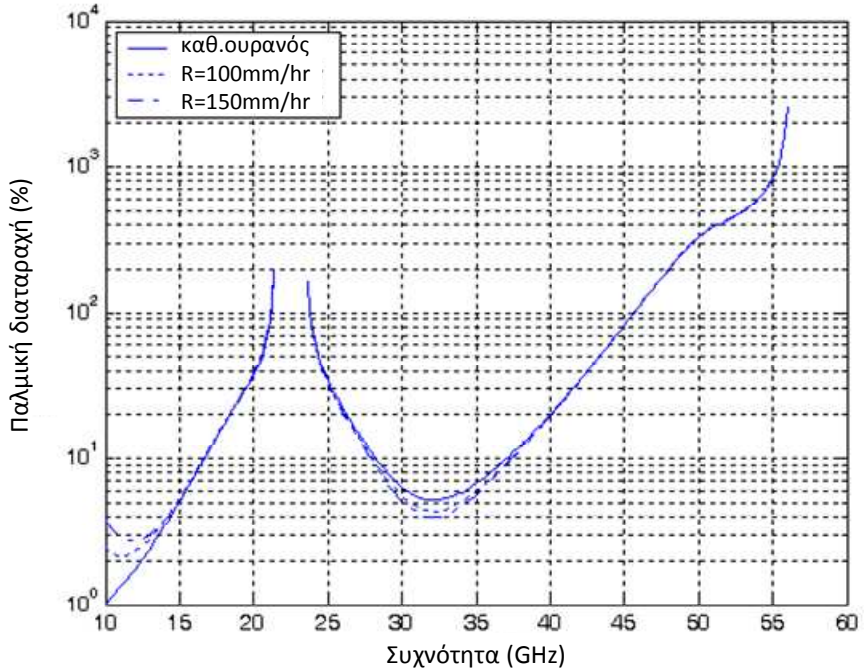
(γ)

Σχήμα 5.10: Ομοίως με το Σχήμα 5.9, αλλά για κατακόρυφη πόλωση.

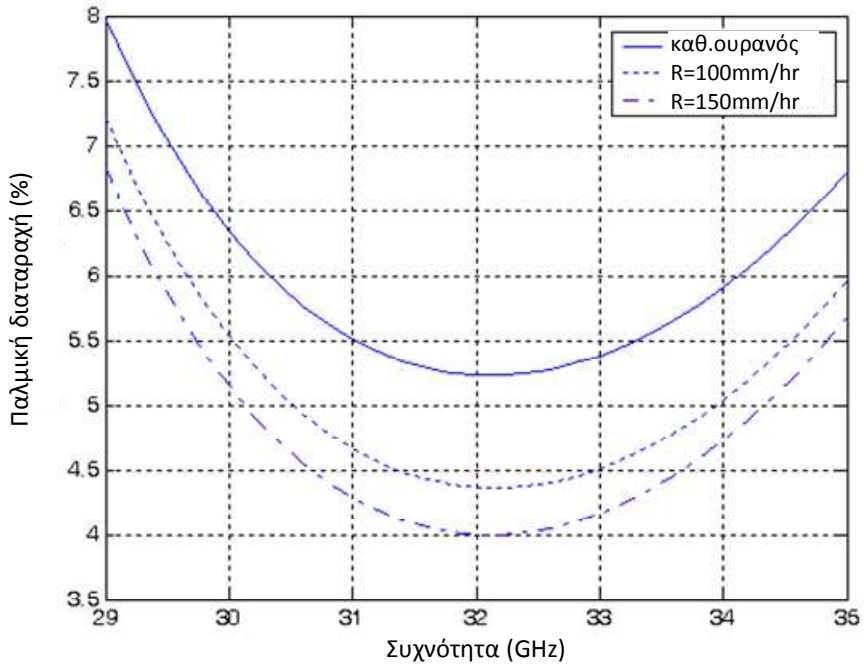
Το 5.10(α) αντιστοιχεί στις περιοχές που ο παλμός διευρύνεται και το 5.10(β) στην περιοχή που στενεύει, κοντά στη γραμμή συντονισμού του H_2O στα 22GHz. Στο 5.10(γ) απεικονίζεται η μέγιστη απόκλιση του μοντέλου καθαρού ουρανού και ενοποιημένου μοντέλου βροχής, που προκύπτει πάλι στα 34GHz. Για κατακόρυφη πόλωση και συνθήκες καθαρού ουρανού η ποσοστιαία παλμική διεύρυνση στα 34GHz είναι 0.62%, τιμή που ελαττώνεται με την παρουσία βροχής σε 0.52% για ρυθμό βροχόπτωσης 100mm/hr και σε 0.47% για ρυθμό βροχόπτωσης 150mm/hr.

Ωστόσο οι διαταραχές που προκαλεί το ατμοσφαιρικό μέσο τείνουν να οξύνονται όσο ο παλμός διανύει μεγαλύτερες αποστάσεις. Στα Σχήματα 5.11 και 5.12 η προηγούμενη διαδικασία εφαρμόζεται σε μια ζεύξη 10km, οριζόντια και κατακόρυφα πολωμένη αντίστοιχα. Τα κενά στις καμπύλες εμφανίζονται στις γραμμές συντονισμού 22GHz του H_2O και 60GHz του O_2, επειδή εκεί η συνθήκη (5.30) δεν ισχύει και είναι αδύνατη η εύρεση αναλυτικής λύσης για τον παλμό $A_{out}(t)$. Γενικά η επίδραση των αερίων κυριαρχεί και εδώ, εκτός από το παράθυρο των 32GHz όπου η συνεισφορά της βροχής προκαλεί αξιοσημείωτες αποκλίσεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11(β), ένταση βροχόπτωσης 100mm/hr θεωρώντας οριζόντια πόλωση ελαττώνει τη διεύρυνση του παλμού κατά 0.87% περίπου, δηλαδή από 5.23% σε 4.36%. Για ισχυρότερη βροχόπτωση 150mm/hr, η

διεύρυνση μετριάζεται από 5.23% σε 4%, με άλλα λόγια σε συνθήκες καθαρού ουρανού ο παλμός στην έξοδο του συστήματος εμφανίζεται 1.23% πιο διευρυμένος.



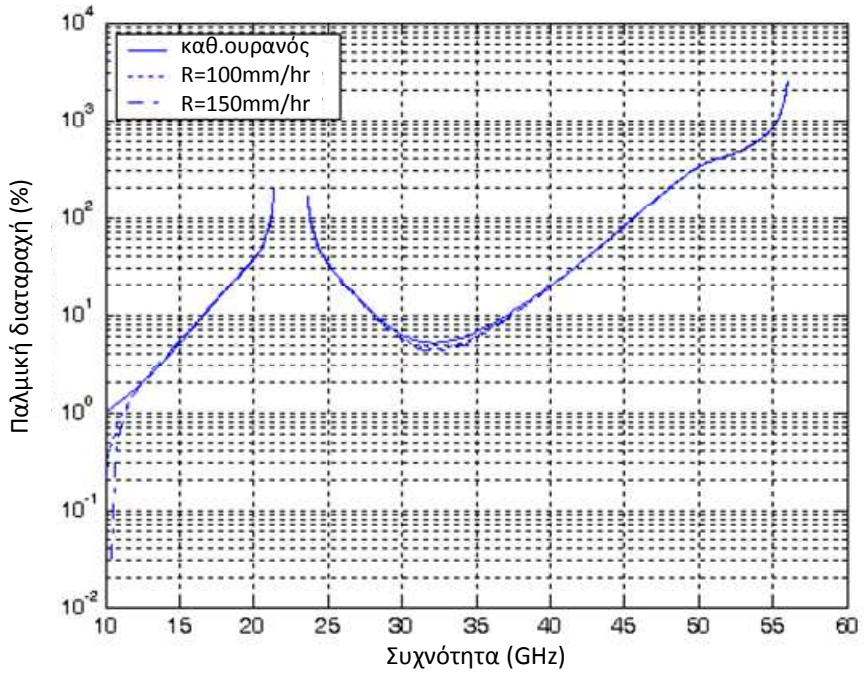
(α)



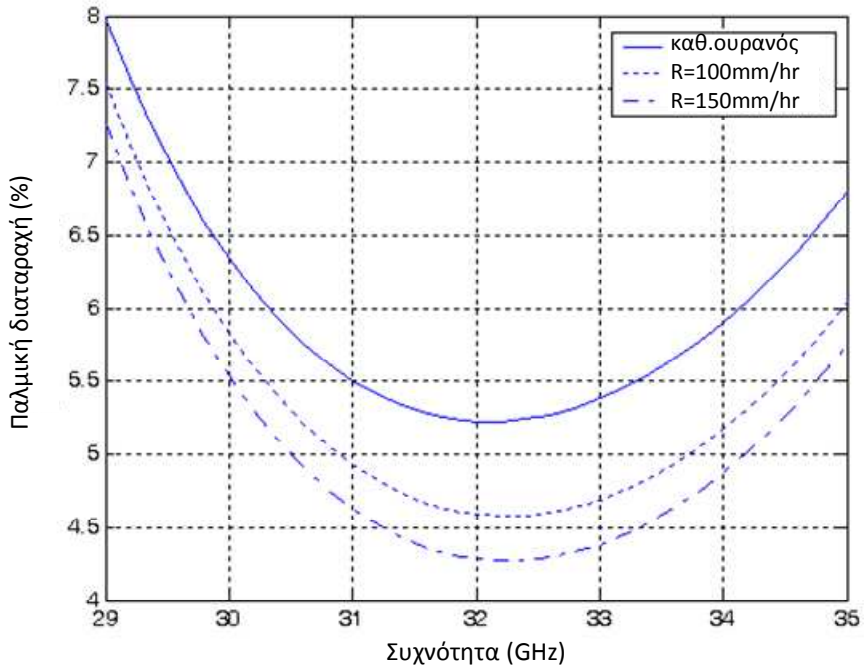
(β)

Σχήμα 5.11: Ποσοστιαία παλμική διαταραχή οριζόντια πολωμένου παλμού Gauss με τυπική απόκλιση 0.02nsec κατά τη διάδοση σε μήκος 10km, (α) διαταραχή για συχνότητες 10 ως 60GHz, (β) περιοχή μέγιστης απόκλισης μεταξύ μοντέλου καθαρού ουρανού MPM και ενοποιημένου μοντέλου αερίων-βροχής, περί τα 32GHz.

Για κατακόρυφα πολωμένο παλμό και μήκος ζεύξης 10km, η διεύρυνση καθαρού ουρανού στην περιοχή των 32GHz μετριάζεται από 5.23% σε 4.57% και σε 4.27% όταν εμφανιστεί βροχόπτωση 100 και 150 mm/hr αντιστοίχως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12(β).



(α)



(β)

Σχήμα 5.12: Ομοίως με το Σχήμα 5.11, αλλά για κατακόρυφη πόλωση.

5.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά διαπιστώνουμε ότι η επίδραση της ατμόσφαιρας στη διάδοση πολύ στενών παλμών UWB είναι σφοδρότερη για

- στενότερους χρονικά παλμούς,
- ισχυρότερους ρυθμούς βροχόπτωσης και
- μεγαλύτερα μήκη ζεύξης.

Επιπλέον η συνεισφορά της βροχής προκύπτει αμελητέα σε σχέση με εκείνη των αερίων όταν βρισκόμαστε κοντά στις γραμμές συντονισμού του H_2O (22GHz) και του O_2 (60GHz). Στο ατμοσφαιρικό παράθυρο των 30-35GHz, η άμβλυνση των φαινομένων καθαρού ουρανού όταν ληφθεί υπόψη η βροχή εξηγείται από τις δεύτερες παραγώγους των σταθερών διάδοσης. Η συνιστώσα καθαρού ουρανού των τελευταίων είναι θετική, προκαλώντας παλμική διεύρυνση, ενώ ταυτόχρονα η συνιστώσα βροχής προκύπτει αρνητική, συμπιέζοντας ελαφρώς τον παλμό.

Τελικά, η ακριβής μοντελοποίηση του ατμοσφαιρικού καναλιού απαιτεί την ενσωμάτωση της βροχής στο μοντέλο MPM, ειδικότερα όταν οι αποστάσεις που διανύουν τα UWB σήματα είναι μεγάλες (λίγες δεκάδες χιλιόμετρα) και για συχνότητες 30-35GHz. Για μικρότερα μήκη ζεύξεων (τις τάξεως λίγων χιλιομέτρων) η παρουσία της βροχής μπορεί να παραλειφθεί κατά τον υπολογισμό των διαταραχών που εισάγονται στο σήμα. Ακόμη όμως και στις περιπτώσεις όπου η συνεισφορά ενός σταθερού ρυθμού βροχόπτωσης αποδεικνύεται μικρή, η χωροχρονική ανομοιογένεια της βροχής δύναται να προκαλέσει στη ζεύξη προβλήματα απώλειας συγχρονισμού και δια-παλμικών παρεμβολών, θέματα που χρήζουν περαιτέρω μελέτης.

5.7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5

[1] A.Nodbotten, “LMDS systems and their application,” *IEEE Comm. Mag.,* vol.38, no.6, pp.150-154, Jun. 2000.

[2] B.Fong, N.Ansari, A.C.M.Fong, G.Y.Fong, and P.B.Rapajic, “On the Scalability of Fixed Broadband Wireless Access Network Deployment,” *IEEE Comm. Mag.,* S12-S18 Suppl. Sept. 2004.

[3] C.L.Bennetta and G.F.Ross, “Time-domain electromagnetics and its applications,” Proceedings of the IEEE, vol.66, no.3, pp.299–318, 1978.

[4] J.D.Taylor, “Introduction to Ultra-wideband Radar Systems,” CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995.

[5] N.Blefari-Melazzi, M.G.D.Benedetto, M.Gerla, H.Luediger, M.Z.Win and P.Withington, “Guest editorial ultra-wideband radio in multi-access wireless communication,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.20, no.9, pp. 1609–1611, 2002.

[6] M.Z.Win and R.A.Scholtz, “Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless-access communications,” IEEE Transactions on Communications, vol.48, no.4, pp.679–691, 2000.

[7] H.J.Liebe, “An updated model for millimeter wave propagation in moist air,” Radio Sci., vol.20, pp.1069-1089, 1985.

[8] L.Brillouin, “Wave propagation and group velocity,” Academic Press, New York, 1960.

[9] D.B.Trinza and T.A.Weber, “Brillouin revisited: Signal velocity definition for pulse propagation in a medium with resonant anomalous dispersion,” Radio Science, vol.17, pp.1169-1180, 1982.

[10] L.E.Vogler, “Pulse distortion in resonant and nonresonant gases,” Radio Science, vol.5, pp.1301-1305, 1970.

[11] H.J.Liebe, “The atmospheric propagation medium between 45 and 75 GHz,” AGARD Conf. Proc. Propagation Effects of ECM Resistant Systems in Communications and Navigation, AGARD-CP 331, Copenhagen, Denmark, pp.1-12, 1982.

[12] G.Hufford, “Millimeter pulse distortion by a single absorption line simulating the terrestrial atmosphere,” US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, NTIA Report 87-229, 1987.

[13] A.M.Glutsyuk, L.I.Sharapov and I.Kh.Vakser, “Distortion of short electromagnetic pulses propagating at the frequencies of atmospheric oxygen absorption lines,” Proc. URS Commission F Open Symp, La Baule, France, pp.637-642, 1977.

[14] M.P.Forrer, “Analysis of millimicrosecond RF pulse transmission,” Proc. IRE, vol.46, pp.1830-1835, 1958.

[15] G.I.Terina, “On distortion of pulses in ionospheric plasma,” Radio Eng. Electron. Phys., vol.12, pp.109-113, 1967.

[16] F.C.De Medeiros Filho, D.A.R.Jayasuriya and R.S.Cole, “Tropospheric effects on line-of-sight links at 36GHz and 55GHz,” IEE Proc. F., vol.130, pp.679-687, 1983.

[17] O.E.Delange, “Propagation studies at microwave frequencies by means of very short pulses, “Bell Syst. Tech. J., vol.31, pp.91-103, 1952.

[18] R.F.Linfield, W.Hubbard and L.E.Pratt, “Transmission channel characterization by impulse response measurements,” US Department of Commerce, National Telecommunications and Information Administration, NTIA Report OT, 76-96, 1976.

[19] “First Report and Order in the Matter of Revision of Part 15 of the Commission’s Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems,” ET Docket 98–153, Federal Communications Commission, FCC 02–48, April 22, 2002.

[20] Weihua Zhuang, Xuemin (Sherman) Shen, and Qi Bi, “Ultra-wideband wireless communications,” *Wirel.Commun. Mob. Comput.*, vol.3, pp.663-685, 2003.

[21] X.Chen and S.Kiaei, “Monocycle shapes for ultra-wideband system,” Proceedings of IEEE ISCAS, 1: I-597–I-600, 2002.

[22] H.T.Friis, “A note on a simple transmission formula,” Proc. IRE, vol.34, pp.254-256, 1946.

[23] J.D.Kraus, “Antennas,” New York: McGraw-Hill. 1988.

[24] H.J.Liebe, “Atmospheric EHF window transparencies near 35, 90, 140 and 220 GHz,” IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.AP-31, no.1, pp.127-135, 1983.

[25] R.A.Bohlander and R.W.McMillan, “Atmospheric effects on near millimeter wave propagation,” Proc. IEEE, vol.73, no.1, pp.49-60, 1985.

[26] C.J.Gibbins, “Propagation of very short pulses through the absorptive and dispersive atmosphere,” Proc. Inst. Elect. Eng., vol.137, no.5, pp.304-310, 1990.

[27] Y.Pinhasi, A.Yahalom, O.Harpaz, and G.Vilner, “Study of Ultrawide-Band Transmission in the Extremely High Frequency (EHF) Band,” *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol.52, no.11, pp.2833-2842, Nov. 2004.

[28] A.Maitra, M.Dan, A.K.Sen, K.Bhattacharyya, and C.K.Sarkar, “Propagation of very short pulses at millimeter wavelengths through rain filled medium,” *Int J Infrared Millimeter Waves*, vol.14, pp.703-713, 1993.

[29] A.Maitra, A.S.Chowdhury, and A.Das, “*Ka*-Band pulsed propagation through rain-filled atmosphere,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol.30, no.2, pp.105-109, July 2001.

[30] J.A.Stratton, “Electromagnetic Theory,” *McGraw-Hill*, New York, 1941.

[31] S.A.Kanellopoulos, A.D.Panagopoulos, and J.D.Kanellopoulos, “Calculation of electromagnetic scattering from a Pruppacher-Pitter raindrop using MAS and slant path rain attenuation prediction,” *Int J Infrared Millimeter Waves*, 26 (12), pp.1783-1802, Dec. 2005.

[32] J.S.Marshall, and W.McK.Palmer, “The distribution of raindrops with size,” *Jour. Meteorol.*, vol.5, pp.165-166, 1948.

[33] E.M.Georgiadou, A.D.Panagopoulos and J.D.Kanellopoulos, “Study of ultra-wideband transmission at 60GHz for pico-links,” Mediterranean Microwave Symposium, September 2005.

[34] E.M.Georgiadou, A.D.Panagopoulos and J.D.Kanellopoulos, “Millimeter wave pulse propagation through distorted raindrops for LOS fixed wireless access channels,” Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol.20, no.9, pp.1235-1248, 2006.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -6-

ΔΙΠΛΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

6.1 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΣΕ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

Όπως παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2, οι στρατοσφαιρικές τηλεπικοινωνιακές πλατφόρμες (High Altitude Platforms Stations, HAPS) αντιπροσωπεύουν μια υβριδική τεχνολογική προσέγγιση στο πρόβλημα της ευρυζωνικής επικοινωνίας, καθώς συνδυάζουν χαρακτηριστικά τόσο επίγειων όσο και δορυφορικών συστημάτων. Οι εν λόγω εναέριες πλατφόρμες δρουν ως σταθμοί βάσης ή κόμβοι αναμετάδοσης και είναι τοποθετημένες σε αεροπλάνα ή αερόπλοια, επανδρωμένα ή μη. Είναι ψευδογεωστατικές και μπορούν να θεωρηθούν είτε ως κεραίες πολύ μεγάλου ύψους είτε ως δορυφόροι πολύ χαμηλής τροχιάς, προσφέροντας κάλυψη σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές αλλά και σε ευρύτερες γεωγραφικές εκτάσεις [1].

Στο παρόν Κεφάλαιο εξετάζουμε την προς τα κάτω ζεύξη (downlink) στρατοσφαιρικών δικτύων που λειτουργούν στην Ka και τη V ζώνη. Μείζον θέμα στην περίπτωση αυτή είναι η επίδραση της ατμόσφαιρας στη διάδοση του κύματος, καθώς κατά τη διαδρομή του από την εναέρια πλατφόρμα στον επίγειο σταθμό συναντά διάφορα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα. Η βροχή, τα σύννεφα, τα αέρια και οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί υποβιβάζουν τη στάθμη ισχύος λήψης και μπορούν να οδηγήσουν εκτός λειτουργίας τη ζεύξη, αν ξεπεραστεί το δεδομένο περιθώριο διαλείψεων (fade margin). Η προσέγγιση που ακολουθείται για την αποτίμηση της ολικής απόσβεσης που προκαλείται από τη δράση πολλαπλών πηγών ταυτόχρονης ατμοσφαιρικής εξασθένησης είναι εκείνη που προτείνεται στη σύσταση P.618 της ITU-R [2].

Ως τεχνική άμβλυνσης των προηγούμενων διαλείψεων προτείνεται η διπλή διαφορική λήψη θέσης. Η τεχνική αυτή εκφράζει την ταυτόχρονη λήψη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από δύο σταθμούς στο έδαφος και βασίζει την αποτελεσματικότητά της στη χωρική ανομοιογένεια της βροχής, δηλαδή στην αποσυσχέτιση των αποσβέσεων κατά μήκος των δύο εναλλακτικών ραδιοδρόμων καθώς η απόσταση διαχωρισμού (separation distance) ανάμεσα στα επίγεια τερματικά μεγαλώνει. Η παραπάνω διάταξη προϋποθέτει την ύπαρξη επίγειας διασύνδεσης ανάμεσα στους σταθμούς διαφορικής λήψης. Έτσι η εφαρμογή της έχει μεγαλύτερη χρησιμότητα στο οπισθοζευκτικό κομμάτι (backhaul link) μεταξύ πλατφόρμας και πυλαίων σταθμών (gateways), που διασυνδέουν το στρατοσφαιρικό δίκτυο στο ευρύτερο επίγειο τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, δεδομένου ότι υπάρχει συχνά μεγαλύτερη ευελιξία στην τοποθέτηση των πυλαίων σταθμών. Η διαφορική λήψη θέσης παρουσιάζει μεγάλη αποτελεσματικότητα ως τεχνική άμβλυνσης των ατμοσφαιρικών διαλείψεων, ωστόσο υπόκειται στο μειονέκτημα αυξημένων απωλειών ελευθέρου χώρου όταν το σήμα διαδίδεται κατά μήκος μακρύτερης διαδρομής. Συγκεκριμένα, μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται κατά την εφαρμογή της μεθόδου, επειδή το ύψος όπου ίπτανται οι στρατοσφαιρικές πλατφόρμες είναι σχετικά μικρό και συνεπώς αύξηση της απόστασης των σταθμών στη γη συνεπάγεται σημαντική αύξηση των απωλειών ελευθέρου χώρου. Αντίθετα στην περίπτωση των δορυφορικών συστημάτων ο περιορισμός αυτός δεν είναι τόσο έντονος. Το κατά τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο ύψος της δορυφορικής τροχιάς καθιστά την αύξηση των απωλειών διαδρομής αμελητέα, ή αν μη τι άλλο ανεκτή, συγκρινόμενη με την άμβλυνση των ατμοσφαιρικών αποσβέσεων.

Η τεχνική διπλής διαφορικής λήψης θέσης σε στρατοσφαιρικά δίκτυα έχει μελετηθεί στο παρελθόν από τους Konefal et al. [3]. Οι τελευταίοι πρότειναν μια μέθοδο πρόβλεψης των στατιστικών παραμέτρων απόσβεσης βροχής, βασιζόμενοι στο συνδυασμό τριών μοντέλων της διεθνούς βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν τη μέθοδο Tattelman και Scharr [4] για την πρόβλεψη του μηνιαίου ρυθμού βροχόπτωσης που υπερβαίνεται με δεδομένη πιθανότητα σε ένα σημείο λήψης. Στη συνέχεια πρότειναν την εφαρμογή του εμπειρικού μοντέλου του Drufuca [5] για τη συσχέτιση του ρυθμού βροχόπτωσης ανάμεσα στους δύο εναλλακτικούς επίγειους σταθμούς. Το μοντέλο Drufuca στηρίζεται σε σειρά μετρήσεων ραντάρ που πραγματοποιήθηκαν στο Μόντρεαλ του Καναδά, και επομένως η αξιοπιστία του είναι -γεωγραφικά τουλάχιστον- περιορισμένη. Τέλος, εφάρμοσαν το μοντέλο KWSA [6] για την απόδοση μιας τοπικής, ταυτόχρονης, απόσβεσης βροχής στον εναλλακτικό σταθμό, δεδομένης της απόσβεσης και του ρυθμού

βροχόπτωσης στο κύριο σημείο λήψης. Η διαδικασία περιλαμβάνει επιλογή της εναλλακτικής διαδρομής με τη μικρότερη απόσβεση βροχής μεταξύ επίγειου σταθμού και εναέριας πλατφόρμας, ενώ οι ετήσιες στατιστικές παράμετροι προκύπτουν από ολοκλήρωση των αντίστοιχων μηνιαίων τιμών.

Παρακάτω παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος εκτίμησης της επίδοσης μιας διάταξης διπλής διαφορικής προστασίας στρατοσφαιρικών δικτύων, που λαμβάνει αφενός υπόψη το συνδυασμό των ατμοσφαιρικών αποσβέσεων από βροχή, σύννεφα, αέρια και σπινθηρισμούς, σύμφωνα με το μοντέλο της ITU-R [2] και χρησιμοποιεί αφετέρου το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων για την περιγραφή της χωρικής δομής της βροχής, υιοθετώντας την λογαριθμοκανονική κατανομή για τη στατιστική περιγραφή της σημειακής έντασης βροχόπτωσης [7]. Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί σαν μια επέκταση της αντίστοιχης μεθοδολογίας πρόβλεψης του ολικού διαφορικού κέρδους για την προς τα κάτω ζεύξη δορυφορικού συστήματος που περιγράφεται από τους Panagopoulos et al. [8]. Η εφαρμογή του μοντέλου σε διαφορετικές τοπολογίες στρατοσφαιρικών δικτύων οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα και την απόδοση των διατάξεων διπλής διαφορικής προστασίας.

6.2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΕΣ ΑΠΟΣΒΕΣΕΙΣ

Μια εκτίμηση για την ολική απόσβεση που εισάγει η ταυτόχρονη δράση ποικίλων ατμοσφαιρικών παραγόντων σε ένα στρατοσφαιρικό σύστημα επικοινωνιών με συχνότητα λειτουργίας άνω των 10GHz, απαιτεί το συνυπολογισμό των επιδράσεων από τη βροχή, τα αέρια, τα σύννεφα και τους τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη σύσταση P.618 της ITU-R [2], η στάθμη σε dB της συνδυασμένης εξασθένησης που εισάγεται από τις ατμοσφαιρικές πηγές και ξεπερνιέται με πιθανότητα $p\%$ προσεγγίζεται από τη σχέση,

$$A_T(p) = A_G(p) + \sqrt{\left(A_R(p) + A_C(p)\right)^2 + A_S{}^2(p)} \tag{6.1}$$

Ο όρος A_G αντιστοιχεί στην απόσβεση των αερίων, οξυγόνου και υδρατμών, και υπολογίζεται κατά τη μεθοδολογία των συστάσεων P.676 [9] και P.836 [10]. Ο όρος A_C αναφέρεται στην απόσβεση από τα σύννεφα, με διαδικασία υπολογισμού που περιγράφεται στη σύσταση P.840 [11]. Ο όρος A_S είναι η εξασθένηση λόγω τροποσφαιρικών σπινθηρισμών σύμφωνα με τις συστάσεις P.618 [2] και P.453 [12]. Τέλος η

απόσβεση βροχής A_R, όντας ο πιο σφοδρός παράγοντας εξασθένησης σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων, μπορεί να προσεγγιστεί με τη βοήθεια των κατανομών και της μεθοδολογίας που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Η πιθανότητα υπέρβασης p μιας στάθμης απόσβεσης στην παραπάνω σχέση θεωρείται ότι κυμαίνεται μεταξύ 0.001% και 50%. Για $p < 1.0\%$ θεωρούμε ότι,

$$A_C(p) = A_C(1\%) \tag{6.2}$$

$$A_G(p) = A_G(1\%) \tag{6.3}$$

Παρακάτω δίνεται η μεθοδολογία υπολογισμού για τις επιμέρους ατμοσφαιρικές αποσβέσεις.

6.2.1 ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΑΕΡΙΑ

Η απόσβεση των ατμοσφαιρικών αερίων (attenuation due to atmospheric gases) για συχνότητες από 1 ως 350GHz μπορεί να προσεγγιστεί από την απλοποιημένη μέθοδο που προτείνεται στη σύσταση P.676 [9]. Οι δύο βασικές της συνιστώσες είναι η απόσβεση ξηρού αέρα (attenuation due to dry air) A_o και η απόσβεση των υδρατμών (attenuation due to water vapour) $A_w(p)$ που υπερβαίνεται για δεδομένο ποσοστό του χρόνου p. Για κεκλιμένες ζεύξεις με γωνίες ανύψωσης ϑ από 5° έως 90°, η απόσβεση των αερίων εκφράζεται σε dB ως εξής.

$$A_G(p) = \frac{A_o + A_w(p)}{\sin\vartheta} \tag{6.4}$$

6.2.1.1 ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΞΗΡΟΥ ΑΕΡΑ

Η απόσβεση ξηρού αέρα περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο την απόσβεση από τα μόρια του οξυγόνου, όταν αναφερόμαστε σε συχνότητες μεταξύ 10 και 100GHz. Αρχικά υπολογίζεται η ειδική απόσβεση του ξηρού αέρα γ_o (dB/km),

$$\gamma_o = \left[\frac{7.2\, r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34\, r_p^2\, r_t^{1.6}} + \frac{0.62\,\xi_3}{(54 - f)^{1.16\xi_1} + 0.83\,\xi_2} \right] f^2\, r_p^2 \times 10^{-3} \tag{6.5}$$

όπου

$$\xi_1 = \varphi(r_p, r_t, 0.0717, -1.8132, 0.0156, -1.6515) \tag{6.6}$$

$$\xi_2 = \varphi(r_p, r_t, 0.5146, -4.6368, -0.1921, -5.7416) \tag{6.7}$$

$$\xi_3 = \varphi(r_p, r_t, 0.3414, -6.5851, 0.2130, -8.5854) \tag{6.8}$$

και

$$\varphi(r_p, r_t, a, b, c, d) = r_p^a r_t^b \exp[c(1 - r_p) + d(1 - r_t)] \tag{6.9}$$

Επιπλέον,

$$r_p = \frac{pr}{1013} \tag{6.10}$$

$$r_t = \frac{288}{273 + t} \tag{6.11}$$

όπου pr η ατμοσφαιρική πίεση σε hPa, t η θερμοκρασία σε °C και f η συχνότητα σε GHz. Η σχέση (6.5) ισχύει για συχνότητες μικρότερες των 54GHz. Για την πίεση θεωρούμε τιμή pr =1013hPa, ενώ για τη μέση ετήσια επιφανειακή θερμοκρασία χρησιμοποιούμε τα αρχεία δεδομένων ESATEMP.txt της ITU-R, σύμφωνα με τη σύσταση P.1510 [13]. Εκεί δίνονται τιμές θερμοκρασίας σε υψόμετρο 2m για όλη την υφήλιο με ανάλυση 1.5° σε γεωγραφικό μήκος και πλάτος. Η επιθυμητή τιμή σε τυχαία θέση προκύπτει μέσω διγραμμικής παρεμβολής στα τέσσερα πλησιέστερα σημεία του πλέγματος.

Η ειδική απόσβεση πρέπει στη συνέχεια να πολλαπλασιαστεί με το ισοδύναμο ύψος ζεύξης προκειμένου να λάβουμε την εξασθένηση λόγω ξηρού αέρα. Το ισοδύναμο ύψος είναι,

$$h_o = \frac{6.1}{1 + 0.17\, r_p^{-1.1}} (1 + t_1 + t_2 + t_3) \tag{6.12}$$

όπου

$$t_1 = \frac{4.64}{1 + 0.066\, r_p^{-2.3}} \exp\left[-\left(\frac{f - 59.7}{2.87 + 12.4 \exp\,(-7.9\, r_p)} \right)^2 \right] \tag{6.13}$$

$$t_2 = \frac{0.14 \exp\,(2.12\, r_p)}{(f - 118.75)^2 + 0.031 \exp(2.2\, r_p)} \tag{6.14}$$

$$t_3 = \frac{0.0114}{1 + 0.14\, r_p^{-2.6}} f \frac{-0.0247 + 0.0001 f + 1.61 \times 10^{-6} f^2}{1 - 0.0169 f + 4.1 \times 10^{-5} f^2 + 3.2 \times 10^{-7} f^3} \tag{6.15}$$

υπό την προϋπόθεση ότι για συχνότητες f <70GHz ισχύει

$$h_o \leq 10.7\ r_p^{0.3} \tag{6.16}$$

Η απόσβεση του ξηρού αέρα τελικά προκύπτει από τις (6.5) και (6.12).

$$A_o = h_o\ \gamma_o \tag{6.17}$$

6.2.1.2 Απόσβεση Υδρατμών

Η ειδική απόσβεση των υδρατμών γ_w (dB/km) δίνεται από τη σχέση,

$$\begin{aligned}\gamma_w = \Bigg\{ & \frac{3.98\eta_1 \exp[2.23(1-r_t)]}{(f-22.235)^2+9.42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11.96\eta_1 \exp[0.7(1-r_t)]}{(f-183.31)^2+11.14\eta_1^2} \\ & + \frac{0.081\eta_1 \exp[6.44(1-r_t)]}{(f-321.226)^2+6.29\eta_1^2} + \frac{3.66\eta_1 \exp[1.6(1-r_t)]}{(f-325.153)^2+9.22\eta_1^2} \\ & + \frac{25.37\eta_1 \exp[1.09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17.4\eta_1 \exp[1.46(1-r_t)]}{(f-448)^2} \\ & + \frac{844.6\eta_1 \exp[0.17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0.41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) \\ & + \frac{8.3328\times 10^4\, \eta_2 \exp[0.99(1-r_t)]}{(f-1\,780)^2} g(f,1\,780) \Bigg\} f^2 r_t^{2.5} \rho \times 10^{-4}\end{aligned} \tag{6.18}$$

όπου

$$\eta_1 = 0.955 r_p r_t^{0.68} + 0.006\rho \tag{6.19}$$

$$\eta_2 = 0.735\ r_p r_t^{0.5} + 0.0353\ r_t^4 \rho \tag{6.20}$$

και

$$g(f, f_i) = 1 + \left(\frac{f-f_i}{f+f_i}\right)^2 \tag{6.21}$$

Οι όροι r_p και r_t δίνονται όπως πριν από τις (6.10) και (6.11), ενώ με ρ συμβολίζεται η επιφανειακή πυκνότητα των υδρατμών (surface water vapour density) σε g/m^3. Η τελευταία υπολογίζεται σύμφωνα με τη σύσταση P.836 [10]. Καθώς η συγκέντρωση των υδρατμών ποικίλει χωρικά αλλά και χρονικά, σε αντίθεση με τη σχεδόν σταθερή συγκέντρωση του ατμοσφαιρικού οξυγόνου, ετήσιες μέσες τιμές που υπερβαίνονται για διάφορα χρονικά ποσοστά παρέχονται με τη βοήθεια ψηφιακών χαρτών στα αρχεία δεδομένων

SURF_WVxx_v4.txt της ITU-R, για γεωγραφικά μήκη από 0° έως 360° και γεωγραφικά πλάτη από +90° έως -90°, με βήμα 1.125°.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ολικό περιεχόμενο των υδρατμών (total water vapour content) V_t σε kg/m^2 κατά μήκος της ζεύξης που υπερβαίνεται για δεδομένο χρονικό ποσοστό, μέσω των αρχείων ESAWVC_xx_v4.txt της ITU-R σύμφωνα με τη σύσταση P.836 [10] και με τρόπο ανάλογο του υπολογισμού επιφανειακής πυκνότητας υδρατμών.

Η απόσβεση των υδρατμών μπορεί να προσεγγιστεί από τη σχέση,

$$A_w(p) = 0.0173\, V_t \frac{\gamma_w(f, pr_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, pr_{ref}, \rho_{v,ref}, t_{ref})} \tag{6.22}$$

όπου f η συχνότητα σε GHz και

$$f_{ref} = 20.6 \text{ GHz} \tag{6.23}$$

$$pr_{ref} = 780 \text{ hPa} \tag{6.24}$$

$$\rho_{v,ref} = \frac{V_t}{4} \text{ g/m}^3 \tag{6.25}$$

$$t_{ref} = 14 \ln\left(\frac{0.22\, V_t}{4}\right) + 3\,°\text{C}. \tag{6.26}$$

6.2.2 ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΑΠΟ ΤΑ ΣΥΝΝΕΦΑ

Ο όρος A_C αναπαριστά την απόσβεση από τα σύννεφα (attenuation due to clouds), με διαδικασία υπολογισμού που περιγράφεται στη σύσταση P.840 [11]. Η στάθμη A_C που υπερβαίνεται για ποσοστό p του χρόνου μπορεί να εκφραστεί σε dB ως,

$$A_C(p) = \frac{L\, K_l}{\sin\vartheta} \tag{6.27}$$

όπου L το ολικό περιεχόμενο μιας στήλης νερού (total columnar content of liquid water) σε kg/m^2, K_l ο συντελεστής ειδικής απόσβεσης των νεφών σε (dB/km)/(g/m^3) και ϑ η γωνία ανύψωσης από 5° έως 90°.

Ο συντελεστής ειδικής απόσβεσης υπολογίζεται μέχρι τα 1000GHz από ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο στη σκέδαση Rayleigh,

$$K_l = \frac{0.819f}{\varepsilon''(1+\eta^2)} \tag{6.28}$$

όπου f η συχνότητα σε GHz και $\varepsilon(f)$ η μιγαδική διηλεκτρική επιτρεπτότητα του νερού.

$$\eta = \frac{2+\varepsilon'}{\varepsilon''} \tag{6.29}$$

$$\varepsilon''(f) = \frac{f(\varepsilon_0-\varepsilon_1)}{f_p\left[1+(f/f_p)^2\right]} + \frac{f(\varepsilon_1-\varepsilon_2)}{f_s\left[1+(f/f_s)^2\right]} \tag{6.30}$$

$$\varepsilon'(f) = \frac{\varepsilon_0-\varepsilon_1}{\left[1+(f/f_p)^2\right]} + \frac{\varepsilon_1-\varepsilon_2}{\left[1+(f/f_s)^2\right]} + \varepsilon_2 \tag{6.31}$$

Στις παραπάνω σχέσεις,

$$\varepsilon_0 = 77.6 + 103.3(\Theta-1) \tag{6.32}$$

$$\varepsilon_1 = 5.48 \tag{6.33}$$

$$\varepsilon_2 = 3.51 \tag{6.34}$$

$$\Theta = \frac{300}{T} \tag{6.35}$$

και T η απόλυτη θερμοκρασία σε K, που για τα σύννεφα λαμβάνεται 273 (0°C). Επιπλέον οι κύριες και δευτερεύουσες συχνότητες χαλάρωσης (σε GHz) ορίζονται ως,

$$f_p = 20.09 - 142(\Theta-1) + 294(\Theta-1)^2 \tag{6.36}$$

$$f_s = 590 - 1500(\Theta-1) \tag{6.37}$$

Όσον αφορά στο ολικό περιεχόμενο μιας στήλης νερού L, αυτό μπορεί να προσεγγιστεί με τη βοήθεια των μέσων ετήσιων τιμών που υπερβαίνονται για δεδομένα ποσοστά του χρόνου ανά την υφήλιο, και είναι συγκεντρωμένες στα αρχεία ESAWRED_xx_v4.txt της ITU-R. Η ζητούμενη στάθμη σε τυχαίες συντεταγμένες υπολογίζεται μέσω παρεμβολής στα τέσσερα πλησιέστερα σημεία του πλέγματος που ορίζεται με βήμα 1.125°, για γεωγραφικά μήκη από 0° έως 360° και γεωγραφικά πλάτη από +90° έως -90°.

6.2.3 ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΤΡΟΠΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥΣ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΜΟΥΣ

Ο όρος A_S είναι η εξασθένηση λόγω ατμοσφαιρικών σπινθηρισμών (attenuation due to tropospheric scintillation). Το μέγεθος των σπινθηρισμών εξαρτάται από τις μεταβολές του δείκτη διάθλασης, και γενικά αυξάνει με τη συχνότητα και το μήκος ζεύξης, ενώ μειώνεται για κεραίες με μικρότερο εύρος δέσμης. Οι μέσες μηνιαίες διακυμάνσεις των σπινθηρισμών είναι άμεσα συσχετισμένες με τον όρο υγρής διαθλαστικότητας (wet term of surface refractivity) N_{wet}, που εξαρτάται από το περιεχόμενο των υδρατμών της ατμόσφαιρας. Ο όρος αυτός μπορεί να προκύψει με διγραμμική παρεμβολή από το αρχείο δεδομένων ESANWET.txt της ITU-R σύμφωνα με τη σύσταση P.453 [12]. Εκεί είναι συγκεντρωμένες τιμές του N_{wet} για σημεία με γεωγραφικό μήκος από 0° έως 360° και γεωγραφικό πλάτος από +90° έως -90°, με βήμα 1.5°. Για γωνίες ανύψωσης ϑ μεγαλύτερες των 4°, η σύσταση P.618 [2] δίνει τη γενική μεθοδολογία υπολογισμού της απόσβεσης λόγω τροποσφαιρικών σπινθηρισμών A_S (dB).

$$A_S(p) = a(p)\,\sigma \tag{6.38}$$

όπου

$$a(p) = -0.061\left(\log_{10} p\right)^3 + 0.072\left(\log_{10} p\right)^2 - 1.71\log_{10} p + 3.0 \tag{6.39}$$

για χρονικά ποσοστά p στο εύρος $0.01 < p \le 50$. Η τυπική απόκλιση σ του σήματος για τη δεδομένη περίοδο και διαδρομή διάδοσης είναι,

$$\sigma = \sigma_{ref}\; f^{\,7/12}\; \frac{g(x)}{(\sin\vartheta)^{1.2}} \tag{6.40}$$

όπου f η συχνότητα λειτουργίας μεγαλύτερη των 4GHz, σ_{ref} (dB) η τυπική απόκλιση του πλάτους του σήματος,

$$\sigma_{ref} = 3.6\times 10^{-3} + 10^{-4}\times N_{wet} \tag{6.41}$$

και $g(x)$ όρος που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κεραίας.

$$g(x) = \sqrt{3.86\,(x^2+1)^{11/12}\cdot \sin\left[\frac{11}{6}\arctan\frac{1}{x}\right] - 7.08\,x^{5/6}} \tag{6.42}$$

Στην (6.42),

$$x = 1.22\,D_{eff}^2\,(f/L) \tag{6.43}$$

όπου D_{eff} (m) η ισοδύναμη διάμετρος κεραίας,

$$D_{eff} = \sqrt{\eta}\, D \tag{6.44}$$

D (m) η φυσική διάμετρος της κεραίας, η ο συντελεστής απόδοσης της κεραίας, και L (m) το ισοδύναμο μήκος ζεύξης,

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2 \vartheta + 2.35 \times 10^{-4}} + \sin\vartheta} \tag{6.45}$$

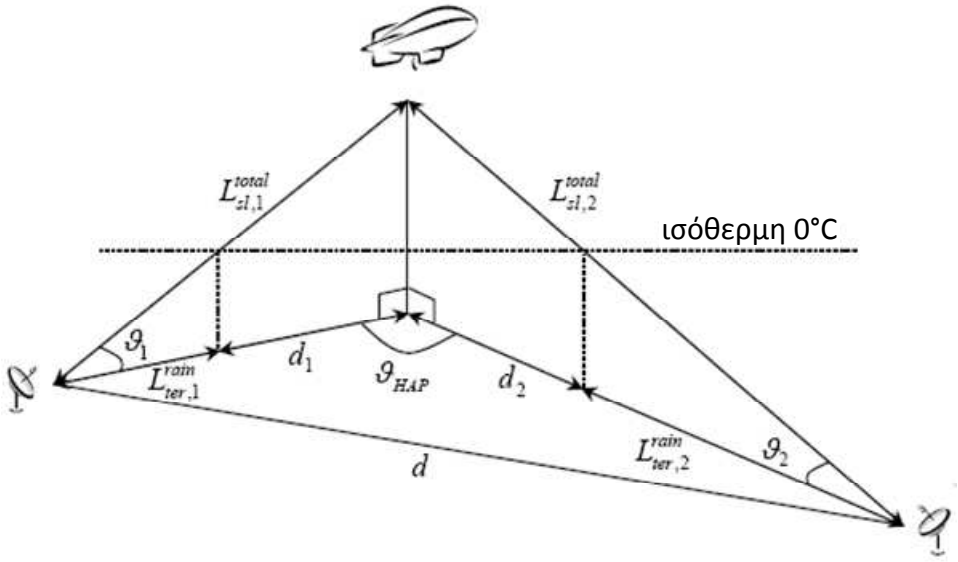
όπου h_L =1000m το ύψος του τυρβώδους στρώματος (turbulent layer).

6.3 ΔΙΠΛΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗ ΛΗΨΗ ΘΕΣΗΣ

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζεται ένα δίκτυο στρατοσφαιρικών επικοινωνιών του οποίου η προς τα κάτω ζεύξη προστατεύεται από σχήμα διπλής διαφορικής λήψης θέσης. Η θεωρούμενη τοπολογία φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Ο κύριος και ο δευτερεύων επίγειος σταθμός είναι τοποθετημένοι σε γωνίες ανύψωσης ϑ_1, ϑ_2 αντιστοίχως, σχηματίζοντας γωνία διαχωρισμού (separation angle) ϑ_{HAP} με το σημείο προβολής της πλατφόρμας στο έδαφος (σημείο ναδίρ). Υποθέτουμε ότι υιοθετείται ο συνδυασμός επιλογής (selection combining) στη διαφορική προστασία, τουτέστιν επιλέγεται το ισχυρότερο από τα λαμβανόμενα σήματα όσον αφορά στο σηματοθορυβικό λόγο, συνδυάζοντας έτσι την υψηλή επίδοση με την απλότητα σχεδίασης του συστήματος.

Η ολική ατμοσφαιρική απόσβεση που υπερβαίνεται με πιθανότητα $p\%$ σε κάθε επίγειο σταθμό περιγράφεται από τη σχέση (6.1). Στις αποστάσεις ενδιαφέροντος του στρατοσφαιρικού συστήματος, όλα τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα εκτός της βροχής μπορούν να θεωρηθούν κατά προσέγγιση σταθερά ως προς το χώρο και το χρόνο, για τις δύο ζεύξεις του διαφορικού σχήματος [9,10,11,12]. Αντίθετα η βροχή είναι ο μοναδικός παράγοντας που παρουσιάζει πολύ έντονη χωρική ανομοιογένεια. Οι βασικές θεωρήσεις που αφορούν στη μοντελοποίηση των τυχαίων μεταβλητών της απόσβεσης λόγω βροχής $A_{R,1}$ και $A_{R,2}$ κατά μήκος των εναλλακτικών διαδρομών δίνονται από τους Panagopoulos et al. [14]. Το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων [7] για τον οριζόντιο άξονα, μαζί με την υπόθεση Crane [15] για τον κατακόρυφο άξονα, εφαρμόζονται για την ανάλυση της ανομοιογένειας του μέσου βροχής. Παγκόσμια στατιστικά δεδομένα για τη στατιστική κατανομή της έντασης βροχόπτωσης [16] και το ύψος βροχής [17] χρησιμοποιούνται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3.

Κάθε χρονική στιγμή, η βελτίωση που προέρχεται από τη διπλή διαφορική λήψη εξαρτάται από τη γωνία διαχωρισμού ϑ_{HAP} που σχηματίζουν οι δύο εναλλακτικές ζεύξεις. Η γωνία αυτή λαμβάνει τιμές στο διάστημα 0° έως 360°, με τη μέγιστη αποσυσχέτιση της απόσβεσης βροχής να εμφανίζεται για $\vartheta_{HAP} = \pi$. Σε κάθε περίπτωση, κριτικής σημασίας είναι και η απόσταση διαχωρισμού d (km) ανάμεσα στους επίγειους σταθμούς, καθώς η σχετική απομάκρυνσή τους συνεπάγεται μείωση του συντελεστή συσχέτισης των μεταβλητών απόσβεσης βροχής $A_{R,1}$ και $A_{R,2}$, οδηγώντας το διαφορικό σχήμα σε υψηλό κέρδος.



Σχήμα 6.1: Διάταξη στρατοσφαιρικού δικτύου με διπλή διαφορική προστασία.

6.4 Επιδοση Στρατοσφαιρικου Συστηματος που Χρησιμοποιει Διπλη Διαφορικη Ληψη Θεσης

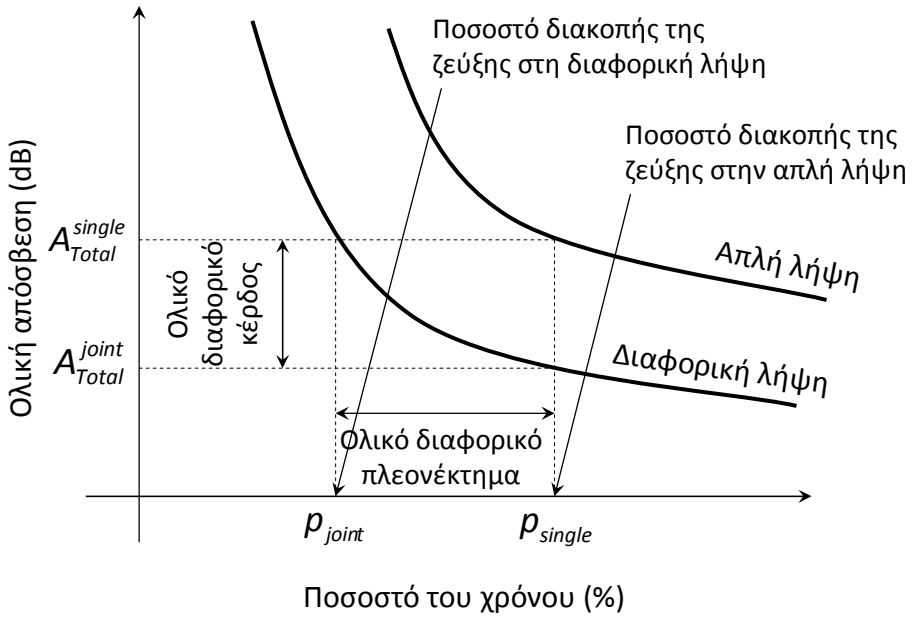
Η εκτίμηση της επίδοσης του σχήματος διαφορικής προστασίας πραγματοποιείται με στατιστικό τρόπο και συγκεκριμένα με βάση το ποσοστό του χρόνου υπέρβασης μιας στάθμης ολικής απόσβεσης, όταν η λήψη γίνεται από δύο εναλλακτικούς επίγειους σταθμούς σε σχέση με το αντίστοιχο ποσοστό όταν η λήψη γίνεται αποκλειστικά από τον σταθμό αναφοράς.

Λαμβάνοντας υπόψη τις καμπύλες του ποσοστού υπέρβασης μιας στάθμης ολικής απόσβεσης του Σχήματος 6.2, το ολικό διαφορικό κέρδος (total diversity gain) G_D (dB) ορίζεται από τη διαφορά των κατωφλίων ατμοσφαιρικής απόσβεσης που υπερβαίνονται με την ίδια πιθανότητα στην απλή και τη διαφορική λήψη [8]. Το διαφορικό κέρδος εκφράζει, ουσιαστικά, τη μείωση του περιθωρίου διαλείψεων που επιτυγχάνεται από ένα σύστημα διπλής διαφορικής λήψης σε σχέση με ένα σύστημα απλής λήψης.

$$G_D(p\%) = A_{Total}^{single}(p\%) - A_{Total}^{joint}(p\%) \tag{6.46}$$

Ισοδύναμα, το ολικό διαφορικό πλεονέκτημα (total diversity improvement) I_D (dB) ορίζεται ως ο λόγος της πιθανότητας υπέρβασης μιας στάθμης ολικής απόσβεσης στην απλή λήψη, προς την πιθανότητα υπέρβασης της ίδιας στάθμης ολικής απόσβεσης στην περίπτωση διαφορικής λήψης. Ποιοτικά το διαφορικό πλεονέκτημα εκφράζει το πόσες φορές μειώνεται το χρονικό διάστημα (σε λεπτά ανά έτος) κατά το οποίο δεν πληρούνται οι προδιαγραφές του συστήματος, ή αλλιώς το πόσο αυξάνεται η διαθεσιμότητα του συστήματος, με χρήση της διαφορικής λήψης.

$$I_D(A) = \frac{p_{single}(A)}{p_{joint}(A)} \tag{6.47}$$



Σχήμα 6.2: Ολικό διαφορικό κέρδος και ολικό διαφορικό πλεονέκτημα.

Η απόδοση του στρατοσφαιρικού συστήματος με διπλή διαφορική λήψη θέσης μπορεί ακόμα να ποσοτικοποιηθεί μέσα από τη στάθμη πιθανότητας λανθασμένου ψηφίου (Bit Error Probability, BEP) που υπερβαίνεται για δεδομένο ποσοστό του χρόνου λειτουργίας του [18]. Η πιθανότητα λήψης λανθασμένου ψηφίου είναι συνάρτηση του λόγου ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου (E_b/n_0) και εξαρτάται από τη διαμόρφωση που χρησιμοποιεί το σύστημα. Για PSK διαμόρφωση και (E_b/n_0) σε dB, ισχύει

$$BEP = \frac{1}{2} erfc\left(\sqrt{10^{0.1\,(E_b/n_0)}}\right) \tag{6.48}$$

Σε κάθε εναλλακτική διαδρομή, ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου $(E_b/n_0)_{thri}$ στην είσοδο του δέκτη μειώνεται λόγω των ατμοσφαιρικών αποσβέσεων $A_{T,i}$,

$$\left(\frac{E_b}{n_0}\right)_{thri} = \left(\frac{E_b}{n_0}\right)_{csi} - A_{T,i}^{thr}, \quad (i = 1,2) \tag{6.49}$$

όπου $(E_b/n_0)_{csi}$ ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Η πιθανότητα διακοπής του συστήματος δίνεται από τη συνδυασμένη πιθανότητα υπέρβασης των κατωφλίων λήψης λανθασμένου ψηφίου στους δύο εναλλακτικούς επίγειους σταθμούς.

$$P_M = \Pr\left[BEP_1 \geq BEP\left[\left(\frac{E_b}{n_0}\right)_{thr1}\right],\ BEP_2 \geq BEP\left[\left(\frac{E_b}{n_0}\right)_{thr2}\right]\right] \tag{6.50}$$

6.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΟΣΦΑΙΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το στρατοσφαιρικό σύστημα τίθεται εκτός λειτουργίας όταν οι ατμοσφαιρικές αποσβέσεις $A_{T,1}$ και $A_{T,2}$ στις δύο εναλλακτικές ζεύξεις υπερβούν ταυτόχρονα τα προκαθορισμένα περιθώρια διαλείψεων $A_{T,1}^{thr}$ και $A_{T,2}^{thr}$ [19]. Κάνοντας χρήση της σχέσης (6.1), η αντίστοιχη πιθανότητα διακοπής p_{out} είναι,

$$p_{out} = \Pr[A_{T,1} \geq A_{T,1}^{thr}, A_{T,2} \geq A_{T,2}^{thr}]$$
$$= \Pr\left[A_T^{joint} \geq A_G^{thr} + \sqrt{\left(A_R^{joint} + A_C^{thr}\right)^2 + \left(A_S^{thr}\right)^2} \right] \tag{6.51}$$

Στην παραπάνω σχέση A_G^{thr}, A_C^{thr}, A_S^{thr} είναι τα κατώφλια απόσβεσης από τα ατμοσφαιρικά αέρια, τα σύννεφα και τους τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς. A_R^{joint} και A_T^{joint} είναι η από κοινού απόσβεση βροχής και η αντίστοιχη από κοινού ολική ατμοσφαιρική απόσβεση που υπερβαίνονται με την ίδια πιθανότητα και στις δύο διαδρομές. Δεδομένου ότι υιοθετείται ο συνδυασμός επιλογής, η από κοινού απόσβεση βροχής ορίζεται ως εξής,

$$A_R^{joint} = \min\left\{ A_{R,1}, A_{R,2} + 20\log\frac{L_{sl,2}^{total}}{L_{sl,1}^{total}} \right\} \tag{6.52}$$

όπου $A_{R,1}$, $A_{R,2}$ οι αποσβέσεις βροχής και $L_{sl,1}^{total}$, $L_{sl,2}^{total}$, τα μήκη των κεκλιμένων ραδιοδρόμων (βλ. Σχήμα 6.1), που στη γενική περίπτωση διαφέρουν λόγω διαφορετικών γωνιών ανύψωσης κύριου και δευτερεύοντος σταθμού. Μια ενδεχόμενη απομάκρυνση του δευτερεύοντος επίγειου τερματικού από το κατώτατο σημείο της πλατφόρμας έχει δύο επιπτώσεις. Πρώτον, αποσυσχέτιση των αποσβέσεων βροχής εφόσον αυξηθεί η απόσταση διαχωρισμού των δύο τερματικών, και δεύτερον, σημαντική αύξηση της διαφοράς των απωλειών ελευθέρου χώρου κατά μήκος των $L_{sl,1}^{total}$, $L_{sl,2}^{total}$, εξαιτίας του σχετικά χαμηλού ύψους της πλατφόρμας. Η διαφορά αυτή λαμβάνεται υπόψη στην (6.52) μέσω του όρου $20\log\left(L_{sl,2}^{total} / L_{sl,1}^{total}\right)$. Η από κοινού πιθανότητα υπέρβασης p_R των περιθωρίων διαλείψεων $A_{R,1}^{thr} = A_R^{thr}$, $A_{R,2}^{thr} = A_R^{thr} - 20\log\left(L_{sl,2}^{total} / L_{sl,1}^{total}\right)$ λόγω βροχής, υπολογίζεται από τη σχέση [20,21],

$$p_R = \Pr\left[A_{R,1} \geq A_R^{thr}, A_{R,2} \geq A_R^{thr} - 20\log\frac{L_{sl,2}^{total}}{L_{sl,1}^{total}} \right] =$$
$$= \int_{A_R^{thr}}^{+\infty} \int_{A_R^{thr} - 20\log\frac{L_{sl,2}^{total}}{L_{sl,1}^{total}}}^{+\infty} f_{A_{R,1}A_{R,2}}(x,y)\,dx\,dy \tag{6.53}$$

όπου $f_{A_{R,1}A_{R,2}}$ η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τυχαίων μεταβλητών $A_{R,1}$, $A_{R,2}$. Ακολουθώντας το λογαριθμοκανονικό μοντέλο και σύμφωνα με την ανάλυση του Παραρτήματος Α, η τελευταία σχέση μπορεί να πάρει τη μορφή,

$$p_R = \Pr\left[A_{R,1} \geq A_R^{thr}, A_{R,2} \geq A_R^{thr} - 20\log\frac{L_{sl,2}^{total}}{L_{sl,1}^{total}} \right] = \\ = \frac{1}{2}\int_{u_1}^{+\infty} f_{U_1}(u)\ erfc\left(\frac{u_2 - \rho_n\, u}{\sqrt{2}\sqrt{1-\rho_n^{\ 2}}} \right) du \tag{6.54}$$

όπου

$$f_{U_1}(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2} \right) \tag{6.55}$$

Στο παραπάνω ολοκλήρωμα έχει γίνει χρήση των κανονικοποιημένων τυχαίων μεταβλητών u_1, u_2, που εμπεριέχουν τις στατιστικές παραμέτρους της κατανομής απόσβεσης βροχής $A_{m,i}$, $S_{a,i}$, $(i = 1,2)$.

$$u_1 = \frac{\ln A_R^{thr} - \ln A_{m,1}}{S_{a,1}},\ u_2 = \frac{\ln\left(A_R^{thr} - 20\log\frac{L_{sl,2}^{total}}{L_{sl,1}^{total}} \right) - \ln A_{m,2}}{S_{a,2}} \tag{6.56}$$

Οι παράμετροι $A_{m,i}$, $S_{a,i}$, $(i = 1,2)$ σχετίζονται κατά τα γνωστά με τις στατιστικές παραμέτρους βροχόπτωσης R_m, S_r, που προσεγγίζονται κάνοντας χρήση των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων της αθροιστικής κατανομής υπέρβασης της σημειακής έντασης βροχόπτωσης για όλες τις τοποθεσίες της γης και ένα ευρύ σύνολο πιθανοτήτων [16], σύμφωνα με το Παράρτημα Δ.

$$S_{a,i} = \sqrt{\ln\left\{ 1 + \frac{H_i}{L_{ter,i}^{rain\ 2}} \left[\exp\left(a_i^{\ 2}\ S_r^{\ 2} \right) - 1 \right] \right\}},\quad (i = 1,2) \tag{6.57}$$

$$A_{m,i} = k_i\ R_m^{\ a_i}\ L_{ter,i}^{rain} \exp\left(\frac{a_i^{\ 2} S_r^{\ 2} - S_{a,i}^{\ 2}}{2} \right),\quad (i = 1,2) \tag{6.58}$$

Οι συντελεστές ειδικής απόσβεσης βροχής a_i, k_i, $(i = 1,2)$ προκύπτουν με τη σειρά τους σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 3, (βλ. §3.3.3). Ο λογαριθμοκανονικός συντελεστής συσχέτισης ρ_n των κανονικών τυχαίων μεταβλητών $\ln A_{R,1}$, $\ln A_{R,2}$ εκφράζεται ως,

$$\rho_n = \frac{1}{S_{a,1}\ S_{a,2}} \ln\left[1 + \rho\sqrt{(\exp S_{a,1}^{\ 2} - 1)\,(\exp S_{a,2}^{\ 2} - 1)} \right] \tag{6.59}$$

όπου ρ ο συντελεστής συσχέτισης των αποσβέσεων βροχής $A_{R,1}$, $A_{R,2}$.

$$\rho = \frac{H_{1,2}}{\sqrt{H_1\, H_2}} \tag{6.60}$$

Σύμφωνα με το Παράρτημα Γ οι παράγοντες H_1, H_2 υπολογίζονται από τη σχέση,

$$H_i = 2\, L_{ter,i}^{rain}\, G \sinh^{-1}\left(\frac{L_{ter,i}^{rain}}{G}\right) + 2\, G^2 \left[1 - \sqrt{\left(\frac{L_{ter,i}^{rain}}{G}\right)^2 + 1}\right], \quad L_{ter,i} \le D_r\,, \quad (i = 1,2) \tag{6.61}$$

ενώ ο $H_{1,2}$ δίνεται από το ολοκλήρωμα,

$$H_{1,2} = \int_{d_1}^{d_1 + L_{ter,1}^{rain}} \int_{d_2}^{d_2 + L_{ter,2}^{rain}} \rho_{Lin}(x,y)\, dx\, dy \tag{6.62}$$

Ο συντελεστής ρ_{Lin} εκφράζει τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου βροχής ανάμεσα σε δύο σημεία απόστασης d που βρίσκονται από ένα σε κάθε υποθετική επίγεια ζεύξη $L_{ter,i}^{rain}$ $(i = 1,2)$, προβολή της αντίστοιχης κεκλιμένης διαδρομής $L_{sl,i}^{rain}$ από την ισόθερμη των 0°C ως τους σταθμούς λήψης. Ο συντελεστής αυτός μπορεί να προσεγγιστεί από τον τύπο του Lin [7],

$$\rho_{Lin}(x,y) = \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2(x,y)}}, \quad d \le D_r \tag{6.63}$$

και η απόσταση των δύο σημείων από το νόμο των συνημιτόνων με τη βοήθεια της κεντρικής γωνίας διαχωρισμού ϑ_{HAP}.

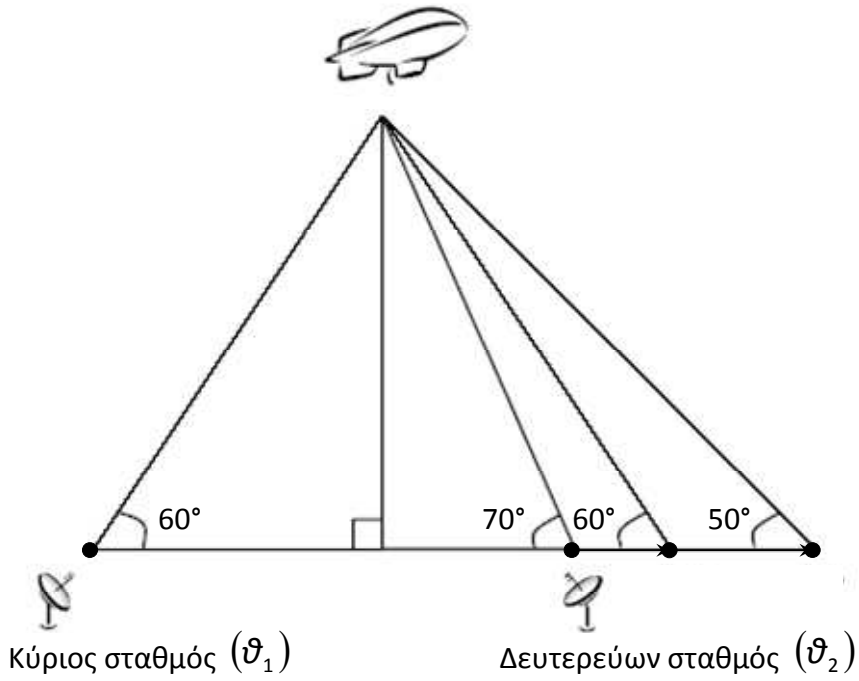
$$d(x,y) = \sqrt{x^2 + y^2 - 2\, x\, y \cos\vartheta_{HAP}} \tag{6.64}$$

Η παράμετρος G εξαρτάται από τα χωρικά χαρακτηριστικά του μέσου βροχής, αναπαριστά την απόσταση στην οποία ισχύει $\rho_{Lin}(x,y) = 1/\sqrt{2}$ και μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια μετεωρολογικών δεδομένων [22]. Καθώς η αντιστροφή του ολοκληρώματος (6.54) για την εύρεση της απόσβεσης βροχής A_R^{joint} έχοντας δεδομένη την από κοινού πιθανότητα υπέρβασης p_R δεν είναι δυνατή με αναλυτικό τρόπο, ακολουθείται μια διαδικασία πολυωνυμικής παρεμβολής σε ένα εύρος τιμών κατωφλίων απόσβεσης βροχής συναρτήσει των αντίστοιχων ποσοστών για να καταλήξουμε σε μια εκτίμηση του ζητούμενου $A_R^{joint}(p)$. Για τη συγκεκριμένη πιθανότητα υπέρβασης υπολογίζονται εν συνεχεία οι αποσβέσεις αερίων, σύννεφων και σπινθηρισμών, και τελικά η συνδυασμένη εξασθένηση από όλες τις ατμοσφαιρικές πηγές $A_T^{joint}(p)$.

6.6 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

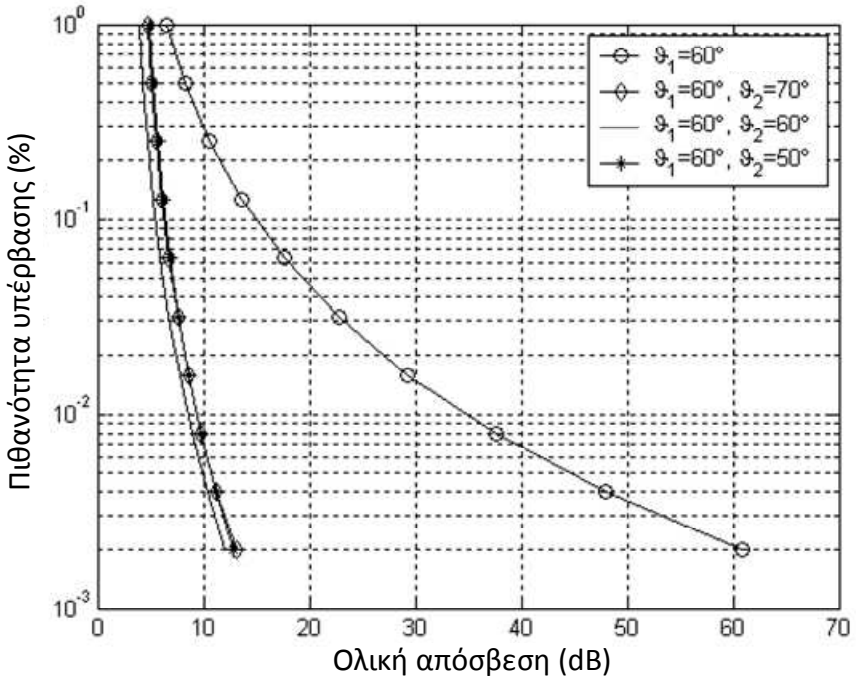
Στην ενότητα αυτή, η εφαρμογή της διαφορικής λήψης θέσης ως τεχνική άμβλυνσης των ατμοσφαιρικών διαλείψεων εξετάζεται για το οπισθοζευκτικό τμήμα (backhaul link) στρατοσφαιρικών δικτύων. Δεδομένου ότι ο κύριος πυλαίος σταθμός έχει γωνία ανύψωσης ϑ_1 ως προς την πλατφόρμα, η επίδοση του συστήματος μελετάται κατά την τοποθέτηση ενός δευτερεύοντος πυλαίου σταθμού σε εναλλακτικές θέσεις και αποστάσεις από τον κύριο σταθμό, μεταβάλλοντας είτε τη γωνία ανύψωσής του ϑ_2, είτε τη γωνία ϑ_{HAP} που σχηματίζεται μεταξύ των δύο δεκτών και του σημείου ναδίρ (βλ. Σχήμα 6.1) [23]. Η πλατφόρμα αιωρείται σε ύψος 22km, ενώ το υψόμετρο των δύο επίγειων σταθμών λαμβάνεται 100m από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι επίγειες κεραίες λήψης θεωρούμε ότι έχουν φυσική διάμετρο 0.1m και ότι λειτουργούν με συντελεστή απόδοσης 50%. Η συχνότητα λειτουργίας της κάτω ζεύξης του συστήματος κυμαίνεται στις ζώνες 27.50-28.35GHz και 47.2-47.5GHz, ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης, ενώ η πόλωση που χρησιμοποιείται είναι κυκλική.

Σε πρώτη φάση θεωρούμε το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.3 που λειτουργεί στο Λονδίνο (Ηνωμένο Βασίλειο) με συχνότητα κάτω ζεύξης 47.5GHz. Ο κυρίως επίγειος σταθμός έχει γωνία ανύψωσης $\vartheta_1 = 60^\circ$ ως προς την πλατφόρμα και προκειμένου να βελτιωθεί η διαθεσιμότητα του συστήματος εφαρμόζεται διπλή διαφορική λήψη θέσης. Ο δευτερεύων σταθμός τοποθετείται σε διαδοχικά σημεία της περιοχής κάλυψης, ώστε η κεντρική γωνία που σχηματίζεται με το σημείο ναδίρ να παραμένει σταθερή $\vartheta_{HAP} = \pi$ και η γωνία ανύψωσης ϑ_2 σταδιακά να μειώνεται $\left(70^\circ \geq \vartheta_2 \geq 50^\circ\right)$.

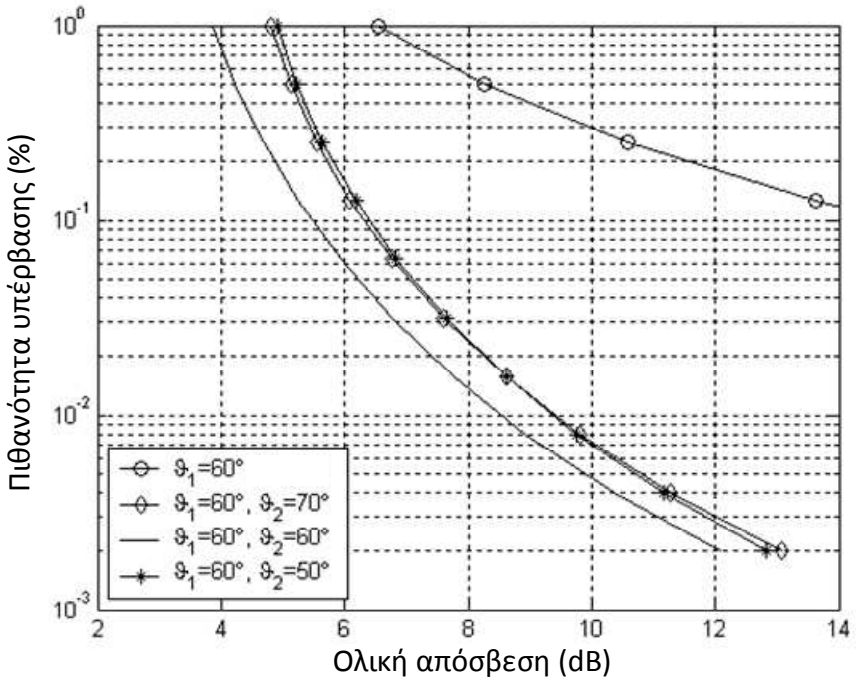


Σχήμα 6.3: Στρατοσφαιρικό δίκτυο που λειτουργεί στο Λονδίνο με συχνότητα κάτω ζεύξης 47.5GHz και διπλή διαφορική λήψη θέσης με $\vartheta_{HAP} = \pi$.

Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται η κατανομή υπέρβασης στάθμης ολικών ατμοσφαιρικών αποσβέσεων για τις περιπτώσεις απλής και διαφορικής λήψης. Από το 6.4(α) είναι προφανές ότι η τεχνική διαφορικής προστασίας βελτιώνει σημαντικά τη διαθεσιμότητα της ζεύξης. Η μέγιστη βελτίωση φθάνει περίπου στα 48dB και στις τρεις περιπτώσεις διαφορικής προστασίας για μια πιθανότητα υπέρβασης 0.002%. Εστιάζοντας στις τρεις καμπύλες του σχήματος διαφορικής προστασίας (Σχήμα 6.4(β)) για μικρές τιμές της ολικής απόσβεσης, διαπιστώνουμε ότι η αποδοτικότητα της τεχνικής μεγιστοποιείται για ίσες τιμές γωνιών ανύψωσης των επίγειων σταθμών. Πράγματι, ελάττωση της γωνίας ϑ_2 από τις 70° στις 60° βελτιώνει την καμπύλη, κατά περίπου 1dB, καθώς αποσυσχετίζει τη βροχόπτωση ανάμεσα στους δύο επίγειους σταθμούς. Ωστόσο περαιτέρω ελάττωση της ϑ_2 από τις 60° στις 50° χειροτερεύει την επίδοση του συστήματος, λόγω αύξησης απωλειών ελευθέρου χώρου στη δευτερεύουσα ζεύξη, καθώς αυξάνεται η απόσταση του εναλλακτικού επίγειου σταθμού από την εναέρια πλατφόρμα.

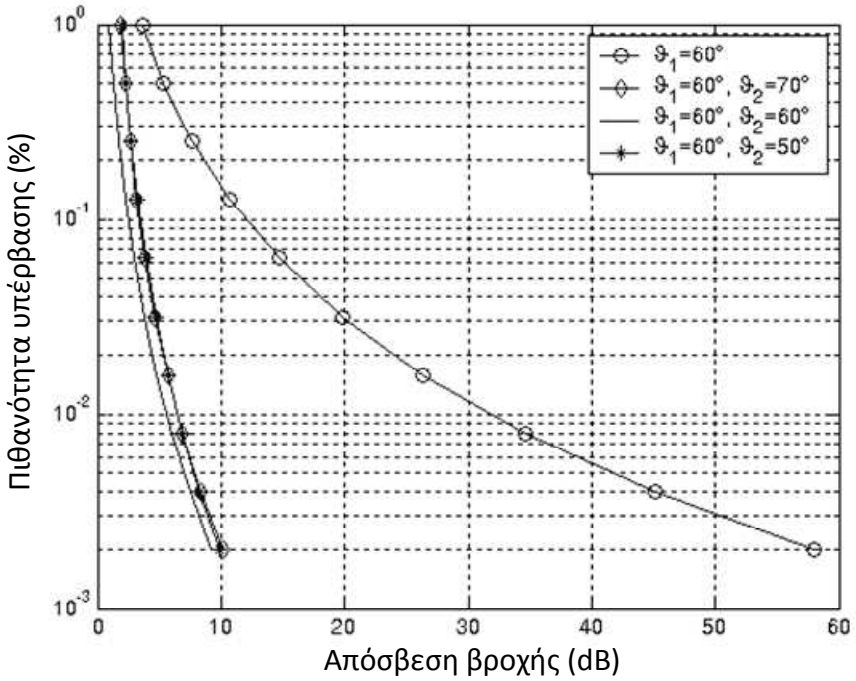


(α)

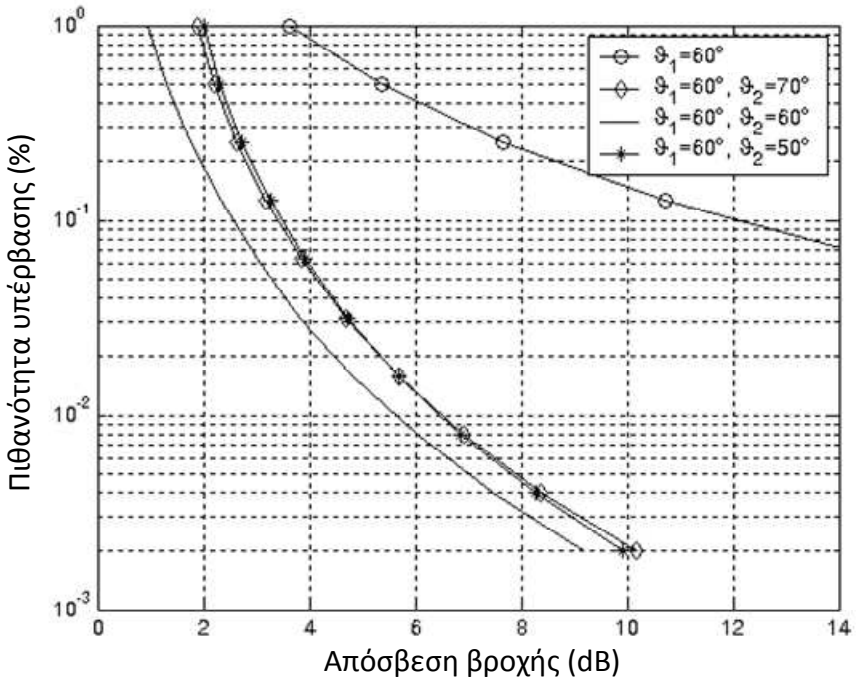


(β)

Σχήμα 6.4: Πιθανότητα υπέρβασης στάθμης ολικών ατμοσφαιρικών αποσβέσεων για το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.3, με και χωρίς διπλή διαφορική λήψη θέσης.



(α)



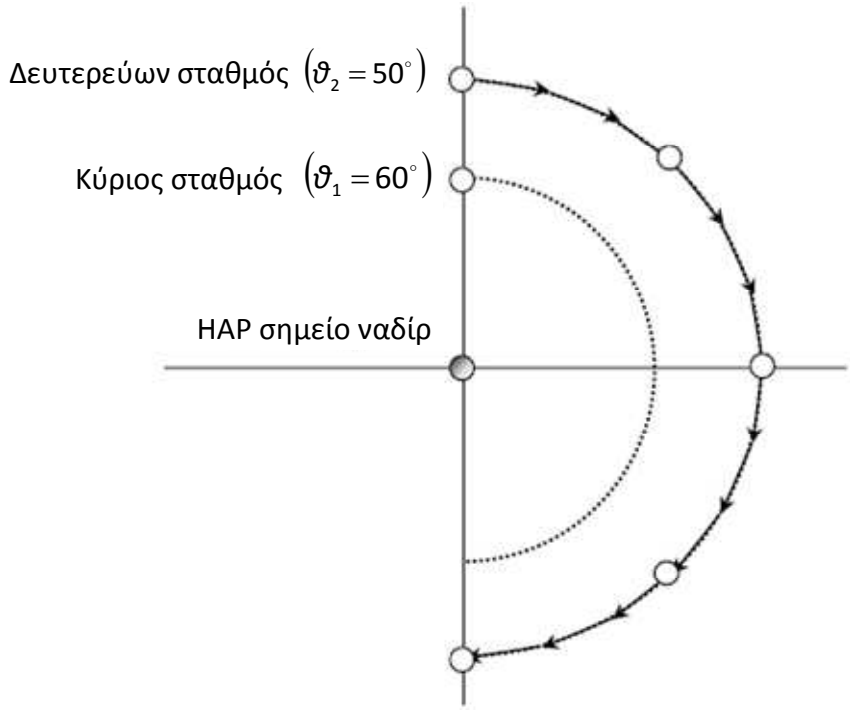
(β)

Σχήμα 6.5: Πιθανότητα υπέρβασης στάθμης απόσβεσης βροχής

για το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.3, με και χωρίς διπλή διαφορική λήψη θέσης.

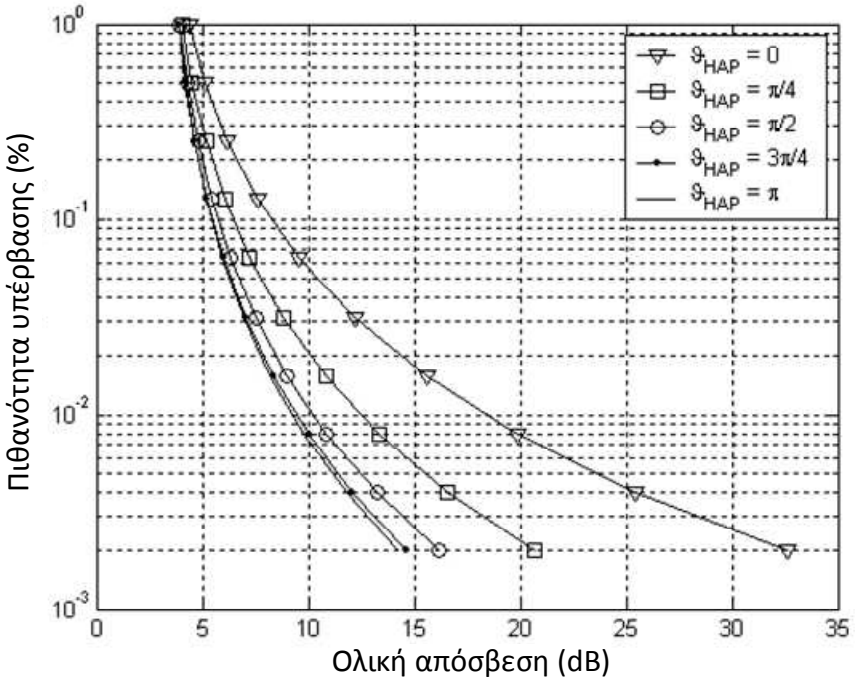
Επιπλέον, στο Σχήμα 6.5 φαίνεται η πιθανότητα υπέρβασης στάθμης απόσβεσης βροχής για το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.3. Διαπιστώνουμε πως όταν παραλείπεται η συνεισφορά των ατμοσφαιρικών αερίων, των νεφών και των τροποσφαιρικών σπινθηρισμών στον υπολογισμό της ολικής απόσβεσης του σήματος, η επίδοση τόσο της απλής όσο και της διπλής διαφορικής λήψης θέσης εμφανίζεται βελτιωμένη. Οι καμπύλες είναι μετατοπισμένες προς τα αριστερά σε σχέση με εκείνες του Σχήματος 6.4, υποεκτιμώντας την ολική ατμοσφαιρική απόσβεση του συστήματος που υπερβαίνεται με δεδομένη πιθανότητα κατά περίπου 3dB.

Στη συνέχεια μελετούμε το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.6 που λειτουργεί στο Τόκιο (Ιαπωνία) με συχνότητα κάτω ζεύξης 28GHz. Οι επίγειοι σταθμοί είναι τοποθετημένοι σε γωνίες ανύψωσης $\vartheta_1 = 60^\circ$, $\vartheta_2 = 50^\circ$ αντιστοίχως. Το σύστημα χρησιμοποιεί QPSK διαμόρφωση, και ο λόγος ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου $(E_b/n_0)_{csi}$ στους δέκτες υπό συνθήκες καθαρού ουρανού λαμβάνεται ίσος με 14dB. Η επίδοση του σχήματος διπλής διαφορικής προστασίας εξετάζεται καθώς η απόσταση διαχωρισμού d ανάμεσα στους εναλλακτικούς σταθμούς μεγαλώνει, από τη μετακίνηση του δευτερεύοντος σταθμού πάνω στο ημικύκλιο $0 \le \vartheta_{HAP} \le \pi$.



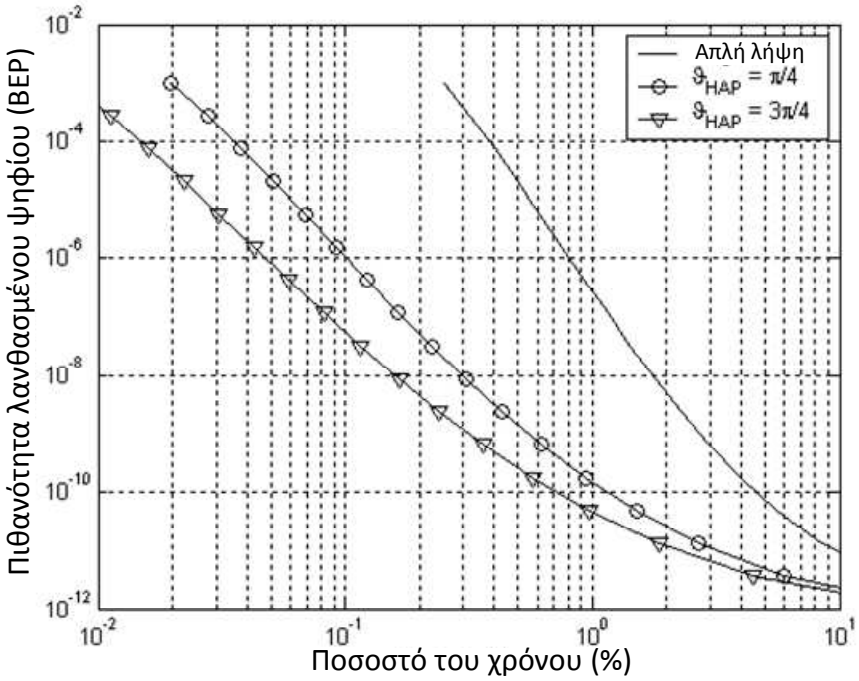
Σχήμα 6.6: Στρατοσφαιρικό δίκτυο που λειτουργεί στο Τόκιο με συχνότητα κάτω ζεύξης 28GHz και διπλή διαφορική λήψη θέσης με $\vartheta_1 = 60^\circ$, $\vartheta_2 = 50^\circ$.

Οι καμπύλες του Σχήματος 6.7 αποδεικνύουν βελτίωση της διαθεσιμότητας κάτω ζεύξης, όσο οι επίγειοι σταθμοί απομακρύνονται ο ένας από τον άλλον, διατηρώντας σταθερή απόσταση από την εναέρια πλατφόρμα. Πράγματι, η άνωθεν μετατόπιση του δευτερεύοντος επίγειου σταθμού προκαλεί αποσυσχέτιση των αποσβέσεων βροχής στους δύο κεκλιμένους ραδιοδρόμους, χωρίς περαιτέρω επιβάρυνση των απωλειών ελευθέρου χώρου. Η μέγιστη βελτίωση αγγίζει τα 19.25dB για μια πιθανότητα υπέρβασης 0.002% και εμφανίζεται κατά την αύξηση της γωνίας ϑ_{HAP} από 0° σε 180°.

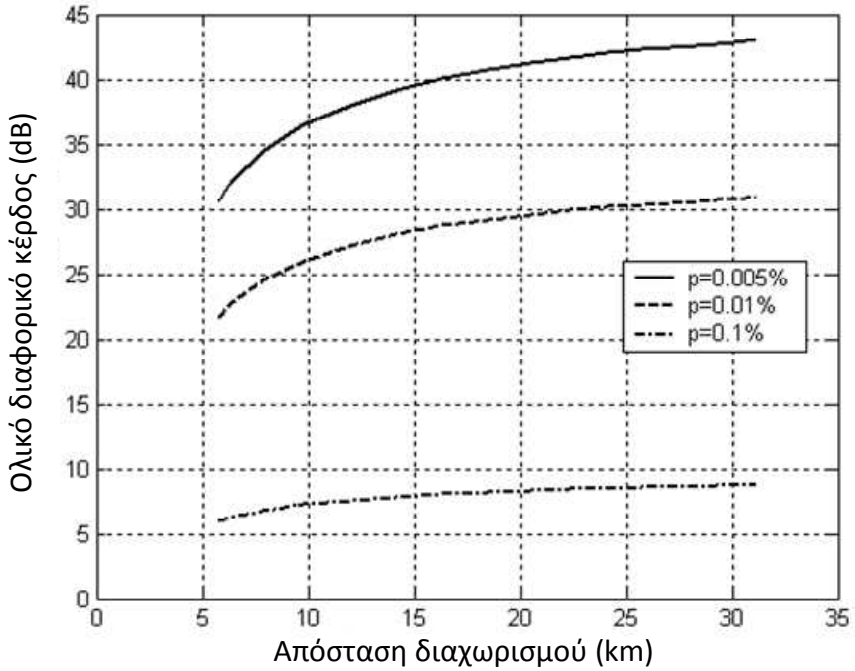


Σχήμα 6.7: Πιθανότητα υπέρβασης στάθμης ολικών ατμοσφαιρικών αποσβέσεων για το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.6 με διπλή διαφορική λήψη θέσης.

Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται η πιθανότητα λήψης λανθασμένου ψηφίου (BEP) στο δέκτη για το παραπάνω δίκτυο. Η διπλή διαφορική προστασία βελτιώνει σημαντικά την πιθανότητα BEP σε σχέση με την απλή λήψη, ενώ περαιτέρω μείωση του BEP για δεδομένο χρονικό ποσοστό επιτυγχάνεται με τη γωνιακή απομάκρυνση των δύο εναλλακτικών σταθμών από τις 45° στις 135°.



Σχήμα 6.8: Ποσοστό του χρόνου για το οποίο υπερβαίνεται μια στάθμη BEP για το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.6, με και χωρίς διπλή διαφορική λήψη θέσης.



Σχήμα 6.9: Εξάρτηση του ολικού διαφορικού κέρδους από την απόσταση διαχωρισμού των δύο εναλλακτικών επίγειων σταθμών και την πιθανότητα υπέρβασης στάθμης ολικής ατμοσφαιρικής απόσβεσης για το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.6.

Τέλος, το Σχήμα 6.9 απεικονίζει το ολικό διαφορικό κέρδος, όπως αυτό ορίζεται από τη σχέση (6.46), συναρτήσει της απόστασης διαχωρισμού d ανάμεσα στον κύριο και τον δευτερεύοντα επίγειο σταθμό λήψης και της πιθανότητας υπέρβασης στάθμης ολικής ατμοσφαιρικής απόσβεσης, για το στρατοσφαιρικό δίκτυο του Σχήματος 6.6. Από τις καμπύλες παρατηρούμε ότι μεγαλύτερες τιμές διαφορικού κέρδους προκύπτουν για μικρότερες πιθανότητες υπέρβασης κατωφλίων ατμοσφαιρικής εξασθένησης. Επιπλέον, η αύξηση της απόστασης διαχωρισμού από τη μετατόπιση του δευτερεύοντος σταθμού πάνω στο ημικύκλιο $0 \le \vartheta_{HAP} \le \pi$, οδηγεί σε κάθε περίπτωση στην αύξηση του ολικού διαφορικού κέρδους, ειδικότερα για τις μικρότερες πιθανότητες υπέρβασης.

6.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο παρόν Κεφάλαιο μελετήσαμε την τεχνική διπλής διαφορικής λήψης θέσης με συνδυασμό επιλογής για την αύξηση της διαθεσιμότητας και την άμβλυνση των ατμοσφαιρικών διαλείψεων στην προς τα κάτω ζεύξη στρατοσφαιρικών δικτύων. Το προτεινόμενο ολοκληρωμένο φυσικό μοντέλο διάδοσης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της απόδοσης του σχήματος διαφορικής προστασίας και της πιθανότητας διακοπής λειτουργίας του συστήματος. Το μοντέλο αφενός συνδυάζει τη συνεισφορά της επίδρασης όλων των ατμοσφαιρικών φαινομένων στη διάδοση του στρατοσφαιρικού σήματος, τουτέστιν της εξασθένησης από τα ατμοσφαιρικά αέρια, τα σύννεφα, τους τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς και τη βροχή. Αφετέρου λαμβάνει υπόψη τη σχετική διαφορά απωλειών ελευθέρου χώρου στις εναλλακτικές διαδρομές της διαφορικής λήψης, που προκύπτουν από την εν γένει διαφορετική απόσταση μεταξύ εναέριας πλατφόρμας και επίγειων σταθμών.

Η εφαρμογή της παραπάνω μοντελοποίησης σε δύο εναλλακτικά σενάρια αποδεικνύει καταρχάς την αποδοτικότητα της τεχνικής διπλής διαφορικής προστασίας στην περίπτωση των στρατοσφαιρικών δικτύων. Επιπλέον, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για την πιθανότητα υπέρβασης δεδομένων κατωφλίων εξασθένησης, διαπιστώνουμε ότι η βροχή αποτελεί μεν τον κυριότερο παράγοντα υποβιβασμού, ωστόσο η συνεισφορά των λοιπών ατμοσφαιρικών παραγόντων δεν μπορεί να αμεληθεί, καθώς οδηγεί σε υποεκτίμηση της πιθανότητας εκτός λειτουργίας της ζεύξης, τόσο στην απλή όσο και στη διπλή διαφορική λήψη.

Τέλος, τα σενάρια εφαρμογής καταδεικνύουν πώς η βελτίωση της απόδοσης του διαφορικού σχήματος εξαρτάται από τη σχετική τοποθέτηση των εναλλακτικών επίγειων σταθμών στην περιοχή κάλυψης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας. Τόσο οι γωνίες ανύψωσης των τελευταίων ως προς την πλατφόρμα όσο και η κεντρική γωνία διαχωρισμού μεταξύ σταθμών και σημείου ναδίρ, έχουν σημαντική επίδραση στη λειτουργία του συστήματος και στο ολικό διαφορικό κέρδος. Για την περίπτωση αντιδιαμετρικής τοποθέτησης των εναλλακτικών σταθμών, βέλτιστη επιλογή αποτελεί η εξίσωση των γωνιών ανύψωσης, καθώς περαιτέρω αύξηση της απόστασης διαχωρισμού μεταξύ των σταθμών, αν και προκαλεί μεγαλύτερη αποσυσχέτιση των αποσβέσεων βροχής, επιβαρύνει το σύστημα με αυξημένες απώλειες ελευθέρου χώρου. Αντιθέτως στην περίπτωση λειτουργίας εναλλακτικών σταθμών με σταθερές γωνίες ανύψωσης, η βέλτιστη επιλογή προκύπτει από τη μεγιστοποίηση της μεταξύ τους απόστασης, που επιτυγχάνεται όταν η γωνία διαχωρισμού φθάνει τις 180°.

6.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 6

[1] T.C.Tozer, D.Grace, “High-altitude platforms for wireless communications,” *Electronics & Communication Engineering Journal*, pp. 127-137, June 2001.

[2] Recommendation ITU-R P.618-10, “Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems,” (10/2009).

[3] T.Konefal, C.Spillard, and D.Grace, “Site diversity for high-altitude platforms: a method for the prediction of joint site attenuation statistics,” *IEEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagation*, vol.149, no.2, pp.124-128, April 2002.

[4] P.Tattelman and K.G.Scharr, “A model for estimating one minute rainfall rates,” J. Clim. Appl. Meteorol., vol.22, pp.1575-1580, 1983.

[5] G.Drufuca, “Radar derived statistics on the structure of precipitation patterns,” *J. Appl. Meteorol.*, vol.16, pp.1029-1035, 1977.

[6] T.Konefal, P.A.Watson, A.K.Shukla and A.Akram, “Prediction of monthly and annual availabilities on 10-50GHz satellite-Earth and aircraft to aircraft links,” IEE Proc. Microw. Antennas Propag., vol.147(2), pp.122-127, April 2000.

[7] S.H.Lin, “A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths,” *Bell Syst. Tech. Jour.*, vol.54, no.6, pp.1051-1083, 1975.

[8] A.D.Panagopoulos, P.-D.M.Arapoglou, J.D.Kanellopoulos, and P.G.Cottis, “Long-term rain attenuation probability and site diversity gain prediction formulas,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol.53, no.7, pp.2307-2313, July 2005.

[9] Recommendation ITU-R P.676-8, “Attenuation by atmospheric gases,” (10/2009).

[10] Recommendation ITU-R P.836-4, “Water vapour: surface density and total columnar content,” (10/2009).

[11] Recommendation ITU-R P.840-4, “Attenuation due to clouds and fog,” (10/2009).

[12] Recommendation ITU-R P.453-9, “The radio refractive index: its formula and refractivity data,” (04/2003).

[13] Recommendation ITU-R P.1510, “Annual mean surface temperature,” (02/2001).

[14] A.D.Panagopoulos, T.D.Kritikos, and J.D.Kanellopoulos, “Aggravation of radio interference effects on a dual polarized earth-space link by two adjacent interfering satellites under rain fades,” *Radio Science*, September 2005.

[15] R.K.Crane, “Propagation handbook for wireless communication system design,” *CRC Press LLC*, 2003.

[16] Recommendation ITU-R P.837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modeling,” (08/2007).

[17] Recommendation ITU-R P.839-3, “Rain height model for prediction methods,” (02/2001).

[18] S.N.Livieratos, and P.G.Cottis, “Availability and performance of single/multiple site diversity satellite systems under rain fades,” *European Trans. Telecommun.*, vol.12, pp.55-65, Jan/Feb 2001.

[19] J.D.Kanellopoulos and S.G.Koukoulas, “Outage performance of route diversity systems,” Radio Science, vol.26, no.4, pp.891-899, 1991.

[20] A.D.Panagopoulos, P.-D.M.Arapoglou, G.E.Chatzarakis, J.D.Kanellopoulos, and P.G.Cottis, “LMDS diversity systems: a new performance model incorporating stratified rain,” *IEEE Communications Letters*, vol.9, no.2, pp.145-147, 2005.

[21] A.D.Panagopoulos, and J.D.Kanellopoulos, “Cell-site diversity performance of millimeter-wave fixed cellular systems operating at frequencies above 20GHz,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.1, pp.183-185, 2002.

[22] M.Akimoto and K.Watanabe, “Study on rain attenuation considering rainfall-intensity dependent spatial correlation characteristics,” Proc. Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), vol.5, pp.2864-2868, 2004.

[23] A.D.Panagopoulos, E.M.Georgiadou and J.D.Kanellopoulos, “Selection combining site diversity performance in High Altitude Platform networks,” IEEE Communications Letters, vol.11, no.10, pp.787-789, 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ -7-

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ

7.1 ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

Στο 7^{ο} και τελευταίο Κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη ανασκόπηση των βασικότερων θεμάτων που μελετήθηκαν και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανά χείρας διατριβή. Τα ζητήματα που αναλύθηκαν αφορούν κυρίως προβλήματα ασύρματης διάδοσης εξαιρετικά υψίσυχνων κυμάτων σε περιβάλλον ατμοσφαιρικών διαλείψεων.

Τα δύο πρώτα Κεφάλαια της διατριβής είναι αφιερωμένα στην επισκόπηση τριών διαφορετικών τύπων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων που λειτουργούν σήμερα, επίγειων, δορυφορικών και στρατοσφαιρικών. Γίνεται αναφορά στις ζώνες συχνοτήτων τους, στα ισχύοντα λειτουργικά πρότυπα και στη συνήθη αρχιτεκτονική τους τοπολογία. Το 3^{ο} Κεφάλαιο παρουσιάζει το μηχανισμό των διαλείψεων που επιδρούν στη διάδοση συχνοτήτων άνω των 10GHz, σύμφωνα με τα διαθέσιμα μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας, τόσο για την περιγραφή και στατιστική αποτίμηση της απόσβεσης λόγω βροχής όσο και για την εκτίμηση της αντίστοιχης επίδρασης από τα ατμοσφαιρικά αέρια. Στο τέλος του Κεφαλαίου παρουσιάζονται οι τρεις βασικότερες τεχνικές άμβλυνσης ατμοσφαιρικών διαλείψεων που εφαρμόζονται στα σύγχρονα δίκτυα τηλεπικοινωνιών.

Στο 4^{ο} Κεφάλαιο αναλύεται η πιθανότητα εκτός λειτουργίας επίγειων δικτύων σταθερής ασύρματης πρόσβασης που λειτουργούν σε συχνότητες από 10 έως 50GHz. Στις συχνότητες αυτές κύρια αιτία διάλειψης είναι η βροχή, η ειδική απόσβεση της οποίας δύναται να αποτιμηθεί από τη λύση του προβλήματος σκέδασης επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος από σταγόνα βροχής. Για τη λύση του παραπάνω προβλήματος εφαρμόζεται η Μέθοδος των Βοηθητικών Πηγών (MAS), ενώ την

προτεινόμενη μεθοδολογία διαφοροποιεί το γεγονός ότι το σχήμα των βροχοσταγόνων προσεγγίζεται από το σφαιροειδές μοντέλο κατά Pruppacher-Pitter, σε αντίθεση με παλαιότερες θεωρήσεις απλοποιημένων μοντέλων. Στη συνέχεια, ακολουθείται ένας αλγόριθμος μη γραμμικής προσέγγισης ελαχίστων τετραγώνων για τη διαμόρφωση εύχρηστων εκφράσεων υπολογισμού του μιγαδικού πλάτους σκέδασης, συναρτήσει της συχνότητας λειτουργίας και της ακτίνας σφαίρας ίσου όγκου με τη σταγόνα βροχής. Η ειδική απόσβεση προκύπτει κατόπιν μέσω του θεωρητικού τύπου Ishimaru, σε αντίθεση με την εμπειρική και συχνά περιορισμένης ακρίβειας σχέση αR^b. Αναφορικά με το μέγεθος των βροχοσταγόνων θεωρείται η κατανομή Marshall-Palmer που ισχύει για εύκρατα κλίματα, οδηγώντας σε αναλυτικές εκφράσεις της ειδικής απόσβεσης. Τέλος, για τον υπολογισμό της ολικής απόσβεσης, εξετάζονται δύο εμπειρικές εκφράσεις για το ισοδύναμο μήκος ζεύξης, σύμφωνα με τα μοντέλα α) Garcia-Lopez και Peiro, και β) ITU-R P.530. Έτσι προκύπτει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υπολογισμού της πιθανότητας αποκοπής ενός επίγειου δικτύου σταθερής ασύρματης πρόσβασης. Η αντιπαράθεση του μοντέλου με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα επίγειων ζεύξεων οπτικής επαφής καταδεικνύει τη χρησιμότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Στο 5° Κεφάλαιο εξετάζονται προβλήματα παλμικής διάδοσης σε επίγεια δίκτυα σταθερής ασύρματης πρόσβασης. Γίνεται ανάλυση της χρήσης παλμικών κυματομορφών πολύ ευρείας ζώνης (UWB) για σύγχρονες εφαρμογές ψηφιακών επικοινωνιών και επιχειρείται ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της διαταραχής που υφίστανται οι μεταδιδόμενοι παλμοί καθώς αυτοί διαδίδονται στο ατμοσφαιρικό κανάλι και υπόκεινται σε απορρόφηση και διασπορά. Η προτεινόμενη έκφραση για τη συνδυασμένη επίδραση βροχής και ατμοσφαιρικών αερίων υπό συνθήκες καθαρού ουρανού επεκτείνει την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ενσωματώνοντας το μοντέλο χιλιοστομετρικής διάδοσης MPM του Liebe καθώς και εύχρηστες εμπειρικές εκφράσεις του μιγαδικού πλάτους σκέδασης από τις οποίες προκύπτει η συνιστώσα βροχής του παράγοντα διάδοσης. Σε αντίθεση με προηγούμενες θεωρήσεις περιορισμένης ακρίβειας, το μιγαδικό πλάτος σκέδασης προκύπτει από την εφαρμογή της Μεθόδου των Βοηθητικών Πηγών (MAS) στο πρόβλημα σκέδασης επίπεδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος από μη σφαιρική σταγόνα βροχής. Η γήινη ατμόσφαιρα μοντελοποιείται ως ένα σύστημα με δεδομένη συνάρτηση μεταφοράς. Τελικά εξετάζεται η διάδοση Γκαουσσιανών παλμών σε συχνότητες από 10 έως 60GHz κατά μήκος επίγειων ζεύξεων λίγων χιλιομέτρων. Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν από την αριθμητική εφαρμογή του θεωρούμενου μοντέλου. Τόσο η απόσβεση όσο και η καθυστέρηση των παλμών εμφανίζεται μεγαλύτερη για μεγαλύτερα μήκη διαδρομών,

μεγαλύτερες εντάσεις βροχόπτωσης και μικρότερο αρχικό παλμικό εύρος. Δευτερεύοντα ρόλο παίζει η συνεισφορά της βροχής στην περιοχή των γραμμών συντονισμού των ατμοσφαιρικών αερίων (60GHz για το οξυγόνο και 22GHz για τους υδρατμούς), σε αντίθεση με το παράθυρο διάδοσης περί τα 30-35GHz, όπου η συνδυασμένη επίδραση των ατμοσφαιρικών παραγόντων προκαλεί κατά περίπτωση άλλοτε συμπίεση και άλλοτε διεύρυνση του μεταδιδόμενου παλμού.

Τέλος, στο 6^{ο} Κεφάλαιο της διατριβής μελετάται η επίδραση της ατμόσφαιρας στην προς τα κάτω ζεύξη στρατοσφαιρικών δικτύων που λειτουργούν στην Ka και V ζώνη συχνοτήτων και προτείνεται σχήμα διπλής διαφορικής προστασίας για την αντιμετώπιση των ατμοσφαιρικών διαλείψεων. Λαμβάνονται υπόψη η ταυτόχρονη εξασθένηση του μεταδιδόμενου σήματος από τη βροχή, τα σύννεφα, τα αέρια και τους τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς σύμφωνα με τη σύσταση P.618 της ITU-R και διαμορφώνεται ένα γενικό μοντέλο υπολογισμού της συνδυασμένης πιθανότητας αποκοπής της στρατοσφαιρικής ζεύξης, όταν υπερβαίνεται ταυτόχρονα το περιθώριο διαλείψεων στον κύριο και τον δευτερεύοντα επίγειο σταθμό λήψης. Η πρωτοτυπία της μεθόδου έγκειται στην υιοθέτηση του μοντέλου των συνεκτικών βροχοπυρήνων για την περιγραφή της χωρικής δομής του μέσου βροχής, σε αντίθεση με παλαιότερες υλοποιήσεις εμπειρικών μοντέλων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, καθώς και ο συνυπολογισμός των ταυτόχρονων φαινομένων της ατμόσφαιρας που επηρεάζουν τη ζεύξη. Επιπλέον λαμβάνεται υπόψη η διαφορά απωλειών ελευθέρου χώρου ανάμεσα στην εναέρια πλατφόρμα και τους δύο εναλλακτικούς επίγειους σταθμούς, καθότι στις αποστάσεις ενδιαφέροντος του διαφορικού σχήματος προστασίας η τελευταία παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό του ολικού διαφορικού κέρδους και συνεπακόλουθα στη λήψη απόφασης για μετάβαση ή μη από την κύρια στη δευτερεύουσα διαδρομή. Εφαρμογή της μεθόδου σε ποικίλες τοπολογίες στρατοσφαιρικών δικτύων με διπλή διαφορική λήψη θέσης οδηγούν σε πολύτιμα συμπεράσματα για την επίδοση του συστήματος και τη βέλτιστη σχετική τοποθέτηση του εναλλακτικού δέκτη στην περιοχή κάλυψης της στρατοσφαιρικής πλατφόρμας.

7.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΈΡΕΥΝΑ

Ποικίλα είναι τα παρεμφερή θέματα που προκύπτουν από την παρούσα διδακτορική διατριβή και θα μπορούσαν να διερευνηθούν περαιτέρω για την κάλυψη του

ευρύτερου επιστημονικού πεδίου. Μερικές ενδεικτικές προτάσεις αναφέρονται στη συνέχεια.

Όλα τα προτεινόμενα μοντέλα θα μπορούσαν να επεκταθούν και να επαναδιατυπωθούν για τροπικές και υποτροπικές περιοχές, με την εφαρμογή αφενός της κατανομής μεγέθους βροχοσταγόνας σύμφωνα με τους Ajayi-Olsen και αφετέρου της κατανομής γάμμα για το ρυθμό βροχόπτωσης και την απόσβεση βροχής σύμφωνα με τους Morita-Higutti.

Στην περίπτωση υπολογισμού της πιθανότητας αποκοπής επίγειων ζεύξεων FWA, ενδιαφέρον θα είχε να ενσωματωθεί στο προτεινόμενο μοντέλο πέρα από την απόσβεση βροχής και η απόσβεση των ατμοσφαιρικών αερίων.

Μελλοντική επέκταση του μοντέλου παλμικής διαταραχής θα μπορούσε να αφορά τη διάδοση αλληλουχίας παλμών υπό συνθήκες βροχής. Στην περίπτωση αυτή η χωροχρονική ανομοιογένεια του μέσου βροχής είναι ένας παράγοντας που μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα απώλειας του συγχρονισμού της ζεύξης αλλά και δια-παλμικές παρεμβολές, επειδή κάθε παλμός της μεταδιδόμενης ακολουθίας υπόκειται σε διαφορετική εξασθένηση και καθυστέρηση φάσης. Έτσι στο σημείο λήψης ο δέκτης λαμβάνει παραμορφωμένους και μετατοπισμένους τους διαδοχικούς παλμούς. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου μοντέλου UWB μεταδόσεων για την πρόβλεψη της επίδρασης του ατμοσφαιρικού καναλιού, βασιζόμενο στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παρούσα διατριβή, θα συμπλήρωνε την πεπραγμένη ερευνητική προσπάθεια και θα έβρισκε εφαρμογή σε πιο πολύπλοκα συστήματα σχεδιασμού επίγειων δικτύων.

Η ανάλυση της διαφορικής προστασίας δικτύων στρατοσφαιρικών επικοινωνιών θα μπορούσε να επεκταθεί σε πιο σύνθετα σχήματα τριπλής διαφορικής λήψης θέσης. Τέτοιες τεχνικές θα είχαν εφαρμογή σε συστήματα πολύ υψηλής διαθεσιμότητας, και εξετάζοντας εναλλακτικές τοπολογίες θα μπορούσαμε να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τις βέλτιστες αποστάσεις διαχωρισμού των διαθέσιμων επίγειων σταθμών λήψης.

Τέλος, ένα ενδιαφέρον ερευνητικό πρόβλημα θα ήταν η μελέτη σεναρίων παρεμβολής σε μοντέλα συνύπαρξης στρατοσφαιρικών και επίγειων ή στρατοσφαιρικών και δορυφορικών δικτύων παρουσία βρόχινων και άλλων ατμοσφαιρικών αποσβέσεων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Α-

ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Α.1 ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Έστω τυχαία μεταβλητή (τ.μ.) X που ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_x και S_x (μέση τιμή και τυπική απόκλιση της τ.μ. $\ln X$ αντίστοιχα). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τ.μ. X δίνεται από τη σχέση [1],

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\, S_x\, x} \exp\left(-\frac{(\ln x - m_x)^2}{2 S_x^2} \right) \tag{A.1}$$

Η μέση τιμή της τ.μ. X^n, όπου n πραγματικός αριθμός είναι [2],

$$E\left[X^n\right] = \exp\left(n\, m_x + \frac{n^2 S_x^2}{2} \right) \tag{A.2}$$

Οι παράμετροι m_x και S_x μπορούν να εκφρασθούν συναρτήσει της μέσης τιμής $\mu_x = E[X]$ και της τυπικής απόκλισης σ_x της τ.μ. X με χρήση των σχέσεων [2],

$$m_x = \ln\left(\frac{\mu_x}{\left(1 + (\sigma_x / \mu_x)^2\right)^{1/2}} \right) \tag{A.3}$$

$$S_x^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right) \tag{A.4}$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης (Α.1) και χρήση του ορισμού της συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος $\mathrm{erfc}(x)$ [3] προκύπτει,

$$\Pr\{X \geq x\} = \frac{1}{2}\,\mathrm{erfc}\left(\frac{\ln x - m_x}{\sqrt{2}\,S_x}\right) \tag{A.5}$$

όπου

$$\mathrm{erfc}(x) = \frac{2}{\pi}\int_x^{\infty} e^{-z^2}\,\mathrm{d}z \tag{A.6}$$

είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος, προκύπτουσα από τη συνάρτηση σφάλματος

$$\mathrm{erf}(x) = \int_0^{x} e^{-z^2}\,\mathrm{d}z \tag{A.7}$$

Οι ανωτέρω συναρτήσεις χαρακτηρίζονται από τις ακόλουθες ιδιότητες.

$$\mathrm{erf}(x) = \mathrm{erf}(-x) \tag{A.8}$$

$$\mathrm{erf}(x \to \infty) = 1 \tag{A.9}$$

$$\mathrm{erfc}(x) = 1 - \mathrm{erf}(x) \tag{A.10}$$

Α.2 ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Έστω δύο τ.μ. X_1 και X_2 που ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με επιμέρους παραμέτρους m_{x_i} και S_{x_i} (i = 1, 2) με συντελεστή συσχέτισης ρ. Ορίζονται οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες ανηγμένες τ.μ. U_1 και U_2 μέσω του μετασχηματισμού,

$$U_i = \frac{\ln X_i - m_{x_i}}{S_{x_i}} \qquad (i = 1, 2) \tag{A.11}$$

Καθεμία από τις ανηγμένες τ.μ. ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1 [1]. Εάν ρ_n είναι ο συντελεστής συσχέτισης των τ.μ. U_1 και U_2, η από κοινού κατανομή αυτών είναι κανονική και έχει τη μορφή [1],

$$f_{U_1U_2}(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_n^2}}\exp\left(-\frac{1}{2\left(1-\rho_n^2\right)}\left(u_1^2 + u_2^2 - 2\rho_n u_1 u_2\right)\right) \tag{A.12}$$

Από την (Α.12) προκύπτει η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των X_1 και X_2 με χρήση του μετασχηματισμού της (Α.11). Η αθροιστική πιθανότητα υπέρβασης της τιμής x προκύπτει,

$$\Pr\{X_1 \geq x, X_2 \geq x\} = \Pr\{U_1 \geq u, U_2 \geq u\} = \int_u^{\infty}\int_u^{\infty} f_{U_1U_2}(u_1, u_2)\mathrm{d}u_1\mathrm{d}u_2 \tag{A.13}$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα του Bayes [1] προκύπτει,

$$f_{U_1U_2}(u_1, u_2) = f_{U_1}(u_1) f_{U_2|U_1}(u_1, u_2) = f_{U_2}(u_2) f_{U_1|U_2}(u_1, u_2) \tag{A.14}$$

όπου

$$f_{U_1|U_2}(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp\left(-\frac{(u_1 - \rho_n u_2)^2}{2(1-\rho_n^2)}\right) \tag{A.15}$$

και

$$f_{U_2}(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u_2^2}{2}\right) \tag{A.16}$$

Αντικατάσταση των σχέσεων (A.14), (A.15) και (A.16) στην (A.13) οδηγεί στην τελική έκφραση,

$$\Pr\{U_1 \geq u, U_2 \geq u\} = \frac{1}{2}\int_u^{\infty} f_{U_2}(u_2)\,\mathrm{erfc}\left(\frac{u - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right)\mathrm{d}u_2 \tag{A.17}$$

Ο υπολογισμός της από κοινού πιθανότητας δύο κανονικών τ.μ. που μεταβάλλονται σε διαφορετικά διαστήματα προκύπτει από τη σχέση,

$$\begin{aligned}
&\Pr\{a \leq U_1 \leq b, c \leq U_2 \leq d\} = \\
&= \int_a^b f_{U_1}(u_1)\frac{1}{2}\left[\mathrm{erfc}\left(\frac{c - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right) - \mathrm{erfc}\left(\frac{d - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right)\right]\mathrm{d}u_1 = \\
&= \int_c^d f_{U_2}(u_2)\frac{1}{2}\left[\mathrm{erfc}\left(\frac{a - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right) - \mathrm{erfc}\left(\frac{b - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1-\rho_n^2)}}\right)\right]\mathrm{d}u_2
\end{aligned} \tag{A.18}$$

A.3 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Έστω οι τ.μ. X_1, X_2 και X_3 που ακολουθούν ξεχωριστά τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_{x_i} και S_{x_i} (i = 1, 2, 3) και συντελεστές συσχέτισης $\rho_{ij}\,(i, j = 1, 2, 3, i \neq j)$. Οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες ανηγμένες τ.μ. U_1, U_2 και U_3 ορίζονται μέσω του μετασχηματισμού (A.11) και ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1. Οι συντελεστές συσχέτισής τους συμβολίζονται με

$\rho_{n_{ij}}\left(i,j=1,2,3,i\neq j\right)$. Η από κοινού κατανομή των U_1, U_2 και U_3 προκύπτει με εφαρμογή του θεωρήματος του Bayes [1],

$$f_{U_1U_2U_3}\left(u_1,u_2,u_3\right)=f_{U_1U_2}\left(u_1,u_2\right)f_{U_3|U_1U_2}\left(u_1,u_2,u_3\right) \tag{A.19}$$

όπου $f_{U_1U_2}\left(u_1,u_2\right)$ είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των ανηγμένων τ.μ. U_1 και U_2, η οποία προκύπτει από την (A.12), και $f_{U_3|U_1U_2}\left(u_1,u_2,u_3\right)$ η δεσμευμένη κατανομή της τ.μ. U_3.

$$f_{U_3|U_1U_2}\left(u_1,u_2,u_3\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{3|1,2}}\exp\left(-\frac{\left(u_3-\mu_{3|1,2}\right)^2}{2\,\sigma_{3|1,2}^2}\right) \tag{A.20}$$

Όπως φαίνεται από την προηγούμενη σχέση, η υπό συνθήκη κατανομή της τ.μ. U_3 είναι κανονική με μέση τιμή $\mu_{3|1,2}$ και τυπική απόκλιση $\sigma_{3|1,2}$, οι οποίες προκύπτουν από τις σχέσεις,

$$\mu_{3/1,2}=\frac{\rho_{n_{13}}-\rho_{n_{12}}\,\rho_{n_{23}}}{1-\rho_{n_{12}}^2}u_1+\frac{\rho_{n_{23}}-\rho_{n_{12}}\,\rho_{n_{13}}}{1-\rho_{n_{12}}^2}u_2 \tag{A.21}$$

$$\sigma_{3/1,2}=\left(\frac{1-\rho_{n_{12}}^2-\rho_{n_{13}}^2-\rho_{n_{23}}^2+2\rho_{n_{12}}\,\rho_{n_{13}}\,\rho_{n_{23}}}{1-\rho_{n_{12}}^2}\right)^{1/2} \tag{A.22}$$

Για τον υπολογισμό της αθροιστικής πιθανότητας υπέρβασης της τιμής *x* ισχύει,

$$\begin{aligned}\Pr\left\{X_1\geq x,X_2\geq x,X_3\geq x\right\}&=\Pr\left\{U_1\geq u,U_2\geq u,U_3\geq u\right\}=\\&=\int_u^\infty\int_u^\infty\int_u^\infty f_{U_1U_2U_3}\left(u_1,u_2,u_3\right)\mathrm{d}u_1\mathrm{d}u_2\mathrm{d}u_3\end{aligned} \tag{A.23}$$

Η τελική έκφραση της αθροιστικής πιθανότητας υπέρβασης προκύπτει με αντικατάσταση των σχέσεων (A.19) έως (A.22) στην (A.23).

$$\Pr\left\{U_1\geq u,U_2\geq u,U_3\geq u\right\}=\frac{1}{2}\int_u^\infty\int_u^\infty f_{U_1U_2}\left(u_1,u_2\right)\mathrm{erfc}\left(\frac{u-\mu_{3|1,2}}{\sqrt{2}\,\sigma_{3|1,2}}\right)\mathrm{d}u_1\mathrm{d}u_2 \tag{A.24}$$

Ο υπολογισμός της από κοινού πιθανότητας τριών κανονικών τ.μ. που μεταβάλλονται σε τρία διαφορετικά διαστήματα προκύπτει από τη σχέση [1],

$$\begin{aligned}&\Pr\left\{a\leq U_1\leq b,c\leq U_2\leq d,e\leq U_3\leq f\right\}=\\&=\int_a^b\int_c^d f_{U_1U_2}\left(u_1,u_2\right)\frac{1}{2}\left[\mathrm{erfc}\left(\frac{e-\mu_{3|1,2}}{\sqrt{2}\,\sigma_{3|1,2}}\right)-\mathrm{erfc}\left(\frac{f-\mu_{3|1,2}}{\sqrt{2}\,\sigma_{3|1,2}}\right)\right]\mathrm{d}u_1\mathrm{d}u_2\end{aligned} \tag{A.25}$$

Α.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ

Έστω οι τ.μ. A_1 και A_2, οι οποίες ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους μ_i (μέση τιμή) και σ_i (τυπική απόκλιση) (i = 1, 2). Επιπλέον, με ρ συμβολίζεται ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των δύο μεταβλητών. Προφανώς, οι μεταβλητές $N_1 = \ln A_1$ και $N_2 = \ln A_2$ ακολουθούν την κανονική κατανομή με παραμέτρους η_i και S_i (i = 1, 2). Ο συντελεστής συσχέτισης των νέων τ.μ. συμβολίζεται με ρ_n και καλείται λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης. Χρησιμοποιώντας τους ορισμούς των ροπών της Ενότητας Α.1 προκύπτουν οι σχέσεις,

$$\mu_i = \exp\left(\eta_i + \frac{S_i^2}{2}\right) \qquad (i = 1, 2) \tag{A.26}$$

$$\sigma_i^2 = \exp\left(2\eta_i + S_i^2\right)\left(\exp\left(S_i^2\right) - 1\right) \tag{A.27}$$

Ο συντελεστής συσχέτισης ρ ορίζεται ως [1],

$$\rho = \frac{E\left[A_1 A_2\right] - \mu_1\,\mu_2}{\sigma_1\,\sigma_2} \tag{A.28}$$

Η προσδοκητή τιμή του γινομένου των δύο τ.μ. $E\left[A_1 A_2\right]$ υπολογίζεται ως εξής,

$$E\left[A_1 A_2\right] = E\left[e^{N_1 + N_2}\right] = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} e^{x_1 + x_2} f_{N_1 N_2}\left(x_1, x_2\right) \mathrm{d}x_1 \mathrm{d}x_2 \tag{A.29}$$

όπου $f_{N_1 N_2}\left(x_1, x_2\right)$ είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που εκφράζεται συναρτήσει των παραμέτρων $\eta_1, \eta_2, S_1, S_2, \rho$. Μετά από αλγεβρικές πράξεις προκύπτει η έκφραση,

$$E\left[A_1 A_2\right] = \exp\left(\eta_1 + \eta_2 + \frac{S_1^2}{2} + \frac{S_2^2}{2} + \rho_n\, S_1\, S_2\right) \tag{A.30}$$

Αντικατάσταση των (Α.26), (Α.27) και (Α.30) στην (Α.28) οδηγεί στην έκφραση,

$$\rho = \frac{\exp\left(\rho_n\, S_1\, S_2\right) - 1}{\sqrt{\left(\exp\left(S_1^2\right) - 1\right)}\sqrt{\left(\exp\left(S_2^2\right) - 1\right)}} \tag{A.31}$$

Λύνοντας ως προς ρ_n προκύπτει η τελική έκφραση του λογαριθμικού συντελεστή συσχέτισης.

$$\rho_n = \frac{1}{S_1\, S_2}\ln\left(1 + \rho\sqrt{\left(\exp\left(S_1^2\right) - 1\right)\left(\exp\left(S_2^2\right) - 1\right)}\right) \tag{A.32}$$

Α.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α

[1] A.Papoulis, S.Unnikrishna Pilai, “Probability, random variables and stochastic processes,” McGraw-Hill, 4th edition, ISBN 0-07-366011-6, 2002.

[2] S.G.Koukoulas, “Πρόβλεψη της Διαφορικής Προστασίας από τη Βροχή Μικροκυματικών Συστημάτων με Εφαρμογή του Μοντέλου Συνεκτικών Βροχοπυρήνων,” Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ, Αθήνα 1987.

[3] M.Abramowitz, I.Stegun, Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, New York, 1965.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Β-

ΓΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Β.1 ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗ ΓΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Έστω τ.μ. *X* που ακολουθεί την κατανομή γάμμα με στατιστικές παραμέτρους υ και β. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της τ.μ. *X* δίνεται από τη σχέση [1],

$$f_X(x) = \frac{\beta^{\upsilon}}{\Gamma(\upsilon)} x^{\upsilon-1} e^{-\beta x} \tag{B.1}$$

όπου $\Gamma(\upsilon)$ η συνάρτηση γάμμα που ορίζεται από το ολοκλήρωμα [2],

$$\Gamma(\upsilon) = \int_0^{\infty} t^{\upsilon-1} e^{-t} \mathrm{d}t \tag{B.2}$$

Η μέση τιμή της τ.μ. X^n, όπου *n* θετικός πραγματικός αριθμός είναι,

$$E\left[X^n\right] = \frac{\Gamma(\upsilon+n)}{\beta^n \Gamma(\upsilon)} \tag{B.3}$$

Οι παράμετροι υ και β μπορούν να εκφρασθούν συναρτήσει της μέσης τιμής $\mu_x = E[X]$ και της τυπικής απόκλισης σ_x της τ.μ. *X* μέσω των σχέσεων,

$$\upsilon = \left(\frac{\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 \tag{B.4}$$

$$\beta = \frac{\mu_x}{\sigma_x^2} \tag{B.5}$$

Με ολοκλήρωση της σχέσης (Β.1) και σύμφωνα με τον ορισμό της ατελούς συνάρτηση γάμμα [2],

$$\gamma(a,x)=\int_0^x t^{a-1}e^{-t}dt \tag{B.6}$$

η τελική έκφραση της πιθανότητας υπέρβασης είναι,

$$\Pr\{X \geq x\}=1-\frac{\gamma(\upsilon,\beta x)}{\Gamma(\upsilon)} \tag{B.7}$$

Επιπλέον η ροπογεννήτρια συνάρτηση μιας τ.μ. X που ακολουθεί την κατανομή γάμμα δίνεται από την έκφραση [1],

$$M_x(t)=E\left[e^{tx}\right]=\left(1-\frac{t}{\beta}\right)^{-\upsilon} \tag{B.8}$$

Οι ανωτέρω συναρτήσεις χαρακτηρίζονται από τις ακόλουθες ιδιότητες.

$$\Pr\{a \leq X \leq b\}=\frac{\gamma(\upsilon,\beta b)}{\Gamma(\upsilon)}-\frac{\gamma(\upsilon,\beta a)}{\Gamma(\upsilon)} \tag{B.9}$$

$$\Gamma(a,x)=\Gamma(a)-\gamma(a,x)=\int_x^\infty e^{-t}t^{a-1}dt \tag{B.10}$$

B.2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Β

[1] A.Papoulis, S.Unnikrishna Pilai, Probability, random variables and stochastic processes, McGraw-Hill, 4th edition, ISBN 0-07-366011-6, 2002.

[2] M.Abramowitz, I.Stegun, Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, New York, 1965.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Γ-

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΧΩΡΙΚΗΣ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΜΕΣΟΥ ΒΡΟΧΗΣ

Γ.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ H_1

Η παράμετρος H_1 ορίζεται ως το διπλό ολοκλήρωμα του σημειακού συντελεστή αυτοσυσχέτισης ρ_0 της ειδικής απόσβεσης βροχής κατά το μήκος L της ζεύξης.

$$H_1 = \int_0^L \int_0^L \rho_0(z, z')\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}z' \tag{Γ.1}$$

Ο συντελεστής ρ_0 εξαρτάται μόνο από την απόσταση

$$d = |z - z'| \tag{Γ.2}$$

Επομένως,

$$\rho_0(z, z') = \rho_0(z', z) \tag{Γ.3}$$

Από τις (Γ.1) και (Γ.3) προκύπτει,

$$H_1 = 2\int_0^L \int_0^z \rho_0(z, z')\,\mathrm{d}z\,\mathrm{d}z' \tag{Γ.4}$$

Θέτοντας $x = z - z'$ και $y = z'$, με αλλαγή μεταβλητών η (Γ.4) έρχεται στη μορφή,

$$H_1 = 2\int_0^L \int_0^{L-x} \rho_0(x)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \tag{Γ.5}$$

η οποία καταλήγει στο απλό ολοκλήρωμα,

$$H_1 = 2\int_0^L \rho_0(x)(L - x)\,dx \tag{Γ.6}$$

Γ.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΚΡΑΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Σύμφωνα με το μοντέλο που εφαρμόζεται σε εύκρατες περιοχές [1], ο συντελεστής ρ_0 δίνεται στη γενική του μορφή από την ακόλουθη σχέση.

$$\rho_0(x)=\begin{cases}\dfrac{G}{\sqrt{G^2+x^2}}, & x\le D_r\\[2ex] \dfrac{G}{\sqrt{G^2+D_r^{\,2}}}, & x>D_r\end{cases} \tag{Γ.7}$$

D_r είναι η μέγιστη διάσταση του βροχοπυρήνα. Η παράμετρος G είναι συνάρτηση των δεδομένων της βροχόπτωσης σε κάθε περιοχή. Η συνήθης τιμή της είναι $G=1.5$. Με βάση την τελευταία σχέση, για $x\le D_r$ η (Γ.6) γράφεται,

$$\begin{aligned}H_1&=2\int_0^L\frac{G\left(L-x\right)}{\sqrt{G^2+x^2}}\,dx\\&=2\,L\,G\int_0^{L/G}\frac{dz}{\sqrt{1+z^2}}-2\,G^2\int_0^{L/G}\frac{z\,dz}{\sqrt{1+z^2}}\end{aligned} \tag{Γ.8}$$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι [2],

$$\int\frac{dz}{\sqrt{1+z^2}}=\sinh^{-1}\left(z\right)+c \tag{Γ.9}$$

$$\int\frac{z\,dz}{\sqrt{1+z^2}}=\sqrt{1+z^2}+c \tag{Γ.10}$$

οπότε η τελική έκφραση της (Γ.8) είναι η ακόλουθη.

$$H_1=2\,L\,G\sinh^{-1}\left(\frac{L}{G}\right)+2\,G^2\left(1-\sqrt{\left(\frac{L}{G}\right)^2+1}\right) \tag{Γ.11}$$

Ακολουθώντας παρόμοια βήματα, αποδεικνύεται ότι για $x>D_r$ η παράμετρος H_1 γίνεται,

$$\begin{aligned}H_1&=2\int_0^{D_r}\frac{G\left(L-x\right)}{\sqrt{G^2+x^2}}\,dx+2\int_{D_r}^{L}\frac{G\left(L-x\right)}{\sqrt{G^2+D_r^{\,2}}}\,dx=\\&=2\,L\,G\sinh^{-1}\left(\frac{D_r}{G}\right)+2\,G^2\left(1-\sqrt{\left(\frac{D_r}{G}\right)^2+1}\right)+\frac{G\left(L-D_r\right)^2}{\sqrt{G^2+D_r^{\,2}}}\end{aligned} \tag{Γ.12}$$

Γ.1.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΟΠΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΤΡΟΠΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Σύμφωνα με το μοντέλο που εφαρμόζεται σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές [3], ο συντελεστής ρ_0 δίνεται στη γενική του μορφή από την ακόλουθη σχέση.

$$\rho_0(x)=\begin{cases}\exp\left(-c\sqrt{x}\right), & x\le D_r\\ \exp\left(-c\sqrt{D_r}\right), & x>D_r\end{cases} \tag{Γ.13}$$

Η παράμετρος c είναι συνάρτηση των δεδομένων της βροχόπτωσης σε κάθε περιοχή. Η συνήθης τιμή της κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και 0.3km$^{-1/2}$. Με βάση την τελευταία σχέση για $x\le D_r$ η (Γ.6) γράφεται,

$$\begin{aligned}H_1&=2\int_0^L(L-x)\exp\left(-c\sqrt{x}\right)dx\\&=\frac{4L}{c^2}\int_0^{c\sqrt{L}}z\exp(-z)\,dz-\frac{4}{c^4}\int_0^{c\sqrt{L}}z^3\exp(-z)\,dz\end{aligned} \tag{Γ.14}$$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι [2],

$$\int z\exp(-z)\,dz=-\exp(-z)(z+1)+c \tag{Γ.15}$$

$$\int z^3\exp(-z)\,dz=-\exp(-z)\left(z^3+3z^2+6z+6\right)+c \tag{Γ.16}$$

οπότε η τελική έκφραση της (Γ.14) είναι η ακόλουθη.

$$H_1=4\,\frac{c^2L-6+2\left(3+3c\sqrt{L}+c^2L\right)\exp\left(-c\sqrt{L}\right)}{c^4} \tag{Γ.17}$$

Ακολουθώντας παρόμοια βήματα, αποδεικνύεται ότι για $x>D_r$ η παράμετρος H_1 γίνεται,

$$\begin{aligned}H_1&=2\int_0^{D_r}(L-x)\exp\left(-c\sqrt{x}\right)dx+2\int_{D_r}^{L}(L-x)\exp\left(-c\sqrt{D_r}\right)dx=\\&=4\,\frac{c^2L-6+\left[c^3(D_r-L)\sqrt{D_r}+c^2(3D_r-L)+6+6c\sqrt{D_r}\right]\exp\left(-c\sqrt{D_r}\right)}{c^4}+\\&\qquad+\exp\left(-c\sqrt{D_r}\right)(L-D_r)^2\end{aligned} \tag{Γ.18}$$

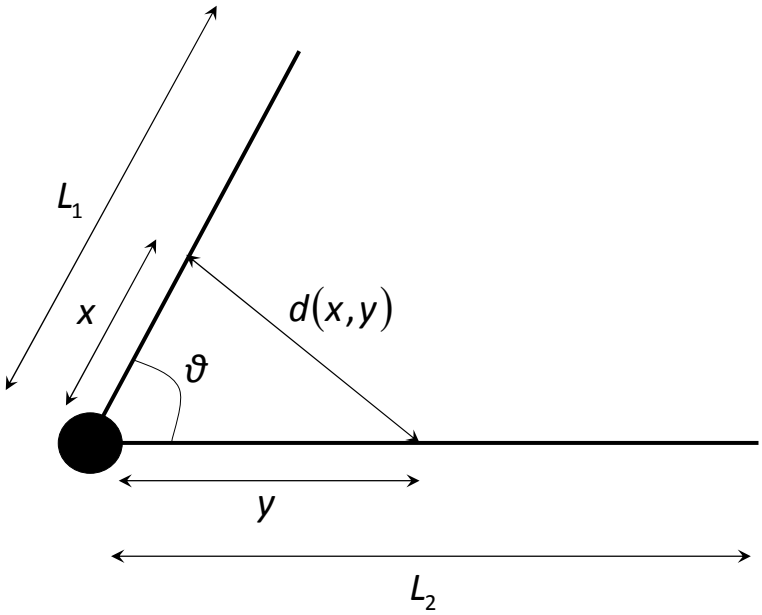
Γ.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ H_{12}

Η παράμετρος H_{12} ορίζεται ως το διπλό ολοκλήρωμα του σημειακού συντελεστή ετεροσυσχέτισης ρ_{12} της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής κατά μήκος δύο τεμνόμενων ραδιοβημάτων L_1 και L_2.

$$H_{12} = \int_0^{L_1}\int_0^{L_2} \rho_{12}(x,y)\,\mathrm{d}x\,\mathrm{d}y \qquad (\Gamma.19)$$

Το μέγεθος ρ_{12} εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων στις επίγειες προβολές των δύο συγκλινουσών ραδιοδρόμων. Υποθέτοντας ότι οι δύο διαδρομές σχηματίζουν γωνία ϑ και ότι τα δύο σημεία απέχουν αποστάσεις x και y από την αρχή, όπου $0 \le x \le L_1$ και $0 \le y \le L_2$, (βλ. Σχήμα Γ.1) η μεταξύ τους απόσταση είναι,

$$d(x,y) = \sqrt{x^2 + y^2 - 2\,x\,y\cos\vartheta} \qquad (\Gamma.20)$$



Σχήμα Γ.1: Γεωμετρία συγκλινουσών ζεύξεων.

Γ.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΚΡΑΤΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Σύμφωνα με το μοντέλο που εφαρμόζεται σε εύκρατες περιοχές [1], ο συντελεστής ρ_{12} δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\rho_{12}(d)=\begin{cases}\dfrac{G}{\sqrt{G^2+d^2(x,y)}}, & d(x,y)\le D_r\\ \dfrac{G}{\sqrt{G^2+D_r^{\,2}}}, & d(x,y)>D_r\end{cases} \tag{Γ.21}$$

Ο υπολογισμός της παραμέτρου H_{12} πραγματοποιείται με αριθμητικό τρόπο.

Γ.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΡΟΠΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΤΡΟΠΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΩΝ

Σύμφωνα με το μοντέλο που εφαρμόζεται σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές [3], ο συντελεστής ρ_{12} δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\rho_{12}(d)=\begin{cases}\exp\left(-c\sqrt{d(x,y)}\right), & d(x,y)\le D_r\\ \exp\left(-c\sqrt{D_r}\right), & d(x,y)>D_r\end{cases} \tag{Γ.22}$$

Ο υπολογισμός της παραμέτρου H_{12} πραγματοποιείται με αριθμητικό τρόπο.

Γ.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Γ

[1] S.H.Lin, “A method for calculating rain attenuation distribution on microwave paths,” Bell Syst. Tech. J., vol.54, no.6, pp.1051-1083, 1975.

[2] M.Abramowitz, I.Stegun, Handbook of Mathematical Functions, Dover Publications, New York, 1965.

[3] K.Morita, I.Higutti, “Prediction methods of rain attenuation distributions of micro and millimetre waves,” Rev. Elec. Commun. Lab., vol.24, no.7-8, pp.651-668, 1976.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Δ-

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Δ.1 ΧΑΡΤΕΣ ΒΡΟΧΗΣ

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο υπολογισμός των στατιστικών παραμέτρων του ρυθμού βροχόπτωσης είναι απαραίτητος για την πρόβλεψη της απόσβεσης και της σκέδασης λόγω βροχόπτωσης και ότι η πληροφορία αυτή είναι απαραίτητη σε όλη την επιφάνεια της Γης, ο τομέας ραδιοεπικοινωνιών της ITU εξέδωσε τη σχετική Σύσταση ITU-R P.837 [1] βάσει της οποίας προτείνεται στους σχεδιαστές συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών η χρήση των χαρτών βροχής (rain maps). Σύμφωνα με τους παραπάνω χάρτες η Γη διαχωρίζεται, ανάλογα με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, σε τομείς των 1.125°x1.125°. Η σύσταση συνοδεύεται από μια τράπεζα δεδομένων, η οποία προέρχεται από την επεξεργασία μετρήσεων διάρκειας 40 ετών του Ευρωπαϊκού Μετεωρολογικού Κέντρου (European Centre of Medium-range Weather Forecast, ECMWF) και αποτελείται από τα αρχεία κειμένου ESARAIN_PR6_v5.txt, ESARAIN_MT_v5.txt και ESARAIN_BETA_v5.txt. Τα αρχεία αυτά περιέχουν αριθμητικές τιμές για τις παραμέτρους:

$P_{r6}[\%]$: Πιθανότητα υπέρβασης περιόδων βροχής διάρκειας έξι ωρών,

$M_T[mm]$: Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης συνεκτικού τύπου,

$\beta[mm]$: Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στρωσιγενούς τύπου,

ενώ τα αρχεία δεδομένων ESARAINLON_v5.txt και ESARAINLAT_v5.txt περιέχουν το γεωγραφικό μήκος και πλάτος κάθε στοιχείου των άλλων αρχείων. Μέσω της αξιοποίησης αυτών των δεδομένων επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της στάθμης ρυθμού βροχόπτωσης R_p που υπερβαίνεται για συγκεκριμένο ποσοστό του συνολικού χρόνου $p\%$ σε οποιαδήποτε γεωγραφική περιοχή. Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1°: Υπολογισμός των παραμέτρων P_{r6}, M_T και β για τα τέσσερα πλησιέστερα σημεία προς το γεωγραφικό πλάτος *Lat* και το γεωγραφικό μήκος *Lon* της επιθυμητής τοποθεσίας. Το πλάτος *Lat* λαμβάνει τιμές στο εύρος +90°(N) έως -90°(S) με βήματα των 1.125°, ενώ το μήκος *Lon* λαμβάνει τιμές στο εύρος 0°(E) έως 360°(E) με βήματα των 1.125°.

Βήμα 2°: Από τις τιμές των παραμέτρων P_{r6}, M_T και β για τα τέσσερα γειτονικά σημεία του πλέγματος υπολογίζονται οι τιμές $P_{r6}(Lat,Lon)$, $M_T(Lat,Lon)$ και $\beta(Lat,Lon)$ στην επιθυμητή τοποθεσία με εφαρμογή δι-γραμμικής παρεμβολής (bi-linear interpolation) σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.1144 [2].

Βήμα 3°: Μετατρέπονται οι παράμετροι M_T και β σε M_c και M_S.

$$\left.\begin{aligned} M_C &= \beta M_T \\ M_S &= (1-\beta) M_T \end{aligned}\right\} \qquad (\Delta.1)$$

Βήμα 4°: Υπολογίζεται η μέση ετήσια πιθανότητα βροχόπτωσης P_0 μέσω της σχέσης,

$$P_0(Lat,Lon) = P_{r6}(Lat,Lon)\left(1 - e^{-0.0079\, M_s(Lat,Lon)/P_{r6}(Lat,Lon)}\right) \qquad (\Delta.2)$$

Στην περίπτωση που το αποτέλεσμα της διαδικασίας δεν προσδιορίζεται (δηλαδή αν $P_{r6} = 0$), η μέση ετήσια πιθανότητα βροχής καθώς και ο ρυθμός βροχόπτωσης που υπερβαίνεται για οποιοδήποτε ποσοστό ενός μέσου έτους είναι μηδέν. Αν ισχύει το τελευταίο, η διαδικασία ολοκληρώνεται σε αυτό το σημείο.

Βήμα 4°: Ο ρυθμός βροχόπτωσης R_p που υπερβαίνεται για ποσοστό του χρόνου $p\%$, όπου $p \le P_0$, προσδιορίζεται από τη σχέση,

$$R_p(Lat,Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad mm/h \qquad (\Delta.3)$$

όπου

$$A = a\,b \qquad (\Delta.4)$$

$$B = a + c\ln\left(p / P_0(Lat,Lon)\right) \qquad (\Delta.5)$$

$$C = \ln\left(p / P_0(Lat,Lon)\right) \qquad (\Delta.6)$$

και

$$a = 1.09 \tag{Δ.7}$$

$$b = \frac{\left(M_c\left(Lat, Lon\right) + M_s\left(Lat, Lon\right)\right)}{21797\, P_0} \tag{Δ.8}$$

$$c = 26.02\, b \tag{Δ.9}$$

Δ.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΛΟΓΑΡΙΘΜΟΚΑΝΟΝΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΠΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα πειραματικά δεδομένα που είναι διαθέσιμα για τις κατανομές των τ.μ. *R* (ρυθμός βροχόπτωσης) ή *A* (απόσβεση λόγω βροχής) εμφανίζονται συνήθως στη μορφή αντίστοιχων ζευγών $x_i, P_i, i = 1, 2, ..., n$, όπου x_i η τιμή του μεγέθους και P_i η πιθανότητα υπέρβασης της τιμής αυτής. Για την τ.μ. του ρυθμού βροχόπτωσης, οι χάρτες βροχής που παρουσιάστηκαν προηγουμένως εξασφαλίζουν την αντιστοίχιση μιας πιθανότητας υπέρβασης (σε μορφή ποσοστού) σε κάθε στάθμη ρυθμού βροχόπτωσης. Το γεγονός αυτό υποκαθιστά την ανάγκη εξαγωγής πειραματικών δεδομένων ανά γεωγραφική τοποθεσία, μολονότι ενδεχόμενη ύπαρξη αυτών παρέχει αναμφίβολα αυξημένη αξιοπιστία. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία προσδιορισμού των στατιστικών παραμέτρων της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης ή της απόσβεσης λόγω βροχής για την περίπτωση που υιοθετείται το λογαριθμοκανονικό μοντέλο.

Για κάθε τιμή της πιθανότητας P_i καθορίζεται η αντίστοιχη τιμή u_i της ανηγμένης τ.μ. *U*, (βλέπε Α.11), από τη σχέση,

$$u_i = \sqrt{2}\, \mathrm{erfc}^{-1}\left(2\, P_i\right) \tag{Δ.10}$$

Ωστόσο ισχύει,

$$u_i = \frac{\ln\left(x_i\right) - \ln\left(m_x\right)}{S_x} \tag{Δ.11}$$

ή

$$u_i = A\, z_i + B \tag{Δ.12}$$

όπου

$$z_i = \ln x_i \tag{Δ.13}$$

$$A = \frac{1}{S_x} \tag{Δ.14}$$

$$B = -\frac{\ln m_x}{S_x} \tag{Δ.15}$$

Από την (Δ.12) προκύπτει ότι τα u_i και z_i συνδέονται μεταξύ τους με μια γραμμική σχέση. Επομένως, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων μπορεί εύκολα να οδηγήσει στον υπολογισμό των συντελεστών γραμμικής παλινδρόμησης *A* και *B* και, από εκεί, στον υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων m_x και S_x .

Δ.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Δ

[1] Recommendation ITU-R P.837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modelling,” (08/2007).

[2] Recommendation ITU-R P.1144-5, “Guide to the application of the propagation methods of Radiocommunication Study Group 3,” (10/2009).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ -Ε-

ΕΜΠΕΙΡΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΛΑΤΟΥΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ Η/Μ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΔΙΑΔΙΔΕΤΑΙ ΣΕ ΜΕΣΟ ΒΡΟΧΗΣ

Ε.1 ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ

Το μιγαδικό πλάτος σκέδασης SA (scattering amplitude) ηλεκτρομαγνητικού κύματος που προσπίπτει σε σταγόνα βροχής κατά Pruppacher-Pitter [1] καθώς διαδίδεται σε οριζόντια επίγεια ζεύξη, εξαρτάται από την πόλωση, τη συχνότητα και την ισοδύναμη ακτίνα σταγόνας βροχής και μπορεί να προκύψει αναλυτικά με τη βοήθεια της μεθόδου των βοηθητικών πηγών MAS [2]. Μετά από μια διαδικασία πολυωνυμικής προσέγγισης στα αποτελέσματα της MAS, οδηγούμαστε σε μια πολύ χρήσιμη εμπειρική έκφραση για τον υπολογισμό του SA, που περιγράφεται από πολυωνυμική συνάρτηση της μορφής,

$$SA(\overline{a}_m, f) \cong \sum_{n=0}^{8} p_{m,n}\ f^n + j\sum_{n=0}^{8} q_{m,n}\ f^n\ ,\ m = 0,1,2,\ldots,13 \qquad \text{(E.1)}$$

όπου η συχνότητα f κυμαίνεται στο εύρος 10 έως 60 GHz και οι ακτίνες $\overline{a}_m$ της ισόογκης με τη σταγόνα σφαίρας σε cm.

$$\overline{a}_m = 0.025\,(m+1)\ ,\ m = 0,1,2,\ldots,13 \qquad \text{(E.2)}$$

Ε.2 ΠΟΛΥΩΝΥΜΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΙΓΑΔΙΚΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ ΣΚΕΔΑΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται αναλυτικά όλοι οι συντελεστές του πολυωνύμου (Ε.1), για τις δύο πολώσεις, όπως αυτοί προέκυψαν από τη διαδικασία προσέγγισης.

Πίνακας Ε.1: Οριζόντια πόλωση, πραγματικοί πολυωνυμικοί συντελεστές $p_{m,n}$.

n \ m	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
0	1.521	-52.167	-59.980	1078.026	-3417.098	-4316.193	4172.251
1	-4.821e-1	16.957	25.591	-393.274	1053.223	1645.640	-940.816
2	6.996e-2	-2.228	-4.257	58.340	-127.406	-245.841	63.990
3	-4.553e-3	1.660e-1	4.035e-1	-4.458	8.0893	19.283	5.260e-1
4	1.968e-4	-7.133e-3	-2.054e-2	1.974e-1	-2.891e-1	-8.581e-1	-2.304e-1
5	-5.213e-6	1.868e-4	6.042e-4	-5.181e-3	5.981e-3	2.243e-2	1.062e-2
6	8.271e-8	-2.928e-06	-1.017e-5	7.921e-5	-7.043e-5	-3.411e-4	-2.230e-4
7	-7.197e-10	2.520e-08	9.029e-08	-6.511e-7	4.319e-7	2.798e-6	2.286e-6
8	2.634e-12	-9.152e-11	-3.271e-10	2.226e-09	-1.044e-9	-9.573e-9	-9.267e-9

n \ m	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
0	19771.649	19897.701	-14082.155	-38655.428	-50792.211	-23934.719	-3229.888
1	-6527.796	-7223.210	3464.229	11803.282	16241.790	8343.046	2477.684
2	869.749	1058.724	-299.181	-1434.834	-2060.866	-1110.286	-435.996
3	-60.281	-80.395	11.746	93.844	139.235	78.065	36.693
4	2.417	3.518	-1.693e-1	-3.653	-5.532	-3.229	-1.738
5	-5.824e-2	-9.220e-2	-2.381e-3	8.720e-2	1.332e-1	8.117e-2	4.869e-2
6	8.321e-4	1.429e-3	1.200e-4	-1.253e-3	-1.912e-3	-1.220e-3	-7.990e-4
7	-6.499e-6	-1.207e-5	-1.585e-6	9.959e-6	1.504e-5	1.007e-5	7.096e-6
8	2.138e-8	4.282e-8	7.322e-9	-3.361e-8	-4.987e-8	-3.514e-8	-2.631e-8

Πίνακας Ε.2: Οριζόντια πόλωση, φανταστικοί πολυωνυμικοί συντελεστές $q_{m,n}$.

n \ m	0	1	2	3	4	5	6
0	-1.653e-1	-88.625	248.405	-840.777	-1680.567	5323.866	11209.698
1	3.416e-2	29.613	-81.285	246.220	682.236	-1563.264	-3913.296
2	-2.912e-3	-4.047	10.718	-27.503	-108.294	178.625	546.374
3	1.742e-4	2.964e-1	-7.372e-1	1.482	8.795	-10.345	-40.054
4	-1.058e-5	-1.281e-2	2.860e-2	-4.041e-2	-4.073e-1	3.210e-1	1.680
5	3.727e-7	3.346e-4	-6.504e-4	4.365e-4	1.103e-2	-5.330e-3	-4.186e-2
6	-7.576e-9	-5.202e-6	8.445e-6	2.187e-6	-1.729e-4	4.154e-5	6.134e-4
7	7.920e-11	4.422e-8	-5.722e-8	-8.503e-8	1.453-6	-6.031e-8	-4.884e-6
8	-3.300e-13	-1.582e-10	1.548e-10	5.016e-10	-5.076e-9	-6.362e-10	1.631e-8

n \ m	7	8	9	10	11	12	13
0	1667.914	-26243.315	-37983.317	-13501.029	-35398.775	34336.682	56720.225
1	-1325.074	7953.527	12541.551	5386.748	13543.635	-9732.805	-17198.379
2	283.859	-963.389	-1669.654	-823.240	-2055.078	1098.080	2099.481
3	-27.895	60.675	116.669	62.504	159.423	-68.647	-140.583
4	1.443	-2.232	-4.786	-2.722	-7.091	2.569	5.610
5	-4.242e-2	4.966e-2	1.192e-1	7.098e-2	1.873e-1	-5.914e-2	-1.372e-1
6	7.137e-4	-6.574e-4	-1.774e-3	-1.095e-3	-2.901e-3	8.215e-4	2.015e-3
7	-6.406e-6	4.762e-6	1.451e-5	9.225e-6	2.432e-5	-6.318e-6	-1.631e-5
8	2.380e-8	-1.450e-8	-5.018e-8	-3.268e-8	-8.514e-8	2.066e-8	5.598e-8

Πίνακας Ε.3: Κατακόρυφη πόλωση, πραγματικοί πολυωνυμικοί συντελεστές $p_{m,n}$.

n \ m	0	1	2	3	4	5	6
0	-3.009	1.619	-46.830	903.796	-1946.186	-3598.060	-584.420
1	9.888e-1	-6.528e-1	20.570	-325.844	565.731	1283.874	520.360
2	-1.267e-1	1.546e-1	-3.457	47.673	-62.584	-179.368	-111.155
3	9.657e-3	-8.402e-3	3.321e-1	-3.574	3.555	13.202	11.024
4	-4.133e-4	4.272e-4	-1.683e-2	1.550e-1	-1.072e-1	-5.530e-1	-5.752e-1
5	1.078e-5	-1.270e-5	4.899e-4	-3.987e-3	1.662e-3	1.365e-2	1.692e-2
6	-1.680e-7	2.158e-7	-8.124e-6	5.973e-5	-1.046e-5	-1.966e-4	-2.829e-4
7	1.438e-9	-1.948e-9	7.087e-8	-4.814e-7	-1.838e-8	1.530e-6	2.509e-6
8	-5.188e-12	7.181e-12	-2.517e-10	1.616e-9	3.700e-10	-4.977e-9	-9.177e-9

n \ m	7	8	9	10	11	12	13
0	7365.149	17429.523	11811.203	-13250.428	-24292.267	-19308.105	-16295.212
1	-2136.538	-5807.269	-4361.771	3680.819	7471.983	6113.078	5484.670
2	243.386	784.322	650.578	-398.433	-921.607	-766.393	-720.348
3	-13.528	-55.338	-50.047	23.225	61.661	52.023	50.994
4	4.001e-1	2.268	2.220	-7.969e-1	-2.454	-2.095	-2.130
5	-6.094e-3	-5.595e-2	-5.901e-2	1.650e-2	5.978e-2	5.150e-2	5.399e-2
6	3.530e-5	8.187e-4	9.268e-4	-2.016e-4	-8.746e-4	-7.586e-4	-8.161e-4
7	1.348e-7	-6.545e-6	-7.930e-6	1.326e-6	7.059e-6	6.153e-6	6.762e-6
8	-1.810e-9	2.201e-8	2.848e-8	-3.576e-9	-2.415e-8	-2.113e-8	-2.362e-8

Πίνακας Ε.4: Κατακόρυφη πόλωση, φανταστικοί πολυωνυμικοί συντελεστές $q_{m,n}$.

n \ m	0	1	2	3	4	5	6
0	4.252	-8.908	135.137	-592.541	-1815.434	2335.462	6382.309
1	-1.391	3.133	-45.324	166.098	678.570	-582.002	-2099.034
2	1.866e-1	-4.498e-1	6.093	-17.201	-100.403	50.492	272.778
3	-1.348e-2	3.443e-2	-4.224e-1	8.001e-1	7.673	-1.670	-18.509
4	5.755e-4	-1.558e-3	1.620e-2	-1.512e-2	-3.371e-1	-1.174e-2	7.116e-1
5	-1.501e-5	4.134e-5	-3.599e-4	-9.355e-5	8.731e-3	2.172e-3	-1.612e-2
6	2.345e-7	-6.452e-7	4.486e-6	8.239e-6	-1.317e-4	-5.674e-5	2.127e-4
7	-2.013e-9	5.455e-9	-2.848e-8	-1.181e-7	1.071e-6	6.300e-7	-1.507e-6
8	7.296e-12	-1.928e-11	6.945e-11	5.592e-10	-3.634e-9	-2.639e-9	4.418e-9

n \ m	7	8	9	10	11	12	13
0	7739.955	-433.965	-21550.611	-17032.810	-4903.314	-2557.332	17337.883
1	-2889.457	-398.411	6677.486	5651.213	1948.099	1525.424	-4903.074
2	428.026	129.634	-835.142	-755.791	-294.130	-287.744	553.473
3	-33.232	-15.117	54.855	52.683	21.335	24.100	-34.819
4	1.470	8.595e-1	-2.121	-2.158	-8.859e-1	-1.126	1.296
5	-3.854e-2	-2.706e-2	4.984e-2	5.371e-2	2.189e-2	3.079e-2	-2.941e-2
6	5.928e-4	4.816e-4	-7.002e-4	-7.988e-4	-3.182e-4	-4.900e-4	3.998e-4
7	-4.941e-6	-4.542e-6	5.406e-6	6.534e-6	2.510e-6	4.200e-6	-2.993e-6
8	1.723e-8	1.765e-8	-1.765e-8	-2.262e-8	-8.299e-9	-1.499e-8	9.488e-9

Ε.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Ε

[1] H.R.Pruppacher, and R.L.Pitter, "A semi-empirical determination of the shape of cloud and raindrops," Journal of the Atmospheric Sciences, vol.28, pp.86-94, June 1970.

[2] S.A.Kanellopoulos, A.D.Panagopoulos, and J.D.Kanellopoulos, "Calculation of electromagnetic scattering from a Pruppacher-Pitter raindrop using MAS and slant path rain attenuation prediction," *Int J Infrared Millimeter Waves*, 26 (12), pp. 1783-1802, Dec. 2005.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΜΗΣΕΩΝ

ACM:	Adaptive Coding Modulation
ADPC:	Automatic Downlink Power Control
AmS:	Amateur Service
AmSS:	Amateur Satellite Service
AMS:	Aeronautical Mobile Service
AMSS:	Aeronautical Mobile Satellite Service
ATM:	Asynchronous Transfer Mode
AUPC:	Automatic Uplink Power Control
BEP:	Bit Error Probability
BER:	Bit Error Rate
BFWA:	Broadband Fixed Wireless Access
BPSK:	Binary Phase Shift Keying
BRAN:	Broadband Radio Access Networks
BS:	Base Station
BS:	Broadcasting Service
BSS:	Broadcasting Satellite Service
BWA:	Broadband Wireless Access
CDMA:	Code Division Multiple Access
DFS:	Dynamic Frequency Selection
DSSS:	Direct Sequence Spread Spectrum
DTH:	Direct To Home
DVB-RCS:	DVB-Return Channel via Satellite
DVB-S:	Digital Video Broadcasting-Satellite
ECMWF:	European Centre of Medium-range Weather Forecast
EESS:	Earth Exploration Satellite Service
EHF:	Extremely High Frequency
EIRP:	Effective Isotropic Radiated Power
ETSI:	European Telecommunications Standards Institute
FEC:	Forward Error Correction

FFT:	Fast Fourier Transform
FMT:	Fade Mitigation Techniques
FS:	Fixed Service
FSS:	Fixed Satellite Service
FWA:	Fixed Wireless Access
GEO:	Geostationary Earth Orbit
GPS:	Global Positioning System
GSM:	Global System for Mobile communications
GSO:	Geosynchronous Earth Orbit
HAAP:	High Altitude Aeronautical Platform
HALE:	High Altitude Long Endurance
HALO:	High Altitude Long Operation
HAPN:	High Altitude Platform Network
HAPS:	High Altitude Platform Stations
HDFS:	High Density Fixed Service
HF:	High Frequency
HiperLAN:	High Performance Local Area Network
HiperMAN:	High Performance Metropolitan Area Network
IEEE:	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMT-2000:	International Mobile Telecommunications-2000
IP:	Internet Protocol
ISS:	Inter-Satellite Service
ITU:	International Telecommunications Union
ITU-R :	ITU Radiocommunication Sector
LEO:	Low Earth Orbit satellites
LMDS:	Local Multipoint Distribution Service
LMS:	Land Mobile Service
LMSS:	Land Mobile Satellite Service
LOS:	Line-of-Sight
MAS:	Method of Auxiliary Sources
MEFS:	Method of Expansion by Fundamental Functions
MEO:	Medium Earth Orbit satellites
METMF:	Method of Expansion in Terms of Metaharmonic Functions
MetSS:	Meteorological Satellite Service

MF-TDMA: Multiple Frequency-TDMA

MGFR: Method of Generalized Fourier Series

MIMO: Multiple Input Multiple Output

MMDS: Microwave Multipoint Distribution Service

MMS: Maritime Mobile Service

MMSS: Maritime Mobile Satellite Service

MPEG2: Moving Pictures Experts Group 2

MPM: Millimeter-wave Propagation Model

MS: Mobile Service

MSS: Mobile Satellite Service

NLOS: Non-Line-of-Sight

OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex

OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

OP: Outage Probability

PAM : Pulse Amplitude Modulation

PN: Pseudorandom Noise

PPM: Pulse Position Modulation

PSK: Phase Shift Keying

PSTN: Public Switched Telephone Network

PTMP: Point-to-Multipoint

PTP: Point-to-Point

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

QoS: Quality of Service

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

RAC: Rural Area Coverage

RAS: Radio Astronomy Service

RCPC: Rate Compatible Punctured Convolutional

RDS: Radiodetermination Service

RDSS: Radiodetermination Satellite Service

RH: Relative Humidity

RS: Reed-Solomon

S: Subscriber

SA: Scattering Amplitude

SAC: Suburban Area Coverage

SHARP: Stationary High Altitude Relay Platform

SIT: Satellite Interactive Terminal

SOS: Space Operation Service

SPR: Stratospheric Platform Radio

SRS: Space Research Service

TDM: Time Division Multiplexing

TDMA: Time Division Multiple Access

THSS: Time Hopping Spread Spectrum

TPC: Transmit Power Control

UAC: Urban Area Coverage

UAV: Unmanned Aeronautical Vehicle

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

UWB: Ultra Wide Band

VoD: Video-on-Demand

VSAT: Very Small Aperture Terminals

WiFi: Wireless Fidelity

WiMAX: Wireless Interoperability for Microwave Access

WLAN: Wireless Local Area Networks

WLL: Wireless Local Loop

WMAN: Wireless Metropolitan Area Networks

XPD: Cross Polar Discrimination