



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Θέματα Φυσικού Στρώματος και Στρώματος ΜΑC Σταθερών Ασύρματων Ευρυζωνικών Δικτύων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΟΝΑ-ΔΑΝΙΗΛ Μ. ΑΡΑΠΟΓΛΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2003)

Αθήνα, Μάιος 2007



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

Θέματα Φυσικού Στρώματος και Στρώματος ΜΑC Σταθερών Ασύρματων Ευρυζωνικών Δικτύων

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΟΝΑ-ΔΑΝΙΗΛ Μ. ΑΡΑΠΟΓΛΟΥ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2003)

Συμβουλευτική Επιτροπή: Παναγιώτης Κωττής (επιβλέπων), Καθηγητής ΕΜΠ
Ιωάννης Κανελλόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ
Χρήστος Καψάλης, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Μαΐου 2007.

...
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

...
Ι. Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

...
Χρ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

...
Ι. Βενιέρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

...
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

...
Φ. Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

...
Α. Κανάτας
Επ. Καθηγητής
Παν. Πειραιώς

Αθήνα, Μάιος 2007

...

ΠΑΝΤΕΛΕΗΜΩΝ-ΔΑΝΙΗΛ Μ. ΑΡΑΠΟΓΛΟΥ

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

© 2007 - All rights reserved

Περιεχόμενα

1	Τεχνολογίες και Πρότυπα Σταθερών Δικτύων BWA	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Θέματα Εκχώρησης Φάσματος	4
1.3	Τεχνικά Πρότυπα	8
1.3.1	Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11	8
1.3.2	Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.16	10
1.3.3	Η οικογένεια προτύπων ETSI BRAN	10
1.3.4	Το WiMAX φόρουμ	11
1.4	Περιγραφή του IEEE 802.16 WirelessMAN	12
1.4.1	Η Ασύρματη Διεπαφή - Φυσικό Στρώμα	12
1.4.2	Πολλαπλή Πρόσβαση - Στρώμα MAC	15
1.5	Κυψελωτές Αρχιτεκτονικές Σταθερών Ασύρματων Μητροπολιτικών Δικτύων	17
1.5.1	Σχεδίαση Κυψέλης	17
1.5.2	Αναχρησιμοποίηση Συχνότητας	20
2	Χαρακτηριστικά Διαύλου σε Συστήματα LMDS	23
2.1	Γενικά	23
2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση μέσω της τροπόσφαιρας σε συχνότητες άνω των 10GHz	25
2.2.1	Απόσβεση από ατμοσφαιρικά αέρια	25
2.2.2	Διαλείψεις λόγω σπινθηρισμών	26
2.2.3	Διαλείψεις λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων	27
2.2.4	Αποπόλωση λόγω βροχόπτωσης	30
2.3	Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση σε κυψελωτό περιβάλλον BWA	32
2.3.1	Τοπογραφία και παρεμπόδιση από κτίρια	32
2.3.2	Παρεμπόδιση από βλάστηση	34
2.3.3	Αποπόλωση λόγω βλάστησης	36
2.3.4	Διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης	36
2.4	Ραδιοκάλυψη σε κυψελωτά δίκτυα LMDS	40
2.5	Στατιστική θεώρηση της απόσβεσης βροχής μέσω φυσικών μοντέλων ..	44
2.5.1	Στατική ανάλυση του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης	44
2.5.2	Ειδική απόσβεση βροχής	46
2.5.3	Στατική ανάλυση της απόσβεσης λόγω βροχής	46
2.5.4	Δυναμική ανάλυση του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης	50
2.5.5	Δυναμική ανάλυση της απόσβεσης λόγω βροχής	52

3	Τεχνικές Αντιμετώπισης των Διαλείψεων	55
3.1	Γενικά	55
3.2	Έλεγχος της ισχύος	62
3.3	Προσαρμοστικές τεχνικές επεξεργασίας του σήματος	67
3.3.1	Προσαρμοστική διαμόρφωση	68
3.3.2	Προσαρμοστική κωδικοποίηση	72
3.4	Διαφορική Προστασία	76
3.4.1	Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας	79
3.4.2	Στατιστική θεώρηση της επίδοσης της διαφορικής λήψης κυψέλης σε εύκρατες περιοχές	80
3.4.3	Στατιστική θεώρηση της επίδοσης της διαφορικής λήψης κυψέλης σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές	86
4	Διακυψελική Παρεμβολή σε Σταθερά Δίκτυα BWA	91
4.1	Γενικά	91
4.2	Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας	94
4.3	Ορισμοί και υποθέσεις του μοντέλου πρόβλεψης της διακυψελικής παρεμβολής	98
4.4	Ανάλυση διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη downstream	102
4.5	Ανάλυση διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη upstream	111
5	Διακυψελική Παρεμβολή σε Σταθερά Δίκτυα CDMA-BWA	117
5.1	Γενικά	117
5.2	Βασικές Αρχές DS-CDMA	118
5.3	Εφαρμογή σε Σταθερά Δίκτυα BWA	122
5.4	Σύγκριση Διακυψελικής Παρεμβολής μεταξύ Συστημάτων TDMA- και CDMA-LMDS	127
5.5	Στατιστική Ανάλυση της Διακυψελικής Παρεμβολής σε Δίκτυα CDMA-LMDS	130
5.5.1	Ανάλυση διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη downstream	131
5.5.2	Ανάλυση διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη upstream	136
6	Έλεγχος Διακυψελικής Παρεμβολής σε Σταθερά Δίκτυα CDMA- BWA	143
6.1	Γενικά	143
6.2	Η Τεχνική CDMA Πολλαπλών Κωδίκων (MC-CDMA)	145
6.3	Η Τεχνική CDMA Μεταβλητού Παράγοντα Εξάπλωσης (VSF-CDMA)	148
6.4	Εφαρμογή στη ζεύξη downstream για τον έλεγχο της διακυψελικής παρεμβολής	150
6.4.1	Βασικές Έννοιες	150
6.4.2	Βελτιστοποίηση της πολιτικής ανάθεσης κωδίκων	152
6.4.3	Αξιολόγηση της επίδοσης	155
6.4.3.1	Στατική ανάθεση κωδίκων	155
6.4.3.2	Δυναμική ανάθεση κωδίκων	159

A' Λογαριθμοκανονική Κατανομή	163
A'.1 Μονοδιάστατη	163
A'.2 Δισδιάστατη	164
A'.3 Τρισδιάστατη	165
A'.4 Τετραδιάστατη	166
A'.5 Λογαριθμικός Συντελεστής Συσχέτισης	168
B' Κατανομή Γάμμα	171
B'.1 Μονοδιάστατη	171
B'.2 Δισδιάστατη	172
Γ' Υπολογισμός των Παραμέτρων H της Χωρικής Δομής του Μέ- σου Βροχόπτωσης	175
Γ'.1 Υπολογισμός της Παραμέτρου H	175
Γ'.1.1 Μοντέλο Εύκρατων Περιοχών	176
Γ'.1.2 Μοντέλο Τροπικών και Υποτροπικών Περιοχών	176
Γ'.2 Υπολογισμός της Παραμέτρου H_{12}	177
Γ'.2.1 Μοντέλο Εύκρατων Περιοχών	178
Γ'.2.2 Μοντέλο Τροπικών και Υποτροπικών Περιοχών	178
Δ' Εξαγωγή των Στατιστικών Παραμέτρων του Ρυθμού Βροχόπτωσης	179
Δ'.1 Χάρτες Βροχής	179
Δ'.2 Υπολογισμός στατιστικών παραμέτρων από πειραματικά δεδομένα	181
Δ'.2.1 Λογαριθμοκανονικό μοντέλο	181
Δ'.2.2 Μοντέλο κατανομής γάμμα	182
Ε' Γεννήτρια Χρονοσειρών Απόσβεσης λόγω Βροχής	185
E'.1 Μοντέλο Maseng-Bakken	185
E'.2 Υπολογισμός της δυναμικής παραμέτρου της απόσβεσης λόγω βροχής d_A	188
E'.3 Παραγωγή Χρονοσειρών Απόσβεσης λόγω Βροχής	190
Βιβλιογραφία	192

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε υπό τη φιλόξενη σκέπη του Εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων που ανήκει στον Τομέα Μετάδοσης της Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών στα πλαίσια των υποχρεώσεων που απορρέουν από το Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Ο τίτλος της προτεινόμενης διατριβής είναι «Θέματα Φυσικού Στρώματος και Στρώματος MAC Σταθερών Ασύρματων Ευρυζωνικών Δικτύων» και στις σελίδες που ακολουθούν γίνεται η λεπτομερής παρουσίαση των γνωστικών αντικειμένων που καλύπτονται από τη διατριβή που είχε ως αφετηρία τον Οκτώβριο του 2003. Η επιλογή ενός αρκετά ευρύ τίτλου οφείλεται στο ότι η εργασία καταπιάνεται με περισσότερα θέματα που αφορούν το φυσικό στρώμα και το στρώμα MAC (Medium Access Control) των σταθερών ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων (Broadband Wireless Access, BWA).

Ειδικότερα, μετά από ένα εισαγωγικό κεφάλαιο που περιγράφει τις εξελίξεις και τα σχετικά πρότυπα που έχουν εμφανισθεί κατά τα τελευταία έτη για τα ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα, τα Κεφάλαια 2 και 3 εμβραθύνουν στα προβλήματα διάδοσης καθώς και τις αντίστοιχες τεχνικές αντιμετώπισής τους που αφορούν το φυσικό δίαυλο των συστημάτων BWA στο εύρος συχνοτήτων 10-66GHz. Η παρουσίαση αυτών των αντικειμένων γίνεται σε στενή συνάφεια με τα προσφάτως δημοσιευμένα από τους διεθνείς τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) και ETSI (European Telecommunications Standardization Institute) πρότυπα για συστήματα BWA. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίδεται στην τεχνική της διαφορικής λήψης κυψέλης, στη μελέτη της οποίας συνείσφερε η παρούσα διατριβή μέσω της ανάπτυξης στατιστικών μοντέλων που προβλέπουν την επίδοσή της σε τροπικά και υποτροπικά κλίματα καθώς και σε περιοχές που διακρίνονται από ήπιες κλιματικές συνθήκες, συμπληρώνοντας κατ' αυτό τον τρόπο τις σχετικές ερευνητικές προσπάθειες προηγούμενων ετών.

Τα επόμενα τρία κεφάλαια ανήκουν στο αντικείμενο της θεωρίας επικοινωνιών καθώς εκτιμούν την ενδοσυστημική παρεμβολή που εμφανίζεται στα κυψελωτά συστήματα BWA ανάλογα με το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης που επιλέγεται. Αντίθετα με άλλα εναλλακτικά κυψελωτά δίκτυα (όπως, για παράδειγμα, τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών), για τα οποία παρόμοιες εργασίες βρίσκονται σε ιδιαίτερα ώριμο στάδιο, η μελέτη της διακυψελικής παρεμβολής σε σταθερά δίκτυα BWA εμφανίζει ορισμένα διακριτά χαρακτηριστικά. Η βασική συνεισφορά της διατριβής είναι ότι οι προτεινόμενες μεθοδολογίες λαμβάνουν υπόψη τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ανάγοντας γνωστές έννοιες από τη θεωρία επικοινωνιών σε αυτό το νέο πλαίσιο. Έτσι, στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται η στατιστική ανάλυση της διακυψελικής παρεμβολής σε συμβατικά συστήματα BWA με πολλαπλή πρόσβαση TDMA (Time Division Multiple Access), ενώ στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μια νέα πρόταση για την εφαρμογή της διαδομένης από τα δίκτυα τρίτης γενεάς τεχνολογίας CDMA στη συγκεκριμένη κατηγορία συστη-

μάτων. Μετά από σύγκριση των επιπτώσεων της διακυβελικής παρεμβολής στα δύο συστήματα πολλαπλής πρόσβασης, η διατριβή καταλήγει στο συμπέρασμα ότι αυτή η νέα πρόταση μπορεί να προσφέρει αξιοσημείωτη μείωση της παρεμβολής, τουλάχιστον για τη ζεύξη μεταξύ σταθμού συνδρομητή και σταθμού βάσης. Για την άμβλυνση της παρεμβολής και κατά την αντίθετη κατεύθυνση μετάδοσης, το Κεφάλαιο 6 προτείνει ένα ολοκληρωμένο σχήμα που βασίζεται στις γνωστές (από τις κινητές επικοινωνίες) τεχνικές εξυπηρέτησης πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης.

Από τη θέση αυτή, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε μια σειρά ανθρώπων. Καταρχήν, στον επιβλέποντα καθηγητή τόσο της διδακτορικής όσο και της διπλωματικής μου διατριβής κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω θερμά για τη μεγάλη εμπιστοσύνη με την οποία περιβάλλει γενικά τους φοιτητές του και εμένα ειδικότερα, εμπιστοσύνη που οδήγησε στη χειραφέτησή μου ως μηχανικού τηλεπικοινωνιών. Θα ήθελα επίσης να τον ευχαριστήσω για τη μεγάλη βοήθεια που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια της διατριβής, προϊόν βαθειάς ερευνητικής εμπειρίας. Οι υψηλές επαγγελματικές αξίες που μου μετέδωσε αποτελούν για μένα τη σημαντικότερη παρακαταθήκη για τη μελλοντική σταδιοδρομία μου. Ο ορθολογισμός του και η αγάπη του για την ορθή χρήση της γλώσσας, στοιχείο που σπάνια χαρακτηρίζει θετικούς επιστήμονες, συνέβαλλε στην ευρύτερη εκπαίδευσή μου κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Ανάλογες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και προς τον καθηγητή μου κ. Ιωάννη Κανελλόπουλο, για τη συμπαράσταση και τη βοήθειά του. Οι πρωτοποριακές του εργασίες στα θέματα διάδοσης εδώ και αρκετά έτη αποτέλεσαν τη βάση και για τη δική μου εργασία. Τέλος, ευχαριστώ τον κ. Χρήστο Καψάλη, Καθηγητή ΕΜΠ, για τη συμβολή του στο κτίσιμο του υποβάθρου μου ως μηχανικού τηλεπικοινωνιών μέσω της παρακολούθησης των προπτυχιακών και μεταπτυχιακών μαθημάτων που διδάσκει.

Εκτός από τους καθηγητές μου, σημαντική συνεισφορά στην περάτωση της διατριβής μου είχε ο διδάκτορας ΕΜΠ Θανάσης Παναγόπουλος, που εκτός από συνεργάτη θεωρώ πλέον και πολύ στενό μου φίλο. Με το τεράστιο θεωρητικό του βάθος και την αγάπη του για έρευνα έδωσε λύσεις σε πολλά δύσκολα σημεία της διατριβής. Η γεννήτρια χρονοσειρών απόσβεσης που χρησιμοποίησα στην εξομοίωση του τελευταίου κεφαλαίου αποτελεί απευθείας προϊόν του διδακτορικού του. Τον ευχαριστώ για τα κοινά μας οράματα και τις πολυάριθμες ώρες συζητήσεων που είχαμε γύρω από τα θέματα αυτά. Θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες και προς πολλούς συναδέλφους μου από το εργαστήριο, με πρώτο το διδάκτορα (πλέον) Σωτήρη Κανελλόπουλο. Η συγκατοίκησή μας στο γραφείο διήρκεσε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, αλλά η φιλία μας ελπίζω για πολύ περισσότερο. Ευχαριστώ επίσης τη συμφοιτήτριά μου Κέλλυ Γεωργιάδου καθώς και τα νεότερα παιδιά Θανάση Δρούγκα, Μάρκο Αναστασόπουλο, Διονυσία Πετράκη, Γιώργο Τσιρόπουλο και Θανάση Λαζαρόπουλο για την αρμονική μας συνεργασία στο Υπουργείο και την παρέα τους.

Από το στενότερο συγγενικό και φιλικό περιβάλλον μου, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου πρώτα από όλους προς τους γονείς μου για την αγάπη τους, τις θυσίες και τη στήριξη που μου παρείχαν απλόχερα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Για την πραγματική τους φιλία, τις ατελείωτες ώρες ονειροπόλησης και γέλιου που μου χάρισαν καθώς και τις θαλασσινές μας περιπέτειες ευχαριστώ τους αδελφικούς μου φίλους Χρήστο Αμπατζή και Φραγκίσκο Γρηγορόπουλο, ενώ ευχαριστώ για τη θερμή τους συμπαράσταση όλα αυτά τα χρόνια τον Νικόλα και την Ελπίδα καθώς και τους Πέτρο και Κωστή.

*Παντελής - Δανιήλ Αράπογλου
Αθήνα, Μάιος 2007*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διατριβή αντιμετωπίζονται διάφορα ζητήματα που άπτονται του φυσικού στρώματος και του στρώματος MAC των σταθερών ευρυζωνικών ασύρματων δικτύων πρόσβασης που λειτουργούν στο φασματικό εύρος 10-66GHz. Η πρόσφατη δημοσίευση των ευρυζωνικών ασύρματων προτύπων IEEE 802.16 και ETSI BRAN HIPERACCESS σηματοδότησε μια περίοδο ανάπτυξης των συγκεκριμένων δικτύων με εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων της ασύρματης επικοινωνίας σε μητροπολιτικά δίκτυα (MAN).

Το Κεφάλαιο 1 της διατριβής παρέχει μια εισαγωγή στις πρόσφατες εξελίξεις από τεχνολογικής και κανονιστικής σκοπιάς της σταθερής ασύρματης ευρυζωνικής τεχνολογίας. Στη συνέχεια, μελετώνται τα θέματα διάδοσης σε ζώνες συχνοτήτων άνω των 10GHz διαχωρίζοντας την επίδραση της ατμόσφαιρας και του περιβάλλοντος εγκατάστασης του σταθερού ασύρματου δικτύου. Η μελέτη αυτή συνοδεύεται από πολυάριθμα μοντέλα πρόβλεψης που αναπαράγονται από τη διεθνή βιβλιογραφία και τις Συστάσεις της ITU-R. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην περιγραφή ενός φυσικού στατιστικού μοντέλου των διαλείψεων λόγω βροχής, ο οποίος αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα υποβάθμισης της επίδοσης στο υψηλής συχνότητας τμήμα των σταθερών συστημάτων BWA. Επιπλέον, το Κεφάλαιο 3 διερευνά τις διάφορες μεθόδους άμβλυσης των διαλείψεων (FMT) για την αντιμετώπιση των διαλείψεων του διαύλου. Οι τεχνικές FMT διαχωρίζονται σε τρεις γενικές κατηγορίες και, συγκεκριμένα, τον έλεγχο ισχύος, την προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση και τη διαφορική λήψη. Για την τελευταία, από τη διατριβή περιγράφονται δύο νέες μέθοδοι για την πρόβλεψη της επίδοσής της υπό ισχυρή και στρωσιγενής βροχή, αντίστοιχα.

Στα υπόλοιπα κεφάλαια πραγματοποιείται μια ανάλυση της διακυβελικής παρεμβολής ως προς το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης που επιλέγεται. Ειδικότερα, το Κεφάλαιο 4 επικεντρώνεται σε συμβατικά δίκτυα BWA που βασίζονται στη διαίρεση TDMA λαμβάνοντας υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά κυψέλης που διακρίνει αυτού του είδους τα δίκτυα. Καίτοι οι πολυδιαδρομικές διαλείψεις έχουν σαφώς μικρότερη βαρύτητα για τα υπό μελέτη συστήματα, το Κεφάλαιο 5 εισάγει την τεχνική CDMA ως εναλλακτικό σχήμα πρόσβασης στο τμήμα των BWA δικτύων που λειτουργεί στο εύρος 10-66GHz, με κίνητρο τη βελτίωση ως προς τη διακυβελική παρεμβολή, τουλάχιστον για τη ζεύξη από το σταθμό συνδρομητή προς το σταθμό βάσης (upstream). Και στις δύο περιπτώσεις, πραγματοποιείται μια στατιστική εκτίμηση της διακυβελικής παρεμβολής λαμβάνοντας υπόψη τις διαλείψεις λόγω βροχής τόσο για την επιθυμητή όσο και για τις παρεμβάλλουσες ζεύξεις. Για την αντίθετη κατεύθυνση μετάδοσης (downstream), το Κεφάλαιο 6 προτείνει ένα συνδυασμό τεχνικών πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης συμπεριλαμβανομένης της τεχνικής CDMA πολλαπλών κωδίκων και μεταβλητού κέρδους εξάπλωσης, των οποίων υιοθετείται μια τροποποιημένη εκδοχή για τον έλεγχο της παρεμβολής σε ολόκληρη την έκταση του τομέα. Η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος ανάθεσης κωδίκων ελέγχεται τόσο με αναλυτικό τρόπο όσο και μέσω μιας ενδελεχούς εξομοίωσης των δυναμικών ιδιοτήτων του διαύλου.

ABSTRACT

The present thesis deals with a number of issues related to the physical and MAC layers of fixed broadband wireless access (BWA) networks operating in the 10-66GHz spectral range. The recent release of the broadband wireless standards IEEE 802.16 and ETSI BRAN HIPERACCESS signified a growth period for these networks to profit from the advantages of wireless communications in metropolitan area networks (MAN).

Chapter 1 of the thesis provides an introduction on the recent technological and standardization developments of broadband wireless access technologies. Next, propagation in frequency bands above 10GHz is studied by separating the influence of the atmosphere and the environment a fixed wireless network is deployed. This is supplemented by many prediction models reproduced from the literature and the ITU-R Recommendations. Emphasis is given on describing a physical statistical model for rain fading, which constitutes the dominant factor degrading the performance of the high frequency segment of fixed BWA systems. Furthermore, Chapter 3 investigates the various fade mitigation techniques (FMT) to combat channel fading. FMTs are separated into three general categories, that is, power control, adaptive modulation and coding and diversity. For the latter, two new methods are described for predicting its performance under heavy and stratiform rain, respectively.

The rest of the chapters offer a radiocommunication analysis on intercell interference with respect to the multiple access scheme selected. Specifically, Chapter 4 is focused on conventional TDMA based BWA networks in the frame of the distinct cellular characteristics this type of networks exhibit. Despite that multipath is less important for the system under study, Chapter 5 introduces CDMA as an alternative access option for the 10-66GHz segment of BWA networks motivated by the improved performance in terms of intercell interference, at least for the link from the subscriber to the base station (upstream). In both cases, a statistical assessment of intercell interference is carried out by taking into account rain fading for the desired and the interfering signals. For the opposite direction of transmission (downstream), Chapter 6 proposes a combination of multirate techniques including multicode-CDMA and variable spreading factor-CDMA employed in a modified fashion to control the interference throughout the sector. The performance of the proposed code assignment scheme is tested both analytically and through a comprehensive simulation of the dynamic properties of the channel.

Κατάλογος Συντμήσεων

τ.μ.	:	τυχαία μεταβλητή
AC	:	Adaptive Coding
ACI	:	Adjacent Channel Interference
ACM	:	Adaptive Coding Modulation
AIP	:	Acceptable Interference Probability
AM	:	Adaptive Modulation
APC	:	Automatic Power Control
ATM	:	Asynchronous Transfer Mode
BER	:	Bit Error Ratio
BPSK	:	Binary Phase Shift Keying
BRAN	:	Broadband Radio Access Networks
BS	:	Base Station
BWA	:	Broadband Wireless Access
CARS	:	Cable TV Relay Service
CBR	:	Constant Bit Rate
CCI	:	Cochannel Interference
CDMA	:	Code Division Multiple Access
CIR	:	Carrier-to-Interference Ratio
CNR	:	Carrier-to-Noise Ratio
CPE	:	Customer Premises Equipment
CRABS	:	Cellular Radio Access for Broadband Services
CSD	:	Cell-Site Diversity
CSMA	:	Collision Sense Multiple Access
DAVIC	:	Digital Audio Video Council
DEM	:	Digital Elevation Model
DEMS	:	Digital Electronic Messaging Service
DRR	:	Data Rate Reduction
DS	:	Direct Sequence
DSL	:	Digital Subscriber Line
DVB-S	:	Digital Video Broadcasting-Satellite
ECMWF	:	European Center of Medium-range Weather Forecast
EIRP	:	Effective Isotropic Radiated Power
ESA	:	European Space Agency
FCC	:	Federal Communication Commission
FCM	:	Fade Counter-Measures
FDD	:	Frequency Division Duplex

FEC	:	Forward Error Correction
FMT	:	Fade Mitigation Techniques
FTP	:	File Transfer Protocol
GFR	:	Guaranteed Frame Rate
HFC	:	Hybrid Fiber Coax
HIPER	:	High Performance
HPA	:	High Power Amplifier
HPBW	:	Half Power Beam Width
IBS	:	Interfering Base Station
IMT2000	:	International Mobile Telecommunications-2000
ISS	:	Interfering Subscriber Station
ITU	:	International Telecommunications Union
LMDS	:	Local Multipoint Distribution Service
LOS	:	Line-Of-Sight
LMSC	:	LAN/MAN Standards Committee
MAC	:	Medium Access Control
MAI	:	Multiple Access Interference
MC	:	Multicode
MIMO	:	Multiple Input Multiple Output
MMDS	:	Microwave Multipoint Distribution Service
MUD	:	Multi-User Detection
NLOS	:	Non Line-of-Sight
OFDM	:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	:	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OP	:	Outage Probability
OVSF	:	Orthogonal VSF
PDU	:	Protocol Data Unit
PMP	:	Point-to-Multipoint
PN	:	Pseudo-Noise
PON	:	Passive Optical Networks
PTP	:	Point-to-Point
QAM	:	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	:	Quadrature Phase Shift Keying
QoS	:	Quality-of-Service
RMS	:	Root-Mean Square
SC	:	Single Carrier
SD	:	Site Diversity
SDU	:	Service Data Unit
SS	:	Subscriber Station
TCM	:	Trellis Coded Modulation
TDD	:	Time Division Duplex
TDM	:	Time Division Multiplex
TDMA	:	Time Division Multiple Access
UMTS	:	Universal Mobile Telecommunications System
UTRA	:	UMTS Terrestrial Radio Access

VCR	:	Variable Chip Rate
VSF	:	Variable Spreading Factor
VSG	:	Variable Spreading Gain
VSL	:	Variable Spreading Length
WCDMA	:	Wideband CDMA
Wi-Fi	:	Wireless Fidelity
WiMAX	:	worldwide interoperability for microwave access
WH	:	Walsh-Hadamard
XPD	:	Cross Polarization Discrimination
XPI	:	Cross Polarization Isolation
XPIC	:	Cross Polarization Interference Canceler

Κεφάλαιο 1

Τεχνολογίες και Πρότυπα Σταθερών Δικτύων BWA

1.1 Γενικά

Τα σταθερά δίκτυα BWA αποτελούν προϊόν της τάσης που παρατηρείται τελευταία στην αγορά τηλεπικοινωνιών για παροχή ευρυζωνικής πρόσβασης (broadband access) στον τελικό χρήστη. Η τάση αυτή, που οφείλεται πρωτίστως στη διαρκή αύξηση των απαιτήσεων των χρηστών για υπηρεσίες Διαδικτύου (Internet), είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη εναλλακτικών τεχνολογιών που υλοποιούνται είτε ενσύρματα είτε ασύρματα.

Στην κατηγορία των ενσύρματων τεχνολογιών ανήκουν τα παθητικά οπτικά δίκτυα PON (Passive Optical Networks), τα ομοαξονικά συστήματα με χρήση καλωδιακών (cable) modem, τα υβριδικά οπτικά-ομοαξονικά δίκτυα HFC (Hybrid Fiber Coax) και οι διάφορες εκδόσεις ψηφιακών γραμμών συνδρομητή xDSL (Digital Subscriber Line). Στην κατηγορία των ασύρματων τεχνολογιών, εκτός από τα δίκτυα BWA, υπάρχει η δυνατότητα σταθερής ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης είτε μέσω δορυφόρων, με χαρακτηριστικότερο αντιπρόσωπο την οικογένεια προτύπων DVB-S (Digital Video Broadcasting via Satellite), είτε μέσω ασύρματων τοπικών δικτύων Wi-Fi (πρότυπο IEEE 802.11).

Μολονότι τα ανωτέρω συστήματα είναι ανταγωνιστικά μεταξύ τους καθώς απευθύνονται στο ίδιο τμήμα της αγοράς τηλεπικοινωνιών, στην πράξη, οι περιορισμοί/ πλεονεκτήματα του καθενός ξεχωριστά τα καθιστούν, σε πολλές περιπτώσεις, συμπληρωματικά, με δυνατότητες παράλληλης ανάπτυξης ή συνέργειας. Ειδικότερα, τα σταθερά

δίκτυα BWA εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών που προσφέρει η ασύρματη πρόσβαση, χωρίς να απαιτούνται σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές, σε αντίθεση με τις αντίστοιχες ενσύρματες τεχνολογίες. Για τον ίδιο λόγο, η ανταποδοτικότητα των δικτύων BWA για τον τηλεπικοινωνιακό πάροχο είναι σχεδόν άμεση, αφού ο χρόνος που μεσολαβεί από την αρχική εγκατάσταση του δικτύου μέχρι την απόσβεση της επένδυσης του απαιτούμενου εξοπλισμού είναι πολύ μικρός. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα της τεχνολογίας ευρυζωνικής ασύρματης πρόσβασης είναι ότι η εγκατάσταση του δικτύου γίνεται χωρίς να διαταράσσεται το φυσικό και ανθρώπινο περιβάλλον, ενώ, γενικά, χαρακτηρίζεται ως κλιμακωτή (scalable) αρχιτεκτονική αφού επεκτείνεται ανάλογα με τη ζήτηση.

Σε σχέση με τη συχνότητα λειτουργίας, η πρώτη γενιά δικτύων BWA σε συχνότητες κάτω των 10GHz αναφέρεται συχνά με την εμπορική ονομασία MMDS (Microwave Multipoint Distribution Services), ενώ, σε συχνότητες άνω των 10GHz με την ονομασία LMDS (Local Multipoint Distribution Services) [Sar99]. Τα δίκτυα MMDS που αναπτύχθηκαν κυρίως στις ΗΠΑ, προσφέρουν συνήθως εύρη ζώνης της τάξης των 100-150MHz περί την κεντρική συχνότητα 2.5GHz. Τα αντίστοιχα μεγέθη στα δίκτυα LMDS είναι σημαντικά αυξημένα: το προσφερόμενο εύρος ζώνης μπορεί να υπερβεί το 1.5GHz και, ανάλογα με την πολιτική εκχώρησης συχνοτήτων της κάθε χώρας, η κεντρική συχνότητα λειτουργίας μπορεί, μεταξύ άλλων, να εντοπίζεται στα 28GHz, 30GHz ή 40GHz. Σημειώνεται ότι η παρούσα διδακτορική διατριβή έχει ως βασικό αντικείμενό της τα δίκτυα BWA που λειτουργούν σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος. Ως εκ τούτου, στα επόμενα, χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση οι όροι BWA, όταν αναφέρονται χαρακτηριστικά που είναι ανεξάρτητα από τη συχνότητα λειτουργίας του δικτύου και LMDS, όταν αναφέρονται ρητά συχνότητες άνω των 10GHz. Στην Ενότητα 1.2 δίδεται το κανονιστικό πλαίσιο της εκχώρησης φάσματος για τα σταθερά δίκτυα ασύρματης πρόσβασης.

Η πρώτη γενιά δικτύων LMDS σχεδιάστηκε με κύριο σκοπό τη διανομή ψηφιακής τηλεόρασης (digital TV), διαδραστικής τηλεόρασης (interactive TV) με εμπορικές εφαρμογές τύπου e-commerce και εφαρμογές video με βάση τα προτύπα DVB και DAVIC (Digital Audio Video Council) [Nor00]. Ωστόσο, η ανταπόκριση από την πλευρά των συνδρομητών δεν ήταν η αναμενόμενη και η τεχνολογία LMDS πέρασε σε δεύτερο πλάνο. Νέα ώθηση στα δίκτυα BWA προσέφερε η τεράστια ζήτηση για

ευρυζωνικές υπηρεσίες IP (Internet Protocol) [Mah01] καθώς το προσφερόμενο εύρος ζώνης είναι κατάλληλο για την εξυπηρέτηση εφαρμογών Διαδικτύου. Ορισμένες καθιερωμένες υπηρεσίες ή εφαρμογές που ευνοούν την ευρεία χρήση του Διαδικτύου είναι [And03]:

- Το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (e-mail)
- Η πλοήγηση στον Παγκόσμιο Ιστό (web-browsing)
- Η μεταφορά αρχείων μέσω FTP (File Transfer Protocol)
- Η ροή αρχείων ήχου (Audio Files Streaming)
- Η ροή αρχείων video (Video Files Streaming)
- Η μετάδοση φωνής πάνω από IP (Voice over IP, VoIP)

Στο πλαίσιο αυτό, σημαντικό βήμα για την ευρεία εμπορευματοποίηση των δικτύων BWA υπήρξε και η πρόσφατη έκδοση των προτύπων IEEE 802.16 WirelessMAN [IEEE04] και ETSI BRAN HIPERACCESS [HIP02]. Για τη σύγκλιση των δύο προτύπων και την ομαλή υλοποίησή τους, έχει συσταθεί το WiMAX¹ φόρουμ. Στην Ενότητα 1.3 παρατίθεται μια επισκόπηση των διαθέσιμων πρωτοκόλλων ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης από τους δύο αυτούς οργανισμούς, ενώ η Ενότητα 1.4 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του φυσικού στρώματος και του στρώματος MAC για το δημοφιλές IEEE 802.16.

Η τεχνολογία BWA βασίζεται σε κυψελωτά δίκτυα σημείου-προς -πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint, PMP), όπου ως σταθμός βάσης (Base Station, BS) της κάθε κυψέλης επιλέγεται ένα υψηλό κτίριο, στην κορυφή του οποίου εγκαθίσταται η κεραία. Στο αζιμουθιακό επίπεδο, οι κεραίες των σταθμών βάσης διαθέτουν μεγάλο γωνιακό εύρος δέσμης (beamwidth) που κυμαίνεται από 360° έως $360^\circ/S$, όπου S είναι ο αριθμός των τομέων (sectors) ανά κυψέλη. Αντίστοιχα, οι συνδρομητές μπορεί να είναι οικιακοί ή μικρές/μεσαίες επιχειρήσεις, στους σταθμούς των οποίων (Subscriber Station, SS), ο εξοπλισμός CPE (Customer Premises Equipment) αποτελείται από την κεραία, την εξωτερική μονάδα (Outdoor Unit) και την εσωτερική μονάδα (Indoor Unit). Σε αντίθεση με τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, στα σταθερά δίκτυα BWA η

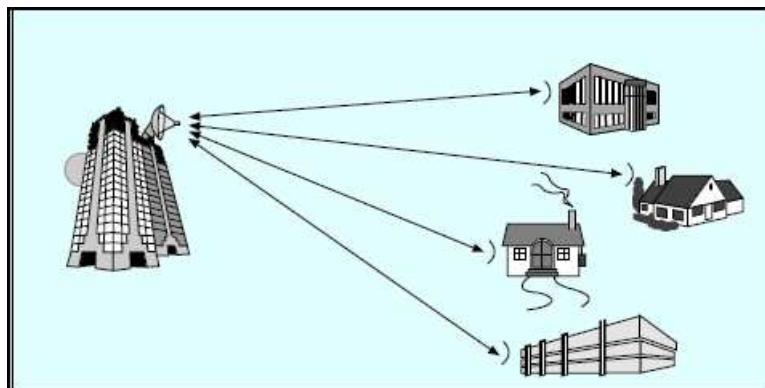
¹Worldwide interoperability for microwave access.

κεραία του συνδρομητή χαρακτηρίζεται από πολύ στενό εύρος δέσμης που κυμαίνεται από 2° έως 10° , ώστε ο SS να σκοπεύει αποκλειστικά τον BS από τον οποίο εξυπηρετείται. Επιπλέον, οι τιμές της ακτίνας κάθε κυψέλης κυμαίνονται από 1Km έως 5Km. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται μια τυπική εικόνα του τρόπου επικοινωνίας των BS με τους συνδρομητές. Μια ανασκόπηση των κυψελωτών αρχιτεκτονικών που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία πραγματοποιείται στην Ενότητα 1.5.

1.2 Θέματα Εκχώρησης Φάσματος

Η ρύθμιση του φάσματος ραδιοεπικοινωνιών σε παγκόσμια κλίμακα με στόχο τη δίκαιη και αποδοτική χρήση του είναι αρμοδιότητα της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union, ITU) [ITU06]. Το διαθέσιμο φάσμα για την υλοποίηση σταθερών δικτύων BWA αντιστοιχεί είτε σε αδειοδοτημένες συχνότητες είτε σε συχνότητες που εξαιρούνται αδειοδότησης. Γενικά, οι αδειοδοτημένες συχνότητες προσφέρουν προστασία από παρεμβολές λόγω του ότι κάθε νέα εκχώρηση πρέπει να συμμορφώνεται με συγκεκριμένες προδιαγραφές που περιορίζουν την παρεμβολή προς τα γειτονικά σε λειτουργία συστήματα, δηλαδή προς εκείνα τα συστήματα που λειτουργούν σε κοντινή απόσταση και σε κοινό τμήμα του φάσματος. Αντίθετα, οι συχνότητες που εξαιρούνται αδειοδότησης δεν υπόκεινται σε παρόμοιες προδιαγραφές. Απαιτείται, όμως, η εκπομπή να περιορίζεται σε χαμηλά επίπεδα ισχύος ώστε να αποφεύγονται οι παρεμβολές.

Παγκοσμίως, υπάρχουν διάφορες ζώνες συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από αδειοδοτημένα ασύρματα ευρυζωνικά συστήματα. Στο πλαίσιο των οδηγιών



Σχήμα 1.1: Τυπικοί Σταθμοί Βάσης και Συνδρομητή σε συστήματα LMDS.

της ITU, οι διάφορες χώρες μπορούν να επιλέξουν ή όχι την αδειοδότηση των σχετικών συχνοτήτων στην επικράτειά τους. Λόγω των διαφορών στις μεθόδους απονομής των συχνοτήτων από τα διάφορα κράτη, στους Πίνακες 1.1 και 1.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά οι αδειοδοτημένες συχνότητες για πρόσβαση στη σταθερή υπηρεσία στις ΗΠΑ και την Ευρώπη, αντίστοιχα.

Για τα συστήματα που λειτουργούν στις συγκεκριμένες συχνότητες, εκτός από τις απαιτήσεις για την απόκτηση άδειας, σε κάθε ζώνη συχνοτήτων πρέπει να ικανοποιούνται αυστηρά τεχνικά κριτήρια με στόχο την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ των συστημάτων που λειτουργούν σε κοινό φάσμα συχνοτήτων. Πρέπει, επίσης, να διασφαλίζεται ότι η φασματική απόδοση (spectrum efficiency) του υπό εγκατάσταση συστήματος δικαιολογεί την κατάληψη του φάσματος ώστε αυτό να μη σπαταλάται. Οι τεχνικές προδιαγραφές αφορούν, συνήθως, παραμέτρους που εμπλέκουν την ελάχιστη και τη μέγιστη ισχύ εκπομπής, τη φασματική απόδοση του σχήματος διαμόρφωσης καθώς και αυστηρά πρότυπα για τα διαγράμματα ακτινοβολίας, όταν χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραίες.

Από την άλλη πλευρά, παρατηρείται ένα διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για εκμετάλλευση των συχνοτήτων που εξαιρούνται αδειοδότησης. Ο βασικός λόγος είναι ότι επιτρέπουν στους χρήστες της ασύρματης υπηρεσίας να χρησιμοποιούν εμπορικά διαθέσιμα modem για τη σύνδεσή τους με το σύστημα. Ωστόσο, οι συχνότητες αυτές, από κανονιστική άποψη, δεν προσφέρουν προστασία έναντι των παρεμβολών, εκτός από την ανοχή στην παρεμβολή που έχει επιτύχει κατά το σχεδιασμό της συσκευής ο ίδιος ο κατασκευαστής. Επειδή η σχετική διεισδυτικότητα των συστημάτων αυτών υπήρξε μέχρι σήμερα χαμηλή, η αναμενόμενη ποιότητα υπηρεσιών (Quality-of-Service, QoS), όταν μεγάλο πλήθος χρηστών ανταγωνίζεται να καταλάβει τον κοινό πόρο δημιουργώντας συνθήκες εκτεταμένης παρεμβολής, απομένει να δοκιμασθεί. Τυπικές ζώνες συχνοτήτων που εξαιρούνται αδειοδότησης και είναι διαθέσιμες σήμερα στις ΗΠΑ και την Ευρώπη για σταθερές ασύρματες υπηρεσίες, είναι οι ζώνες 2.4-2.483GHz, 5.15-5.35GHz, 5.470-5.725GHz και 5.725-5.825GHz.

Πίνακας 1.1: Αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων για χρήση από σταθερά ασύρματα δίκτυα στις ΗΠΑ.

Ζώνη Συχνοτήτων (GHz)	Χρήση
2.150-2.156	Κανάλι 6MHz για υπηρεσίες MMDS
2.156-2.162	Κανάλι 6MHz για υπηρεσίες MMDS
2.156-2.160	Κανάλι 4MHz για υπηρεσίες MMDS
2.500-2.690	31 Κανάλια των 6MHz που μοιράζονται μεταξύ των υπηρεσιών MMDS και ITFS (Instructional Television Fixed Service)
3.8-4.2	Ζώνη συχνοτήτων για συστήματα σημείου-προς-σημείο (point-to-point, PTP)
5.9-7.1	Ζώνη συχνοτήτων για συστήματα PTP
10.7-11.7	Ζώνη συχνοτήτων για συστήματα PTP
12.7-13.25	Ζώνη συχνοτήτων για συστήματα CARS (Cable TV Relay Service)
17.7-18.820	Μοιράζεται μεταξύ των συστημάτων CARS και PTP
24.25-25.25	Ζώνη συχνοτήτων για συστήματα DEMS (Digital Electronic Messaging Service). Περιλαμβάνει 5 × 40MHz κανάλια FDD (Frequency Division Duplex)
28	Ζώνη συχνοτήτων για συστήματα LMDS Η ζώνη A περιλαμβάνει τα μπλοκ 27.5-28.35GHz, 29.10-30.25GHz και 31.075-31.225GHz. Η ζώνη B περιλαμβάνει τα μπλοκ 31.0-31.075GHz, και 31.225-31.3GHz.
38	Κανάλια FDD των 50MHz στις ζώνες 38.6-38.95GHz και 39.3-39.65GHz

Πίνακας 1.2: Αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων για χρήση από σταθερά ασύρματα δίκτυα στην Ευρώπη.

Ζώνη Συχνοτήτων (GHz)	Χρήση
3.4-3.6	Χρησιμοποιούνται ζώνες προστασίας των 50 ή 100MHz
3.8-4.2	Ζώνη συχνοτήτων δημόσιου παρόχου για υψηλής χωρητικότητας ζεύξεις PTP
5.9-7.1	Ζώνη συχνοτήτων δημόσιου παρόχου για υψηλής χωρητικότητας ζεύξεις PTP
7.1-8.5	Ζώνη συχνοτήτων δημόσιου παρόχου για μεσαίας και υψηλής χωρητικότητας ζεύξεις PTP μεγάλου μήκους
10.15-10.65	Περιλαμβάνει 5 × 40MHz κανάλια
10.7-11.7	Ζώνη συχνοτήτων δημόσιου παρόχου για υψηλής χωρητικότητας ζεύξεις PTP
12.7-13.3	Ζώνη συχνοτήτων δημόσιου παρόχου χαμηλής και μεσαίας χωρητικότητας
14.4-15.4	Ζώνη συχνοτήτων για διάφορων ειδών συστήματα σταθερής υπηρεσίας
17.7-19.7	Ζώνη συχνοτήτων δημόσιου παρόχου χαμηλής και μεσαίας χωρητικότητας
21.2-23.6	Ζώνη συχνοτήτων δημόσιου παρόχου για υψηλής χωρητικότητας ζεύξεις PTP
24.5-26.5	Ζώνη συχνοτήτων ETSI-26GHz. Κανάλια FDD των 3.5 έως 112MHz
37.5-39.5	Ζώνη συχνοτήτων κοινού φέροντος για συστήματα PTP

1.3 Τεχνικά Πρότυπα

Το πρώτο διάστημα εγκατάστασης σταθερών ευρυζωνικών ασύρματων συστημάτων, αποτελούμενων κυρίως από μικροκυματικές PTP ζεύξεις, η κυρίαρχη τάση ήταν τα συστήματα να συμμορφώνονται με ένα ελάχιστο κανονιστικό πλαίσιο αλλά, κατά τα άλλα, να χρησιμοποιούν ιδιόκτητες μεθόδους (proprietary). Μάλιστα, η προσέγγιση αυτή οδήγησε σε σημαντικές καινοτομίες στον εξοπλισμό που προορίζεται για χρήση από σταθερές ζεύξεις. Σε πολλές ρυθμιστικές αρχές, και ειδικά στον οργανισμό FCC (Federal Communications Commission), υπήρχε η βούληση να ελαχιστοποιούνται οι τεχνικές προδιαγραφές για τον έλεγχο της παρεμβολής μεταξύ των παρόχων, με τις λεπτομέρειες της μετάδοσης να αφήνονται στους ίδιους. Για παράδειγμα, αυτή είναι η περίπτωση του πλαισίου που ισχύει για τα συστήματα LMDS στις ΗΠΑ, όπου οι αδειοδοτημένοι πάροχοι επιλέγουν την τεχνολογία που εκείνοι επιθυμούν κατά την υλοποίηση του συστήματος. Εντούτοις, η ανάγκη προτυποποίησης των διάφορων συστημάτων εξακολουθεί να υπάρχει, ιδιαίτερα εκείνων των οποίων οι υπηρεσίες απευθύνονται προς ένα μεγάλο αριθμό εμπορικών και οικιακών χρηστών που διασκορπίζονται τυχαία στο εσωτερικό της περιοχής εξυπηρέτησης. Έτσι, με την εισαγωγή λεπτομερών προτύπων επιτυγχάνονται δύο σημαντικά οφέλη [And03]:

- Η κατασκευή μεγάλου αριθμού προτυποποιημένων συσκευών από τις ανταγωνιζόμενες επιχειρήσεις, γεγονός που μειώνει δραστικά την τιμή τους.
- Σε σχέση με το προηγούμενο, η αυξημένη πρωτοβουλία από πλευράς παρόχων για την ανάπτυξη προτυποποιημένων συστημάτων καθώς αυτά βασίζονται σε οικονομικότερο εξοπλισμό και, συνεπώς, διαθέτουν ευρύτερη πελατειακή βάση.

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή των δραστηριοτήτων προτυποποίησης καθώς και των συναφών οργανισμών προκειμένου για σταθερά ευρυζωνικά ασύρματα συστήματα. Περισσότερες λεπτομέρειες για το πρότυπο IEEE 802.16 που απασχολεί ιδιαίτερα την παρούσα διατριβή δίδονται στην Ενότητα 1.4.

1.3.1 Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.11

Η Ομάδα Εργασίας IEEE 802.11 [IEEE11] είναι τμήμα της Επιτροπής IEEE 802 LMSC (LAN/MAN Standards Committee), η οποία λειτουργεί υπό την αιγίδα του Ινστιτούτου IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Το πρώτο πρότυπο IEEE 802.11 για ασύρματα δίκτυα στη ζώνη συχνοτήτων 2.4GHz προσέφερε ρυθμούς δεδομένων της τάξης του 1-2Mbps. Οι ρυθμοί αυτοί ήταν σημαντικά χαμηλότεροι σε σχέση με την οικονομικότερη ενσύρματη λύση των δικτύων Ethernet σε ταχύτητες 10 ή 100Mbps. Για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης του συγκεκριμένου ασύρματου δικτύου ξεκίνησαν δύο νέα προγράμματα.

Το πρόγραμμα **IEEE 802.11a** ξεκίνησε το 1997 και ολοκληρώθηκε το 1999 επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 54Mbps. Αφορά τη ζώνη συχνοτήτων 5GHz, η οποία είναι λιγότερο επβαρυμένη σε σχέση με τη ζώνη 2.4GHz και προβλέπει τη χρήση διαμόρφωσης OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) των 52 φερόντων. Το συνολικό εύρος ζώνης καναλιού είναι 20MHz.

Επίσης, το 1999 ολοκληρώθηκε και εκδόθηκε το **IEEE 802.11b** που αποτελεί τροποποίηση του αρχικού προτύπου. Επιτυγχάνει ταχύτητες έως 11Mbps με χρήση της εξαιρούμενης από αδειοδότηση ζώνης των 2.4GHz. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, η ζώνη διαιρείται σε έξι κανάλια των 15MHz. Η στάθμη ισχύος που εκπέμπεται από συσκευές 802.11b περιορίζεται σε επίπεδα mW, ενώ απαιτείται η χρήση της τεχνολογίας μετάδοσης εξαπλωμένου φάσματος (spread spectrum) για τη μείωση της πιθανής παρεμβολής προς τους υπόλοιπους χρήστες. Η πρόσβαση πολλαπλών χρηστών πραγματοποιείται μέσω της τεχνικής CSMA (Collision Sense Multiple Access).

Τον Ιούνιο του 2003, επικυρώθηκε το **IEEE 802.11g**, το πλέον πρόσφατο πρότυπο που παρήγαγε η συγκεκριμένη ομάδα εργασίας με σκοπό να επιτύχει βελτιωμένους ρυθμούς μετάδοσης στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz, ενώ σημαντικές τεχνικές προσπάθειες έχουν γίνει με στόχο να γίνουν συμβατές οι εκδόσεις b και g².

Τέλος, το **IEEE 802.11n** βρίσκεται ακόμα σε προκαταρκτικό στάδιο και αναμένεται να δοθεί στη δημοσιότητα το Νοέμβριο του 2007. Ο ονομαστικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων αναμένεται να πλησιάζει τα 540Mbps, γεγονός που θα το καταστήσει 50 φορές ταχύτερο από το 802.11b και πάνω από 10 φορές ταχύτερο σε σχέση με τα 802.11a και 802.11g. Η σημαντική αύξηση της απόδοσης της συγκεκριμένης έκδοσης, βασίζεται, κατά κύριο λόγο, στην εισαγωγή της τεχνικής MIMO (Multiple-Input Multiple-Output), η οποία εκμεταλλεύεται την ύπαρξη των πολλαπλών κεραιών στον πομπό και το δέκτη και τη χωρική πολύπλεξη που αυτές δημιουργούν καθώς συζευγνύονται μεταξύ τους.

²Ωστόσο, η παρουσία ενός κόμβου 802.11b μειώνει τη συνολική επίδοση του δικτύου 802.11g.

1.3.2 Η οικογένεια προτύπων IEEE 802.16

Η Ομάδα Εργασίας Ευρυζωνικής Ασύρματης Πρόσβασης **IEEE 802.16** είναι και αυτή τμήμα της IEEE 802 LMSC. Αρχική της αποστολή ήταν η σύσταση προτύπων για σταθερά συστήματα BWA που λειτουργούν άνω των 10GHz, όπως είναι το DEMS (24GHz), το LMDS (28GHz) καθώς και για συστήματα που χρησιμοποιούν τη ζώνη των 38GHz. Έκτοτε, η ομάδα εργασίας έχει επεκτείνει τις δραστηριότητές της συμπεριλαμβάνοντας τις συχνότητες από 2 έως 11GHz. Το πρότυπο αυτό αναφέρεται με την ονομασία **IEEE 802.16a** και η δημοσιοποίησή του πραγματοποιήθηκε το 2003. Το ίδιο έτος, έλαβε χώρα και μια τροποποίηση του τμήματος 10-66GHz, ώστε να καταστεί ευκολότερη η διαλειτουργικότητα της ασύρματης διεπαφής (**802.16c**). Τέλος, η τελευταία έκδοση του προτύπου το 2005 αναφέρεται ως **802.16e** και ενσωματώνει τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών Διαδικτύου σε χαμηλής ταχύτητας κινητούς χρήστες (π.χ. πεζοί χρήστες). Σημειώνεται ότι τα τμήματα του προτύπου 10-66GHz και 2-11GHz διαθέτουν κοινή προδιαγραφή για το στρώμα MAC, ενώ διαφοροποιούνται όσον αφορά το φυσικό στρώμα.

1.3.3 Η οικογένεια προτύπων ETSI BRAN

Η επιτροπή BRAN (Broadband Radio Access Networks) του ευρωπαϊκού οργανισμού προτυποποίησης ETSI (European Telecommunications Standardization Institute) έχει εκδώσει διάφορα πρότυπα ασύρματης πρόσβασης στα πλαίσια της σειράς HIPER (HIgh PERformance):

- **HIPERLAN/2** Χαρακτηρίζεται από τις ίδιες προδιαγραφές για το φυσικό στρώμα με το 802.11a διαφέροντας, όμως, ως προς το στρώμα MAC λόγω της χρήσης πολλαπλής πρόσβασης TDMA αντί για CSMA. Όπως και το 802.11a, η λειτουργία του πραγματοποιείται στη ζώνη των 5GHz και για ρυθμούς μέχρι 54Mbps. Το HIPERLAN/2 πρωτοδημοσιεύθηκε το 2000 με την προσπάθεια, προς το παρόν, να επικεντρώνεται στη γεφύρωσή του με τα πρότυπα IEEE και το πρότυπο τρίτης γενιάς κινητής τηλεφωνίας IMT2000 (International Mobile Telecommunications-2000).
- **HIPERACCESS** Έχει σχεδιασθεί ως παραλλαγή του HIPERLAN/2 για PMP δίκτυα μεγαλύτερης κλίμακας με δυνατότητα να προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης

έως 25Mbps στη ζώνη 40.5-43.5GHz. Μαζί με το IEEE 802.16 WirelessMAN, τα δίκτυα που ανήκουν στο ETSI BRAN HIPERACCESS αποτελούν το βασικό πεδίο εφαρμογής των μεθόδων που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή.

- **HIPERMAN** Αφορά σταθερά δίκτυα BWA στο εύρος 2-11GHz, όπου η ασύρματη διεπαφή (air interface) έχει σχεδιασθεί με γνώμονα την εφαρμογή σε PMP αρχιτεκτονικές. Το HIPERMAN χρησιμοποιεί ως σημείο αφετηρίας το πρότυπο 802.16a.
- **HIPERLINK** Αφορά ζεύξεις μικρής κλίμακας (μικρότερες των 150m) και υψηλής ταχύτητας (μέχρι 155Mbps), με σκοπό τη διασύνδεση των δικτύων HIPERMAN και HIPERACCESS. Οι σχετικές εργασίες δεν έχουν ολοκληρωθεί ακόμα.

1.3.4 Το WiMAX φόρουμ

Βασική αποστολή του WiMAX φόρουμ είναι η προώθηση της εγκατάστασης δικτύων BWA που θα βασίζονται σε ένα παγκόσμιο πρότυπο καθώς και η πιστοποίηση της συμβατότητας των συναφών προϊόντων και τεχνολογιών. Απο την αποστολή του αυτή, γίνεται φανερό ότι βασικός στόχος του WiMAX είναι η σύγκλιση των αντίστοιχων προτύπων που έχουν εκδοθεί από τους οργανισμούς IEEE και ETSI, όπως αυτά παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Οι βασικές αρχές του WiMAX φόρουμ συνοψίζονται στα εξής σημεία [WIM06]:

- Η υποστήριξη του προτύπου IEEE 802.16 στις συχνότητες 2-66GHz.
- Η πρόταση εναλλακτικών προφίλ πρόσβασης για διάφορους τύπους χρηστών σε συστήματα IEEE 802.16.
- Η εγγύηση της απαιτούμενης διαλειτουργικότητας (interoperability).
- Η προώθηση του IEEE 802.16 με σκοπό την παγκόσμια αναγνώριση και υιοθέτησή του.
- Η εξασφάλιση της ανοικτής συμμετοχής για κάθε ενδιαφερόμενο, ανεξάρτητα αν προέρχεται από τη βιομηχανία ή τον ακαδημαϊκό χώρο.
- Η ανάπτυξη προδιαγραφών ελέγχου και δοκιμαστικών διαδικασιών (baseline tests).

1.4 Περιγραφή του IEEE 802.16 WirelessMAN

1.4.1 Η Ασύρματη Διεπαφή - Φυσικό Στρώμα

10-66GHz – Η σχεδίαση των επιμέρους λεπτομερειών του φυσικού στρώματος για τις συχνότητες 10-66GHz έγινε θεωρώντας δεδομένη την ύπαρξη οπτικής επαφής (Line-of-Sight, LOS). Υπό τη συνθήκη αυτή, η οποία συνεπάγεται ότι η διάδοση γίνεται κυρίως μέσω της απευθείας ζεύξης (και όχι μέσω της πολύοδης διάδοσης του σήματος), η επιλογή σχημάτων διαμόρφωσης που χρησιμοποιούν ένα μοναδικό φέρον (Single Carrier, SC) ήταν αυτονόητη [Ekl02]. Αντίστοιχα, η συγκεκριμένη ασύρματη διεπαφή ονομάζεται WirelessMAN-SC. Λόγω της αρχιτεκτονικής PMP, ο BS μεταδίδει στην προς τα κάτω ζεύξη (downstream) προς τους SS με πολύπλεξη διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiplexing, TDM), σύμφωνα με την οποία η ανάθεση χρονικών σχισμών (time slots) στους ενεργούς SS πραγματοποιείται διαδοχικά στο χρόνο. Η πρόσβαση κατά την προς τα άνω ζεύξη (upstream) από τους πολλαπλούς SS προς τον BS πραγματοποιείται μέσω TDMA. Όσον αφορά την αμφιδρόμηση (duplexing), επιλέχθηκε τελικά ένα σχήμα που επιτρέπει τόσο την αμφιδρόμηση με διαίρεση χρόνου (Time Division Duplexing, TDD), όπου οι δύο κατευθύνσεις εκπομπής χρησιμοποιούν από κοινού τον ίδιο διάυλο αλλά δεν εκπέμπουν ταυτόχρονα, όσο και την αμφιδρόμηση με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Duplexing, FDD), όπου οι δύο κατευθύνσεις εκπομπής λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες, ορισμένες φορές και ταυτόχρονα.

Γενικά, το φυσικό στρώμα του IEEE 802.16 WirelessMAN για το εύρος 10-66GHz εκμεταλλεύεται προσαρμοστικές τεχνικές φυσικού στρώματος -βλ. Κεφάλαιο 3- δηλαδή τη δυνατότητα ανεξάρτητης ρύθμισης σε κάθε πλαίσιο (frame) των παραμέτρων μετάδοσης του SS, συμπεριλαμβανομένων αυτών της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης (Adaptive Coding Modulation, ACM). Το εύρος ζώνης διαύλου προκαθορίζεται στα 25MHz, ενώ η μορφοποίηση παλμού (pulse shaping) γίνεται μέσω παλμών ανυψωμένου συνημιτόνου Nyquist με παράγοντα διαπλάτυνσης (roll-off factor) 0.25. Παράλληλα, πραγματοποιείται τυχαιοποίηση (randomization) για τη φασματική μορφοποίηση και τη διασφάλιση του συγχρονισμού.

Επιστρέφοντας στη δυνατότητα εφαρμογής προσαρμοστικών τεχνικών μετάδοσης, για τη διόρθωση σφαλμάτων FEC (Forward Error Correction) έχει επιλεγεί η υποχρεωτική χρήση ως εξωτερικού κώδικα της κωδικοποίησης Reed-Solomon GF(256) με

Πίνακας 1.3: Παράμετροι Φυσικού Στρώματος για την οικογένεια προτύπων IEEE 802.16.

	802.16	802.16a-d	802.16e
Συχνότητες	10-66GHz	2-11GHz	2-6GHz
Εφαρμογή	Δίκτυο Κορμού	Ασύρματο DSL	Κινητό Διαδίκτυο
Συνθήκες Διαύλου	LOS	NLOS	NLOS
Ρυθμός Μετάδοσης	134Mbps	75Mbps	15Mbps
Διαμόρφωση	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	OFDM, 256 φέροντα QPSK, 16-, 64-QAM	Κλιμακωτή OFDMA
Κωδικοποίηση	Reed-Solomon GF(256) Reed-Solomon GF(256) \ Συνελικτικός κώδικας (24,16) Reed-Solomon GF(256) \ Κώδικας Ελέγχου Ισοτιμίας (9,8) Μπλοκ κώδικας Turbo (προαιρετικά)		
Χρήστες	Σταθεροί	Σταθεροί	Κινητοί
Εύρος Ζώνης Διαύλου	20, 25, 28MHz	1.5-25MHz	20, 25, 28MHz
Ακτίνα Κυψέλης	1-5Km	6-10Km	1-5Km

μεταβλητό μήκος μπλοκ³. Ο κώδικας αυτός συνδυάζεται με ένα εσωτερικό συνελικτικό κώδικα (convolutional code) για την αυξημένη προστασία των κρίσιμων δεδομένων, όπως είναι ο έλεγχος των πλαισίων και η αρχική πρόσβαση. Προαιρετικά, αντί για το ανωτέρω αλυσιδωτό σχήμα κωδικοποίησης, προβλέπεται η χρήση κωδικοποίησης Turbo [Han02]. Οι δυνατές διαμορφώσεις σύμφωνα με το 802.16 είναι η QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), η 16-QAM (16-state Quadrature Amplitude Modulation) και η 64-QAM (64-state QAM) για τη βελτιστοποίηση της φασματικής απόδοσης κατά τη διάρκεια ευνοϊκών συνθηκών στο δίαυλο. Στην περίπτωση που το τελευταίο μπλοκ FEC δεν συμπληρωθεί πλήρως, περικόπτεται (shortening), διαδικασία η οποία ελέγχεται από τον BS μέσω των χαρτών μετάδοσης προς τα άνω ζεύξης (UL-MAP) και προς τα κάτω ζεύξης (DL-MAP). Σύνοψη των προηγούμενων χαρακτηριστικών παρουσιάζεται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 1.3.

2-11GHz – Στο τμήμα του προτύπου IEEE 802.16 WirelessMAN που αφορά τη ζώνη συχνοτήτων 2-11GHz, ορίζονται τρεις εναλλακτικές ασύρματες διεπαφές, καθεμία

³Προκειμένου να παρέχεται μεταβλητή δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων.

από τις οποίες παρέχει την απαραίτητη διαλειτουργικότητα. Η προδιαγραφή του φυσικού στρώματος σε αυτές τις συχνότητες προέκυψε από την ανάγκη για εξυπηρέτηση περιοχών της κυψέλης που δεν διαθέτουν οπτική επαφή (Non Line-of-Sight, NLOS) [Ges02]. Λαμβάνοντας υπόψη τις οικιακές εφαρμογές της τεχνολογίας BWA, είναι πιθανό οι οροφές των κτιρίων να μη διαθέτουν το απαραίτητο ύψος προκειμένου να εξασφαλίζεται η οπτική επαφή. Την κατάσταση αυτή επιτείνει και η παρεμπόδιση, γενικά, από βλάστηση και, ιδιαίτερα, από δένδρα. Σε αυτή την περίπτωση, αναμένεται σημαντικό μέρος της διάδοσης να πραγματοποιείται μέσω πολύοδης διάδοσης (multipath) -βλ. Κεφάλαιο 2-. Οι τρεις ασύρματες διεπαφές που καθορίζονται από το πρότυπο είναι:

- WirelessMAN-SC2, η οποία κάνει χρήση διαμόρφωσης μοναδικού φέροντος.
- WirelessMAN-OFDM, η οποία κάνει χρήση OFDM256 φερόντων, ενώ η πολλαπλή πρόσβαση γίνεται μέσω TDMA [Kof02]. Η συγκεκριμένη ασύρματη διεπαφή είναι υποχρεωτική για ζώνες συχνοτήτων που εξαιρούνται αδειοδότησης ώστε να αμβλύνονται τα φαινόμενα παρεμβολών.
- WirelessMAN-OFDMA, η οποία κάνει χρήση OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) με μετασχηματισμό των 2048 σημείων. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό, η πολλαπλή πρόσβαση επιτυγχάνεται αναθέτοντας ένα υποσύνολο των πολλαπλών φερόντων σε κάθε δέκτη.

Από τις δύο ανωτέρω εκδοχές του σχήματος OFDM, η πρώτη στοχεύει σε λιγότερο εξεζητημένες εφαρμογές σε μικρές αποστάσεις. Χρησιμοποιεί την τεχνική FFT (Fast Fourier Transform) των 256 σημείων, ένα βήμα περαιτέρω σε σχέση με το 802.11a που χρησιμοποιεί 64 φέροντα. Όλα τα φέροντα μεταδίδονται ταυτόχρονα. Τα δεδομένα της ζεύξης downstream μεταδίδονται ως δεδομένα TDM, ενώ το πλαίσιο της ζεύξης upstream ακολουθεί TDMA. Στην OFDMA εκδοχή της, η ασύρματη διεπαφή βασίζεται στην τεχνική FFT των 2048 φερόντων τα οποία χωρίζονται σε επιμέρους διαύλους. Στη ζεύξη downstream, οι επιμέρους διάυλοι χρησιμοποιούνται για τη διάκριση των δεδομένων σε λογικά ρεύματα (logical stream) με διαφορετικές διαμορφώσεις και κωδικοποιήσεις ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του διαύλου. Στη ζεύξη upstream, οι επιμέρους διάυλοι χρησιμοποιούνται για την πολλαπλή πρόσβαση.

Ένας επιμέρους διάυλος (υπο-διάυλος) αποτελεί υποσύνολο του συνολικού αριθμού φερόντων. Προκειμένου να μετριάσθούν οι επιλεκτικές διαλείψεις ως προς τη

συχνότητα (frequency selective fading), τα φέροντα του κάθε υπο-διαύλου απλώνονται σε ολόκληρο το διαθέσιμο φάσμα. Ο χώρος τον οποίο μπορούν να καταλάβουν τα φέροντα χωρίζεται σε N_G ομάδες. Κάθε ομάδα περιλαμβάνει N_E συνεχόμενα φέροντα. Ο υπο-διάυλος αποτελείται από ένα στοιχείο (φέρον) από κάθε ομάδα που ανατίθεται σε αυτή μέσω μιας ψευδοτυχαίας διαδικασίας που βασίζεται σε αντιμεταθέσεις, έτσι ώστε το N_G να συμβολίζει και το πλήθος των στοιχείων ανά υπο-διάυλο. Για $N = 2048$, για τη ζεύξη downstream ισχύει $N_G = 48$ και $N_E = 32$, ενώ για τη ζεύξη upstream έχουμε $N_G = 53$ και $N_E = 32$, αφού αφαιρεθούν τα πιλοτικά φέροντα [Kof02].

Ουσιαστικά, η αρχή της OFDMA συνίσταται στην από κοινού χρήση του χώρου FFT από διαφορετικούς χρήστες στη ζεύξη upstream. Ο χωρισμός σε επιμέρους διαύλους αποτελεί μια μορφή FDMA, όπου ο συνδρομητής χρησιμοποιεί το $1/N_E = 1/32$ από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού για μετάδοση OFDMA των 2048 φερόντων. Οι υπόλοιπες δύο στήλες του Πίνακα 1.3 αναφέρονται στις παραμέτρους του φυσικού στρώματος για τις συχνότητες 2-11GHz.

1.4.2 Πολλαπλή Πρόσβαση - Στρώμα MAC

Το πρωτόκολλο MAC του προτύπου IEEE 802.16 έχει σχεδιασθεί για ευρυζωνικές εφαρμογές ασύρματης πρόσβασης PMP με σκοπό να ικανοποιηθούν απαιτήσεις υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων τόσο στη ζεύξη upstream (προς το σταθμό βάσης) όσο και στη ζεύξη downstream (από το σταθμό βάσης). Το σχήμα πρόσβασης και οι αλγόριθμοι ανάθεσης εύρους ζώνης επιβαρύνονται λόγω της εξυπηρέτησης εκατοντάδων τερματικών ανά διάυλο, όπου το κάθε τερματικό ενδεχομένως μοιράζεται ανάμεσα σε πολλούς τελικούς χρήστες. Μάλιστα, όπως περιγράφηκε στην εισαγωγική ενότητα, οι υπηρεσίες που ζητούν οι τελικοί χρήστες κυμαίνονται από τις συμβατικές εφαρμογές TDM (μετάδοση φωνής και δεδομένων), μέχρι εφαρμογές διασύνδεσης μέσω IP (για παράδειγμα, υπηρεσία VoIP). Για να υποστηρίξει αυτή την πληθώρα υπηρεσιών, το στρώμα MAC του 802.16 πρέπει να εξυπηρετεί τόσο κίνηση συνεχούς όσο και καταιγιστικού (bursty) χαρακτήρα. Για το λόγο αυτό, προσφέρει μια ευρεία ποικιλία υπηρεσιών, σε αντιστοιχία με τις κατηγορίες υπηρεσιών που προσφέρει το πρωτόκολλο ATM (Asynchronous Transfer Mode) καθώς και νέες κατηγορίες υπηρεσιών όπως η GFR (Guaranteed Frame Rate) [Ekl02].

Το πρωτόκολλο MAC του 802.16 υποστηρίζει, επίσης, διάφορες απαιτήσεις κίνησης

κορμού (backhaul) που βασίζονται τόσο στο ATM (μεταγωγή κυκλώματος) όσο και σε πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτου. Για την αντιστοίχιση της κίνησης του στρώματος μεταφοράς στο στρώμα MAC χρησιμοποιούνται υποστρώματα σύγκλισης (convergence sublayers). Μέσω δυνατοτήτων όπως είναι η μείωση του μεγέθους των επικεφαλίδων, η συνένωση σε πακέτα (packing) και ο τεμαχισμός δεδομένων (fragmentation), το υπόστρωμα σύγκλισης και το στρώμα MAC συνεργάζονται προκειμένου να μεταφέρεται η κίνηση με μορφή αποδοτικότερη σε σχέση με τον αρχικό μηχανισμό μεταφοράς.

Ακόμη ένα θέμα που αφορά τη διεπαφή μεταξύ του φυσικού στρώματος και του στρώματος MAC είναι η απόδοση της μεταφοράς δεδομένων. Για παράδειγμα, η δυνατότητα προσαρμοστικής ρύθμισης των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ACM σε κάθε πλαίσιο και για κάθε συνδρομητή προσφέρει την επιλογή το στρώμα MAC να κάνει χρήση αποδοτικών ως προς το εύρος ζώνης σχημάτων κάτω από ευνοϊκές συνθήκες για τη ζεύξη, ή χρήση περισσότερο αξιόπιστων/εύρωστων (αλλά λιγότερο αποδοτικών) εναλλακτικών σχημάτων προκειμένου να διασφαλισθεί η απαιτούμενη διαθεσιμότητα της ζεύξης (που μπορεί να φθάσει το 99.999%).

Ο μηχανισμός αποδοχής των αιτημάτων έχει σχεδιασθεί με τρόπο ώστε να είναι κλιμακωτός -δηλαδή να εκχωρεί τους πόρους του συστήματος σταδιακά ανάλογα με τη ζήτηση-, αποδοτικός -δηλαδή να κάνει βέλτιστη χρήση των πόρων αυτών- και να διαθέτει δυνατότητα αυτόματης διόρθωσης. Έτσι, η αποδοτικότητα του συστήματος πρόσβασης στο 802.16 δεν μειώνεται όταν αντιμετωπίζει πολλαπλές συνδέσεις και διάφορα επίπεδα QoS ανά τερματικό καθώς και μεγάλο αριθμό πολυπλεγμένων χρηστών, αφού εκμεταλλεύεται τη διαθέσιμη ποικιλία μηχανισμών αποδοχής των αιτημάτων, εξισορροπώντας μεταξύ της ευστάθειας που προσφέρει η πρόσβαση χωρίς σύνδεση και της αποδοτικότητας της πρόσβασης με σύνδεση [Ekl02].

Αν και το πρότυπο προσφέρει πολλούς μηχανισμούς ανάθεσης εύρους ζώνης και QoS, οι λεπτομέρειες του προγραμματισμού εργασιών (scheduling) και της διαχείρισης των κρατήσεων (reservation management) δεν προδιαγράφονται από το πρότυπο, δίδοντας στους παρόχους ένα σημαντικό εργαλείο ώστε να διαφοροποιούν τον εξοπλισμό τους.

Εκτός από τη θεμελιώδη αποστολή της ανάθεσης εύρους ζώνης και της μεταφοράς δεδομένων, το στρώμα MAC του 802.16 περιλαμβάνει, επίσης, ένα υπόστρωμα ιδιωτικότητας (privacy sublayer), το οποίο επικυρώνει την πρόσβαση στο δίκτυο και την

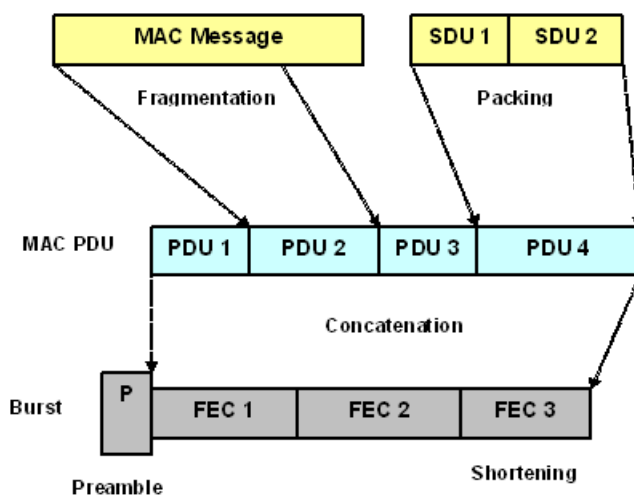
εγκατάσταση συνδέσεων, ενώ προσφέρει διαδικασίες ανταλλαγής κλειδιού και κρυπτογράφησης για προστασία των δεδομένων.

Στο Σχήμα 1.2 επεξηγούνται οι περισσότεροι από τους μηχανισμούς που αναφέρθηκαν στην παρούσα ενότητα για την αντιστοίχιση των SDU (Service Data Unit) στην κατάλληλη σύνδεση MAC. Η MAC PDU (Protocol Data Unit) αποτελεί τη στοιχειώδη μονάδα δεδομένων που ανταλλάσσεται μεταξύ των στρωμάτων MAC του BS και των SS. Στη συνέχεια, πολλαπλές μονάδες MAC PDU συνενώνονται σε κωδικοποιημένα μπλοκ του φυσικού στρώματος.

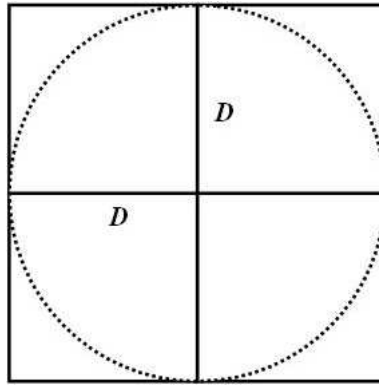
1.5 Κυψελωτές Αρχιτεκτονικές Σταθερών Ασύρματων Μητροπολιτικών Δικτύων

1.5.1 Σχεδίαση Κυψέλης

Τα πρώτα μικροκυματικά συστήματα PMP αποτελούνταν από ένα σύνολο κεραιών στενής δέσμης, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετούσε μικρό αριθμό συνδρομητών. Αυτού του τύπου οι ζεύξεις χαρακτηρίζονται πλέον εύστοχα ως πολλαπλές ζεύξεις PTP, παρά ως σταθμοί βάσης ενός δικτύου PMP. Σε ένα πραγματικό σταθμό βάσης, όπου οι κεραιές εξυπηρετούν πολλαπλούς SS σε μια συγκεκριμένη περιοχή της κυψέλης, διάφορες παράμετροι, όπως η ραδιοκάλυψη, η φασματική απόδοση και το κόστος των υποδομών πρέπει να εξισορροπηθούν [Gra97]. Οι κυψέλες στα συστήματα κινητών



Σχήμα 1.2: Μετάδοση των MAC PDU από το 802.16.



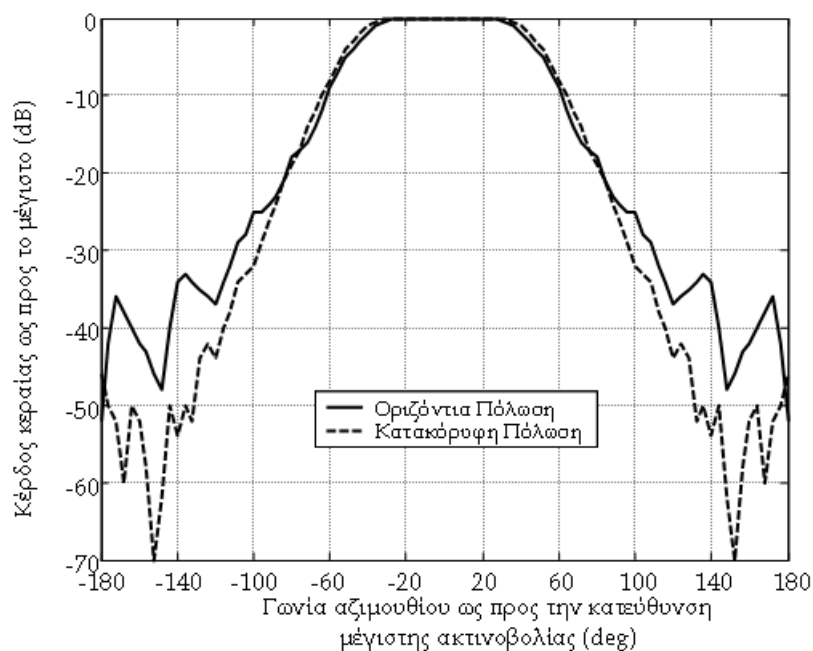
Σχήμα 1.3: Τετραγωνική αρχιτεκτονική κυψέλης σε συστήματα LMDS. Η παράμετρος D συμβολίζει την ακτίνα της κυψέλης.

επικοινωνιών προσεγγίζονται συνήθως από εξάγωνα. Στη βιβλιογραφία των συστημάτων LMDS, η περιοχή κάλυψης της κυψέλης αναπαρίστανται συνήθως από ένα τετράγωνο που χωρίζεται σε τέσσερις τομείς των 90° , όπως αυτό του Σχήματος 1.3, με την ακτίνα της κυψέλης D να κυμαίνεται από 1 μέχρι 5Km. Το πλήθος των τομέων ανά κυψέλη μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω (sectoring) προκειμένου να επιτευχθεί υψηλότερη χωρητικότητα. Ωστόσο, αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερο κόστος εξοπλισμού.

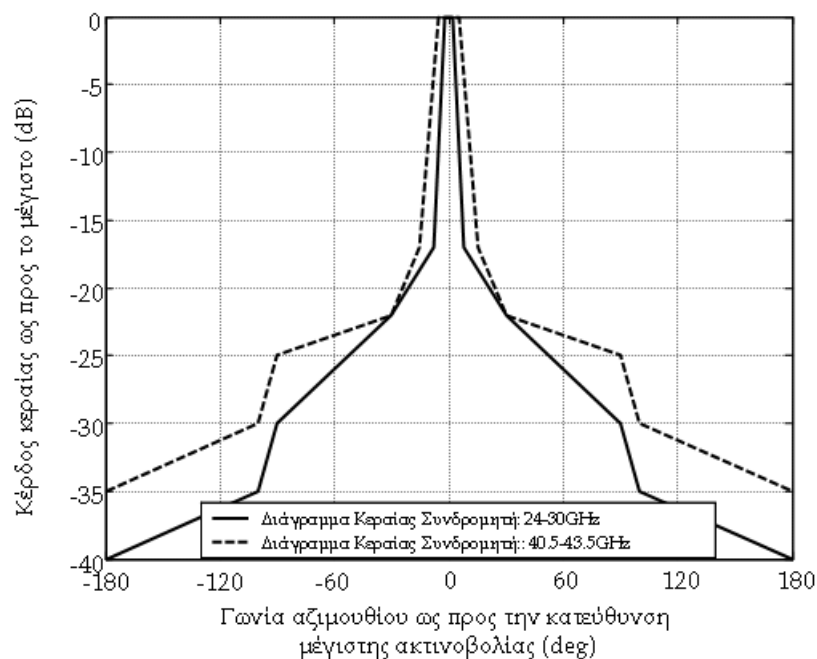
Ένας άλλος παράγοντας που περιορίζει τον αριθμό των τομέων ανά BS είναι η επίδοση της κεραίας. Σε συχνότητες υψηλότερες των 20GHz, η κυρίαρχη τάση σήμερα όσον αφορά τις κεραίες των τομέων είναι η χρήση ακτινοβολητών τύπου χοάνης (horn antennas) με διάγραμμα ακτινοβολίας στο αζιμουθιακό επίπεδο όπως αυτό του Σχήματος 1.4. Υποψήφιες τοποθεσίες για την εγκατάσταση της κεραίας ενός BS αποτελούν δομικές κατασκευές μεγάλου ύψους, όπως οι οροφές υψηλών κτιρίων ή οι υφιστάμενοι τηλεπικοινωνιακοί πύργοι. Από την άλλη πλευρά, η σταθερή θέση των SS συνεπάγεται τη χρήση ιδιαίτερα κατευθυντικών κεραιών, συνήθως παραβολικών κατόπτρων, με εύρος δέσμης μισής ισχύος (Half Power Beamwidth, HPBW) που κυμαίνεται από 2° μέχρι 10° . Ο οργανισμός ETSI καθορίζει τις ηλεκτρικές προδιαγραφές για τις κεραίες σταθερού συνδρομητή SS στις ζώνες συχνοτήτων 11-60GHz. Στο Σχήμα 1.5 παρουσιάζεται το κανονικοποιημένο ως προς το μέγιστο κέρδος⁴ διάγραμμα ακτινοβολίας για τερματικούς σταθμούς της Κατηγορίας 1⁵ στις συχνότητες 24-30GHz [ETSI02] και 40.5-43.5GHz [ETSI01]. Οι συγκεκριμένοι τύποι κεραιών θα χρησιμοποιηθούν εκτεταμένα στις αριθμητικές εφαρμογές των Κεφαλαίων 4 και 5.

⁴Το μέγιστο κέρδος κυμαίνεται μεταξύ 30dBi και 40dBi.

⁵Όπως ονομάζονται οι σταθμοί συνδρομητή σύμφωνα με την ορολογία του ETSI.

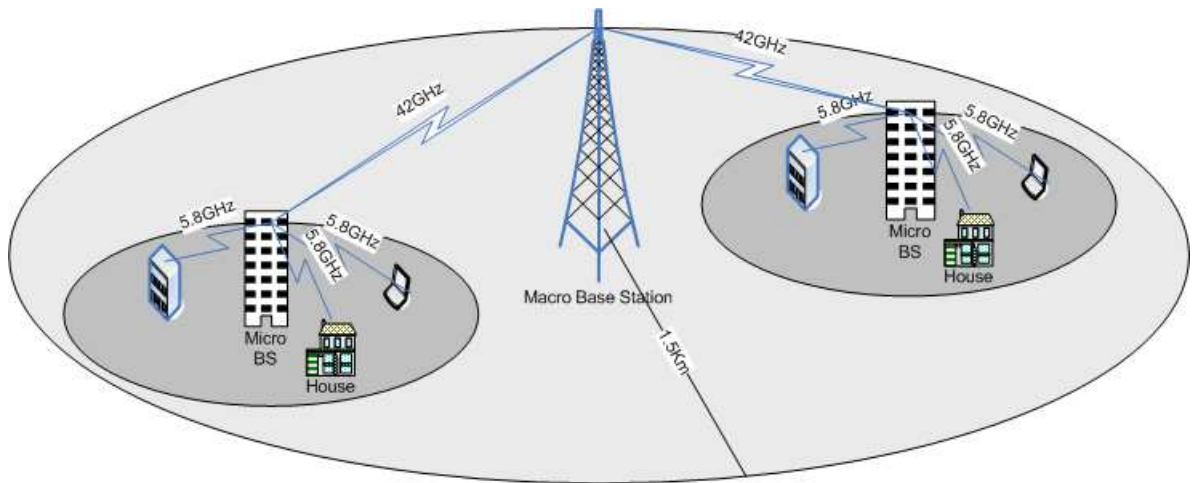


Σχήμα 1.4: Τυπικό διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας ενός τομέα LMDS στο αζιμουθιακό επίπεδο. Παρουσιάζονται τόσο η οριζόντια όσο και η κατακόρυφη πόλωση της κεραίας.



Σχήμα 1.5: Προδιαγραφή ETSI για το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας του τερματικού σταθμού (Κατηγορία 1) στις συχνότητες 24-30GHz και 40.5-43.5GHz.

Εξαιτίας του δυσμενούς περιβάλλοντος διάδοσης σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος (το περιβάλλον διάδοσης εξετάζεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο), κατά τη



Σχήμα 1.6: Αρχιτεκτονική κυψέλης LMDS δύο επιπέδων στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος CABSINET για την εξυπηρέτηση LOS (μακροκυψέλες) και NLOS (μικροκυψέλες) συνδρομητών.

διαστασιοποίηση της κυψέλης σε συστήματα LMDS προκύπτει η αναγκαιότητα για επικοινωνία LOS μεταξύ του BS και των συνδρομητών SS. Καθώς αυτό δεν είναι πάντα δυνατό, στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος CABSINET⁶ προτάθηκε μια αρχιτεκτονική κυψέλης δύο επιπέδων, η οποία χωρίζει την περιοχή της κυψέλης σε μακροκυψέλες που λειτουργούν στα 42GHz υπό συνθήκες LOS και μικροκυψέλες που λειτουργούν στη ζώνη των 5.8GHz χωρίς LOS (Non-LOS, NLOS) (βλ. Σχήμα 1.6). Το φυσικό στρώμα και το στρώμα MAC της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής συζητούνται στα [Mah02] και [Mar99], αντίστοιχα. Οι αρχιτεκτονικές δύο επίπεδων διαφαίνεται ότι θα αποτελέσουν τη βασική δομή των μελλοντικών σταθερών δικτύων BWA καθώς προσφέρονται για την υλοποίηση της ασύρματης διεπαφής των νέων προτύπων IEEE 802.16 και ETSI BRAN, τα οποία, όπως προαναφέρθηκε, περιλαμβάνουν, αντίστοιχα, δύο διεπαφές για το φυσικό στρώμα στη ζώνη 10-66GHz και στη ζώνη 2-11GHz.

1.5.2 Αναχρησιμοποίηση Συχνότητας

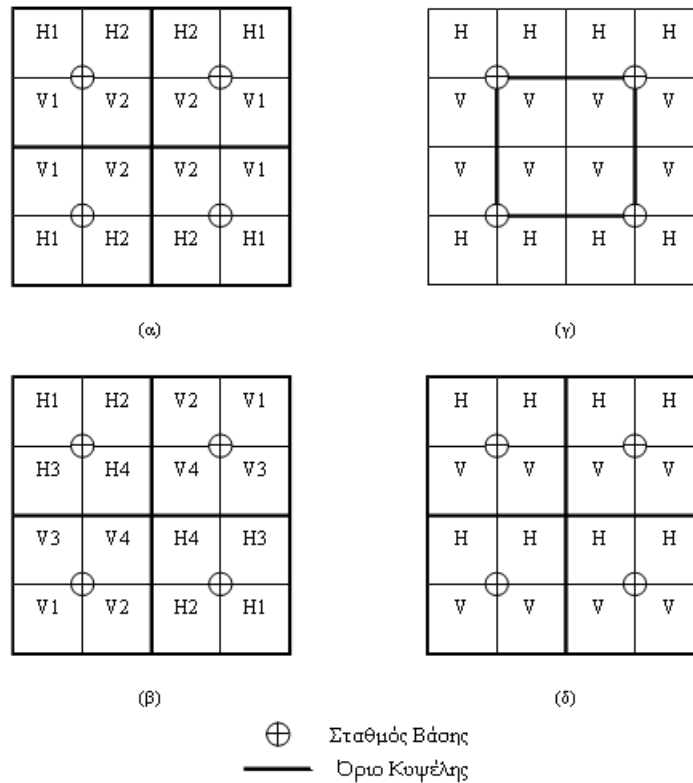
Ανάλογα με την επιλογή της συχνότητας λειτουργίας, το διαθέσιμο εύρος ζώνης λειτουργίας σε δίκτυα LMDS με πολλαπλές κυψέλες μπορεί να αγγίξει τα 2GHz. Εντούτοις, στα πλαίσια της προσπάθειας μεγιστοποίησης της διεύλευσης (throughput), η αναχρησιμοποίηση συχνότητας (frequency reuse) στα δίκτυα LMDS γίνεται μέσω

⁶Cellular Access to Broadband Service and INtEractive Television.

επιθετικών τοπολογιών, αναχρησιμοποιώντας σε κάθε κυψέλη ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης⁷. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι, κατά τη διαδικασία σχεδιασμού του συστήματος, πρέπει να αντισταθμίζονται οι παράμετροι της διέλευσης (throughput) και της ενδοσυστημικής (intrasystem) παρεμβολής.

Για την άμβλυνση των δυσμενών συνεπειών της συγκεκριμένης πολιτικής αναχρησιμοποίησης, χρησιμοποιείται ευρέως η τεχνική της *εναλλαγής πολώσεων* (polarization interleaving) στους γειτονικούς τομείς της κυψέλης αξιοποιώντας, έτσι, την αναχρησιμοποίηση τόσο στο επίπεδο της συχνότητας όσο και στο επίπεδο της πόλωσης [Rom99]. Για παράδειγμα, στις αρχιτεκτονικές τομέα του Σχήματος 1.7, οι οποίες συνιστούν κάποιες χαρακτηριστικές τοπολογίες από τις πολλές δυνατές επιλογές, η οριζόντια και η κατακόρυφη πόλωση εναλλάσσονται προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απομόνωση μεταξύ δύο γειτονικών τομέων, ενώ η χρησιμοποίηση του διαύλου διπλασιάζεται. Ορίζοντας ως *παράγοντα αναχρησιμοποίησης* τον αριθμό των τομέων ανά κυψέλη όπου αναχρησιμοποιείται ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης, στα Σχήματα 1.7α και 1.7β, το συνολικό εύρος ζώνης διαιρείται σε δύο και τέσσερις ζώνες ανά κυψέλη (παράγοντας αναχρησιμοποίησης 2 και 1), αντίστοιχα, ενώ στα Σχήματα 1.7γ και 1.7δ, ολόκληρο το εύρος ζώνης επαναχρησιμοποιείται σε κάθε τομέα (παράγοντας αναχρησιμοποίησης 4). Οι δύο τελευταίες τοπολογίες διαφέρουν μόνο ως προς τις θέσεις των κεραίων των τομέων, δηλαδή, στην περιφέρεια (κορυφές) και το κέντρο της κυψέλης, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι στα συστήματα κινητών επικοινωνιών σε κάθε κυψέλη χρησιμοποιείται ένα κλάσμα του εύρους ζώνης και ως παράγοντας αναχρησιμοποίησης ορίζεται ο αριθμός των κυψελών στις οποίες αναχρησιμοποιείται ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Καίτοι η χρήση ορθογώνιων πολώσεων προσφέρει επιπλέον εύρος ζώνης και βελτίωση όσον αφορά την παρεμβολή CCI, οι σταθμοί πρέπει να σχεδιάζονται με επαρκή *διαχωρισμό διασταύρωσης πόλωσης* XPD (Cross-Polar Discrimination) ώστε να ελαχιστοποιούνται σημαντικές στάθμες παρεμβολής ACI λόγω αποπόλωσης, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια δυσμενών συνθηκών διάδοσης. Τέλος, αντί για διαίρεση συχνοτήτων, ο χωρισμός των τομέων στην περίπτωση συστημάτων DS-CDMA LMDS μπορεί να πραγματοποιηθεί στο πεδίο των ακολουθιών εξάπλωσης (spreading sequences), ή συνδυάζοντας τα πεδία της συχνότητας, της πόλωσης και των ακολουθιών εξάπλωσης. Αυτού του είδους οι αρχιτεκτονικές CDMA έχουν εξετασθεί στις εργασίες [Nov03],

⁷ Απώροια της λειτουργίας σε πολύ υψηλές συχνότητες, όπου οι απώλειες είναι αντίστοιχα υψηλές.



Σχήμα 1.7: Τετραγωνικές αρχιτεκτονικές κυψελών LMDS με χρήση διαφορετικών συχνοτήτων (1 και 2 ή 1, 2, 3 και 4) και πολώσεων (H: Horizontal και V: Vertical). (α) Παράγοντας αναχρησιμοποίησης = 2. (β) Παράγοντας αναχρησιμοποίησης = 1 (γ) Παράγοντας αναχρησιμοποίησης = 4 (Οι κεραιές των τομέων εγκαθίστανται στις κορυφές της κυψέλης) (δ) Παράγοντας αναχρησιμοποίησης = 4 (Οι κεραιές των τομέων εγκαθίστανται στο κέντρο της κυψέλης).

[Tsa02] και θα διερευνηθούν με περισσότερη λεπτομέρεια στο Κεφάλαιο 5 του παρόντος.

Κεφάλαιο 2

Χαρακτηριστικά Διαύλου σε Συστήματα LMDS

2.1 Γενικά

Τα μοντέλα διάδοσης αποτελούν θεμελιώδες εργαλείο κατά τη σχεδίαση των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών. Ένα μοντέλο διάδοσης προβλέπει την υποβάθμιση του σήματος κατά τη μετάδοσή του προς το δέκτη. Κατά τη διάδοσή τους, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξασθενούν με διάφορους τρόπους οδηγώντας σε παραμόρφωση των αντίστοιχων σημάτων πληροφορίας, γεγονός που πρέπει να προβλέπεται κατά τη σχεδίαση της ζεύξης προκειμένου η πληροφορία να φθάνει επιτυχώς στο δέκτη. Η σχεδίαση του εξοπλισμού μετάδοσης και λήψης και η ποιότητα της τηλεπικοινωνιακής υπηρεσίας που προσφέρεται εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από αυτή την εξασθένηση και παραμόρφωση.

Τα μοντέλα διάδοσης ποικίλλουν ως προς το είδος και την ευκολία υλοποίησής τους. Υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες μοντέλων πρόβλεψης της επίδοσης του διαύλου¹:

- (α) τα *εμπειρικά μοντέλα* που περιγράφουν την επίδοση της ζεύξης βασιζόμενα σε μια μεγάλη συλλογή πειραματικών δεδομένων και
- (β) τα *φυσικά μοντέλα* που βασίζονται σε υποθέσεις όσον αφορά τους φυσικούς μηχανισμούς διάδοσης και περιγράφουν με μαθηματικό τρόπο τις υποκείμενες

¹Στην παρούσα διατριβή υιοθετείται ο όρος διάυλος για το φυσικό μέσο όπου πραγματοποιείται η μετάδοση και ο όρος κανάλι για τη φασματική ζώνη που χρησιμοποιεί κάποιο επιμέρους τμήμα μιας ευρύτερης υπηρεσίας.

διαδικασίες.

Αν και τα εμπειρικά μοντέλα πλεονεκτούν ως προς την ευκολία αξιοποίησης, η εφαρμογή τους περιορίζεται σε συγκεκριμένες συνθήκες, παρόμοιες με αυτές για τις οποίες αναπτύχθηκαν. Αντίθετα, τα φυσικά μοντέλα χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα αλλά και υψηλότερη αξιοπιστία σε μεγαλύτερη ποικιλία συνθηκών διάδοσης, αντίστοιχα.

Στο παρόν κεφάλαιο, μελετώνται τα χαρακτηριστικά του διαύλου LMDS στη φασματική περιοχή 10-66GHz. Όπως επισημάνθηκε στο Κεφάλαιο 1, στη συγκεκριμένη περιοχή του φάσματος, η επικοινωνία μεταξύ BS και SS πραγματοποιείται υπό συνθήκες LOS, δηλαδή, θεωρώντας ότι τουλάχιστον το 60% της πρώτης ζώνης Fresnel δεν παρεμποδίζεται. Με δεδομένη την καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel, η διάδοση πραγματοποιείται στον ελεύθερο χώρο (free space) και, κατά συνέπεια, η μέση λαμβανόμενη ισχύς σε απόσταση d από τον πομπό δίδεται από τη γνωστή εξίσωση του Friis [Rap99]

$$P_r(d) = EIRP \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2.1)$$

όπου $EIRP$ (Effective Isotropic Radiated Power) το γινόμενο της ισχύος εκπομπής P_t και του κέρδους της κεραίας G_t του πομπού, G_r το κέρδος της κεραίας του δέκτη και $(\lambda/4\pi d)^2$ η εξασθένιση λόγω διάδοσης στον ελεύθερο χώρο για ένα ραδιοκύμα σε μήκος λ .

Ωστόσο, μια σειρά φαινομένων και μηχανισμών που εμφανίζονται στο εύρος συχνοτήτων 10-66GHz προκαλούν σημαντικές διακυμάνσεις στο πλάτος του σήματος περί τη μέση τιμή του. Οι διακυμάνσεις αυτές ονομάζονται *διαλείψεις* (fading) και περιγράφονται κατά στατιστικό τρόπο. Ανάλογα με την προέλευσή τους, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση στο δίαυλο LMDS προκαλώντας διαλείψεις και άλλα δυσμενή αποτελέσματα μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- (α) στους παράγοντες εκείνους που de facto επιβαρύνουν τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσω της τροπόσφαιρας σε συχνότητες άνω των 10GHz, ανεξάρτητα από τον τύπο του συστήματος και του περιβάλλοντος εγκατάστασης και
- (β) στους παράγοντες εκείνους που σχετίζονται με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος (αστικό, προαστιακό, αγροτικό), όπου εγκαθίσταται ένα δίκτυο LMDS.

Στην Ενότητα 2.2 πραγματοποιείται μια επισκόπηση των παραγόντων που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία, ενώ στην Ενότητα 2.3 συζητούνται οι παράγοντες της δεύτερης

κατηγορίας. Η περιγραφή συνοδεύεται από παράθεση των πλέον διαδεδομένων μοντέλων πρόβλεψης για κάθε παράγοντα από τη διεθνή βιβλιογραφία και τις σχετικές Συστάσεις (Recommendations) του Τομέα Ραδιοεπικοινωνιών της ITU (ITU-R). Τα τεχνικά αυτά πρότυπα αποτελούν προϊόν των εργασιών των αντίστοιχων Ομάδων Μελέτης (Study Groups) της ITU-R και συνήθως περιλαμβάνουν εμπειρικά μοντέλα διάδοσης μεγάλης αξιοπιστίας². Στην Ενότητα 2.4 εξετάζεται η επίδραση των επιμέρους παραγόντων στη ραδιοκάλυψη των δικτύων LMDS, δεδομένου ότι πρόκειται για αρχιτεκτονική PMP. Τέλος, στην Ενότητα 2.5 παρουσιάζεται μια πλήρης στατιστική θεώρηση της απόσβεσης λόγω βροχόπτωσης, η οποία συνιστά το κυριότερο αίτιο διαλείψεων στην υπό εξέταση περιοχή του φάσματος, μέσω φυσικών μοντέλων. Η ανάλυση αυτή αποτελεί τη θεωρητική βάση για τα επόμενα κεφάλαια.

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση μέσω της τροπόσφαιρας σε συχνότητες άνω των 10GHz

2.2.1 Απόσβεση από ατμοσφαιρικά αέρια

Σε συχνότητες υψηλότερες των 10GHz, παρατηρείται απόσβεση λόγω απορρόφησης από οξυγόνο και υδρατμούς και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των συνολικών απωλειών διάδοσης. Η απόσβεση από ατμοσφαιρικά αέρια σε μια ζεύξη μήκους $d[\text{Km}]$ δίδεται από τη σχέση

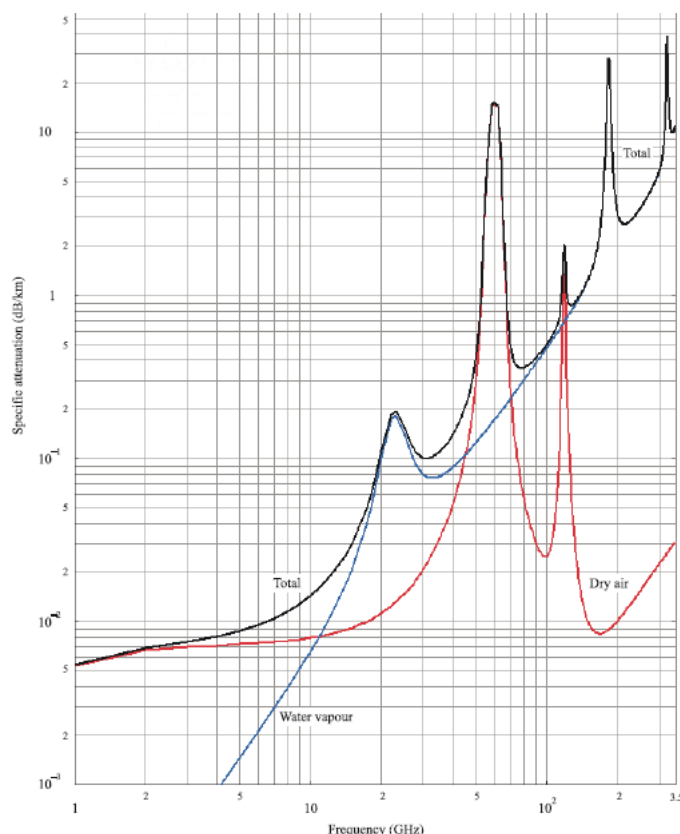
$$A_a = \gamma_a d \quad (2.2)$$

όπου η ειδική απόσβεση $\gamma_a[\text{dB/Km}]$ υπολογίζεται από τη Σύσταση ITU-R P.676 [ITU676]. Από την ίδια σύσταση, αναπαράγεται και το Σχήμα 2.1 που παρουσιάζει την παράμετρο γ_a υπό συνθήκες ξηρού αέρα, υπό συνθήκες υδρατμών καθώς και με ταυτόχρονη παρουσία και των δύο παραγόντων για τιμές πίεσης 1013hPa, θερμοκρασίας 15°C και πυκνότητας υδρατμών 7.5gr/m³.

² Λόγω του ότι έχουν υποβληθεί σε διεξοδικούς ελέγχους και συγκρίσεις με πειραματικά δεδομένα.

2.2.2 Διαλείψεις λόγω σπινθηρισμών

Μεταβολές του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας οδηγούν σε διακυμάνσεις του πλάτους του σήματος που εξαρτώνται από το μήκος της ζεύξης και αυξάνονται με τη συχνότητα. Η εξάρτηση από την απόσταση υποδηλώνει ότι οι τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί επηρεάζουν κυρίως τις δορυφορικές ζεύξεις, όπου το βάθος της διάλειψης λόγω σπινθηρισμών μπορεί να φθάσει τα μερικά dB, ενώ τα σχετικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί στη διεθνή βιβλιογραφία αφορούν κεκλιμένους ραδιοδρόμους (βλ., για παράδειγμα, [Van99]). Σημειώνεται ότι οι διαλείψεις λόγω τροποσφαιρικών σπινθηρισμών ανήκουν στην κατηγορία των ταχέων διαλείψεων (fast fading) αφού οι μεταβολές στο δίαυλο συμβαίνουν ταχύτερα από τις μεταβολές του σήματος βασικής ζώνης.



Σχήμα 2.1: Ειδική απόσβεση από ατμοσφαιρικά αέρια σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.676.

2.2.3 Διαλείψεις λόγω ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων

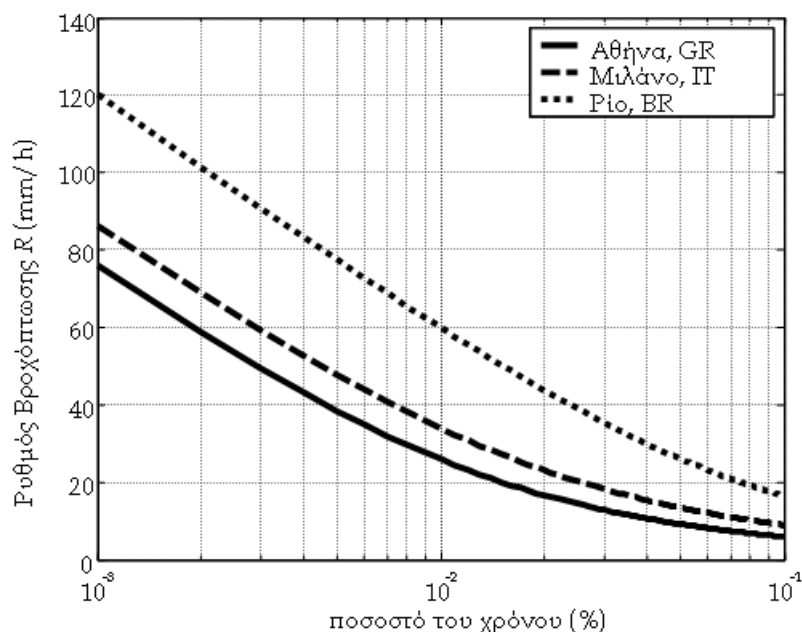
Σημαντικές διαλείψεις προκαλούν η απορρόφηση και η σκέδαση από υδρομετεωρίτες, όπως η βροχή, το χιόνι και το χαλάζι. Μολονότι σε συχνότητες κάτω από 10GHz η απόσβεση λόγω βροχής είναι σχεδόν αμελητέα, σε συχνότητες λειτουργίας υψηλότερες του ορίου αυτού, η βαρύτητα του συγκεκριμένου παράγοντα διάδοσης αυξάνει εκθετικά και συνιστά το πλέον δυσμενές περιβάλλον διάδοσης ραδιοκυμάτων [Cra03].

Μακροσκοπικά, ανάλογα με την εποχή του έτους και τη γεωγραφική θέση, η βροχή ως μέσο διάδοσης εμφανίζει δύο μορφές:

(α) τη μορφή βροχοπτώσεων μικρής έως μέτριας έντασης (βροχή στρωσιγενούς τύπου), ή

(β) τη μορφή χωρικά περιορισμένων περιοχών με ισχυρή βροχόπτωση που καλούνται βροχοπυρήνες και περιβάλλονται από στρωσιγενή βροχή (βροχή συνεκτικού τύπου). Στους βροχοπυρήνες οφείλονται οι πολύ υψηλές τιμές απόσβεσης στις οποίες υπόκεινται τα ραδιοκύματα για μικρές χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια του έτους. Μεταξύ των δύο τύπων βροχής υπάρχει μεγάλη διαφορά ως προς το βαθμό ομοιογένειας. Συγκεκριμένα, η βροχή εντός των βροχοπυρήνων (των οποίων η έκταση είναι της τάξης των μερικών χιλιομέτρων) παρουσιάζει σημαντική ανομοιογένεια. Όπως είναι λογικό, η ομοιογένεια της βροχής στρωσιγενούς τύπου έχει ως συνέπεια τη μεγάλη χωρική αυτοσυσχέτιση. Το θέμα της συσχέτισης που εμφανίζει η βροχή ως μέσο διάδοσης θα μελετηθεί διεξοδικά στο επόμενο κεφάλαιο σε σχέση με τις τεχνικές αντιμετώπισης των διαλείψεων.

Από τα προηγούμενα γίνεται σαφές ότι η βροχή είναι μια τυχαία διαδικασία τόσο στο πεδίο του χώρου όσο και στο πεδίο του χρόνου και, επομένως, απαιτείται η θεώρησή της κατά στατιστικό τρόπο. Προς τούτο, θεμελιώδες μέγεθος είναι ο *σημειακός ρυθμός ή ένταση βροχόπτωσης* (rainfall rate) R που εκφράζει (σε mm/h) το ύψος της στάθμης του ύδατος λόγω βροχόπτωσης που φθάνει στο έδαφος στη μονάδα του χρόνου. Η γνώση των στατιστικών ιδιοτήτων της (αφού πρόκειται για τυχαία διαδικασία) είναι απαραίτητη κατά τον υπολογισμό των αντίστοιχων στατιστικών ιδιοτήτων της απόσβεσης λόγω βροχής. Συγκεκριμένα, το μέγεθος το οποίο ενδιαφέρει κατά τη σχεδίαση μιας μικροκυματικής ζεύξης είναι το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο ο ρυθμός βροχόπτωσης υπερβαίνει κάποια συγκεκριμένη τιμή. Ο πλέον αξιόπιστος τρόπος για τον προσδιορισμό του είναι η διεξαγωγή μετρήσεων στην τοποθεσία εγκατάστα-



Σχήμα 2.2: Κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.837.

σης ενός συστήματος. Προϋπόθεση ώστε η διαδικασία των μετρήσεων να συγκλίνει σε ένα αποδεκτό αποτέλεσμα είναι η μεγάλη (αρχικών ετών) διάρκειά της, αφού έχει παρατηρηθεί ότι μετρήσεις μικρής χρονικής διάρκειας στην ίδια περιοχή διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους [Cra03].

Προς την κατεύθυνση αυτή και προκειμένου να διευκολύνει τη διαδικασία εκτίμησης της απόσβεσης λόγω βροχής, μέσω της Σύστασής της ITU-R P.837 [ITU837], η ITU-R προσφέρει μια βάση δεδομένων για το σημειακό ρυθμό βροχόπτωσης λαμβάνοντας υπόψη τον έντονα τοπικό χαρακτήρα που εμφανίζει το μέγεθος αυτό. Έτσι, από την ανωτέρω Σύσταση προτείνεται στους σχεδιαστές συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών η χρήση των χαρτών βροχής (rain maps), σύμφωνα με τους οποίους η Γη διαιρείται κατά γεωγραφικό μήκος και πλάτος σε τομείς των $1.5^\circ \times 1.5^\circ$. Η τράπεζα δεδομένων που συνοδεύει τη σύσταση προέρχεται από την επεξεργασία μετρήσεων διάρκειας 15 ετών από το Ευρωπαϊκό Μετεωρολογικό Κέντρο ECMWF³. Η κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης για τις περιοχές της Αθήνας, GR, του Μιλάνο, IT και του Ρίο, BR απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2. Οι περιοχές αυτές έχουν επιλεγεί ως χαρακτηριστικές του μεσογειακού, του κεντροευρωπαϊκού και του τροπικού κλίματος, αντίστοιχα.

Για τη μετάβαση από τις στατιστικές ιδιότητες του ρυθμού βροχόπτωσης σε αυτές

³European Centre of Medium-Range Weather Forecast

της απόσβεσης λόγω βροχής χρησιμοποιείται η ειδική απόσβεση βροχής γ_R (σε dB/Km) που ορίζεται ως η εξασθένιση ανά μονάδα μήκους που υφίσταται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα όταν διαδίδεται σε ένα χωρικά ομογενές μέσο βροχής. Συνδέεται με το ρυθμό βροχόπτωσης R μέσω της εκθετικής σχέσης

$$\gamma_R = kR^a \quad (2.3)$$

Τιμές για τους συντελεστές k , a για διάδοση κυμάτων με οριζόντια πόλωση (k_H, a_H) και κατακόρυφη πόλωση (k_V, a_V) συναρτήσει της συχνότητας στο φασματικό εύρος 1 έως 1000GHz δίδονται σε πινακοποιημένη μορφή από τη Σύσταση ITU-R P.838 [ITU838]. Για γραμμική και κυκλική πόλωση, και για κάθε γεωμετρία ζεύξης, οι συντελεστές k και a υπολογίζονται από τις εκφράσεις

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \phi \cos 2\tau]/2 \quad (2.4)$$

$$a = [k_H a_H + k_V a_V + (k_H a_H - k_V a_V) \cos^2 \phi \cos 2\tau]/2k \quad (2.5)$$

όπου ϕ η γωνία ανύψωσης της ζεύξης⁴ και τ η γωνία πόλωσης του ραδιοκύματος ($\tau = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ για οριζόντια, κυκλική και κατακόρυφη πόλωση, αντίστοιχα).

Αφού υπολογισθεί η ειδική απόσβεση, η κατανομή των διαλείψεων λόγω βροχής εκτιμάται μέσω της εφαρμογής του εμπειρικού μοντέλου της Σύστασης ITU-R P.530 [ITU530] που περιλαμβάνει μια σειρά μεθόδων πρόβλεψης για επίγειες ζεύξεις PTP που λειτουργούν υπό συνθήκες LOS. Σκοπός είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής της λειτουργίας μιας ζεύξης (outage probability, OP) λόγω βροχής

$$OP = \Pr\{A \geq F\} \quad (2.6)$$

όπου F [dB] το περιθώριο διαλείψεων (fade margin) της ζεύξης, δηλαδή, ένα προκαθορισμένο κρίσιμο κατώφλιο απόσβεσης, η υπέρβαση του οποίου οδηγεί το δέκτη σε αδυναμία ανάκτησης του σήματος. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.3 εφαρμόζεται το μοντέλο εκτίμησης της ετήσιας κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής για μια επίγεια ζεύξη μήκους 5Km που λειτουργεί στο Παρίσι, FR, στις τυπικές συχνότητες 28GHz και 42GHz. Σημειώνεται ότι οι διαλείψεις βροχής ανήκουν στην κατηγορία των αργών και επίπεδων διαλείψεων (slow and flat fading) καθώς, αφενός, οι μεταβολές στο δίαυλο συμβαίνουν βραδύτερα από αυτές του σήματος βασικής ζώνης και, αφετέρου, το εύρος ζώνης του σήματος είναι μικρότερο από αυτό του διαύλου. Τέλος, η απόσβεση από τα νέφη και την ομίχλη μελετάται στη Σύσταση ITU-R P.840 [ITU840].

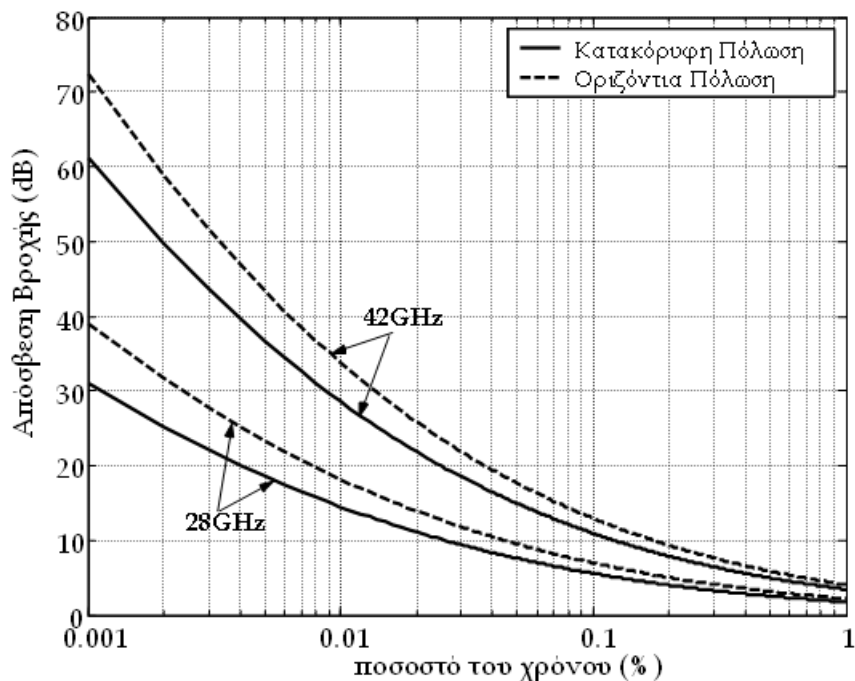
⁴Σε επίγειες ραδιοζεύξεις, η γωνία ϕ λαμβάνει πολύ μικρές τιμές.

2.2.4 Αποπόλωση λόγω βροχόπτωσης

Όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 1, τα σταθερά δίκτυα BWA ακολουθούν κυφελωτή αρχιτεκτονική, κατά την οποία οι κυψέλες χωρίζονται σε τομείς για να αυξηθεί ο αριθμός των εξυπηρετούμενων χρηστών. Ένας τρόπος διαχωρισμού σε τομείς είναι η χρήση ορθογώνιων πολώσεων. Ως εκ τούτου, η στροφή της πόλωσης του ραδιοκύματος κατά τη διάδοση (αποπόλωση), η οποία οφείλεται στο μη σφαιρικό σχήμα των σταγόνων της βροχής, μπορεί να δημιουργήσει πρόσθετη παρεμβολή. Η αποπόλωση ποσοτικοποιείται μέσω του παράγοντα XPD. Στην παρούσα εργασία, ο παράγοντας XPD ορίζεται ως ο λόγος της λαμβανόμενης ισχύος κατά την επιθυμητή πόλωση $p_{||}$ [W] προς τη λαμβανόμενη ισχύ κατά την ορθογώνια πόλωση p_{\perp} [W] και εκφράζεται σε dB μέσω της σχέσης

$$XPD = 10 \log \frac{p_{||}}{p_{\perp}} \quad (2.7)$$

Διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα για το συγκεκριμένο παράγοντα στα 30GHz διατίθενται από την παραπομπή [Dal96], ενώ μια προσεγγιστική σχέση μεταξύ των στατιστικών ιδιοτήτων του παράγοντα XPD και της ομοπολικής απόσβεσης λόγω βροχής CPA (Copolar Attenuation) για συγκεκριμένο ποσοστό του χρόνου $p\%$ περιλαμβάνε-



Σχήμα 2.3: Κατανομή των διαλείψεων λόγω βροχής για ζεύξη 5Km στο Παρίσι, FR, σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.530.

ται στη Σύσταση ITU-R P.530

$$XPD(p\%) = U(f) - V(f) \log CPA(p\%) \quad (2.8)$$

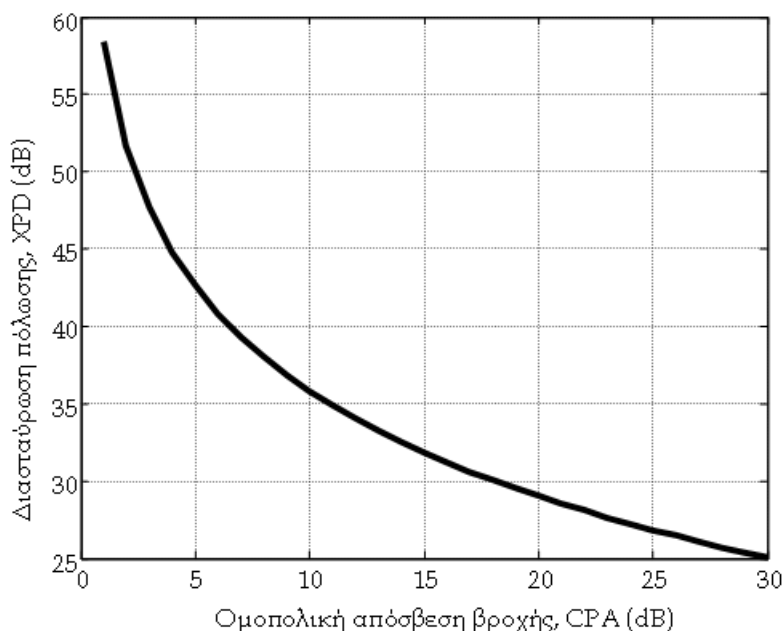
Οι συντελεστές U και V εξαρτώνται από τη συχνότητα f και για ζεύξεις LOS με μικρές γωνίες ανύψωσης και οριζόντια ή κατακόρυφη πόλωση προσεγγίζονται από τις σχέσεις

$$U(f) = U_0 + 30 \log f \quad (2.9)$$

$$V(f) = \begin{cases} 12.8f^{0.19} & 8\text{GHz} \leq f \leq 20\text{GHz} \\ 22.6 & 20\text{GHz} \leq f \leq 35\text{GHz} \end{cases} \quad (2.10)$$

Στις μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για το U_0 , έχει προκύψει μέση τιμή περίπου 15dB και κάτω όριο τα 9dB. Το Σχήμα 2.4 αποτελεί εφαρμογή της προηγούμενης μεθοδολογίας σε ζεύξη μήκους 5Km που λειτουργεί στα 28GHz στην περιοχή της Αθήνας, GR.

Αξίζει να επισημανθεί ότι αποπόλωση παρατηρείται και υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (clear sky conditions), δηλαδή απουσία βροχοπτώσης. Ωστόσο, ο βαθμός αποπόλωσης υπό συνθήκες καθαρού ουρανού εξαρτάται από την ελάχιστη τιμή XPD την οποία εγγυάται ο κατασκευαστής των κεραιών του πομπού και του δέκτη κατά την κατεύθυνση μεγίστου και, συνεπώς, βρίσκεται εκτός του αντικειμένου του παρόντος



Σχήμα 2.4: Σχέση μεταξύ των στατιστικών ιδιοτήτων του παράγοντα XPD και της ομοπολικής απόσβεσης λόγω βροχής για ζεύξη 5Km στην Αθήνα, GR, σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.530.

κεφαλαίου όπου εξετάζονται τα χαρακτηριστικά διάδοσης στο δίαυλο LMDS. Στην περίπτωση αυτή, αναφέρεται απλώς ότι η χρήση ενός ακυρωτή παρεμβολής διασταύρωσης πόλωσης XPIC (Cross-Polar Interference Canceller) μπορεί να προσφέρει βελτίωση του παράγοντα απομόνωσης διασταύρωσης πόλωσης XPI (Cross-Polar Isolation) μέχρι και 20dB. Ο παράγοντας XPI είναι ο λόγος της ισχύος του σήματος που λαμβάνεται από το δέκτη σε μια συγκεκριμένη πόλωση προς την ισχύ που λαμβάνεται στην ίδια πόλωση αλλά από ένα σήμα που έχει εκπεμφθεί σε ορθογώνια πόλωση.

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση σε κυψελωτό περιβάλλον BWA

2.3.1 Τοπογραφία και παρεμπόδιση από κτίρια

Εκτός από τα φαινόμενα διάδοσης στον ελεύθερο χώρο που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, η διάδοση σε ασύρματα συστήματα επικοινωνιών επηρεάζεται από το είδος και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του πραγματικού περιβάλλοντος όπου εγκαθίσταται το σύστημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στα σταθερά συστήματα BWA, όπου η διάκριση της περιοχής κάλυψης σε LOS και NLOS καθορίζει, αντίστοιχα, και την ασύρματη διεπαφή που θα υλοποιηθεί. Προφανώς, η ύπαρξη πληροφοριών σχετικών με το περιβάλλον διάδοσης βελτιώνει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του διαύλου. Η απόκτηση, όμως, τέτοιων βάσεων δεδομένων μπορεί να είναι πρακτικά αδύνατη ή εξαιρετικά δαπανηρή.

Προς την κατεύθυνση αυτή, σημαντική πληροφορία προσφέρουν οι τοπογραφικοί χάρτες που περιλαμβάνουν λεπτομερή στοιχεία για το υψόμετρο κάθε σημείου σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Στο Σχήμα 2.5 δίδεται ένα παράδειγμα τοπογραφικού χάρτη, όπου διακρίνονται οι λόφοι, τα βουνά και τα υπόλοιπα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής που απεικονίζεται. Εκτός από τοπογραφικούς χάρτες, μια εναλλακτική μέθοδος που έχει αναπτυχθεί για την αποθήκευση και την επεξεργασία υψομετρικών δεδομένων του εδάφους είναι το ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο (Digital Elevation Model, DEM) σταθερού πλέγματος. Το μοντέλο DEM αποτελείται από ένα πίνακα όπου συγκεντρώνονται τα υψόμετρα σημείων σε σταθερές μεταξύ τους αποστάσεις, είτε σε μέτρα είτε σε γεωγραφικές συντεταγμένες. Για τον προσδιορισμό της καθαρότητας της

ζεύξης, σχεδιάζεται η οδός διάδοσης κατά μήκος του πλέγματος και το υψόμετρο σε κάθε σημείο υπολογίζεται μέσω διγραμμικής παρεμβολής (bi-linear interpolation) των τεσσάρων πλησιεστέρων σημείων του πλέγματος.

Ενώ υπάρχουν διαθέσιμοι τοπογραφικοί χάρτες και βάσεις δεδομένων DEM υψηλής ανάλυσης και ποιότητας για τα περισσότερα μέρη του πλανήτη (κυρίως με τη βοήθεια φωτογραφιών από δορυφόρο), δεν ισχύει το ίδιο για τις βάσεις δεδομένων κτιρίων, η απόκτηση των οποίων, αν αυτές υπάρχουν, συνεπάγεται υψηλό κόστος. Τα κτίρια αποτελούν το βασικό παράγοντα που επηρεάζει τις βραχέος μήκους ζεύξεις (short range links) σε αστικά περιβάλλοντα. Βάσεις δεδομένων κτιρίων μπορούν να αναπτυχθούν με διάφορους τρόπους, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- (α) *Διανυσματικές βάσεις δεδομένων*, στις οποίες τα τοιχώματα, οι οροφές και άλλες επιφάνειες των κτιρίων αναπαριστώνται ως ένα σύνολο δεδομένων αποτελούμενο από το γεωγραφικό μήκος, πλάτος και ύψος. Ο συνδυασμός των στοιχείων για τα τοιχώματα διαμορφώνουν τελικά τρισδιάστατες πολυγωνικές μορφές για την αναπαράσταση των κτιρίων.
- (β) *Βάσεις δεδομένων πλέγματος (canopy)*, στις οποίες τα κτίρια, η βλάστηση, οι γέφυρες κ.λ.π. αναπαριστώνται από ένα υψηλής ανάλυσης κανονικό πλέγμα ανυψωμένων σημείων, περίπου με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο οι βάσεις δεδομένων DEM αναπαριστούν τα χαρακτηριστικά του εδάφους.



Σχήμα 2.5: Παράδειγμα τοπογραφικού χάρτη.

Μια εξαιρετική επισκόπηση των διαφόρων περιβαλλοντικών βάσεων δεδομένων (τοπογραφία, κτίρια κ.λ.π.) που μπορούν να αξιοποιηθούν κατά τη σχεδίαση ασυρμάτων συστημάτων επικοινωνιών περιλαμβάνεται στο [And03]. Η επεξεργασία τους μέσω υπολογιστή παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού των σημείων κατά μήκος της οδού διάδοσης που παρεμποδίζουν τη ζεύξη. Μάλιστα, στην περίπτωση δικτύων PMP, η διαδικασία αυτή ακολουθείται για το μεγάλο αριθμό ζεύξεων που σχηματίζονται μεταξύ του BS και των πολλών SS για να εκτιμηθεί η καθαρότητα του 60% της πρώτης ζώνης Fresnel. Για ζεύξεις μεγαλύτερου μήκους, η ραδιοζεύξη μεταξύ του πομπού και του δέκτη λαμβάνει καμπυλωτή μορφή λόγω της αντίστοιχης καμπυλότητας της Γης, γεγονός που λαμβάνεται υπόψη κατά τη χαρτογράφηση των σύγχρονων βάσεων δεδομένων μέσω συντελεστών διόρθωσης.

2.3.2 Παρεμπόδιση από βλάστηση

Η παρεμπόδιση από βλάστηση και, ιδιαίτερα, από δένδρα μπορεί να περιορίσει σημαντικά τον αριθμό των συνδρομητών με τους οποίους επιτυγχάνεται επικοινωνία LOS. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας ειδών βλάστησης και μορφής φυλλωμάτων, η ανάπτυξη μιας γενικευμένης μεθοδολογίας πρόβλεψης είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Στη Σύσταση ITU-R P.833 [ITU833] υπάρχουν διαθέσιμα συναφή εμπειρικά μοντέλα που βρίσκουν εφαρμογή σε συγκεκριμένες συνθήκες και εύρη συχνοτήτων. Σε μια επίγεια ραδιοζεύξη, όπου ο τερματικός σταθμός βρίσκεται εγκατεστημένος εντός δασώδους περιοχής, οι επιπλέον απώλειες (excess attenuation) λόγω βλάστησης χαρακτηρίζονται από δύο παραμέτρους [ITU833]:

- την ειδική απόσβεση (σε dB/m), κυρίως λόγω σκέδασης της ενέργειας προς διαφορετικές κατευθύνσεις από την επιθυμητή και
- τη μέγιστη συνολική επιπλέον απόσβεση λόγω βλάστησης (σε dB) που προκαλείται από την επίδραση διαφορετικών μηχανισμών, όπως είναι η διάδοση του κύματος εδάφους υπεράνω της βλάστησης και η εμπρόσθια σκέδαση στο εσωτερικό της.

Θεωρώντας ζεύξη της οποίας ο πομπός βρίσκεται εκτός δασώδους περιοχής, ενώ ο δέκτης σε βάθος d στο εσωτερικό της, η επιπλέον απόσβεση λόγω της παρουσίας της

βλάστησης A_{ev} , δίδεται από την εμπειρική σχέση

$$A_{ev} = A_m[1 - \exp(-d\gamma/A_m)] \quad (2.11)$$

όπου d [m] το μήκος της ζεύξης μέσα από δασώδη περιοχή, γ [dB/m] η ειδική απόσβεση σε μικρού μήκους ραδιοζεύξεις μέσα από βλάστηση και A_m [dB] η μέγιστη απόσβεση στην οποία υπόκειται το ραδιοκύμα λόγω βλάστησης συγκεκριμένου είδους και ύψους. Αξίζει να επισημανθεί ότι η επιπλέον απόσβεση A_{ev} θεωρείται ότι προστίθεται στις αποσβέσεις που οφείλονται στους υπόλοιπους μηχανισμούς που εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο. Η τιμή της ειδικής απόσβεσης γ εξαρτάται από το είδος και την πυκνότητα της βλάστησης. Προσεγγιστικές τιμές της ειδικής απόσβεσης συναρτήσει της συχνότητας δίδονται στην [ITU833].

Δυναμικά φαινόμενα – Έχει παρατηρηθεί ότι όταν μια ζεύξη παρεμποδίζεται από δένδρα, το πλάτος του λαμβανόμενου σήματος μεταβάλλεται ταχέως όταν τα δένδρα κινούνται, κυρίως λόγω του ανέμου. Μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στα 38 και 42GHz έχουν καταδείξει ότι υπάρχει ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού μεταβολής του πλάτους του σήματος και της ταχύτητας του ανέμου. Κατά τη μελέτη της βλάστησης είναι σαφές ότι συνιστά ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο περιβάλλον. Είναι πιθανό ένα ή περισσότερα δένδρα να παρεμβάλλονται κατά μήκος της κατεύθυνσης λήψης ενός δέκτη, χωρίς η στάθμη του λαμβανομένου σήματος να γίνεται χαμηλότερη από ένα κρίσιμο κατώφλιο. Ωστόσο, έχει παρατηρηθεί ότι, καθώς τα δένδρα αυτά κινούνται, η στάθμη του σήματος μεταβάλλεται δυναμικά σε ένα μεγάλο εύρος, οδηγώντας σε αδυναμία παροχής υπηρεσιών. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μετρήσεις της στάθμης του σήματος συναρτήσει του χρόνου σε ζεύξεις μέσα από δένδρα [Sch88], [Jon89] καταδεικνύοντας μέση μείωση της στάθμης του σήματος κατά περίπου 20dB ανά δένδρο, με συχνές διακοπές της ζεύξης λόγω διαλείψεων βάθους έως 50dB και διάρκειας περίπου 10ms. Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει τυπικά αποτελέσματα από μετρήσεις στα 38GHz ως προς τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της απόσβεσης. Εξετάζονται τρία είδη δένδρων υπό συνθήκες άπνοιας και ισχυρού ανέμου, αντίστοιχα.

Πίνακας 2.1: Δυναμικές ιδιότητες διαλείψεων λόγω βλάστησης από μετρήσεις στα 38GHz.

Είδος βλάστησης		Τριανταφυλλιά (διάμετρος 2m)	Μηλιά (διάμετρος 2.8m)	Πεύκο (διάμετρος 1.5m)
Άπνοια	Μέση απώλεια (dB)	8.6	17.4	7.7
	Τυπική απόκλιση (dB)	2.0	2.8	2.2
Ισχυρός άνεμος	Μέση απώλεια (dB)	11.7	17.8	12.1
	Τυπική απόκλιση (dB)	4.4	4.2	4.3

2.3.3 Αποπόλωση λόγω βλάστησης

Καίτοι η απόσβεση λόγω βροχής αποτελεί την κυρίαρχη συνιστώσα της συνολικής απόσβεσης στα συστήματα LMDS, η στροφή της πόλωσης την οποία εισάγει η βλάστηση είναι ισχυρότερη αυτής που οφείλεται στη βροχοπτώση. Πειραματικές μετρήσεις που έγιναν υπό την εποπτεία του ερευνητικού ινστιτούτου ITS (Institute for Telecommunication Sciences) [Vio88], [Pap92], [Pap97] έδειξαν ότι οι πλέον σοβαρές περιπτώσεις αποπόλωσης οφείλονται σε κωνοφόρα δένδρα, όπου το μέσο XPD βρέθηκε ίσο με 12dB για ύψη φυλλώματος 20m και 9dB για ύψη φυλλώματος 60m⁵. Πάντως, η γενίκευση των πορισμάτων παρόμοιων μετρήσεων σε εφαρμογές LMDS είναι ιδιαίτερα επισφαλής καθώς το ύψος των φυλλωμάτων και το είδος των δένδρων που παρενοχλεί τη ζεύξη προς το συνδρομητή είναι τυχαίες παράμετροι που δεν είναι γνωστές εξαρχής.

2.3.4 Διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης

Οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation) αποτελούν ένα γενικό όρο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει το φαινόμενο κατά το οποίο πολλές εκδοχές του εκπεμπόμενου σήματος φθάνουν στο δέκτη μέσω διαφορετικών διαδρομών διάδοσης. Οι πολλές διαδρομές προκύπτουν λόγω ανάκλασης, περίθλασης και σκέδασης από σταθερές οντότητες, όπως το έδαφος και οι σταθερές κατασκευές ή από κινούμενες οντότητες, όπως τα αυτοκίνητα και τα λεωφορεία. Επίσης, σε μικροκυματικά συστήματα η πολυδιαδρομική διάδοση είναι το αποτέλεσμα ανακλάσεων στο εσωτερικό στρωμάτων της ατμόσφαιρας. Καθώς τα σήματα από διάφορους δρόμους δεν είναι στα-

⁵Χαμηλότερες τιμές XPD συνεπάγονται μεγαλύτερη στροφή της πόλωσης του εκπεμπόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

θερά κατά το πλήθος, το πλάτος, τη φάση και τους χρόνους άφιξης, η δυνατότητα πρόβλεψης των χαρακτηριστικών παραμέτρων της πολυδιαδρομικής διάδοσης αποτελεί μια συνεχής πρόκληση και αντιμετωπίζεται με στατιστικές μεθόδους. Στην παρούσα παράγραφο, συζητούνται κυρίως τα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάλειψης που εμφανίζονται σε μικροκυματικές ζεύξεις LOS ή σε ζεύξεις που παρεμποδίζονται μόνο μερικώς.

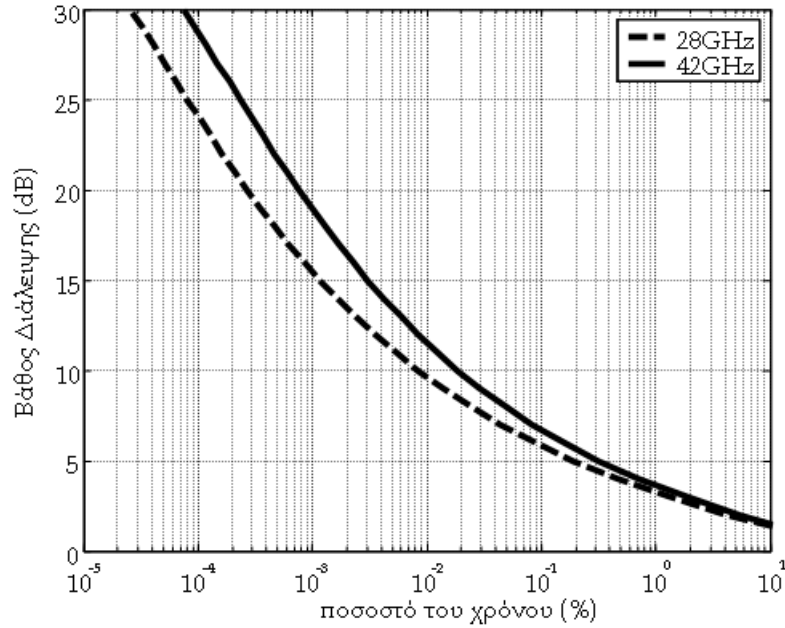
Δύο είναι οι βασικοί μηχανισμοί που προκαλούν πολυδιαδρομική διάδοση σε τέτοια μικροκυματικά συστήματα [And03]:

- Διαφορετικές διαδρομές διάδοσης μέσω της ατμόσφαιρας λόγω των απότομων μεταβολών ή ασυνεχειών του δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας που δημιουργούν διαθλαστικές ή και ανακλαστικές επιφάνειες.
- Διαφορετικές διαδρομές διάδοσης λόγω ανακλάσεων από το έδαφος, οι οποίες μεταβάλλονται καθώς μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης του εδάφους και έχουν ως αποτέλεσμα τα σήματα που ανακλώνται από αυτό να έχουν διαφορετική ένταση και γεωμετρία.

Στο μεγαλύτερο ποσοστό της διάρκειας ενός έτους, ο δείκτης διάθλασης της ατμόσφαιρας είναι γραμμική συνάρτηση του ύψους. Ωστόσο, όταν ο δείκτης δεν είναι ομοιόμορφος, τα στρώματα της ατμόσφαιρας που εμφανίζουν απότομες μεταβολές ή ασυνεχειές του δείκτη διάθλασης λόγω διαφορών στη θερμοκρασία ή την υγρασία μπορούν να δημιουργήσουν στρώματα ανάκλασης, τα οποία προκαλούν πολυδιαδρομική διάδοση. Στο Σχήμα 2.6 εφαρμόζεται το μοντέλο της Σύστασης ITU-R P.530 για τον υπολογισμό του ποσοστού του χρόνου κατά τη διάρκεια του χειρότερου μήνα ενός έτους, κατά το οποίο το βάθος της πολυδιαδρομικής διάλειψης υπερβαίνει κάποια τιμή. Οι δύο καμπύλες αφορούν τις συχνότητες 28 και 42GHz για μήκος ζεύξης ίσο με 5Km. Για την εφαρμογή του μοντέλου, απαραίτητος είναι ο γεωκλιματικός παράγοντας της γεωγραφικής θέσης⁶ που, με τη σειρά του, εξαρτάται από το σημειακό δείκτη διάθλασης dN_1 στο χαμηλότερο τμήμα 65m της ατμόσφαιρας που δεν υπερβαίνεται για το 1% του μέσου έτους. Παγκόσμιοι χάρτες για την τιμή του dN_1 περιλαμβάνονται στη Σύσταση ITU-R P.453 [ITU453].

Μια ενδιαφέρουσα θεωρητική μελέτη που βασίστηκε σε συλλογή δεδομένων που σχετίζονται με την πολυδιαδρομική διάδοση σε ζεύξεις LOS στα 38GHz υπό συνθήκες

⁶ Στο Σχήμα 2.6 έχει υποτεθεί η Αθήνα, GR.



Σχήμα 2.6: Ποσοστό του χρόνου υπέρβασης ενός βάθους διάλειψης κατά τη διάρκεια του χειρότερου μήνα του έτους σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.530.

βροχόπτωσης παρουσιάζεται στο [Xu00]. Οι μετρήσεις ευρείας ζώνης που καταγράφονται στην εργασία έδειξαν ότι προκύπτουν σημαντικές μεταβολές στα χαρακτηριστικά της πολυδιαδρομικής διάδοσης υπό ειδικές καιρικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, ενώ υπό συνθήκες καθαρού ουρανού δεν παρατηρήθηκε πολυδιαδρομική διάδοση, υπό συνθήκες βροχόπτωσης, το λαμβανόμενο σήμα πρέπει να θεωρηθεί ως το άθροισμα μιας σταθερής (σύμφωνης) συνιστώσας και πολλών (ασύμφωνων) συνιστωσών προερχομένων από την τυχαία σκέδαση από τις σταγόνες βροχής. Επομένως, η κατανομή της ισχύος του λαμβανομένου σήματος μπορεί να προσεγγισθεί από την κατανομή Rice με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$p(x) = \frac{1}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{2x + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{A\sqrt{2x}}{\sigma^2}\right) \quad (2.12)$$

όπου $A^2/2$ είναι η ισχύς της σύμφωνης συνιστώσας, σ^2 η ισχύς της ασύμφωνης συνιστώσας και I_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους και μηδενικής τάξης. Η κατανομή Rice μπορεί να παραμετροποιηθεί, επίσης, μέσω του παράγοντα K που ορίζεται ως ο λόγος ισχύων της σύμφωνης προς την ασύμφωνη συνιστώσα σε dB

$$K = 10 \log \frac{A^2/2}{\sigma^2} \quad (2.13)$$

Μετά από μια διαδικασία μη γραμμικής παλινδρόμησης των δεδομένων από τις μετρήσεις [Xu00], προέκυψε η ακόλουθη σχέση μεταξύ του παράγοντα K και του ρυθμού βροχόπτωσης R

$$K[\text{dB}] = 16.88 - 0.04R \quad (2.14)$$

Πολυδιαδρομική διάδοση σε ζεύξεις NLOS – Η παρουσίαση του αντικειμένου της πολυδιαδρομικής διάδοσης καταλήγει με μια συνοπτική αναφορά στις ζεύξεις NLOS των δικτύων BWA στο εύρος συχνοτήτων 2-11GHz. Στην περίπτωση αυτή, οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης προσεγγίζονται κατάλληλα από γνωστή συνάρτηση κατανομής προκειμένου να περιγραφούν οι μεταβολές της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος. Για την εφαρμογή των μοντέλων γίνεται η υπόθεση ότι το σήμα είναι μικρού σχετικά εύρους ζώνης, ώστε οι διαλείψεις να μην εμφανίζουν επιλεκτικότητα ως προς τη συχνότητα. Ακόμα και στην περίπτωση διαύλων, των οποίων το εύρος ζώνης του σήματος και η φύση του περιβάλλοντος διάδοσης είναι τέτοια ώστε να εμφανίζεται επιλεκτικότητα ως προς τη συχνότητα, το μοντέλο των επίπεδων διαλείψεων εξακολουθεί να είναι εφαρμόσιμο σε συγκεκριμένα φασματικά παράθυρα του συνολικού εύρους ζώνης. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, ορισμένα σχήματα διαμόρφωσης, όπως η διαμόρφωση OFDM, έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε το εύρος ζώνης καθενός από τα επιμέρους φέροντα να περιορίζεται σε εύρος συχνοτήτων στο οποίο οι διαλείψεις χαρακτηρίζονται ως επίπεδες.

Οι πλέον διαδεδομένες κατανομές που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της πολυδιαδρομικής διάδοσης σε ζεύξεις NLOS είναι οι κατανομές Rayleigh, Rice και Nakagami. Η πρώτη από αυτές θεωρείται καταλληλότερη όταν υπάρχει μεγάλο πλήθος σκεδαστών στο περιβάλλον διάδοσης, οπότε η διάδοση στο δίαυλο μετατρέπεται σε διαδικασία Gauss, ανεξάρτητα από την κατανομή των επιμέρους συνιστωσών. Αν δεν υπάρχει άφιξη στο δέκτη μιας κυρίαρχης συνιστώσας, η διαδικασία αυτή θα έχει μέση τιμή μηδέν και φάση ομοιόμορφα κατανεμημένη μεταξύ 0 και 2π . Συνεπώς, η κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται όταν δεν υπάρχει απευθείας συνιστώσα μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Αντίθετα, αν υπάρχει απευθείας κυρίαρχη συνιστώσα, χρησιμοποιείται η κατανομή Rice.

Συνοψίζοντας, ο τηλεπικοινωνιακός δίαυλος μοντελοποιείται συνήθως ως Rayleigh σε περιβάλλον μακροκυφελών, ενώ σε περιβάλλον μικροκυφελών, όπου η ύπαρξη απευθείας συνιστώσας είναι πιθανότερη, ο δίαυλος μοντελοποιείται, συνήθως, ως Rice.

Τέλος, αντίθετα με τις κατανομές Rayleigh και Rice, που περιγράφουν συμπεριφορά υπαρκτών φυσικών ποσοτήτων και διαδικασιών (θόρυβος Gauss και ημιτονικό κύμα, αντίστοιχα), η κατανομή Nakagami αποτελεί μαθηματική επινόηση χωρίς φυσική θεμελίωση. Όμως, σε σχέση με τις τελευταίες, η κατανομή Nakagami είναι περισσότερο ευέλικτη, αφού δίδει τη δυνατότητα σχηματισμού συναρτήσεων πυκνότητας με ποικίλες μορφές.

2.4 Ραδιοκάλυψη σε κυψελωτά δίκτυα LMDS

Τα φαινόμενα και τα αντίστοιχα μοντέλα διάδοσης που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες αφορούσαν κυρίως μικροκυματικές ζεύξεις PTP⁷. Η αναγωγή τους σε κυψελωτές αρχιτεκτονικές PMP, τις οποίες υιοθετούν τα δίκτυα LMDS, έχει ως συνέπεια τη μείωση της ραδιοκάλυψης (radio coverage). Ως *ραδιοκάλυψη* ορίζεται το ποσοστό της κυψέλης που εξυπηρετείται από τον BS. Προς την κατεύθυνση αυτή, η Σύσταση ITU-R P.1410 [ITU1410] επικεντρώνεται στη σχεδίαση επίγειων ευρυζωνικών συστημάτων πρόσβασης που λειτουργούν στις συχνότητες 20-50GHz.

Η επιλογή της θέσης και του ύψους εγκατάστασης της κεραίας του BS σε τέτοια συστήματα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να είναι δυνατή η απρόσκοπτη παροχή υπηρεσιών προς τον επιθυμητό αριθμό χρηστών στο εσωτερικό της κυψέλης. Επομένως, κατά τη σχεδίαση ενός κυψελωτού συστήματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ποικιλία παραγόντων που επιβαρύνουν τις μεμονωμένες ζεύξεις μεταξύ BS και SS. Ορισμένες τροποποιήσεις στους πομπούς και τους δέκτες των μεμονωμένων ζεύξεων με σκοπό τη βελτίωση της ραδιοκάλυψης είναι [Fal03]:

- Η αύξηση της μέγιστης ισχύος εκπομπής (Περιορισμός: Τεχνολογικό κόστος, δημιουργία παρεμβολών, ασφάλεια και κανονιστικά θέματα).
- Η αύξηση της κατευθυντικότητας και του κέρδους των κεραιών (Περιορισμός: Ευαισθησία σκόπευσης κατά την εγκατάσταση της κεραίας και όρια ισχύος εκπομπής).

⁷Άλλωστε οι περισσότερες από τις μεθοδολογίες πρόβλεψης που συζητήθηκαν περιλαμβάνονται στη Σύσταση ITU-R P.530, η οποία έχει ως αποκλειστικό αντικείμενο τις επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις υπό συνθήκες LOS.

- Η μείωση του εύρους ζώνης και του ρυθμού μετάδοσης (Περιορισμός: Μείωση της χωρητικότητας του συστήματος).
- Η μείωση των απωλειών του δέκτη και του θορύβου (Περιορισμός: Κόστος και θερμοκρασία).

Οι περιορισμοί που μόλις αναφέρθηκαν καθώς και η έλλειψη λεπτομερών βάσεων δεδομένων κτιρίων, οδήγησε την ITU-R να συμπεριλάβει στη Σύσταση P.1410 ένα στατιστικό μοντέλο για την εκτίμηση της παρεμπόδισης από κτίρια, το οποίο βασίζεται σε τοπογραφικές βάσεις δεδομένων από τη Βόρεια Ευρώπη. Συγκεκριμένα, μέσω της τεχνικής ray tracing υπολογίστηκε η ραδιοκάλυψη συναρτήσει του ύψους των κτιρίων, της παρεμπόδισης από βλάστηση, του ύψους των κεραιών πομπού και δέκτη και του ενδεχομένου εξυπηρέτησης από περισσότερους του ενός BS. Από τις μελέτες αυτές προέκυψαν ορισμένες γενικές παρατηρήσεις ως προς τη ραδιοκάλυψη, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν κατά τη σχεδίαση ενός δικτύου LMDS. Αυτές είναι:

- Η ραδιοκάλυψη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία, ιδιαίτερα αν στην περιοχή υπάρχουν τοπογραφικές ιδιομορφίες ή ασυνήθιστα υψηλός βαθμός παρεμπόδισης από κτίρια. Εξάλλου, από μελέτες σε διάφορες αστικές/προαστιακές τοποθεσίες προέκυψε ποσοστό ραδιοκάλυψης της τάξης του 40-60% για κυψέλες ακτίνας 2Km, όταν η κεραία του πομπού εγκαθίσταται σε ύψος 30m.
- Η κάλυψη αυξάνεται κατά 1-2% για κάθε μέτρο αύξησης του ύψους της κεραίας του BS.
- Η κάλυψη αυξάνεται κατά 3-4% για κάθε μέτρο αύξησης του ύψους της κεραίας του κάθε χρήστη.
- Αρχιτεκτονικές κυψέλης που επιτρέπουν στους δέκτες να επιλέξουν περισσότερους του ενός BS προσφέρουν σημαντική αύξηση της ραδιοκάλυψης. Η τεχνική αυτή, γνωστή ως διαφορική λήψη, θα μελετηθεί εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο. Για παράδειγμα, όταν η κεραία του πομπού τοποθετείται σε ύψος 30m, η κάλυψη κυψελών με ακτίνα 2Km αυξάνει από 44% με ένα μοναδικό BS σε 80% με δύο σταθμούς και σε 90% με τέσσερις.
- Η βαρύτητα των επιπτώσεων της παρεμπόδισης από δένδρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία. Από μελέτη που πραγματοποιήθηκε σε πόλεις του

Ηνωμένου Βασιλείου, έγινε γνωστό ότι το 10-20% του συνόλου των κτιρίων παρεμποδίζεται από δένδρα.

- Η απόσβεση από δένδρα είναι πολύ ισχυρή σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος. Ο ρυθμός απόσβεσης εξαρτάται από το είδος των δένδρων, την υγρασία την οποία κατακρατούν και τη γεωμετρία της ζεύξης αλλά, στη γενική περίπτωση, γίνεται αποδεκτός ένας ρυθμός απόσβεσης 4-5dB/m (βλ. Ενότητα 2.3.2). Εντούτοις, ανεξάρτητα από το μήκος της ζεύξης, η απόσβεση δεν υπερβαίνει κάποια υψηλή τιμή, τυπικά 20-40dB.

Οι ανωτέρω γενικές παρατηρήσεις μπορούν να μεταφραστούν σε συγκεκριμένες προτάσεις για τη βελτίωση της ραδιοκάλυψης σε κυψελωτά δίκτυα LMDS που δεν συνοδεύονται από σημαντικά μειονεκτήματα [Fal03]:

- Αύξηση του ύψους της κεραίας του BS ή/και των SS και βελτιστοποίηση της θέσης του BS εντός της κυψέλης.
- Μείωση της απόστασης μεταξύ γειτονικών κυψελών αυξάνοντας την πυκνότητα των BS στο δίκτυο.
- Χρήση διαφορικής λήψης.
- Χρήση επαναληπτών που ενισχύουν και επανεκπέμπουν τα αδύναμα σήματα και προς τις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης.

Από τη στιγμή όπου διασφαλισθεί ότι ένας χρήστης διαθέτει ζεύξη LOS προς τον BS, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του ποσοστού του χρόνου κατά το οποίο είναι δυνατή η παροχή υπηρεσιών υπό την επίδραση της βροχόπτωσης. Εφόσον η βροχή ως μέσο διάδοσης δεν είναι ομοιόμορφη κατά το οριζόντιο επίπεδο, το μονοδιάστατο μοντέλο της Σύστασης ITU-R P.530 που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 2.2.3 για ζεύξεις PTP δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε ζεύξεις PMP. Για το σκοπό αυτό, κατάλληλη είναι η χρήση του μοντέλου της Σύστασης ITU-R P.1410, στην οποία η έννοια του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης R (βλ. Ενότητα 2.2.3) επεκτείνεται με τον ορισμό του μέσου ρυθμού βροχόπτωσης περιοχής $R_a(p)$ [mm/h] που υπερβαίνεται για $p\%$ του χρόνου. Ενδεικτικές τιμές για την παράμετρο R_a που προήλθαν από μετρήσεις radar διάρκειας δύο ετών στο Ηνωμένο Βασίλειο, καταγράφονται στον Πίνακα 2.2. Αφετηρία για

Πίνακας 2.2: Δεδομένα σημειακού και μέσου ρυθμού βροχόπτωσης περιοχής που προήλθαν από μετρήσεις radar δύο ετών στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Ποσοστό του χρόνου (%)	Σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης (mm/h)	Μέσος ρυθμός βροχόπτωσης περιοχής (mm/h)	
		ακτίνα κυψέλης 2.5Km	ακτίνα κυψέλης 5Km
0.001	65.6	36.0	33.0
0.003	46.2	29.0	23.4
0.01	29.9	19.4	17.1
0.03	18.1	16.3	12.6
0.1	9.8	9.5	8.5
0.3	5.0	4.9	4.8
1	2.0	2.1	2.1

την εκτίμηση της ραδιοκάλυψης παρουσία ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων αποτελεί ο αριθμητικός υπολογισμός της χαρακτηριστικής απόστασης d_0 για $p\%$ του χρόνου μέσω της σχέσης

$$kR_a^a(p)d(1.5 + (1.1(2d^{-0.04} - 2.25)) \log(R_a(p))) + 20 \log(d/D) = F \quad (2.15)$$

Η ανωτέρω σχέση αφορά κυψέλες ακτίνας D που εξυπηρετούνται από ένα BS με ομοιοκατευθυντική κεραία. Η παράμετρος F αντιπροσωπεύει το περιθώριο διαλείψεων του συστήματος, ενώ οι σταθερές k και a συμβολίζουν τους συντελεστές της ειδικής απόσβεσης βροχής γ_R (βλ. Ενότητα 2.2.3). Μετά την εύρεση της χαρακτηριστικής απόστασης d_0 , το ποσοστό ραδιοκάλυψης της κυψέλης υπολογίζεται από τη σχέση

$$C(D, p, F) = 100 \times \left(\frac{d_0}{D} \right)^2 \quad (2.16)$$

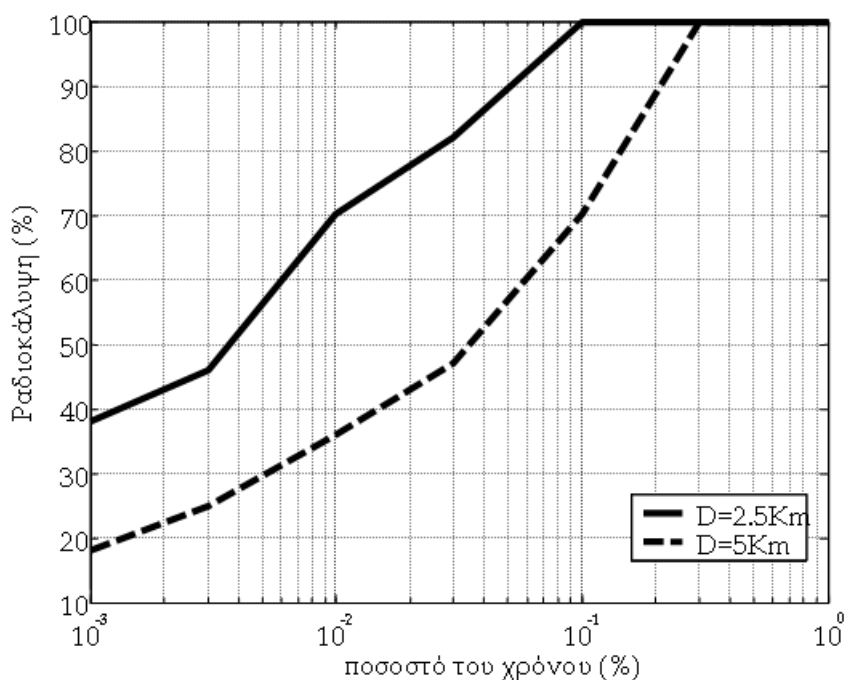
Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προηγούμενης διαδικασίας με χρήση των δεδομένων του Πίνακα 2.2 για δύο κυψέλες ακτίνας 2.5 και 5Km, αντίστοιχα, που χρησιμοποιούν κατακόρυφη πόλωση στα 42GHz με περιθώριο διαλείψεων $F = 10\text{dB}$. Φαίνεται ότι για χαμηλά ποσοστά του χρόνου, οπότε και η απόσβεση λόγω βροχής λαμβάνει σημαντικές τιμές, το ποσοστό ραδιοκάλυψης μειώνεται δραστικά. Καταλήγοντας, στην εργασία τους [Pan03b], οι συγγραφείς προτείνουν μια γενική μέθοδο υπολογισμού του μέσου ρυθμού βροχόπτωσης μιας περιοχής, R_a , από δεδομένα του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης R .

2.5 Στατιστική θεώρηση της απόσβεσης βροχής μέσω φυσικών μοντέλων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η μοντελοποίηση της μακροπρόθεσμης χωρο-χρονικής στατιστικής (long term statistics) της απόσβεσης λόγω βροχής μέσω φυσικών μοντέλων. Η σχετική ανάλυση αποτελεί τη βάση για τις μεθόδους που αναπτύσσονται στα επόμενα κεφάλαια.

2.5.1 Στατική ανάλυση του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης

Η στατιστική του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης που ορίσθηκε στην Ενότητα 2.2.3 καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και τη στατιστική της απόσβεσης λόγω βροχής, αφού ενσωματώνει την εξάρτηση του φαινομένου από τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν εκάστοτε στην περιοχή λειτουργίας του συστήματος. Στην παρούσα ενότητα, η ανάλυση περιορίζεται στις χωρικές ιδιότητες του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης θεωρώντας ότι $R = R(x, y)$ ή, αλλιώς, $R = R(z)$, όπου $z = \sqrt{x^2 + y^2}$ η απόσταση από την



Σχήμα 2.7: Ποσοστό ραδιοκάλυψης συναρτήσει του ποσοστού του χρόνου σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.1410.

αρχή της ζεύξης $(x, y) = (0, 0)$. Στην ανάλυση που ακολουθεί, η εξάρτηση αυτή όπου δεν αναγράφεται θα υπονοείται. Όπως προαναφέρθηκε, ο πλέον αξιόπιστος τρόπος για τον προσδιορισμό της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης είναι μέσω πολυετών μετρήσεων που πραγματοποιούνται είτε με βροχομετρητές (rain gauges) είτε με τη βοήθεια radar. Εναλλακτικά, όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα διεξαγωγής μετρήσεων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι βάσεις δεδομένων από χάρτες βροχής που περιλαμβάνονται στη Σύσταση ITU-R P.837.

Προκειμένου για περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής, είναι γενικά αποδεκτό ότι τα πειραματικά δεδομένα του ρυθμού βροχόπτωσης προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τη λογαριθμοκανονική κατανομή που περιγράφεται μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας

$$p_R(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_r R} \exp \left[- \left(\frac{\ln R - \ln R_m}{\sqrt{2}S_r} \right)^2 \right] \quad (2.17)$$

όπου $\ln R_m$ και S_r η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής $\ln R$. Σημειώνεται ότι η ανωτέρω κατανομή ονομάζεται αδέσμευτη (unconditional), αφού αναφέρεται σε περιόδους βροχόπτωσης και μη, σε αντίθεση με τη λογαριθμοκανονική κατανομή που προτάθηκε αρχικά από τον Lin [Lin75], η οποία δεσμευόταν από το ενδεχόμενο βροχόπτωσης. Για το λόγο αυτό, η αδέσμευτη κατανομή που υιοθετείται από την παρούσα διατριβή ισχύει για ρυθμούς βροχόπτωσης υψηλότερους μιας ελάχιστης τιμής, αφού για πολύ μικρές τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης οδηγεί σε υπερεκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης. Στην πράξη, το γεγονός αυτό δεν μειώνει τη χρησιμότητά της, δεδομένου οι πολύ μικρές τιμές του ρυθμού βροχόπτωσης είναι αδιάφορες κατά τη μελέτη της απόσβεσης. Μια βήμα-προς-βήμα μεθοδολογία για την εξαγωγή των παραμέτρων R_m και S_r από πειραματικές καμπύλες της πιθανότητας υπέρβασης ή από τους χάρτες βροχής της ITU-R προτείνεται από το Παράρτημα Δ'.

Για περιοχές με τροπικό και υποτροπικό κλίμα (Νότια Αμερική, Άπω Ανατολή, Νότια Ασία, Αφρική), τα πειραματικά δεδομένα για το ρυθμό βροχόπτωσης προσεγγίζονται καλύτερα από την κατανομή γάμμα [Mor76] που περιγράφεται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$p_R(R) = \frac{\beta_R^{v_R}}{\Gamma(v_R)} R^{v_R-1} \exp(-\beta_R R) \quad (2.18)$$

Και η κατανομή αυτή είναι αδέσμευτη υπό την έννοια που δόθηκε προηγουμένως. Η συνάρτηση γάμμα $\Gamma(\cdot)$ ορίζεται στο Παράρτημα Β, ενώ οι παράμετροι v_R και β_R υπολο-

γίζονται από πειραματικές καμπύλες της πιθανότητας υπέρβασης με γραφικές μεθόδους [Mor71] ή με αναλυτικό τρόπο, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Δ'.

2.5.2 Ειδική απόσβεση βροχής

Εκτός από την πινακοποιημένη μορφή των συντελεστών της ειδικής απόσβεσης βροχής k , a -βλ. (2.3)- που περιλαμβάνονται στη Σύσταση ITU-R P.838, έχουν προταθεί εναλλακτικές σχέσεις υπολογισμού των k_H, a_H, k_V, a_V , ανάλογα με την κατανομή που υιοθετείται για το σχήμα των σταγόνων της βροχής. Έτσι, σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από εύκρατο κλίμα, η κατανομή Laws-Parsons [Law43] εφαρμόζεται κατάλληλα και, για συχνότητες από 10 έως 30GHz, αποδίδει τις ακόλουθες προσεγγιστικές σχέσεις

$$\begin{cases} k_H = 8.9789 \times 10^{-5} \times f^{2.24060558} \\ k_V = 7.3682 \times 10^{-5} \times f^{2.25740612} \\ a_H = 1.7681577 - 0.2206576 \ln f \\ a_V = 1.61107 - 0.18141203 \ln f \end{cases} \quad (2.19)$$

Για περιοχές του πλανήτη με τροπικό κλίμα, ακριβέστερη θεωρείται η προσέγγιση της σταγόνας βροχής από την κατανομή Ajayi-Olsen [Aja85], η οποία για συχνότητες από 10 έως 30GHz οδηγεί στις ακόλουθες προσεγγιστικές σχέσεις

$$\begin{cases} k_H = 1.93082 \times 10^{-4} \times f^{2.04115} \\ k_V = 1.4435 \times 10^{-4} \times f^{2.08455} \\ a_H = 1.7071 - 0.20769 \ln f \\ a_V = 1.6248 - 0.1898 \ln f \end{cases} \quad (2.20)$$

Για τον τελικό προσδιορισμό των σταθερών k και a , αντικαθίστανται οι τιμές που προκύπτουν από τις (2.19) και (2.20) στις (2.4) και (2.5).

2.5.3 Στατική ανάλυση της απόσβεσης λόγω βροχής

Ας θεωρηθεί επίγεια ζεύξη μήκους L , για την οποία επιθυμείται ο προσδιορισμός της στατιστικής της απόσβεσης λόγω βροχής A . Σε αντίθεση με το εμπειρικό μοντέλο της Σύστασης P.530, η υιοθέτηση ενός φυσικού μοντέλου συνεπάγεται ότι η απόσβεση λόγω βροχής A εκφράζεται ως το ολοκλήρωμα της ειδικής απόσβεσης γ_R κατά μήκος της ζεύξης λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική ανομοιογένεια του μέσου

$$A = \int_0^L \gamma_R(z) dz = \int_0^L k[R(z)]^a dz \quad (2.21)$$

Από το σημείο αυτό, ο υπολογισμός της κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής διαφοροποιείται για κάθε φυσικό μοντέλο, ανάλογα με τις υποκείμενες φυσικές υποθέσεις που αφορούν τη χωρική δομή της βροχής. Στην παρούσα διατριβή, στη γενική περίπτωση, υιοθετείται το λογαριθμοκανονικό μοντέλο [Lin75], [Kan90] που αφορά περιοχές με εύκρατο κλίμα. Σε κάποιες ειδικές περιπτώσεις υιοθετείται το μοντέλο της κατανομής γάμμα [Mor76], [Kou90] που αφορά τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Οι λεπτομέρειες των δύο φυσικών μοντέλων αναλύονται διεξοδικά στις επόμενες παραγράφους. Για λόγους πληρότητας, αξίζει να αναφερθεί από τη διεθνή βιβλιογραφία και το φυσικό μοντέλο EXCELL, το οποίο έχει τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να εφαρμόζεται σε δίκτυα LMDS [Par02].

Το Λογαριθμοκανονικό Μοντέλο – Σύμφωνα με το λογαριθμοκανονικό μοντέλο, οι τυχαίες μεταβλητές (τ.μ.) τόσο του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης R όσο και της απόσβεσης λόγω βροχής A προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Η πυκνότητα πιθανότητας της τ.μ. R έχει ήδη δοθεί από την (2.17), ενώ για την τ.μ. A ισχύει αντίστοιχα

$$p_A(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_a A} \exp \left[- \left(\frac{\ln A - \ln A_m}{\sqrt{2}S_a} \right)^2 \right] \quad (2.22)$$

Σκοπός της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός των στατιστικών παραμέτρων A_m και S_a της κατανομής της απόσβεσης για την υπό μελέτη επίγεια ζεύξη. Προς την κατεύθυνση αυτή, για τη μέση τιμή της τ.μ. A ισχύει⁸

$$\mu_a = E[A] = \int_0^L k E[(R(z))^a] dz = k E[R^a] L \quad (2.23)$$

Για τη διακύμανση της τ.μ. A ισχύει

$$\begin{aligned} \sigma_a^2 &= E[A^2] - \mu_a^2 = E \left[\int_0^L k [R(z)]^a dz \int_0^L k [R(z')]^a dz' \right] = \\ &= \int_0^L \int_0^L k^2 E[(R(z))^a (R(z'))^a] dz dz' - \mu_a^2 \end{aligned} \quad (2.24)$$

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

$$\rho_0(|z - z'|) = \frac{E[(R(z))^a (R(z'))^a] - E^2[R^a]}{E[(R^a)^2] - E^2[R^a]} \quad (2.25)$$

⁸Ο τελεστής $E[X]$ δηλώνει τη μέση τιμή της τ.μ. X με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $p_X(\cdot)$. Ορίζεται μέσω της σχέσης $E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} X p_X(X) dX$.

Με βάση τις (2.23)-(2.25), η έκφραση για τη διακύμανση σ_a^2 γίνεται

$$\sigma_a^2 = k^2 \{E[R^{2a}] - E^2[R^a]\} \int_0^L \int_0^L \rho_0(|z - z'|) dz dz' \quad (2.26)$$

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

$$E[R^a] = \exp \left[aR_m + \frac{a^2 S_r^2}{2} \right] \quad (2.27)$$

$$E[R^{2a}] = \exp [2aR_m + 2a^2 S_r^2] \quad (2.28)$$

Αντικατάσταση των (2.27) και (2.28) στις (2.23) και (2.26), αντίστοιχα, συνεπάγεται

$$\mu_a = k \exp \left[aR_m + \frac{a^2 S_r^2}{2} \right] L \quad (2.29)$$

$$\sigma_a^2 = k^2 \exp [2aR_m + a^2 S_r^2] [\exp(a^2 S_r^2) - 1] \int_0^L \int_0^L \rho_0(|z - z'|) dz dz' \quad (2.30)$$

Από την (2.30) είναι φανερό ότι, για τον υπολογισμό της σ_a^2 είναι απαραίτητη η έκφραση του σημειακού συντελεστή αυτοσυσχέτισης της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής ρ_0 . Μια τέτοια ημιεμπειρική έκφραση έχει προταθεί από τον Lin [Lin75] και έχει αποδειχθεί ότι προσεγγίζει με επιτυχία τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα σε περιοχές της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Η έκφραση αυτή είναι

$$\rho_0(\Delta z = |z - z'|) = \frac{G}{\sqrt{G^2 + \Delta z^2}} \quad (2.31)$$

όπου η σταθερά G ορίζεται μέσω της εξίσωσης

$$\rho_0(G) = \sqrt{2}/2$$

και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Ένας απλός τρόπος υπολογισμού του G παρέχεται από την έκφραση

$$G = \begin{cases} 1 & |\Lambda| \leq 23^\circ \\ 1.5 & 23^\circ < |\Lambda| \leq 50^\circ \\ 1.75 & |\Lambda| > 50^\circ \end{cases} \quad (2.32)$$

όπου $|\Lambda|$ η απόλυτη τιμή του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής. Πλέον, είναι δυνατός ο αναλυτικός υπολογισμός του διπλού ολοκληρώματος της (2.30)

$$H = \int_0^L \int_0^L \rho_0(|z - z'|) dz dz' \quad (2.33)$$

με τον τρόπο που υποδεικνύεται από το Παράρτημα Γ'. Το τελικό αποτέλεσμα είναι

$$H = 2LG \sinh^{-1} \left(\frac{L}{G} \right) + 2G^2 \left(1 - \sqrt{\left(\frac{L}{G} \right)^2 + 1} \right) \quad (2.34)$$

Έτσι, με αντικατάσταση των (2.29) και (2.30) στις (Α'.3) και (Α'.4) του Παραρτήματος Α' προκύπτουν οι επιθυμητές στατιστικές παράμετροι της κατανομής της απόσβεσης A

$$S_a^2 = \ln \left[1 + [\exp(a^2 S_r^2) - 1] \frac{H_1}{L^2} \right] \quad (2.35)$$

$$A_m = \ln \left[k \exp(a R_m) \exp \left(\frac{a^2 S_r^2 - S_a^2}{2} \right) L \right] \quad (2.36)$$

Τέλος, ο υπολογισμός της πιθανότητας υπέρβασης οποιασδήποτε τιμής περιθωρίου διαλείψεων F [dB] πραγματοποιείται μέσω της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής

$$\Pr\{A > F\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln F - \ln A_m}{\sqrt{2} S_a} \right] \quad (2.37)$$

όπου $\operatorname{erfc}(\cdot)$ η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος (complementary error function), όπως αυτή ορίζεται στο Παράρτημα Α'.

Το Μοντέλο Κατανομής Γάμμα – Το μοντέλο αυτό έχει βασισθεί στις αρχικές εργασίες των Morita και Higuti [Mor76] και συνίσταται στην προσέγγιση του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης R καθώς και της απόσβεσης λόγω βροχής A από την κατανομή γάμμα για περιοχές της Ιαπωνίας αλλά και, γενικότερα, για τροπικές και υποτροπικές περιοχές. Η έκφραση της πυκνότητας πιθανότητας της τ.μ. R έχει ήδη δοθεί από την (2.18), ενώ για την τ.μ. A ισχύει αντίστοιχα

$$p_A(A) = \frac{\beta_A^{v_A}}{\Gamma(v_A)} A^{v_A-1} \exp(-\beta_A A) \quad (2.38)$$

Η διαδικασία υπολογισμού των στατιστικών παραμέτρων v_A και β_A είναι ανάλογη με αυτήν που ακολουθήθηκε για το λογαριθμοκανονικό μοντέλο, με τη βασική διαφορά της υιοθέτησης ενός σημειακού συντελεστή συσχέτισης της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής με διαφορετική μορφή σε σχέση με πριν. Συγκεκριμένα, η έκφραση που έχει υιοθετηθεί από το [Mor76] είναι

$$\rho_0(\Delta z = |z - z'|) = \exp \left[-c \sqrt{\Delta z} \right] \quad (2.39)$$

όπου c σταθερά που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.2 και $0.3 \text{Km}^{-1/2}$. Συνεπώς, το αντίστοιχο διπλό ολοκλήρωμα της (2.33) υπολογίζεται αναλυτικά. Σύμφωνα με το Παράρτημα Γ', το τελικό αποτέλεσμα είναι

$$H = 4 \frac{c^2 L - 6 + 2(3 + 3c\sqrt{L} + c^2 L) \exp(-c\sqrt{L})}{c^4} \quad (2.40)$$

Έχοντας διαθέσιμο τον παράγοντα H μπορεί κανείς να υπολογίσει τη μέση τιμή μ_a και την τυπική απόκλιση σ_a της απόσβεσης A από τις (2.23) και (2.26). Με χρήση της (B'.3) του Παραρτήματος Β' για $n = a$ και $n = 2a$ προκύπτει, αντίστοιχα

$$E[R^a] = \frac{\Gamma(v_R + a)}{\beta_R^a \Gamma(v_R)} \quad (2.41)$$

$$E[R^{2a}] = \frac{\Gamma(v_R + 2a)}{\beta_R^{2a} \Gamma(v_R)} \quad (2.42)$$

όπου v_R και β_R είναι οι αντίστοιχες παράμετροι του ρυθμού βροχόπτωσης. Αντικατάσταση των δύο τελευταίων σχέσεων στις (2.40) και (2.41) δίδει

$$\mu_a = k \frac{\Gamma(v_R + a)}{\beta_R^a \Gamma(v_R)} L \quad (2.43)$$

$$\sigma_a^2 = \frac{k^2 H_1}{\beta_R^{2a} \Gamma(v_R)} [\Gamma(v_R) \Gamma(v_R + 2a) - \Gamma^2(v_R + a)] \quad (2.44)$$

Αν πλέον, αντικατασταθούν οι (2.44) και (2.45) στις (B'.4) και (B'.5) του Παραρτήματος Β', προκύπτουν οι προς υπολογισμό στατιστικές παράμετροι

$$v_A = \frac{L^2}{H_1} \frac{\Gamma^2(v_R + a)}{\Gamma(v_R) \Gamma(v_R + 2a) - \Gamma^2(v_R + a)} \quad (2.45)$$

$$\beta_A = \frac{\beta_R^a L}{k H_1} \frac{\Gamma(v_R) \Gamma(v_R + a)}{\Gamma(v_R) \Gamma(v_R + 2a) - \Gamma^2(v_R + a)} \quad (2.46)$$

Τέλος, ο υπολογισμός της πιθανότητας υπέρβασης οποιασδήποτε τιμής περιθωρίου διαλείψεων F [dB] πραγματοποιείται μέσω της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής

$$\Pr\{A > F\} = 1 - \frac{\gamma(v_A, \beta_A F)}{\Gamma(v_A)} \quad (2.47)$$

όπου $\gamma(\cdot)$ η ατελής συνάρτηση γάμμα (incomplete gamma function), όπως αυτή ορίζεται στο Παράρτημα Β'.

2.5.4 Δυναμική ανάλυση του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης

Στην παρούσα ενότητα, ο ορισμός του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης επεκτείνεται ώστε να περιλάβει τη δυναμική ανάλυση του φαινομένου. Προς τούτο, ορίζεται η στοχαστική διαδικασία $R(x, y, t)$ ή, αλλιώς, $R(z, t)$ ως ο σημειακός ρυθμός βροχόπτωσης τη χρονική στιγμή t σε απόσταση z από την αρχή της ζεύξης. Η ανάλυση βασίζεται στο στοχαστικό δυναμικό μοντέλο των Maseng-Bakken [Mas81] και προαπαιτεί για

την εφαρμογή του τρεις παραμέτρους: τη δυναμική παράμετρο $d_R[\text{s}^{-1}]$ που περιγράφει τη χρονική μεταβολή του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης καθώς και τις στατικές παραμέτρους R_m, S_r της λογαριθμοκανονικής κατανομής του R –βλ. (2.17)–. Εξάλλου, η συνάρτηση συνδιακύμανσης της διαδικασίας $R(z, t)$ σε συγκεκριμένο σημείο της ζεύξης εκφράζεται υπό τη μορφή [Pan03a]

$$\begin{aligned} B_R(\tau) &= E[R(t_1)R(t_2)] - E^2[R(t)] = \\ &= R_m^2 \exp(S_r^2) \{ \exp(S_r^2 \exp(-d_R|\tau|)) - 1 \} \end{aligned} \quad (2.48)$$

όπου $\tau = t_1 - t_2$. Εφαρμόζοντας τις γνωστές εξισώσεις Wiener-Khinchine και μετά από πολύπλοκη άλγεβρα, υπολογίζεται το χρονικό φάσμα συνδιακύμανσης της διαδικασίας $R(t)$ σε συγκεκριμένο σημείο της ζεύξης

$$\begin{aligned} S_R(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B_R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \\ &= \frac{R_m^2 \exp(S_r^2)}{d_R \pi} \exp\left(-\pi \frac{\omega}{d_R}\right) \operatorname{Re} \left\{ |S_r^2|^{j\omega/d_R} \left[\Gamma\left(-\frac{j\omega}{d_R}\right) - \gamma\left(-\frac{j\omega}{d_R}, -S_r^2\right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.49)$$

όπου $\Gamma(x)$ και $\gamma(a, x)$ η συνάρτηση γάμμα και η ατελής συνάρτηση γάμμα, αντίστοιχα. Πραγματοποιώντας μια ασυμπτωτική ανάλυση [Abr65], η έκφραση για το φάσμα του ρυθμού βροχόπτωσης έρχεται σε απλούστερη μορφή για χαμηλές και υψηλές συχνότητες, αντίστοιχα [Pan03a]

$$S_R(\omega) = \begin{cases} a_0 + a_1\omega^2 + a_2\omega^4 & \text{για χαμηλές τιμές του } \omega \\ c/\omega^2 & \text{για υψηλές τιμές του } \omega \end{cases} \quad (2.50)$$

όπου

$$a_0 = \frac{R_m^2 \exp(S_r^2)}{d_R \pi} \{ E_i(S_r^2) - \ln(S_r^2) - \gamma \} \quad (2.51)$$

$$a_1 = -\frac{R_m^2 S_r^2 \exp(S_r^2)}{d_R^3 \pi} {}_4F_4\{[1, 1, 1, 1]; [2, 2, 2, 2]; S_r^2\} \quad (2.52)$$

$$a_2 = -\frac{R_m^2 S_r^2 \exp(S_r^2)}{d_R^5 \pi} {}_6F_6\{[1, 1, 1, 1, 1, 1]; [2, 2, 2, 2, 2, 2]; S_r^2\} \quad (2.53)$$

και

$$c = \frac{R_m^2 S_r^2 \exp(2S_r^2) d_R}{\pi} \quad (2.54)$$

Στις (2.51)-(2.54), $\gamma \simeq 0.577216$ είναι η σταθερά Euler-Mascheroni, $E_i(x)$ η εκθετική ολοκληρωτική συνάρτηση και

$${}_4F_4\{[k_1, k_2, k_3, k_4]; [l_1, l_2, l_3, l_4]; x\}, {}_6F_6\{[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6]; [l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6]; x\}$$

οι γενικευμένες υπεργεωμετρικές συναρτήσεις [Dwo90]. Οι επιμέρους πράξεις καθώς και οι λεπτομέρειες της ασυμπτωτικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε παρουσιάζονται στο σύνολό τους στην παραπομπή [Pan02b].

2.5.5 Δυναμική ανάλυση της απόσβεσης λόγω βροχής

Για τη δυναμική ανάλυση της απόσβεσης λόγω βροχής, η (2.21) τροποποιείται κατάλληλα ώστε να εκφράζει τη συνολική απόσβεση σε μια ζεύξη μήκους L τη χρονική στιγμή t

$$A(t) = \int_0^L \gamma_R(z, t) dz = \int_0^L k[R(z, t)]^a dz \quad (2.55)$$

όπου $\gamma_R(z, t)$ η χωροχρονική διαδικασία της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής. Δεδομένου ότι $a \simeq 1$, η συνάρτηση συνδιακύμανσης της $A(t)$ γράφεται

$$B_A(\tau) = k^2 \int_0^L \int_0^L B_R(|z_1 - z_2|, \tau) dz_1 dz_2 = k^2 \int_0^L \int_0^L B_R(\Delta z, \tau) dz_1 dz_2 \quad (2.56)$$

όπου $B_R(\Delta z, \tau)$ η συνάρτηση συνδιακύμανσης του ρυθμού βροχόπτωσης εκφρασμένη ως χωροχρονική διαδικασία, υποθέτοντας ότι είναι χωρικά ιστροπική και στάσιμη. Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις Wiener-Khinchine και στα δύο μέλη της (2.56), προκύπτει το χρονικό φάσμα συνδιακύμανσης της διαδικασίας $A(t)$

$$S_A(\omega) = k^2 \int_0^L \int_0^L C_R(\Delta z, \omega) dz_1 dz_2 \quad (2.57)$$

όπου $C_R(\Delta z, \omega)$ η χωροσυχνοτική φασματική πυκνότητα. Η τελευταία ορίζεται μέσω της σχέσης

$$C_R(\Delta z, \omega) = S_R(\omega) \rho(\omega, \Delta z) \quad (2.58)$$

όπου $\rho(\omega, \Delta z)$ η σύνθετη χωροσυχνοτική συνάρτηση συσχέτισης που καθορίζει το βαθμό της χωρικής συσχέτισης ημιτονοειδών συνιστωσών της χωροχρονικής διαδικασίας $R(z, t)$. Η καθαρά χωρική συνάρτηση συσχέτισης $\rho(\Delta z)$ υπολογίζεται από τη σχέση

$$\rho(\Delta z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\rho(\omega, \Delta z) S_R(\omega)}{\sigma_R^2} d\omega \quad (2.59)$$

όπου

$$\sigma_R^2 = R_m^2 \exp(S_r^2) [\exp(S_r^2) - 1] \quad (2.60)$$

Κατά την ανωτέρω ανάλυση έχει θεωρηθεί η γενική περίπτωση υποθέτοντας ότι ο σύνθετος χωροσυχνοτικός συντελεστής συσχέτισης $\rho(\omega, \Delta z)$ εξαρτάται τόσο από τη συχνότητα ω όσο και από τη χωρική διαφορά Δz .

Επαναλαμβάνοντας την ασυμπτωτική ανάλυση για την περίπτωση της χωροσυχνοτικής φασματικής πυκνότητας $C_R(\Delta z, \omega)$, προκύπτει η επόμενη σχέση για χαμηλές και υψηλές τιμές της συχνότητας, αντίστοιχα [Pan03a]

$$C_R(\Delta z, \omega) = \begin{cases} (a_0 + a_1\omega^2 + a_2\omega^4)\rho(\Delta z) \exp\left(\frac{a_0\omega + a_1\omega^3/3 + a_2\omega^5/5}{\sigma_R^2}\right) & \text{για χαμηλές τιμές του } \omega \\ \frac{c}{\omega^2}\rho(\Delta z) \exp\left(-\frac{c}{\sigma_R^2\omega}\right) & \text{για υψηλές τιμές του } \omega \end{cases} \quad (2.61)$$

Εφαρμόζοντας τις (2.57)-(2.61) και μετατρέποντας το χρονικό φάσμα συνδιακύμανσης σε φασματική πυκνότητα ισχύος [Pap02], προκύπτει η τελική έκφραση

$$P_A(\omega) = \begin{cases} k^2 H \left[(a_0 + a_1\omega^2 + a_2\omega^4) \exp\left(\frac{a_0\omega + a_1\omega^3/3 + a_2\omega^5/5}{\sigma_R^2}\right) + R_m^2 / (2\pi) \exp(2S_r^2) \delta(\omega) \right] & \text{για χαμηλές τιμές του } \omega \\ \frac{c}{\omega^2} \rho(\Delta z) \exp\left(-\frac{c}{\sigma_R^2\omega}\right) & \text{για υψηλές τιμές του } \omega \end{cases} \quad (2.62)$$

όπου η παράμετρος H της χωρικής δομής του μέσου βροχόπτωσης υπολογίζεται από την (2.34) και $\delta(\omega)$ η συνάρτηση Dirac. Οι επιμέρους πράξεις καθώς και οι λεπτομέρειες της ασυμπτωτικής ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε παρουσιάζονται στο σύνολό τους στην παραπομπή [Pan02b].

Κεφάλαιο 3

Τεχνικές Αντιμετώπισης των Διαλείψεων

3.1 Γενικά

Η ελκυστικότητα των σταθερών δικτύων BWA που λειτουργούν στις συχνότητες 10-66GHz οφείλεται στο γεγονός ότι προσφέρουν σημαντικά εύρη ζώνης, τα οποία δίδουν στους χρήστες τη δυνατότητα μετάδοσης σε υψηλούς ρυθμούς. Ωστόσο, η λειτουργία των συστημάτων LMDS σε υψηλές συχνότητες γίνεται με αντίτιμο την υποβάθμιση της ποιότητας μετάδοσης από ένα πλήθος ατμοσφαιρικών μηχανισμών διάδοσης, όπως αυτοί αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Κατά συνέπεια, η συμμόρφωση με τις προδιαγραφές διαθεσιμότητας (availability) καθίσταται δυσκολότερη. Η διαθεσιμότητα ορίζεται ως το ποσοστό του χρόνου για το οποίο ο λόγος λανθασμένων ψηφίων BER (Bit Error Ratio)¹ είναι χαμηλότερος από ένα προαπαιτούμενο κατώφλιο και αποτελεί συμπληρωματική κατάσταση σε σχέση με τη διακοπή της λειτουργίας. Η διαθεσιμότητα αποτελεί τον κύριο παράγοντα εκτίμησης της QoS στο επίπεδο του φυσικού στρώματος.

Τα περισσότερα ατμοσφαιρικά φαινόμενα διάδοσης που συζητήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο εμφανίζουν στοχαστική συμπεριφορά στα πεδία του χώρου και του χρόνου και, επομένως, διαφέρουν από τους ντετερμινιστικούς παράγοντες που επηρεάζουν μια μικροκυματική ζεύξη υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (όπως, για παράδειγμα, οι απώλειες ελεύθερου χώρου). Εφόσον σε αυτές τις πολύ υψηλές συχνότητες λει-

¹Ο λόγος του αριθμού λανθασμένων ψηφίων πληροφορίας προς το συνολικό αριθμό ψηφίων που λαμβάνονται σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

τουργίας, οι τυχαίοι παράγοντες υποβάθμισης του σήματος αποκτούν μεγάλη βαρύτητα για μικρά ποσοστά του χρόνου στη διάρκεια του έτους, το κέρδος του συστήματος (system gain) πρέπει να ισχυροποιείται περαιτέρω μέσω της επιπλέον αύξησης της τιμής του. Παράλληλα, η λειτουργία υπό σταθερό περιθώριο διαλείψεων μεγάλης τιμής κρίνεται ως μη αποδοτική ή και ως τεχνολογικά ανέφικτη λύση.

Για τη μετρίαση των δυσμενών φαινομένων διάδοσης και, ιδιαίτερα, των διαλείψεων λόγω βροχής, έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές αντιμετώπισης των διαλείψεων (Fade Mitigation Techniques, FMT) ή, άλλως, *αντίμετρα κατά των διαλείψεων* (Fade Counter-Measures, FCM). Οι τεχνικές αυτές επιτρέπουν όχι μόνο τη συμμόρφωση με τις προδιαγραφές διαθεσιμότητας του συστήματος υπό πρακτικά εφικτές τιμές του περιθωρίου διαλείψεων, αλλά και τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης όταν επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες στο δίκτυο, χωρίς να σπαταλώνται κρίσιμοι πόροι του συστήματος (ισχύς, εύρος ζώνης). Μάλιστα, οι τεχνικές FMT έχουν γνωρίσει την τελευταία δεκαετία μεγάλη ανάπτυξη στα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών [Cas98], [Pan04], με αποτέλεσμα να έχουν ενσωματωθεί στα αντίστοιχα πρότυπα, όπως το σύγχρονο πρότυπο DVB-S2 [ETSI03]. Ταυτόχρονα, όπως ανέδειξε το Κεφάλαιο 1, οι τεχνικές FMT αποτελούν τη σημαντικότερη καινοτομία που έχει εισαχθεί στα νέα πρότυπα για τα δίκτυα BWA IEEE 802.16 WirelessMAN [IEEE04] και ETSI BRAN HIPERACCESS [HIP02].

Οι τεχνικές αντιμετώπισης των διαλείψεων διακρίνονται σε τρεις γενικές κατηγορίες [COST255]:

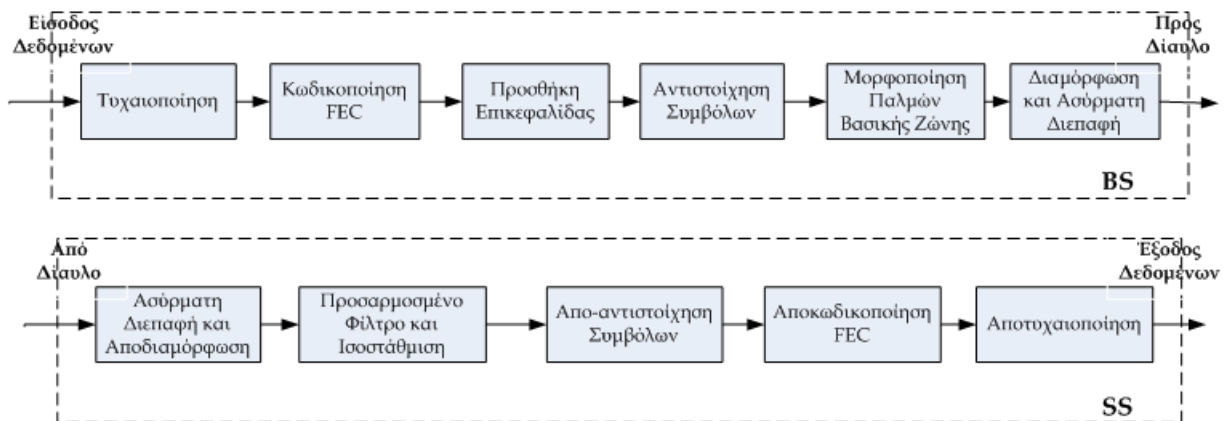
- (α) Έλεγχος της ισχύος (Power Control)
- (β) Προσαρμοστικές τεχνικές επεξεργασίας του σήματος (Adaptive Signal Processing FMT)
- (γ) Διαφορική προστασία (Diversity Protection)

Ο έλεγχος της ισχύος και οι τεχνικές επεξεργασίας του σήματος χαρακτηρίζονται από την από κοινού χρήση ανεκμετάλλευτων πόρων του συστήματος (shared resource), ενώ η διαφορική προστασία συνεπάγεται την επαναδρομολόγηση (re-routing) του σήματος. Η από κοινού χρήση των ανεκμετάλλευτων πόρων αποσκοπεί στην αντιμετώπιση των διαλείψεων που επηρεάζουν μια συγκεκριμένη ζεύξη, ώστε να διατηρείται ή ακόμα και να βελτιώνεται η επίδοσή της. Αντίθετα, τα σχήματα διαφορικής προστασίας

διατηρούν την ποιότητα της ζεύξης εντός των προδιαγραφών προσφέροντας εναλλακτικούς διαύλους μετάδοσης. Καθεμία από τις προηγούμενες κατηγορίες FMT αναλύεται διεξοδικά στο παρόν κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, στην Ενότητα 3.2 συζητούνται οι μέθοδοι ελέγχου της ισχύος σε ένα κυψελωτό δίκτυο BWA, στην Ενότητα 3.3 παρουσιάζονται οι εναλλακτικοί τρόποι επεξεργασίας του σήματος για τη βελτιστοποίηση της μετάδοσης και στην Ενότητα 3.4 δίδεται έμφαση στην τεχνική της διαφορικής λήψης που αποτελεί τμήμα της συνεισφοράς της παρούσας διατριβής. Λόγω της ένδειας συναφών ερευνητικών εργασιών για επίγεια μικροκυματικά συστήματα πρόσβασης, κατά την πορεία της ανάλυσης δίδονται αναφορές και σε εργασίες της διεθνούς βιβλιογραφίας που αφορούν δορυφορικά συστήματα. Το απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα μετάδοσης για τη ζεύξη downstream, στο οποίο θα βασισθεί η περιγραφή των τεχνικών FMT, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.

Παρά τις διαφορές τους, καθεμία από τις τεχνικές FMT οφείλει να εκτελεί περιοδικά τις επόμενες κοινές λειτουργίες [Mal02]:

1. Παρακολούθηση της ποιότητας της ζεύξης πραγματοποιώντας μετρήσεις των κρίσιμων παραμέτρων του διαύλου.
2. Βραχυπρόθεσμη εκτίμηση της συμπεριφοράς και της διάρκειας της επόμενης κατάστασης του διαύλου.
3. Ρύθμιση των παραμέτρων του συστήματος με βάση την προηγούμενη βραχυπρόθεσμη εκτίμηση.



Σχήμα 3.1: Λειτουργικό διάγραμμα αλυσίδας μετάδοσης από το σταθμό βάσης BS προς το συνδρομητή SS για τη ζεύξη downstream.

Η μεγαλύτερη δυσκολία που αντιμετωπίζεται κατά την προηγούμενη επαναληπτική διαδικασία είναι η ακριβής ανίχνευση και πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο της δυναμικής συμπεριφοράς του διαύλου. Οι εναλλακτικοί τρόποι ανίχνευσης που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία έχουν ως κύριο πεδίο εφαρμογής το δορυφορικό δίαυλο, όπου η ανίχνευση επιβαρύνεται περαιτέρω από την καθυστέρηση διάδοσης που εισάγει η τεράστια απόσταση Γης – γεωστατικής τροχιάς (περίπου 36 000Km).

Τα σχήματα ανίχνευσης διακρίνονται σε [COST255]: ανοικτού βρόχου (open loop) [Dis97], κλειστού βρόχου (closed loop) [Ega82] και υβριδικού βρόχου (hybrid loop). Τα συστήματα ανοικτού βρόχου βασίζονται στην εκτίμηση της εξασθένησης στη ζεύξη upstream μέσω μετρήσεων που πραγματοποιούνται από το συνδρομητή SS. Σε αυτή την περίπτωση, η ενσωμάτωση μετεωρολογικών και ραδιομετρικών σχημάτων ανίχνευσης στα τερματικά είναι δύσκολη λόγω υψηλού κόστους. Από την άλλη πλευρά, οι μετρήσεις μέσω βροχομετρητών δεν προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια καθώς δεν παρέχουν πληροφορία για την κατανομή του ρυθμού βροχόπτωσης σε ολόκληρο το μήκος της ζεύξης, αλλά μόνο στο σημείο όπου τοποθετούνται.

Στα συστήματα κλειστού βρόχου, η εκτίμηση της εξασθένησης στη ζεύξη upstream από τον SS πραγματοποιείται μέσω μετρήσεων της συνολικής επίδοσης της ζεύξης (upstream και downstream). Η μέθοδος βασίζεται σε μια επαναληπτική διαδικασία, όπου σε κάθε βήμα μετράται από τον SS είτε το μέγεθος BER είτε ο σηματοθορυβικός λόγος. Το αποτέλεσμα της συγκεκριμένης μέτρησης συγκρίνεται με κάποιο κατώφλιο που αντιπροσωπεύει την απαιτούμενη επίδοση ώστε η ζεύξη να λειτουργεί απρόσκοπτα. Ενδεχόμενη υπέρβαση του κατωφλίου μεταφράζεται σε ενεργοποίηση κάποιας από τις εναλλακτικές διαδικασίες FMT. Με βάση την αρχή του κλειστού βρόχου, είναι απαραίτητη η διάκριση μεταξύ της συνεισφοράς της ζεύξης upstream και της ζεύξης downstream στη συνολική απόσβεση. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι οι μετρήσεις υπόκεινται σε κάποιου είδους διαδικασία αναγωγής συχνότητας (frequency scaling).

Σκοπός της ανίχνευσης μέσω υβριδικού βρόχου είναι ο συνδυασμός δύο ειδών μετρήσεων ώστε να αποφεύγεται η χρήση αλγορίθμων αναγωγής συχνότητας. Σε κάθε σταθμό συνδρομητή πραγματοποιούνται ταυτόχρονα μετρήσεις της επίδοσης τόσο της συνολικής ζεύξης όσο και της ζεύξης downstream. Υπολογίζεται, έτσι, η απόσβεση στη ζεύξη upstream. Καίτοι το σχήμα υβριδικού βρόχου χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη ακρίβεια, στα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών εμφανίζει το μειονέ-

κτημα της αυξημένης καθυστέρησης που εισάγεται από τη στιγμή διεξαγωγής της μέτρησης μέχρι την ενεργοποίηση του κατάλληλου αντίμετρου διαλείψεων. Ωστόσο, στα επίγεια συστήματα, όπου οι αποστάσεις πομπού και δέκτη είναι της τάξης των μερικών χιλιομέτρων, τα συστήματα υβριδικού βρόχου μπορούν να αποτελέσουν μια ιδιαίτερος αξιόπιστη λύση.

Στην πράξη, ως προς την επιλογή του μεγέθους που μετράται από το σύστημα με σκοπό την εκτίμηση της ποιότητας του διαύλου, δύο τύποι μετρήσεων είναι δυνατοί: Μετρήσεις σηματοθορυβικού λόγου ή μετρήσεις του λόγου BER. Στη δεύτερη περίπτωση, είναι απαραίτητο να εμφανίζεται επαρκής αριθμός λαθών στο δίαυλο προκειμένου να προκύψει ακριβής τιμή του BER και, επομένως, να είναι δυνατή η εξαγωγή κάποιου συμπεράσματος για τη στάθμη της διάλειψης. Αναμένονται, λοιπόν, επιπλέον καθυστερήσεις πριν από την εφαρμογή του κατάλληλου αντίμετρου διαλείψεων, οι οποίες αυξάνουν καθώς μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης. Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια ευνοϊκών συνθηκών διάδοσης οπότε και ικανοποιούνται τα όρια του περιθωρίου διαλείψεων, η τιμή του BER αναμένεται να είναι εξαιρετικά χαμηλή (της τάξης του 10^{-7} έως 10^{-9}) οδηγώντας σε αδυναμία αξιόπιστης μέτρησης του μεγέθους σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη πλευρά, όταν οι συνθήκες διάδοσης οδηγούν στην υπέρβαση του περιθωρίου διαλείψεων, ο λόγος BER αυξάνεται ταχέως. Σε αυτή την περίπτωση, ο χρόνος που διατίθεται για την έγκαιρη ενεργοποίηση της κατάλληλης τεχνικής FMT είναι ελάχιστος.

Από την προηγούμενη συζήτηση γίνεται σαφές ότι για την ανίχνευση της στάθμης διαλείψεων καταλληλότερη θεωρείται η χρήση μεγεθών σηματοθορυβικού λόγου. Μάλιστα, στο πρότυπο [IEEE04] προτείνεται μια γενική μεθοδολογία μέτρησης του λόγου σήματος - προς - θόρυβο και παρεμβολή CNIR. Συγκεκριμένα, με βάση τη διαδικασία αυτή ο σταθμός SS πραγματοποιεί μετρήσεις του CNIR και ενημερώνει τον BS μέσω μηνυμάτων αναφοράς. Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των στατιστικών CNIR που συλλέγονται από τις μετρήσεις αναφέρονται σε dB. Για την προετοιμασία τέτοιων μηνυμάτων αναφοράς, οι στατιστικές ιδιότητες των μετρήσεων κβαντοποιούνται σε βήματα του 1dB στο εύρος από -20dB έως 37dB. Τιμές που βρίσκονται εκτός του εύρους αυτού λαμβάνουν την τιμή του πλησιέστερου άκρου.

Ο τρόπος υλοποίησης της εκτίμησης του CNIR ενός μηνύματος δεδομένων που αποτελείται από N σύμβολα αφήνεται στον κάθε πάροχο, με την υποχρέωση η σχετική

και απόλυτη ακρίβεια της μέτρησης κάθε μηνύματος να είναι $\pm 1\text{dB}$ και $\pm 2\text{dB}$, αντίστοιχα. Ένας πιθανός τρόπος εκτίμησης του CNIR ενός μηνύματος συμβόλων είναι μέσω της κανονικοποίησης ως προς τη μέση ισχύ του σήματος του μέσου τετραγωνικού υπολειπόμενου λάθους (mean residual error) των συμβόλων δεδομένων (ή/και των πιλοτικών συμβόλων) που έχουν μεταδοθεί χρησιμοποιώντας τη σχέση

$$CNIR[k] = \frac{A[k]}{E[k]} \quad (3.1)$$

όπου $CNIR[k]$ το CNIR του μηνύματος k . Ορίζοντας με $r[k, n]$ το λαμβανόμενο σύμβολο n του μηνύματος k και με $s[k, n]$ το αντίστοιχο σύμβολο δεδομένων ή το πιλοτικό σύμβολο που έχει, ο αριθμητής της (3.1) κατά τη διάρκεια ενός μηνύματος γράφεται ως

$$A[k] = \sum_{n=0}^{N-1} |s[k, n]|^2 \quad (3.2)$$

και αντιστοιχεί στη μέση ισχύ του σήματος. Αυτή διατηρείται σταθερή από τον αυτόματο ελεγκτή της ισχύος (Automatic Power Control, APC). Επιπλέον, τετραγωνικό σφάλμα $E[k]$ κατά τη διάρκεια ενός μηνύματος γράφεται υπό τη μορφή του αθροίσματος

$$E[k] = \sum_{n=0}^{N-1} |r[k, n] - s[k, n]|^2 \quad (3.3)$$

Η μέση τιμή του CNIR σε dB δίδεται από το μέγεθος $10 \log \hat{\mu}_{CNIR}[k]$, όπου

$$\hat{\mu}_{CNIR}[k] = \begin{cases} CNIR[0] & k = 0 \\ (1 - a_{avg})\hat{\mu}_{CNIR}[k-1] + a_{avg}CNIR[k] & k > 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Στην (3.4), η μεταβλητή k αναπαριστά το χρονικό δείκτη του μηνύματος (με το αρχικό μήνυμα να έχει δείκτη $k = 0$, το επόμενο μήνυμα $k = 1$ κ.ο.κ.). Το $CNIR[k]$ αποτελεί γραμμική μέτρηση του CNIR του μηνύματος k (προερχόμενη από οποιονδήποτε μηχανισμό που επιτυγχάνει την προαναφερθείσα ακρίβεια) και a_{avg} αποτελεί έναν παράγοντα μεσοστάθμισης (averaging). Για την εύρεση της τυπικής απόκλισης, το τετράγωνο της αναμενόμενης τιμής ανανεώνεται σε κάθε μήνυμα με βάση την ακόλουθη αναδρομική σχέση

$$\hat{x}_{CNIR}^2[k] = \begin{cases} |CNIR[0]|^2 & k = 0 \\ (1 - a_{avg})\hat{x}_{CNIR}^2[k-1] + a_{avg}|CNIR[k]|^2 & k > 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

και το αποτέλεσμα αυτό εφαρμόζεται στον υπολογισμό της τελικής έκφρασης για την τυπική απόκλιση σε dB

$$\hat{\sigma}_{CNIR} = 5 \log (|\hat{x}_{CNIR}^2[k] - \hat{\mu}_{CNIR}^2[k]|) \quad (3.6)$$

Τα σχήματα ανίχνευσης που εξετάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους θεωρούνται ως *a posteriori* τεχνικές, υπό την έννοια ότι στο σύστημα δίδεται η δυνατότητα αντίδρασης μόνο μετά την ανίχνευση ενός επεισοδίου διάλειψης (fade event). Αυτό συνεπάγεται πρόσθετη καθυστέρηση λόγω της επεξεργασίας που ακολουθεί την ανίχνευση ενός επεισοδίου διάλειψης και της απόφασης για την τεχνική άμβλυνσης που πρέπει να επιλεγεί. Με τη σειρά της, αυτή η καθυστέρηση συμβάλλει στη δημιουργία πρόσθετων λαθών, τα οποία μπορούν να μειωθούν αν στο τερματικό υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο. Στην πράξη, δύο ειδών προβλέψεις μπορούν να υλοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο: η πρώτη εκμεταλλεύεται τις δυναμικές ιδιότητες των διαλείψεων ενώ, η δεύτερη κάνει χρήση του στιγμιαίου λόγου αναγωγής συχνότητας, όπως αναφέρεται στη συνέχεια.

Τα μοντέλα πρόβλεψης που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 αφορούσαν τη μακροπρόθεσμη στατιστική συμπεριφορά του κάθε μηχανισμού διάδοσης. Αντίθετα, για την πρόβλεψη της επόμενης κατάστασης του διαύλου σε πραγματικό χρόνο και την προληπτική ενεργοποίηση του βρόχου ελέγχου απαιτείται η γνώση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών των διαλείψεων και, κυρίως, της κλίσης της διάλειψης (fade slope), δηλαδή του ρυθμού μεταβολής της απόσβεσης ως προς το χρόνο. Ερευνητικές εργασίες που μελετούν το συγκεκριμένο μέγεθος βρίσκει κανείς στις αναφορές [Swe92a], [Van03], ενώ προσφάτως η ITU-R έχει δημοσιεύσει τη σχετική Σύσταση P.1623 [ITU1623] για κεκλιμένους ραδιοδρόμους Γης - δορυφόρου. Ένα κρίσιμο ζήτημα το οποίο προκύπτει κατά την εκτίμηση των διαλείψεων σε πραγματικό χρόνο είναι η δυνατότητα διάκρισης μεταξύ των διάφορων μηχανισμών διάδοσης, ώστε ο αλγόριθμος ελέγχου να αντιδρά κατάλληλα σε καθένα από αυτούς. Προς την κατεύθυνση αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο φασματικός διαχωρισμός (ή φασματική αποσύνθεση) των παραγόντων διάδοσης δεδομένου ότι οι χαμηλές φασματικές συνιστώσες συνδέονται με την απόσβεση από αέρια, οι μεσαίες με τα νέφη και τη βροχή, ενώ οι υψηλές με τους σπινθηρισμούς. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατός ο απαραίτητος διαχωρισμός των φαινομένων μέσω κατάλληλα σχεδιασμένων φίλτρων [Mat82].

Εξάλλου, στις περισσότερες από τις τεχνικές ανίχνευσης ή πρόβλεψης, ενσωματώνεται η δυνατότητα αναγωγής συχνότητας. Σύμφωνα με τη Σύσταση ITU-R P.530 [ITU530], όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα απόσβεσης βροχής σε μια συχνότητα, μια πρόχειρη εκτίμηση της απόσβεσης για την ίδια επίγεια ζεύξη αλλά σε διαφορετική

συχρότητα στο εύρος 7-50GHz παρέχεται από τον εμπειρικό κανόνα

$$A_2 = A_1(\Phi_2/\Phi_1)^{1-H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)} \quad (3.7)$$

όπου

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4}f^2} \quad (3.8)$$

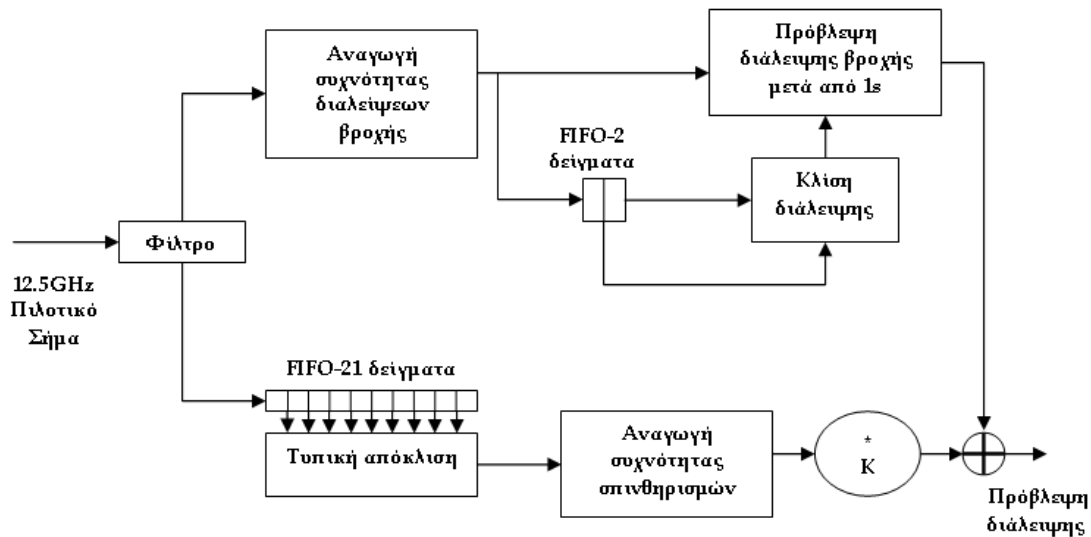
$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1.12 \times 10^{-3}(\Phi_2/\Phi_1)^{0.5}(\Phi_1 A_1)^{0.55} \quad (3.9)$$

Στις (3.7) και (3.9), με A_1 και A_2 συμβολίζονται οι αποσβέσεις βροχής στις συχνότητες f_1 και f_2 σε GHz, αντίστοιχα, για το ίδιο ποσοστό του χρόνου $p\%$. Ωστόσο, κατά την πρόβλεψη της στάθμης διαλείψεων σε πραγματικό χρόνο, μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο στιγμιαίος λόγος αναγωγής συχνότητας. Ο λόγος αυτός εμφανίζει ισχυρή μεταβολή κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου διάλειψης, ιδιαίτερα για τη βροχή συνεκτικού τύπου. Η συμπεριφορά αυτή χαρακτηρίζεται από ένα φαινόμενο υστέρησης [Swe92b] που προκαλείται από τη δυναμική μεταβολή της κατανομής του μεγέθους της σταγόνας βροχής, του ενεργού μήκους της ζεύξης και της επίδρασης του νερού που επικάθεται επί των κεραιών. Όπως έχουν καταδείξει διάφορα πειραματικά αποτελέσματα, τα σφάλματα από τη χρήση ενός σταθερού λόγου στιγμιαίας αναγωγής συχνότητας μπορούν να φθάσουν τα ± 4 dB. Για την άμβλυνση αυτού του σημαντικού σφάλματος, έχει προταθεί [Gre98] ένα στατιστικό μοντέλο ανοικτού βρόχου για τη στιγμιαία αναγωγή συχνότητας της απόσβεσης λόγω βροχής, το οποίο λαμβάνει υπόψη την επίδραση των τυχαίων μεταβολών στην κατανομή της σταγόνας βροχής.

Η ενσωμάτωση της αναγωγής συχνότητας καθώς και των υπόλοιπων μεθόδων που συζητήθηκαν ανωτέρω για την εκτίμηση/πρόβλεψη των διαλείψεων σε ένα βρόχο ελέγχου FMT παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Το σχήμα που αποτελεί προϊόν της εργασίας [Cas02], αφορά ένα δορυφορικό σύστημα που λειτουργεί στη ζώνη Ka (30/20GHz). Ωστόσο, χρησιμοποιεί ένα πιλοτικό σήμα στα 12.5GHz, το οποίο, αφού διέλθει από ένα βαθυπερατό φίλτρο (φασματική αποσύνθεση) για το διαχωρισμό μεταξύ σπινθηρισμών και διαλείψεων βροχής, ανάγεται στη συχνότητα της ζώνης Ka παρέχοντας ως τελική έξοδο την πρόβλεψη της συνολικής διάλειψης.

3.2 Έλεγχος της ισχύος

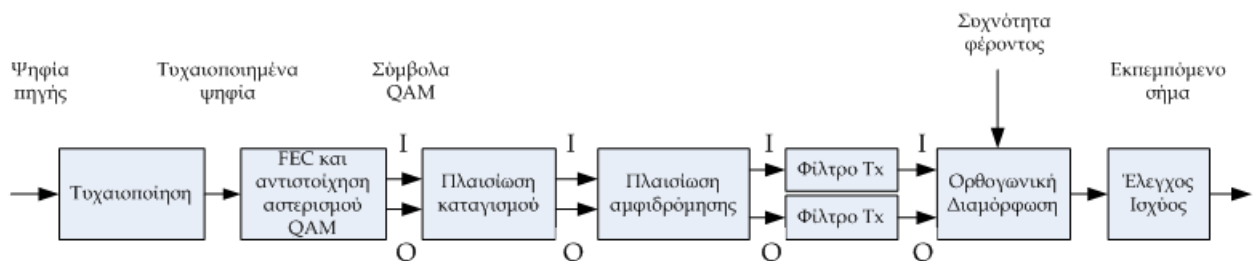
Η τεχνική ελέγχου της ισχύος έχει ως στόχο τη ρύθμιση της ισχύος εκπομπής για την αντιστάθμιση των διαλείψεων και, γενικότερα, τη ρύθμιση της ισχύος με στόχο τη



Σχήμα 3.2: Τυπικό λειτουργικό διάγραμμα βρόχου ελέγχου FMT.

βελτιστοποίηση του συνολικού σηματοθορυβικού λόγου. Ο έλεγχος της ισχύος μπορεί να λάβει χώρα σε δύο θέσεις: στο συνδρομητή SS οπότε και ονομάζεται έλεγχος ισχύος upstream ή στο σταθμό BS οπότε και ονομάζεται έλεγχος ισχύος downstream. Η θέση της μονάδας ελέγχου της ισχύος στην αλυσίδα του πομπού φαίνεται στο Σχήμα 3.3.

Στην περίπτωση των σταθερών δικτύων BWA, συνηθίζεται ο έλεγχος της ισχύος να πραγματοποιείται στο σταθμό του συνδρομητή καθώς ο σταθμός βάσης ακολουθεί μετάδοση ευρυεκπομπής (broadcasting) προς τους πολλαπλούς SS. Ωστόσο, λόγω των διαφορετικών αποστάσεων από τον BS κατά τις οποίες τοποθετούνται οι SS εντός της κυψέλης, συνηθίζεται κατά την αρχική διαστασιοποίηση του συστήματος, η μέση ισχύς κάθε συνδρομητή να υπόκειται σε μια αρχική ρύθμιση ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασής του από τον BS. Το σχήμα αυτό μπορεί να ονομασθεί *στατικός έλεγχος της*



Σχήμα 3.3: Επεξεργασία του προς μετάδοση σήματος στον πομπό παρουσία της μονάδας ελέγχου της ισχύος.

ισχύος και αποκτά μεγαλύτερη σημασία σε δίκτυα DS-CDMA για την αποφυγή του προβλήματος κοντινού- προς -απομακρυσμένο συνδρομητή (near-far). Το πρόβλημα αυτό εντοπίζεται σε κυψελωτά δίκτυα DS-CDMA και συνίσταται στη μεγάλη διαφορά της λαμβανομένης ισχύος μεταξύ συνδρομητών που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το σταθμό βάσης σε σχέση με τους συνδρομητές που βρίσκονται σε ακραίες θέσεις της κυψέλης. Από την άλλη πλευρά, το σύστημα APC περιλαμβάνει και μια δεύτερη μονάδα που αντιδρά δυναμικά σε αυξήσεις της απόσβεσης λόγω βροχής μέχρι την τιμή του περιθωρίου ελέγχου ισχύος M_{APC} [dB]. Η έκφραση για τη συνολική ισχύ εκπομπής από κάθε SS που είναι εξοπλισμένος με μια τέτοια αρχιτεκτονική ελέγχου της ισχύος δύο επιπέδων είναι [Ara07]

$$P_{T,SS}(d, A) = \begin{cases} P_{T,SS}^{min} \times (d/d_{min})^2 & A[\text{dB}] < 0.5 \\ P_{T,SS}^{min} \times (d/d_{min})^2 \times 10^{A/10} & 0.5 \leq A[\text{dB}] \leq M_{APC} \\ P_{T,SS}^{min} \times (d/d_{min})^2 \times 10^{M_{APC}/10} & A[\text{dB}] > M_{APC} \end{cases} \quad (3.10)$$

όπου $P_{T,SS}^{min}$ [W] η ελάχιστη ισχύς εκπομπής από τον πλησιέστερο συνδρομητή προς τον BS σε απόσταση d_{min} υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Στάθμες διαλείψεων υψηλότερες του 0.5dB σηματοδοτούν την ύπαρξη απόσβεσης λόγω βροχής. Σημειώνεται ότι σε πρακτικές περιπτώσεις βρόχων ελέγχου της ισχύος, όπως αυτές που θα εξετασθούν ακολούθως, ο βρόχος ελέγχου αυξάνει την ισχύ εκπομπής σταδιακά, για παράδειγμα, σε βήματα του 1dB, σε αντίθεση με τη συνεχή αύξηση που προβλέπει η (3.10).

Ένα πιθανό πρόβλημα που μπορεί να προκύψει από τη χρήση ελέγχου της ισχύος είναι η παρεμβολή γειτονικού διαύλου (adjacent channel interference), οπότε μέρος της ενέργειας του σήματος επικαλύπτει τους φασματικά γειτονικούς διαύλους. Όταν το σύστημα ελέγχου προβλέπει βαθιά διάλειψη κατά την επόμενη κατάσταση του διαύλου, ο ενισχυτής HPA (High Power Amplifier) του πομπού μειώνει το περιθώριο ισχύος εξόδου (output back-off), δηλαδή το περιθώριο μεταξύ του σημείου λειτουργίας και του σημείου κορεσμού του ενισχυτή, προκειμένου να αντιμετωπισθεί η διάλειψη. Αυτό οδηγεί στη μερική αποκατάσταση των φασματικών ουρών του σήματος και, κατά συνέπεια, στη δημιουργία παρεμβολής στους γειτονικούς διαύλους.

Άλλα δύο είδη παρεμβολής που εντείνονται λόγω της χρήσης ελέγχου της ισχύος είναι η ενδοσυστημική (intrasystem) και η διασυστημική (intersystem) παρεμβολή. Η επίδραση του APC στην πρώτη εξετάζεται λεπτομερώς στα Κεφάλαια 4 και 5. Η παράλληλη ανάπτυξη σε μεγάλη κλίμακα των δικτύων BWA και δορυφορικών

συστημάτων (π.χ. οικιακοί δορυφορικοί δέκτες TV) που συντελείται τα τελευταία έτη, ενδεχομένως, οδηγεί σε παρεμβολές μεταξύ των δύο συστημάτων. Ένα τέτοιο σενάριο διασυστημικής παρεμβολής μεταξύ της σταθερής υπηρεσίας και της δορυφορικής υπηρεσίας ευρυσυχνότητας αναλύεται στο [Pan06].

Ακολουθεί η περιγραφή μιας πρακτικής περίπτωσης ελέγχου της ισχύος, όπως αυτή καθορίζεται από το πρότυπο IEEE 802.16, σύμφωνα με το οποίο ο έλεγχος της ισχύος υποστηρίζεται για τη ζεύξη upstream και περιλαμβάνει αρχική ρύθμιση (calibration) του συστήματος καθώς και την περιοδική του προσαρμογή. Ο BS οφείλει να διαθέτει την ικανότητα να προσφέρει ακριβείς μετρήσεις ισχύος του λαμβανομένου σήματος. Στη συνέχεια, η τιμή αυτή συγκρίνεται με μια στάθμη αναφοράς και το σφάλμα που προκύπτει επιστρέφεται στον SS μέσα σε ένα μήνυμα ελέγχου που παραδίδεται στο στρώμα MAC. Μολονότι η υλοποίηση του ελέγχου της ισχύος δεν καθορίζεται με λεπτομέρεια, ο αλγόριθμος APC πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να αποκρίνεται σε μεταβολές της ισχύος μέχρι 30dB/s και βάρη διαλείψεων τουλάχιστον 10dB. Επιπλέον, ο αλγόριθμος APC πρέπει να λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση του ενισχυτή HPA με τα διαφορετικά προφίλ μετάδοσης. Για παράδειγμα, όταν μεταβάλλεται η διαμόρφωση QAM σε διαδοχικούς καταιγισμούς (bursts), το περιθώριο ισχύος εξόδου του ενισχυτή πρέπει να διατηρείται μεγάλο ώστε να αποφεύγεται η παραβίαση των προδιαγραφών ανεπιθύμητης εκπομπής.

Παρόμοιες οδηγίες σε σχέση με τον έλεγχο ισχύος περιλαμβάνονται και στο πρότυπο [HIP02]. Μια σημαντική διαφορά είναι η προαιρετική χρήση της τεχνικής του ελέγχου ισχύος και στη ζεύξη downstream, η οποία πρέπει να υπακούει στους ακόλουθους κανόνες:

- Η ρύθμιση της ισχύος στη ζεύξη downstream εφαρμόζεται αφού πρώτα εξαντληθούν οι δυνατότητες της προσαρμοστικής διαμόρφωσης και κωδικοποίησης.
- Η μεταβολή της ισχύος εκπομπής στη ζεύξη downstream δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1dB ανά 50ms, δηλαδή, η κλίση της δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει τα 20dB/s.
- Το βήμα διόρθωσης της ισχύος δεν πρέπει να υπερβαίνει το ± 1 dB.
- Η RMS (Root-Mean Square) τιμή της ισχύος εκπομπής πρέπει να παραμένει σταθερή σε κάθε πλαίσιο.

- Η διόρθωση της ισχύος εφαρμόζεται ακριβώς πριν την εκπομπή της επικεφαλίδας του πλαισίου.
- Το δυναμικό εύρος του βρόχου ελέγχου της ισχύος εξαρτάται από την κατηγορία του τερματικού SS. Το δυναμικό εύρος καθορίζεται εντός των ορίων 0-4dB για τα τερματικά Κατηγορίας 1 και, αντίστοιχα, 0-7dB για την Κατηγορία 2 και 0-10dB για την Κατηγορία 3.

Από την άλλη πλευρά, ο υποχρεωτικός έλεγχος της ισχύος στη ζεύξη upstream ελέγχεται πλήρως από τον BS. Ο σχετικός αλγόριθμος δεν προτυποποιείται, ωστόσο, η διαδικασία ελέγχου της ισχύος υλοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε η ισχύς εκπομπής από κάθε SS να εξασφαλίζει την επιθυμητή επίδοση της ζεύξης. Η στάθμη ισχύος εκπομπής ορίζεται για κάθε SS ως εκείνη που, ανεξάρτητα από την απόσταση από τον BS και τις συνθήκες του διαύλου, διασφαλίζει ότι δεν θα συμβεί υπέρβαση της μέγιστης στάθμης BER, ακόμα και στην περίπτωση διαλείψεων με απότομη κλίση. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, ο BS πρέπει να λαμβάνει σήματα από κάθε SS με επιπλέον ισχύ σε σχέση με το ονομαστικό κατώφλιο του BER. Η απόσταση σε dB μεταξύ της πραγματικής λαμβανόμενης ισχύος και της λαμβανόμενης ισχύος κατωφλίου καλείται περιθώριο λαμβανόμενης ισχύος. Η τιμή του περιθωρίου λαμβανόμενης ισχύος πρέπει να ανήκει στο εύρος 4-8dB σε σχέση με το ονομαστικό κατώφλιο του BER. Κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου ελέγχου της ισχύος στη ζεύξη upstream πρέπει να τηρούνται οι ακόλουθοι κανόνες:

- Η σηματοδότηση για τον έλεγχο της ισχύος πρέπει να γίνεται με σχετικό τρόπο (για παράδειγμα, τα αιτήματα για αυξομείωση της ισχύος εκπομπής του SS πρέπει να υποβάλλονται σε σχετικά βήματα με θετική/αρνητική ένδειξη).
- Ο ελάχιστος χρόνος μεταξύ των μηνυμάτων ελέγχου δεν μπορεί να είναι μικρότερος από 50ms, ανεξάρτητα από την υλοποίηση του αλγορίθμου APC. Ο ελάχιστος αυτός χρόνος πρέπει να ανήκει στο διάστημα 50-200ms.
- Το βήμα διόρθωσης της ισχύος ανήκει στο διάστημα 0.5-4dB με διαβάθμιση της τάξης του 0.5dB. Συνεπώς, το ελάχιστο βήμα αυξομείωσης της ισχύος είναι 0.5dB και το μέγιστο 4dB.
- Η σχετική ακρίβεια του πομπού πρέπει να είναι καλύτερη από $\pm 0.5\text{dB}$.

- Το δυναμικό εύρος του βρόχου ελέγχου της ισχύος στον SS πρέπει να είναι τουλάχιστον 40dB. Θεωρώντας ότι η μέγιστη ισχύς εκπομπής προδιαγράφεται στα 14dBm, η ελάχιστη ισχύς εκπομπής δεν μπορεί να υπερβαίνει την τιμή των -26dBm.
- Η ακρίβεια μέτρησης του σηματοθροβικού λόγου στον BS πρέπει να είναι καλύτερη από ± 1 dB. Η μέτρηση του σηματοθροβικού λόγου πρέπει να πραγματοποιείται με ανάλυση της τάξης των 0.25dB.

3.3 Προσαρμοστικές τεχνικές επεξεργασίας του σήματος

Οι τεχνικές που ανήκουν στη συγκεκριμένη κατηγορία αποσκοπούν στην προσαρμογή του τρόπου επεξεργασίας/μετάδοσης του σήματος προς τις συνθήκες που επικρατούν στο δίαυλο. Οι εναλλακτικοί τρόποι μετάδοσης είναι διαθέσιμοι σε όλους τους κόμβους του δικτύου (BS, SS) μετά από αίτηση (on demand). Επομένως, οι προσαρμοστικές τεχνικές επεξεργασίας του σήματος ανήκουν στην κατηγορία των τεχνικών FMT με από κοινού χρήση των πόρων. Μπορούν να διακριθούν περαιτέρω σε δύο κατηγορίες: προσαρμοστική διαμόρφωση (Adaptive Modulation, AM) και προσαρμοστική κωδικοποίηση FEC (Adaptive Coding, AC). Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι δύο πρώτες τεχνικές συνυπάρχουν, οπότε και αναφέρονται ως προσαρμοστική κωδικοποίηση και διαμόρφωση (ACM).

Οι προσαρμοστικές τεχνικές επεξεργασίας απαιτούν υψηλής ακρίβειας εκτίμηση του διαύλου καθώς και μεγάλης αξιοπιστίας ζεύξη ανάδρασης μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Προτάθηκαν για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 60' [Hay68]. Ωστόσο, το ενδιαφέρον για τις συγκεκριμένες τεχνικές ήταν βραχύβιο λόγω περιορισμών στον εξοπλισμό, των ελλείψεων στις τεχνικές εκτίμησης του διαύλου και του γεγονότος ότι το ενδιαφέρον εκείνη την περίοδο περιοριζόταν σε ζεύξεις PTP χωρίς ανάδραση προς τον πομπό. Το γεγονός, όμως, ότι πολλοί από τους περιορισμούς αυτούς έχουν αρθεί στα σύγχρονα συστήματα επικοινωνιών, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι υπάρχει αυξημένη ζήτηση για επικοινωνίες υψηλής φασματικής απόδοσης, ανανέωσε το ενδιαφέρον για τις προσαρμοστικές τεχνικές επεξεργασίας του σήματος. Οι τεχνικές αυτές έχουν φθάσει σε υψηλό επίπεδο ωρίμανσης για τα συμβατικά συστήματα κινητών

επικοινωνιών (βλ. την αρχική περίοδο των [Hay68], [Vuc91] έως τις [Chu01], [Lau02]) και τα συστήματα δορυφορικών επικοινωνιών (βλ. τις πρώτες εργασίες [Kha89], [Fil90] έως τις πλέον πρόσφατες [Rin04], [Ara04a]). Αντίθετα, οι ερευνητικές εργασίες στο αντικείμενο των προσαρμοστικών τεχνικών μετάδοσης με αποκλειστική εφαρμογή σε σταθερά δίκτυα BWA είναι περιορισμένες, με εξαίρεση τις [Mas02], [Arm03], [Far02], από τις οποίες, οι δύο πρώτες είναι περιγραφικού χαρακτήρα, ενώ η τρίτη παρέχει αναλυτικά αποτελέσματα στα πλαίσια ενός δικτύου πρόσβασης ATM.

3.3.1 Προσαρμοστική διαμόρφωση

Μέσω της χρήσης τεχνικών ψηφιακής διαμόρφωσης υψηλής φασματικής απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί βελτιωμένη χωρητικότητα του συστήματος για καθορισμένο εύρος ζώνης. Πράγματι, η μετάδοση ψηφιακών διαμορφώσεων M -οστού επιπέδου προσφέρει τη δυνατότητα μετάδοσης περισσότερων ψηφίων ανά δευτερόλεπτο χωρίς αντίστοιχη αύξηση του εύρους ζώνης.

Στόχος της τεχνικής AM είναι η μείωση του απαιτούμενου λόγου ενέργειας ψηφίου προς φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου E_b/N_0 , που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο BER, με μείωση της φασματικής απόδοσης καθώς μειώνεται ο σηματοθορυβικός λόγος CNR στην είσοδο του δέκτη. Για παράδειγμα, για τη ζεύξη downstream του IEEE 802.16 προδιαγράφονται οι διαμορφώσεις 64-QAM και 16-QAM υπό ευνοϊκές και μέτριες συνθήκες του διαύλου, αντίστοιχα, και προβλέπεται η ενεργοποίηση της διαμόρφωσης QPSK, όταν οι συνθήκες στο δίαυλο επιδεινώνονται. Επισημαίνεται ότι η χρήση της τεχνικής AM δεν επιτυγχάνει βελτίωση της διαθεσιμότητας σε σχέση με αυτήν που επιτυγχάνει η διαμόρφωση με το χαμηλότερο επίπεδο M από τις δυνατές επιλογές (η QPSK στο τελευταίο παράδειγμα). Αντίθετα προσφέρει σημαντική βελτίωση όσον αφορά τη φασματική απόδοση όταν επικρατούν συνθήκες καθαρού ουρανού.

Για την αναγωγή της διαθεσιμότητας από όρους απόσβεσης λόγω βροχής -βλ. (2.6)- σε όρους πιθανότητας υπέρβασης BER, εισάγεται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο [Liv01]. Στόχος είναι να εκφρασθεί η πιθανότητα διακοπής του συστήματος OP ως συνάρτηση της πιθανότητας υπέρβασης ενός κρίσιμου κατωφλίου BER_{th}

$$OP = \Pr\{BER > BER_{th}\} \quad (3.11)$$

Εξάλλου, η τιμή BER για οποιοδήποτε σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης μπορεί να ορι-

σθεί συναρτήσει του λόγου ενέργειας συμβόλου προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου, $\gamma = E_s/N_0$, δηλαδή

$$BER = f(\gamma)$$

όπου

$$\gamma = \frac{E_s}{N_0} = \log_2 M \frac{E_b}{N_0} \quad (3.12)$$

και

$$\left[\frac{E_s}{N_0} \right]_{cs} [\text{dB}] = \left[\frac{E_s}{N_0} \right]_{cs} - A[\text{dB}] \quad (3.13)$$

Στην (3.13), με $[E_s/N_0]_{cs}$ συμβολίζεται η τιμή σε dB του λόγου γ υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (clear sky). Συνεπώς, η (3.11) λαμβάνει τη μορφή

$$OP = \Pr\{f(\gamma) > f(\gamma_{th})\} = \Pr\left\{f\left(\left[\frac{E_s}{N_0}\right]_{cs} - A\right) > f\left(\left[\frac{E_s}{N_0}\right]_{cs} - F\right)\right\} \quad (3.14)$$

Επειδή η συνάρτηση $f(\cdot)$ είναι αμφιμονοσήμαντη, η πιθανότητα διακοπής καταλήγει στη σχέση

$$OP = \Pr\{A > F\}$$

δηλαδή είναι πανομοιότυπη με τη (2.6), με αποτέλεσμα οι δύο ορισμοί να ταυτίζονται.

Με βάση την ανωτέρω διαδικασία, είναι πλέον δυνατή η έκφραση της πιθανότητας υπέρβασης της στάθμης BER για οποιοδήποτε σχήμα ψηφιακής διαμόρφωσης καθιστώντας συγκεκριμένη τη μορφή της συνάρτησης $f(\cdot)$. Στη συνέχεια, η εργασία αυτή πραγματοποιείται για τα τρία εναλλακτικά σχήματα διαμόρφωσης M-QAM² από το σύνολο $\{M = 4, 16, 64\}$ που καθορίζονται από το πρότυπο ETSI BRAN HIPERACCESS για τη ζεύξη downstream. Προς τούτο, η πιθανότητα λανθασμένου συμβόλου για τη διαμόρφωση M-QAM δίδεται κατά προσέγγιση από τη σχέση [Pro01]

$$P_M(\gamma) = 1 - (1 - P_{\sqrt{M}}(\gamma))^2 \quad (3.15)$$

όπου

$$P_{\sqrt{M}}(\gamma) = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) Q \left(\sqrt{\frac{3}{M-1}} \gamma\right) \quad (3.16)$$

Η συνάρτηση $Q(\cdot)$ συνδέεται με τη συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος $\text{erfc}(\cdot)$ –βλ. (Α'6)– μέσω της σχέσης [Stu01]

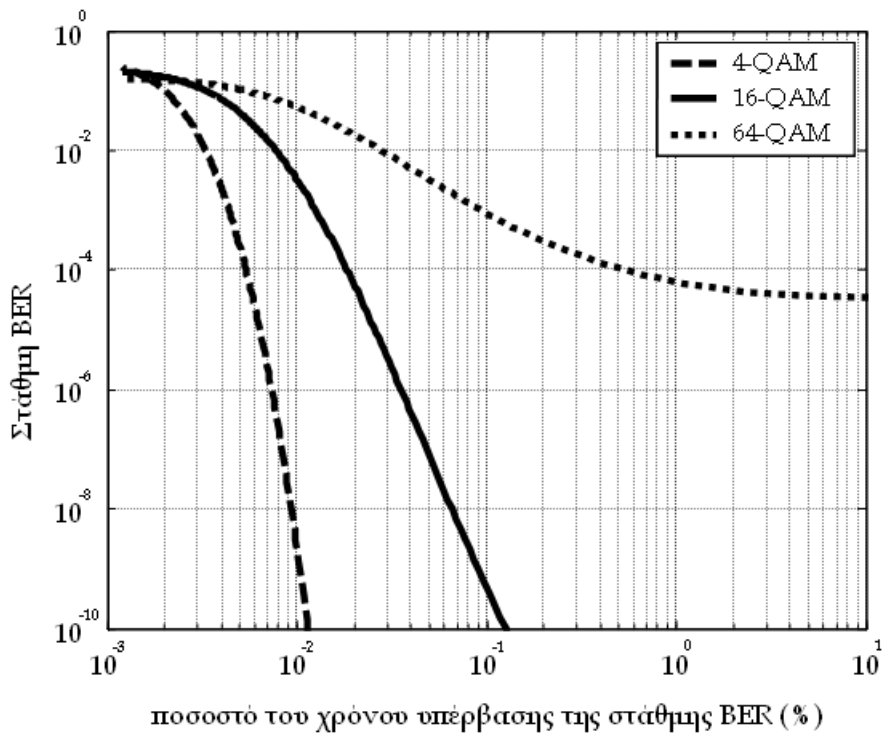
$$Q(x) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.17)$$

²Στη διαμόρφωση M-QAM, το επίπεδο M προσδιορίζει το πλήθος των σημείων συγκεκριμένου πλάτους και φάσης στο σηματοτικό αστερισμό.

Με δεδομένο ότι χρησιμοποιείται αντιστοίχιση Gray, ο λόγος BER μπορεί να συσχετισθεί με την πιθανότητα λανθασμένου συμβόλου $P_M(\gamma)$ μέσω της εξίσωσης

$$BER(\gamma) = P_M(\gamma)/\log_2 M.$$

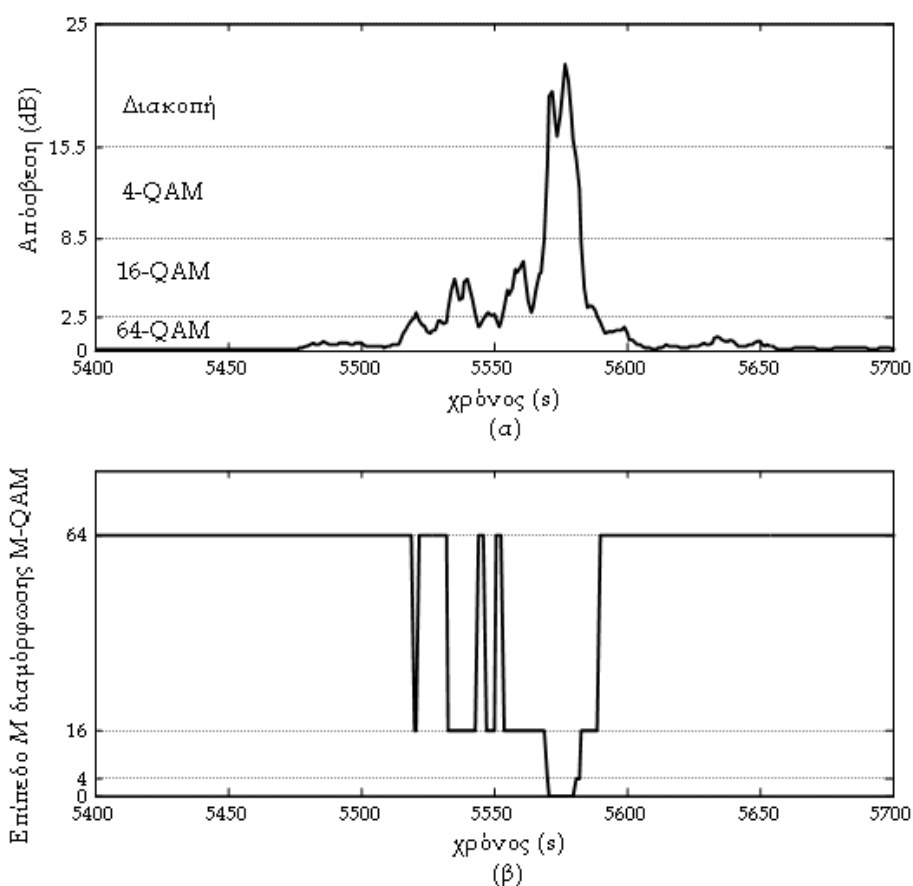
Θεωρώντας επίγεια ζεύξη συχνότητας $f = 28\text{GHz}$, κατακόρυφης πόλωσης και μήκους 3km που λειτουργεί υπό τα κλιματικά χαρακτηριστικά της Αθήνας, GR, με $[E_s/N_0]_{cs} = 25\text{dB}$, στο Σχήμα 3.4 σχεδιάζεται το ποσοστό του χρόνου για το οποίο υπερβαίνονται διάφορες στάθμες BER για τα τρία εναλλακτικά σχήματα διαμόρφωσης M-QAM. Από το σχήμα γίνεται φανερό ότι μόνο οι διαμορφώσεις 4-QAM και 16-QAM μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστη μετάδοση υπό χαμηλές τιμές BER ακόμα και για μικρά ποσοστά του χρόνου. Εντούτοις, η λειτουργία της τεχνικής AM γίνεται περισσότερο εναργής μέσω του Σχήματος 3.5, στο οποίο απομονώνεται ένα επεισόδιο βαθιάς διάλειψης (Σχήμα 3.5α) και, ταυτόχρονα, παρουσιάζονται οι μεταβάσεις στα κατάλληλα επίπεδα M ανάλογα με το βάθος της διάλειψης (Σχήμα 3.5β). Οι στάθμες μετάβασης μεταξύ των διαμορφώσεων έχουν υπολογισθεί θεωρώντας $BER = 10^{-3}$, οπότε το απαιτούμενο γ_{th} γίνεται ίσο με 22.5, 16.5 και 9.5dB για $M = 64, 16$ και 4, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι $[E_s/N_0]_{cs} = 25\text{dB}$, από την (3.13) εύκολα προκύπτουν οι οριακές τιμές απόσβεσης



Σχήμα 3.4: Ποσοστό του χρόνου για το οποίο υπερβαίνεται μια στάθμη BER για τρία σχήματα διαμόρφωσης M-QAM.

$A = 2.5, 8.5$ και 15.5 dB, αντίστοιχα.

Σημαντική βελτίωση ως προς τη φασματική απόδοση προσφέρει η τεχνική AM. Για σήματα πολλαπλής φάσης, το εύρος ζώνης του διαύλου αντιστοιχεί στο εύρος ζώνης του ισοδύναμου βαθυπερατού παλμού του σήματος. Επομένως, η φασματική απόδοση για ένα σήμα εύρους ζώνης W και ρυθμού μετάδοσης R_b είναι $R_b/W = \log_2 M$. Θεωρώντας πάλι το σύστημα του Σχήματος 3.4, ο Πίνακας 3.1 αποκαλύπτει ότι για $BER = 10^{-3}$, η διαμόρφωση 64-QAM χρησιμοποιείται στη συντριπτική διάρκεια του χρόνου και η μετάβαση στις υπόλοιπες δύο διαμορφώσεις συμβαίνει για ελάχιστα ποσοστά του χρόνου. Άρα, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η υιοθέτηση της τεχνικής AM οδηγεί σε φασματική απόδοση $5.994 + 0.003 + 0.0002 = 5.9972$ (bits/s)/Hz. Αντίθετα, η χρήση αποκλειστικά του σχήματος 4-QAM θα είχε ως αποτέλεσμα φασματική απόδοση μόλις $(100 - 0.004)/100 \times 2 = 1.9999$ (bits/s)/Hz, με τα δύο συστήματα να ικανοποιούν το ίδιο ποσοστό διαθεσιμότητας.



Σχήμα 3.5: Λειτουργία της τεχνικής AM κατά τη διάρκεια μιας βαθιάς διάλειψης.

Πίνακας 3.1: Συνεισφορά στη συνολική φασματική απόδοση του κάθε σχήματος διαμόρφωσης M -QAM σε ένα σύστημα AM για $BER=10^{-3}$.

Διαμόρφωση	% του χρόνου	$\log_2 M$ (bits/s)/Hz	φασματική απόδοση
64-QAM	99.908	6	5.994
16-QAM	0.078	4	0.003
4-QAM	0.010	2	0.0002
διακοπή λειτουργίας	0.004	0	0

3.3.2 Προσαρμοστική κωδικοποίηση

Η εισαγωγή κωδικοποίησης FEC επιτρέπει την προσθήκη πλεοναζόντων ψηφίων στα ψηφία πληροφορίας για την ανίχνευση και διόρθωση σφαλμάτων που προκαλούνται όταν μια ζεύξη υπόκειται σε διαλείψεις. Κάθε σχήμα κωδικοποίησης χαρακτηρίζεται από το ρυθμό κώδικα (code rate) $r = k/n$, όπου k τα ψηφία πληροφορίας και n τα συνολικά ψηφία μετά την προσθήκη $n - k$ πλεοναζόντων ψηφίων. Η τεχνική AC συνίσταται στη δημιουργία κωδίκων με μεταβλητό ρυθμό κωδικοποίησης, η τιμή του οποίου προσαρμόζεται στις συνθήκες διάδοσης. Καθώς αυξάνεται το πλήθος των πλεοναζόντων ψηφίων, η πιθανότητα λάθους μειώνεται, με αντίστοιχη αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Επομένως, η κωδικοποίηση μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συμβιβασμός μεταξύ απαιτούμενου εύρους ζώνης και ισχύος ώστε να ικανοποιείται ένα προκαθορισμένο κατώφλιο BER.

Οι διαλείψεις λόγω βροχής στο δίαυλο LMDS παράγουν λάθη καταγιστικής μορφής κατά ομάδες ψηφίων (burst errors). Για το λόγο αυτό, οι κώδικες FEC που έχουν σχεδιασθεί για να αντιμετωπίζουν ανεξάρτητα λάθη που οφείλονται στο θόρυβο δεν είναι αποτελεσματικοί. Η επίδοση της τεχνικής FMT μπορεί να βελτιωθεί από τη χρήση μπλοκ κωδικοποίησης, η οποία αποδίδει καλύτερα όταν αντιμετωπίζει καταγισμούς σφαλμάτων σε συνδυασμό με την τεχνική της ανάδευσης (interleaving), η οποία αναδεύει τα κωδικοποιημένα δεδομένα με τέτοιο τρόπο, ώστε, μετά την αποκωδικοποίησή τους, αυτά να θεωρούνται ανεξάρτητα [Pro01]. Η τεχνική της ανάδευσης θεωρείται χρήσιμη μόνο έναντι διαλείψεων μικρής διάρκειας και, ιδιαίτερα, έναντι εκείνων που δημιουργούνται λόγω σπινθηρισμών. Υψηλότερη επίδοση μπορεί να επιτευχθεί από αλυσιδωτά σχήματα (concatenated codes) που συνδυάζουν τη μπλοκ κωδικοποίηση με ένα συνελικτικό κώδικα και αποκωδικοποίηση Viterbi στο δέκτη. Με τον τρόπο αυτό,

οι συνελικτικοί κώδικες αντιμετωπίζουν τα τυχαία σφάλματα, ενώ οι μπλοκ κώδικες αποτελούν μια ικανοποιητική λύση για τη διόρθωση καταιγισμών από σφάλματα.

Ένα τέτοιο αλυσιδωτο σχήμα με μεταβλητή δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων προτείνεται από τα πρότυπα IEEE 802.16 και HIPERACCESS (βλ. Πίνακα 1.3). Σύμφωνα με τις προδιαγραφές, ανάλογα με την εντολή από το βρόχο ελέγχου FMT, η είσοδος του πομπού τροφοδοτείται με 1 έως 4 MAC PDU, καθεμία από τις οποίες αποτελείται από 54 bytes. Τα K bytes³ που εισάγονται στο σύστημα κωδικοποιούνται μέσω ενός εξωτερικού περικομμένου μπλοκ κώδικα Reed-Solomon (RS) με ρυθμό κώδικα $r_{out} = K/(K+16)$ [Li00]. Ο κώδικας αυτός προέρχεται από το μητρικό κώδικα RS(255, 239, $t = 8$), όπου $t = 8$ bytes η διορθωτική ικανότητα του κώδικα. Επειδή τα συνολικά bytes από τις MAC PDU είναι πάντοτε λιγότερα από 239, τα υπόλοιπα $239 - K$ bytes συμπληρώνονται από μηδενικά bytes. Μετά την κωδικοποίηση RS, η συστηματική δομή του κώδικα επιτρέπει την περικοπή του, δηλαδή, την αφαίρεση των $239 - K$ μηδενικών bytes. Αν δεν χρησιμοποιείται εσωτερική κωδικοποίηση, η κωδικοποιημένη λέξη αποτελείται από $[(K + 16) \times 8]$ ψηφία, τα οποία παραδίδονται απευθείας στη μονάδα διαμόρφωσης, αφού πρώτα εισαχθεί ένας αριθμός ψηφίων παραπλήρωσης (padding) για τη διασφάλιση ακέραίου αριθμού διαμορφωμένων συμβόλων.

Όταν υπάρχει και εσωτερική κωδικοποίηση, στο τέλος κάθε κωδικοποιημένης λέξης προστίθενται 6 μηδενικά ψηφία ουράς (tail bits). Τότε, καθένα από τα $[(K + 16) \times 8 + 6]$ bits κωδικοποιείται από ένα εσωτερικό, συνελικτικό, δυαδικό κώδικα με ρυθμό $1/2$. Μετά τη συνελικτική κωδικοποίηση, εφαρμόζεται η λειτουργία της διάτρησης (puncturing)⁴, η οποία, ανάλογα με τον εσωτερικό ρυθμό κώδικα r_{in} που έχει επιλεγεί, καταλήγει σε $[(K + 16) \times 8 + 6]/r_{in}$ ψηφία. Στο τελικό στάδιο, τα κωδικοποιημένα bits παραδίδονται στη μονάδα διαμόρφωσης. Τα αλυσιδωτά σχήματα κωδικοποίησης προσφέρουν μεγαλύτερη διαβάθμιση (granularity) όσον αφορά τους δυνατούς ρυθμούς κωδικοποίησης, αφού ο συνολικός ρυθμός κώδικα της αλυσίδας δίδεται από το γινόμενο $r_{out} \cdot r_{in}$.

Η σχέση του αριθμού των διαμορφωμένων συμβόλων ανά κωδικοποιημένη λέξη ανάλογα με τον αριθμό των MAC PDU που εισάγονται στο γενικό σχήμα ACM διευκρινίζεται στον Πίνακα 3.2. Ο πίνακας έχει καταστρωθεί με βάση την υπόθεση

³ $K = 54, 108, 162$ ή 216

⁴Η διαδικασία της διάτρησης συνίσταται στη μη μετάδοση των κωδικοποιημένων ψηφίων '0' και στην ανάκτησή τους στο δέκτη σύμφωνα με κάποιο προκαθορισμένο αλγόριθμο.

Πίνακας 3.2: Πλήθος συμβόλων ανά κωδικοποιημένη λέξη για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς MAC PDU και σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ACM.

PDU/ κωδικοποιημένη λέξη	K (bytes)	K + 16 (bytes)	bits/ κωδικοποιημένη λέξη	ρυθμός κωδικοποίησης	διαμόρφωση	bits/ σύμβολο	bits παραγεϊσματος	σύμβολα/ κωδικοποιημένη λέξη
1	54	70	560	0.77	4-QAM	2	0	280
1	54	70	560	0.77	16-QAM	4	0	140
1	54	70	560	0.77	64-QAM	6	4	94
2	108	124	992	0.87	4-QAM	2	0	496
2	108	124	992	0.87	16-QAM	4	0	248
2	108	124	992	0.87	64-QAM	6	4	166
3	162	178	1424	0.91	4-QAM	2	0	712
3	162	178	1424	0.91	16-QAM	4	0	356
3	162	178	1424	0.91	64-QAM	6	4	238
4	216	232	1856	0.93	4-QAM	2	0	928
4	216	232	1856	0.93	16-QAM	4	0	464
4	216	232	1856	0.93	64-QAM	6	4	310

ότι για τους δυνατούς συνδυασμούς διαμόρφωσης χρησιμοποιείται μόνο εξωτερική κωδικοποίηση RS. Από τον πίνακα γίνεται φανερό ότι κάθε κωδικοποιημένη λέξη αποτελείται από $N_M = [(K + 16) \times 8 + n_p] / \log_2 M$ σύμβολα, όπου n_p τα ψηφία παραπλήρωσης κατά περίπτωση. Ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που επιλέγεται, ο κωδικοποιητής έχει δυνατότητα διόρθωσης $t_M = \lfloor 1/2(N_M - K_M) \rfloor$ λανθασμένων συμβόλων, όπου $\lfloor x \rfloor$ αναπαριστά το ακέραιο μέρος του x και $K_M = K \times 8 / \log_2 M$ τα σύμβολα πληροφορίας.

Για την εκτίμηση της επίδοσης του γενικού σχήματος ACM που περιλαμβάνεται στα πρότυπα IEEE 802.16 και HIPERACCES, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της πιθανότητας λάθους κωδικοποιημένης λέξης μέσω της σχέσης [Pro01]

$$P_C = \sum_{i=t_M+1}^{N_M} \binom{N_M}{i} P_M^i (1 - P_M)^{N_M-i} \quad (3.18)$$

όπου η πιθανότητα P_M υπολογίζεται από την (3.15). Η πιθανότητα λάθους συμβόλου μετά τη διαδικασία κωδικοποίησης είναι [Pro01]

$$P_S = \frac{1}{N_M} \sum_{i=t_M+1}^{N_M} i \binom{N_M}{i} P_M^i (1 - P_M)^{N_M-i} \quad (3.19)$$

Η αναγωγή της προηγούμενης πιθανότητας σε όρους BER γίνεται μέσω της σχέσης [Pro01]

$$BER(\gamma) = \frac{M}{2(M-1)} P_S(\gamma) \quad (3.20)$$

Πίνακας 3.3: Στάθμες μετάβασης μεταξύ ρυθμών μετάδοσης του γενικού σχήματος ACM για $BER = 10^{-6}$ σύμφωνα με τα πρότυπα *IEEE 802.16* και *HIPERACCES*.

ρυθμός κώδικα	διαμόρφωση	K_M	N_M	t_M	γ (dB)
0.77	4-QAM	216	280	32	5.7
0.87	4-QAM	432	496	32	6.7
0.91	4-QAM	648	712	32	7.2
0.93	4-QAM	864	928	32	7.6
0.77	16-QAM	108	140	16	14.0
0.87	16-QAM	216	248	16	14.8
0.91	16-QAM	324	356	16	15.2
0.93	16-QAM	432	464	16	15.5
0.77	64-QAM	72	94	11	20.8
0.87	64-QAM	144	166	11	21.5
0.91	64-QAM	216	238	11	21.9
0.93	64-QAM	288	310	11	22.1

όπου, για την εφαρμογή της (3.20), η παράμετρος γ προκύπτει από την τροποποιημένη σε σχέση με την (3.12) έκφραση

$$\gamma = \frac{E_s}{N_0} = r \log_2 M \frac{E_b}{N_0} \quad (3.21)$$

Με βάση τις (3.18) έως (3.20), υπολογίζονται στον Πίνακα 3.3 οι στάθμες μετάβασης μεταξύ των επιπέδων διαμόρφωσης M-QAM και των ρυθμών κώδικα RS του σχήματος ACM θεωρώντας $BER = 10^{-6}$. Γίνεται σαφές ότι οι τρεις εναλλακτικές διαμορφώσεις ορίζουν αντίστοιχα τρεις ευρύτερες περιοχές τιμών για το απαιτούμενο γ , ενώ οι τέσσερις ρυθμοί κωδικοποίησης προσφέρουν μια επιπλέον διαβάθμιση των περιοχών μετάβασης ρυθμού ώστε το σύστημα να οδηγείται πλησιέστερα προς την πλήρη βελτιστοποίηση. Συγκεκριμένα, όπως εξηγείται και στην παραπομπή [Chu01], όπου εξετάζονται εναλλακτικοί τρόποι ταυτόχρονης βελτιστοποίησης της ισχύος εκπομπής και της διαμόρφωσης, όσο μειώνεται η απόσταση μεταξύ των σταθμών μετάβασης, τόσο προσεγγίζεται το θεωρητικό όριο χωρητικότητας του Shannon.

3.4 Διαφορική Προστασία

Η διαφορική προστασία συνιστά μια από τις παλαιότερες και πλέον αποτελεσματικές τεχνικές FMT. Γενικά, ο όρος διαφορική προστασία υποδηλώνει τη λήψη του σήματος από ένα εναλλακτικό δίαυλο προκειμένου να αντισταθμίζεται η υποβάθμιση της ποιότητας του κυρίως διαύλου λόγω των διαφόρων φαινομένων διάδοσης. Συγκεκριμένα, η τεχνική της διαφορικής λήψης βρίσκει εφαρμογή στην άμβλυση των επίπεδων διαλείψεων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (διαφορική λήψη χώρου, διαφορική λήψη πόλωσης), στην άμβλυση των επιλεκτικών ως προς τη συχνότητα διαλείψεων (διαφορική λήψη συχνότητας, διαφορική λήψη φάσης) και στην αντιμετώπιση του φαινομένου της σκίασης (shadowing), δηλαδή της απόκλισης του λαμβανομένου σήματος από τη μέση τιμή του στις κινητές επικοινωνίες (macrodiversity). Στην παρούσα ενότητα, αναλύεται σε βάθος η διαφορική λήψη από περισσότερους BS για την αντιμετώπιση των διαλείψεων λόγω βροχής. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή με την ονομασία *διαφορική λήψη κυψέλης* (Cell-Site Diversity, CSD). Η υιοθέτηση της συγκεκριμένης τεχνικής στα δίκτυα LMDS είχε ως αφετηρία της την παραπλήσια τεχνική διαφορικής λήψης (Site Diversity, SD) που εφαρμόζεται στα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών [Pan05b].

Η τεχνική CSD στηρίζεται στην ταυτόχρονη λήψη του σήματος μέσω δύο εναλλακτικών διαδρομών του σήματος από τον BS εκμεταλλευόμενη τις χωρικές ιδιότητες της βροχής ως μέσου διάδοσης. Στο προηγούμενο κεφάλαιο, συζητήθηκε η ανομοιογένεια της χωρικής δομής του ρυθμού βροχόπτωσης. Μάλιστα, στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται ένας βροχοπυρήνας, όπου οι επιφάνειες με βαθύτερη απόχρωση αντιπροσωπεύουν βροχόπτωση υψηλότερου ρυθμού (συνεκτικού τύπου).

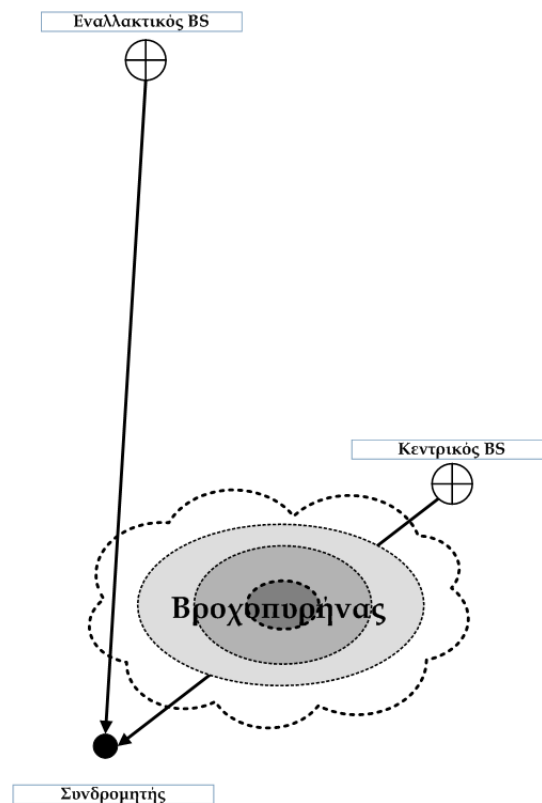
Η ανομοιογένεια αυτή έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές διαδρομές του ραδιοκύματος μέσω βροχής να υπόκεινται σε διαφορετική απόσβεση λόγω της μετακίνησης των βροχοπυρήνων με το χρόνο. Με αναφορά πάλι στο Σχήμα 3.6, καταδεικνύεται ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, καίτοι ο εναλλακτικός BS μπορεί να βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον υπό εξυπηρέτηση SS σε σχέση με τον BS αναφοράς, η πρώτη ζεύξη επιβαρύνεται λιγότερο από τη δεύτερη λόγω της επικάλυψής της από βροχή στρωσιγενούς τύπου. Αναμένεται, λοιπόν, κάθε χρονική στιγμή μόνο μια ζεύξη από τις δύο διαθέσιμες να υποφέρει από υψηλή απόσβεση λόγω βροχής.

Έτσι, προκειμένου να βελτιωθεί ο σηματοθορυβικός λόγος CNR στην είσοδο του δέκτη του συνδρομητή, οι εκπομπές από τους δύο BS συλλέγονται από τον SS και

ακολουθεί η περαιτέρω επεξεργασία τους με βάση κάποιο από τα επόμενα κριτήρια:

- (α) *Συνδυασμός επιλογής* (selection combining): Επιλογή του ισχυρότερου (εκείνου με τον υψηλότερο σηματοθορυβικό λόγο) από τα δύο λαμβανόμενα σήματα.
- (β) *Συνδυασμός μεταγωγής* (switched combining): Μεταγωγή στη ζεύξη από τον εναλλακτικό BS όταν ο λόγος CNR της ζεύξης από τον BS αναφοράς είναι μικρότερος από ένα προκαθορισμένο κατώφλιο.
- (γ) *Συνδυασμός ίσου κέρδους* (equal gain combining): Τα λαμβανόμενα σήματα αθροίζονται κατά σύμφωνο τρόπο.
- (δ) *Συνδυασμός μέγιστου λόγου* (maximal ratio combining): Πριν αθροισθούν, καθένα από τα λαμβανόμενα σήματα πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο συντελεστή βάρους ανάλογα με την τιμή CNR του καθενός.

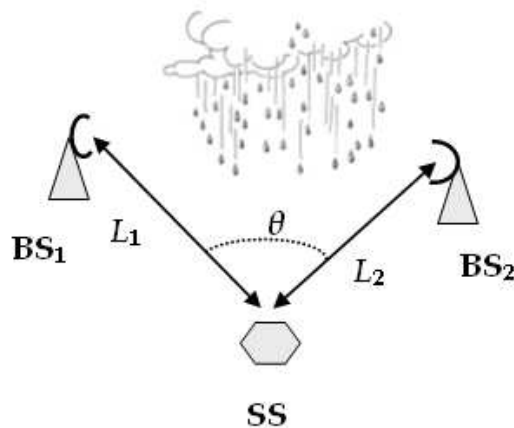
Για το υπόλοιπο της ενότητας, υιοθετείται ο συνδυασμός επιλογής, τεχνική που συνδυάζει την υψηλή επίδοση με την απλότητα σχεδίασης του δέκτη. Κάθε χρονική



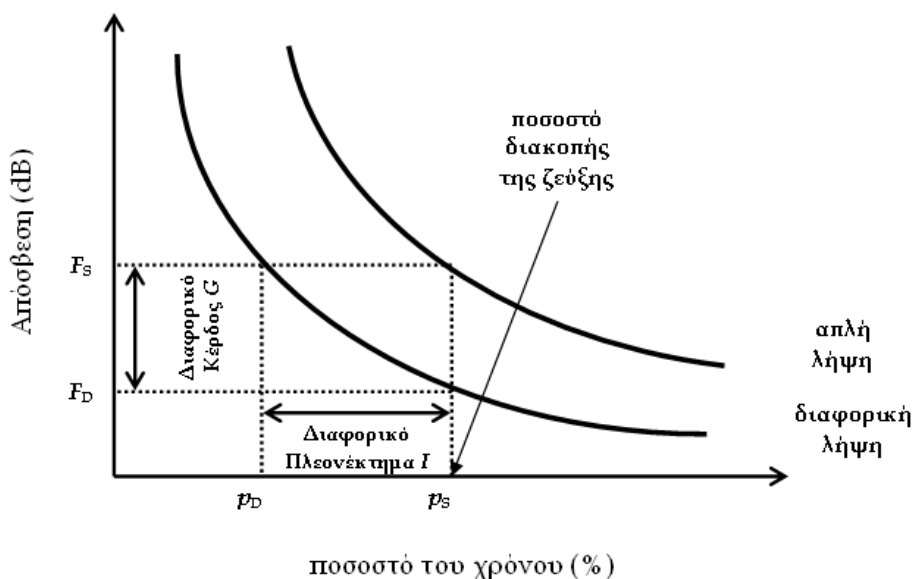
Σχήμα 3.6: Η χωρική ανομοιογένεια της βροχής ως μέσου διάδοσης. Οι επιφάνειες με βαθύτερη απόχρωση στο εσωτερικό του βροχοπυρήνα αντιστοιχούν σε βροχόπτωση υψηλότερου ρυθμού.

στιγμή, η βελτίωση που προέρχεται από την τεχνική CSD εξαρτάται από τη γωνία διαχωρισμού θ που σχηματίζουν οι δύο εναλλακτικές ζεύξεις (βλ. Σχήμα 3.7). Η γωνία διαχωρισμού λαμβάνει τιμές στο διάστημα 0° έως 360° , με τη μέγιστη αποσυσχέτιση της απόσβεσης να εμφανίζεται για $\theta = 180^\circ$.

Η εκτίμηση της επίδοσης κάθε σχήματος διαφορικής λήψης πραγματοποιείται με στατιστικό τρόπο και, συγκεκριμένα, με βάση το ποσοστό του χρόνου $p_D\%$ υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης A , όταν η λήψη γίνεται από δύο σταθμούς BS σε σχέση με το ίδιο ποσοστό $p_S\%$, όταν η λήψη γίνεται αποκλειστικά από το σταθμό αναφοράς.



Σχήμα 3.7: Γεωμετρία σχήματος διαφορικής λήψης κυψέλης.



Σχήμα 3.8: Ορισμός των βασικών παραμέτρων εκτίμησης της επίδοσης ενός σχήματος διαφορικής λήψης.

Λαμβάνοντας υπόψη τις καμπύλες του ποσοστού υπέρβασης μιας στάθμης απόσβεσης του Σχήματος 3.8, η μείωση του περιθωρίου διαλείψεων που επιτυγχάνεται από ένα σύστημα διπλής λήψης σε σχέση με ένα σύστημα απλής λήψης ποσοτικοποιείται μέσω του διαφορικού κέρδους G για συγκεκριμένο ποσοστό του χρόνου $p\%$

$$G(p\%) = F_{S_i}(p\%) - F_D(p\%) \quad (i = 1, 2) \quad (3.22)$$

όπου F_{S_i} το περιθώριο διαλείψεων απλής λήψης ανάλογα με το ποιός σταθμός ($i = 1, 2$) θεωρείται ως σταθμός αναφοράς και F_D το περιθώριο διαλείψεων με διαφορική λήψη. Ισοδύναμα, το διαφορικό πλεονέκτημα I ορίζεται ως ο λόγος του ποσοστού του χρόνου με απλή λήψη προς το ποσοστό του χρόνου με διαφορική λήψη για τα οποία πραγματοποιείται υπέρβαση της ίδιας στάθμης απόσβεσης A

$$I(A) = \frac{p_{S_i}(A)}{p_D(A)} \quad (i = 1, 2) \quad (3.23)$$

Στο υπόλοιπο της ενότητας, πραγματοποιείται μια επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας ως προς την τεχνική CSD και, συγκεκριμένα, τις βάσεις δεδομένων διαφορικής λήψης που έχουν αναπτυχθεί από μετρήσεις radar καθώς και τα εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης της επίδοσης της τεχνικής που προέκυψαν από αυτές. Σε επόμενο στάδιο και σε αντιστοιχία με τη δομή του Κεφαλαίου 2, δίδεται βαρύτητα στην παρουσίαση των αντίστοιχων φυσικών μοντέλων διαφορικής λήψης που εφαρμόζονται σε μεγαλύτερη ποικιλία συνθηκών σε σχέση με τα εμπειρικά. Παρουσιάζονται φυσικά μοντέλα που προσεγγίζουν ικανοποιητικά την επίδοση ενός σχήματος CSD σε εύκρατο κλίμα (με διαχωρισμό μεταξύ των περιπτώσεων βροχής συνεκτικού και στρωσιγενούς τύπου) καθώς και ένα φυσικό μοντέλο με εφαρμογή σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές.

3.4.1 Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας

Οι πρώτες προσπάθειες αξιολόγησης στην πράξη της επίδοσης του σχήματος CSD σε δίκτυα LMDS για την άμβλυνση της επίδρασης της βροχόπτωσης πραγματοποιήθηκαν στην αρχή της δεκαετίας. Η εργασία [Tan00] συνοδεύεται από πειραματικά δεδομένα στα 42GHz. Ακολούθησε η ενδεδειγμένη εργασία [Hen02], όπου δημοσιεύονται δεδομένα διαφορικής λήψης (με συνδυασμό επιλογής) προερχόμενα από μετρήσεις radar στο

Montreal, CAN, στα 30GHz. Στην ίδια μελέτη, πραγματοποιείται σε βάθος διερεύνηση της εξάρτησης του συντελεστή συσχέτισης της απόσβεσης λόγω βροχής σε δύο συγκλίνουσες ζεύξεις από τη γωνία διαχωρισμού θ (βλ. Σχήμα 3.7). Παρόμοια αποτελέσματα μετρήσεων από radar αναφέρονται στο [Usm02] για το Hampshire, UK, στα 42GHz. Οι δύο τελευταίες παραπομπές συνέκλιναν στο συμπέρασμα ότι το διαφορικό κέρδος σε συστήματα CSD, G_{CSD} , προσεγγίζεται από μια συνάρτηση γενικής μορφής $\sin^c(\theta/2)$, όπου η τιμή του εκθέτη c μεταβάλλεται ανάλογα με το σχετικό μήκος των ζεύξεων L_1 και L_2 που συμμετέχουν στο σχήμα CSD. Όταν το σχετικό μήκος ισούται με 1 ($L_1 = L_2$), το σύστημα διαφορικής λήψης χαρακτηρίζεται ως συμμετρικό. Στην περίπτωση όπου $L_1 \neq L_2$, το σύστημα διαφορικής λήψης θεωρείται μη συμμετρικό. Μια παραλλαγή αυτής της εμπειρικής συνάρτησης με σκοπό τον υπολογισμό του διαφορικού κέρδους G_{CSD} και του διαφορικού πλεονεκτήματος I_{CSD} της τεχνικής CSD έχει υιοθετηθεί και από την ITU-R [ITU1410]. Πρόσφατα, η επικέντρωση στον PMP χαρακτήρα των δικτύων LMDS, οδήγησε σε μια εμπειρική μέθοδο [Zna06] που βασίζεται σε τρισδιάστατες βάσεις δεδομένων του ρυθμού βροχόπτωσης από radar. Στόχος της μεθόδου είναι ο υπολογισμός του διαφορικού πλεονεκτήματος συναρτήσει μιας μοναδικής παραμέτρου που περιγράφει τη χωρική κατανομή της βροχόπτωσης σε τρεις διαστάσεις.

3.4.2 Στατιστική θεώρηση της επίδοσης της διαφορικής λήψης κυψέλης σε εύκρατες περιοχές

Σύμφωνα με τη στατιστική θεώρησης της τεχνικής διαφορικής λήψης [Kan91], [Pan02a], το σύστημα CSD τίθεται εκτός λειτουργίας όταν οι απόσβεσεις λόγω βροχής στις δύο εναλλακτικές ζεύξεις A_1 και A_2 υπερβούν ταυτόχρονα τα προκαθορισμένα περιθώρια διαλείψεων F_1 και F_2 . Η αντίστοιχη πιθανότητα διακοπής είναι

$$OP_{CSD} = \Pr\{A_1 \geq F_1, A_2 \geq F_2\} \quad (3.24)$$

Για σύστημα CSD εγκατεστημένο σε περιοχή με εύκρατο κλίμα υιοθετείται το λογαριθμικοκανονικό μοντέλο για την περιγραφή της απόσβεσης λόγω βροχής. Επομένως, η (3.24) οδηγεί στην ακόλουθη σχέση

$$OP_{CSD} = \int_{F_1}^{\infty} \int_{F_2}^{\infty} p_{A_1 A_2}(A_1, A_2) dA_1 dA_2 \quad (3.25)$$

όπου $p_{A_1 A_2}$ η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τ.μ. A_1 και A_2 . Όταν $F_1 = F_2$, το σύστημα CSD θεωρείται ισοσταθμισμένο (balanced), γεγονός που συνεπάγεται, αντίστοιχα, ότι $L_1 = L_2$ και ότι ο εξοπλισμός των δύο BS είναι πανομοιότυπος. Σε κάθε άλλη περίπτωση, το σύστημα CSD θεωρείται μη ισοσταθμισμένο (unbalanced). Προφανώς, ένα ισοσταθμισμένο σύστημα διαφορικής λήψης είναι και συμμετρικό.

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας διακοπής OP_{CSD} , ορίζονται οι μετασχηματισμοί

$$u_i = \frac{\ln A_i - \ln A_{m_i}}{S_{a_i}} \quad (i = 1, 2) \quad (3.26)$$

$$u_{F_i} = \frac{\ln F_i - \ln A_{m_i}}{S_{a_i}} \quad (i = 1, 2) \quad (3.27)$$

όπου οι στατιστικές παράμετροι της κατανομής της απόσβεσης A_{m_i} και S_{a_i} ορίζονται για κάθε ζεύξη ($i = 1, 2$) από τις (2.36) και (2.35), αντίστοιχα. Ακολουθώντας τη μεθοδολογία που παρατίθεται στην Ενότητα Α'.2 του Παραρτήματος Α', προκύπτει η τελική έκφραση για την (3.24)

$$OP_{CSD} = \frac{1}{2} \int_{u_{F_2}}^{\infty} p_{U_1}(u_1) \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{F_1} - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}} \right) du_1 \quad (3.28)$$

όπου

$$p_{U_1}(u_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{u_1^2}{2} \right) \quad (3.29)$$

και ρ_n ο λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης που εξετάζεται στην Ενότητα Α'.5 του Παραρτήματος Α'. Συνδέεται με το συντελεστή συσχέτισης της απόσβεσης λόγω βροχής ρ μέσω της (Α'.32)

$$\rho_n = \frac{1}{S_{a_1} S_{a_2}} \ln \left(1 + \rho \sqrt{[\exp(S_{a_1}^2) - 1][\exp(S_{a_2}^2) - 1]} \right) \quad (3.30)$$

Με τη σειρά του, ο συντελεστής συσχέτισης εκφράζεται μέσω των παραμέτρων H της χωρικής δομής του μέσου βροχόπτωσης (βλ. Παράρτημα Γ')

$$\rho = \frac{H_{12}}{\sqrt{H_1 H_2}} \quad (3.31)$$

Οι παράμετροι H_i , $i = 1, 2$, αντιστοιχούν στο διπλό ολοκλήρωμα του συντελεστή αυτοσυσχέτισης ρ_0 της ειδικής απόσβεσης βροχής κατά μήκος της ζεύξης L_i -βλ. (2.33)- και H_{12} στο διπλό ολοκλήρωμα του συντελεστή ετεροσυσχέτισης ρ_{12} της ειδικής απόσβεσης βροχής κατά μήκος των ζεύξεων L_1 και L_2 -βλ. (Γ'.21)-. Η τελική έκφραση για

τις δύο πρώτες δίδεται από την (2.34), ενώ ο υπολογισμός της τελευταίας παραμέτρου απαιτεί την εφαρμογή μεθόδων αριθμητικής ολοκλήρωσης.

Όπως αποδεικνύεται και στο [Pan02a], το μοντέλο που μόλις περιγράφηκε προσεγγίζει ικανοποιητικά τις πειραματικές βάσεις δεδομένων διαφορικής λήψης (Ενότητα 3.4.1) για υψηλά ποσοστά διαθεσιμότητας (χαμηλά ποσοστά διακοπής), οπότε η υιοθέτηση του συνεκτικού τύπου βροχής είναι κυρίαρχη. Στην εργασία τους [Pan05a], οι συγγραφείς προχώρησαν στην επέκταση του μοντέλου προκειμένου να ενσωματωθεί και η βροχή στρωσιγενούς τύπου που επικρατεί σε περιοχές χαμηλής βροχόπτωσης. Η σημασία αυτής της επέκτασης έγκειται στο γεγονός ότι στις ζώνες υψηλών συχνότητων λειτουργίας των συστημάτων LMDS, ακόμα και οι χαμηλές τιμές βροχόπτωσης επηρεάζουν δυσμενώς την πιθανότητα διακοπής του συστήματος.

Η στρωσιγενής περιγραφή της βροχής αντιστοιχεί σε ρυθμούς βροχόπτωσης της τάξης των 10-20mm/h. Συνεπώς, οι χαμηλότερες τιμές της απόσβεσης είναι αποτέλεσμα της στρωσιγενούς βροχόπτωσης. Για τη διάκριση μεταξύ των τιμών της απόσβεσης που οφείλονται σε κάθε κατηγορία βροχόπτωσης, ορίζεται το κατώφλιο απόσβεσης

$$A_{th} = kR_{th}^a L \quad (3.32)$$

όπου k και a οι γνωστοί συντελεστές της ειδικής απόσβεσης γ_R και R_{th} το κατώφλιο μετάβασης του ρυθμού βροχόπτωσης από βροχή στρωσιγενούς σε βροχή συνεκτικού τύπου. Επειδή στη γενική περίπτωση τα σχήματα CSD δεν είναι συμμετρικά, η παράμετρος L θεωρείται ίση προς το μέσο μήκος των δύο ζεύξεων: $L = 0.5(L_1 + L_2)$.

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας διακοπής OP_{CSD} , η ανάλυση ταυτίζεται με την περίπτωση του συνεκτικού τύπου βροχής. Άρα, η τελική μορφή της δίδεται πάλι από την (3.28). Τα δύο μοντέλα αποκλίνουν ως προς την περιγραφή του συντελεστή ετεροσυσχέτισης της ειδικής απόσβεσης βροχής μεταξύ σημείων των δύο εναλλακτικών ζεύξεων

$$\rho_{str} = \frac{P(1, 2; d)}{P(0)} \frac{e^{a^2 S_r^2}}{e^{a^2 S_r^2} - 1} - \frac{1}{e^{a^2 S_r^2} - 1} \quad (3.33)$$

όπου $P(0)$ η ετήσια πιθανότητα βροχόπτωσης σε κάποιο σημείο, όπως υπολογίζεται από τη Σύσταση ITU-R P.837. Υποθέτοντας ότι τα δύο σημεία απέχουν αποστάσεις l_1 και l_2 ($0 \leq l_i \leq L_i$) από την αρχή της ζεύξης, η μεταξύ τους απόσταση είναι

$$d(l_1, l_2) = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos \theta} \quad (3.34)$$

Η συνάρτηση $P(1, 2; d)$ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ταυτόχρονης βροχόπτωσης σε δύο σημεία που απέχουν απόσταση d

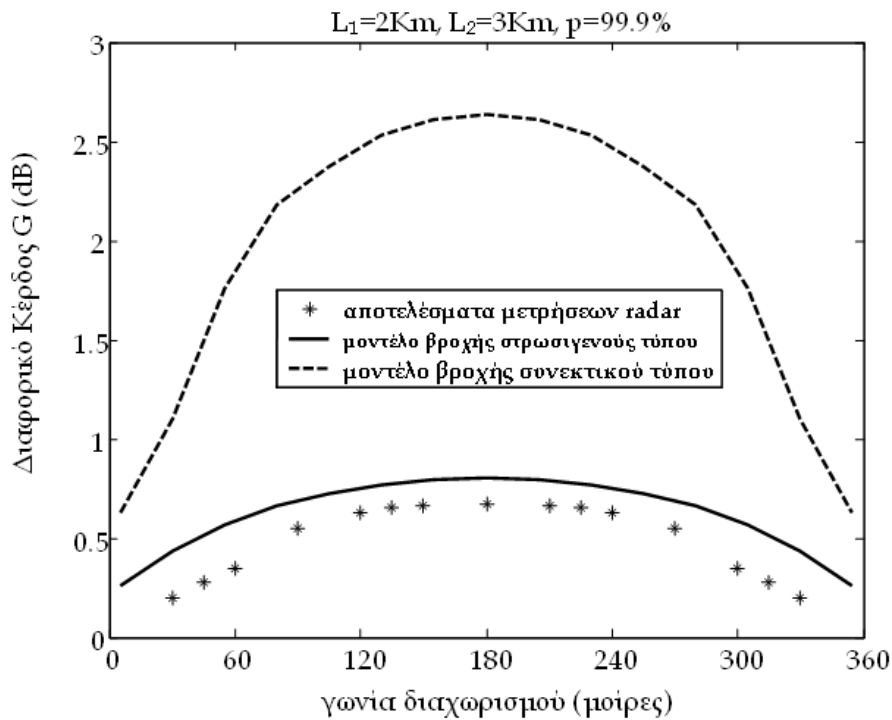
$$P(1, 2; d) = [P(0) - P^2(0)] e^{-q\sqrt{d}} + P^2(0) \quad (3.35)$$

όπου η παράμετρος $q[\text{Km}^{-1/2}]$ χαρακτηρίζει τη χωρική δομή της στρωσιγενούς βροχής ως μέσου διάδοσης. Τα μέχρι τώρα περιορισμένα πειραματικά δεδομένα έχουν αποκαλύψει ότι μια κατάλληλη τιμή για το q είναι $0.06\text{Km}^{-1/2}$. Ωστόσο, απαιτείται επιπλέον σύγκριση με νέα πειραματικά δεδομένα για την υιοθέτηση μιας καθολικής τιμής σε παγκόσμια κλίμακα.

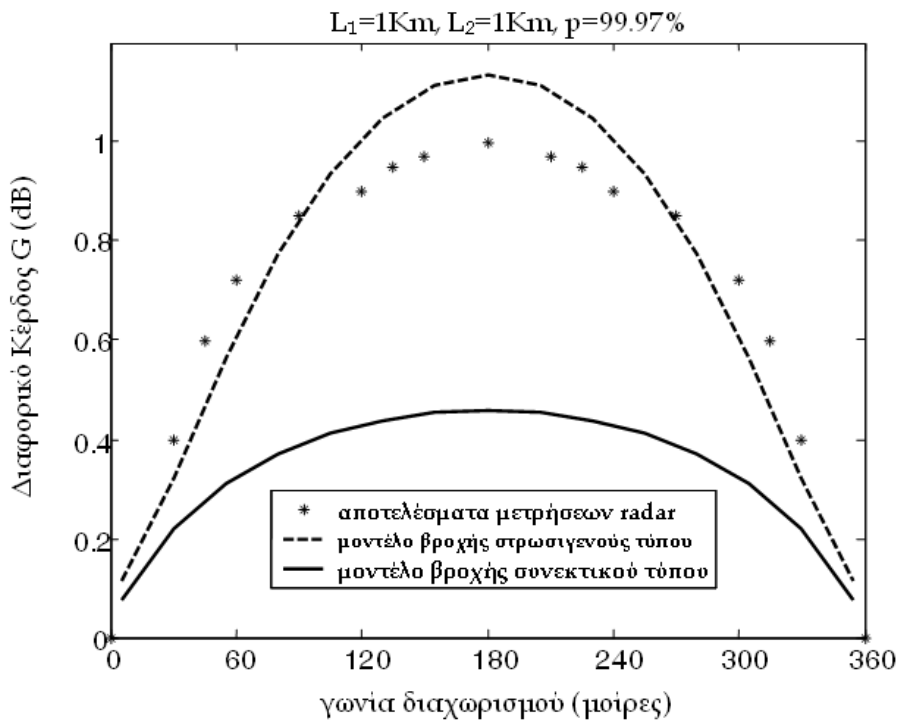
Συνοψίζοντας, η διαδικασία υπολογισμού της πιθανότητας OP_{CSD} συνίσταται στα επόμενα βήματα:

1. Αρχικά, από την (3.32) υπολογίζεται η τιμή του κατωφλίου απόσβεσης A_{th} .
2. Για $A < A_{th}$, η πιθανότητα ταυτόχρονης υπέρβασης του περιθωρίου διαλείψεων και στις δύο εναλλακτικές ζεύξεις προσδιορίζεται από την (3.28), όπου οι παράμετροι H της χωρικής δομής της στρωσιγενούς βροχής προκύπτουν με ολοκλήρωση του συντελεστή συσχέτισης ρ_{str} από την (3.33).
3. Για $A > A_{th}$, η πιθανότητα ταυτόχρονης υπέρβασης του περιθωρίου διαλείψεων και στις δύο εναλλακτικές ζεύξεις προσδιορίζεται πάλι από την (3.28), όπου οι παράμετροι H της χωρικής δομής της συνεκτικής βροχής προκύπτουν σύμφωνα με το Παράρτημα Γ'.

Για να δοκιμασθεί η εγκυρότητα και το εύρος εφαρμογής της προηγούμενης διαδικασίας, το μοντέλο αντιπαράκειται με τα πειραματικά αποτελέσματα από μετρήσεις radar στο Hampshire, UK. Για την εξαγωγή της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης από τη Σύσταση ITU-R P.837 (βλ. Παράρτημα Δ'), απαιτούνται οι γεωγραφικές συντεταγμένες της τοποθεσίας (51.05°N , 1.15°W). Ως αποτέλεσμα, οι στατιστικές παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης προκύπτουν $R_m = 0.0249$ και $S_r = 1.859$. Η τιμή $R_{th} = 10\text{mm/h}$ υιοθετείται ως το κατώφλιο μετάβασης του ρυθμού βροχόπτωσης. Στο Σχήμα 3.9 σχεδιάζεται το κέρδος διαφορικής λήψης G ως συνάρτηση της γωνίας διαχωρισμού θ για το συγκεκριμένο σύστημα CSD. Η συχνότητα λειτουργίας είναι $f = 42\text{GHz}$ και τα μήκη των δύο εναλλακτικών ζεύξεων $L_1 = 2\text{Km}$ και $L_2 = 3\text{Km}$. Φαίνεται ότι, για το μέτριο αυτό ποσοστό διαθεσιμότητας



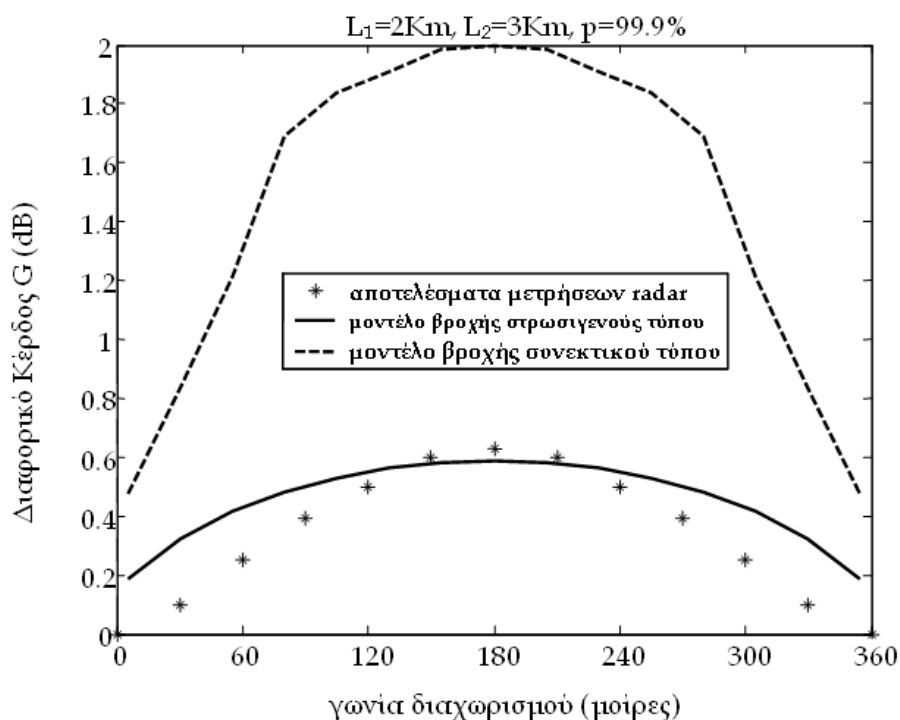
Σχήμα 3.9: Κέρδος διαφορικής λήψης κυψέλης G ως προς γωνία διαχωρισμού. Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα radar από το Hampshire, UK.



Σχήμα 3.10: Κέρδος διαφορικής λήψης κυψέλης G ως προς γωνία διαχωρισμού. Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα radar από το Hampshire, UK.

99.9% ($OP = 0.1\%$), η επέκταση του μοντέλου διαφορικής λήψης για το στρωσιγενή τύπο βροχής προσεγγίζει με μεγαλύτερη επιτυχία τα πειραματικά αποτελέσματα σε σχέση με το αρχικό [Pan02a]. Αντίθετα, από το Σχήμα 3.10 που έχει σχεδιασθεί για το ίδιο σύστημα με $L_1, L_2 = 1\text{Km}$, αλλά για υψηλότερο ποσοστό διαθεσιμότητας 99.97% ($OP = 0.03\%$), το αρχικό μοντέλο βροχής συνεκτικού τύπου εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά. Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι η προτεινόμενη μέθοδος που διακρίνει μεταξύ των περιπτώσεων στρωσιγενούς βροχής και βροχής συνεκτικού τύπου ανάλογα με τη στάθμη απόσβεσης βροχής (και, συνεπώς, ανάλογα με το ποσοστό διαθεσιμότητας) είναι η καταλληλότερη για την προσέγγιση της επίδοσης ενός συστήματος CSD.

Για να εξετασθεί η εφαρμοσιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου για διαφορετικές τοποθεσίες του πλανήτη (ευαισθησία ως προς τα κλιματικά χαρακτηριστικά), στη συνέχεια, πραγματοποιείται νέα σύγκριση για το Montreal, CAN, με γεωγραφικές συντεταγμένες (45.31°N , 73.34°W). Οι αντίστοιχες στατιστικές παράμετροι της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης γίνονται τώρα $R_m = 0.02684$ και $S_r = 1.934$. Στο Σχήμα 3.11 δείχνεται το κέρδος διαφορικής λήψης G ως συνάρτηση της γωνίας διαχωρισμού θ



Σχήμα 3.11: Κέρδος διαφορικής λήψης κυψέλης G ως προς γωνία διαχωρισμού. Σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα radar από το Montreal, CAN.

για το υπό μελέτη σύστημα CSD, υποθέτοντας συχνότητα λειτουργίας $f = 30\text{GHz}$ και μήκη των δύο εναλλακτικών ζεύξεων $L_1 = 2\text{Km}$ και $L_2 = 3\text{Km}$. Το ποσοστό διαθεσιμότητας προδιαγράφεται στο 99.9% ($OP = 0.1\%$). Είναι φανερή η συμφωνία μεταξύ του μοντέλου και των πειραματικών δεδομένων, γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η επιλογή της παραμέτρου $q = 0.06\text{Km}^{-1/2}$ αποτελεί μία ικανοποιητική πρώτη προσέγγιση σε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας και κλιματικές συνθήκες.

3.4.3 Στατιστική θεώρηση της επίδοσης της διαφορικής λήψης κυψέλης σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές

Η ανάπτυξη μιας μεθόδου πρόβλεψης της τεχνικής CSD για συστήματα LMDS σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές είχε ως έναυσμα το ολοένα αυξανόμενο ενδιαφέρον των αναπτυσσόμενων χωρών με παρόμοια κλιματικά χαρακτηριστικά (για παράδειγμα, Νότια Αμερική, Νότια Αφρική, Ανατολική Ασία) να επεκτείνουν τις τηλεπικοινωνιακές υποδομές τους μέσω ασυρμάτων δικτύων, ώστε τα κράτη αυτά να καρπωθούν τα πλεονεκτήματα της ασύρματης πρόσβασης. Η λύση αυτή, αν συνδυασθεί με δορυφορική κάλυψη, μπορεί να αποτελέσει μια τεχνικά και οικονομικά εφικτή λύση για την ταχεία ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου δημόσιου δικτύου, το οποίο προς το παρόν στις χώρες αυτές είναι ανεπαρκές. Άλλωστε, οι τροπικές και υποτροπικές περιοχές χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα έντονες συνθήκες βροχόπτωσης, με συνέπεια να θεωρείται ανέφικτη η λειτουργία των δικτύων BWA χωρίς την προστασία από μία ή περισσότερες τεχνικές FMT. Το προτεινόμενο μοντέλο εκτίμησης της επίδοσης της τεχνικής CSD σε περιοχές όπου η απόσβεση λόγω βροχής είναι οξυμένη βασίζεται στο μοντέλο γάμμα, το οποίο στην παρούσα ενότητα επεκτείνεται στις δύο διαστάσεις [Ara04b]. Ο ορισμός της πιθανότητας διακοπής της λειτουργίας του σχήματος διαφορικής λήψης στηρίζεται στις (3.24) και (3.25), με τη διαφορά ότι η συνάρτηση $p_{A_1A_2}$ είναι η δισδιάστατη κατανομή γάμμα (βλ. Ενότητα Β'.2). Η τελική έκφραση δίδεται από τη σχέση (Β'.24) και αναπαράγεται ως εξής

$$OP_{CSD} = \frac{(1 - \rho)^{v_A}}{\Gamma(v_A)} \sum_{i=0}^{\infty} \rho^i \frac{\Gamma(v_A + i)}{i!} \left[1 - \frac{\gamma(v_A + i, \beta'_{A_1} F_1)}{\Gamma(v_A + i)} \right] \left[1 - \frac{\gamma(v_A + i, \beta'_{A_2} F_2)}{\Gamma(v_A + i)} \right] \quad (3.36)$$

όπου η συνάρτηση $\Gamma(v)$ και η ατελής συνάρτηση $\gamma(a, x)$ ορίζονται από τις (B'.2) και (B'.6), αντίστοιχα. Οι στατιστικές παράμετροι v_A , β_{A_i} και β'_{A_i} ($i = 1, 2$) ορίζονται από τις (2.46), (2.47) και (B'.19), αντίστοιχα. Επιπλέον, ο συντελεστής συσχέτισης της απόσβεσης λόγω βροχής ρ ορίζεται όπως στην (3.31). Η παράμετρος H_i ($i = 1, 2$) υπολογίζεται μέσω της διπλής ολοκλήρωσης του συντελεστή αυτοσυσχέτισης της ειδικής απόσβεσης βροχής

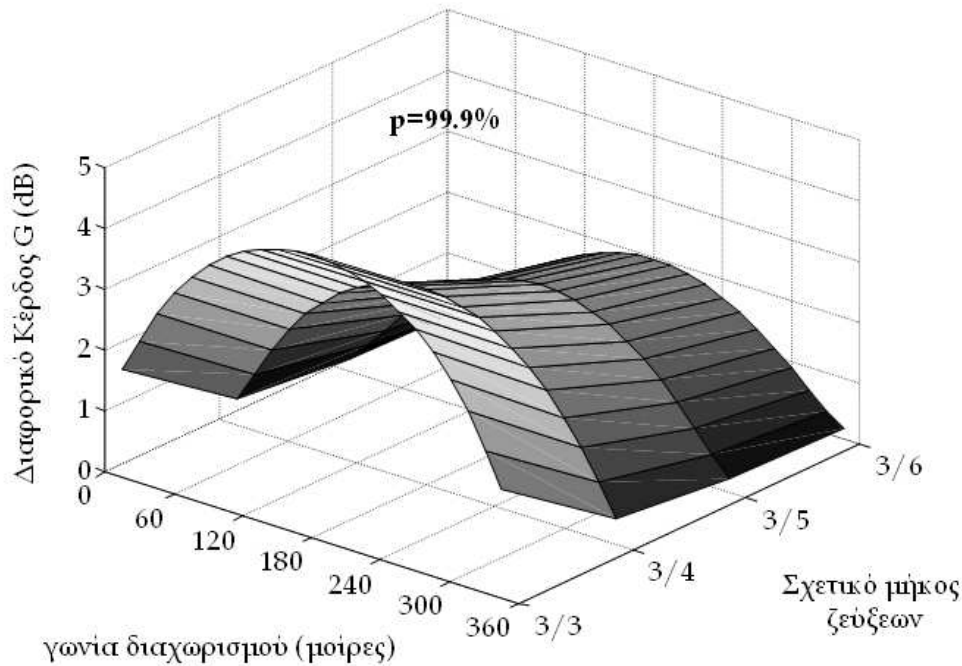
$$\rho_0(x) = \begin{cases} \exp[-c\sqrt{x}] & x \leq D_r \\ \exp[-c\sqrt{D_r}] & x > D_r \end{cases} \quad (3.37)$$

και το τελικό αποτέλεσμα αντιστοιχεί στην (2.40). Αντίστοιχα, η παράμετρος H_{12} υπολογίζεται μέσω της διπλής ολοκλήρωσης του συντελεστή ετεροσυσχέτισης της ειδικής απόσβεσης βροχής

$$\rho_{12}(d) = \begin{cases} \exp[-c\sqrt{d(l_1, l_2)}] & d(l_1, l_2) \leq D_r \\ \exp[-c\sqrt{D_r}] & d(l_1, l_2) > D_r \end{cases} \quad (3.38)$$

Εφόσον δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα διαφορικής λήψης σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές, εξετάζεται, γενικότερα, η εξάρτηση του συστήματος CSD από τις διάφορες παραμέτρους του. Αρχικά, εφαρμόζεται η προτεινόμενη μέθοδος σε ένα υποθετικό σύστημα διαφορικής λήψης LMDS εγκατεστημένο στη Singapore, SG (1.17°N, 103.51°E), στα 28GHz με κατακόρυφη πόλωση. Οι στατιστικές παράμετροι του ρυθμού βροχόπτωσης προκύπτουν $v_R = 0.006$ και $\beta_R = 0.0235$. Το διάγραμμα του διαφορικού κέρδους G ως προς τη γωνία διαχωρισμού θ και το σχετικό μήκος των δύο εναλλακτικών ζεύξεων L_1/L_2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12, στο οποίο η ζεύξη του SS με τον BS αναφοράς θεωρείται σταθερή ($L_1 = 3\text{Km}$) και μεταβάλλεται το μήκος L_2 . Καθώς η απόσβεση λόγω βροχής στις υπό μελέτη περιοχές μπορεί να λάβει πολύ υψηλές τιμές, το σχήμα έχει σχεδιασθεί με βάση μια ενδιάμεση τιμή διαθεσιμότητας 99.9% ($OP = 0.01\%$), επιτυγχάνοντας διαφορικά κέρδη που φθάνουν τα 4dB.

Αντίστοιχα, ένα σύστημα CSD περιγράφεται ισοδύναμα από το διαφορικό πλεονέκτημα I . Επιλέγοντας τώρα ως περιοχή λειτουργίας του υποθετικού συστήματος το Rio, BR (22.53°S, 43.12°W), με στατιστικές παραμέτρους του ρυθμού βροχόπτωσης $v_R = 0.002$ και $\beta_R = 0.0329$, στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζεται το διάγραμμα του διαφορικού πλεονεκτήματος I ως προς τη γωνία διαχωρισμού θ και το σχετικό μήκος των δύο εναλλακτικών ζεύξεων L_1/L_2 (με $L_1 = 3\text{Km}$). Το περιθώριο διαλείψεων υποτίθεται ίσο με $F = 20\text{dB}$, ενώ οι ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος (συχνότητα, πόλωση) είναι ίδιες με προηγούμενως.



Σχήμα 3.12: Κέρδος διαφορικής λήψης κυψέλης G ως προς τη γωνία διαχωρισμού και το σχετικό μήκος των δύο εναλλακτικών ζεύξεων. Παράδειγμα συστήματος CSD εγκατεστημένου στην Singapore, SG.

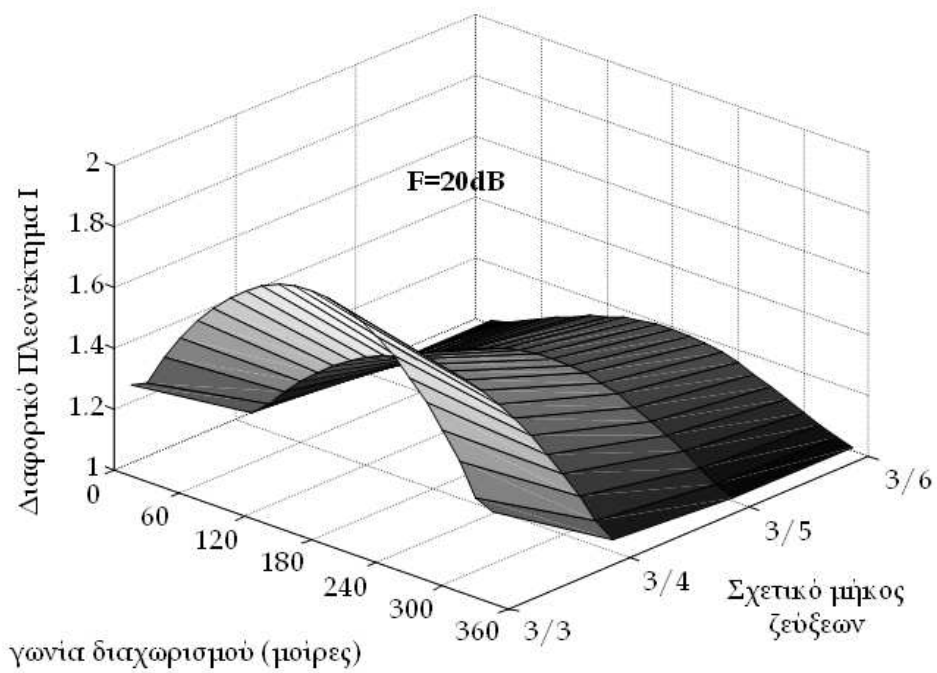
Από τα Σχήματα 3.12 και 3.13 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η επίδοση του συστήματος CSD μειώνεται καθώς αυξάνει το μήκος μιας από τις δύο ζεύξεις. Η εξήγηση για το συγκεκριμένο αποτέλεσμα έγκειται στο γεγονός ότι, όταν $L_1 \neq L_2$, η επίδοση του συστήματος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή της απόσβεσης στη βραχέος μήκους ζεύξη, από την οποία εξυπηρετείται ο SS κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του χρόνου, αφού επηρεάζεται λιγότερο από την απόσβεση λόγω βροχής.

Αναγωγή σε όρους BER – Επεκτείνοντας τη διαδικασία που αναπτύχθηκε στις (3.11)-(3.14) είναι δυνατή η αναγωγή των μέτρων επίδοσης του σχήματος διαφορικής λήψης (κέρδος, πλεονέκτημα), από όρους απόσβεσης σε όρους BER. Προς τούτο, θεωρείται η από κοινού πιθανότητα υπέρβασης μιας στάθμης BER

$$OP_{CSD} = \Pr \{BER_1 \geq BER(\gamma_{th_1}), BER_2 \geq BER(\gamma_{th_2})\} \quad (3.39)$$

όπου, με εφαρμογή της (3.13) για απόσβεση ίση με το περιθώριο διαλείψεων, προκύπτει η τιμή κατωφλίου για το λόγο γ

$$\gamma_{th_i}[\text{dB}] = \left[\frac{E_s}{N_0} \right]_{cs_i} - F_i[\text{dB}] \quad (i = 1, 2). \quad (3.40)$$



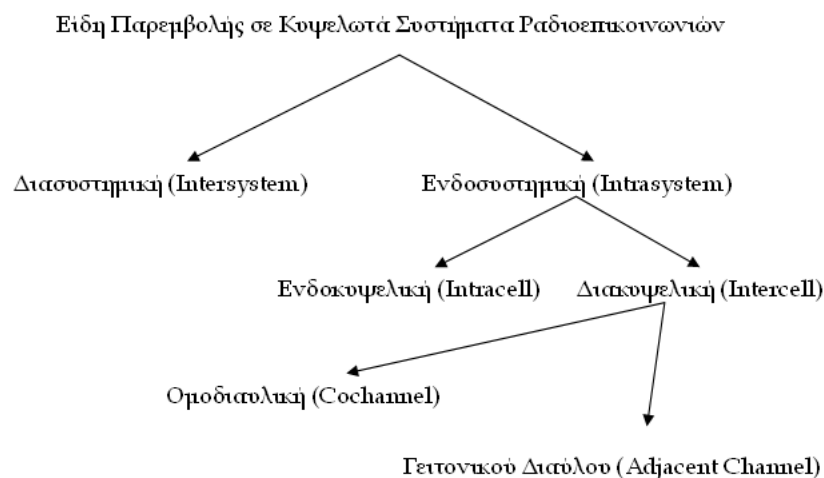
Σχήμα 3.13: Πλεονέκτημα διαφορικής λήψης κυψέλης I ως προς τη γωνία διαχωρισμού και το σχετικό μήκος των δύο εναλλακτικών ζεύξεων. Παράδειγμα συστήματος CSD εγκατεστημένου στο Rio, BR.

Κεφάλαιο 4

Διακυψελική Παρεμβολή σε Σταθερά Δίκτυα BWA

4.1 Γενικά

Η παρεμβολή αποτελεί το σημαντικότερο περιοριστικό παράγοντα της επίδοσης ασυρμάτων δικτύων με κυψελωτή αρχιτεκτονική, όπως είναι τα δίκτυα BWA. Ανάλογα με την προέλευσή τους, τα είδη παρεμβολής σε ένα κυψελωτό σύστημα ραδιοεπικοινωνιών ταξινομούνται σύμφωνα με το Σχήμα 4.1. Συγκεκριμένα, όταν η πηγή της παρεμβολής προέρχεται από το ίδιο το σύστημα ονομάζεται *ενδοσυστημική*, ενώ όταν προέρχεται από διαφορετικό σύστημα ονομάζεται *διασυστημική*. Με τη σειρά της, η πρώτη κατηγορία διακρίνεται στη *διακυψελική* παρεμβολή (intercell interference), όταν ο παρεμ-



Σχήμα 4.1: Είδη Παρεμβολής σε Κυψελωτά Συστήματα Ραδιοεπικοινωνιών.

βάλλων σταθμός ανήκει σε διαφορετική κυψέλη με το σταθμό που υπόκειται σε παρεμβολή ή την ενδοκυψελική παρεμβολή (intracell interference), όταν ο παρεμβάλλων σταθμός ανήκει στην ίδια κυψέλη¹. Η μελέτη της διακυψελικής παρεμβολής διακρίνεται σε ομοδιαυλική παρεμβολή (cochannel interference, CCI) και σε παρεμβολή γειτονικού διαύλου (adjacent channel interference, ACI).

Η αναχρησιμοποίηση της συχνότητας που υιοθετείται από τα κυψελωτά συστήματα ραδιοεπικοινωνιών συνεπάγεται ότι, σε μια δεδομένη περιοχή κάλυψης, πολλές κυψέλες χρησιμοποιούν κοινή ζώνη συχνοτήτων (ομοδιαυλικές κυψέλες). Από τις κυψέλες αυτές προέρχεται η ομοδιαυλική παρεμβολή. Μάλιστα, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 1.5.2, τα σταθερά δίκτυα BWA που λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων 10-66GHz αναχρησιμοποιούν ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης τουλάχιστον μια φορά σε κάθε κυψέλη. Σε αντίθεση με το θερμικό θόρυβο, η παρεμβολή CCI δεν μπορεί να αντιμετωπισθεί αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής των σταθμών, γεγονός που συνεπάγεται τη συνακόλουθη αύξηση της σταθμής παρεμβολής προς τους υπόλοιπους σταθμούς του συστήματος.

Για την άμβλυνση της παρεμβολής CCI που εμφανίζεται στα συστήματα LMDS λόγω αναχρησιμοποίησης του εύρους ζώνης σε κάθε κυψέλη, εφαρμόζεται η τεχνική της εναλλαγής πολώσεων. Κατά συνέπεια, στην παρούσα εργασία ως ACI θεωρείται η παρεμβολή που προκαλείται λόγω της αποπόλωσης των ραδιοκυμάτων που εκπέμπονται από ένα σταθμό που λειτουργεί στην ίδια συχνότητα αλλά σε ορθογώνια πόλωση. Η προηγούμενη θεώρηση διαφέρει από το συνήθη ορισμό που υιοθετείται από τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, όπου η παρεμβολή ACI προέρχεται από φασματικά γειτονικά σήματα. Οφείλεται στα μη ιδανικά φίλτρα του δέκτη που επιτρέπουν τη μερική διέλευση σημάτων που ανήκουν σε γειτονική συχνότητα. Ωστόσο, για τα συστήματα που μελετώνται στο παρόν κεφάλαιο, υποτίθεται ότι το σημαντικό εύρος ζώνης που διατίθεται εξασφαλίζει την ύπαρξη ζωνών προστασίας (guard bands) με επαρκές εύρος.

Ακολουθώντας την τάση των σύγχρονων σταθερών δικτύων BWA που βασίζονται στα πρότυπα IEEE 802.16 και ETSI BRAN HIPERACCESS, η μελέτη της διακυψελικής παρεμβολής πραγματοποιείται για συστήματα με πολλαπλή πρόσβαση TDMA για τη ζεύξη upstream. Για τη ζεύξη downstream επιλέγεται το σχήμα πολύπλεξης

¹ Συχνά, η συγκεκριμένη κατηγορία παρεμβολής εξειδικεύεται περαιτέρω σε ενδοτομεακή (intra-sector) και διατομεακή (intersector) παρεμβολή.

TDM. Όσον αφορά την αμφιδρόμηση, αυτή υλοποιείται μέσω FDD ή TDD, αφού και τα δύο σχήματα είναι αποδεκτά από το πρότυπο. Ωστόσο, στην περίπτωση του δεύτερου σχήματος, απαιτείται ο λόγος των χρονικών σχισμών που ανατίθενται κατά τη λειτουργία upstream και downstream να είναι σταθερός σε όλες τις κυψέλες (static TDD). Στην αντίθετη περίπτωση, υπάρχει πιθανότητα πρόκλησης ισχυρής παρεμβολής μεταξύ σταθμών που βρίσκονται ταυτόχρονα σε αντίθετες φάσεις μετάδοσης. Η μελέτη της παρεμβολής λόγω εφαρμογής της δυναμικής πολύπλεξης TDD (dynamic TDD) με μεταβλητό όριο μεταξύ των χρονικών σχισμών upstream και downstream βρίσκεται εκτός αντικειμένου της παρούσας εργασίας. Η στατιστική ανάλυση της δυναμικής TDD σε σταθερά ασύρματα δίκτυα καθώς και ορισμένες τεχνικές ανάθεσης πόρων για τη μείωση της εμφανιζόμενης παρεμβολής, περιγράφονται στην παραπομπή [Jeo02].

Η διάρθρωση της ύλης του συγκεκριμένου κεφαλαίου έχει ως εξής: Στην Ενότητα 4.2 πραγματοποιείται μια εκτενής παρουσίαση της διεθνούς βιβλιογραφίας ως προς το αντικείμενο της διακυβελικής παρεμβολής στα σταθερά ευρυζωνικά ασύρματα δίκτυα. Στην προπαρασκευαστική Ενότητα 4.3, παρατίθενται οι απαραίτητοι ορισμοί και οι υποθέσεις που έχουν γίνει. Ακολουθεί η μοντελοποίηση της διακυβελικής παρεμβολής σε LOS σταθερά δίκτυα BWA σε συχνότητες 10-66GHz στη ζεύξη downstream (Ενότητα 4.4) και στη ζεύξη upstream (Ενότητα 4.5).

Στη γενική περίπτωση, για την εκτίμηση της επίδοσης του συστήματος παρουσία παρεμβολών, χρησιμοποιείται το θεμελιώδες μέγεθος ισχύς σήματος - προς - ισχύ παρεμβολής (Carrier-to-Interference Ratio, CIR). Συγκεκριμένα, αρχικά μελετώνται οι στατιστικές ιδιότητες του CIR όταν το επιθυμητό και τα παρεμβάλλοντα σήματα υπόκεινται σε διαλείψεις υπό συνθήκες διάδοσης NLOS αλλά, στη συνέχεια, επικεντρώνεται, κυρίως, σε αρχιτεκτονικές δικτύου LOS. Βασικός στόχος της μελέτης παρεμβολών είναι ο αναλυτικός προσδιορισμός της πιθανότητας διακοπής λόγω παρεμβολής

$$OP_I = \Pr \left\{ \frac{C}{I} \leq \gamma_{th} \right\} \quad (4.1)$$

Η πιθανότητα OP_I αποτελεί μια κρίσιμη προδιαγραφή της QoS σε κυψελωτά συστήματα, αφού, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, υπερσχύει του λόγου CNR κατά τον προσδιορισμό της συνολικής πιθανότητας διακοπής. Στην προηγούμενη σχέση, η ποσότητα C αναπαριστά την ισχύ του επιθυμητού σήματος και I το άθροισμα των παρεμβολών CCI και ACI που λαμβάνονται από το σταθμό αναφοράς. Τέλος, η μεταβλητή γ_{th} συμβολίζει στο παρόν την τιμή κατωφλίου του λόγου CIR που προδιαγράφεται από το

σύστημα.

4.2 Επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας

Η εργασία [Gon99] αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια αξιολόγησης της επίδρασης που έχει η ομοδιαυλική παρεμβολή σε ένα κυψελωτό σύστημα LMDS. Μεγάλη βαρύτητα δόθηκε από τη συγκεκριμένη εργασία στη χρήση κατευθυντικών κεραιών, τόσο από την πλευρά των σταθμών SS όσο και από τους τομείς των BS, δεδομένου ότι οι μελέτες ομοδιαυλικής παρεμβολής τότε αφορούσαν ομοιοκατευθυντικές κεραιές ή κεραιές ευρείας κάλυψης σε συστήματα κινητών επικοινωνιών. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η επίδραση του εύρους HPBW των κεραιών, του κατευθυντικού κέρδους της κεραιάς και της τεχνικής ελέγχου της ισχύος στην πιθανότητα διακοπής OP_I . Στο [Far00] εξετάζονται επιπλέον διάφοροι τρόποι χωρισμού της κυψέλης σε τομείς με εκμετάλλευση ορθογώνιων πολώσεων, γεγονός που οδηγεί στη διάκριση μεταξύ των ειδών παρεμβολής CCI και ACI, υπό την έννοια που αυτές ορίστηκαν προηγουμένως.

Αμφότερες οι εργασίες [Gon99] και [Far00] υποθέτουν ότι η διάδοση στα συστήματα LMDS είναι σχεδόν LOS (nearly LOS). Με τον όρο αυτό υπονοείται ότι οι ζεύξεις μεταξύ σταθμών βάσης και συνδρομητή εμποδίζονται μερικώς και χαρακτηρίζονται από διαλείψεις λόγω σκίασης (shadowing). Αυτός ο τύπος διαλείψεων περιγράφεται στατιστικά μέσω μιας λογαριθμοκανονικής τ.μ. ξ με μέση τιμή μηδέν ή, επιλέγοντας την κλίμακα dB, από μία κανονική τ.μ. με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$p(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\xi} \exp\left\{-\frac{\xi^2}{2\sigma_\xi^2}\right\} \quad (4.2)$$

όπου η παράμετρος σ_ξ είναι η τυπική απόκλιση λόγω σκίασης.

Στην περίπτωση της σκίασης, κατά τον υπολογισμό της πιθανότητας διακοπής OP_I πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλαπλές πηγές παρεμβολής θεωρώντας ότι

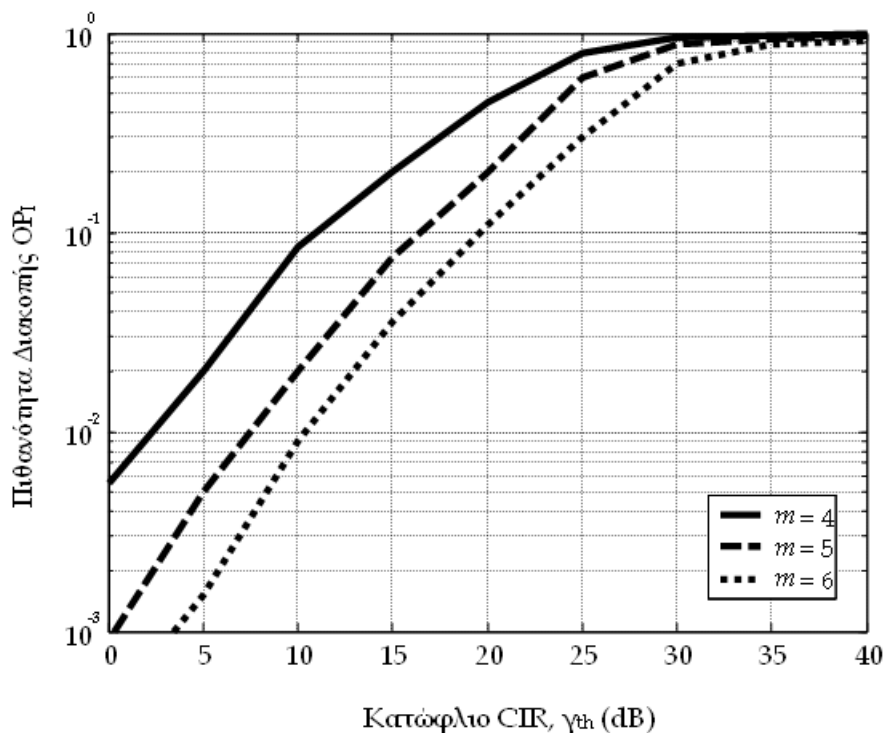
$$I = 10 \log \left[\sum_{k=1}^K 10^{I_k/10} \right] \quad (4.3)$$

όπου I_k [dB] η ισχύς παρεμβολής από το σταθμό $k = 1, \dots, K$ που υπόκειται σε σκίαση. Επομένως, για να καταστεί δυνατή η στατιστική μοντελοποίηση του λόγου CIR, είναι απαραίτητο να ορισθεί μια νέα τ.μ. I που αποτελεί το άθροισμα πεπερασμένου πλήθους τ.μ. που ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Καίτοι δεν είναι γνωστή μια

ακριβής έκφραση για την κατανομή ενός τέτοιου αθροίσματος, διάφοροι ερευνητές έχουν αναπτύξει προσεγγιστικές μεθόδους. Οι περισσότερες από αυτές χειρίζονται το άθροισμα των λογαριθμοκανονικών τ.μ. ως λογαριθμοκανονική κατανομή, επίσης. Μια μέθοδος που εξισώνει τις ροπές πρώτης και δεύτερης τάξης με αυτές της προσεγγιστικής κατανομής έχει αναπτυχθεί από τον Fenton [Fen60], ενώ η μέθοδος Schwartz-Yeh [Sch82] χρησιμοποιεί αναδρομικές σχέσεις χωρίζοντας τις K τ.μ. σε ομάδες των δύο τ.μ. και εξισώνοντας τις ροπές τους με τις ακριβείς ροπές πρώτης και δεύτερης τάξης².

Άλλη σημαντική παράμετρος, που επηρεάζει το μέγεθος της παρεμβολής όταν η διάδοση είναι σχεδόν LOS, είναι η τιμή του εκθέτη απωλειών m , ο οποίος, όταν υπάρχει σκίαση, υπερβαίνει την τιμή 2 που αντιστοιχεί στη διάδοση LOS. Στο Σχήμα 4.2 σχεδιάζεται η πιθανότητα διακοπής OP_I για διάφορες τιμές της συγκεκριμένης παράμετρου. Επιπλέον, στις εφαρμογές κινητών επικοινωνιών, η τυπική απόκλιση σε έχει μελετηθεί επαρκώς και είναι γνωστό ότι λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από

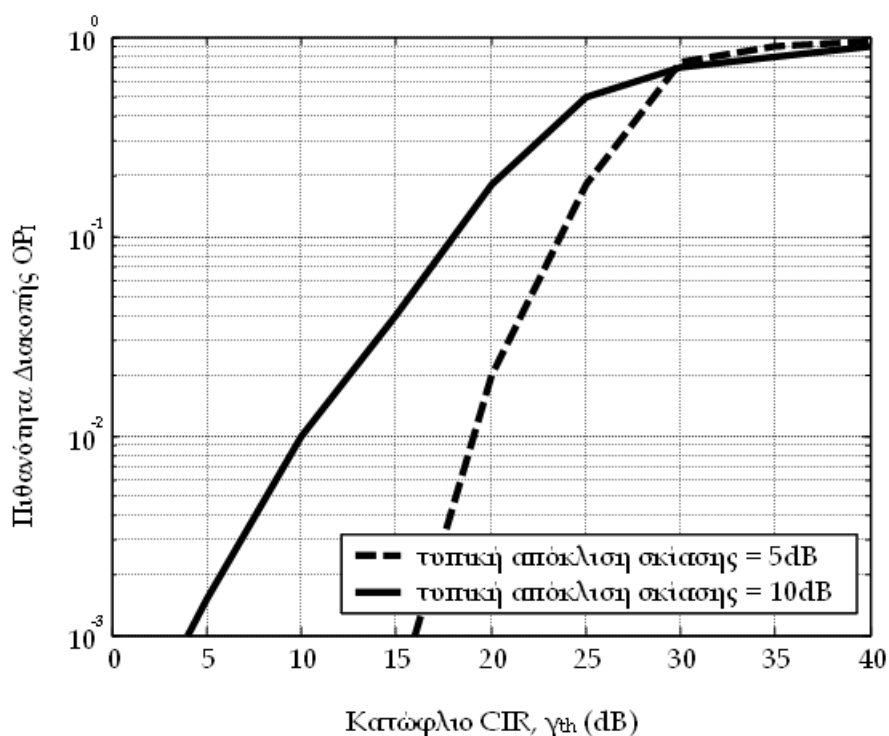
²Σημειώνεται ότι εκτός από αυτές τις δύο θεμελιώδεις μεθόδους, η έρευνα για τη βελτίωση της προσέγγισης του αθροίσματος πεπερασμένου πλήθους λογαριθμοκανονικών τ.μ. εξακολουθεί να είναι επίκαιρη –βλ., για παράδειγμα, [Pra06]–.



Σχήμα 4.2: Πιθανότητα διακοπής OP_I ως προς το κατώφλιο CIR γ_{th} σε ένα κυβελωτό σύστημα LMDS για διάφορες τιμές του εκθέτη απωλειών m .

5 έως 12dB σε μακροκυψέλες και από 4 έως 13dB σε μικροκυψέλες. Επίσης, εμφανίζει μια ελαφρά αύξηση καθώς αυξάνεται η συχνότητα (είναι υψηλότερη κατά 0.8dB στα 1800MHz σε σχέση με τα 900MHz) [Stu01]. Πάντως, για συστήματα LMDS που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz, δεν υπάρχουν παρόμοιες μετρήσεις. Με αναφορά στο Σχήμα 1.7δ (παράγοντας αναχρησιμοποίησης 4), στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η πιθανότητα διακοπής OP_I για δύο τιμές της τυπικής απόκλισης λόγω σκίασης. Τα Σχήματα 4.2 και 4.3 έχουν αναπαραχθεί από το [Far00] και έχουν εξαχθεί βάσει της μεθόδου Schwartz-Yeh.

Πλέον, έχει καταστεί σαφές για την ερευνητική κοινότητα ότι η λειτουργία των σταθερών δικτύων BWA στις συχνότητες 10-66GHz είναι εφικτή μόνο υπό συνθήκες LOS, διαφορετικά η επίδοση του δικτύου επιδεινώνεται δραματικά [ITU1410]. Στο πλαίσιο αυτό, δημοσιεύθηκαν οι εργασίες [Bos04a], [Bau05]. Αφορούν μια συστηματική ανάλυση της παρεμβολής σε LOS δίκτυα LMDS σε δύο διαστάσεις και σε τρεις διαστάσεις, δηλαδή αποκλειστικά στο επίπεδο του αζιμουθίου και λαμβάνοντας υπόψη και τα ύψη των κτιρίων, αντίστοιχα. Ως μοντέλο διάδοσης υιοθετείται η προτεινόμενη μεθοδολογία της Σύστασης ITU-R P.452 [ITU452] με εφαρμογή σε επίγειους μικροκυ-



Σχήμα 4.3: Πιθανότητα διακοπής OP_I ως προς το κατώφλιο CIR γ_{th} σε ένα κυψελωτό σύστημα LMDS για διάφορες τιμές της τυπικής απόκλισης της σκίασης σε.

ματικούς σταθμούς που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 0.7GHz. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει ένα στατιστικό παράγοντα που εκφράζει τη βραχυπρόθεσμη μεταβολή (αύξηση ή μείωση) του λαμβανομένου σήματος λόγω πολυδιαδρομικών διαλείψεων και φαινομένων εστίασης (focusing).

Ως προς τη μελέτη της παρεμβολής σε τρεις διαστάσεις, σημαντική είναι η συνεισφορά της εργασίας [Bau05], όπου γίνεται χρήση της τοπογραφικής βάσης δεδομένων του Munich, D. Η αξία της ανάλυσης έγκειται στο γεγονός ότι, στην πράξη, τα δίκτυα LOS που εγκαθίστανται σε αστικές περιοχές επιβάλλουν την τοποθέτηση της κεραίας του BS σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο ύψος. Κατά συνέπεια, είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη οι γωνίες ανύψωσης και τα ύψη των κτιρίων. Για να ενσωματωθεί στο μοντέλο παρεμβολής η χωρική διάκριση των λαμβανομένων σημάτων λόγω του κατευθυντικού κέρδους της κεραίας SS, λαμβάνεται υπόψη ότι στις τρεις διαστάσεις, το εύρος HPBW σχηματίζει στερεά γωνία. Εκτός από την παρεμπόδιση της ζεύξης και τον περιορισμό της ραδιοκάλυψης εντός της κυψέλης, η παρουσία ενός υψηλού κτιρίου έχει και ευνοϊκή επίδραση στο μέγεθος της παρεμβολής CCI. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν η διάδοση πραγματοποιείται με LOS, οπότε ο σταθμός SS δέχεται το μεγαλύτερο μέρος της παρεμβολής από μια συγκεκριμένη κυρίαρχη πηγή. Τότε, η παρεμβολή CCI μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως, τοποθετώντας την κεραία του συνδρομητή αρκετά χαμηλότερα σε σχέση με τον BS από τον οποίο εξυπηρετείται, ώστε να παραμένει σε LOS ως προς αυτόν αλλά, ταυτόχρονα, ο παρεμβάλλον BS (interfering BS, IBS) να βρίσκεται εκτός του εύρους HPBW της κεραίας του SS. Συνοψίζοντας, τα πορίσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του λόγου CIR σε τρεις διαστάσεις είναι:

- Όταν ο επιθυμητός BS έχει τοποθετηθεί σε συγκεκριμένο ύψος, η αύξηση του ύψους τοποθέτησης του IBS οδηγεί σε αύξηση της παρεμβολής στην οποία υπόκειται ο συνδρομητής.
- Όταν ο IBS έχει τοποθετηθεί σε συγκεκριμένο ύψος, η αύξηση του ύψους τοποθέτησης του επιθυμητού BS οδηγεί σε μείωση του ποσοστού των συνδρομητών της κυψέλης που υπόκεινται σε παρεμβολή.
- Αυξάνοντας το ύψος τοποθέτησης όλων των BS επιτείνεται το πρόβλημα της παρεμβολής σε όλο το δίκτυο.
- Καθώς κάθε BS λειτουργεί ως IBS στις γειτονικές προς αυτόν κυψέλες, η τοπο-

θέτηση των κεραιών όλων των BS στο ίδιο περίπου ύψος αποτελεί μια αποτελεσματική σχεδίαση του δικτύου.

Όπως έγινε φανερό από τα προηγούμενα κεφάλαια, ο πλέον επιβαρυντικός παράγοντας υποβάθμισης της διάδοσης σε σταθερά δίκτυα BWA που λειτουργούν άνω των 10GHz υπό συνθήκες LOS είναι η απόσβεση λόγω βροχής. Μάλιστα, σημαντική είναι η επίδραση του συγκεκριμένου παράγοντα και στο λόγο CIR, όπως αποκάλυψε η εργασία [Par02], όπου δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στον υπολογισμό της κατανομής του CIR λόγω αποπόλωσης, δηλαδή της παρεμβολής ACI. Προς τούτο, τροποποιήθηκε κατάλληλα το φυσικό μοντέλο πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής με την ονομασία EXCELL. Παράλληλα, πολυετείς μετρήσεις του CIR σε ένα σύστημα LMDS εγκατεστημένο στην Taiwan λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση βροχοπτώσεων παρουσιάζονται στο [Chu05]. Η συχνότητα λειτουργίας του υπό μελέτη συστήματος ήταν 28.35GHz, ενώ κατά την ανάλυση θεωρήθηκαν διαφορετικές τιμές για την ακτίνα της κυψέλης στο εύρος 1-6Km. Η επέκταση της μελέτης όσον αφορά τη λειτουργία του ίδιου συστήματος με βάση την ψηφιακή διαμόρφωση M-QAM παρουσιάστηκε στο [Che07].

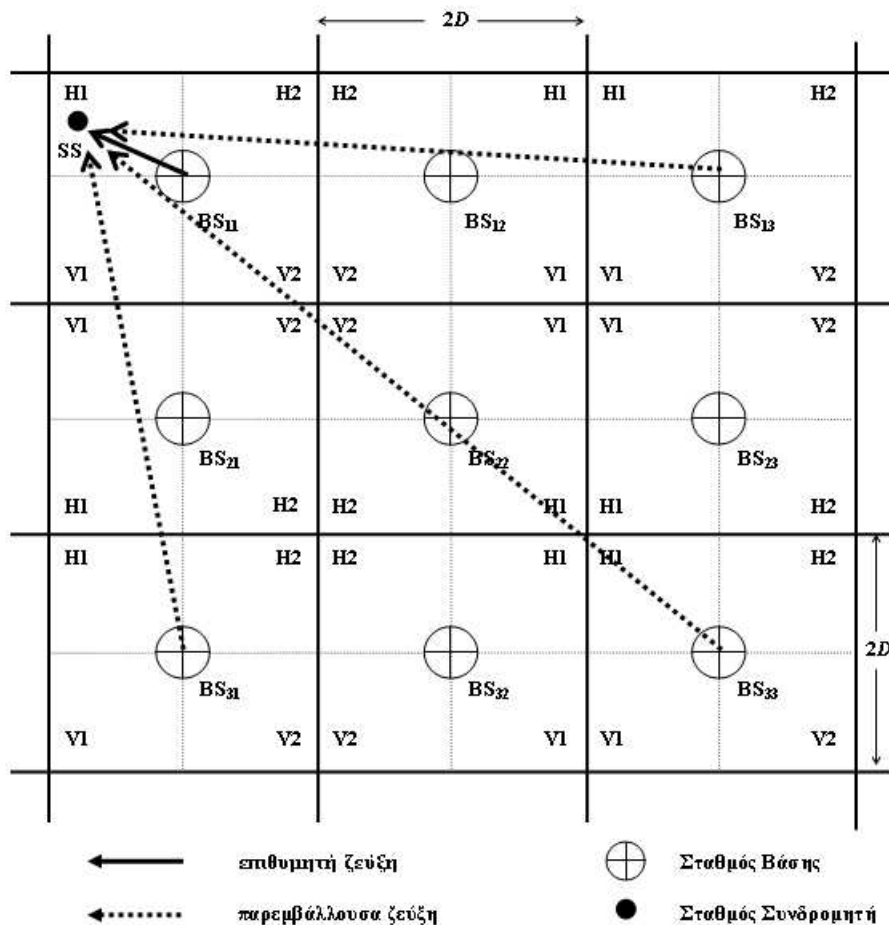
Στο υπόλοιπο του κεφαλαίου παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη στατιστική ανάλυση της παρεμβολής σε ένα σύστημα LMDS παρόμοιο με αυτό που μόλις περιγράφηκε. Η ανάλυση έχει ως υπόβαθρο τα φυσικά μοντέλα πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής που αναπτύχθηκαν λεπτομερώς στα προηγούμενα κεφάλαια και προορίζεται για εφαρμογή σε καθολική κλίμακα.

4.3 Ορισμοί και υποθέσεις του μοντέλου πρόβλεψης της διακυψελικής παρεμβολής

Αντίθετα από τις μελέτες που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.2, το προτεινόμενο μοντέλο διακυψελικής παρεμβολής [Pan07] εμβαθύνει στην επίδραση που έχει η χωρική δομή της βροχής ως μέσου διάδοσης στη διακυψελική παρεμβολή. Τα σενάρια παρεμβολής καθώς και τα αντίστοιχα στατιστικά μοντέλα του λόγου CIR εξετάζονται χωριστά για τις ζεύξεις upstream και downstream. Για τη ζεύξη downstream, το πρόβλημα διαχωρίζεται περαιτέρω μεταξύ CCI και ACI. Για τη ζεύξη upstream, το πρόβλημα διαχωρίζεται ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο βρόχος ελέγχου της ισχύος.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η κάτοψη της κυβελωτής αρχιτεκτονικής του υπό μελέτη δικτύου BWA. Αποτελείται από ένα πλέγμα τετραγωνικών κυβελών, όπου κάθε κυβέλη χωρίζεται σε τέσσερις τομείς των 90° (βλ. Ενότητα 1.5.2). Οι διαφορετικοί BS θα διακρίνονται στα επόμενα με αναφορά στους δείκτες τους, σε αντιστοιχία με τα στοιχεία ενός πίνακα. Για το χωρισμό σε τομείς επιλέγεται το σχήμα των δύο συχνοτήτων (συχνότητα 1 και 2) και των δύο πολώσεων (V και H) που προτάθηκε από το πρόγραμμα CRABS³ ως εκείνο που συμβιβάζει κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο την υψηλή φασματική απόδοση με τη μικρότερη επιβάρυνση από τη διακυβελική παρεμβολή. Ωστόσο, επισημαίνεται ότι η ανάλυση που ακολουθεί μπορεί εύκολα να επεκταθεί και σε διαφορετικές αρχιτεκτονικές, αφού πρώτα εντοπισθούν τα αντίστοιχα σενάρια παρεμβολών. Η οριζόντια και η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών

³Cellular Radio Access for Broadband Services.



Σχήμα 4.4: Κυβελωτή αρχιτεκτονική του υπό μελέτη δικτύου BWA: Τετραγωνικές κυβέλες με τομείς των 90° . Η διάκριση σε τομείς πραγματοποιείται με χρήση δύο συχνοτήτων (1 και 2) και δύο πολώσεων (H και V).

BS συμβολίζεται με $2D$, όπου D η ακτίνα της κυψέλης.

Τα σενάρια παρεμβολής που εμφανίζονται στα συστήματα LMDS συνδέονται στενά με το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας του συνδρομητή. Για το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας του SS στο αζιμουθιακό επίπεδο υιοθετείται το αντίστοιχο πρότυπο Κατηγορίας 1 του ETSI του Σχήματος 1.5. Η προδιαγραφή αφορά τις δύο πλέον τυπικές ως προς την υλοποίηση ζώνες συχνοτήτων των σύγχρονων συστημάτων LMDS, δηλαδή τις ζώνες 24-30GHz [ETSI02] και 40.5-43.5GHz [ETSI01]. Το στενό εύρος HPBW που χαρακτηρίζει τις κεραίες των συνδρομητών αποτελεί και τη βασική αιτία αποφυγής της ενδοκυβελικής παρεμβολής στα συστήματα LMDS. Ως προς τους BS, γίνεται η υπόθεση κεραιών με ομοιόμορφο κέρδος στο εύρος HPBW = 90° που δεν εμφανίζουν πλευρικούς λοβούς. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.4, μια τέτοια υπόθεση είναι συμβατή με τις κεραίες τομέων που λειτουργεί στην πράξη.

Κάθε BS εκπέμπει σταθερό EIRP στη ζεύξη downstream. Στη ζεύξη upstream, η ισχύς εκπομπής από το συνδρομητή καθορίζεται με στατικό τρόπο σε σχέση με την απόσταση d από τον BS και με δυναμικό τρόπο με σκοπό την αντιστάθμιση της απόσβεσης λόγω βροχής A μέχρι την τιμή του περιθωρίου ελέγχου της ισχύος M_{APC} . Αυτό ισοδυναμεί με την αρχιτεκτονική ελέγχου της ισχύος δύο επιπέδων της (3.10). Η ισχύς εκπομπής από τον SS συμβολίζεται με $P_{T,SS}(d, A)$.

Όσον αφορά το μοντέλο διάδοσης, από τα προηγούμενα έχει γίνει κατανοητό ότι τα δίκτυα BWA νέας γενεάς διακρίνονται σε υπο-περιοχές της κυψέλης όπου η διάδοση πραγματοποιείται υπό NLOS και σε εκείνες τις υπο-περιοχές όπου η διάδοση χαρακτηρίζεται ως LOS (βλ., για παράδειγμα, την αρχιτεκτονική κυψέλης του Σχήματος 1.6). Στην πρώτη κατηγορία, που αφορά συχνότητες κάτω των 10GHz, το πλέον κατάλληλο μοντέλο διάδοσης είναι εκείνο των διαλείψεων λόγω σκίασης ή πολυδιαδρομικής διάδοσης, ενώ, στη δεύτερη, το πλέον κατάλληλο μοντέλο διάδοσης είναι εκείνο των διαλείψεων λόγω βροχής. Επομένως, στη γενική ανάλυση διακυβελικών παρεμβολών που ακολουθεί, τουλάχιστον το 60% της πρώτης ζώνης Fresnel θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από κάθε είδους εμπόδια για μικρό αριθμό διαδοχικών κυψελών. Ως αποτέλεσμα, οι απώλειες διάδοσης θεωρούνται ανάλογες προς

$$\text{Απώλειες Διάδοσης} \propto 10^{A/10} \times d^m$$

όπου d η απόσταση μεταξύ BS και SS και m ο εκθέτης απωλειών. Σύμφωνα με τη συζήτηση που μόλις προηγήθηκε, η διάδοση γίνεται υπό συνθήκες LOS και, συνεπώς,

$m = 2$, τουλάχιστον για αποστάσεις της τάξης των δύο ακτίνων κυψέλης. Όπως θα γίνει φανερό στη συνέχεια, η απόσταση αυτή εμπεριέχει την πρώτη σειρά παρεμβλλουσών κυψελών. Το μέγεθος A [dB] είναι η τ.μ. που περιγράφει την απόσβεση λόγω βροχής σε συγκεκριμένη ζεύξη μεταξύ BS και SS. Κατά την ανάλυση της απόσβεση λόγω βροχής, υιοθετείται το λογαριθμοκανονικό μοντέλο της Ενότητας 2.5.3. Συνεπώς, κάθε συνδρομητής οφείλει να ικανοποιεί συγκεκριμένη προδιαγραφή πιθανότητας διακοπής ως προς το λόγο CNR με βάση την πιθανότητα

$$OP_T = \Pr \left\{ \frac{C}{N} \leq \gamma_{th} \right\} = \Pr \{ A \geq F \} \quad (4.4)$$

που υπολογίζεται σύμφωνα με την (2.37). Συμπερασματικά, η συνολική προδιαγραφή του συστήματος επιβάλλει τη συμμόρφωση των χρηστών προς τις πιθανότητες διακοπής λόγω θερμικού θορύβου OP_T και λόγω παρεμβολής OP_I . Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη συνήθη πρακτική στα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών, όπου αρκεί η ικανοποίηση της κατά πολύ αυστηρότερης OP_I . Όμως, όπως θα καταδείξει η ανάλυση που ακολουθεί, στα σταθερά δίκτυα BWA οι συνδρομητές δεν περιορίζονται όλοι από την παρεμβολή (interference limited), όπως, για παράδειγμα, οι συνδρομητές που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τον BS.

Η χρήση της εναλλαγής πολώσεων υποδηλώνει ότι κατά τη μελέτη της διακυβελικής παρεμβολής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ο παράγοντας της αποπόλωσης. Η αναχρησιμοποίηση συχνότητας αποδίδει περισσότερο αποδοτική όταν αυξάνεται το μέγεθος XPD. Παρότι οι διαλείψεις λόγω βροχής δημιουργούν τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη συνολική απόσβεση, η αποπόλωση λόγω βλάστησης (Ενότητα 2.3.3) συνεπάγεται, γενικά, μικρότερες τιμές XPD σε σχέση με την αποπόλωση λόγω βροχής (Ενότητα 2.2.4). Η τιμή XPD είναι ασθενής συνάρτηση της απόσβεσης. Επομένως, στις αριθμητικές υλοποιήσεις του παρόντος, το μέγεθος XPD θεωρείται σταθερό [Far00]. Η αποπόλωση από ορθογώνια πολωμένες πηγές μοντελοποιείται ως ACI, ενώ το μέγεθος XPD αμελείται κατά τη μοντελοποίηση της παρεμβολής CCI. Έπειτα, τα δύο είδη παρεμβολής αντιμετωπίζονται από κοινού και υπολογίζεται το συνολικό CIR.

4.4 Ανάλυση διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη downstream

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα σενάρια διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη downstream [Ara05a]. Επιστρέφοντας στο Σχήμα 4.4 και με αναφορά στην κυψέλη που εξυπηρετείται από τον BS₁₁, θεωρείται ένας τυχαίος συνδρομητής SS τοποθετημένος στον τομέα H1 σε απόσταση d_D ($0 < d_D \leq \sqrt{2}D$) από τον BS₁₁. Γενικά, υπάρχουν τρεις IBS που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα και πόλωση με τον SS και προκαλούν την παρεμβολή CCI που εκφράζεται από τη μεταβλητή I_C . Στο υπό μελέτη σενάριο, ο συνδρομητής SS εκτός από τη λήψη του επιθυμητού σήματος από τον BS₁₁, υπόκειται σε παρεμβολή από ένα από τους τρεις τομείς H1 των κυψελών (1,3), (3,1) και (3,3). Οι αντίστοιχοι BS των δύο πρώτων κυψελών, BS₁₃ και BS₃₁ σε απόσταση $4D$ από τον BS₁₁, ονομάζονται παράλληλοι παρεμβολείς. Αντίστοιχα, ο BS₃₃ σε απόσταση $4\sqrt{2}D$ από τον BS₁₁, ονομάζεται διαγώνιος παρεμβολέας. Καθένας από τους τρεις IBS σχηματίζει μια παρεμβάλλουσα ζεύξη προς τον SS που το μήκος της συμβολίζεται με d_I υπό γωνία αζιμουθίου θ ως προς τη διαδρομή μήκους d_D . Για κάθε δυνατή θέση συνδρομητή εντός του τομέα, ως πηγή της παρεμβολής CCI θεωρείται ο IBS που είναι ορατός υπό τη μικρότερη γωνία θ .

Με τον ίδιο τρόπο, η παρεμβολή ACI, που εκφράζεται μέσω της μεταβλητής I_A , έχει ως αφετηρία τομείς κυψελών που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα αλλά ορθογώνια πόλωση σε σχέση με το σταθμό θύμα της παρεμβολής (victim station). Στο υπό μελέτη σενάριο, τέτοιοι είναι οι τομείς V1 που βρίσκονται σε οπτική επαφή με τον SS. Από το Σχήμα 4.4, οι πιθανοί IBS προέρχονται από τους τομείς V1 των BS₂₁, BS₂₃ και BS₁₃⁴

Αγνοώντας καταρχήν την επίδραση της απόσβεσης λόγω βροχής, για τον προσδιορισμό του CIR του συνδρομητή SS τόσο λόγω της παρεμβολής CCI όσο και λόγω της παρεμβολής ACI υπό συνθήκες καθαρού ουρανού εφαρμόζεται η σχέση

$$\left(\frac{C}{I_i}\right)_{cs} = \frac{EIRP_{BS,D} \cdot G_{R,SS}(0^\circ)}{EIRP_{BS,I} \cdot G_{R,SS}(\theta)} \cdot \frac{FSL(d_D)}{FSL(d_I)} \cdot \frac{1}{1/X}, \quad i = C \text{ or } A \quad (4.5)$$

Στην (4.5), οι δείκτες D και I εκφράζουν μεγέθη της επιθυμητής και της παρεμβάλλουσας ζεύξης, αντίστοιχα, όπως αυτές εντοπίστηκαν και εξειδικεύθηκαν προηγουμέ-

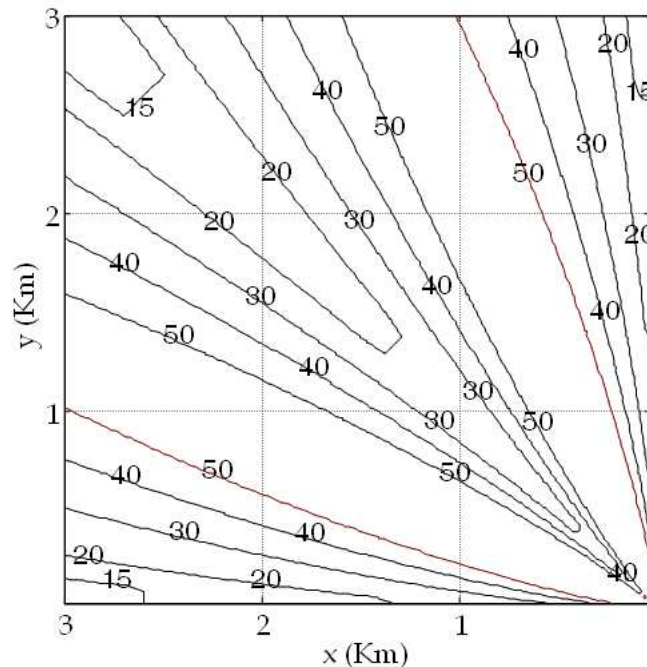
⁴Ο BS₁₃ περιλαμβάνεται στους πιθανούς παρεμβολείς λόγω του ότι πρακτικά το εύρος HPBW υπερβαίνει ελαφρώς τις 90°.

νως. Επίσης

$$X = \begin{cases} 1 & \text{όταν } I_i = I_C \\ XPD & \text{όταν } I_i = I_A \end{cases} \quad (4.6)$$

Ο παράγοντας $G_{R,SS}(\theta)$ αντιστοιχεί στο κατευθυντικό κέρδος της κεραίας του SS ως προς το μέγιστο κέρδος $G_{R,SS}(0)$ που κυμαίνεται συνήθως από 30 έως 40dBi. Επιπλέον, $FSL(d) = (\lambda/4\pi d)^2$ είναι οι απώλειες ελεύθερου χώρου για ζεύξη μήκους d σε μήκος κύματος λ .

Με βάση την (4.5), στα Σχήματα 4.5 και 4.6 σχεδιάζεται η κατανομή του CIR εντός του τομέα για παρεμβολή CCI και ACI, αντίστοιχα, και για κάθε πιθανή θέση (x, y) του συνδρομητή υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Η θέση του BS είναι η κάτω δεξιά κορυφή του τομέα, η ακτίνα της κυψέλης D είναι 3Km και η κεραία του SS ακολουθεί το πρότυπο 24-30GHz του ETSI. Στα Σχήματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται τα ίδια μεγέθη για παρεμβολή τύπου CCI και ACI, αντίστοιχα, θεωρώντας, ωστόσο, ότι η κεραία του SS ακολουθεί το πρότυπο 40.5-43.5GHz του ETSI. Και στα δύο σχήματα που αφορούν την παρεμβολή ACI, οι ισοδυναμικές γραμμές του CIR έχουν σχεδιασθεί για $XPD = 16$ dB. Η τιμή αυτή έχει προέλθει από πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν στο Northglenn, U.S. [Pap97] και αποτελεί μια ρεαλιστική υπόθεση



Σχήμα 4.5: Κατανομή $CIR(x, y)$ εντός του τομέα για παρεμβολή CCI στη ζεύξη downstream υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (ακτίνα κυψέλης $D = 3$ Km, κεραία SS σύμφωνα με το πρότυπο 24-30GHz του ETSI). Η θέση του BS είναι η κάτω δεξιά κορυφή του τομέα.

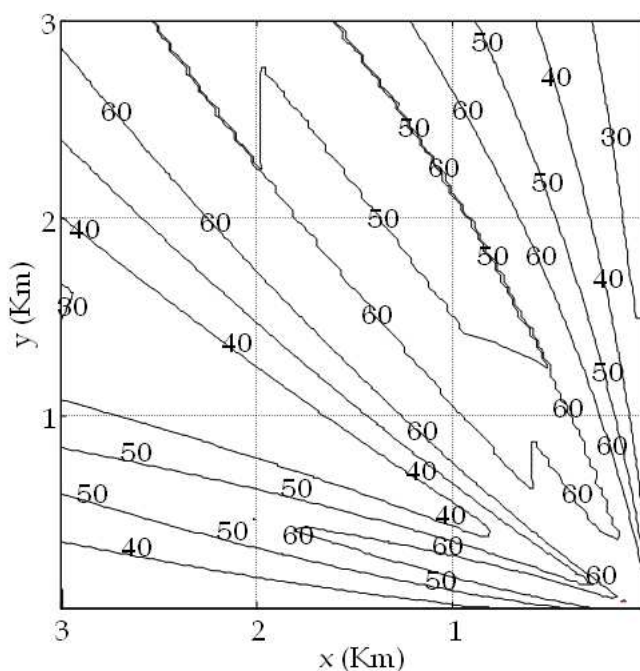
σε σχέση με την τιμή XPD που αναμένεται να μετρηθεί σε ένα κοινό σύστημα. Σε αντίθεση με την παρεμβολή CCI των Σχημάτων 4.5 και 4.7 που εμφανίζουν συμμετρία περί τη διαγώνιο του τομέα, η παρεμβολή ACI των Σχημάτων 4.6 και 4.8 είναι μη συμμετρική εξαιτίας της θέσης του τομέα V1 του BS₂₃. Επιπλέον, από τα ανωτέρω σχήματα εξάγεται το γενικό συμπέρασμα ότι οι τιμές του CIR λόγω CCI είναι αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με εκείνες λόγω ACI.

Στη συνέχεια, εισάγεται η απόσβεση λόγω βροχής και υπολογίζεται η κατανομή του συνολικού CIR λαμβάνοντας υπόψη και τα δύο είδη παρεμβολής CCI και ACI. Όπως είναι γνωστό, δύο διαφορετικά είδη παρεμβολής συνδυάζονται για τον υπολογισμό του συνολικού CIR μέσω της σχέσης

$$\left(\frac{C}{I_C + I_A}\right)^{-1} = \left(\frac{C}{I_C}\right)^{-1} + \left(\frac{C}{I_A}\right)^{-1} \quad (4.7)$$

ή, εναλλακτικά, σε dB

$$\left(\frac{C}{I_C + I_A}\right) [\text{dB}] = -10 \log \left[10^{-\frac{(C/I_C)[\text{dB}]}{10}} + 10^{-\frac{(C/I_A)[\text{dB}]}{10}} \right] \quad (4.8)$$



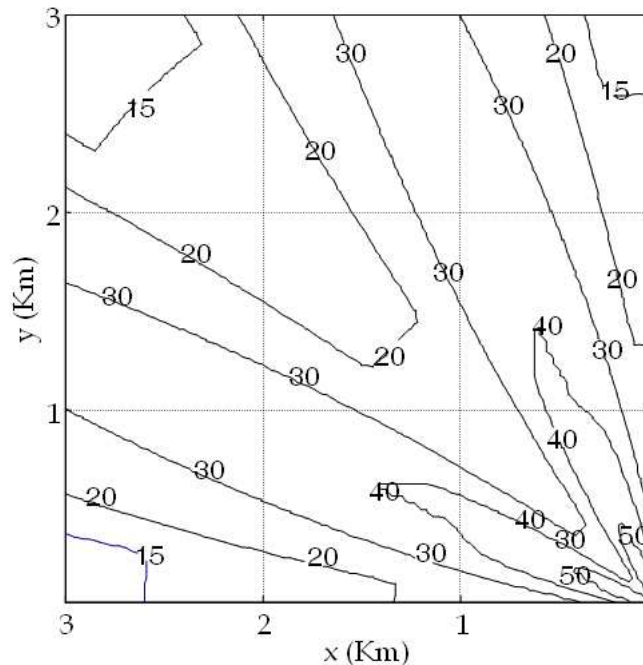
Σχήμα 4.6: Κατανομή $CIR(x, y)$ εντός του τομέα για παρεμβολή ACI στη ζεύξη downstream υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (ακτίνα κυψέλης $D = 3\text{Km}$, κεραία SS σύμφωνα με το πρότυπο 24-30GHz του ETSI, $XPD = 16\text{dB}$). Η θέση του BS είναι η κάτω δεξιά κορυφή του τομέα.

Εφαρμόζοντας την (4.8), ο συνολικός λόγος CIR στη ζεύξη downstream υπό συνθήκες βροχής υπολογίζεται με βάση τη συνάρτηση

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{down} = CIR_{down}(A_D, A_{I_C}, A_{I_A}) = A_{I_C} + A_{I_A} - A_D - 10 \log \left[10^{\frac{A_{I_C} - (C/I_C)_{cs}}{10}} + 10^{\frac{A_{I_A} - (C/I_A)_{cs}}{10}} \right] \quad (4.9)$$

όπου A_D , A_{I_C} και A_{I_A} είναι λογαριθμοκανονικές τ.μ. που αντιπροσωπεύουν την απόσβεση λόγω βροχής στην επιθυμητή ζεύξη BS₁₁-SS καθώς και τις αποσβέσεις λόγω βροχής στις δύο παρεμβάλλουσες ζεύξεις με οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση, αντίστοιχα. Οι όροι $(C/I_C)_{cs}$ και $(C/I_A)_{cs}$ είναι εκφρασμένοι σε dB και καθορίζονται κατά περίπτωση από την (4.5). Άλλωστε, η (4.8) προκύπτει από την (4.9) θέτοντας όλες τις τ.μ. απόσβεσης ίσες με μηδέν.

Η συνάρτηση που εκφράζει το συνολικό CIR_{down} ως συνάρτηση τριών τ.μ., είναι και αυτή τ.μ.. Η παρούσα ενότητα αποσκοπεί στον υπολογισμό της κατανομής της. Μάλιστα, αντί για τη γενική πιθανότητα διακοπής OP_I της (4.1), επιλέγεται ο ορισμός μιας πλέον εξειδικευμένης πιθανότητας, η οποία στο εξής θα αναφέρεται ως AIP



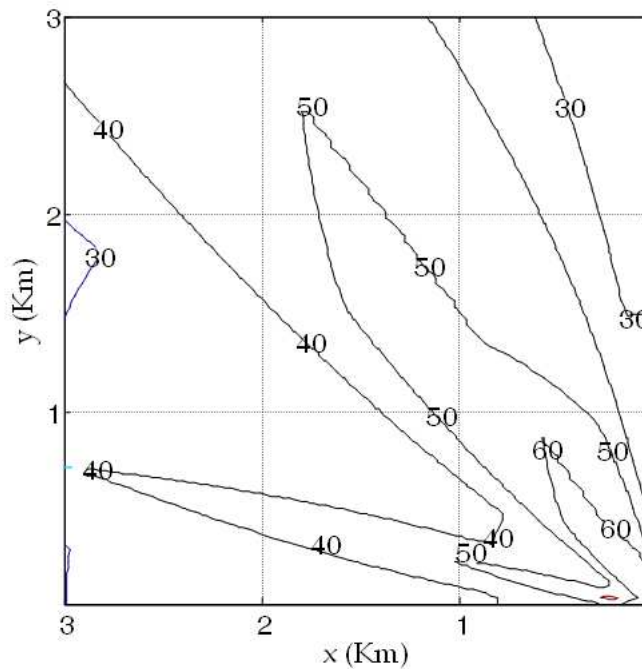
Σχήμα 4.7: Κατανομή $CIR(x, y)$ εντός του τομέα για παρεμβολή CCI στη ζεύξη downstream υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (ακτίνα κυψέλης $D = 3Km$, κεραία SS σύμφωνα με το πρότυπο 40.5-43.5GHz του ETSI). Η θέση του BS είναι η κάτω δεξιά κορυφή του τομέα.

(Acceptable Interference Probability) [Pan07]

$$AIP = \Pr \left[\left(\frac{C}{I_C + I_A} \right)_{down} \leq \gamma_{th}, 0.5 \leq A_D \leq F \right] \quad (4.10)$$

Η πιθανότητα AIP αντιπροσωπεύει την ετησίως αποδεκτή πιθανότητα ώστε ο λόγος CIR ενός συνδρομητή να παραμένει χαμηλότερα από το περιθώριο παρεμβολής γ_{th} , ενώ, συγχρόνως, η απόσβεση λόγω βροχής στην επιθυμητή ζεύξη δεν υπερβαίνει το περιθώριο διαλείψεων F . Δηλαδή, ο ορισμός της πιθανότητας AIP επιτρέπει να απομονωθεί η στατιστική συμπεριφορά του λόγου CIR από την προδιαγραφη διακοπής λόγω θερμικού θορύβου OP_T της (4.4), θεωρώντας δεδομένο ότι η τελευταία ικανοποιείται. Στην (4.10), η τιμή 0.5dB αντιστοιχεί στο κάτω όριο της απόσβεσης λόγω βροχής. Ο υπολογισμός της πιθανότητας AIP απαιτεί την τριπλή ολοκλήρωση της τρισδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής –βλ. Ενότητα Α'3–. Ωστόσο, μετασχηματίζοντας με βάση την (Α'11) τις λογαριθμοκανονικές τ.μ. A_D , A_{I_C} και A_{I_A} σε κανονικές τ.μ.

$$U_k = \frac{\ln A_k - \ln A_{m,k}}{S_{a,k}}, \quad k = D, I_C, I_A \quad (4.11)$$



Σχήμα 4.8: Κατανομή $CIR(x, y)$ εντός του τομέα για παρεμβολή ACI στη ζεύξη downstream υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (ακτίνα κυψέλης $D = 3Km$, κεραία SS σύμφωνα με το πρότυπο 40.5-43.5GHz του ETSI, $XPD = 16dB$). Η θέση του BS είναι η κάτω δεξιά κορυφή του τομέα.

και μετά από κατάλληλους μαθηματικούς χειρισμούς, η τελική έκφραση για την πιθανότητα AIP απλοποιείται στη σχέση

$$AIP = \int_{u(a_S)}^{u(F)} du_D \int_{-\infty}^{u_C^{th}} du_{IC} p_{U_D U_{IC}}(u_D, u_{IC}) \left[1 - 0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{u_A^{th} - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (4.12)$$

Τα όρια ολοκλήρωσης του εξωτερικού ολοκληρώματος σχετίζονται με τη συνάρτηση

$$u(x) = \frac{\ln x - \ln A_{m,D}}{S_{a,D}} \quad (4.13)$$

όπου

$$a_S = \begin{cases} 0.5 & a_D^{th} < 0.5 \\ a_D^{th} & 0.5 \leq a_D^{th} < F \\ F & a_D^{th} \geq F \end{cases} \quad (4.14)$$

και a_D^{th} η λύση της εξίσωσης $CIR_{down}(a_D^{th}, 0, 0) = \gamma_{th}$.

Εξάλλου

$$u_i^{th} = \frac{\ln a_{I_i}^{th} - \ln A_{m,I_i}}{S_{a,I_i}}, \quad i = C, A \quad (4.15)$$

όπου $a_{I_C}^{th}$ και $a_{I_A}^{th}$ οι αντίστοιχες λύσεις των εξισώσεων

$$CIR_{down}(A_D, a_{I_C}^{th}, 0) = \gamma_{th}$$

$$CIR_{down}(A_D, A_{I_C}, a_{I_A}^{th}) = \gamma_{th}$$

Όσον αφορά τις στατιστικές παραμέτρους μ και σ , αυτές προκύπτουν από τις (Α'.21) και (Α'.22) με κατάλληλη επιλογή δεικτών

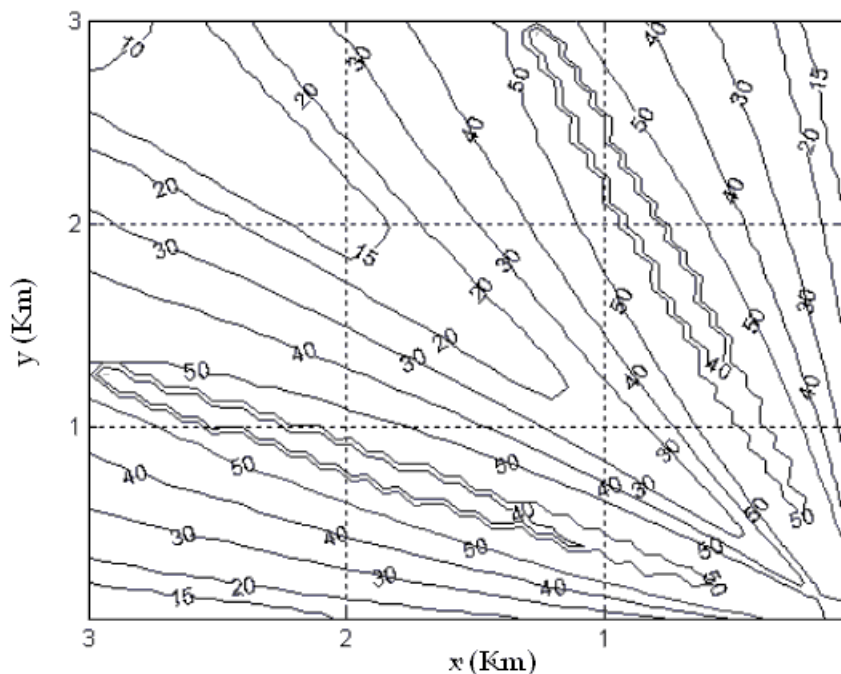
$$\mu = \frac{\rho_{n_{DIA}} - \rho_{n_{ICA}} \rho_{n_{DIC}}}{1 - \rho_{n_{DIC}}^2} u_D + \frac{\rho_{n_{ICA}} - \rho_{n_{DIC}} \rho_{n_{DIA}}}{1 - \rho_{n_{DIC}}^2} u_{IC} \quad (4.16)$$

$$\sigma = \left(\frac{1 - \rho_{n_{DIC}}^2 - \rho_{n_{DIA}}^2 - \rho_{n_{ICA}}^2 + 2\rho_{n_{DIC}} \rho_{n_{DIA}} \rho_{n_{ICA}}}{1 - \rho_{n_{DIC}}^2} \right)^{1/2} \quad (4.17)$$

Η $p_{U_D U_{IC}}$ συμβολίζει τη δισδιάστατη κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας –βλ. (Α'.12)–. Ο προσδιορισμός των λογαριθμικών συντελεστών της συσχέτισης ρ_{nij} ανά ζεύγη των τριών τ.μ. περιγράφεται αναλυτικά στην Ενότητα Α'.5 του Παραρτήματος Α'. Τέλος, οι στατιστικές παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής της απόσβεσης λόγω βροχής των τριών ζεύξεων $A_{m,i}$ και $S_{a,i}$, $i = D, IC, IA$ προκύπτουν κατά τα γνωστά από τις (2.36) και (2.37), αφού πρώτα εφαρμοσθεί η διαδικασία εξαγωγής των παραμέτρων R_m , S_r του ρυθμού βροχόπτωσης από πειραματικά δεδομένα ή από τους χάρτες βροχής της ITU-R σύμφωνα με το Παράρτημα Δ'.

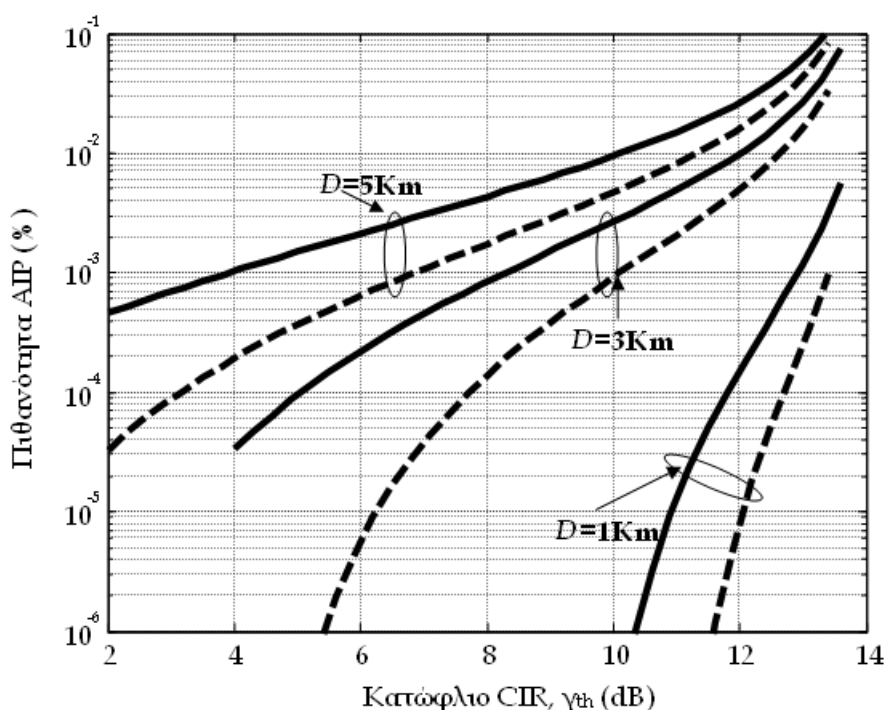
Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η συνολική κατανομή $CIR(x, y)$ στη ζεύξη downstream για παρεμβολή CCI και ACI. Ουσιαστικά, το συγκεκριμένο σχήμα αντιστοιχεί στη λύση της υπερβατικής εξίσωσης (4.10) σε κάθε σημείο του τομέα υποθέτοντας ότι όλοι οι SS ικανοποιούν την προδιαγραφή $AIP = 0.001\%$ ως προς την παρεμβολή. Όσον αφορά την πιθανότητα διακοπής του CNR, έχει υποτεθεί ότι $OP_T = 0.01\%$. Η συχνότητα λειτουργίας είναι 28GHz, η ακτίνα της κυψέλης $D = 3\text{Km}$, η διασταύρωση πόλωσης $XPD = 16\text{dB}$, ενώ για τα δεδομένα βροχόπτωσης έχει εφαρμοσθεί η μεθοδολογία των χαρτών βροχής του Παραρτήματος Δ' για την Αθήνα, GR. Στο Σχήμα 4.9 παρατηρείται ότι το μέγεθος CIR_{down} περιορίζεται κυρίως από τις κατά πολύ χαμηλότερες τιμές CCI και, κατά συνέπεια, η κατανομή του CIR εντός του τομέα καταλήγει να είναι σχεδόν συμμετρική. Συγκρίνοντας με τα Σχήματα 4.5 και 4.7 (συνθήκες καθαρού ουρανού), οι υπο-περιοχές χαμηλού CIR του τομέα έχουν διευρυνθεί και εμφανίζονται περιοχές χαμηλότερου CIR σε σχέση με το ελάχιστο υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Αυτό συμβαίνει οποτεδήποτε κάποιος συνδρομητής SS βρίσκεται στις πλέον απομακρυσμένες θέσεις από τον BS.

Στο Σχήμα 4.10 δίδονται καμπύλες της πιθανότητα AIP ως προς το κατώφλιο



Σχήμα 4.9: Συνολική (CCI+ACI) κατανομή $CIR(x, y)$ εντός του τομέα στη ζεύξη downstream υπό συνθήκες διαλείψεων σύμφωνα με τη προδιαγραφή $AIP = 0.001\%$ για την Αθήνα, GR (ακτίνα κυψέλης $D = 3\text{Km}$, συχνότητα λειτουργίας $f=28\text{GHz}$, $XPD = 16\text{dB}$).

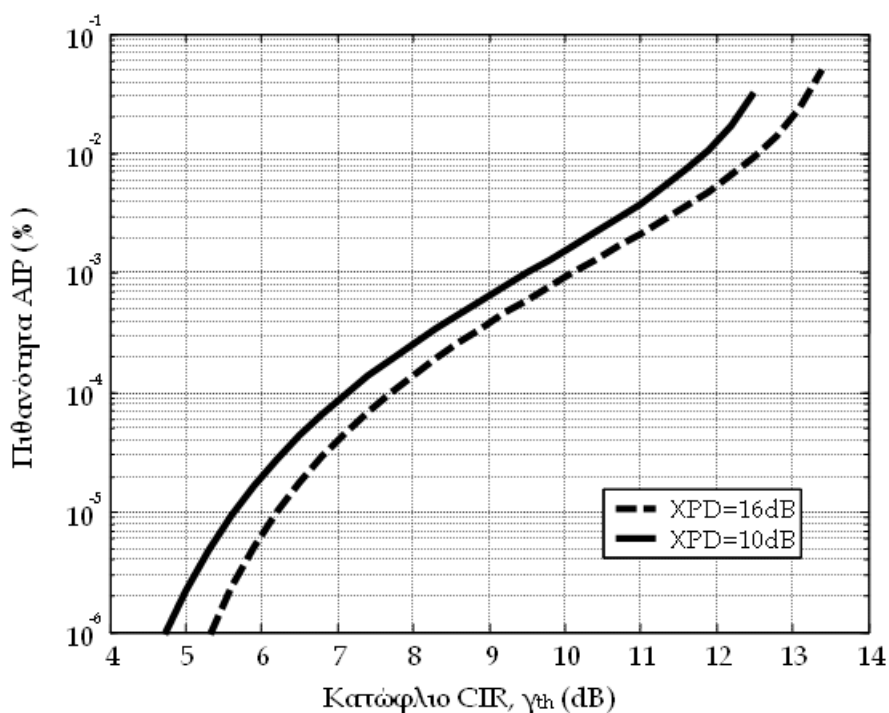
γ_{th} για τη χειρότερη θέση συνδρομητή στις οριακές θέσεις στη γωνία $d_D = D$ και στη διαγώνιο $d_D = \sqrt{2}D$ του τομέα και για το ίδιο δίκτυο. Οι σταθερές καμπύλες αντιστοιχούν σε παρεμβολή από παράλληλους παρεμβολείς και οι διακεκομμένες καμπύλες σε παρεμβολή από διαγώνιους παρεμβολείς. Αφού το συνολικό CIR_{down} εξαρτάται κυρίως από την παρεμβολή CCI, δεν παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ της παρεμβολής από τους παράλληλους παρεμβολείς στην οριζόντια κατεύθυνση και τους παράλληλους παρεμβολείς στην κατακόρυφη κατεύθυνση, μολονότι στην πρώτη περίπτωση η παρεμβολή ACI οφείλεται στον BS₂₁ (σε απόσταση μιας κυψέλης), ενώ στη δεύτερη στον BS₁₃ (σε απόσταση δύο κυψελών). Επίσης, η αριθμητική εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου διακυβελικής παρεμβολής πραγματοποιήθηκε για διαφορετικές ακτίνες κυψέλης που αντιστοιχούν σε μακροκυψελωτή ($D = 5\text{Km}$), μικροκυψελωτή ($D = 3\text{Km}$) και πικοκυψελωτή ($D = 1\text{Km}$) αρχιτεκτονική LMDS. Για παράδειγμα, για τις τρεις αυτές τιμές ακτίνας και κατώφλιο $\gamma_{th} = 13\text{dB}$, το ετήσιο ποσοστό AIP από



Σχήμα 4.10: Κατανομή της πιθανότητας AIP συναρτήσει του γ_{th} για τη χειρότερη θέση του τομέα στη διαφώνια κορυφή (μέγιστη απόσταση από τον BS). Οι σταθερές καμπύλες αντιστοιχούν σε παρεμβολή που προέρχεται από παράλληλους παρεμβολείς και οι διακεκομμένες καμπύλες σε παρεμβολή που προέρχεται από διαγώνιους παρεμβολείς. Οι τιμές της ακτίνας της κυψέλης αντιστοιχούν σε μακροκυψελωτή ($D = 5\text{Km}$), μικροκυψελωτή ($D = 3\text{Km}$) και πικοκυψελωτή ($D = 1\text{Km}$) αρχιτεκτονική LMDS.

διαγώνια παρεμβολή ισούται με 0.065%, 0.026% και 1.16E-03%, ενώ από παράλληλη παρεμβολή με 0.044%, 0.017% και 3.47E-04%, αντίστοιχα.

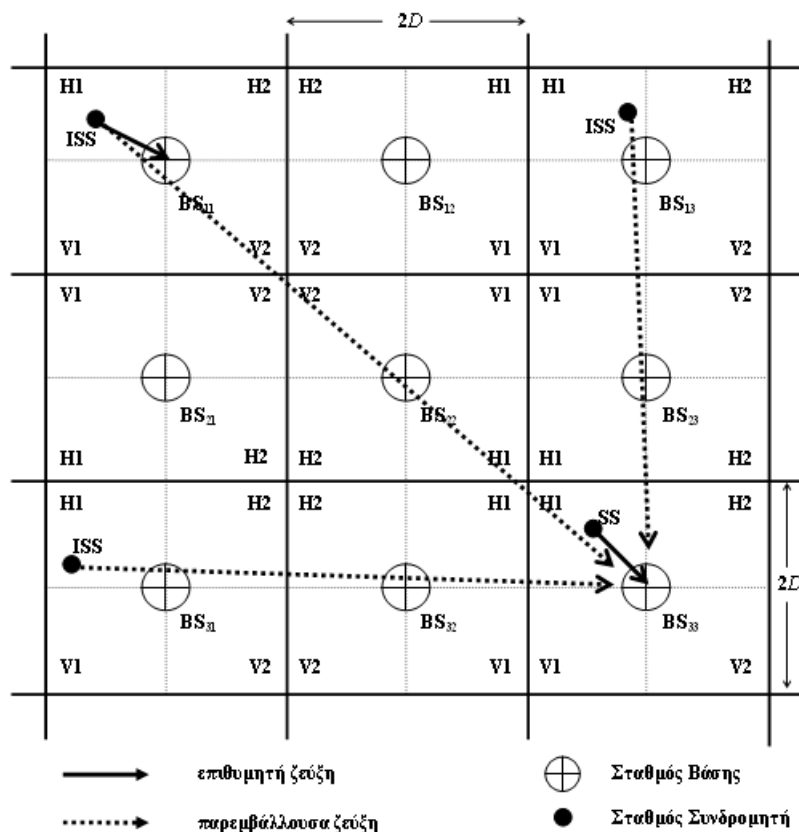
Από τα ανωτέρω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η παρεμβολή ACI έχει αξιοσημείωτη συνεισφορά στο συνολικό CIR όταν η μέση τιμή της διασταύρωσης πόλωσης XPD είναι ιδιαίτερος χαμηλή ώστε οι τιμές της παρεμβολής CCI και ACI να γίνονται συγκρίσιμες. Μια τέτοια περίπτωση σχεδιάζεται στο Σχήμα 4.11, όπου το συνολικό CIR_{down} στην πλέον απομακρυσμένη θέση του τομέα με $XPD = 16\text{dB}$ συγκρίνεται με την τιμή $XPD = 10\text{dB}$. Πάντως, η τελευταία επιλογή για το XPD είναι εξαιρετικά χαμηλή και απαντάται μόνο για μεγάλα ύψη φυλλωμάτων και συγκεκριμένα είδη δένδρων σε προαστικές ή αγροτικές περιοχές [Pap97]. Με βάση τα συμπεράσματα που μόλις διατυπώθηκαν, η διερεύνηση της διακυβελικής παρεμβολής στην επόμενη ενότητα πραγματοποιείται αποκλειστικά για την περίπτωση CCI.



Σχήμα 4.11: Επίδραση χαμηλών τιμών του μεγέθους XPD στην κατανομή της πιθανότητας AIP συναρτήσει του γ_{th} για τη χειρότερη θέση του τομέα πάνω στη διαγώνιο.

4.5 Ανάλυση διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη upstream

Για την εκτίμηση της διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη upstream χρησιμοποιείται ως σταθμός αναφοράς ο BS_{33} . Με αναφορά στο Σχήμα 4.12, ο τυχαίος SS στο εσωτερικό του τομέα H1 της συγκεκριμένης κυψέλης εκπέμπει το επιθυμητό σήμα προς τον BS_{33} . Οι χρήστες που ανήκουν τους τομείς H1 των κυψελών (1,3), (1,1) και (3,1) είναι τώρα οι πιθανοί παρεμβάλλοντες συνδρομητές (Interfering SS, ISS). Όπως προαναφέρθηκε, κάθε συνδρομητής έχει διαθέσιμο ένα σχήμα ελέγχου της ισχύος δύο επιπέδων ώστε να διατηρεί την QoS της κυψέλης στη δική του κυψέλη. Στην παρούσα ενότητα, εξετάζονται οι επιπτώσεις της χρήσης αυτής της τεχνικής FMT στη διακυψελική παρεμβολή. Προς τούτο, η ανάλυση χωρίζεται σε δύο μέρη: Αρχικά, γίνεται η υπόθεση ότι η απόσβεση λόγω βροχής στην επιθυμητή ζεύξη, A_D , αντισταθμίζεται πλήρως από τον



Σχήμα 4.12: Σενάριο διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη upstream: Ο σταθμός αναφοράς BS_{33} λαμβάνει το επιθυμητό σήμα από το συνδρομητή SS, ενώ οι ISS στους BS_{13} , BS_{11} ή BS_{31} είναι πιθανοί παρεμβολείς.

προσαρμοστικό βρόχο ελέγχου, δηλαδή, ότι η τ.μ. A_D λαμβάνει χαμηλότερες τιμές από το περιθώριο ελέγχου της ισχύος M_{APC} –βλ. (3.10)–. Στη συνέχεια, η ανάλυση καλύπτει την ειδική περίπτωση όπου $A_D > M_{APC}$.

Όπως και στην περίπτωση της ζεύξης downstream, οι θέσεις των κυψελών που προκαλούν ισχυρή παρεμβολή είναι εκείνες όπου οι BS των ISS ευθυγραμμίζονται με το σταθμό αναφοράς BS₃₃. Καθώς είναι σπάνιο και οι τρεις ISS στις θέσεις ισχυρής παρεμβολής να εκπέμπουν ταυτόχρονα την ίδια χρονική σχισμή, οι υπολογισμοί του CIR πραγματοποιούνται λαμβάνοντας υπόψη μόνο ένα ISS σε αποστάσεις d_I και d_W από τον BS₃₃ και τον BS από τον οποίο εξυπηρετείται, αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τ.μ. της απόσβεσης λόγω βροχής συμβολίζονται με A_I και A_W . Ο λόγος CIR για τη ζεύξη upstream όταν η απόσβεση λόγω βροχής βρίσκεται εντός του δυναμικού εύρους του βρόχου ελέγχου της ισχύος δίδεται από τη σχέση

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{up} = \frac{P_{T,SS}(d_D, A_D) G_{T,SS}(0^\circ) G_{R,BS}/10^{A_D/10} FSL(d_D)}{P_{T,ISS}(d_W, A_W) G_{T,ISS}(\theta) G_{R,BS}/10^{A_I/10} FSL(d_I)} \quad (4.18)$$

όπου $G_{R,BS}$ το κατευθυντικό κέρδος κατά τη λήψη από την κεραία του σταθμού BS₃₃. Το κέρδος αυτό έχει υποθεθεί σταθερό σε όλο το εύρος των 90°, ενώ θ η γωνία που σχηματίζεται από τις ζεύξεις του ISS προς τον BS₃₃ -μήκους d_I - και προς τον BS που τον εξυπηρετεί -μήκους d_W -. Η εξάρτηση της ισχύος εκπομπής $P_{T,ISS}$ από τα d_W και A_W οφείλεται στον έλεγχο της ισχύος στη ζεύξη upstream που πραγματοποιείται και από κάθε ISS για τη διατήρηση του QoS στη δική του κυψέλη. Η (4.18) γράφεται υπό συμπαγή μορφή σε dB ως συνάρτηση δύο τ.μ.

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{up} = CIR_{up}(A_W, A_I) = \left(\frac{C}{I}\right)_{cs} - A_W + A_I \quad (4.19)$$

όπου ο όρος του λόγου CIR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού είναι

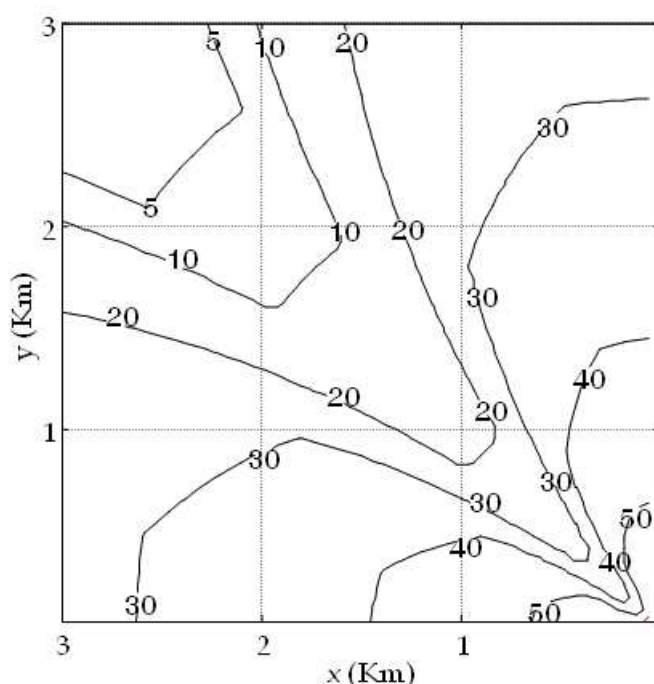
$$\left(\frac{C}{I}\right)_{cs} = [G_{T,SS}(0^\circ) - G_{T,ISS}(\theta)] - 20 \log \left(\frac{d_W}{d_I}\right) \quad (4.20)$$

Ένα αξιοσημείωτο συμπέρασμα που προκύπτει από τα ανωτέρω είναι ότι, λόγω του ελέγχου της ισχύος, η τιμή CIR_{up} , την οποία αντιλαμβάνεται ο BS₃₃ γίνεται ανεξάρτητη από τη θέση των υπό εξυπηρέτηση συνδρομητών και εξαρτάται μόνο από παραμέτρους των ISS. Επομένως, ο ορισμός της πιθανότητας AIP τροποποιείται κατάλληλα ως εξής [Pan07]

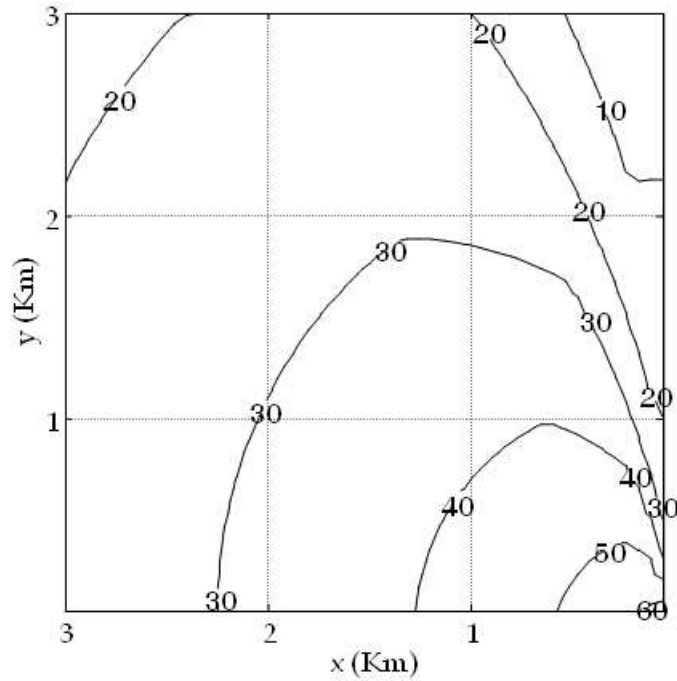
$$AIP = \Pr \left[\left(\frac{C}{I}\right)_{up} \leq \gamma_{th}, 0.5 \leq A_W \leq F \right] \quad (4.21)$$

Ακολουθώντας μια άμεση στατιστική ανάλυση, η τελική έκφραση για το AIP είναι παρόμοια με αυτήν της (4.12), με τη διαφορά ότι είναι μειωμένη κατά μια διάσταση αφού η συνάρτηση CIR_{up} είναι συνάρτηση δύο τ.μ. αντί τριών όπως συμβαίνει στην περίπτωση της ζεύξης downstream.

Στα Σχήματα 4.13 και 4.14, η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται σε ένα δίκτυο BWA που λειτουργεί στην Αθήνα, GR, σε συχνότητα λειτουργίας 42GHz με ακτίνα κυψέλης 3Km. Το σύστημα ικανοποιεί τις προδιαγραφές $AIP = 0.001\%$ και $OP_T = 0.01\%$ όσον αφορά την παρεμβολή και το θερμικό θόρυβο, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η κατανομή του μεγέθους CIR_{up} εντός του τομέα, όταν η παρεμβολή προέρχεται από ένα ISS σε οποιαδήποτε θέση (x, y) του τομέα H1 της κυψέλης BS₁₁. Επισημαίνεται ότι οι απώλειες της επιθυμητής ζεύξης SS–BS₃₃ αντισταθμίζονται πλήρως από το βρόχο ελέγχου της ισχύος. Το Σχήμα 4.14 αναπαριστά το ίδιο πρόβλημα, αλλά θεωρώντας ένα παράλληλο ISS που ανήκει στην κυψέλη BS₁₃. Έτσι, αντίθετα με την περίπτωση της ζεύξης downstream όπου οι συντατεταγμένες (x, y) αφορούσαν τη θέση του σταθμού θύματος της παρεμβολής στην κυψέλη αναφοράς, στην περίπτωση



Σχήμα 4.13: Κατανομή $CIR(x, y)$ εντός του τομέα στη ζεύξη upstream συστήματος LMDS που λειτουργεί στην Αθήνα, GR, υπό την προδιαγραφή $AIP = 0.001\%$ (συχνότητα λειτουργίας $f = 42\text{GHz}$, ακτίνα κυψέλης $D = 3\text{Km}$). Πηγή της παρεμβολής είναι ένας διαγώνιος ISS στην κυψέλη BS₁₁.



Σχήμα 4.14: Κατανομή $CIR(x, y)$ εντός του τομέα στη ζεύξη upstream συστήματος LMDS που λειτουργεί στην Αθήνα, GR, υπό την προδιαγραφή $AIP = 0.001\%$ (συχνότητα λειτουργίας $f = 42\text{GHz}$, ακτίνα κυψέλης $D = 3\text{Km}$). Πηγή της παρεμβολής είναι ένας παράλληλος ISS στην κυψέλη BS_{13} .

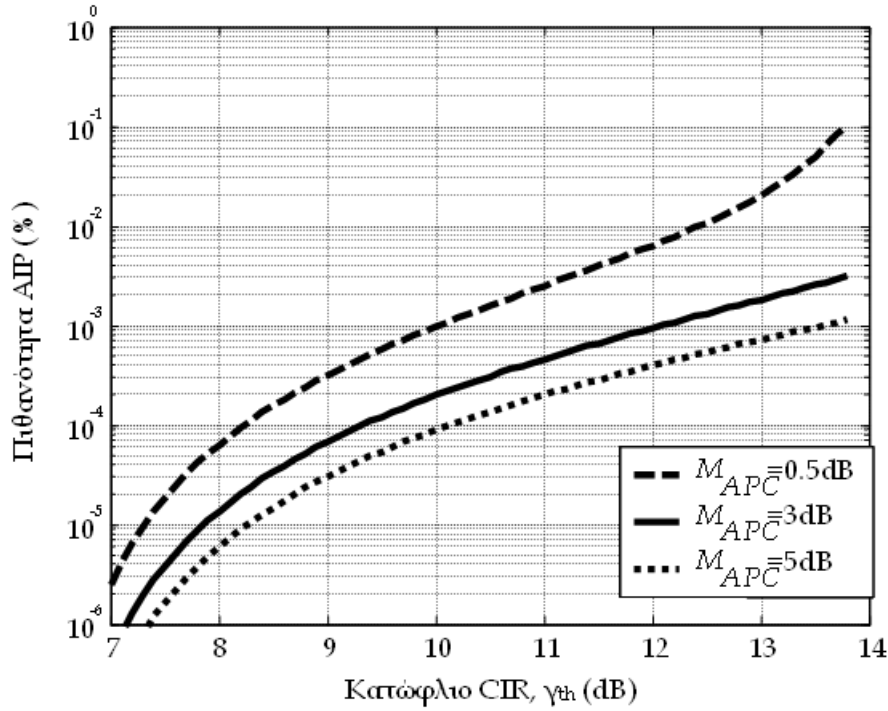
της ζεύξης upstream αφορούν τη θέση του ISS στη δική του κυψέλη. Από τα σχήματα αυτά συμπεραίνεται ότι σημαντική παρεμβολή εμφανίζεται από παρεμβολείς στις πλέον απομακρυσμένες θέσεις της κυψέλης τους. Αυτό αντίκειται στη διασθητική αντίληψη ότι υψηλές τιμές παρεμβολής προκαλούνται από τις πλησιέστερες προς το σταθμό θύμα πηγές παρεμβολής και οφείλεται στο βρόχο ελέγχου της ισχύος.

Προκειμένου να διερευνηθεί περαιτέρω το χειρότερο σενάριο παρεμβολής CCI, εξετάζεται η περίπτωση όπου η απόσβεση λόγω βροχής στην επιθυμητή ζεύξη υπερβαίνει το δυναμικό εύρος του σχήματος ελέγχου της ισχύος, προκαλώντας πρόσθετη επιβάρυνση στη ζεύξη $SS-BS_{33}$. Ειδικότερα, για τον προσδιορισμό του λόγου CIR_{up} , πρέπει στην (4.19) να ληφθεί υπόψη η επιπλέον απόσβεση $A_D - M_{APC}$. Τότε, η CIR_{up} μετατρέπεται σε συνάρτηση τριών τ.μ., δηλαδή,

$$CIR_{up}(A_D, A_I, A_W) = \left(\frac{C}{I}\right)_{up} = \left(\frac{C}{I}\right)_{cs} - (A_D - M_{APC}) - A_W + A_I \quad (4.22)$$

Η πιθανότητα AIP ορίζεται αντίστοιχα από τη σχέση

$$AIP = \Pr \left[\left(\frac{C}{I}\right)_{up} \leq \gamma_{th}, M_{APC} \leq A_D \leq F + M_{APC} \right] \quad (4.23)$$



Σχήμα 4.15: Επίδραση του κατωφλίου M_{APC} στην κατανομή της πιθανότητας AIP συναρτήσει του γ_{th} για το χειρότερο συνδυασμό θέσεων SS και ISS.

η οποία διασφαλίζει ότι η απόσβεση A_D ανήκει στο πεδίο τιμών που ενδιαφέρει, ενώ ισχύει $M_{APC} \geq 0.5$ dB.

Μετά από μια στατιστική ανάλυση παρόμοια με την προηγούμενη, η τελική έκφραση έρχεται στη μορφή

$$AIP = \int_{u(a_S)}^{u(F+M_{APC})} du_D \int_{u_W^{th}}^{\infty} du_W p_{U_D U_W}(u_D, u_W) \left[1 - 0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{u_I^{th} - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (4.24)$$

όπου η τιμή $u(F + M_{APC})$ προκύπτει από την (4.13). Ωστόσο, η παράμετρος a_S καθορίζεται τώρα με βάση τη σχέση

$$a_S = \begin{cases} M_{APC} & a_D^{th} < M_{APC} \\ a_D^{th} & M_{APC} \leq a_D^{th} < F + M_{APC} \\ F + M_{APC} & a_D^{th} \geq F + M_{APC} \end{cases} \quad (4.25)$$

Οι παράμετροι u_W^{th} , u_I^{th} , μ και σ υπολογίζονται από τις (4.15)–(4.17) αλλάζοντας κατάλληλα τους δείκτες και εφαρμόζοντας τη συνάρτηση CIR_{up} της (4.22) αντί της (4.9).

Όπως προαναφέρθηκε κατά τη συζήτηση του Σχήματος 4.13, οι χαμηλές στάθμες CIR προέρχονται από τις πλέον απομακρυσμένες θέσεις των ISS. Εντούτοις, για την περίπτωση που εξετάζεται, η επίδραση της διαφορικής απόσβεσης λόγω βροχής στις δύο

συγκλίνουσες ζεύξεις ISS–BS₃₃ και SS–BS₃₃ γίνεται πλέον δυσμενής όσο αυξάνεται η γωνία μεταξύ των δύο ραδιοδιαδρομών [Pan03c]. Για το λόγο αυτό, η διάταξη όπου ο ISS βρίσκεται σε απόσταση $d_W = \sqrt{2}D$ από τον BS₁₁ και ο επιθυμητός συνδρομητής SS σε απόσταση $d_D = D$ στην (οριζόντια ή κατακόρυφη) κορυφή του BS₃₃ συνιστά το χειρότερο δυνατό θέσεων συνδρομητή, αφού τότε μεγιστοποιείται η γωνία μεταξύ επιθυμητής και παρεμβάλλουσας ζεύξης. Το Σχήμα 4.15 παρουσιάζει καμπύλες της πιθανότητας AIP ως προς το κατώφλιο γ_{th} για αυτή την ειδική περίπτωση, θεωρώντας τα περιθώρια ελέγχου της ισχύος $M_{APC} = 0.5, 3$ και 5dB. Η πρώτη καμπύλη αποτελεί ένα παράδειγμα ενός συνδρομητή που δεν διαθέτει μονάδα ελέγχου της ισχύος (λόγω οικονομικότερου ή απαρχαιωμένου εξοπλισμού), ενώ ο παρεμβάλλον συνδρομητής διαθέτει μια τέτοια μονάδα.

Κεφάλαιο 5

Διακυψελική Παρεμβολή σε Σταθερά Δίκτυα CDMA-BWA

5.1 Γενικά

Η τελευταία δεκαετία έχει χαρακτηριστεί από την καθολική επικράτηση της πολλαπλής πρόσβασης CDMA (Code Division Multiple Acces) στα κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών WCDMA (Wideband CDMA) τρίτης γενεάς (3G) [Mil00]. Η επιτυχία της τεχνολογίας CDMA, η οποία ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία σχημάτων *απλωμένου φάσματος* (spread spectrum), οφείλεται κατά κύριο λόγο σε ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η καθολική αναχρησιμοποίηση συχνότητας, η ήπια διαπομπή (soft handoff), οι εγγενείς δυνατότητες διαφορικής λήψης, η ελαστικότητα ως προς τη χωρητικότητα και η υψηλή φασματική απόδοση [Che06].

Οι σημαντικά αυξημένες απαιτήσεις για υπηρεσίες (κυρίως IP) με ολοένα και υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και βελτιωμένη φασματική απόδοση είναι οι κινητήριες δυνάμεις για την ανάπτυξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών γενεάς 3G καθώς και των επερχόμενων γενεών πέρα της τρίτης (beyond 3G), που θεμελιώνονται επί της τεχνολογίας CDMA. Στο πλαίσιο της ITU, τα δίκτυα 3G ονομάζονται IMT-2000, ενώ στην Ευρώπη είναι γνωστά ως UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systems) [Pra98]. Η τρίτη γενεά δικτύων κινητών επικοινωνιών, ήλθε να αντικαταστήσει το εξαιρετικά επιτυχημένο στις Η.Π.Α. πρότυπο CDMA δεύτερης γενεάς IS-95 [IS-95].

Μικρότερη ανάπτυξη έχει γνωρίσει η πολλαπλή πρόσβαση CDMA σε ευρυζωνικά

δίκτυα BWA, ενώ η υποχρεωτική εφαρμογή της περιορίζεται σε κάποιες εκδόσεις του προτύπου IEEE 802.11 και του UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access) [Haa00] συστήματα που χαρακτηρίζονται από διάδοση NLOS. Το παρόν κεφάλαιο πραγματεύεται μια νέα πρόταση για την υιοθέτηση της τεχνικής CDMA απευθείας ακολουθίας (Direct Sequence-CDMA, DS-CDMA) σε LOS σταθερά δίκτυα BWA στις συχνότητες 10-66GHz με κύριο κίνητρο τη βελτιωμένη αντιμετώπιση της διακυβελικής παρεμβολής. Η συγκεκριμένη πρόταση έρχεται σε αντίθεση με την κυρίαρχη τάση της υιοθέτησης σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 802.16 της τεχνικής TDMA από τα σύγχρονα δίκτυα WiMAX. Έτσι, μετά την παρουσίαση στην Ενότητα 5.2 των βασικών αρχών της τεχνικής DS-CDMA, στην Ενότητα 5.3 περιγράφονται οι λεπτομέρειες μιας πιθανής αρχιτεκτονικής για σταθερά δίκτυα BWA με βάση τη CDMA. Ακολουθεί στην Ενότητα 5.4 η σύγκριση των συστημάτων TDMA- και CDMA-LMDS ως προς τη διακυβελική παρεμβολή υιοθετώντας κάποιες απλουστευτικές υποθέσεις. Η σύγκριση αυτή αποσκοπεί στο να καταδείξει το ενδεχόμενο πλεονέκτημα της δεύτερης αρχιτεκτονικής σε σχέση με την πρώτη, τουλάχιστον ως προς τη ζεύξη upstream. Τέλος, στην Ενότητα 5.5 παρατίθεται μια στατιστική ανάλυση του λόγου CIR, παρόμοια με εκείνη που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 4 για συμβατικά συστήματα LMDS, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική ανομοιογένεια των διαλείψεων λόγω βροχής.

5.2 Βασικές Αρχές DS-CDMA

Κατά τη μετάδοση ενός σήματος απλωμένου φάσματος, το εύρος ζώνης που καταλαμβάνεται είναι πολλαπλάσιο του ελάχιστου απαιτούμενου εύρους ζώνης. Αν και η τεχνική αυτή φαίνεται μη αποδοτική όταν εμπλέκεται ένας μόνο χρήστης, τα πλεονεκτήματά της εμφανίζονται όταν γίνεται ταυτόχρονη και από κοινού χρήση του απλωμένου φάσματος από περισσότερους χρήστες χωρίς να εμφανίζεται μεταξύ τους παρεμβολή. Επομένως, τα συστήματα απλωμένου φάσματος είναι εξαιρετικά αποδοτικά ως προς το εύρος ζώνης σε περιβάλλοντα που χαρακτηρίζονται από παρεμβολή λόγω πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference, MAI).

Εκτός από την κατάληψη πολύ μεγάλου εύρους ζώνης, τα σήματα απλωμένου φάσματος είναι ψευδοτυχαίου χαρακτήρα και διαθέτουν ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του θορύβου. Η ακολουθία ή κώδικας εξάπλωσης είναι μια δυαδική ακολουθία που εμφανίζε-

ται ως τυχαία, αλλά μπορεί να αναπαραχθεί κατά ντετερμινιστικό τρόπο από το δέκτη προς τον οποίο προορίζεται το σήμα. Τα σήματα απλωμένου φάσματος αποδιαμορφώνονται στο δέκτη μέσω της αυτοσυσχέτισης με μια τοπικά παραγόμενη εκδοχή της ακολουθίας εξάπλωσης. Η ετεροσυσχέτιση με την κατάλληλη ακολουθία εξάπλωσης επανασυμπύπτουσε το σήμα και επιτρέπει την ανάκτηση του αρχικού σήματος δεδομένων στενής ζώνης. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η συσχέτιση από ένα άλλο γενικώς ανεπιθύμητο χρήστη εμφανίζεται στην έξοδο του αντίστοιχου δέκτη ως θόρυβος.

Το πλέον σημαντικό πλεονέκτημα των τεχνικών απλωμένου φάσματος είναι η εγγενής ικανότητα απόρριψης της παρεμβολής. Εφόσον σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένας μοναδικός κώδικας εξάπλωσης που είναι σχεδόν ορθογώνιος ως προς τους κώδικες των υπολοίπων χρηστών, ο δέκτης μπορεί να διαχωρίσει τον κάθε χρήστη μέσω του κώδικά του, παρά το γεγονός ότι όλοι οι χρήστες καταλαμβάνουν το ίδιο φάσμα ταυτόχρονα. Μέχρι κάποιο πλήθος χρηστών, αυτό συνεπάγεται ότι η παρεμβολή που δημιουργεί ο ένας χρήστης στον άλλον είναι αμελητέα. Αυτό ισχύει και σε περιπτώσεις εκούσιας παρεμβολής από σήματα στενής ζώνης (jamming). Αφού όλοι οι χρήστες μοιράζονται ταυτόχρονα κοινό τμήμα του φάσματος, η υιοθέτηση σχημάτων απλωμένου φάσματος μπορεί να απλοποιήσει σημαντικά τη σχεδίαση της αναχρησιμοποίησης της συχνότητας, αναθέτοντας σε όλους τους χρήστες τα ίδια κανάλια.

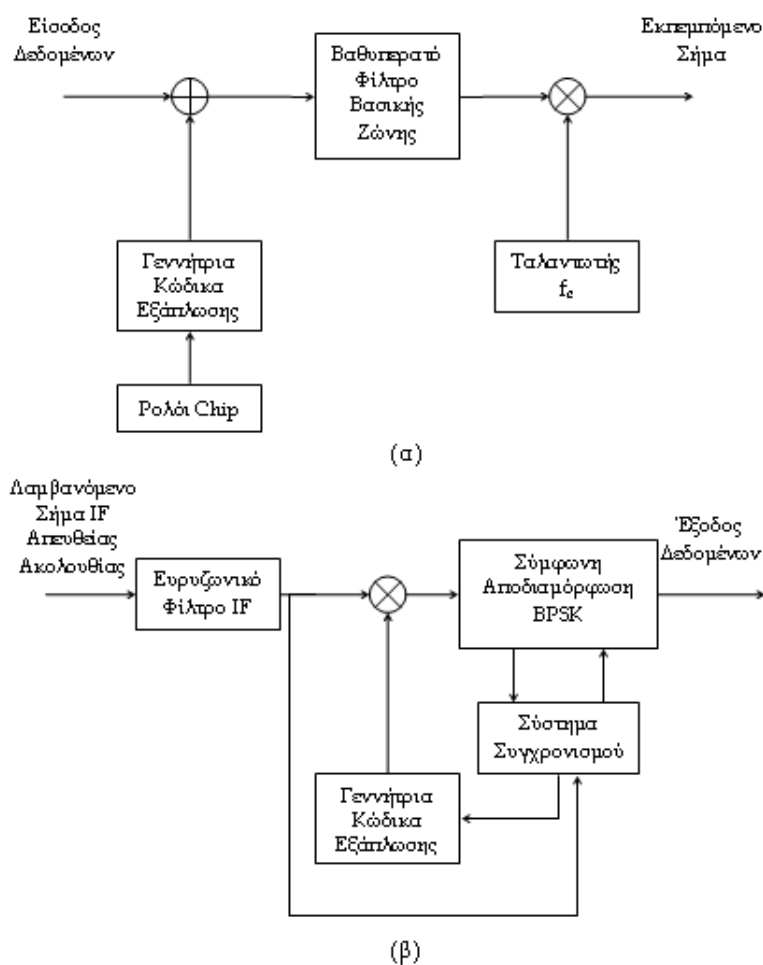
Η ανθεκτικότητα ως προς τις διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης αποτελεί ένα πρόσθετο κίνητρο για την εφαρμογή των τεχνικών απλωμένου φάσματος στις ασύρματες επικοινωνίες. Είναι γνωστό ότι τα ευρυζωνικά σήματα υποφέρουν από διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Αφού η ενέργεια των σημάτων απλωμένου φάσματος κατανέμεται ομοιόμορφα σε ένα πολύ μεγάλο εύρος ζώνης, σε κάθε χρονική στιγμή, μόνο ένα μικρό τμήμα του φάσματος υπόκειται σε διαλείψεις.

Στο πεδίο του χρόνου, η ανθεκτικότητα ως προς τις διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης οφείλεται στο γεγονός ότι οι καθυστερημένες εκδοχές του σήματος έχουν μικρή συσχέτιση με την αρχική ακολουθία εξάπλωσης, οπότε και έχουν αμελητέα έξοδο από το δέκτη. Επιπλέον, τα συστήματα απλωμένου φάσματος με χρήση δεκτών Rake εκμεταλλεύονται εποικοδομητικά τις πολλαπλές συνιστώσες του σήματος για να βελτιώσουν την επίδοση του συστήματος. Ουσιαστικά, ο δέκτης Rake αποτελείται, από μια τράπεζα συσχετιστών, ο καθένας από τους οποίους συσχετίζεται με συγκεκριμένη πολυδιαδρομική συνιστώσα του επιθυμητού σήματος. Οι έξοδοι από κάθε συσχετιστή

πολλαπλασιάζονται με κατάλληλο βάρος σύμφωνα με την ένταση της συνιστώσας και ακολουθεί άθροισή τους για την τελική εκτίμηση του σήματος.

Σε ένα σύστημα DS-CDMA, τα δεδομένα βασικής ζώνης εξαπλώνονται μέσω του απευθείας πολλαπλασιασμού με την ακολουθία εξάπλωσης. Κάθε παλμός της ακολουθίας εξάπλωσης αποκαλείται chip. Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται το απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα ενός συστήματος DS-CDMA με διαμόρφωση δυαδικής φάσης BPSK [Rap99], το οποίο αποτελεί μια από τις πολλές δυνατές υλοποιήσεις πομποδέκτη συστήματος DS-CDMA. Συγκεκριμένα, τα συγχρονισμένα σύμβολα δεδομένων προστίθενται κατά modulo-2 (\oplus) στα chip της ακολουθίας εξάπλωσης πριν από τη διαμόρφωση φάσης. Στην πλευρά του δέκτη χρησιμοποιείται ένας σύμφωνος αποδιαμορφωτής BPSK.

Θεωρώντας την εξιδανικευμένη περίπτωση όπου απουσιάζουν ο θόρυβος και η



Σχήμα 5.1: Απλοποιημένο λειτουργικό διάγραμμα συστήματος μετάδοσης DS-CDMA με διαμόρφωση BPSK. (α) Πόμπος (β) Τμήμα IF του δέκτη.

παρεμβολή, το λαμβανόμενο σήμα απλωμένου φάσματος ενός τυχαίου χρήστη εκφράζεται υπό τη μορφή

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} m(t)p(t) \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (5.1)$$

όπου $m(t)$ η ακολουθία δεδομένων, $p(t)$ η ακολουθία εξάπλωσης, f_c η συχνότητα φέροντος και θ η γωνία φάσης για $t = 0$. Η κυματομορφή δεδομένων αποτελείται από μη επικαλυπτόμενους ορθογώνιους παλμούς με πλάτος ± 1 . Το σήμα $m(t)$ αποτελείται από σύμβολα δεδομένων διάρκειας T_s . Το σήμα $p(t)$ αποτελείται από παλμούς chip με ορθογώνια συνήθως μορφή, πλάτους ± 1 και διάρκειας T_c . Το χρονικό σημείο μετάβασης μεταξύ συμβόλων δεδομένων και chip ταυτίζεται έτσι ώστε ο λόγος του T_s προς το T_c να είναι ακέραιος. Αν W το εύρος ζώνης του σήματος απλωμένου φάσματος $s(t)$ και B το εύρος ζώνης του $m(t) \cos(2\pi f_c t + \theta)$, η εξάπλωση λόγω πολλαπλασιασμού με την ακολουθία $p(t)$ έχει ως αποτέλεσμα $W \gg B$.

Το Σχήμα 5.1β απεικονίζει το δέκτη του συστήματος. Υποθέτοντας ότι στο δέκτη επιτυγχάνεται συγχρονισμός των κωδίκων, το λαμβανόμενο σήμα διέρχεται από ένα ευρυζωνικό φίλτρο και πολλαπλασιάζεται με ένα τοπικό αντίγραφο της ακολουθίας εξάπλωσης $p(t)$. Δεδομένου ότι $p(t) = \pm 1$, ο πολλαπλασιασμός αυτός δημιουργεί στην είσοδο του αποδιαμορφωτή το επανασυμπτυγμένο σήμα

$$s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} m(t) \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (5.2)$$

Μετά την αντίστοιχη αποδιαμόρφωση, από το σήμα BPSK $s_1(t)$, ανακτάται το σήμα πληροφορίας $m(t)$.

Ένα προσεγγιστικό μέτρο της δυνατότητας απόρριψης των παρεμβολών σε ένα σύστημα DS-CDMA είναι ο λόγος W/B , γνωστός με τις ονομασίες παράγοντας εξάπλωσης (spreading factor), κέρδος επεξεργασίας (processing gain) ή κέρδος εξάπλωσης (spreading gain). Για τη συνέχεια της διατριβής υιοθετείται ο τρίτος όρος οριζόμενος από τη σχέση

$$G_S = \frac{T_s}{T_c} = \frac{W}{B} \quad (5.3)$$

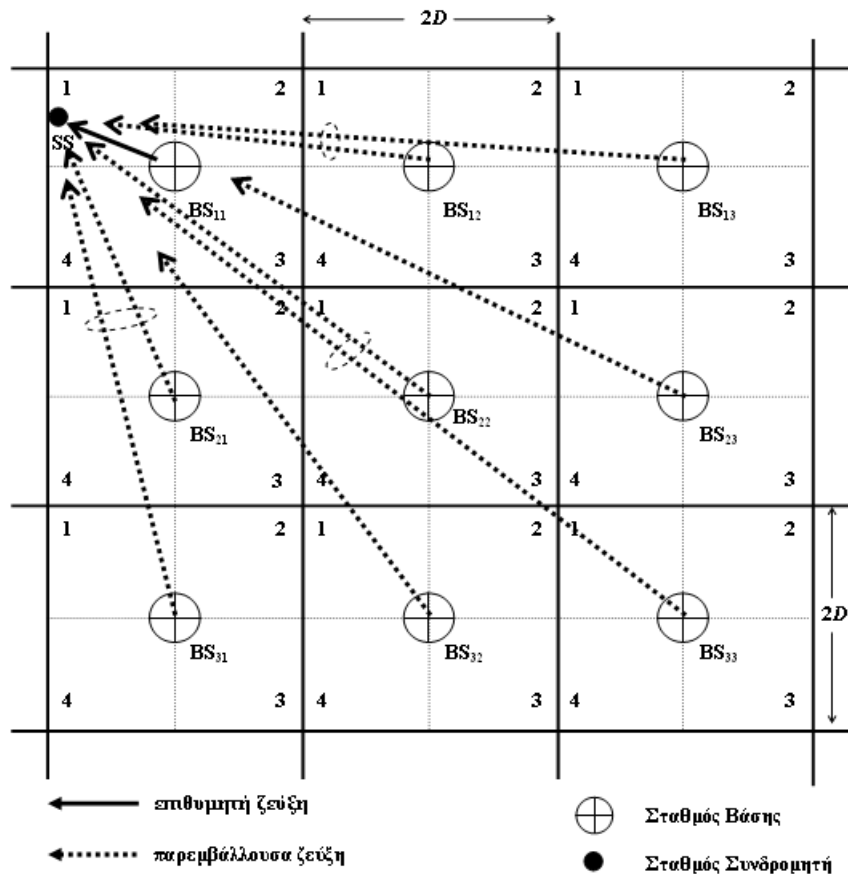
Όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος εξάπλωσης G_S , τόσο αυξάνει η ικανότητα καταστολής της παρεμβολής του συστήματος.

5.3 Εφαρμογή σε Σταθερά Δίκτυα BWA

Στα πλαίσια των προτύπων WiMAX, οι τεχνολογίες BWA χρησιμοποιούν αποκλειστικά παραλλαγές της τεχνικής TDMA για την πολλαπλή πρόσβαση. Αντίθετα, η εφαρμογή της πολλαπλής πρόσβασης DS-CDMA σε σταθερά δίκτυα BWA σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος έχει προσελκύσει ελάχιστα το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας, κυρίως λόγω κάποιων πρακτικών ζητημάτων που προκύπτουν. Ειδικότερα, μολονότι σημαντικό τμήμα του φάσματος έχει εκχωρηθεί για εφαρμογές LMDS, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης χρήστη που εξυπηρετούνται από τα υπό μελέτη συστήματα, καθιστούν αμφίβολη την επίτευξη κερδών εξάπλωσης επαρκούς τιμής. Επιπλέον, όπως προκύπτει από το Κεφάλαιο 2, η πολυδιαδρομική διάδοση αποτελεί δευτερεύοντα παράγοντα διαλείψεων σε μικροκυματικές ζεύξεις LOS σε χιλιοστομετρικά μήκη κύματος. Επομένως, οι διάφορες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών για την εποικοδομητική επεξεργασία των συνιστώσεων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (π.χ. ο δέκτης Rake) δεν είναι ικανές να προσφέρουν αξιόλογη βελτίωση της επίδοσης του συστήματος.

Σε πείσμα αυτών των επιφυλάξεων, οι πρωτοπόρες εργασίες [Hal00], [Sar01] διεξήγαγαν σημαντικές προκαταρκτικές έρευνες στο αντικείμενο των δικτύων CDMA-LMDS. Οι εργασίες αυτές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι, τουλάχιστον για τη ζεύξη upstream, η χρήση της τεχνικής DS-CDMA προσφέρει μεγαλύτερη ανοχή στη διακυβελική παρεμβολή συγκριτικά με τα καθιερωμένα σχήματα TDMA. Το προηγούμενο συμπέρασμα στοιχειοθετείται με απλό τρόπο στην Ενότητα 5.4.

Σε σχέση με τη διερεύνηση της αναχρησιμοποίησης συχνότητας που πραγματοποιήθηκε στην Ενότητα 1.5.2, στις εργασίες [Nov03], [Tsa02] και [Hal00] προτείνονται διάφορες προσεγγίσεις ως προς τη διαίρεση σε τομείς σε δίκτυα CDMA-LMDS. Μελετώνται οι γνωστές τεχνικές της αναχρησιμοποίησης συχνότητας και της εναλλαγής πολώσεων που συζητήθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια. Ωστόσο, η υιοθέτηση της DS-CDMA προσφέρει ένα πρόσθετο πεδίο για τη διάκριση μεταξύ γειτονικών τομέων της κυψέλης και, συγκεκριμένα, το πεδίο των ακολουθιών εξάπλωσης. Ειδικότερα, από την παραπομπή [Nov03] συμπεραίνεται ότι είναι αποδοτικότερη η διαίρεση σε τομείς όταν πραγματοποιείται αποκλειστικά στο πεδίο των κωδίκων. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.7δ, όπου σε κάθε τομέα χρησιμοποιείται ολόκληρο το εύρος ζώνης (παράγοντας αναχρησιμοποίησης 4). Στην προκειμένη περίπτωση, η αυξημένη διακυβελική παρεμβολή αντι-



Σχήμα 5.2: Κυβελωτή αρχιτεκτονική του δικτύου CDMA-LMDS: Τετραγωνικές κυψέλες με τομείς των 90° . Η διάκριση σε τομείς πραγματοποιείται με χρήση διαφορετικών κωδίκων εξάπλωσης. Το σχήμα απεικονίζει επίσης τα σενάρια παρεμβολής στη ζεύξη downstream για ένα τυχαίο SS στον τομέα 1 της κυψέλης (1,1).

σταθμίζεται από το υψηλότερο κέρδος εξάπλωσης. Κατ' αυτό τον τρόπο, προκύπτει η κυβελωτή αρχιτεκτονική του Σχήματος 5.2, στο οποίο η αρίθμηση των τομέων δεν αντιστοιχεί σε διαφορετικές συχνότητες αλλά σε διαφορετικές ακολουθίες εξάπλωσης.

Οι ακολουθίες εξάπλωσης που χρησιμοποιούνται στα συστήματα DS-CDMA μπορούν να διαχωρισθούν στις ακολουθίες ψευδοθορύβου (Pseudo-Noise, PN) και στις ορθογώνιες (orthogonal) ακολουθίες. Η επίδοση των ακολουθιών εξάπλωσης κάθε είδους καθορίζεται από τις ιδιότητες της αυτοσυσχέτισης και της ετεροσυσχέτισής τους. Θεωρώντας δύο ακολουθίες εξάπλωσης $p^{(j)}(t)$ και $p^{(k)}(t)$, η αυτοσυσχέτιση ορίζεται ως

$$R_{kk} = \sum_{i=1}^Q p_i^{(k)} p_{q+i}^{(k)} \quad q = -(Q - 1), \dots, Q \quad (5.4)$$

και η ετεροσυσχέτιση ως

$$R_{jk} = \sum_{i=1}^Q p_i^{(j)} p_{q+i}^{(k)} \quad q = -(Q-1), \dots, Q \quad (5.5)$$

όπου $p_i \in \{-1, +1\}$ το πλάτος της ακολουθίας σε κάθε περίοδο T_c . Οι ακολουθίες PN είναι ψευδοτυχαίες ακολουθίες που παράγονται από γραμμικούς καταχωρητές ολίσθησης (linear shift registers). Βασικό χαρακτηριστικό των ορθογώνιων ακολουθιών είναι ότι η τιμή της ετεροσυσχέτισής τους είναι μηδέν στην περίπτωση σύγχρονης μετάδοσης. Από τις δύο ανωτέρω επιλογές, στις εργασίες [Sar01], [Ara05b] προτιμήθηκαν οι ορθογώνιες ακολουθίες εξάπλωσης προκειμένου να επιτευχθεί η διαίρεση σε τομείς. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε με σκοπό να αποφευχθεί η ενδοκυβελική παρεμβολή και στηρίζεται στο εξής σκεπτικό: Στα συστήματα LMDS, η μέτρια επίδραση των διαλείψεων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, καίτοι ακυρώνει τη δυνατότητα των χρηστών να αξιοποιήσουν ενδεχόμενο διαφορικό κέρδος από τις καθυστερημένες εκδοχές του σήματος, πρακτικά, διατηρεί την ορθογωνιότητα μεταξύ των κωδίκων στο δέκτη.

Για να εκμεταλλευθούν την ώριμη τεχνολογία των κυβελωτών δικτύων επικοινωνιών DS-CDMA δεύτερης γενεάς, οι εργασίες [Sar01], [Ara05b] προτείνουν ένα σχήμα ανάθεσης κωδίκων παρόμοιο με αυτό του προτύπου IS-95 [IS-95]. Η λειτουργία της εξάπλωσης σε κάθε χρήστη πραγματοποιείται μέσω της ανάθεσης μιας ορθογώνιας ακολουθίας WH (Walsh-Hadamard) μήκους $4N$, έτσι ώστε ένας τομέας να μπορεί να εξυπηρετήσει μέχρι N συνδρομητές (πλήρες φορτίο). Στη συνέχεια, το σήμα που προκύπτει πολλαπλασιάζεται με μια μεγάλη μήκους ακολουθία PN. Ο πολλαπλασιασμός αυτός αποσκοπεί στη διάκριση μεταξύ των BS, η οποία επιτυγχάνεται μέσω διαφορετικής χρονικής ολίσθησης της ακολουθίας PN σε κάθε BS. Σε κάθε κυψέλη, η διαίρεση σε τομείς πραγματοποιείται χωρίζοντας το σύνολο των κωδίκων WH σε τέσσερα διακριτά υποσύνολα με αποτέλεσμα κάθε κυψέλη να αποτελείται από τέσσερις τομείς (αριθμούνται ως 1, 2, 3, 4 στο Σχήμα 5.2).

Όπως αποκαλύπτει το Σχήμα 5.2, στη ζεύξη downstream, όλοι οι BS γειτονικών κυβελών αποτελούν πηγές παρεμβολής CCI. Ωστόσο, σε συγκεκριμένη θέση του SS κάθε τομέα (τομέας 1 της κυψέλης (1,1) στο παράδειγμα του Σχήματος 5.2), το πλήθος των IBS περιορίζεται από το στενό εύρος HPBW της κεραίας λήψης. Διατηρώντας τους συμβολισμούς του προηγούμενου κεφαλαίου και παραλείποντας την επίδραση των

διαλείψεων, η γενική έκφραση για τη μέση τιμή του λόγου CIR στη ζεύξη downstream είναι

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{down} = \frac{C}{I_{intra} + I_{inter}} \times \frac{W}{B} \quad (5.6)$$

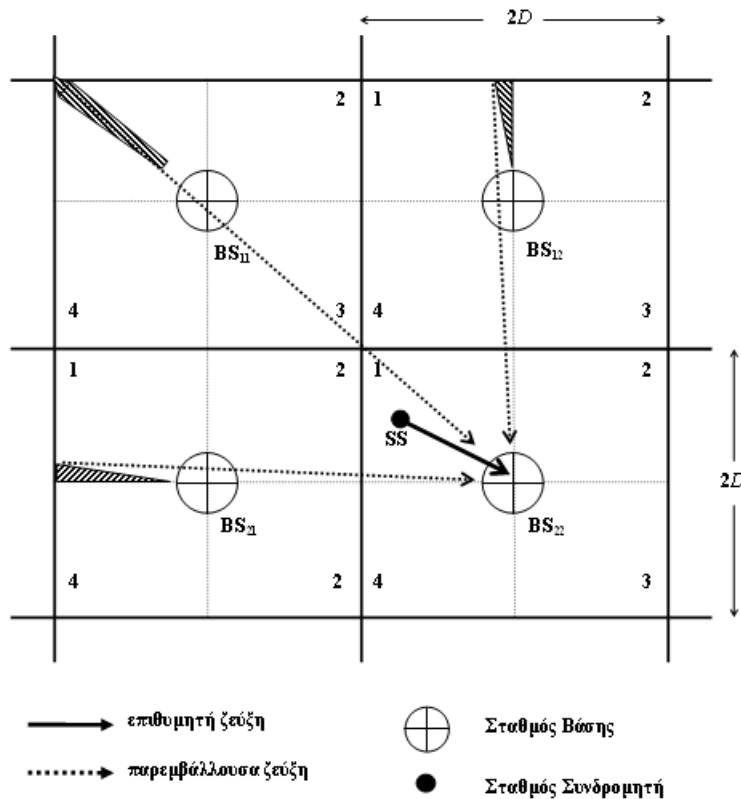
όπου ο αριθμητής

$$C \propto EIRP_{BS,D} G_{R,SS}(0) (1/d_D)^m \quad (5.7)$$

είναι ανάλογος της ισχύος του επιθυμητού σήματος. Αν W το εύρος ζώνης των chip και B το εύρος ζώνης του σήματος πληροφορίας, το κλάσμα W/B ισοδυναμεί με το κέρδος εξάπλωσης G_S . Επίσης, ο πρώτος όρος του παρονομαστή

$$I_{intra} \propto (1 - \alpha)(N - 1)EIRP_{BS,D} G_{R,SS}(0) (1/d_D)^m \quad (5.8)$$

παριστάνει τη συνολική ισχύ από τον BS_{11} προς τους υπόλοιπους $(N - 1)$ συνδρομητές στον τομέα (ενδοκυβελική παρεμβολή) και α είναι ο παράγοντας ορθογωνιότητας μεταξύ των ακολουθιών εξάπλωσης. Υιοθετώντας ακολουθίες τύπου WH και λαμβάνοντας υπόψη τη μέτρια επίδραση των διαλείψεων λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, $\alpha = 1$, οπότε



Σχήμα 5.3: Σενάριο παρεμβολής στη ζεύξη upstream θεωρώντας ως σταθμό θύμα τον BS_{22} .

ο όρος I_{intra} εξαλείφεται. Ο δεύτερος όρος του παρονομαστή γράφεται

$$I_{inter} \propto N \sum_{k=1}^K EIRP_{BS,I}^{(k)} G_{R,SS}^{(k)}(\theta_k) (1/d_I^{(k)})^m \quad (5.9)$$

και προέρχεται από τον παρεμβάλλοντα IBS k , $k = 1, \dots, K$, που εξυπηρετεί N ενεργούς χρήστες κάποιου τομέα γειτονικής κυψέλης (διακυβελική παρεμβολή).

Αντίθετα, στο Σχήμα 5.3 εξετάζεται το σενάριο της παρεμβολής CCI στη ζεύξη upstream. Στο υπόψη σχήμα επιλέγεται ο BS₂₂ ως σταθμός αναφοράς. Ισχύει ότι οποιοσδήποτε συνδρομητής που ανήκει στον τομέα 1 γειτονικής κυψέλης δρα ως παρεμβάλλον ISS προς τον BS₂₂. Ωστόσο, ισχυρή παρεμβολή προκαλείται μόνο από θέσεις του τομέα όπου η κεραία των ISS ευθυγραμμίζεται τόσο με τον οικείο BS όσο και με τον BS₂₂. Οι θέσεις αυτές σχηματίζουν αντίστοιχες περιοχές εντός του τομέα παρόμοιες με τις σκιασμένες περιοχές του Σχήματος 5.3, η επιφάνεια των οποίων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κεραίας των συνδρομητών. Η γενική έκφραση για τη μέση τιμή του λόγου CIR στην περίπτωση της ζεύξης upstream είναι

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{up} = \frac{C}{I_{intra} + I_{inter}} \times \frac{W}{B} \times q \quad (5.10)$$

όπου

$$C \propto P_{T,SS} G_{T,SS}(0) (1/d_D)^m \quad (5.11)$$

η ισχύς που λαμβάνεται από τον επιθυμητό χρήστη. Ο πολλαπλασιαστικός παράγοντας q λαμβάνει τιμές στο εύρος στο εύρος 0 έως 1 που αντιπροσωπεύει την επίδραση του ελλιπούς ελέγχου της ισχύος (imperfect power control), όταν υπάρχει σφάλμα κατά την εκτίμηση του διαύλου από το βρόχο ελέγχου. Όμως, δεδομένου ότι στα συστήματα LMDS οι συνδρομητές είναι σταθεροί και ότι τα φαινόμενα διαλείψεων που επιβαρύνουν το δίαυλο ανήκουν στην κατηγορία των αργών διαλείψεων, μπορεί να τεθεί $q = 1$. Επιπλέον, οι παράγοντες

$$I_{intra} \propto (1 - \alpha)(1 - j) \sum_{n=1}^{N-1} P_{T,SS}^{(n)} G_{T,SS}^{(n)}(0) (1/d_D^{(n)})^m \quad (5.12)$$

$$I_{inter} \propto N \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N P_{T,SS}^{(k,n)} G_{T,SS}^{(k,n)}(\theta_{k,n}) (1/d_I^{(k,n)})^m \quad (5.13)$$

αντιστοιχούν στην ενδοκυβελική και τη διακυβελική παρεμβολή CCI, αντίστοιχα. Ειδικότερα, η (5.12) αποτελεί το άθροισμα των σημάτων με αφετηρία τους υπόλοιπους $(N - 1)$ συνδρομητές στον τομέα 1 της κυψέλης (2,2). Η παράμετρος j κυμαίνεται

στο διάστημα $[0,1]$ και ενδεχόμενη αύξησή της εκφράζει τη μείωση της ενδοκυψελικής παρεμβολής όταν εφαρμόζεται η τεχνική της από κοινού ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών (joint multiuser detection, MUD) [Lup89]. Οι δέκτες MUD βασίζονται στο ότι, ενώ η διακυψελική παρεμβολή είναι τυχαίας φύσης, δεν συμβαίνει το ίδιο με την ενδοκυψελική παρεμβολή αφού ο BS γνωρίζει τις ακολουθίες εξάπλωσης όλων των συνδρομητών τους οποίους εξυπηρετεί. Η βασική αρχή λειτουργίας της από κοινού ανίχνευσης συνίσταται στην ταυτόχρονη επίλυση ενός συνόλου γραμμικών εξισώσεων, το πλήθος των οποίων αυξάνει με την αύξηση των συνδρομητών του τομέα. Περισσότερα στοιχεία για την τεχνική MUD ως τρόπου μείωσης της παρεμβολής MAI σε συστήματα CDMA-LMDS παρέχονται στην παραπομπή [Nov02].

Τέλος, ως προς την (5.13), το ζεύγος (k, n) αναφέρεται στο συνδρομητή n , $n = 1, \dots, N$, που ανήκει στην παρεμβάλλουσα κυψέλη k , $k = 1, \dots, K$, αντιπροσωπεύει, δηλαδή, τη διακυψελική παρεμβολή.

5.4 Σύγκριση Διακυψελικής Παρεμβολής μεταξύ Συστημάτων TDMA- και CDMA-LMDS

Στην παραπομπή [Aga07] πραγματοποιείται μια απλοποιημένη σύγκριση των παρεμβολών CCI που προκαλούν οι δύο εναλλακτικές αρχιτεκτονικές πολλαπλής πρόσβασης, και, συγκεκριμένα, το σύστημα TDMA-LMDS που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και το σύστημα CDMA-LMDS που αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο. Η απόσβεση του σήματος θεωρείται ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης ($m = 2$) και ο ρυθμός μετάδοσης κοινός για όλους τους σταθμούς. Προκειμένου να διασφαλισθεί ότι η σύγκριση γίνεται κατά δίκαιο τρόπο, πραγματοποιούνται οι ακόλουθες υποθέσεις όσον αφορά τη διαίρεση σε τομείς. Στην TDMA περίπτωση, οι τέσσερις τομείς προκύπτουν διαιρώντας το συνολικό εύρος ζώνης $4N$ σε τέσσερις ανεξάρτητες ζώνες συχνοτήτων. Στην CDMA περίπτωση, αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συνόλου $4N$ ορθογώνιων κωδίκων σε κάθε κυψέλη¹. Για την απλοποίηση της σύγκρισης, αμελούνται η δυνατότητα εναλλαγής πολώσεων καθώς και τα φαινόμενα XPD για τα

¹Για να παραχθεί πλήθος $4N$ ορθογώνιων κωδίκων απαιτούνται ακολουθίες μήκους $4N$. Συνεπώς, αφού το μήκος μιας ορθογώνιας ακολουθίας αντιστοιχεί στο κέρδος εξάπλωσης του κώδικα, το κέρδος εξάπλωσης ισούται και αυτό με $4N$.

δύο συστήματα. Αποτέλεσμα της αρχιτεκτονικής που μόλις περιγράφηκε είναι ότι κάθε τομέας κυψέλης αποτελείται το πολύ από N συνδρομητές. Επιπλέον, για όλους τους BS υποτίθεται ότι εκπέμπεται η ίδια στάθμη $EIRP_{BS}$. Η τιμή του λόγου CIR που υπολογίζεται για τη σύγκριση λαμβάνει υπόψη αποκλειστικά την παρεμβολή CCI από/προς συνδρομητές που ανήκουν στην πρώτη σειρά παρεμβαλλουσών (δηλ. ομοδι-αυλικών) κυψελών² και είναι ευθυγραμμισμένοι με την πηγή της παρεμβολής, δηλαδή, μεταδίδουν υπό μέγιστο κέρδος κεραίας προς το σταθμό θύμα. Επομένως, η προσέγγιση του προβλήματος αφορά τη χειρότερη περίπτωση και η στάθμη CIR στην οποία υπόκεινται οι σταθμοί εξαρτάται αποκλειστικά από τις αποστάσεις μεταξύ BS-SS.

Για την ανωτέρω διάταξη και υποθέσεις, η τιμή CIR για τη ζεύξη downstream (συνδρομητής που υπόκειται σε παρεμβολή από ένα μόνο IBS) στο σύστημα TDMA υπολογίζεται από μια απλοποιημένη εκδοχή της (4.5)

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{down}^{TDMA} = \left(\frac{d_I}{d_D}\right)^2 \quad (5.14)$$

Αν θεωρηθεί ότι ο SS βρίσκεται στη διαγώνια κορυφή του τομέα (χειρότερη θέση του τομέα), τότε $d_D = \sqrt{2}D$ και $d_I = 5\sqrt{2}D$ (που αντιστοιχεί σε έναν IBS σε απόσταση δύο κυψελών) και ο λόγος CIR καταλήγει ίσος με 14dB. Στη ζεύξη upstream ενός σταθερού συστήματος BWA χρησιμοποιείται συνήθως η τεχνική APC. Υιοθετείται, λοιπόν, μια απλοποιημένη εκδοχή της (3.10) αγνοώντας τις διαλείψεις, σύμφωνα με την οποία η ισχύς εκπομπής από τον SS είναι ανάλογη του μήκους της ζεύξης BS-SS. Μετά από απλές αλγεβρικές πράξεις εξάγεται το συμπέρασμα ότι, στο σύστημα TDMA-LMDS, η χειρότερη τιμή CIR τόσο στην κατεύθυνση downstream όσο και στην κατεύθυνση upstream είναι η ίδια και ισούται με 14dB.

Με χρήση της (5.6), η τιμή του CIR στη ζεύξη downstream του συστήματος CDMA-LMDS προκύπτει

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{down}^{CDMA} = \frac{4N}{N} \left(\frac{d_I}{d_D}\right)^2 \quad (5.15)$$

όπου $W/B = 4N$, $\alpha = 1$ και η παρεμβολή προέρχεται από έναν IBS σε απόσταση μιας κυψέλης, ο οποίος μεταδίδει προς N ενεργούς συνδρομητές της δικής του κυψέλης (βρίσκεται, δηλαδή, υπό πλήρες φορτίο). Για την ίδια ακριβώς γεωμετρία επιθυμητού

²Στην TDMA, λόγω του σχήματος αναχρησιμοποίησης συχνότητας που επιλέγεται, η παρεμβολή από την πρώτη σειρά σταθμών αντιστοιχεί σε παρεμβαλλόντες σταθμούς σε απόσταση δύο κυψελών, ενώ στην CDMA η απόσταση αυτή μειώνεται στη μία κυψέλη.

SS, $d_D = \sqrt{2}D$, $d_I = 3\sqrt{2}D$ και η (5.15) δίδει 15.5dB. Αν κατά τον υπολογισμό του CIR ληφθεί υπόψη και δεύτερος IBS σε απόσταση δύο κυψελών ($d_I = 5\sqrt{2}D$), η τιμή του CIR μειώνεται στα 14.2dB, η οποία εξακολουθεί να υπερβαίνει ελαφρώς αυτή του σχήματος TDMA. Οι υπολογισμοί για το CIR στη ζεύξη upstream είναι περίπλοκοι καθώς η παρεμβολή CCI προέρχεται από το ποσοστό συνδρομητών του τομέα στις σκιασμένες περιοχές του Σχήματος 5.3 (περιοχές του τομέα που δημιουργούν ισχυρή παρεμβολή). Σύμφωνα με την εργασία [Sar01], μια ρεαλιστική υπόθεση για το ποσοστό αυτό είναι 25%, ενώ από το γεωμετρικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε στην εργασία [Ara05b] με βάση τα πρότυπα κεραιών κατά ETSI προκύπτει το ποσοστό 13% για συνδρομητές στους τρεις παρεμβάλλοντες τομείς (οριζόντιο, κατακόρυφο και διαγώνιο τομέα). Για την παρούσα προσέγγιση, όπου εξετάζεται η χειρότερη περίπτωση, υποτίθεται ότι 50% των πηγών παρεμβολής προκαλούν ισχυρή παρεμβολή. Με αντικατάσταση του ποσοστού αυτού στην (5.8) (αμελώντας τις τεχνικές APC και MUD) λαμβάνεται το αποτέλεσμα 18.5dB. Συμπερασματικά, η επίδοση ως προς το CIR στη ζεύξη downstream μεταξύ των συστημάτων TDMA-LMDS και CDMA-LMDS είναι συγκρίσιμη, ενώ η CDMA επιδεικνύει μεγαλύτερη ανοχή στην παρεμβολή κατά την κατεύθυνση μετάδοσης upstream. Για τη θεμελίωση αυτού του ενδιαφέροντος συμπεράσματος, το οποίο προσφέρει σημαντική εμβάθυνση σε σχέση με την πλεονεκτικότερη τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης, απαιτούνται πρόσθετες μελέτες στα πλαίσια ενός πλέον ρεαλιστικού περιβάλλοντος λειτουργίας και, ενδεχομένως, πειραματικά δεδομένα. Μάλιστα, το επόμενο κεφάλαιο της διατριβής επικεντρώνεται σε τεχνικές μείωσης της παρεμβολής στη ζεύξη downstream, η εφαρμογή των οποίων καθιστά την πολλαπλή πρόσβαση DS-CDMA πλεονεκτικότερη και στις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης. Σε κάθε περίπτωση, η πιθανή βελτίωση της χωρητικότητας που προσφέρεται από τα συστήματα CDMA-LMDS δεν μπορεί να αγνοηθεί. Για λόγους πληρότητας, μνημονεύεται η αναφορά [Bos04b], όπου καταγράφεται μια παρόμοια βελτίωση της χωρητικότητας σε σταθερά δίκτυα BWA με υιοθέτηση της τεχνικής TCM (Trellis Coded Modulation). Η τεχνική αυτή εμφανίζει πολλές ομοιότητες με το σχήμα CDMA που παρουσιάζεται στο παρόν.

5.5 Στατιστική Ανάλυση της Διακυβελικής Παρεμβολής σε Δίκτυα CDMA-LMDS

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η στατιστική ανάλυση του λογου CIR στις ζεύξεις downstream [Ara05b] και upstream [Ara05d] λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική δομή της βροχής ως μέσου διάδοσης κατά αναλογία με την αντίστοιχη μελέτη του Κεφαλαίου 4 (Ενότητες 4.4 και 4.5, αντίστοιχα). Οι απαραίτητες υποθέσεις για την εφαρμογή του στατιστικού μοντέλου διακυβελικής παρεμβολής είναι παρόμοιες με εκείνες της Ενότητας 4.3, ενώ οι λεπτομέρειες που αφορούν ειδικά την αναγωγή του μοντέλου σε συστήματα CDMA-LMDS έχουν σκιαγραφηθεί στις προηγούμενες ενότητες του παρόντος. Αυτές επαναλαμβάνονται αμέσως κατωτέρω με συνοπτικό τρόπο υπό τη μορφή σημείων:

- Η κυβελωτή αρχιτεκτονική του δικτύου CDMA-LMDS απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2. Αποτελείται από τετραγωνικές κυψέλες ακτίνας D , όπου οι τέσσερις τομείς ανά κυψέλη χρησιμοποιούν ανεξάρτητα υποσυνόλα κωδίκων εξάπλωσης WH επιλεγμένα από το συνολικό πλήθος $4N$. Ολόκληρο το διαθέσιμο εύρος ζώνης αναχρησιμοποιείται σε κάθε τομέα, ενώ δεν χρησιμοποιείται κάποια τεχνική εναλλαγής πολώσεων.
- Οι διάφοροι BS αναγνωρίζονται από χρονικά ολισθημένες εκδοχές της ίδιας ακολουθίας PN μεγάλου μήκους.
- Κατά τα γνωστά, το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας του SS θεωρείται σύμφωνο με τις προδιαγραφές του ETSI [ETSI02] και [ETSI01].
- Οι κεραίες των BS χαρακτηρίζονται από ομοιόμορφο κατευθυντικό κέρδος στο εύρος $HPBW = 90^\circ$ και δεν εμφανίζουν πλευρικούς λοβούς.
- Το εκπεμπόμενο από κάθε BS EIRP στη ζεύξη downstream θεωρείται σταθερό.
- Στη ζεύξη upstream, η ισχύς εκπομπής από το συνδρομητή καθορίζεται με στατικό τρόπο ανάλογα με την απόσταση d από τον BS. Κατά συνέπεια, η ισχύς εκπομπής από κάθε SS αντιπροσωπεύεται από τη συνάρτηση $P_{T,SS}(d)$. Στην περίπτωση αυτή, παραλείπεται η ενσωμάτωση στο βρόχο ελέγχου μιας δυναμικής μονάδας για την αντιστάθμιση των χρονομεταβλητών διαλείψεων λόγω βροχής,

όπως έγινε στην αντίστοιχη ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, γεγονός που θα οδηγούσε σε μεγάλη αναλυτική πολυπλοκότητα.

- Ως προς το περιβάλλον διάδοσης, θεωρείται δεδομένη η ύπαρξη συνθηκών LOS για αποστάσεις μερικών κυψελών.
- Καθώς η διάδοση πραγματοποιείται υπό συνθήκες LOS, κυρίαρχο μοντέλο διαλείψεων είναι η απόσβεση λόγω βροχής. Προς τούτο, υιοθετείται κατά τα γνωστά το λογαριθμοκανονικό μοντέλο και κάθε χρήστης οφείλει να συμμορφώνεται με συγκεκριμένη πιθανότητα διακοπής λόγω θερμικού θορύβου –βλ. (4.4)–.

5.5.1 Ανάλυση διακυβελικής παρεμβολής στη ζεύξη downstream

Επιστρέφοντας στο Σχήμα 5.2, θα εκτιμηθεί η κατανομή του λόγου CIR του συνδρομητή SS στον τομέα 1 της κυψέλης (1,1). Υποθέτοντας ότι για αποστάσεις μέχρι δύο κυψέλες οι ζεύξεις είναι LOS, υπάρχουν πέντε πιθανοί IBS. Ειδικότερα, εκτός από το επιθυμητό σήμα το οποίο λαμβάνει ο SS από τον BS₁₁, ανάλογα με τη θέση του εντός του τομέα υποφέρει από διακυβελική παρεμβολή CCI που προέρχεται είτε από ένα από τα τρία ζεύγη IBS {BS₁₂,BS₁₃}, {BS₂₁,BS₃₁}, {BS₂₂,BS₃₃} είτε από έναν μόνο IBS (BS₂₃ ή BS₃₂). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η περίπτωση παρεμβολής από ζεύγος IBS, δηλαδή υποτίθεται ότι οι πηγές της παρεμβολής βρίσκονται στην πλησιέστερη κυψέλη και στη δεύτερη γειτονική κυψέλη, I_1 και I_2 , αντίστοιχα. Ο αντίστοιχος λόγος CIR δίδεται από τη σχέση

$$\left(\frac{C}{\sum_{i=1}^2 I_i} \right)_{down} = \frac{EIRP_{BS} G_{R,SS}(0^\circ) / (10^{A_D/10} d_D^2)}{\sum_{i=1}^2 K_i EIRP_{BS} G_{R,SS}(\theta_i) / (10^{A_{I_i}/10} d_{I_i}^2)} \times \frac{W}{B} \quad (5.16)$$

Στην (5.16), οι δείκτες D , I_1 , I_2 αντιστοιχούν στο επιθυμητό σήμα και τα σήματα από τους δύο IBS, αντίστοιχα. Οι γωνίες θ_i , $i = 1, 2$, είναι οι γωνίες αζιμουθίου που σχηματίζονται από την επιθυμητή ζεύξη BS₁₁-SS και τις παρεμβάλλουσες ζεύξεις με μήκη d_D , d_{I_1} , d_{I_2} , αντίστοιχα. Οι παράγοντες K_i , $i = 1, 2$, εκφράζουν το πλήθος των ενεργών χρηστών στους τομείς 1 των δύο IBS. Επίσης, $G_{R,SS}(\theta)$ είναι το κατευθυντικό κέρδος της κεραίας του SS. Εκφράζοντας την (5.16) σε dB προκύπτει

$$CIR_{down}(A_D, A_{I_1}, A_{I_2}) = A_{I_1} + A_{I_2} - A_D - 10 \log \left[10^{\frac{A_{I_1} - (\frac{C}{I_2})_{cs}}{10}} + 10^{\frac{A_{I_2} - (\frac{C}{I_1})_{cs}}{10}} \right] \quad (5.17)$$

Η τ.μ. CIR_{down} είναι συνάρτηση των τ.μ. της απόσβεσης λόγω βροχής στην επιθυμητή και στις δύο παρεμβάλλουσες ζεύξεις A_D , A_{I_1} και A_{I_2} , αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές CIR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού υπολογίζονται από την (5.6) θέτοντας $\alpha = 1$. Οι λόγοι $(C/I_i)_{cs}$ εκφράζονται σε dB υπό την απλοποιημένη μορφή

$$\left(\frac{C}{I_i}\right)_{cs} = 10 \log \left[\frac{1}{K_i} \frac{W}{B} \left(\frac{d_{I_i}}{d_D}\right)^2 \right] + [G_{R,SS}(0^\circ) - G_{R,SS}(\theta_i)] \quad i = 1, 2 \quad (5.18)$$

Ο συνολικός λόγος CIR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού εξάγεται με απλό τρόπο από την (5.17) θέτοντας $A_D = A_{I_i} = 0$.

Κατά τρόπο παρόμοιο με τη στατιστική αντιμετώπιση του CIR για τη ζεύξη downstream του Κεφαλαίου 4, ορίζεται η πιθανότητα AIP

$$AIP = \Pr \left[\left(\frac{C}{\sum_{i=1}^2 I_i} \right)_{down} \leq \gamma_{th}, 0.5 \leq A_D \leq F \right] \quad (5.19)$$

Η πιθανότητα AIP αντιπροσωπεύει την ετησίως αποδεκτή πιθανότητα παραμονής του λόγου CIR κάτω από το περιθώριο παρεμβολής γ_{th} , ενώ, συγχρόνως, η απόσβεση λόγω βροχής στην επιθυμητή ζεύξη δεν υπερβαίνει το περιθώριο διαλείψεων F . Με τη βοήθεια του μετασχηματισμού (4.11), η τελική έκφραση για την πιθανότητα AIP είναι πανομοιότυπη με την (4.12) αφού τροποποιηθούν κατάλληλα οι αντίστοιχοι δείκτες των μεταβλητών που εμπλέκονται. Επομένως

$$AIP = \int_{u(a_S)}^{u(F)} du_D \int_{-\infty}^{u_1^{th}} du_{I_1} p_{U_D U_{I_1}}(u_D, u_{I_1}) \left[1 - 0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{u_2^{th} - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (5.20)$$

Τα όρια του εξωτερικού ολοκληρώματος προσδιορίζονται από τη συνάρτηση (4.13) με χρήση της (4.14) για τον υπολογισμό της παραμέτρου a_S . Επιπλέον

$$u_i^{th} = \frac{\ln a_{I_i}^{th} - \ln A_{m, I_i}}{S_{a, I_i}}, \quad i = 1, 2 \quad (5.21)$$

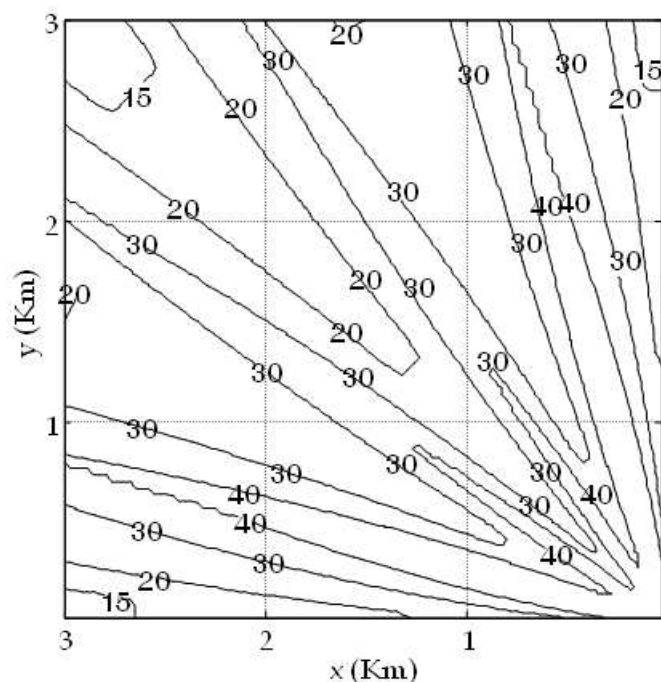
όπου $a_{I_1}^{th}$ και $a_{I_2}^{th}$ οι αντίστοιχες λύσεις των εξισώσεων

$$CIR_{down}(A_D, a_{I_1}^{th}, 0) = \gamma_{th}$$

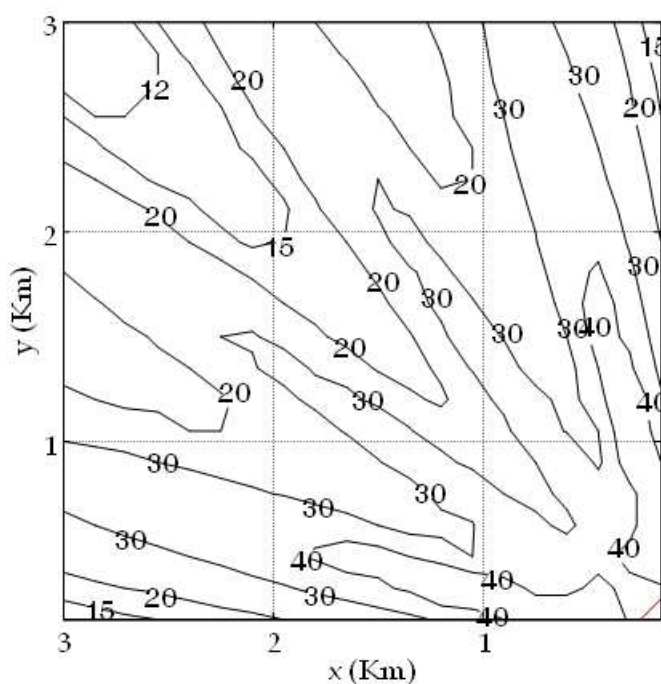
$$CIR_{down}(A_D, A_{I_1}, a_{I_2}^{th}) = \gamma_{th}$$

Όσον αφορά τις στατιστικές παραμέτρους μ και σ , αυτές προκύπτουν από τις (Α'.21) και (Α'.22) με κατάλληλη επιλογή δεικτών

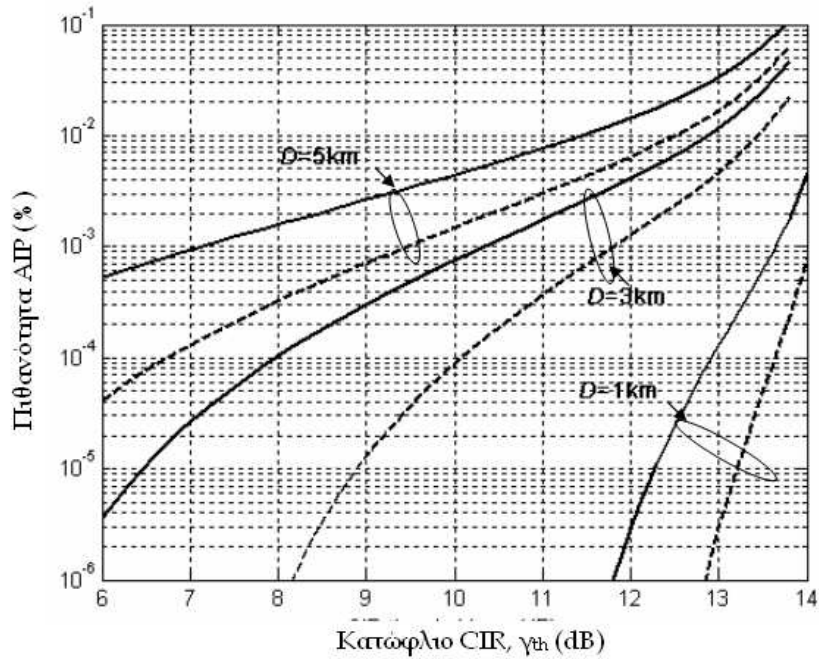
$$\mu = \frac{\rho_{n_{DI_2}} - \rho_{n_{I_1 I_2}} \rho_{n_{DI_1}}}{1 - \rho_{n_{DI_1}}^2} u_D + \frac{\rho_{n_{I_1 I_2}} - \rho_{n_{DI_1}} \rho_{n_{DI_2}}}{1 - \rho_{n_{DI_1}}^2} u_{I_1} \quad (5.22)$$



Σχήμα 5.4: Κατανομή $CIR(x,y)$ εντός του τομέα στη ζεύξη *downstream* υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (ακτίνα κυψέλης $D = 3\text{Km}$, συχνότητα λειτουργίας 28GHz). Η θέση του *BS* είναι η κάτω δεξιά κορυφή του τομέα.



Σχήμα 5.5: Κατανομή $CIR(x,y)$ εντός του τομέα στη ζεύξη *downstream* υπό συνθήκες διαλείψεων σύμφωνα με τη προδιαγραφή $AIP = 0.001\%$ για την Αθήνα, *GR* (ακτίνα κυψέλης $D = 3\text{Km}$, συχνότητα λειτουργίας 28GHz).

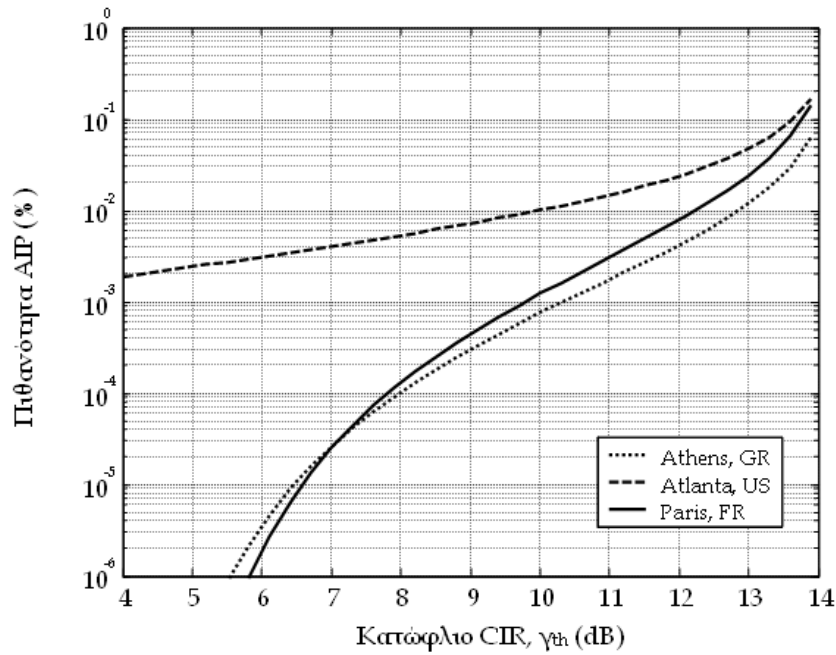


Σχήμα 5.6: Κατανομή της πιθανότητας AIP συναρτήσει του γ_{th} για συνδρομητή που είναι τοποθετημένος στη διαγώνια κορυφή (μέγιστη απόσταση από τον BS). Οι σταθερές καμπύλες αντιστοιχούν σε παρεμβολή από παράλληλους παρεμβολείς και οι διακεκομμένες καμπύλες σε παρεμβολή από διαγώνιους παρεμβολείς. Οι τιμές της ακτίνας της κυψέλης αντιστοιχούν σε μακροκυψελωτή ($D = 5Km$), μικροκυψελωτή ($D = 3Km$) και πικοκυψελωτή ($D = 1Km$) αρχιτεκτονική CDMA-LMDS.

$$\sigma = \left(\frac{1 - \rho_{n_{DI_1}}^2 - \rho_{n_{DI_2}}^2 - \rho_{n_{I_1I_2}}^2 + 2\rho_{n_{DI_1}}\rho_{n_{DI_2}}\rho_{n_{I_1I_2}}}{1 - \rho_{n_{DI_1}}^2} \right)^{1/2} \quad (5.23)$$

όπου ρ_{nij} ο λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης μεταξύ ζευγών των τριών τ.μ. που εμπλέκονται.

Για την εφαρμογή της προηγούμενης διαδικασίας, θεωρείται ένα υποθετικό δίκτυο LMDS εγκατεστημένο στην Αθήνα, GR, που λειτουργεί στα 28GHz με κατακόρυφη πόλωση. Εφόσον οι συνδρομητές στα δίκτυα BWA χιλιοστομετρικού μήκους κύματος είναι σταθεροί, η σχεδίαση και η διαστασιοποίηση του συστήματος πρέπει να γίνεται με βάση τη χειρότερη περίπτωση παρεμβολής, διαφορετικά κάποιοι συνδρομητές δεν θα εκπληρώνουν τις απαιτήσεις της QoS σε μόνιμη βάση. Για το λόγο αυτό, σε όλες τις αριθμητικές εφαρμογές που ακολουθούν, γίνεται η υπόθεση ότι όλοι οι τομείς λειτουργούν υπό πλήρες φορτίο, δηλαδή ότι $K_i = N$. Επιπλέον, λόγω της χρήσης ορθογώνιων ακολουθιών, το κέρδος εξάπλωσης είναι $G_S = 4N$ και η ακτίνα της κυψέλης υποτίθεται $D = 3Km$.



Σχήμα 5.7: Επίδραση των κλιματικών συνθηκών στην κατανομή της πιθανότητας AIP συναρτήσει του γ_{th} για τη χειρότερη θέση SS εντός του τομέα.

Αγνοώντας, καταρχήν, την επίδραση των διαλείψεων, το Σχήμα 5.4 αναπαριστά την κατανομή του $CIR(x, y)$ εντός του τομέα στη ζεύξη downstream υπό συνθήκες καθαρού ουρανού για κάθε θέση (x, y) του SS. Η θέση του BS είναι η κάτω δεξιά κορυφή του τομέα. Λαμβάνοντας υπόψη τη στατιστική ανάλυση των προηγούμενων παραγράφων, το Σχήμα 5.5 παρουσιάζει το ίδιο σύστημα υπό την προδιαγραφή $AIP = 0.001\%$. Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.4 και 5.5 παρατηρείται ότι οι υπο-περιοχές χαμηλού CIR του τομέα διευρύνονται, ενώ οι υπο-περιοχές υψηλού CIR συμπύκνωσης. Επίσης, εμφανίζονται ισοδυναμικές CIR σε χαμηλότερες τιμές από την ελάχιστη υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Γίνεται φανερό ότι, όσον αφορά την παρεμβολή, οι χειρότερες θέσεις συνδρομητή είναι οι κορυφές του τομέα όπου $\theta_i = 0^\circ$ και, επομένως, η τιμή του κέρδους $G_{R,SS}(\theta_i)$ μεγιστοποιείται.

Στο Σχήμα 5.6 σχεδιάζεται η κατανομή της πιθανότητα AIP συναρτήσει του γ_{th} για τους συνδρομητές που βρίσκονται στη χειρότερη διαγώνια και παράλληλη θέση σε απόσταση $\sqrt{(2)D}$ και D από τον οικείο BS, αντίστοιχα. Οι καμπύλες σχεδιάστηκαν για ακτίνες κυψελών $D = 5, 3$ και 1Km ώστε να αντιστοιχούν σε μακρο-, μικρο- και πικοκυβελωτή αρχιτεκτονική δικτύου CDMA-LMDS. Για παράδειγμα, υποθέτοντας ότι για το υπό μελέτη σύστημα υιοθετείται το κάτω όριο $\gamma_{th} = 12\text{dB}$, οι συνδρομητές στη χειρότερη θέση επι της διαγώνιας κορυφής παραμένουν κάτω από αυτή την τιμή για

2.89E-06% ($D = 1\text{Km}$), 4.16E-03% ($D = 3\text{Km}$) και 1.43E-02% ($D = 5\text{Km}$) του ετήσιου χρόνου, ενώ, από το Σχήμα 5.4, η χαμηλότερη τιμή του CIR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού προκύπτει ίση με 14.2dB. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ξεκάθαρα τους επιπλέον περιορισμούς σε σχέση με τη διακυβελική παρεμβολή όταν λαμβάνεται υπόψη η διαφορική απόσβεση λόγω βροχής.

Τέλος, το Σχήμα 5.7 παρουσιάζει την εξάρτηση της διακυβελικής παρεμβολής από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης και, συγκεκριμένα, τη στατιστική του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης, όπως αυτή προκύπτει από τη Σύσταση ITU-R P.837 [ITU837]. Η επίδοση του ίδιου συστήματος όταν αυτό εγκατασταθεί υπό τις κλιματικές συνθήκες της Atlanta, US και Paris, FR, συγκρίνεται με την περιοχή των Αθηνών, που αποτελεί το βασικό παράδειγμα υλοποίησης του προτεινόμενου μοντέλου καθόλη την έκταση της παρούσας ενότητας.

5.5.2 Ανάλυση διακυβελικής παρεμβολής στη ζεύξη upstream

Το σενάριο διακυβελικής παρεμβολής στη ζεύξη upstream απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3 και η ανάλυση διαφοροποιείται σημαντικά από αυτήν του Κεφαλαίου 4 σε συμβατικά συστήματα TDMA-LMDS κατά την ίδια κατεύθυνση μετάδοσης. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο την πρώτη σειρά παρεμβαλλουσών κυψελών, η οποία όμως προκαλεί το σημαντικότερο μέρος της παρεμβολής CCI, ο σταθμός BS₂₂ θεωρείται ως σταθμός θύμα της παρεμβολής. Ο συνδρομητής SS που βρίσκεται στον τομέα 1 της κυψέλης αναφοράς, μεταδίδει το επιθυμητό σήμα προς τον BS₂₂, ενώ όλοι οι συνδρομητές του τομέα 1 των BS₂₁, BS₁₁ και BS₁₂ αποτελούν πιθανούς ISS.

Εφόσον ο ακριβής υπολογισμός της κατανομής του CIR στη ζεύξη upstream είναι αρκετά πολύπλοκος, γίνονται ορισμένες απλοποιητικές υποθέσεις. Όσον αφορά τις τιμές του λόγου CIR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι K_i συνδρομητές καθενός από τους τρεις παρεμβάλλοντες τομείς που προκαλούν ισχυρή παρεμβολή, δηλαδή εκείνοι οι ISS για τους οποίους ο BS₂₂ είναι ορατός υπό μέγιστο κέρδος κεραίας [Sar01]. Υποθέτοντας ότι οι συνδρομητές είναι κατανομημένοι ομοιόμορφα, οι σκιασμένες περιοχές των τομέων στο Σχήμα 5.3 παρέχουν μια προσεγγιστική εικόνα των αντίστοιχων θέσεων ισχυρής παρεμβολής. Αν κάθε τομέας λειτουργεί υπό πλήρες φορτίο, δηλαδή υπάρχουν N ενεργοί συνδρομητές ανά τομέα, τότε, για

το πρότυπο κεραιάς συνδρομητή του ETSI στις συχνότητες 24-30GHz, οι σκιασμένες περιοχές στις παράλληλες κυψέλες καταλαμβάνουν το 2% της έκτασης του τομέα και στη διαγώνια κυψέλη το 9%. Εναλλακτικά, για το πρότυπο κεραιάς συνδρομητή του ETSI στις συχνότητες 40.5-43.5GHz, οι σκιασμένες περιοχές στις παράλληλες κυψέλες καταλαμβάνουν το 5.5% της έκτασης του τομέα και στη διαγώνια κυψέλη το 21%.

Όσον αφορά την ανάλυση υπό συνθήκες βροχής, γίνεται η υπόθεση ότι οι K_i συνδρομητές σε κάθε παρεμβάλλοντα τομέα είναι συγκεντρωμένοι στο πλέον απομακρυσμένο σημείο από τον BS ο οποίος τις εξυπηρετεί. Η συγκεκριμένη υπόθεση δικαιολογείται από τη μορφή των σκιασμένων περιοχών που παράγουν ισχυρή παρεμβολή. Ως αποτέλεσμα, οι τρεις τ.μ. απόσβεσης λόγω βροχής A_{I_1} , A_{I_2} και A_{I_3} που προκύπτουν υπολογίζονται για μήκη ζεύξεων $3D$, $3\sqrt{2}D$ και $3D$, αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη το στατικό έλεγχο της ισχύος ανάλογα με την απόσταση του κάθε SS από τον BS της κυψέλης του και τις υποθέσεις που διατυπώθηκαν προηγουμένως, προκύπτει η γενική σχέση για το λόγο CIR στη ζεύξη upstream

$$\left(\frac{C}{\sum_{i=1}^3 I_i} \right)_{up} = \frac{P_{T,SS}(d_D)G_{T,SS}(0^\circ) / (10^{A_D/10} d_D^2)}{\sum_{i=1}^3 \sum_{n=1}^{K_i} P_{T,SS}(d_{W_i}^{(n)}) G_{T,SS}(0^\circ) / (10^{A_{I_i}/10} (d_{I_i}^{(n)})^2)} \times \frac{W}{B} \quad (5.24)$$

Στην (5.24), με $d_{I_i}^{(n)}$, $d_{W_i}^{(n)}$ συμβολίζονται τα μήκη των ζεύξεων από τον ISS n , $n = 1, \dots, K_i$, του παρεμβάλλοντος τομέα i , $i = 1, 2, 3$, προς τον BS₂₂ και τον BS της κυψέλης του, αντίστοιχα. Ανακατατάσσοντας την (5.24), προκύπτει η συνάρτηση του λόγου CIR στη ζεύξη upstream σε dB

$$\left(\frac{C}{I} \right)_{up} = CIR_{up}(A_D, A_{I_1}, A_{I_2}, A_{I_3}) = A_{I_1} + A_{I_2} + A_{I_3} - A_D - 10 \log \left[10^{\frac{A_{I_1} + A_{I_2} - (\frac{C}{I_3})_{cs}}{10}} + 10^{\frac{A_{I_2} + A_{I_3} - (\frac{C}{I_1})_{cs}}{10}} + 10^{\frac{A_{I_1} + A_{I_3} - (\frac{C}{I_2})_{cs}}{10}} \right] \quad (5.25)$$

όπου οι μεμονωμένοι όροι CIR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού προκύπτουν από τις σχέσεις

$$\left(\frac{C}{I_i} \right)_{cs} = 10 \log \left[\frac{\frac{W}{B} \times \frac{P_{T,SS}(d_D)}{(d_D)^2}}{\sum_{n=1}^{K_i} \frac{P_{T,SS}(d_{W_i}^{(n)})}{(d_{W_i}^{(n)})^2}} \right] \quad i = 1, 2, 3 \quad (5.26)$$

Κατά τρόπο παρόμοιο με την ανάλυση για τη ζεύξη downstream, η πιθανότητα

AIP ορίζεται από τη σχέση

$$AIP = \Pr \left[\left(\frac{C}{\sum_{i=1}^3 I_i} \right)_{up} \leq \gamma_{th}, 0.5 \leq A_D \leq F \right] \quad (5.27)$$

Ακολουθώντας τη στατιστική ανάλυση που ακολουθήθηκε προηγουμένως για αντίστοιχες περιπτώσεις, η τελική έκφραση για την πιθανότητα *AIP* είναι

$$AIP = \int_{u(a_S)}^{u(F)} du_D \int_{-\infty}^{u_1^{th}} du_{I_1} \int_{-\infty}^{u_2^{th}} du_{I_2} p_{U_D U_{I_1} U_{I_2}}(u_D, u_{I_1}, u_{I_2}) \left[1 - 0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{u_3^{th} - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (5.28)$$

Τα όρια του εξωτερικού ολοκληρώματος προσδιορίζονται από τη συνάρτηση (4.13) με χρήση της (4.14) για τον υπολογισμό της παραμέτρου a_S . Επιπλέον, οι παράμετροι u_i^{th} , $i = 1, 2, 3$ υπολογίζονται όπως στην Ενότητα 5.5.1, αφού πρώτα υπολογισθούν οι τιμές $a_{I_i}^{th}$ που ικανοποιούν τις εξισώσεις

$$CIR_{up}(A_D, a_{I_1}^{th}, 0, 0) = \gamma_{th}$$

$$CIR_{up}(A_D, A_{I_1}, a_{I_2}^{th}, 0) = \gamma_{th}$$

και

$$CIR_{up}(A_D, A_{I_1}, A_{I_2}, a_{I_3}^{th}) = \gamma_{th}$$

Επιπλέον, οι στατιστικές παράμετροι μ και σ , προκύπτουν από τις (Α'.28) και (Α'.29) με κατάλληλη επιλογή δεικτών

$$\begin{aligned} \mu = \frac{1}{\det(\mathbf{C})} & [(Q_{11}\rho_{nDI_3} + Q_{12}\rho_{nI_1I_3} + Q_{13}\rho_{nI_2I_3})u_D + \\ & + (Q_{12}\rho_{nDI_3} + Q_{22}\rho_{nI_1I_3} + Q_{23}\rho_{nI_2I_3})u_{I_1} + \\ & + (Q_{13}\rho_{nDI_3} + Q_{23}\rho_{nI_1I_3} + Q_{33}\rho_{nI_2I_3})u_{I_2}] \end{aligned} \quad (5.29)$$

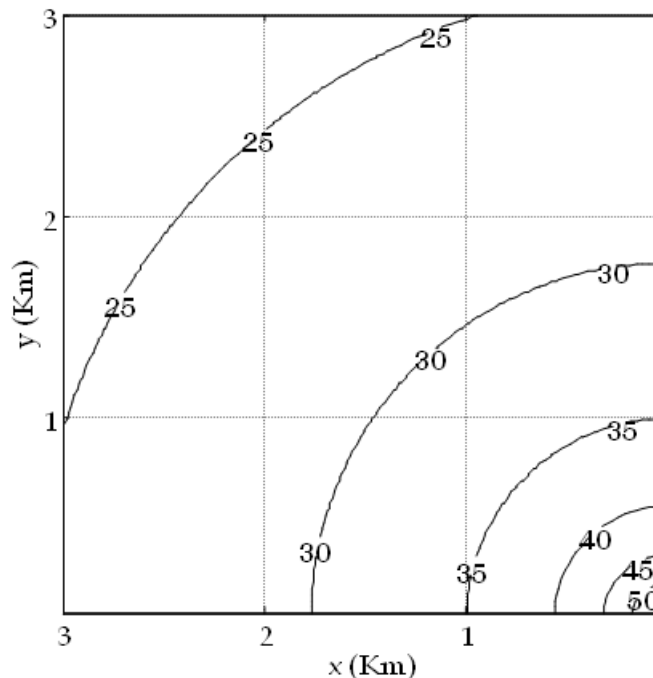
$$\sigma = [1 - Q(\rho_{nDI_3}, \rho_{nI_1I_3}, \rho_{nI_2I_3})]^{1/2} \quad (5.30)$$

Ο πίνακας συνδιακύμανσης \mathbf{C} , η συνάρτηση $Q(\cdot)$ και οι όροι Q_{ij} ορίζονται στο Παράρτημα Α'.4.

Υποθέτοντας ότι δεν υπάρχει διαθέσιμο σχήμα APC, η κατανομή $CIR(x, y)$ για κάθε θέση (x, y) του επιθυμητού SS εντός του τομέα υπό συνθήκες καθαρού ουρανού παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.8. Οι ισοδυναμικές γραμμές έχουν τη μορφή ομόκεντρων

τεταρτοκυκλίων και σχεδιάστηκαν για ακτίνα κυψέλης $D = 3\text{Km}$ και κεραία SS συμβατή με το πρότυπο 24-30GHz του ETSI, που συνεπάγεται ότι στους υπολογισμούς συμπεριλήφθηκαν ISS με γωνία μικρότερη από $\text{HPBW} = 4^\circ$ ως προς τον BS_{22} . Ανάλογα με τη θέση του επιθυμητού SS, το εύρος τιμών του CIR που λαμβάνει ο BS_{22} κυμαίνεται από 62dB (όταν ο SS βρίσκεται στην πλησιέστερη δυνατή θέση προς τον BS_{22}) έως 22.4dB (στη διαγώνια κορυφή του τομέα). Από την άλλη πλευρά, όταν οι συνδρομητές διαθέτουν APC, η τιμή του CIR στη ζεύξη upstream γίνεται ανεξάρτητη της θέσης του επιθυμητού SS. Από την (5.26), αυτή η σταθερή τιμή του CIR προκύπτει 26.7dB.

Το Σχήμα 5.9 παρουσιάζει την ίδια κατανομή $\text{CIR}(x, y)$ εντός του τομέα υπό συνθήκες διαλείψεων ($\text{AIP} = 0.001\%$) χωρίς την παρουσία μονάδας ελέγχου της ισχύος. Θεωρούνται οι κλιματικές παράμετροι της Αθήνας, GR, και συχνότητα λειτουργίας $f = 28\text{GHz}$. Όπως και στην περίπτωση της ζεύξης downstream, οι περιοχές χαμηλού CIR του τομέα διευρύνονται και, εφόσον ο SS βρίσκεται πέρα απο μια συγκεκριμένη απόσταση από τον BS_{22} , ο λόγος CIR υπολείπεται της ελάχιστης τιμής υπό συνθήκες CIR που είναι 22.4dB. Για την υπό εξέταση περίπτωση, αυτό συμβαίνει για περίπου 11% της περιοχής του τομέα. Αν η προδιαγραφή της ετήσιας AIP αυξηθεί

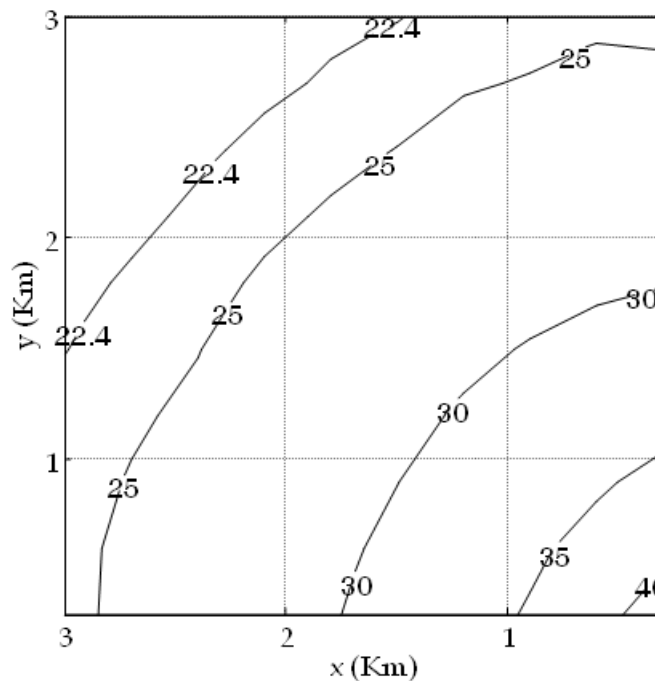


Σχήμα 5.8: Κατανομή $\text{CIR}(x,y)$ εντός του τομέα στη ζεύξη upstream υπό συνθήκες καθαρού ουρανού (ακτίνα κυψέλης $D = 3\text{Km}$, κεραία SS σύμφωνα με το πρότυπο 24-30GHz του ETSI). Η θέση του BS είναι η κάτω δεξιά κορυφή του τομέα.

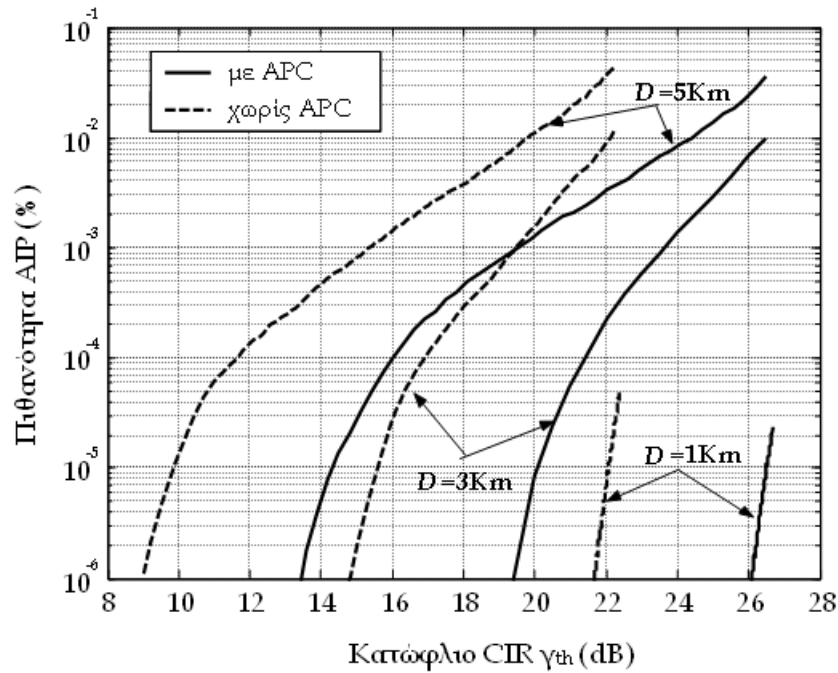
στη λιγότερο αυστηρή τιμή 0.005%, τότε μόνο το 4% των συνδρομητών του τομέα υπολείπεται της ελάχιστης τιμή υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Αντίθετα, για την αυστηρότερη προδιαγραφή $AIP = 0.0005\%$, το 17% των συνδρομητών του τομέα κατορθώνουν να υπερβούν τη συγκεκριμένη τιμή. Τα ποσοστά αυτά μπορεί να εμφανίζονται κατά πολύ αυξημένα σε γεωγραφικές περιοχές με περισσότερο οξυμένα χαρακτηριστικά βροχοπτώσης.

Τέλος, από το Σχήμα 5.10, σχεδιάζονται τα ποσοστά της ετήσιας πιθανότητας AIP ως προς το περιθώριο παρεμβολών γ_{th} για τη χειρότερη πιθανή θέση συνδρομητή (στη διαγώνια κορυφή του τομέα) με και χωρίς APC. Όπως αναμενόταν, ο έλεγχος της ισχύος βελτιώνει την τιμή του CIR των απομακρυσμένων SS, με αντίτιμο τη χαμηλότερη τιμή CIR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού για τους υπόλοιπους χρήστες του τομέα της κυψέλης.

Από τις αναλύσεις της διακυβελικής παρεμβολής στις προηγούμενες ενότητες εξάγονται ορισμένα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Πρώτον, λόγω των ομόκεντρων κύκλων που σχηματίζουν οι ισοδυναμικές CIR στη ζεύξη upstream, η τιμή του λόγου CIR εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση του επιθυμητού SS από τον BS αναφοράς.



Σχήμα 5.9: Κατανομή $CIR(x,y)$ εντός του τομέα στη ζεύξη upstream συστήματος LMDS που λειτουργεί στην Αθήνα, GR, υπό την προδιαγραφή $AIP = 0.001\%$ (συχνότητα λειτουργίας $f = 28GHz$, ακτίνα κυψέλης $D = 3Km$).



Σχήμα 5.10: Κατανομή της πιθανότητας AIP συναρτήσει του γ_{th} για συνδρομητή που είναι τοποθετημένος στην πλέον απομακρυσμένη κορυφή του τομέα πάνω στη διαγώνιο. Το σύστημα CDMA-LMDS είναι όμοιο με αυτό του Σχήματος 5.9.

Αντίθετα, στη ζεύξη downstream, η τιμή CIR εξαρτάται και από τη γωνία από τον BS αναφοράς. Δεύτερον, η στατιστική ανάλυση επιβεβαιώνει ότι στα συστήματα CDMA-LMDS, η ζεύξη που είναι ευάλωτη στην παρεμβολή είναι η ζεύξη downstream. Μάλιστα, αν ληφθεί υπόψη η ασυμμετρία της κίνησης στις δύο κατευθύνσεις μετάδοσης δεδομένου ότι η ζεύξη downstream συνήθως λειτουργεί υπό υψηλότερους ρυθμούς σε σχέση με τη ζεύξη upstream, τα δυνατά κέρδη εξάπλωσης γίνονται ακόμα μικρότερα, οδηγώντας σε υποβάθμιση της επίδοσης. Συνεπώς, οι τεχνικές μείωσης της παρεμβολής στα δίκτυα CDMA-LMDS πρέπει να επικεντρώνονται στη ζεύξη downstream. Το Κεφάλαιο 6 που ακολουθεί περιγράφει μια τέτοια τεχνική για τον έλεγχο της παρεμβολής κατά τη συγκεκριμένη κατεύθυνση μετάδοσης.

Κεφάλαιο 6

Έλεγχος Διακυψελικής Παρεμβολής σε Σταθερά Δίκτυα CDMA-BWA Μέσω Τεχνικών Πολλαπλών Ρυθμών (Multirate)

6.1 Γενικά

Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση της διακυψελικής παρεμβολής για ένα καθιερωμένο σταθερό δίκτυο BWA, για το οποίο, τυπικά, επιλέγεται η τεχνική TDMA ως σχήμα πολλαπλής πρόσβασης. Αντίστοιχα, στο Κεφάλαιο 5 αντιμετωπίστηκε το ίδιο πρόβλημα για ένα σταθερό δίκτυο BWA, όπου η πολλαπλή πρόσβαση πραγματοποιείται εναλλακτικά μέσω DS-CDMA. Μια απλή αντιπαράθεση των δύο αρχιτεκτονικών πολλαπλής πρόσβασης στην Ενότητα 5.4 κατέδειξε ότι, καιτοι δεν έχει ενσωματωθεί στα σύγχρονα πρότυπα BWA, το σύστημα CDMA-LMDS εμφανίζει μεγαλύτερη ανοχή στη διακυψελική παρεμβολή στη ζεύξη upstream. Αντίθετα, οι δύο αρχιτεκτονικές έχουν παρόμοια επίδοση ως προς τη διακυψελική παρεμβολή στη ζεύξη downstream.

Από το παρόν κεφάλαιο προτείνεται μια νέα τεχνική για την περαιτέρω βελτίωση και έλεγχο της διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη downstream συστημάτων CDMA-LMDS. Προς την κατεύθυνση αυτή, χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη εκδοχή των τεχνικών πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης (multirate) που εφαρμόζονται σε

δίκτυα κινητών επικοινωνιών CDMA τρίτης γενεάς. Στα δίκτυα αυτά, οι συγκεκριμένες τεχνικές παρέχουν σε κάθε χρήστη τη δυνατότητα διαφοροποίησης του ρυθμού μετάδοσης. Κατά τον τρόπο αυτό, εξυπηρετούνται χρήστες με διαφορετική QoS (π.χ. φωνή, δεδομένα, video) με εκμετάλλευση των ελκυστικών δυνατοτήτων που προσφέρει η τεχνολογία DS-CDMA.

Οι δύο βασικές κατηγορίες τεχνικών πολλαπλών ρυθμών είναι [Ott95]:

- Η τεχνική *CDMA πολλαπλών κωδίκων* (Multicode-CDMA, MC-CDMA) που παρουσιάζεται στην Ενότητα 6.2.
- Η τεχνική *CDMA μεταβλητού παράγοντα εξάπλωσης* (Variable Spreading Factor CDMA, VSF-CDMA)¹ που παρουσιάζεται στην Ενότητα 6.3.

Η παρουσίαση των τεχνικών στις επόμενες δύο ενότητες συνοδεύεται από την παράθεση της πλούσιας διαθέσιμης βιβλιογραφίας με επίκεντρο τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης. Επισημαίνεται ότι, εκτός από τις δύο ανωτέρω τεχνικές, έχουν κατά το παρελθόν προταθεί δύο ακόμα περιπτώσεις σχημάτων πολλαπλής πρόσβασης CDMA που υποστηρίζουν πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης και, συγκεκριμένα, το σχήμα πρόσβασης CDMA μεταβλητού ρυθμού chip (Variable Chip Rate CDMA, VCR-CDMA) [Wu94] και το σχήμα πρόσβασης CDMA μικτών διαμορφώσεων (mixed modulation) [Mct94]. Ωστόσο, οι δύο τελευταίες τεχνικές δεν έτυχαν της ευρείας αναγνώρισης και εφαρμογής των δύο πρώτων.

Στην Ενότητα 6.4 εξετάζεται η εφαρμογή των τεχνικών MC-CDMA και VSF-CDMA στο σύστημα CDMA-LMDS του προηγούμενου κεφαλαίου με στόχο τη μείωση της διακυψελικής παρεμβολής στη ζεύξη downstream. Στην Ενότητα 6.4.1 παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που συνδέονται με την προτεινόμενη τεχνική. Ακολουθεί στην Ενότητα 6.4.2, η παρουσίαση ενός πρακτικού αλγορίθμου για την ανάθεση των κωδίκων ώστε το σύνολο των συνδρομητών να ικανοποιούν τα μέτρα επίδοσης CIR που τίθενται από το σύστημα. Ο αλγόριθμος αυτός αποδεικνύεται ότι οδηγεί στη βέλτιστη ανάθεση κωδίκων. Τέλος, στην Ενότητα 6.4.3 αξιολογείται η επίδοση της προτεινόμενης τεχνικής. Αυτό γίνεται κατά δύο τρόπους: Αρχικά, και όμοια με τα προηγούμενα κεφάλαια, πραγματοποιείται η στατιστική ανάλυση του CIR με βάση τη

¹Η τεχνική VSF-CDMA αναφέρεται επίσης ως τεχνική μεταβλητού μήκους εξάπλωσης (Variable Spreading Length, VSL) και ως τεχνική μεταβλητού κέρδους εξάπλωσης (Variable Spreading Gain, VSG).

Κεφάλαιο 6. Έλεγχος Διακυψελικής Παρεμβολής σε Σταθερά Δίκτυα CDMA-BWA μακροπρόθεσμη στατιστική του διαύλου. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αναφέρεται ως στατική πολιτική ανάθεσης των κωδίκων και αξιολογείται μέσω αριθμητικών εφαρμογών του στατικού μοντέλου. Κατά το δεύτερο τρόπο, λαμβάνονται υπόψη οι δυναμικές ιδιότητες του διαύλου, με αποτέλεσμα η ανάθεση κωδίκων να γίνεται με δυναμικό τρόπο (δυναμική πολιτική ανάθεσης των κωδίκων). Το δυναμικό αυτό μοντέλο αξιολογείται μέσω μιας ενδεδειγμένης εξομοίωσης, από την οποία καταδεικνύεται τόσο η σημαντική βελτίωση της επίδοσης του λόγου CIR σε σχέση με το απλό σύστημα DS-CDMA όσο και η καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του συστήματος σε σχέση με τη στατική πολιτική ανάθεσης των πολλαπλών κωδίκων.

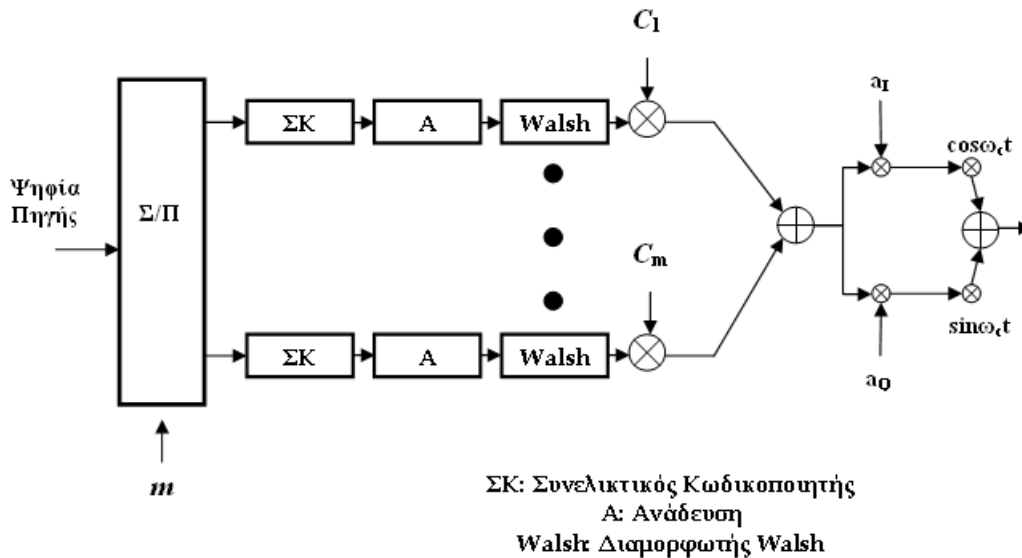
6.2 Η Τεχνική CDMA Πολλαπλών Κωδίκων (MC-CDMA)

Η τεχνική MC-CDMA πρωτοεμφανίσθηκε στα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας [I95a], [I95b], [Ott95] κατά την προετοιμασία της τρίτης γενεάς κινητών επικοινωνιών ως λύση για την εξυπηρέτηση των υπηρεσιών πολυμέσων. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, όταν ένας χρήστης απαιτεί ένα πολλαπλάσιο m του βασικού ρυθμού μετάδοσης, μετατρέπει τη ροή δεδομένων του από σειριακή σε παράλληλη (Σ/Π) αποτελούμενη από m ροές σημάτων βασικού ρυθμού μετάδοσης. Κάθε τέτοια ροή πολλαπλασιάζεται με διαφορετικό κώδικα εξάπλωσης και όλες οι ροές υπερτίθενται πριν την άνω μετατροπή συχνότητας που πραγματοποιείται στο τμήμα RF του πομπού.

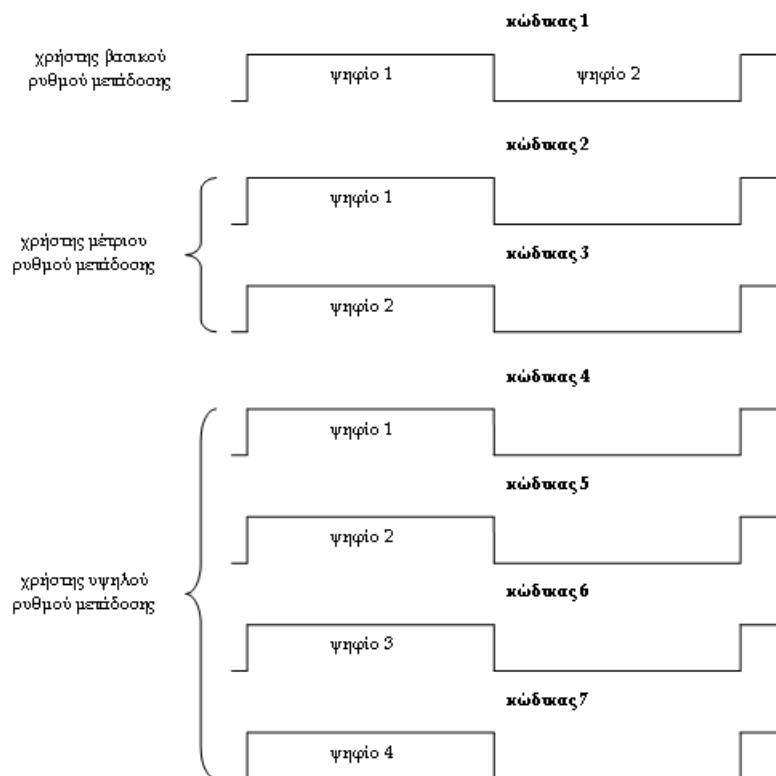
Οι λειτουργίες αυτές απεικονίζονται στο διάγραμμα πομπού MC-CDMA του Σχήματος 6.1, το οποίο αποτελείται από πολλαπλούς κλάδους του συμβατικού πομπού CDMA. Στο σχήμα, η παράμετρος m , $m = 1, \dots, M$, δηλώνει το πολλαπλάσιο του βασικού ρυθμού μετάδοσης που απαιτεί ο χρήστης, όπου $m = 1$ είναι ο βασικός (ελάχιστος) ρυθμός μετάδοσης και $m = M$ ο μέγιστος επιτρεπτός ρυθμός που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα. Επίσης, η παράμετρος m δηλώνει το πλήθος των παράλληλων κλάδων που είναι ενεργοί. Οι ακολουθίες a_I και a_Q είναι οι κώδικες που χρησιμοποιούνται για τη διάκριση μεταξύ των BS των διαφορετικών κυψελών. Οι χρήστες που ανήκουν στην ίδια κυψέλη διαθέτουν τους ίδιους κώδικες BS. Οι ακολουθίες C_m είναι τυχαίες ακολουθίες εξάπλωσης τις οποίες χρησιμοποιεί ο χρήστης όταν μεταδίδει σε ρυθμό υψηλότερο του βασικού. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια μέθοδος για την παραγωγή

των πολλαπλών ακολουθιών εξάπλωσης κατά τρόπο ώστε να διατηρείται η μεταξύ τους ορθογωνιότητα. Όπως γίνεται φανερό από το Σχήμα 6.1, με εξαίρεση την πολλαπλάσια ισχύ που απαιτείται, το σύστημα MC-CDMA δεν απαιτεί τροποποιήσεις στο τμήμα RF.

Συνοψίζοντας, σε ένα σύστημα MC-CDMA οι χρήστες υψηλού ρυθμού εξυπηρε-



Σχήμα 6.1: Αρχιτεκτονική πομπού σε σύστημα MC-CDMA.



Σχήμα 6.2: Τεχνική πρόσβασης MC-CDMA για παροχή πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης.

τούνται μέσω της πολύπλεξης των δεδομένων τους σε περισσότερες ακολουθίες εξάπλωσης. Αποτέλεσμα είναι η πληροφορία ενός χρήστη να αποστέλλεται μέσω πολλαπλών παράλληλων διαύλων. Η αρχή λειτουργίας της τεχνικής MC-CDMA γίνεται περισσότερο εναργής μέσω του παραδείγματος του Σχήματος 6.2, όπου οι χρήστες μέτριου και υψηλού ρυθμού μετάδοσης μεταδίδουν σε διπλάσιο και τετραπλάσιο ρυθμό σε σχέση με το βασικό χρησιμοποιώντας 2 και 4 κώδικες, αντίστοιχα.

Οι απαιτήσεις συγχρονισμού/ανάκτησης στην πλευρά του δέκτη είναι ιδιαίτερα απαιτητικές ακόμα και για τους συμβατικούς δέκτες CDMA μοναδικού κώδικα. Θετικό στοιχείο είναι ότι ο δέκτης MC-CDMA δεν απαιτεί αύξηση της πολυπλοκότητας του συγχρονισμού κατά m φορές σε σχέση με το συμβατικό. Η εξήγηση σχετίζεται με το γεγονός ότι σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών, τα σήματα από τους παράλληλους κλάδους υπόκεινται στις ίδιες διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, οπότε, για την ανάκτηση των σημάτων από τους παράλληλους κλάδους, αρκεί η χρήση ενός μόνο κυκλώματος.

Από τη θεμελιώδη εργασία [I95a] προτείνεται ένας τρόπος παραγωγής επιπλέον κωδικών για την αποφυγή της αυτό-παρεμβολής (self-interference) όταν ένας χρήστης κάνει χρήση πολλαπλών κωδικών. Το σχήμα έχει ως εξής: Σε κάθε χρήστη που εισάγεται στο σύστημα ανατίθεται ένας πρωτεύων κώδικας. Στόχος είναι οι πολλαπλοί κώδικες μέσω των οποίων μεταδίδει κάποιος χρήστης να καταστούν ορθογώνιοι μεταξύ τους. Προς τούτο, αν C_1 είναι ο πρωτεύων κώδικας ενός χρήστη που χρησιμοποιεί υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης σε σχέση με το βασικό, οι επιπλέον κώδικες C_i παράγονται από τον πρωτεύοντα μέσω της σχέσης

$$C_i = C_1 \times D_i, \text{ όπου } D_i \perp D_j, \quad i \neq j \quad (6.1)$$

Προφανώς, $C_i \perp C_j, \quad i \neq j$. Η ορθογωνιότητα αυτή διατηρείται στο δέκτη, εφόσον τα φαινόμενα διάδοσης που επηρεάζουν τα σήματα από τους παράλληλους κώδικες είναι κοινά.

Σημαντική βιβλιογραφία υπάρχει διαθέσιμη όσον αφορά την επίδοση της τεχνικής MC-CDMA. Η προδιαγραφή μιας ολοκληρωμένης αρχιτεκτονικής MC-CDMA για την πρόσβαση στο δίκτυο στα πλαίσια ενός δικτύου ATM παρουσιάζεται στην εργασία [Liu96], ενώ μια αρχιτεκτονική για την εξυπηρέτηση ετερογενούς κίνησης που αποτελείται από διαφορετικές συνιστώσες παρουσιάζεται στην εργασία [Ch099]. Ο υπολογισμός της πιθανότητας λανθασμένου ψηφίου για συστήματα πολλαπλής πρόσβασης

Κεφάλαιο 6. Έλεγχος Διακυβελικής Παρεμβολής σε Σταθερά Δίκτυα CDMA-BWA

MC-CDMA αναλύεται στην εργασία [Lee01]. Η έρευνα σχετικά με την πολλαπλή πρόσβαση MC-CDMA επικεντρώθηκε στον υπολογισμό της χωρητικότητας τέτοιων συστημάτων υπό ποικίλες υποθέσεις όσον αφορά τις παραμέτρους του συστήματος: Ορίζοντας τη χωρητικότητα ως το πλήθος χρηστών διαφορετικών υπηρεσιών που εξυπηρετούνται ταυτόχρονα από το σύστημα, η παραπομπή [Ayy99] παρέχει μια αναλυτική εκτίμηση της χωρητικότητας λαμβάνοντας υπόψη τη λαμβανόμενη ισχύ από τους χρήστες κάθε κατηγορίας και τον παράγοντα δραστηριότητας των χρηστών δεδομένων. Ο αναλυτικός υπολογισμός της στατιστικής της χωρητικότητας σε σύστημα MC-CDMA παρουσία ενός εξειδικευμένου σχήματος ελέγχου της ισχύος προσαρμοσμένου στην τιμή του λόγου CIR παρουσιάζεται στην παραπομπή [Kim01]. Η τελευταία υποθέτει ότι το σύστημα εξυπηρετεί ετερογενή κίνηση CBR (Constant Bit Rate). Τέλος, η παραπομπή [Kan02] εξετάζει τη χωρητικότητα του συστήματος MC-CDMA όταν αυτό συνυπάρχει φασματικά με ένα συμβατικό σύστημα DS-CDMA μοναδικού κώδικα, ώστε να μελετηθεί η επίδοση υπό την ταυτόχρονη παρουσία δικτύων δεύτερης και τρίτης γενεάς.

6.3 Η Τεχνική CDMA Μεταβλητού Παράγοντα Εξάπλωσης (VSF-CDMA)

Η τεχνική VSF-CDMA εμφανίσθηκε παράλληλα με την MC-CDMA από τα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας [I95c]. Αναπτύχθηκε ως απάντηση στο πρόβλημα της πολυπλοκότητας εξοπλισμού που συνεπάγεται η πρόσβαση MC-CDMA λόγω της απαίτησης για πολλαπλές μονάδες πομποδέκτη προς υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης [Min00]. Αντίθετα, με την τεχνική VSF-CDMA, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μόνο μια ακολουθία εξάπλωσης με μεταβλητό κέρδος. Όταν οι ακολουθίες εξάπλωσης μεταξύ των διάφορων χρηστών είναι ορθογώνιες, η τεχνική αναφέρεται ως OVVSF-CDMA (Orthogonal VSF).

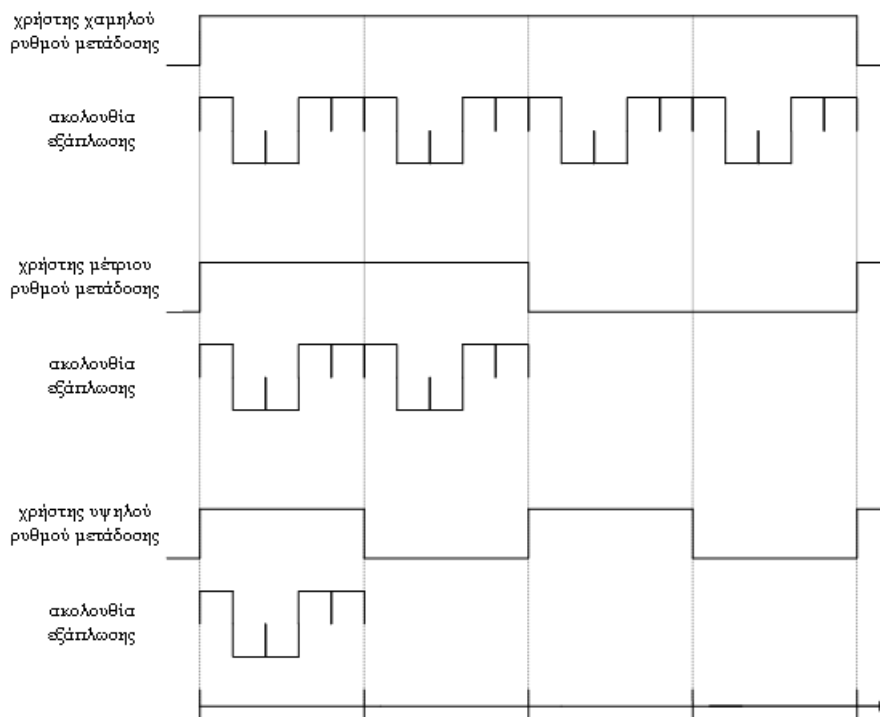
Η αρχή λειτουργίας της VSF-CDMA απεικονίζεται στο Σχήμα 6.3, όπου ο χρήστης με απαιτήσεις υψηλού ρυθμού μετάδοσης πραγματοποιεί τη λειτουργία της εξάπλωσης μέσω μιας ακολουθίας διπλάσιου και τετραπλάσιου μήκους σε σχέση με το χρήστη μέτριου και χαμηλού ρυθμού μετάδοσης, αντίστοιχα. Για κάθε κατηγορία χρήστη παρουσιάζεται στο άνω μέρος η αντίστοιχη διάρκεια του ψηφίου μετά τον πολλαπλασι-

ασμό με τη διαφορετικού μήκους ακολουθία εξάπλωσης του κάτω μέρους. Άλλωστε από τον ορισμό του κέρδους εξάπλωσης G_S στην (5.3) γίνεται φανερό ότι η υποδιείρεση της περιόδου chip T_c προκαλεί αντίστοιχη αύξηση του ρυθμού μετάδοσης κατά τον ίδιο παράγοντα, αποτέλεσμα που ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η συσχέτιση που πραγματοποιείται στο δέκτη κατά τη διαδικασία ανάκτησης του σήματος πληροφορίας έχει μικρότερη διάρκεια.

Εξάλλου, η υλοποίηση της OVSF-CDMA είναι δυνατή μέσω των ορθογώνιων κωδίκων WH που συζητήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Μάλιστα, η συγκεκριμένη κατηγορία κωδίκων διακρίνεται από μια ιδιαίτερα ευνοϊκή ιδιότητα των πινάκων Hadamard, η οποία επιτρέπει τη μεταβολή της διάστασης του κώδικα. Συγκεκριμένα, οι πίνακες Hadamard υψηλότερης διάστασης υπολογίζονται από την αναδρομική σχέση

$$\mathbf{H}_{2n} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_n & \mathbf{H}_n \\ \mathbf{H}_n & \bar{\mathbf{H}}_n \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

όπου ο δείκτης κάθε στοιχείου του σύνθετου πίνακα δηλώνει τη διάστασή του, η άνω παύλα το συμπλήρωμα του στοιχείου (2,2), ενώ $\mathbf{H}_1 = 1$ και $\bar{\mathbf{H}}_1 = 0$. Για να εξαχθούν n ορθογώνιες ακολουθίες WH από ένα πίνακα Hadamard $n \times n$, αρκεί τα '0' κάθε σειράς να αντικατασταθούν από '-1'.



Σχήμα 6.3: Τεχνική πρόσβασης VSF-CDMA για παροχή πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης.

Η αναδρομική παραγωγή κωδίκων OVSF μεγαλύτερης διάστασης από κώδικες μικρότερης διάστασης μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω δυαδικών δένδρων [Ada97], [Min00]. Σε αυτή την περίπτωση, για την αναγνώριση του κάθε κώδικα ανατίθενται σε αυτόν δύο αριθμοί-ταυτότητες: ένας αριθμός που αντιστοιχεί στο επίπεδο του δένδρου και ένας αριθμός που αντιστοιχεί στον κλάδο του δένδρου. Τα επίπεδα του δένδρου αριθμούνται από κάτω προς τα πάνω και, επομένως, ένας κώδικας υψηλότερου επιπέδου διακρίνεται από μικρότερη διάσταση σε σχέση με έναν κώδικα χαμηλότερου επιπέδου. Στην εργασία [Woo02] προτείνεται ένας εναλλακτικός τρόπος παραγωγής ορθογώνιων κωδίκων OVSF με βάση τη θεωρία των πεπερασμένων προβολικών επιπέδων (finite projective planes). Οι ορθογώνιοι κώδικες σχεδιάζονται αντιστοιχίζοντας τα σημεία ενός συνόλου πεπερασμένων προβολικών επιπέδων σε chip υψηλού/χαμηλού πλάτους. Η δυνατότητα μεταβλητής εξάπλωσης επιτυγχάνεται μέσω αναδρομής μεταξύ αυτών των πολλαπλών επιπέδων.

6.4 Εφαρμογή στη ζεύξη downstream για τον έλεγχο της διακυψελικής παρεμβολής

6.4.1 Βασικές Έννοιες

Στην παρούσα ενότητα, προτείνεται η τροποποιημένη εφαρμογή των τεχνικών πολλαπλών ρυθμών που συζητήθηκαν προηγουμένως αποσκοπώντας στον έλεγχο της παρεμβολής CCI στη ζεύξη downstream των σταθερών δικτύων CDMA-BWA [Ara06]. Γίνεται η θεώρηση ότι εξακολουθούν να ισχύουν η αρχιτεκτονική, οι αντίστοιχοι ορισμοί και οι λεπτομέρειες υλοποίησης των υπόψη δικτύων, όπως αυτές περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 5. Εξαίρεση αποτελεί το πλήθος των IBS που λαμβάνονται υπόψη κατά τους υπολογισμούς. Έτσι, για τη διευκόλυνση της ανάλυσης καθώς και για λόγους συνέπειας με την υπόθεση LOS, η απόσταση από την οποία ο σταθμός αναφοράς λαμβάνει τα παρεμβάλλοντα σήματα περιορίζεται σε μια κυψέλη αντί δύο, με αντίστοιχη μείωση του πλήθους των IBS. Κατά συνέπεια, η στατιστική ανάλυση της Ενότητας 5.5.1 μειώνεται κατά μια διάσταση, αφού υπολογίζεται η παρεμβολή μόνο από τους άμεσα γειτονικούς BS και όχι από BS σε απόσταση δύο κυψελών.

Η κεντρική ιδέα πίσω από την προτεινόμενη τεχνική είναι η βελτίωση του λόγου CIR

των SS που βρίσκονται σε επιβαρυνμένες περιοχές του τομέα, όπως αυτές εντοπίστηκαν στο Σχήμα 5.5 του Κεφαλαίου 5. Η βελτίωση αυτή επιτυγχάνεται με αντίτιμο τη μερική επιδείνωση του λόγου CIR στις ευνοϊκές περιοχές του τομέα [Ara05c]. Έτσι, η προτεινόμενη τεχνική μπορεί να θεωρηθεί ως τρόπος ελέγχου και διευθέτησης της παρεμβολής σε ολόκληρη την έκταση του τομέα ώστε να αμβλύνονται οι ακραίες διαφορές του CIR και το σύνολο των συνδρομητών να ικανοποιεί αυστηρότερες προδιαγραφές ως προς την παρεμβολή.

Δεδομένου ότι οι συνδρομητές σε ένα σύστημα LMDS είναι σταθεροί, ορισμένες περιοχές του τομέα υποφέρουν από χαμηλό CIR σε μόνιμη βάση. Το γεγονός αυτό επιβάλλει η ανάλυση να πραγματοποιείται για τη χειρότερη περίπτωση σε αντιδιαστολή με την ανάλυση της μέσης επίδοσης που συνήθως υιοθετείται στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Στο πλαίσιο αυτό και για το υπόλοιπο της ανάλυσης, οι τομείς υποτίθεται ότι λειτουργούν υπό πλήρες φορτίο, δηλαδή το πλήθος συνδρομητών ανά τομέα είναι $K_i = N$, όπου N το μέγιστο πλήθος συνδρομητών που μπορεί να εξυπηρετήσει ο τομέας². Στα επόμενα, οι συνδρομητές στον τομέα της κυψέλης θα αναγνωρίζονται μέσω του διανύσματος $\mathbf{N} = \{1, 2, \dots, n, \dots, N\}$.

Καταρχήν, η ισχυρή παρεμβολή μπορεί να μειωθεί αναθέτοντας σε συγκεκριμένους SS ακολουθίες WH αυξημένου μήκους, σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας της τεχνικής OVSF-CDMA. Επομένως, αν ο συνδρομητής $n \in \mathbf{N}$ απαιτεί βελτίωση του λόγου CIR κατά 2^m φορές προκειμένου να ικανοποιεί την προδιαγραφή AIP του συστήματος, η ακολουθία εξάπλωσής του αυξάνεται αντίστοιχα κατά 2^m φορές ($m = 0, 1, \dots, M$). Ωστόσο, αυτό συνεπάγεται ότι ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται κατά τον ίδιο παράγοντα 2^m επίσης. Για την αντιστάθμιση αυτής της μείωσης, στον ίδιο συνδρομητή ανατίθεται πλήθος 2^m ακολουθιών αυξημένου μήκους, το οποίο ισοδυναμεί με την τεχνική MC-CDMA. Με άλλα λόγια, για την εξισορρόπηση του CIR σε ολόκληρη την έκταση του τομέα, συνδυάζονται οι τεχνικές OVSF-CDMA και MC-CDMA. Οι επιπλέον ακολουθίες εξάπλωσης αυξημένου μήκους παράγονται σε πολλαπλάσια του 2 με εκμετάλλευση της αναδρομικής ιδιότητας των πινάκων Hadamard που περιγράφεται από την (6.2).

Έστω ότι το πλήθος ορθογώνιων ακολουθιών μήκους 2^m που ανατίθενται στο συνδρομητή $n \in \mathbf{N}$ ορίζονται ως $C_n \in \{2^0, 2^1, \dots, 2^m, \dots, 2^M\}$, σχηματίζοντας το

²Υπενθυμίζεται ότι, σύμφωνα με την περιγραφή της αρχιτεκτονικής CDMA-LMDS, σε κάθε τομέα της κυψέλης υπάρχουν διαθέσιμοι N ορθογώνιοι κώδικες για τη διάκριση μεταξύ των χρηστών.

διάνυσμα $\mathbf{C} = \{C_n\}$ διάστασης N . Με βάση την τεχνική ελέγχου της παρεμβολής CCI που μόλις αναλύθηκε, ο λόγος CIR υπό συνθήκες καθαρού ουρανού καταλήγει στην ακόλουθη τροποποιημένη εκδοχή της (5.18) [Ara06]

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{cs}^n = 10 \log \left[\frac{C_n}{\sum_{n \in \mathbf{N}} C_n} \frac{W}{B} \left(\frac{d_I}{d_D}\right)^2 \right] + [G_{R,SS}(0^\circ) - G_{R,SS}(\theta)] \quad (6.3)$$

όπου ο άνω δείκτης n υποδηλώνει ότι ο λόγος CIR υπολογίζεται βάσει του προτεινόμενου συνδυασμού των τεχνικών OVSF- και MC-CDMA. Ισχύει $W/B = G_S = 4N$ και το αντίστοιχο μήκος της ακολουθίας WH του συνδρομητή n είναι $C_n \times 4N$, όπου $C_n \leq 2^M \forall n \in \mathbf{N}$. Ο αριθμητής και ο παρονομαστής στο κλάσμα του πρώτου όρου της (6.3) είναι ανάλογοι της ενίσχυσης της ισχύος του επιθυμητού σήματος και της συνολικής παρεμβολής CCI από τον πλησιέστερο IBS, αντίστοιχα, λόγω της χρήσης πολλαπλών κωδίκων³. Επιπλέον, ο συνολικός λόγος CIR του συνδρομητή n στη ζεύξη downstream υπό συνθήκες διαλείψεων, μετά την υιοθέτηση της προτεινόμενης τεχνικής θα συμβολίζεται με $CIR_{down}^n(AIP\%)$, όπου η πιθανότητα AIP υπολογίζεται από την (5.20) για ένα μόνο IBS.

6.4.2 Βελτιστοποίηση της πολιτικής ανάθεσης κωδίκων

Από τις αναφορές [Sar01] και [Ara05c] έγινε σαφές ότι η ανάθεση πολλαπλών ορθογώνιων ακολουθιών εξάπλωσης αυξημένου μήκους σε κρίσιμες ως προς την παρεμβολή περιοχές του τομέα προσφέρει σημαντική βελτίωση της επίδοσης. Εντούτοις, καμία από τις δύο εργασίες δεν συνοδεύεται από συγκεκριμένη πρόταση για την κατανομή του πλήθους των κωδίκων σε κάθε SS του τομέα. Το θέμα αυτό είναι εξαιρετικά κρίσιμο, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη το ότι η ανάθεση πολλαπλών κωδίκων σε ορισμένους χρήστες συνεπάγεται αύξηση της παρεμβολής CCI για τους SS στους οποίους θα ανατεθούν λιγότεροι από το μέγιστο δυνατό αριθμό 2^M κώδικες. Στην επόμενη παράγραφο, περιγράφεται ένας απλός και πρακτικός αλγόριθμος που εξασφαλίζει ότι σε κάθε SS ανατίθεται ο βέλτιστος αριθμός ακολουθιών.

Το υπό μελέτη πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να διατυπωθεί ως ακολούθως: Υπό δεδομένο μέγιστο επιτρεπτό αριθμό κωδίκων ανά SS, 2^M , στόχος είναι η ε-

³ Δεδομένου ότι η κατανομή πολλαπλών κωδίκων αυξημένου μήκους είναι κοινή σε κάθε τομέα κυψέλης της περιοχής εξυπηρέτησης του συστήματος CDMA-LMDS.

λαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού ορθογώνιων ακολουθιών εξάπλωσης σε ολόκληρο τον τομέα, ενώ, ταυτόχρονα, όλοι οι SS του τομέα ικανοποιούν το περιθώριο παρεμβολής γ_{th} . Δηλαδή,

$$\min_{C_n} \left[\sum_{n \in \mathbf{N}} C_n \right] \text{ έτσι ώστε } CIR_{down}^n > \gamma_{th}, \forall n \in \mathbf{N}, \text{ υπό τον περιορισμό } C_n \leq 2^M. \quad (6.4)$$

Το ανωτέρω πρόβλημα ελαχιστοποίησης εμφανίζει πολλές ομοιότητες με τυπικούς αλγορίθμους ελέγχου της ισχύος που αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση του CIR για τη διασφάλιση της QoS σε κινητά τερματικά⁴. Επισημαίνεται ότι ο περιορισμός του μέγιστου επιτρεπτού πλήθους κωδικών ανά SS επιβάλλεται από τεχνολογικούς περιορισμούς και από την πολυπλοκότητα του εξοπλισμού των πομποδεκτών MC-CDMA, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

Έστω \mathbf{C}_* το διάνυσμα που αποτελεί λύση του προβλήματος ελαχιστοποίησης (6.4). Ένα τέτοιο διάνυσμα μπορεί να δημιουργηθεί με αφετηρία το μοναδιαίο διάνυσμα $C_n = 1$ ($m = 0$) $\forall n$, εφαρμόζοντας σε αυτό μια σειρά αυστηρά αυξητικών βημάτων. Ένα βήμα του αλγορίθμου εκτελείται οποτεδήποτε η τιμή CIR_{down}^n του συνδρομητή n είναι χαμηλότερη από γ_{th} . Το βήμα είναι της μορφής

$$\text{αν } CIR_{down}^n \leq \gamma_{th} \text{ τότε αύξηση του } C_n \text{ από } 2^m \text{ σε } 2^{m+1}$$

Ο αριθμός των απαραίτητων αυξητικών βημάτων προκειμένου να προκύψει το διάνυσμα \mathbf{C}_* ορίζεται μονοσήμαντα. Ωστόσο, η σειρά με την οποία αυτά εκτελούνται δεν επηρεάζει την τελική λύση. Ολόκληρος ο αλγόριθμος σε μορφή ψευδοκώδικα έχει ως εξής:

1. LET $\mathbf{C} = \{C_n = 1\}_{1 \times N}$
2. CALCULATE $CIR_{down}^n <$ for all n in $\mathbf{N} = \{1, 2, \dots, n, \dots, N\}$
3. REPEAT
4. *Changes_in_Cycle* := 0

⁴Ενδεικτικά αναφέρονται μια από τις πρώτες εργασίες στο αντικείμενο [Zan92] και μια πλέον πρόσφατη [Kos05].

5. FOR (each n) DO
6. IF ($CIR_{down}^n < \gamma_{th}$) AND ($C_n < 2^M$) THEN
7. INCREASE C_n from 2^m to 2^{m+1}
8. $Changes_in_Cycle$ ++
9. END IF
10. END FOR
11. CALCULATE $CIR_{down}^n <$ for all n in $\mathbf{N} = \{1, 2, \dots, n, \dots, N\}$
12. UNTIL ($\nexists n$ such that $CIR_{down}^n < \gamma_{th}$) OR ($Changes_in_Cycle == 0$)

Η σύγκλιση του αλγορίθμου είναι εξασφαλισμένη είτε υπάρχει κάποια ανάθεση κωδίκων που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς είτε όχι. Στη δεύτερη περίπτωση, μετά από πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων, στους συνδρομητές που δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις CIR, ανατίθενται απλώς ο μέγιστος αριθμός ακολουθιών, ασχέτως αν αυτό δεν αποτελεί λύση του προβλήματος.

Ας υποθεθεί κάποια γεωμετρία διάταξης για την οποία είναι γνωστό ότι η κατανομή των κωδίκων μεταξύ των συνδρομητών είναι βέλτιστη. Για τη συγκεκριμένη διάταξη, η εκτέλεση του προτεινόμενου αλγορίθμου καταλήγει στο διάνυσμα \mathbf{C}_* , ενώ η βέλτιστη λύση συμβολίζεται ως \mathbf{C}_{opt} . Θα αποδειχθεί ο ισχυρισμός ότι τα αυξητικά βήματα που παράγονται για τα διανύσματα \mathbf{C}_* και \mathbf{C}_{opt} από την προτεινόμενη πολιτική ανάθεσης κωδίκων είναι πανομοιότυπα.

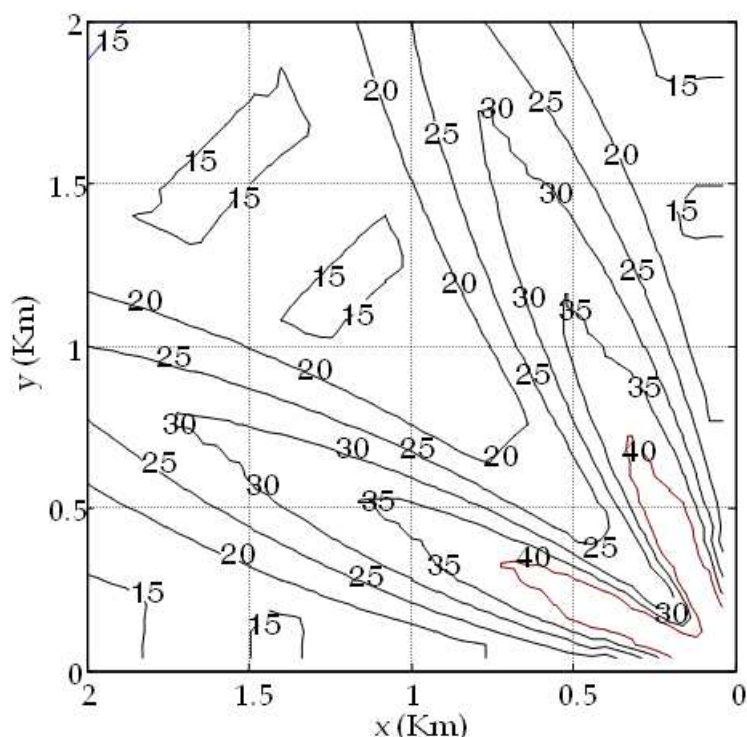
Απόδειξη— Όπως υπαγορεύει η αρχική συνθήκη του αλγορίθμου, κατά το πρώτο βήμα, το διάνυσμα \mathbf{C}_* αποτελείται από μονάδες. Έστω ότι ένα από τα αυξητικά βήματα που εκτελείται για κάποιο C_n δεν περιλαμβάνεται στο σύνολο βημάτων του διανύσματος \mathbf{C}_{opt} . Σύμφωνα με τη βέλτιστη λύση, αυτό συνεπάγεται ότι το C_n δεν πρέπει να αυξηθεί, παραμένοντας στην αρχική κατάσταση $C_n = 1$ μέχρι την ολοκλήρωση όλων των βημάτων του αλγορίθμου. Ωστόσο, ένα αυξητικό βήμα για οποιονδήποτε SS n προκαλείται όταν η τιμή του CIR του είναι χαμηλότερη από γ_{th} . Αφού από τον αλγόριθμο επιτρέπονται αποκλειστικά αυξητικά βήματα, οι επόμενες επαναλήψεις του αλγορίθμου μπορούν να προκαλέσουν μόνο χειροτέρευση του CIR. Επομένως, η υπόθεση της βέλτιστης λύσης συνεπάγεται ότι το συγκεκριμένο βήμα περιλαμβάνεται

απαραιτήτως και στο C_{opt} . Το ίδιο σκεπτικό ισχύει για όλες τις επόμενες επαναλήψεις της πολιτικής ανάθεσης κωδίκων και, συνεπώς, δεν είναι δυνατό το διάνυσμα C_* να περιλαμβάνει λιγότερα αυξητικά βήματα σε σχέση με το C_{opt} . Για τον ίδιο λόγο, δεν είναι δυνατό το διάνυσμα C_* να περιλαμβάνει περισσότερα αυξητικά βήματα σε σχέση με το C_{opt} . Συμπερασματικά, καθώς η σειρά με την οποία λαμβάνουν χώρα τα αυξητικά βήματα δεν παίζει ρόλο, τα δύο διανύσματα είναι πανομοιότυπα.

6.4.3 Αξιολόγηση της επίδοσης

6.4.3.1 Στατική ανάθεση κωδίκων

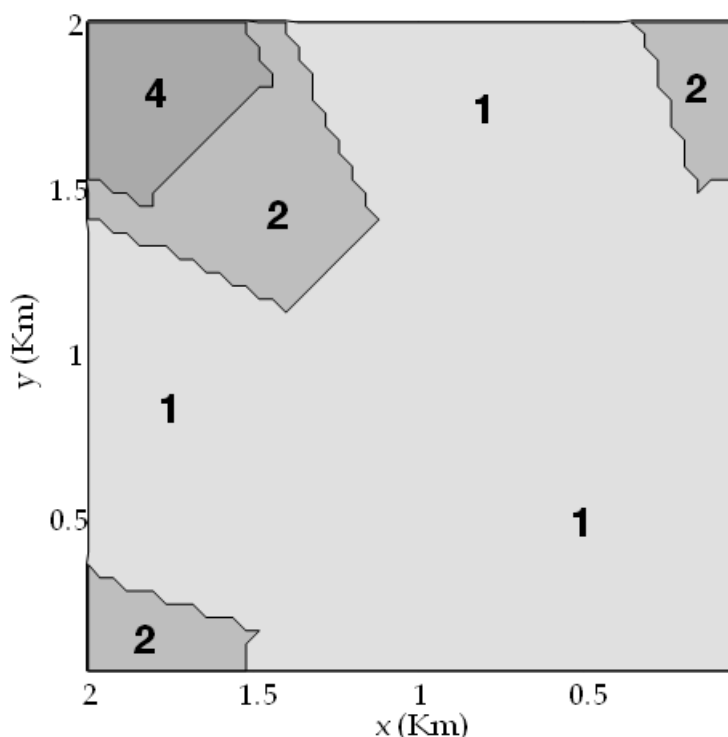
Ας θεωρηθεί σύστημα CDMA-LMDS που λειτουργεί στην Αθήνα, GR, στα 42GHz και με ακτίνα κυψέλης $D = 2\text{Km}$. Επίσης, ας θεωρηθεί ότι κάθε SS οφείλει να ικανοποιεί το ζεύγος προδιαγραφών $\{\gamma_{th} = 14\text{dB}, AIP = 0.001\%\}$ ως προς την παρεμβολή. Εφαρμόζοντας τη στατιστική ανάλυση του Κεφαλαίου 5 για συστήματα DS-CDMA



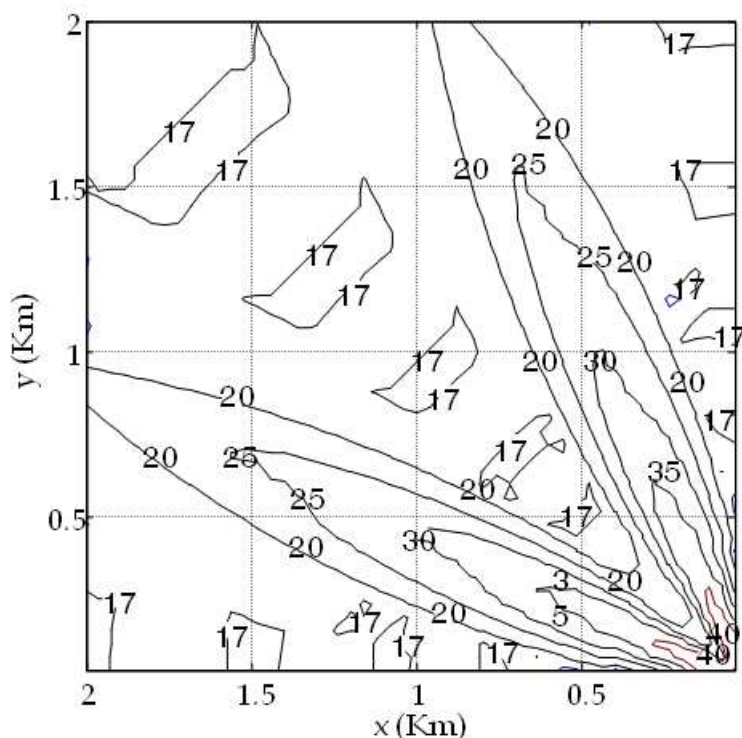
Σχήμα 6.4: Κατανομή $CIR(x,y)$ εντός του τομέα μετά την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου ελέγχου της διακυψελικής παρεμβολής CCI. Σύστημα CDMA-LMDS που λειτουργεί στην Αθήνα, GR, υπό τις προδιαγραφές $\gamma_{th} = 14\text{dB}$ και $AIP = 0.001\%$ (συχνότητα λειτουργίας $f=42\text{GHz}$, ακτίνα κυψέλης $D=2\text{Km}$).

μοναδικού κώδικα, συνάγεται ότι περίπου το 17.5% των SS του τομέα δεν επιτυγχάνουν τη συμμόρφωση ως προς την επιτρεπόμενη παρεμβολή για τη συγκεκριμένη τιμή γ_{th} . Στη συνέχεια, επιβάλλοντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο ελέγχου της CCI, προκύπτει η κατανομή του CIR σε κάθε σημείο (x, y) του τομέα του Σχήματος 6.4. Στο συγκεκριμένο σχήμα, το σύνολο των SS ικανοποιεί το όριο των 14dB ως προς το CIR, ενώ είναι ευνόητο ότι οι περιοχές του τομέα που περιβάλλονται από την ισοδυναμική των 15dB έχουν τιμές CIR που κυμαίνονται στο εύρος 14-15dB. Το μέγιστο πλήθος κωδικών ανά SS που απαιτείται για να επιτευχθεί το αποτέλεσμα αυτό είναι 4 ($M = 2$) ακολουθίες αυξημένου μήκους. Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται το πώς κατανέμονται οι κώδικες στις διάφορες περιοχές του τομέα σύμφωνα με το διάγραμμα C_* .

Εξετάζοντας περαιτέρω τη δυνατότητα του αλγορίθμου να προσφέρει βελτιωμένη επίδοση ως προς το CIR, στα Σχήματα 6.6 και 6.7 απεικονίζονται οι αντίστοιχες κατανομές με τα Σχήματα 6.4 και 6.5, αλλά για την αυστηρότερη προδιαγραφή $\gamma_{th} = 16dB$. Μάλιστα, η συγκεκριμένη τιμή γ_{th} υπερβαίνει το ελάχιστο CIR στη χειρότερη θέση του τομέα υπό συνθήκες καθαρού ουρανού κατά το σχήμα CDMA-LMDS μοναδικού κώδικα εξάπλωσης. Για τις ίδιες προδιαγραφές και υπό συνθήκες διαλείψεων,



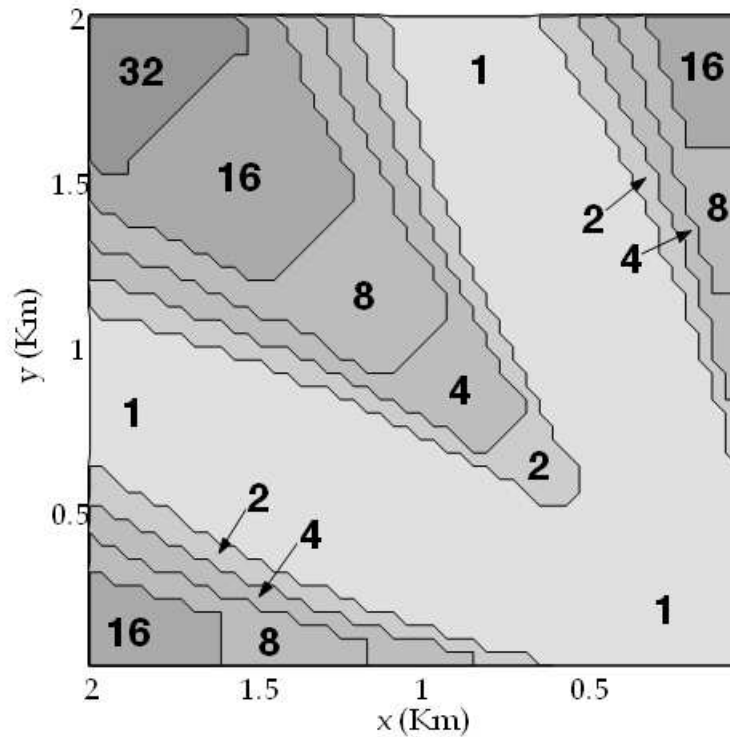
Σχήμα 6.5: Κατανομή πλήθους κωδικών εντός του τομέα σύμφωνα με το διάγραμμα C_* για το σύστημα του Σχήματος 6.4.



Σχήμα 6.6: Κατανομή $CIR(x,y)$ εντός του τομέα μετά την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου ελέγχου της διακυψελικής παρεμβολής CCI. Σύστημα CDMA-LMDS που λειτουργεί στην Αθήνα, GR, υπό τις προδιαγραφές $\gamma_{th} = 16dB$ και $AIP = 0.001\%$ (συχνότητα λειτουργίας $f=42GHz$, ακτίνα κυψέλης $D=2Km$).

Πίνακας 6.1: Ποσοστό της περιοχής του τομέα στο οποίο ανατίθενται $C_n = 2^m$ ακολουθίες εξάπλωσης αυξημένου μήκους για διάφορες τιμές του γ_{th}

Πλήθος κωδίκων	$\gamma_{th} =$							
	9dB	10dB	11dB	12dB	13dB	14dB	15dB	16dB
$C_n = 2^m$ (m)	% της περιοχής του τομέα							
1 (0)	100	99.96	97.64	93.68	86.48	78.12	67.28	44.6
2 (1)	-	0.04	2.36	6.32	12.68	15.48	13.52	11
4 (2)	-	-	-	-	0.84	6.4	14.64	11.68
8 (3)	-	-	-	-	-	-	4.56	13.52
16 (4)	-	-	-	-	-	-	-	14.64
32 (5)	-	-	-	-	-	-	-	4.56



Σχήμα 6.7: Κατανομή πλήθους κωδικών εντός του τομέα σύμφωνα με το διάνυσμα C_* για το σύστημα του Σχήματος 6.6.

το 25.1% περίπου του τομέα οδηγείται σε διακοπή της λειτουργίας λόγω παρεμβολής για το αρχικό σύστημα DS-CDMA με έναν κώδικα εξάπλωσης. Αντίθετα, με εφαρμογή της προτεινόμενης τεχνικής, το Σχήμα 6.6 καταδεικνύει ότι όλοι οι SS βρίσκονται υψηλότερα του κατωφλίου γ_{th} , με αντίτιμο την αύξηση των απαιτούμενων κωδικών ανά SS από 4 (της προηγούμενης εφαρμογής για $\gamma_{th} = 14\text{dB}$) σε 32 ($M = 5$). Για το δεδομένο σύστημα, δεν είναι δυνατή η εύρεση κατάλληλου διανύσματος C_* ώστε να ικανοποιηθούν απαιτήσεις ακόμα υψηλότερες του κατωφλίου των 16dB, αφού η χρήση περισσότερων κωδικών αυξάνει δραματικά τη διακυψελική παρεμβολή.

Αποτελέσματα για το ποσοστό της περιοχής του τομέα ή, ισοδύναμα, των ομοιόμορφα κατανεμημένων συνδρομητών, που κάνουν χρήση συγκεκριμένου αριθμού ακολουθιών εξάπλωσης αυξημένου μήκους, από την τιμή $\gamma_{th} = 9\text{dB}$ (σχήμα μοναδικού κώδικα) μέχρι τη μέγιστη δυνατή τιμή για την οποία υπάρχει διάνυσμα C_* ($\gamma_{th} = 16\text{dB}$) συγκεντρώνονται στον Πίνακα 6.1. Σε συνδυασμό με τα σχήματα που προηγήθηκαν, ο Πίνακας 6.1 φανερώνει την εξισορρόπηση του CIR σε ολόκληρη την έκταση του τομέα που επιτυγχάνεται από την προτεινόμενη τεχνική: Συγκριτικά με το αρχικό σχήμα CDMA-LMDS που χρησιμοποιεί έναν απλό κώδικα, η τιμή του λόγου CIR στις δυσ-

μενείς περιοχές του τομέα αυξάνει, ενώ οι πλεονεκτικές περιοχές του τομέα, δηλαδή εκείνες που αποτελούνται από χρήστες που χρησιμοποιούν λιγότερους από 2^M κώδικες, υποφέρουν από αυξημένη παρεμβολή, παραμένοντας, ωστόσο, εντός των ορίων των προδιαγραφών.

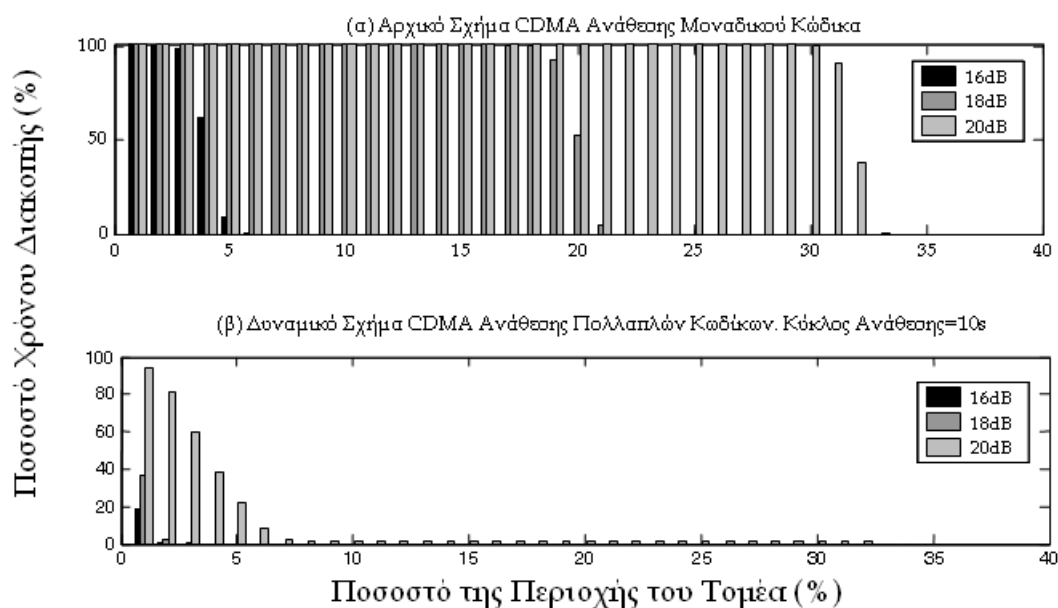
6.4.3.2 Δυναμική ανάθεση κωδίκων

Μέχρι τώρα, μελετήθηκε η επίδραση της μακροπρόθεσμης στατιστικής της απόσβεσης λόγω βροχής στη διακυψελική παρεμβολή. Αναφέρεται ως πολιτική στατικής ανάθεσης των κωδίκων, αφού η επίδοση του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου της παρεμβολής μέσω πολλαπλών κωδίκων αυξημένου μήκους καθώς και του αλγορίθμου ανάθεσης τους δοκιμάστηκε έναντι της στατιστικής κατανομής του CIR. Με άλλα λόγια, για τη συμμόρφωση με το ζεύγος σχεδιαστικών απαιτήσεων $\{\gamma_{th}, AIP\}$, στους συνδρομητές ανατίθεται κατάλληλος αριθμός κωδίκων σε μόνιμη βάση.

Αυτή η υπο-βέλτιστη σχεδίαση του δικτύου μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με δυναμική ανάθεση των κωδίκων λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική συμπεριφορά του περιβάλλοντος διάδοσης δεδομένου ότι κρίσιμη επιβάρυνση της παρεμβολής από τη διακορική απόσβεση λόγω βροχής συμβαίνει μόνο για μερικά λεπτά κατά τη διάρκεια του έτους. Επομένως, η δυναμική πολιτική ανάθεσης των κωδίκων επιτρέπει τη δέσμευση των επιπλέον πόρων του συστήματος μόνο όταν αυτό είναι απαραίτητο. Για να επιβεβαιωθεί η βελτιωμένη επίδοση της πολιτικής ανάθεσης πολλαπλών κωδίκων έναντι του αρχικού σχήματος, πραγματοποιείται εκτενής εξομοίωση του φυσικού διαύλου μέσω της γεννήτριας παραγωγής χρονοσειρών απόσβεσης λόγω βροχής του Παραρτήματος Ε', η οποία βασίζεται στο μοντέλο Maseng-Bakken. Η γεννήτρια εκτελείται περισσότερες φορές για τη σύνθεση των χαρακτηριστικών του διαύλου τόσο για την επιθυμητή όσο και για τις παρεμβάλλουσες ζεύξεις. Τα χαρακτηριστικά του δικτύου θεωρούνται ίδια με πριν. Η δυναμική παράμετρος του ρυθμού βροχόπτωσης είναι $d_R = 1.852 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$, ενώ αυτή της απόσβεσης λόγω βροχής, d_A , λαμβάνει διαφορετικές τιμές αντίστοιχα με τη ζεύξη για την οποία υπολογίζεται καθώς εξαρτάται από το μήκος της⁵.

Μια σημαντική λεπτομέρεια της εξομοίωσης είναι ότι στα τελικά αποτελέσματα δεν εμφανίζονται οι χρονικές περίοδοι για τις οποίες συμβαίνει διακοπή της λειτουργίας στην επιθυμητή ζεύξη λόγω υπέρβασης του περιθωρίου διαλείψεων, δηλαδή των χρονικών

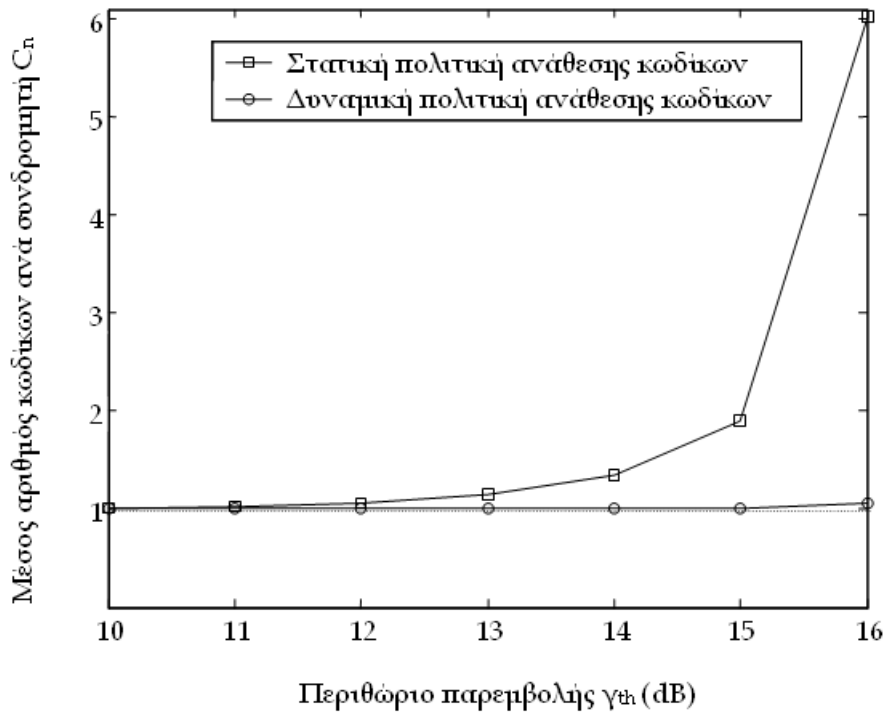
⁵Η συχνότητα λειτουργίας είναι $f = 42\text{GHz}$.



Σχήμα 6.8: Ποσοστό του χρόνου για το οποίο συγκεκριμένο ποσοστό του τομέα υποφέρει από διακοπή λειτουργίας λόγω CIR όταν $\gamma_{th} = 16, 18$ και $20dB$. Συγκρίνονται δύο εναλλακτικά σχήματα CDMA ανάθεσης κωδικών: (α) Μοναδικού κώδικα. (β) Πολλαπλών κωδικών με κύκλο ανάθεσης των $10s$.

περιόδων όπου ισχύει $A_D > F$. Αυτό γίνεται για λόγους συνέπειας με τον ορισμό της πιθανότητας AIP στην (5.17). Επίσης, για λόγους πρακτικής υλοποίησης της προτεινόμενης τεχνικής σε πραγματικά συστήματα, για τη δυναμική μεταβολή των κωδικών ανά SS με το χρόνο, αντί της ανάθεσης των κωδικών σε πραγματικό χρόνο, επιλέχθηκε κάθε κύκλος ανάθεσης να διαρκεί $10s$. Με αυτό τον τρόπο, θυσιάζεται μέρος της επίδοσης του συστήματος για να επιτευχθεί χαμηλότερο φορτίο επεξεργασίας και μικρότερη πολυπλοκότητα στο δίκτυο. Κάθε φορά που ο υπολογισμός της νέας κατανομής κωδικών στον τομέα δεν καταλήγει σε κάποια λύση C_* , τα στοιχεία του διανύσματος C διατηρούν τις υπο-βέλτιστες τιμές που έλαβαν κατά τον προηγούμενο επιτυχημένο κύκλο ανάθεσης. Συνεπώς, στο συνολικό χρόνο διακοπής της λειτουργίας λόγω παρεμβολής συνεισφέρουν αποκλειστικά οι περίοδοι για τις οποίες $CIR_{down}^n > \gamma_{th}$.

Οι δύο διαφορετικές πολιτικές ανάθεσης κωδικών (CDMA απλού κώδικα, δυναμική CDMA πολλαπλών κωδικών) συγκρίνονται μέσω του Σχήματος 6.8α και 6.8β. Καθένα από τα σχήματα αυτά αποτελείται από ιστογράμματα που εμφανίζουν το ποσοστό του συνολικού χρόνου για το οποίο συγκεκριμένο ποσοστό του τομέα βρίσκεται εκτός



Σχήμα 6.9: Σύγκριση της κατάληψης των πόρων του συστήματος (κώδικες αυξημένου μήκους) μεταξύ της στατικής και της δυναμικής ανάθεσης των κωδίκων.

λειτουργίας για $\gamma_{th}=16, 18$ και 20dB . Από το Σχήμα 6.8β παρατηρείται ότι με εφαρμογή της πολιτικής ανάθεσης πολλαπλών κωδίκων αυξημένου μήκους, η ταυτόχρονη διακοπή λειτουργίας λόγω παρεμβολής σε περισσότερους SS εμφανίζεται κυρίως για το ιδιαίτερα αυστηρό κατώφλιο $\gamma_{th}=20\text{dB}$ ενώ, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, το φαινόμενο γίνεται αμελητέο για ποσοστά του τομέα άνω του 6%. Από την άλλη πλευρά, σημαντικά ποσοστά διακοπής λόγω CCI που φθάνουν μέχρι και το 34% της περιοχής του τομέα συμβαίνουν με το αρχικό σχήμα CDMA απλού κώδικα στο Σχήμα 6.8α.

Ο βασικός στόχος της διεξαγωγής της ανωτέρω εξομοίωσης είναι να καταδειχθεί η σημαντική βελτίωση ως προς το CIR που επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της τεχνικής ελέγχου του CIR σε σχέση με το αρχικό σχήμα πολλαπλής πρόσβασης του Κεφαλαίου 5. Ένα επιπλέον κίνητρο είναι να καταδειχθεί η καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του συστήματος από τη δυναμική ανάθεση πολλαπλών κωδίκων σε σχέση με τη στατική εκδοχή. Σημειώνεται ότι τα δύο σχήματα είναι ισοδύναμα ως προς την πιθανότητα διακοπής AIP. Αυτή η πλευρά της εξομοίωσης διερευνάται στο Σχήμα 6.9, όπου σχεδιάζεται η κανονικοποιημένη ως προς τον πληθυσμό N των SS συνάρτηση κόστους του προβλήματος ελαχιστοποίησης (6.4), $\sum_{n \in \mathbf{N}} C_n$, ως συνάρτηση του περι-

θωρίου παρεμβολής γ_{th} για τη στατική και τη δυναμική εκδοχή του σχήματος ανάθεσης πολλαπλών κωδίκων. Για να εξασφαλισθεί ότι η σύγκριση είναι δίκαιη, ο μέγιστος αριθμός κωδίκων M στη δυναμική περίπτωση περιορίζεται από την τιμή που προέκυψε από το αναλυτικό μοντέλο. Έτσι, για το δεδομένο σύστημα, προκειμένου η σύγκριση να έχει νόημα, περιορίζεται στο εύρος τιμών 10-16dB του γ_{th} , για το οποίο είναι δυνατή η εύρεση ενός διανύσματος \mathbf{C}_* . Όσον αφορά τη στατική ανάθεση κωδίκων, για τη σχεδίαση της αντίστοιχης καμπύλης στο Σχήμα 6.9 χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του Πίνακα 6.1. Για τη δυναμική ανάθεση, τα αποτελέσματα της εξομοίωσης μεσοσταθμίσθηκαν ως προς το συνολικό χρόνο εξομοίωσης. Όπως αναμενόταν, η δυναμική εκδοχή του προτεινόμενου αλγορίθμου οδηγεί σε δραστική μείωση των δεσμευμένων πόρων στην έκταση του τομέα (ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές του κατωφλίου γ_{th}), καθιστώντας το σύστημα σχεδόν ισοδύναμο από αυτή τη σκοπιά με τη CDMA μοναδικού κώδικα.

Παράρτημα Α΄

Λογαριθμοκανονική Κατανομή

Α΄.1 Μονοδιάστατη

Έστω τ.μ. X που ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_x και S_x (μέση τιμή και τυπική απόκλιση της κανονικής τ.μ. $\ln X$, αντίστοιχα). Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίδεται από τη σχέση [Pap02]

$$p_X(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_x X} \exp \left[- \left(\frac{\ln X - m_x}{\sqrt{2}S_x} \right)^2 \right] \quad (\text{A}' .1)$$

Η μέση τιμή της τ.μ. X^n , όπου n πραγματικός αριθμός, είναι [Stu01]

$$E[X^n] = \exp \left\{ nm_x + \frac{n^2 S_x^2}{2} \right\} \quad (\text{A}' .2)$$

Οι παράμετροι m_x και S_x μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της μέσης τιμής $\mu_x = E[X]$ και της τυπικής απόκλισης σ_x της τ.μ. X με βάση τις επόμενες σχέσεις [Stu01]

$$m_x = \ln \left(\frac{\mu_x}{\sqrt{1 + (\sigma_x/\mu_x)^2}} \right) \quad (\text{A}' .3)$$

$$S_x^2 = \ln \left(1 + \frac{\sigma_x^2}{\mu_x^2} \right) \quad (\text{A}' .4)$$

Ολοκληρώνοντας την (Α΄.1) προκύπτει

$$\Pr\{X \geq x\} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln x - m_x}{\sqrt{2}S_x} \right) \quad (\text{A}' .5)$$

όπου

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^\infty e^{-z^2} dz \quad (\text{A}' .6)$$

η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος, προερχόμενη από τη συνάρτηση σφάλματος

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-z^2} dz \quad (\text{A'.7})$$

Οι ανωτέρω συναρτήσεις χαρακτηρίζονται από τις ιδιότητες

$$\operatorname{erf}(x) = \operatorname{erf}(-x) \quad (\text{A'.8})$$

$$\operatorname{erf}(x \rightarrow \infty) = 1 \quad (\text{A'.9})$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) \quad (\text{A'.10})$$

A'.2 Δισδιάστατη

Ας θεωρηθούν δύο τ.μ. X_1 και X_2 που ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_{x_i} και S_{x_i} ($i = 1, 2$) με συντελεστή συσχέτισης ρ . Οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες ανηγμένες τ.μ. U_1 και U_2 ορίζονται μέσω των μετασχηματισμών

$$U_i = \frac{\ln X_i - m_{x_i}}{S_{x_i}} \quad (i = 1, 2) \quad (\text{A'.11})$$

Καθεμία από τις τ.μ. U_i ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1 [Pap02]. Αν ρ_n ο συντελεστής συσχέτισης των τ.μ. U_1 και U_2 , η από κοινού κατανομή τους είναι κανονική και έχει τη μορφή [Pap02]

$$p_{U_1 U_2}(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho_n^2)} [u_1^2 + u_2^2 - 2\rho_n u_1 u_2] \right\} \quad (\text{A'.12})$$

Από την τελευταία σχέση υπολογίζεται η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των X_1 και X_2 . Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό της (A'.11), υπολογίζεται η αθροιστική πιθανότητα υπέρβασης της τιμής x

$$\Pr\{X_1 \geq x, X_2 \geq x\} = \Pr\{U_1 \geq u, U_2 \geq u\} = \int_u^\infty \int_u^\infty p_{U_1 U_2}(u_1, u_2) du_1 du_2 \quad (\text{A'.13})$$

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Bayes προκύπτει

$$p_{U_1 U_2}(u_1, u_2) = p_{U_1}(u_1) p_{U_2/U_1}(u_1, u_2) = p_{U_2}(u_2) p_{U_1/U_2}(u_1, u_2) \quad (\text{A'.14})$$

όπου

$$p_{U_1/U_2}(u_1, u_2) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho_n^2}} \exp \left\{ -\frac{(u_1 - \rho_n u_2)^2}{2(1-\rho_n^2)} \right\} \quad (\text{A'.15})$$

και

$$p_{U_2}(u_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u_2^2}{2}\right) \quad (\text{A'.16})$$

Αντικαθιστώντας τις τρεις τελευταίες σχέσεις στην (Α'.13) προκύπτει η τελική έκφραση

$$\Pr\{U_1 \geq u, U_2 \geq u\} = \frac{1}{2} \int_u^\infty p_{U_2}(u_2) \operatorname{erfc}\left(\frac{u - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}}\right) du_2 \quad (\text{A'.17})$$

Τέλος, όσον αφορά τον υπολογισμό της από κοινού πιθανότητας δύο κανονικών τ.μ. που μεταβάλλονται σε δύο διαφορετικά διαστήματα ισχύει [Pap02]

$$\begin{aligned} \Pr\{a \leq U_1 \leq b, c \leq U_2 \leq d\} &= \\ &= \int_a^b p_{U_1}(u_1) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{c - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{d - \rho_n u_1}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}}\right) \right] du_1 = \\ &= \int_c^d p_{U_2}(u_2) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{a - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{b - \rho_n u_2}{\sqrt{2(1 - \rho_n^2)}}\right) \right] du_2 \quad (\text{A'.18}) \end{aligned}$$

Α'.3 Τρισδιάστατη

Ας θεωρηθούν οι τ.μ. X_1, X_2, X_3 που ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_{x_i} και S_{x_i} και συντελεστές συσχέτισης ρ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, i \neq j$).

Οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες ανηγμένες τ.μ. U_1, U_2, U_3 ορίζονται μέσω της (Α'.11) και ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1, ενώ οι συντελεστές συσχέτισης τους συμβολίζονται με $\rho_{n_{ij}}$ ($i, j = 1, 2, 3, i \neq j$). Η από κοινού κατανομή των U_1, U_2, U_3 προσδιορίζεται εφαρμόζοντας το θεώρημα του Bayes [Pap02]

$$p_{U_1 U_2 U_3}(u_1, u_2, u_3) = p_{U_1 U_2}(u_1, u_2) p_{U_3/U_1 U_2}(u_1, u_2, u_3) \quad (\text{A'.19})$$

όπου $p_{U_1 U_2}(u_1, u_2)$ η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των ανηγμένων τ.μ. U_1 και U_2 -βλ. (Α'.12)- και $p_{U_3/U_1 U_2}(u_1, u_2, u_3)$ η δεσμευμένη κατανομή της τ.μ. U_3

$$p_{U_3/U_1 U_2}(u_1, u_2, u_3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{3/1,2}} \exp\left\{-\frac{(u_3 - \mu_{3/1,2})^2}{2\sigma_{3/1,2}^2}\right\} \quad (\text{A'.20})$$

Η U_3 είναι κανονική τ.μ. με μέση τιμή $\mu_{3/1,2}$ και τυπική απόκλιση $\sigma_{3/1,2}$

$$\mu_{3/1,2} = \frac{\rho_{n_{13}} - \rho_{n_{12}}\rho_{n_{23}}}{1 - \rho_{n_{12}}^2} u_1 + \frac{\rho_{n_{23}} - \rho_{n_{12}}\rho_{n_{13}}}{1 - \rho_{n_{12}}^2} u_2 \quad (\text{A'.21})$$

$$\sigma_{3/1,2} = \left(\frac{1 - \rho_{n_{12}}^2 - \rho_{n_{13}}^2 - \rho_{n_{23}}^2 + 2\rho_{n_{12}}\rho_{n_{13}}\rho_{n_{23}}}{1 - \rho_{n_{12}}^2} \right)^{1/2} \quad (A'.22)$$

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης της τιμής x ισχύει διαδοχικά

$$\begin{aligned} \Pr\{X_1 \geq x, X_2 \geq x, X_3 \geq x\} &= \Pr\{U_1 \geq u, U_2 \geq u, U_3 \geq u\} = \\ &= \int_u^\infty \int_u^\infty \int_u^\infty p_{U_1 U_2 U_3}(u_1, u_2, u_3) du_1 du_2 du_3 \end{aligned} \quad (A'.23)$$

Αντικαθιστώντας τις (A'.19) έως (A'.22) στην (A'.23) προκύπτει η τελική έκφραση της πιθανότητας υπέρβασης

$$\Pr\{U_1 \geq u, U_2 \geq u, U_3 \geq u\} = \frac{1}{2} \int_u^\infty \int_u^\infty p_{U_1 U_2}(u_1, u_2) \operatorname{erfc} \left(\frac{u - \mu_{3/1,2}}{\sqrt{2}\sigma_{3/1,2}} \right) du_1 du_2 \quad (A'.24)$$

Τέλος, παρατίθενται ορισμένες χρήσιμες σχέσεις που αφορούν τον υπολογισμό της από κοινού πιθανότητας τριών κανονικών τ.μ. που μεταβάλλονται σε τρία διαφορετικά διαστήματα [Pap02]

$$\begin{aligned} \Pr\{a \leq U_1 \leq b, c \leq U_2 \leq d, e \leq U_3 \leq f\} &= \\ &= \int_a^b \int_c^d p_{U_1 U_2}(u_1, u_2) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{e - \mu_{3/1,2}}{\sqrt{2}\sigma_{3/1,2}} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{f - \mu_{3/1,2}}{\sqrt{2}\sigma_{3/1,2}} \right) \right] du_1 du_2 \end{aligned} \quad (A'.25)$$

A'.4 Τετραδιάστατη

Ας θεωρηθούν οι τ.μ. X_1, X_2, X_3, X_4 που ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους m_{x_i} και S_{x_i} και συντελεστές συσχέτισης ρ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3, 4, i \neq j$).

Οι αντίστοιχες κανονικοποιημένες ανηγμένες τ.μ. U_1, U_2, U_3, U_4 ορίζονται μέσω της (A'.11) και ακολουθούν την κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1, ενώ οι συντελεστές συσχέτισής τους συμβολίζονται με $\rho_{n_{ij}}$ ($i, j = 1, 2, 3, 4, i \neq j$). Η από κοινού κατανομή των U_1, U_2, U_3, U_4 προσδιορίζεται εφαρμόζοντας το θεώρημα του Bayes [Pap02]

$$p_{U_1 U_2 U_3 U_4}(u_1, u_2, u_3, u_4) = p_{U_1 U_2 U_3}(u_1, u_2, u_3) p_{U_4/U_1 U_2 U_3}(u_1, u_2, u_3, u_4) \quad (A'.26)$$

όπου $p_{U_1 U_2 U_3}(u_1, u_2, u_3)$ η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των ανηγμένων τ.μ. U_1, U_2 και U_3 -βλ. (A'.12)- και $p_{U_4/U_1 U_2 U_3}(u_1, u_2, u_3)$ η δεσμευμένη κατανομή

Παράρτημα Α'. Λογαριθμοκανονική Κατανομή

της τ.μ. U_4

$$p_{U_4/U_1U_2U_3}(u_1, u_2, u_3, u_4) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{4/1,2,3}} \exp \left\{ -\frac{(u_4 - \mu_{3/1,2,3})^2}{2\sigma_{4/1,2,3}^2} \right\} \quad (A'.27)$$

Η U_4 είναι κανονική τ.μ. με μέση τιμή $\mu_{4/1,2,3}$ και τυπική απόκλιση $\sigma_{4/1,2,3}$

$$\begin{aligned} \mu_{4/1,2,3} = \frac{1}{\det(\mathbf{C})} [(Q_{11}\rho_{n14} + Q_{12}\rho_{n24} + Q_{13}\rho_{n34})u_1 + \\ + (Q_{12}\rho_{n14} + Q_{22}\rho_{n24} + Q_{23}\rho_{n34})u_2 + (Q_{13}\rho_{n14} + Q_{23}\rho_{n24} + Q_{33}\rho_{n34})u_3] \end{aligned} \quad (A'.28)$$

$$\sigma_{4/1,2,3} = [1 - Q(\rho_{n14}, \rho_{n24}, \rho_{n34})]^{1/2} \quad (A'.29)$$

Ο 3×3 πίνακας συνδιακύμανσης ορίζεται ως

$$\mathbf{C} = [C_{ij} = \rho_{nij}]_{3 \times 3} \quad (A'.30)$$

και ρ_{nij} είναι ο λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των $U_i, U_j, i \neq j$. Η ορίζουσα του πίνακα \mathbf{C} δίδεται από τη σχέση

$$\det(\mathbf{C}) = 1 - \rho_{n12}^2 - \rho_{n13}^2 - \rho_{n23}^2 + 2\rho_{n12}\rho_{n13}\rho_{n23} \quad (A'.31)$$

Ο αντίστροφος του πίνακα \mathbf{C} εκφράζεται ως

$$\mathbf{C}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{C})} [Q_{ij}]_{3 \times 3} \quad (A'.32)$$

όπου

$$\begin{cases} Q_{11} = 1 - \rho_{n23}^2 \\ Q_{22} = 1 - \rho_{n13}^2 \\ Q_{33} = 1 - \rho_{n12}^2 \\ Q_{12} = Q_{21} = \rho_{n13}\rho_{n23} - \rho_{12} \\ Q_{13} = Q_{31} = \rho_{n12}\rho_{n23} - \rho_{13} \\ Q_{23} = Q_{32} = \rho_{n12}\rho_{n13} - \rho_{23} \end{cases} \quad (A'.33)$$

Στοιχεία του πίνακα Q χρησιμοποιούνται κατά τον ορισμό της αντίστοιχης συνάρτησης και, συγκεκριμένα,

$$Q(u_1, u_2, u_3) = \frac{1}{\det(\mathbf{C})} (Q_{11}u_1^2 + Q_{22}u_2^2 + Q_{33}u_3^2 + 2Q_{12}u_1u_2 + 2Q_{13}u_1u_3 + 2Q_{23}u_2u_3) \quad (A'.34)$$

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας υπέρβασης της τιμής x ισχύει διαδοχικά

$$\begin{aligned} \Pr\{X_1 \geq x, X_2 \geq x, X_3 \geq x, X_4 \geq x\} &= \Pr\{U_1 \geq u, U_2 \geq u, U_3 \geq u, U_4 \geq u\} = \\ &= \int_u^\infty \int_u^\infty \int_u^\infty \int_u^\infty p_{U_1U_2U_3U_4}(u_1, u_2, u_3, u_4) du_1 du_2 du_3 du_4 \end{aligned} \quad (A'.35)$$

Αντικαθιστώντας τα ανωτέρω στην (Α'.26) προκύπτει η τελική έκφραση της πιθανότητας υπέρβασης

$$\Pr\{U_1 \geq u, U_2 \geq u, U_3 \geq u, U_4 \geq u\} = \frac{1}{2} \int_u^\infty \int_u^\infty \int_u^\infty p_{U_1 U_2 U_3}(u_1, u_2, u_3) \times \\ \times \operatorname{erfc}\left(\frac{u - \mu_{4/1,2,3}}{\sqrt{2}\sigma_{4/1,2,3}}\right) du_1 du_2 du_3 \quad (\text{Α'.36})$$

Α'.5 Λογαριθμικός Συντελεστής Συσχέτισης

Ας θεωρηθούν οι τ.μ. A_1 και A_2 που ακολουθούν τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους μ_i (μέση τιμή) και σ_i (τυπική απόκλιση) ($i = 1, 2$). Επιπλέον, με ρ αναπαρίσταται 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 ονομάζεται λογαριθμικός συντελεστής συσχέτισης. Από τους ορισμούς των ροπών στην Ενότητα Α'.1 προκύπτουν οι επόμενες σχέσεις

$$\mu_i = \exp\left(\eta_i + \frac{S_i^2}{2}\right) \quad (i = 1, 2) \quad (\text{Α'.37})$$

$$\sigma_i^2 = \exp(2\eta_i + S_i^2)[\exp(S_i^2) - 1] \quad (i = 1, 2) \quad (\text{Α'.38})$$

Ο συντελεστής συσχέτισης ορίζεται ως [Pap02]

$$\rho = \frac{E[A_1 A_2] - \mu_1 \mu_2}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (\text{Α'.39})$$

Η τιμή του γινομένου των δύο τ.μ. υπολογίζεται ως εξής

$$E[A_1 A_2] = E[e^{N_1 + N_2}] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{x_1 + x_2} p_{N_1 N_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (\text{Α'.40})$$

όπου $p_{N_1 N_2}(x_1, x_2)$ είναι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που εκφράζεται συναρτήσει των παραμέτρων $\eta_1, S_1, \eta_2, S_2, \rho$. Μετά από αλγεβρικές πράξεις καταλήγει κανείς στην έκφραση

$$E[A_1 A_2] = \exp\left(\eta_1 + \eta_2 + \frac{S_1^2}{2} + \frac{S_2^2}{2} + \rho_n S_1 S_2\right) \quad (\text{Α'.41})$$

Αντικαθιστώντας στις (Α'.26), (Α'.27) και (Α'.30) στην (Α'.28) προκύπτει

$$\rho = \frac{\exp(\rho_n S_1 S_2) - 1}{\sqrt{[\exp(S_1^2) - 1][\exp(S_2^2) - 1]}} \quad (\text{Α'.42})$$

Παράρτημα Α'. Λογαριθμοκανονική Κατανομή

Τέλος, λύνοντας ως προς ρ_n , προκύπτει η τελική μορφή του λογαριθμικού συντελεστή συσχέτισης

$$\rho_n = \frac{1}{S_1 S_2} \ln \left(1 + \rho \sqrt{[\exp(S_1^2) - 1][\exp(S_2^2) - 1]} \right) \quad (A'.43)$$

Παράρτημα Β΄

Κατανομή Γάμμα

Β΄.1 Μονοδιάστατη

Ας θεωρηθεί η τ.μ. X που ακολουθεί την κατανομή γάμμα με στατιστικές παραμέτρους v και β . Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίδεται από τη σχέση [Pap02]

$$p_X(X) = \frac{\beta^v}{\Gamma(v)} x^{v-1} e^{-\beta x} \quad (\text{B'.1})$$

όπου $\Gamma(v)$ η συνάρτηση γάμμα που ορίζεται από το ολοκλήρωμα [Abr65]

$$\Gamma(v) = \int_0^\infty t^{v-1} e^{-t} dt \quad (\text{B'.2})$$

Η μέση τιμή της τ.μ. X^n , όπου n θετικός πραγματικός αριθμός, είναι

$$E[X^n] = \frac{\Gamma(v+n)}{\beta^n \Gamma(v)} \quad (\text{B'.3})$$

Οι παράμετροι v και β μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει της μέσης τιμής μ_x και της τυπικής απόκλισης σ_x της τ.μ. X μέσω των επόμενων σχέσεων

$$v = \left(\frac{\mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \quad (\text{B'.4})$$

$$\beta = \frac{\mu_x}{\sigma_x^2} \quad (\text{B'.5})$$

Ολοκληρώνοντας την (B'.1) και σύμφωνα με τον ορισμό της ατελούς συνάρτησης γάμμα [Abr65]

$$\gamma(a, x) = \int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt \quad (\text{B'.6})$$

η τελική έκφραση της πιθανότητας υπέρβασης είναι

$$\Pr\{X \geq x\} = 1 - \frac{\gamma(v, \beta x)}{\Gamma(v)} \quad (\text{B'.7})$$

Επιπλέον, η ροπογεννήτρια συνάρτηση μιας τ.μ. X που ακολουθεί την κατανομή γάμμα δίνεται από την έκφραση [Pap02]

$$M_x(t) = E[e^{tx}] = \left(1 - \frac{t}{\beta}\right)^{-v} \quad (\text{B'.8})$$

Τέλος, παρατίθενται ορισμένες χρήσιμες σχέσεις που σχετίζονται με την κατανομή γάμμα

$$\Pr\{a \leq X \leq b\} = \frac{\gamma(v, \beta b)}{\Gamma(v)} - \frac{\gamma(v, \beta a)}{\Gamma(v)} \quad (\text{B'.9})$$

$$\Gamma(a, x) = \Gamma(a) - \gamma(a, x) = \int_x^\infty e^{-t} t^{a-1} dt \quad (\text{B'.10})$$

B'.2 Δισδιάστατη

Ας θεωρηθούν δύο τ.μ. X_1 και X_2 που ακολουθούν την κατανομή γάμμα με παραμέτρους (v_1, β_1) και (v_2, β_2) , αντίστοιχα. Ο μεταξύ τους συντελεστής συσχέτισης συμβολίζεται με ρ . Καθώς στις περιπτώσεις που αντιμετωπίζονται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, οι αριθμητικές τιμές των v_1 και v_2 διαφέρουν ελάχιστα, μπορεί να υιοθετηθεί η προσέγγιση

$$v = \sqrt{v_1 v_2} \simeq v_1 \simeq v_2 \quad (\text{B'.11})$$

Λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρική δισδιάστατη κατανομή γάμμα [Kou90], αποδεικνύεται ότι η ροπογεννήτρια συνάρτηση των μεταβλητών X_1 και X_2 δίδεται από τη σχέση

$$M_{x_1 x_2}(t_1, t_2) = E[e^{t_1 x_1 + t_2 x_2}] = \left[1 - \frac{\beta_2 t_1 + \beta_1 t_2}{\beta_1 \beta_2} + \frac{(1 - \rho)t_1 t_2}{\beta_1 \beta_2}\right]^{-v} \quad (\text{B'.12})$$

Πράγματι, εύκολα αποδεικνύεται ότι οι περιθώριες συναρτήσεις κατανομής έχουν ροπογεννήτριες συναρτήσεις της μορφής

$$M_{x_1}(t_1) = M_{x_1 x_2}(t_1, 0) = \left(1 - \frac{t_1}{\beta_1}\right)^{-v} \quad (\text{B'.13})$$

$$M_{x_2}(t_2) = M_{x_1 x_2}(0, t_2) = \left(1 - \frac{t_2}{\beta_2}\right)^{-v} \quad (\text{B'.14})$$

Επιπλέον, ο υπολογισμός της δεύτερης ροπής οδηγεί στο αποτέλεσμα

$$E[X_1 X_2] = \frac{\partial^2 M_{x_1 x_2}(0, 0)}{\partial t_1 \partial t_2} = \frac{v^2 + v\rho}{\beta_1 \beta_2} \quad (\text{B'.15})$$

Συνεπώς, ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των τ.μ. X_1 και X_2 προκύπτει

$$\rho = \frac{E[X_1 X_2] - E[X_1]E[X_2]}{\sigma_{x_1} \sigma_{x_2}} \quad (\text{B'.16})$$

Παράρτημα Β'. Κατανομή Γάμμα

Στη συνέχεια αποδεικνύεται ότι η από κοινού συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας των τ.μ. X_1 και X_2 είναι

$$p_{X_1 X_2}(x_1, x_2) = \frac{(1 - \rho)^v}{\Gamma(v)} \sum_{i=0}^{\infty} \rho^i \frac{\Gamma(v + i)}{i!} p_{X'_i}(x) p_{Y'_i}(y) \quad (\text{B'.17})$$

όπου X'_i και Y'_i τ.μ. που ακολουθούν την κατανομή γάμμα με παραμέτρους $(v + i, \beta_1/(1 - \rho))$ και $(v + i, \beta_2/(1 - \rho))$, αντίστοιχα. Για τις ανάγκες της απόδειξης, η (B'.13) γράφεται στη μορφή

$$M_{x_1 x_2}(t_1, t_2) = (1 - \rho)^v \left[\left(1 - \frac{t_1}{\beta'_1}\right) \left(1 - \frac{t_2}{\beta'_2}\right) \right]^{-v} \left[1 - \frac{\rho}{\left(1 - \frac{t_1}{\beta'_1}\right) \left(1 - \frac{t_2}{\beta'_2}\right)} \right]^v \quad (\text{B'.18})$$

όπου

$$\begin{cases} \beta'_1 = \frac{\beta_1}{1 - \rho} \\ \beta'_2 = \frac{\beta_2}{1 - \rho} \end{cases} \quad (\text{B'.19})$$

Αναπτύσσοντας την (B'.18) σε σειρά προκύπτει

$$M_{x_1 x_2}(t_1, t_2) = (1 - \rho)^v \left[\left(1 - \frac{t_1}{\beta'_1}\right) \left(1 - \frac{t_2}{\beta'_2}\right) \right]^{-v} \sum \frac{v^{(i)}}{i!} \left[\frac{\rho}{\left(1 - \frac{t_1}{\beta'_1}\right) \left(1 - \frac{t_2}{\beta'_2}\right)} \right]^i \quad (\text{B'.20})$$

όπου

$$v^{(i)} = v(v - 1) \cdots (v + i - 1) = \frac{\Gamma(v + i)}{\Gamma(v)} \quad (\text{B'.21})$$

Η (B'.20) γράφεται και ως

$$M_{x_1 x_2}(t_1, t_2) = \frac{(1 - \rho)^v}{\Gamma(v)} \sum_{i=0}^{\infty} \rho^i \frac{\Gamma(v + i)}{i!} M_{X'_i}(t_1) M_{Y'_i}(t_2) \quad (\text{B'.22})$$

Επιπλέον, η (B'.22) προκύπτει απευθείας από την (B'.17) λόγω του ότι

$$E[e^{t_1 x_1 + t_2 x_2}] = \frac{(1 - \rho)^v}{\Gamma(v)} \sum_{i=0}^{\infty} \rho^i \frac{\Gamma(v + i)}{i!} E[e^{t_1 X'_i}] E[e^{t_2 Y'_i}] \quad (\text{B'.23})$$

Τέλος, η από κοινού πιθανότητα υπέρβασης δύο τιμών x_1 και x_2 δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$\begin{aligned} \Pr\{X_1 \geq x_1, X_2 \geq x_2\} &= \\ &= \int_{x_1}^{\infty} \int_{x_2}^{\infty} p_{X_1 X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 = \\ &= \frac{(1 - \rho)^v}{\Gamma(v)} \sum_{i=0}^{\infty} \rho^i \frac{\Gamma(v + i)}{i!} \int_{x_1}^{\infty} p_{X'_i}(x) dx \int_{x_2}^{\infty} p_{Y'_i}(y) dy = \\ &= \frac{(1 - \rho)^v}{\Gamma(v)} \sum_{i=0}^{\infty} \rho^i \frac{\Gamma(v + i)}{i!} \left[1 - \frac{\gamma(v + i, \beta'_1 x_1)}{\Gamma(v + i)} \right] \left[1 - \frac{\gamma(v + i, \beta'_2 x_2)}{\Gamma(v + i)} \right] \end{aligned} \quad (\text{B'.24})$$

Παράρτημα Γ'

Υπολογισμός των Παραμέτρων H της Χωρικής Δομής του Μέσου Βροχόπτωσης

Γ'.1 Υπολογισμός της Παραμέτρου H

Η παράμετρος H ορίζεται ως το διπλό ολοκλήρωμα του σημειακού συντελεστή αυτο-συσχέτισης ρ_0 της ειδικής απόσβεσης βροχής κατά το μήκος L της ζεύξης

$$H = \int_0^L \int_0^L \rho_0(l, l') dl dl' \quad (\Gamma'.1)$$

Εξάλλου, ο συντελεστής ρ_0 εξαρτάται μόνο από την απόσταση

$$d = |l - l'| \quad (\Gamma'.2)$$

Επομένως,

$$\rho_0(l, l') = \rho_0(l', l) \quad (\Gamma'.3)$$

Από τις (Γ'.1) και (Γ'.3) προκύπτει

$$H = 2 \int_0^L \int_0^l \rho_0(l, l') dl dl' \quad (\Gamma'.4)$$

Θέτοντας $x = l - l'$ και $y = l'$, με αλλαγή μεταβλητών η (Γ'.4) έρχεται στη μορφή

$$H = 2 \int_0^L \int_0^{L-x} \rho_0(x) dx dy \quad (\Gamma'.5)$$

η οποία απλοποιείται στο απλό ολοκλήρωμα

$$H = 2 \int_0^L \rho_0(x)(L - x) dx \quad (\Gamma'.6)$$

Γ'.1.1 Μοντέλο Εύκρατων Περιοχών

Σύμφωνα με το μοντέλο που εφαρμόζεται σε εύκρατες περιοχές [Lin75], ο συντελεστής ρ_0 δίδεται από την (2.31), η οποία, στη γενική της μορφή, αναπαράγεται από την ακόλουθη σχέση

$$\rho_0(x) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2+x^2}} & x \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2+D_r^2}} & x > D_r \end{cases} \quad (\Gamma'.7)$$

όπου D_r η μέγιστη διάσταση του βροχοπυρήνα. Με βάση την τελευταία σχέση, για $x \leq D_r$ η (Γ'.6) γράφεται

$$H = 2 \int_0^L \frac{G(L-x)}{\sqrt{G^2+x^2}} dx \quad (\Gamma'.8)$$

ή

$$H = 2LG \int_0^{L/G} \frac{dz}{\sqrt{1+z^2}} - 2G^2 \int_0^{L/G} \frac{zdz}{\sqrt{1+z^2}} \quad (\Gamma'.9)$$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι [Abr65]

$$\int \frac{dz}{\sqrt{1+z^2}} = \sinh^{-1}(z) + c \quad (\Gamma'.10)$$

$$\int \frac{zdz}{\sqrt{1+z^2}} = \sqrt{1+z^2} + c \quad (\Gamma'.11)$$

οπότε η τελική έκφραση της (Γ'.9) δίδεται από την (2.34)

$$H = 2LG \sinh^{-1} \left(\frac{L}{G} \right) + 2G^2 \left(1 - \sqrt{\left(\frac{L}{G} \right)^2 + 1} \right) \quad (\Gamma'.12)$$

Ακολουθώντας παρόμοια βήματα, αποδεικνύεται ότι για $x > D_r$ η παράμετρος H γίνεται

$$H = 2LG \sinh^{-1} \left(\frac{D_r}{G} \right) + 2G^2 \left(1 - \sqrt{\left(\frac{D_r}{G} \right)^2 + 1} \right) + \frac{G(L-D_r)^2}{\sqrt{G^2+D_r^2}} \quad (\Gamma'.13)$$

Γ'.1.2 Μοντέλο Τροπικών και Υποτροπικών Περιοχών

Σύμφωνα με το μοντέλο που εφαρμόζεται σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές [Mor76], ο συντελεστής ρ_0 δίδεται από την (2.39), η οποία, στη γενική της μορφή, αναπαράγεται από την ακόλουθη σχέση

$$\rho_0(x) = \begin{cases} \exp[-c\sqrt{x}] & x \leq D_r \\ \exp[-c\sqrt{D_r}] & x > D_r \end{cases} \quad (\Gamma'.14)$$

Με βάση την τελευταία σχέση, για $x \leq D_r$ η (Γ'.6) γράφεται

$$H = 2 \int_0^L (L-x) \exp[-c\sqrt{x}] dx \quad (\Gamma'.15)$$

ή

$$H = \frac{4L}{c^2} \int_0^{c\sqrt{L}} z \exp(-z) dz - \frac{4}{c^4} \int_0^{c\sqrt{L}} z^3 \exp(-z) dz \quad (\Gamma'.16)$$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι [Abr65]

$$\int z \exp(-z) dz = -\exp(-z)(z+1) + c \quad (\Gamma'.17)$$

$$\int z^3 \exp(-z) dz = -\exp(-z)(z^3 + 3z^2 + 6z + 6) + c \quad (\Gamma'.18)$$

οπότε η τελική έκφραση της ($\Gamma'.16$) δίδεται από την (2.34)

$$H = 4 \frac{c^2 L - 6 + 2(3 + 3c\sqrt{L} + c^2 L) \exp(-c\sqrt{L})}{c^4} \quad (\Gamma'.19)$$

Ακολουθώντας παρόμοια βήματα, αποδεικνύεται ότι για $x > D_r$ η παράμετρος H γίνεται

$$H = 4 \frac{c^2 L - 6 + [c^3(D_r - L)\sqrt{D_r} + c^2(3D_r - L) + 6 + 6c\sqrt{D_r}] \exp(-c\sqrt{L})}{c^4} + \exp(-a_s\sqrt{D_r}) + (L - D_r)^2 \quad (\Gamma'.20)$$

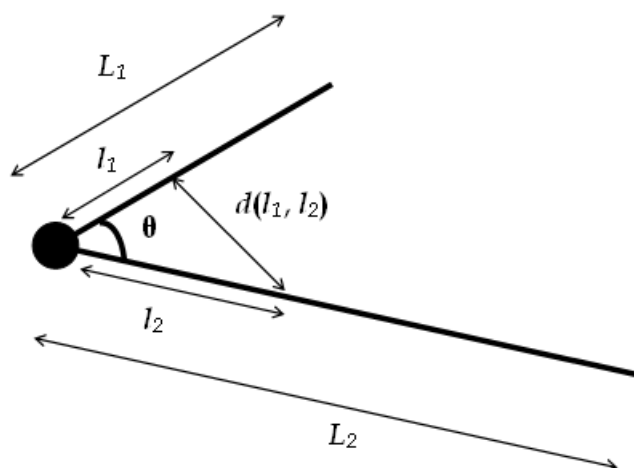
Γ'.2 Υπολογισμός της Παραμέτρου H_{12}

Η παράμετρος H_{12} ορίζεται ως το διπλό ολοκλήρωμα του σημειακού συντελεστή ετερο-συσχέτισης ρ_{12} της ειδικής απόσβεσης λόγω βροχής κατά μήκος δύο συγκλινουσών ζεύξεων L_1 και L_2

$$H_{12} = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \rho_{12}(l_1, l_2) dl_1 dl_2 \quad (\Gamma'.21)$$

Το μέγεθος ρ_{12} εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ των σημείων στις δύο συγκλινουσες ζεύξεις. Υποθέτοντας ότι οι δύο επίγειες ζεύξεις σχηματίζουν γωνία θ και ότι τα δύο σημεία απέχουν αποστάσεις l_1 και l_2 ($0 \leq l_i \leq L_i$) από την αρχή της ζεύξης (βλ. Σχήμα Γ'.1), η μεταξύ τους απόσταση είναι

$$d(l_1, l_2) = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos \theta} \quad (\Gamma'.22)$$



Σχήμα Γ'.1: Ορισμός των γεωμετρικών μεγεθών δύο συγκλινουσών ζεύξεων.

Γ'.2.1 Μοντέλο Εύκρατων Περιοχών

Σύμφωνα με το μοντέλο που εφαρμόζεται σε εύκρατες περιοχές, ο συντελεστής ρ_{12} δίδεται από την ακόλουθη σχέση

$$\rho_{12}(d) = \begin{cases} \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2(l_1, l_2)}} & d(l_1, l_2) \leq D_r \\ \frac{G}{\sqrt{G^2 + D_r^2}} & d(l_1, l_2) > D_r \end{cases} \quad (\Gamma'.23)$$

και ο υπολογισμός της παραμέτρου H_{12} πραγματοποιείται με αριθμητικό τρόπο.

Γ'.2.2 Μοντέλο Τροπικών και Υποτροπικών Περιοχών

Σύμφωνα με το μοντέλο που εφαρμόζεται σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές, ο συντελεστής ρ_{12} δίδεται από την ακόλουθη σχέση

$$\rho_{12}(d) = \begin{cases} \exp \left[-c\sqrt{d(l_1, l_2)} \right] & d(l_1, l_2) \leq D_r \\ \exp \left[-c\sqrt{D_r} \right] & d(l_1, l_2) > D_r \end{cases} \quad (\Gamma'.24)$$

και ο υπολογισμός της παραμέτρου H_{12} πραγματοποιείται με αριθμητικό τρόπο.

Παράρτημα Δ΄

Εξαγωγή των Στατιστικών Παραμέτρων του Ρυθμού Βροχόπτωσης από Δεδομένα Βροχής

Δ΄.1 Χάρτες Βροχής

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο υπολογισμός των στατιστικών μέσων 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 [ITU837]. Από τη συγκεκριμένη Σύσταση προτείνεται στους σχεδιαστές συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών η χρήση των χαρτών βροχής (rain maps), σύμφωνα με τους οποίους και ανάλογα με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, η Γη διαιρείται σε τομείς των $1.5^\circ \times 1.5^\circ$. Η τράπεζα δεδομένων που συνοδεύει τη σύσταση προέρχεται από την επεξεργασία μετρήσεων διάρκειας 15 ετών από το Ευρωπαϊκό Μετεωρολογικό Κέντρο ECMWF και αποτελείται από τα αρχεία κειμένου ESARAIN-PR6.TXT, ESARAIN_MC.TXT και ESARAIN_MS.TXT που περιέχουν δεδομένα για τις αντίστοιχες παραμέτρους:

$P_{r6}[\%]$: Πιθανότητα υπέρβασης περιόδων βροχής διάρκειας έξι ωρών.

M_c [mm]: Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης συνεκτικού τύπου.

M_s [mm]: Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης στρωσιγενούς τύπου.

Σκοπός του προτεινόμενου μοντέλου είναι ο υπολογισμός της στάθμης ρυθμού βροχόπτωσης R_p που υπερβαίνεται για συγκεκριμένο ποσοστό του συνολικού χρόνου $p\%$ σε δεδομένη τοποθεσία. Η μεθοδολογία εφαρμόζεται με βάση τα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1ο: Υπολογισμός των παραμέτρων P_{r6} , M_c και M_s 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 $+90^\circ N$ έως $-90^\circ S$ σε βήματα των 1.5° . Το μήκος Lon λαμβάνει τιμές στο εύρος $0^\circ E$ έως $360^\circ E$ σε βήματα των 1.5° .

Βήμα 2ο: Από τις τιμές των παραμέτρων P_{r6} , M_c και M_s στα τέσσερα γειτονικά σημεία του πλέγματος, οι τιμές $P_{r6}(Lat, Lon)$, $M_c(Lat, Lon)$ και $M_s(Lat, Lon)$ στην επιθυμητή τοποθεσία υπολογίζονται με εφαρμογή δι-γραμμικής παρεμβολής.

Βήμα 3ο: Υπολογίζεται η μέση ετήσια πιθανότητα βροχόπτωσης P_0 μέσω της σχέσης

$$P_0(Lat, Lon) = P_{r6}(Lat, Lon) (1 - e^{-0.0117M_s(Lat, Lon)/P_{r6}(Lat, Lon)}) \quad (\Delta'.1)$$

Αν η πιθανότητα P_{r6} ισούται με μηδέν, η μέση ετήσια πιθανότητα βροχής καθώς και ο ρυθμός βροχόπτωσης που υπερβαίνεται για οποιοδήποτε ποσοστό ενός μέσου έτους είναι μηδέν. Αν ισχύει το τελευταίο, τα ακόλουθα βήματα είναι περιττά.

Βήμα 4ο: Ο ρυθμός βροχόπτωσης R_p που υπερβαίνεται για κάθε ποσοστό του συνολικού χρόνου $p\%$, όπου $p \leq P_0$ προσδιορίζεται από τη σχέση

$$R_p(Lat, Lon) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (\Delta'.2)$$

όπου

$$A = ab \quad (\Delta'.3)$$

$$B = a + c \ln(p/P_0(Lat, Lon)) \quad (\Delta'.4)$$

$$C = \ln(p/P_0(Lat, Lon)) \quad (\Delta'.5)$$

και

$$a = 1.11 \quad (\Delta'.6)$$

$$b = \frac{(M_c(Lat, Lon) + M_s(Lat, Lon))}{22932 P_0} \quad (\Delta'.7)$$

$$c = 31.5b \quad (\Delta'.8)$$

Δ'.2 Υπολογισμός στατιστικών παραμέτρων από πειραματικά δεδομένα

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 $x_i, P_i, i = 1, 2, \dots, n$, 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 στην προηγούμενη ενότητα εξασφαλίζουν την πιθανότητα υπέρβασης (σε μορφή ποσοστού) κάθε στάθμης ρυθμού βροχόπτωσης, υποκαθιστώντας μερικώς την αναγκαιότητα για τοπικά πειραματικά δεδομένα που, ασφαλώς, αν υπάρχουν διαθέσιμα είναι σαφώς πλέον αξιόπιστα. Στη συνέχεια, περιγράφονται διαδικασίες βάσει των οποίων προσδιορίζονται οι στατιστικές παράμετροι της κατανομής του ρυθμού βροχόπτωσης ή της απόσβεσης λόγω βροχής όταν υιοθετείται το λογαριθμοκανονικό μοντέλο ή το μοντέλο της κατανομής γάμμα.

Δ'.2.1 Λογαριθμοκανονικό μοντέλο

Ως πρώτο βήμα της μεθόδου, για κάθε τιμή της πιθανότητας P_i καθορίζεται η αντίστοιχη τιμή u_i της ανηγμένης κανονικής τ.μ. U –βλ. (Α'.11)– από τη σχέση

$$u_i = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2P_i) \quad (\Delta'.9)$$

Όμως, ισχύει

$$u_i = \frac{\ln(x_i) - \ln(m_x)}{S_x} \quad (\Delta'.10)$$

ή

$$u_i = Az_i + B \quad (\Delta'.11)$$

όπου

$$z_i = \ln x_i \quad (\Delta'.12)$$

$$A = \frac{1}{S_x} \quad (\Delta'.13)$$

$$B = -\frac{\ln m_x}{S_x} \quad (\Delta'.14)$$

δηλαδή προκύπτει μια γραμμική σχέση μεταξύ των u_i και z_i . Επομένως, η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων οδηγεί εύκολα στον υπολογισμό των συντελεστών γραμμικής παλινδρόμησης A και B και, από εκεί, στον υπολογισμό των στατιστικών παραμέτρων m_x και S_x .

Δ'.2.2 Μοντέλο κατανομής γάμμα

Έστω ότι υπάρχουν διαθέσιμα n πειραματικά σημεία της καμπύλης αθροιστικής κατανομής με συντεταγμένες (x_i, P_i) . Από τα σημεία αυτά προκύπτει η καμπύλη

$$y = f(x) = -\frac{dP}{dx} \quad (\Delta'.15)$$

Εφαρμόζοντας την ανωτέρω σχέση για την κατανομή γάμμα, η $(\Delta'.15)$ γράφεται

$$y = f(x) = \frac{\beta^v x^{v-1} e^{-\beta x}}{\Gamma(v)} \quad (\Delta'.16)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι, όταν υπολογίζεται η παράμετρος v για τις τ.μ. R και A λαμβάνει συνήθως μικρές τιμές (της τάξης του 10^{-3}), ισχύουν οι επόμενες προσεγγιστικές σχέσεις

$$\begin{cases} (\beta x) \simeq 1 \\ \Gamma(v) \simeq 1/v \end{cases} \quad (\Delta'.17)$$

Συνεπώς, η $(\Delta'.16)$ γράφεται

$$y = \frac{v e^{-\beta x}}{x} \quad (\Delta'.18)$$

Θέτοντας

$$z = \ln(xy) \quad (\Delta'.19)$$

προκύπτει η γραμμική σχέση

$$z = \ln v - \beta x \quad (\Delta'.20)$$

Με εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης και της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζονται κατά προσέγγιση οι στατιστικές παράμετροι v και β .

Για τον ακριβέστερο προσδιορισμό των v και β χρησιμοποιείται η έκφραση της πιθανότητας υπέρβασης

$$P(x, v, \beta) = 1 - \frac{\gamma(v, \beta x)}{\Gamma(v)} \quad (\Delta'.21)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, τα v και β επιλέγονται έτσι ώστε η παράσταση

$$S = \sum_{i=1}^n [P(x_i, v, \beta) - P_i]^2 \quad (\Delta'.22)$$

να ελαχιστοποιείται. Συνεπώς ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial v} = 0 \end{cases} \quad (\Delta'.23)$$

Μετά από πράξεις, προκύπτει το σύστημα εξισώσεων

$$\sum_{i=1}^n [P(x_i, v, \beta) - P_i] x_i^v e^{-\beta x_i} = 0 \quad (\Delta'.24)$$

$$\sum_{i=1}^n [P(x_i, v, \beta) - P_i] \left[\Gamma(v) \int_0^{\beta x_i} z^{v-1} e^{-z} \ln z dz - \Gamma'(v) \gamma(v, \beta x_i) \right] = 0 \quad (\Delta'.25)$$

Για την επίλυση του συστήματος ($\Delta'.24$) και ($\Delta'.25$) μπορεί να εφαρμοσθεί κάποια επαναληπτική αριθμητική μέθοδος με αρχικές τιμές για τις v και β εκείνες που καθορίστηκαν από τον προσεγγιστικό υπολογισμό που προηγήθηκε.

Άλλη μια πρακτική προσεγγιστική μέθοδος με στόχο τον προσδιορισμό των v και β είναι η εξής: Με αρχική τιμή του v εκείνη που προκύπτει από τη γραμμική παλινδρόμηση, επιλέγεται κάποιο σημείο (x_k, P_k) (κατά προτίμηση στην ουρά της καμπύλης, στην οποία αντιστοιχούν οι χαμηλές πιθανότητες υπέρβασης) και επιβάλλεται η θεωρητική καμπύλη να διέρχεται από το σημείο αυτό. Τότε, για $x = x_k$, η ($\Delta'.21$) γίνεται

$$P_k = 1 - \frac{\gamma(v, \beta x_k)}{\Gamma(v)} \quad (\Delta'.26)$$

επιτρέποντας, έτσι, τον καθορισμό του αντίστοιχου β . Στη συνέχεια, υπολογίζεται το άθροισμα S σύμφωνα με την ($\Delta'.22$). Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες γειτονικές τιμές του v μεταβάλλοντας το βήμα κατά 1/10 του χιλιοστού. Το ζεύγος που ελαχιστοποιεί το άθροισμα S είναι το πλέον κατάλληλο. Η συγκεκριμένη μέθοδος αποδεικνύεται ταχύτερη και αποτελεσματικότερη από τις προηγούμενες καθώς εξαναγκάζει τη θεωρητική καμπύλη να προσαρμόζεται στα πειραματικά δεδομένα για την περιοχή τιμών που ενδιαφέρει.

Παράρτημα Ε΄

Γεννήτρια Χρονοσειρών Απόσβεσης λόγω Βροχής

Ε΄.1 Μοντέλο Maseng-Bakken

Στο Κεφάλαιο 2, ειδικότερα στις Ενότητες 2.5.4 και 2.5.5, παρουσιάζεται το υπόβαθρο για τη δυναμική ανάλυση της στατιστικής του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης $R(z, t)$ και της απόσβεσης λόγω βροχής $A(z, t)$ ως χωροχρονικών διαδικασιών [Pan02b]. Το περιεχόμενο της εκεί ανάλυσης αποτελείται από την παράθεση των βασικών υποθέσεων και εξισώσεων που οδηγούν, τελικά, στον υπολογισμό της φασματικής πυκνότητας ισχύος των δύο τ.μ..

Στο παρόν παράρτημα γίνεται εμβάθυνση στη χρονική μεταβολή των $R(z, t)$ και $A(z, t)$ χρησιμοποιώντας το δυναμικό μοντέλο των Maseng-Bakken [Mas81]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η στοχαστική διαφορική εξίσωση που ακολουθεί η απόσβεση λόγω βροχής έχει την ακόλουθη μορφή

$$dA(t) = K_{1A}(A)dt + dW_A(A) \quad (\text{Ε΄.1})$$

όπου $W_A(A)$ στοχαστική διαδικασία ανεξάρτητων διαφορών, η διαφορική τιμή της οποίας ορίζεται ως η διαφορά της απόσβεσης για δύο χρονικές στιγμές που διαφέρουν κατά Δt

$$dW_A(A) = A(t + \Delta t) - A(t) \quad (\text{Ε΄.2})$$

Η $dW_A(A)$ ικανοποιεί τις εξής ιδιότητες του λευκού θορύβου

$$\begin{cases} E[dW_A(A)|A] = 0 \\ E[(dW_A(A))^2|A] = K_{2A}(A)dt \end{cases} \quad (\text{Ε΄.3})$$

όπου $K_{1A}(A)$ και $K_{2A}(A)$ οι ντετερμινιστικές συναρτήσεις της τ.μ. $A(t)$ που σχετίζονται με τις δύο πρώτες δεσμευμένες (conditional) ροπές της $W_A(a)$. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας πρώτης τάξης $p_A(A(t), t)$ της στοχαστικής ανέλιξης $A(t)$ σχετίζεται με τις προηγούμενες ροπές μέσω της εξίσωσης διάχυσης τύπου Fokker-Planck [Pan02b]

$$\frac{\partial p_A(A, t)}{\partial t} = 0.5 \frac{\partial^2}{\partial A^2} [K_{2A}(A)p_A(A, t)] - \frac{\partial}{\partial A} [K_{1A}(A)p_A(A, t)] \quad (\text{E'.4})$$

Σημειώνεται ότι υπό τον όρο διαδικασία διάχυσης (diffusion process) αποκαλείται κάθε παραμετρική στοχαστική ανέλιξη συνεχούς χρόνου που διακρίνεται από την ισχυρή ιδιότητα Markov και τα δείγματά της είναι σχεδόν πάντοτε συνεχείς συναρτήσεις του χρόνου. Επειδή μόνο περιορισμένο πλήθος περιπτώσεων στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων τύπου Fokker-Planck επιλύονται αναλυτικά [Kar81], η μορφή της $K_{2A}(A)$ επιλέγεται έτσι ώστε να μεταπίπτει σε μια από αυτές. Η επιλογή που γίνεται από το μοντέλο Maseng-Bakken για την υπό μελέτη συνάρτηση είναι

$$K_{2A}(A) = 2d_A A^2 S_a^2 \quad (\text{E'.5})$$

όπου d_A [s^{-1}] η δυναμική παράμετρος που περιγράφει το ρυθμό μεταβολής της στοχαστικής ανέλιξης της απόσβεσης λόγω βροχής και S_a η τυπική απόκλιση της στάσιμης πυκνότητας πιθανότητας $p_A(A)$. Υιοθετώντας το λογαριθμοκανονικό μοντέλο για τη μακροπρόθεσμη (long term) στατιστική της απόσβεσης λόγω βροχής, η $p_A(A)$ ακολουθεί τη μορφή της (2.22). Η επιλογή της $K_{2A}(A)$ σύμφωνα με την (E'.5) οδηγεί στον υπολογισμό και της συνάρτησης $K_{1A}(A)$ μέσω της διαφορικής εξίσωσης

$$0.5 \frac{\partial^2}{\partial A^2} [K_{2A}(A)p_A(A)] = \frac{\partial}{\partial A} [K_{1A}(A)p_A(A)] \quad (\text{E'.6})$$

η οποία προκύπτει από την (E'.4) θέτοντας $(\partial/\partial t = 0)$. Αντικαθιστώντας στην (E'.6) την πυκνότητα πιθανότητας $p_A(A)$, προκύπτει η τελική μορφή της συνάρτησης

$$K_{1A}(A) = d_A A [S_r^2 - \ln(A/A_m)] \quad (\text{E'.7})$$

όπου A_m η γνωστή μέση τιμή της κανονικής τ.μ. $\ln A$.

Εφαρμόζοντας το μη γραμμικό μετασχηματισμό

$$x_A(t) = \frac{\ln A(t) - \ln A_m}{S_a} \quad (\text{E'.8})$$

και χρησιμοποιώντας τους κανόνες διαφορίσης κατά Ito [Kar81], προκύπτει η στοχαστική διαφορική εξίσωση τύπου Langevin¹

$$dx_A(t) = -d_A x_A(t)dt + dW_{x_A}(x_A) \quad (\text{E'.9})$$

όπου

$$dW_{x_A}(x_A) = x_A(t + \Delta t) - x_A(t) \quad (\text{E'.10})$$

Η τελευταία είναι μια στοχαστική ανέλιξη ανεξάρτητων διαφορών και για τη ροπή n -οστής τάξης ισχύει

$$K_{nx_A}(x_A) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} E[(x_A(t + \Delta t) - x_A(t))^n | x_A(t)] \quad (\text{E'.11})$$

Οι δύο πρώτες ροπές δίδονται από τις σχέσεις

$$\begin{cases} K_{1x_A}(x_A) = -d_A x_A \\ K_{2x_A}(x_A) = 2d_A \end{cases} \quad (\text{E'.12})$$

Με βάση τις (E'.3) και (E'.12), ισχύει

$$\frac{dW_{x_A}(x_A)}{dt} = \sqrt{2d_A} n(t) \quad (\text{E'.13})$$

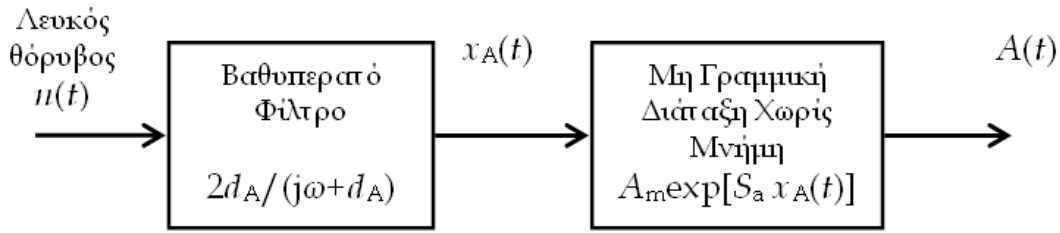
όπου $n(t)$ η στοχαστική διαδικασία του λευκού θορύβου. Με αντικατάσταση της (E'.13) στην (E'.9), η τελευταία γίνεται

$$dx_A(t) = -d_A x_A(t)dt + \sqrt{2d_A} n(t) \quad (\text{E'.14})$$

Συνεπώς, η απόσβεση λόγω βροχής $A(t)$ ως στοχαστική διαδικασία μπορεί να αναπαραχθεί με βάση το λειτουργικό διάγραμμα του Σχήματος Ε'.1, όπου, σε πρώτο στάδιο, χρησιμοποιείται κατάλληλο βαθυπερατό φίλτρο για την υλοποίηση της διαφορικής εξίσωσης (E'.14) και, σε δεύτερο στάδιο, εκτελείται ο μη γραμμικός μετασχηματισμός της (E'.8).

Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι το δυναμικό μοντέλο Maseng-Bakken αφορούσε, στην αρχική του μορφή, αποκλειστικά την τ.μ. της απόσβεσης. Ωστόσο, όπως έδειξαν οι συγγραφείς στο [Bur90], το ίδιο μοντέλο εφαρμόζεται με επιτυχία και για την τ.μ. του ρυθμού βροχόπτωσης. Κατά συνέπεια, η ανάλυση που προηγήθηκε μπορεί να επαναληφθεί αυτούσια και στην περίπτωση του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης με αντικαθιστώντας τα μεγέθη απόσβεσης με εκείνα του ρυθμού βροχόπτωσης.

¹Για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. Παράρτημα Ζ της διατριβής [Pan02b].



Σχήμα Ε'.1: Γεννήτρια χρονοσειρών απόσβεσης λόγω βροχής.

Ε'.2 Υπολογισμός της δυναμικής παραμέτρου της απόσβεσης λόγω βροχής d_A

Η κατάλληλη επιλογή της δυναμικής παραμέτρου της απόσβεσης λόγω βροχής d_A συμβάλλει με κρίσιμο τρόπο στην επιτυχή προσέγγιση της στοχαστικής διαδικασίας $A(t)$. Η υπό μελέτη παράμετρος, που συχνά συμβολίζεται και με τη μεταβλητή β , αποτελεί σήμερα αντικείμενο εκτεταμένης ερευνητικής δραστηριότητας. Αν υπάρχουν διαθέσιμες πραγματικές χρονοσειρές του $A(t)$ από πειραματικές μετρήσεις, η εκτίμηση του d_A μπορεί να πραγματοποιηθεί αντικαθιστώντας την (Ε'.5) στην (Ε'.3)

$$d_A = \frac{E[(A(t + \Delta t) - A(t))^2 | A(t)]}{2S_a^2 A^2(t) \Delta t} \quad (\text{Ε'.15})$$

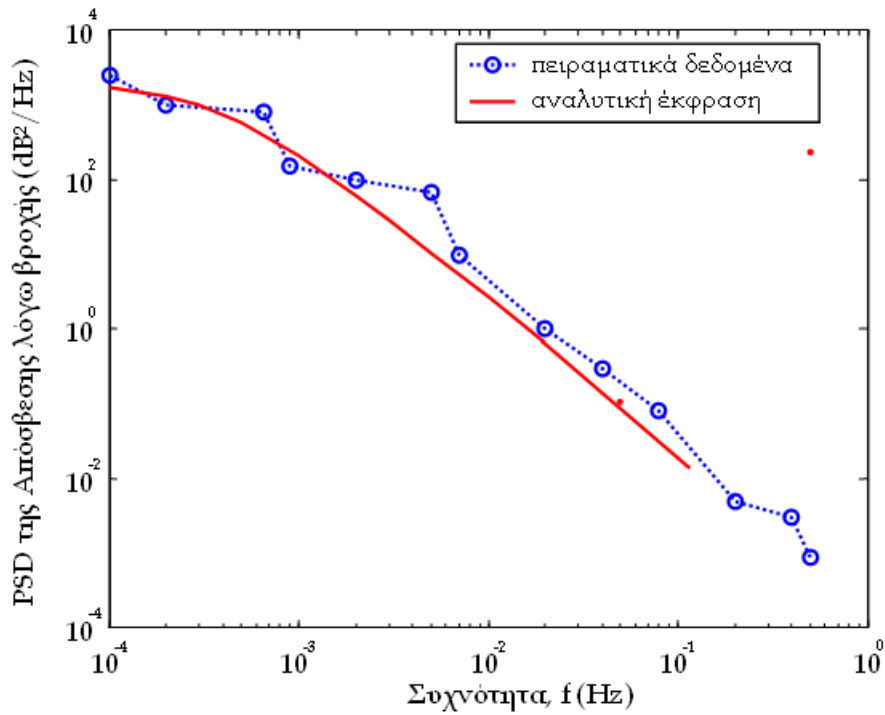
όπου Δt το διάστημα δειγματοληψίας, ενώ ο χρόνος δειγματοληψίας πρέπει να είναι μικρότερος από d_A^{-1} .

Εξάλλου, από την πρωτοποριακή εργασία [Mas81] προτείνεται μια σταθερή τιμή για τη δυναμική παράμετρο με καθολική εφαρμογή σε όλες τις περιοχές της Γης. Η τιμή που επιλέχθηκε είναι

$$d_A = 0.111 \text{min}^{-1} = 0.00185 \text{s}^{-1}$$

Νεότερες έρευνες [Gre04] που βασίσθηκαν σε πειραματικά δεδομένα από το δορυφόρο ITALSAT κατέδειξαν ότι η παράμετρος d_A λαμβάνει τιμές στο εύρος $3.16 \cdot 10^{-4} \leq d_A \leq 3.16 \cdot 10^{-3}$. Επίσης, από το πρόγραμμα [Lem04] της ESA (European Space Agency) και μετά από ενδελεχή σύγκριση με πειραματικά δεδομένα προέκυψε ότι μια ικανοποιητική προσέγγιση για περιοχές της Βορειοδυτικής Ευρώπης είναι η τιμή $d_A = 10^{-4} \text{s}^{-1}$.

Στην παρούσα ενότητα προτείνεται ένα αναλυτικό πλαίσιο [Pan03a] για τον υπολογισμό της δυναμικής παραμέτρου της απόσβεσης λόγω βροχής d_A , η οποία αντιμετωπίζεται ως διαφορετική σε σχέση την αντίστοιχη δυναμική παράμετρο του σημειακού



Σχήμα Ε'.2: Σύγκριση της αναλυτικής έκφρασης της φασματικής πυκνότητας ισχύος της απόσβεσης λόγω βροχής με πειραματικά δεδομένα από το δορυφόρο ITALSAT που προέκυψαν από μετρήσεις στη Βαρκελώνη, ESP.

ρυθμού βροχόπτωσης d_R –βλ. Κεφάλαιο 2–. Στην τελευταία, αποδίδεται η τιμή $d_R = 1.852 \cdot 10^{-3} \text{s}^{-1}$, η οποία, σύμφωνα με την παραπομπή [Bur90] έχει παγκόσμια ισχύ. Λαμβάνοντας υπόψη τη φασματική ανάλυση της Ενότητας 2.5.5, η ακριβής έκφραση για τη φασματική πυκνότητα ισχύος της απόσβεσης λόγω βροχής είναι

$$P_A(\omega) = \frac{A_m^2 \exp(S_a^2)}{d_A \pi} \exp\left(-\pi \frac{\omega}{d_A}\right) \text{Re} \left\{ |S_a^2|^{j\omega/d_A} \left[\Gamma\left(-\frac{j\omega}{d_A}\right) - \Gamma\left(-\frac{j\omega}{d_A}, -S_a^2\right) \right] \right\} + (1/2\pi) A_m^2 \exp(S_a^2) \delta(\omega) \quad (\text{Ε'.16})$$

όπου $\delta(\omega)$ είναι η συνάρτηση δέλτα του Dirac. Το Σχήμα Ε'.2 παρουσιάζει μια σύγκριση μεταξύ της αναλυτικής έκφρασης (Ε'.16) με τη φασματική πυκνότητα ισχύος της απόσβεσης λόγω βροχής που μετρήθηκε από δεδομένα του γεωστατικού δορυφόρου ITALSAT στη Βαρκελώνη, ESP [Cat00]. Η δορυφορική ζεύξη από το δορυφόρο ITALSAT λειτουργεί στη συχνότητα των 39.5GHz και με γωνία ανύψωσης 40° .

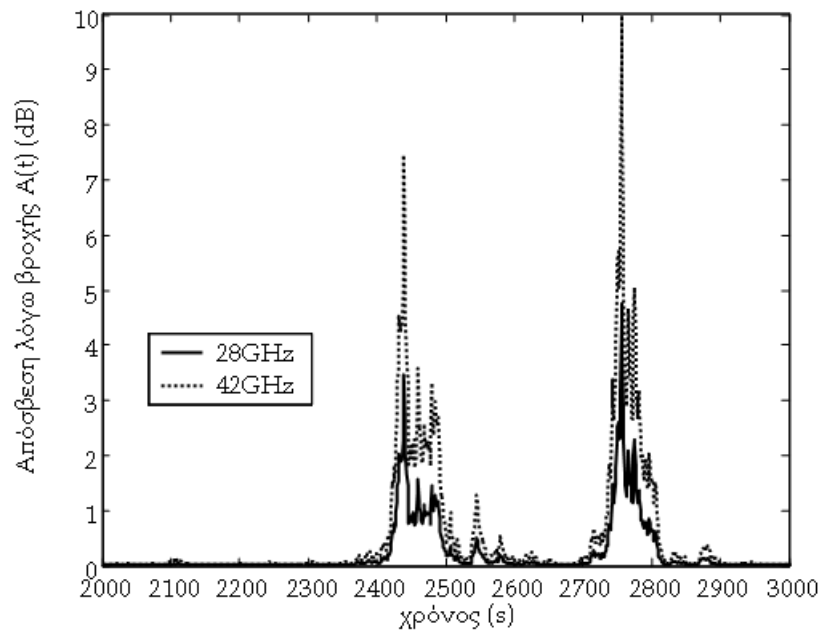
Το επόμενο βήμα κατά τον υπολογισμό της παραμέτρου d_A είναι η επίλυση της διπλής υπερβατικής εξίσωσης

$$P_A(\omega_c, d_A) = P_{AL}(\omega_c, d_R) = P_{AH}(\omega_c, d_R) \quad (\text{Ε'.17})$$

με σκοπό τον προσδιορισμό, αρχικά, της χαρακτηριστικής συχνότητας ω_c και, στη συνέχεια, της παραμέτρου d_A . Οι συναρτήσεις P_{AL} και P_{AH} αντιστοιχούν στους δύο κλάδους της (2.62) για χαμηλές και υψηλές τιμές του ω , ενώ η P_A ισοδυναμεί με την (Ε'.16).

Ε'.3 Παραγωγή Χρονοσειρών Απόσβεσης λόγω Βροχής

Έχοντας διαθέσιμα τα θεμελιώδη εργαλεία από τη δυναμική ανάλυση των προηγούμενων παραγράφων καθίσταται, πλέον, δυνατή η παραγωγή τεχνητών χρονοσειρών απόσβεσης λόγω βροχής με βάση τη διάταξη του Σχήματος Ε'.1 και με σκοπό τη ρεαλιστική αναπαραγωγή του φαινομένου. Η γεννήτρια χρονοσειρών επιτρέπει τη δοκιμή και τη ρύθμιση των προσαρμοστικών βρόχων ελέγχου FMT (βλ. Κεφάλαιο 3) για την εφαρμογή της τεχνικής του ελέγχου της ισχύος καθώς και των τεχνικών AM και AC. Ταυτόχρονα, παρακάμπτεται η αναγκαιότητα διεξαγωγής χρονοβόρων και δαπανηρών πειραματικών μετρήσεων κατά τη διαστασιοποίηση του συστήματος. Παράλληλα, όπως αποδεικνύεται από το Κεφάλαιο 6, συμβάλλει στη μελέτη της επίδοσης συστημάτων



Σχήμα Ε'.3: Παράδειγμα παραγωγής χρονοσειρών απόσβεσης λόγω βροχής για μια επίγεια ζεύξη μήκους 3Km στην Αθήνα, GR.

BWA, όπου η γεννήτρια εφαρμόζεται στα πλαίσια της εξομοίωσης του συστήματος με δυναμική ανάθεση κωδίκων.

Έτσι, μια βήμα - προς - βήμα διαδικασία σύνθεσης λογαριθμοκανονικών χρονοσειρών απόσβεσης συνίσταται στα επόμενα βήματα:

Βήμα 1ο: Καταρχήν, υπολογίζονται οι στατιστικές παράμετροι A_m και S_a της λογαριθμοκανονικής κατανομής, είτε απευθείας από πειραματικά δεδομένα σύμφωνα με τη Ενότητα Δ'.2.1 είτε σύμφωνα με τη διαδικασία των χαρτών βροχής της Ενότητας Δ'.1 του Παραρτήματος Δ'.

Βήμα 2ο: Υπολογίζεται η δυναμική παράμετρος d_A της απόσβεσης, όπως περιγράφει η προηγούμενη ενότητα.

Βήμα 3ο: Εφαρμόζεται η διέλευση μιας διαδικασίας λευκού θορύβου από ένα βαθυπερατό φίλτρο πρώτης τάξης (π.χ. φίλτρο Butterworth) με κανονικοποιημένη συχνότητα αποκοπής $2d_A$. Στην έξοδο του φίλτρου εμφανίζεται η διαδικασία $x_A(t)$.

Βήμα 4ο: Με τη σειρά της, η διαδικασία $x_A(t)$ διέρχεται από τη μη γραμμική διάταξη $A_m \exp[S_a x_A(t)]$ ώστε, τελικά, να προκύψει η διαδικασία $A(t)$.

Στο Σχήμα Ε'.3 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής των προηγούμενων βημάτων. Το παράδειγμα αφορά ζεύξη εγκατεστημένη στην Αθήνα, GR, μήκους 3Km. Επιλέγονται οι συχνότητες 28, 42GHz ώστε να διαφανεί το πώς διαφοροποιείται η έξοδος από τη γεννήτρια όταν μεταβάλλεται κάποιο θεμελιώδες χαρακτηριστικό της ζεύξης.

Βιβλιογραφία

- [Abr65] M. Abramowitz, I. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, New York, 1965.
- [Ada97] F. Adachi, M. Sawahashi, H. Suda, "Tree structured generation of orthogonal spreading codes with different lengths for forward link of DS-CDMA mobile radio," *IEE Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 27-28, January 1997.
- [Aja85] G.O. Ajayi, R.L. Olsen, "Modelling of raindrop size distribution for microwave and millimetre wave applications," *Radio Sci.*, vol. 20, pp. 193-202, March/April 1985.
- [And03] H.R. Anderson, *Fixed Broadband Wireless System Design*, John Wiley & Sons Ltd., ISBN 0-470-84438-8, 2003.
- [Ara04a] P.-D.M. Arapoglou, A.D. Panagopoulos, S.N. Livieratos, P.G. Cottis, "Error performance of adaptive modulation as a fade countermeasure for satellite systems operating at Ka and V bands," in *10th Ka Broadband Commun. Conf.*, Vicenza, Italy, September 2004.
- [Ara04b] P.-D.M. Arapoglou, E. Kartsakli, G.E. Chatzarakis, P.G. Cottis, "Cell-site diversity performance of LMDS systems operating in heavy rain climatic regions," *Int. J. Infrared Millim. Waves*, vol. 25, no. 9, pp. 1345-1359, September 2004.
- [Ara05a] P.-D.M. Arapoglou, A.D. Panagopoulos, G.E. Chatzarakis, J.D. Kanellopoulos, and P.G. Cottis, "Downstream Intercell Radio Interference in Millimeter Wave Broadband Wireless Access Systems," in *IEEE AP-S International Symposium & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Washington, DC, July 3-8, 2005.

- [Ara05b] P.-D.M. Arapoglou, A.D. Panagopoulos, J.D. Kanellopoulos, P.G. Cottis, "Intercell radio interference studies in CDMA-based LMDS networks," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 53, no. 8, pp. 2471-2479, August 2005.
- [Ara05c] P.-D.M. Arapoglou, G.E. Chatzarakis, P.G. Cottis, "Applying multicode CDMA for MAI reduction in fixed broadband wireless application networks," in *Mediterranean Microwave Symposium, Athens*, September 6-8, 2005.
- [Ara05d] P.-D.M. Arapoglou, P.G. Cottis, "Evaluating downstream intercell interference in CDMA based broadband wireless access systems," in *XXVIIIth URSI General Assembly*, New Delhi, October 23-29, 2005.
- [Ara06] P.-D.M. Arapoglou, P.I. Papaioannou, A.D. Panagopoulos, P.G. Cottis, "Controlling intercell interference in CDMA-based fixed wireless networks through multirate techniques," submitted for publication in *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, 2006.
- [Ara07] P.-D.M. Arapoglou, A.D. Panagopoulos, P.G. Cottis, "Interference in Millimeter-Wave WMAN Configurations," in *Millimeter Wave Technology in Wireless PAN, LAN and MAN*, Editors S. Xiao, M. Zhou, Y. Zhang, Auerbach Publications, CRC Press, to be published, 2007.
- [Arm03] E. Armanious, D.D. Falconer, H. Yanikomeroğlu, "Adaptive modulation, adaptive coding, and power control for fixed cellular broadband wireless systems: Some new insights," in *IEEE Wireless Commun. Network. Conf. (WCNC03)*, Louisiana, USA, March 2003.
- [Ayy99] D. Ayyagari, A. Ephremides, "Cellular multicode CDMA capacity for integrated (voice and data) services," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 17, no. 5, pp. 928-938, May 1999.
- [Bau05] G. Bauer, R. Bose, R. Jakoby, "Three-dimensional interference investigations for LMDS networks using an urban database," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 53, no. 8, pp. 2464-2470, August 2005.

- [Bos04a] R. Bose, G. Bauer, R. Jacoby, "Two-dimensional line of sight interference analysis of LMDS networks for the downlink and uplink," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, no. 9, pp. 2464-2473, September 2004.
- [Bos04b] R. Bose, "Improving capacity in LMDS networks using Trellis Coded Modulation," *EURASIP J. Wireless Commun. Networking*, Issue 2, pp. 365-373, November 2004.
- [Bur90] A. Burgueño, E. Vilar, M. Puigcerver, "Spectral analysis of 49 years of rainfall rate and relation to fade dynamics," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 38, no. 9, pp. 1359-1366, September 1990.
- [Cas98] L. Castanet, J. Lemorton, M. Bousquet, "Fade mitigation techniques for new SatCom services at Ku-band and above," in *4th Ka band Utilization Conf.*, Venice, Italy, 2-4 November 1998.
- [Cas02] L. Castanet, M. Bousquet, D. Mertens, "Simulation of the performance of a Ka-band VSAT videoconferencing system with uplink power control and data rate reduction to mitigate atmospheric propagation effects," *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 20, no. 4, pp. 231-249, 2002.
- [Cat00] C. Catalan, B.C. Gremont, E. Vilar, C. Wrench, "Dynamical comparison of rainfall rate and rain attenuation; Path averaging of rain attenuation," in *Millenium Conf. Antennas Propagat. AP2000*, Davos, Switzerland, 9-14 April, 2000.
- [Che06] Special Issue on "Next Generation CDMA Technologies," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Guest Editors H.-H. Chen, A.J.H. Vinck, Q. Bi, F. Adachi, vol. 24, no. 1, January 2006.
- [Che07] K.S. Chen, C.-Y. Chu, "A propagation study of the 28 GHz LMDS system performance with M-QAM modulations under rain fading," *Prog. Electromagn. Resear., PIER.*, vol. 68, pp. 35-51, 2007.
- [Ch099] S. Choi, K.G. Shin, "An uplink CDMA system architecture with diverse QoS guarantees for heterogeneous traffic," *IEEE/ACM Trans. Network.*, vol. 7, no. 5, pp. 616-628, October 1999.

- [Chu01] S.T. Chung, A.J. Goldsmith, "Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 9, pp. 1561-1571, September 2001.
- [Chu05] C.-Y. Chu, K.S. Chen, "Effects of rain fading on the efficiency of the Ka-band LMDS system in the Taiwan area," *IEEE Trans. Vehic. Techn.*, vol. 54, no. 1, pp. 9-19, January 2005.
- [COST255] COST Project 255, *Radiowave propagation modeling for SatCom services at Ku band and above*, Final Report, ESA Publication Division, ISBN 92-9092-608-2, 2002.
- [Cra03] R.K. Crane, *Propagation Handbook for Wireless Communication System Design*, CRC Press, 2003
- [Dal96] R.A. Dalke, G.A. Hufford, R.L. Ketcum, "Radio propagation considerations for local multipoint distribution systems," *NTIA Report 96-331*, August 1996.
- [Dis97] A.W. Dissanayake, "Application of open-loop uplink power control in Ka-band satellite links," *Proceed. IEEE*, vol. 85, no. 6, pp. 959-969, 1997.
- [Dwo90] B. Dwork, *Generalized Hypergeometric Functions*, Clarendon Press, Oxford, England, 1990.
- [Ega82] S. Egami, "Individual closed-loop satellite access power control system using overall satellite link quality level," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 30, no. 7, pp. 1806-1808, July 1982.
- [Ekl02] C. Eklund, R.B. Marks, K.L. Stanwood, S. Wang, "IEEE Standard 802.16: A technical overview of the WirelessMAN air interface for broadband wireless access," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 6, pp. 98-107, June 2002.
- [ETSI01] ETSI EN 301 215-3 V1.1.1, *Fixed Radio Systems; Point to Multipoint Antennas; Antennas for point-to-multipoint fixed radio systems in the 11 GHz to 60 GHz band; Part 3: Multipoint Multimedia Wireless System in the 40.5 to 43.5GHz*, Final Draft, European Standard, August 2001.

- [ETSI02] ETSI EN 301 215-2 V1.2.1, *Fixed Radio Systems; Point to Multipoint Antennas; Antennas for point-to-multipoint fixed radio systems in the 11 GHz to 60 GHz band; Part 2: 24 GHz to 30 GHz*, Final Draft, European Standard, January 2002.
- [ETSI03] 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)* Final Draft, European Standard, 2003.
- [Fal03] D.D. Falconer, J.-P. DeCruyenaere, "Coverage enhancement methods for LMDS," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 7, pp. 86-92, July 2003.
- [Far00] S. Farahvash, M. Kavehrad, "Co-channel interference assessment for line-of-sight and nearly line-of-sight millimeter waves cellular LMDS architecture," *Int. J. Wireless Inform. Networks*, vol. 7, no. 4, pp. 197-210, 2000.
- [Far02] S. Farahvash, K. Akhavan, M. Kavehrad, "Packet transmission over a fixed wireless loop using adaptive rate techniques," *Int. J. Wireless Inform. Networks*, vol. 9, no. 3, pp. 165-177, July 2002.
- [Fen60] L.F. Fenton, "The sum of log-normal probability distributions in scatter transmission systems," *IRE Trans. Commun.*, vol. 8, pp. 57-67, March 1960.
- [Fil90] M. Filip, E. Vilar, "Adaptive modulation as a fade countermeasure. An Olympus experiment," *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 8, pp. 31-41, 1990.
- [Ges02] D. Gesbert, L. Haumonte, H. Bolcskei, R. Krishnamoorthy, A.J. Paulraj, "Technologies and performance for non-line-of-sight broadband wireless access systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 4, pp. 86-95, April 2002.
- [Gon99] S.Q. Gong, D. Falconer, "Cochannel interference in cellular fixed broadband access systems with directional antennas," *Personal Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 103-117, June 1999.
- [Gra97] P.A. Gray, "Optimal hub deployment for 28GHz LMDS system," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Conf. 97*, pp. 18-22, August 1997.

- [Gre98] B.C. Grémont, M. Filip, "Modelling the instantaneous frequency scaling of rain attenuation and applications," in *1st Int. Workshop radiowave propagation modelling for SatCom services at Ka band and above*, pp. 269-276, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, October 1998.
- [Gre04] B.C. Grémont, M. Filip, "Spatio-temporal rain attenuation model for application to fade mitigation techniques," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 52, no. 5, pp. 1245-1256, May 2004.
- [Haa00] M. Haardt, A. Klein, R. Koehn, S. Oestreich, M. Purat, V. Sommer, and T. Ulrich, "The TD-CDMA based UTRA TDD mode," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 8, pp. 1375-1385, August 2000.
- [Hal00] H. Halbauer, P. Jaenecke, H. Sari, "An analysis of Code-Division Multiple Access for LMDS networks," in *7th Europ. Conf. Fixed Radio Systems Network.*, pp. 173-180, Dresden, September 2000.
- [Han02] L. Hanzo, T.H. Liew, B.L. Yeap, *Turbo Coding, Turbo Equalisation and Space-Time Coding for Transmission over Fading Channels*, Wiley-IEEE Press, ISBN: 978-0-470-84726-8, July 2002.
- [Hay68] J.F. Hayes, "Adaptive feedback communications," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol. 16, pp. 29-34, February 1968.
- [Hen02] G. Hendratoro, R.J.C. Bultitude, D.D. Falconer, "Use of cell-site diversity in millimeter-wave fixed cellular systems to combat the effects of rain attenuation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 602-614, April 2002..
- [HIP02] ETSI TS 101 999 V1.1.1, *Broadband Radio Access Networks (BRAN); HIPER-ACCESS; PHY protocol specification*, 2002.
- [I95a] C.-L. I, R.D. Gitlin, "Multi-Code CDMA wireless personal communications networks," in *Proceedings of International Conference on Communications, ICC 95*, pp. 1060-1064, Seattle, June 1995.

- [I95b] C.-L. I, R.D. Gitlin, "Performance of multi-code CDMA wireless personal communications networks," in *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 95*, pp. 907-911, Chicago, July 1995.
- [I95c] C.-L. I, K. K. Sabnani, "Variable spreading gain CDMA with adaptive control for integrated traffic in wireless networks," in *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 95*, pp. 794-798, Chicago, July 1995.
- [IEEE04] IEEE Standard 802.16 2004, *Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*, October 2004.
- [IEEE11] <http://www.ieee802.org/11/>.
- [IS-95] TIA/EIA-95B, *Mobile Station-Base Station Compatibility Standard for Dual Mode Wideband Spread Spectrum Cellular Systems*, Baseline Version, July 1997.
- [ITU06] <http://www.itu.int/home/index.html>.
- [ITU452] ITU-R P.452-12, *Prediction procedure for the evaluation of microwave interference between stations on the surface of the Earth at frequencies above about 0.7 GHz*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [ITU453] ITU-R P.453-9, *The radio refractive index: its formula and refractivity data*, Geneva, Switzerland, 2003.
- [ITU530] ITU-R P.530-11, *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [ITU676] ITU-R P.676-6, *Attenuation by atmospheric gases*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [ITU833] ITU-R P.833-5, *Attenuation in vegetation*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [ITU837] ITU-R P.837-4, *Characteristics of precipitation for propagation modeling*, Geneva, Switzerland, 2003.
- [ITU838] ITU-R P.838-3, *Specific attenuation model for rain for use in prediction methods*, Geneva, Switzerland, 2005.

- [ITU840] ITU-R P.840-3, *Attenuation due to clouds and fog*, Geneva, Switzerland, 1999.
- [ITU1410] ITU-R P.1410-3, *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband millimetric radio access systems operating in a frequency range of about 20-50 GHz*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [ITU1623] ITU-R P.1623-3, *Prediction methods of fade dynamics on Earth-Space paths*, Geneva, Switzerland, 2005.
- [Jon89] D. Jones, R. Espeland, E. Violette, "Vegetation loss measurements at 9.6, 28.8, 57.6 and 96.1 GHz through a conifer orchard in Washington state," *NTIA Report 89-251*, October 1989.
- [Jeo02] W. Jeong, M. Kavehrad, "Cochannel interference reduction in dynamic-TDD fixed wireless applications, using time slot allocation algorithms," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 10, pp. 1627-1636, October 2002.
- [Kan90] J.D. Kanellopoulos, S.G. Koukoulas, N.J. Kolliopoulos, C.N. Capsalis, S.G. Ventouras, "Rain attenuation problems affecting the performance of microwave communication systems," *Ann. Telecommun.*, vol. 45, no. 7-8, pp. 437-451, 1990.
- [Kan91] J.D. Kanellopoulos, S.G. Koukoulas, "Outage performance of route diversity systems," *Radio Sci.*, vol. 26, no. 4, pp. 891-899, 1991.
- [Kan02] C.S. Kang, D.K. Sung, "Capacities of spectrally overlaid single-code and multicode CDMA systems," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 51, no. 5, pp. 839-854, September 2002.
- [Kar81] S. Karlin, H.M. Taylor, *A Second Course in Stochastic Processes*, Academic Press, San Diego, 1981.
- [Kha89] M.H. Khan, T. Le-Ngoc, V.K. Bhargava, "Further studies on efficient AFEC schemes for Ka-band satellite systems," *IEEE Trans. Aerospace Electron. Sys.*, vol. 25, no. 1, pp. 9-19, January 1989.

- [Kim01] D.K. Kim, D.K. Sung, "Capacity estimation for a multicode CDMA system with SIR-based power control," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 50, no. 3, pp. 701-710, May 2001.
- [Kof02] I. Koffman, V. Roman, "Broadband wireless access solutions based on OFDM access in IEEE 802.16," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 4, pp. 96-103, April 2002.
- [Kos05] S. Koskie, Z. Gajic, "A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks," *IEEE/ACM Trans. Network.*, vol. 13, no. 5, pp. 1017-1026, October 2005.
- [Kou90] S.G. Koukoulas, J.D. Kanellopoulos, "A model for the prediction of the site diversity performance based on the two-dimensional gamma distribution," *Trans. IEICE*, vol. 73, no. 2, pp. 229-236, February 1990.
- [Lau02] J.O. Laws, D.A. Parsons, "The relation of raindrop-size intensity," *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 24, pp. 452-460, 1943.
- [Law43] V.K.N. Lau, "Performance analysis of variable rate: Symbol-by-symbol adaptive bit interleaved coded modulation for Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 51, no. 3, May 2002.
- [Lee01] S.J. Lee, T.S. Kim, D.K. Sung, "Bit-error probabilities of multicode direct-sequence spread-spectrum multiple-access systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 1, pp. 31-34, January 2001.
- [Lem04] J. Lemorton, L. Castanet, F. Lacoste, M.M.J.L. van de Kamp, C. Riva, E. Matricciani, U.-C. Fiebig, "Development of propagation models for telecommunication satellite systems," *ESA Study*, no. 16865/03/NL/EC, ONERA, Final Report, July 2004.
- [Li00] S.J. Li, K.F. Pan, J.S. Yuan, A.J. Vigil, A.L. Berg, "Adaptive Reed-Solomon coding for wireless ATM communication," in *Proceed. IEEE Southeastcon 2000.*, pp. 27-30, Nashville, TN, USA, 2000.
- [Lin75] 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.

- [Liu96] Z. Liu, M.J. Karol, M. El Zarki, K.Y. Eng, "Channel access and interference issues in multi-code DS-CDMA wireless packet (ATM) networks," *Wirel. Network.*, vol. 2, pp. 173-193, 1996.
- [Liv01] S.N. Livieratos, P.G. Cottis, "Availability and performance of single/multiple site diversity satellite systems under rain fades," *Europ. Trans. Telecommun.*, vol. 12, no. 1, pp. 55-65, Jan-Feb 2001.
- [Lup89] R. Lupas, S. Verdu, "Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple access channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 35, pp. 123-136, January 1989.
- [Mah01] P. Mähönen, T. Saarinen, Z. Shelby, L. Muñoz, "Wireless Internet over LMDS: architecture and experimental implementation," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 39, no. 5, pp. 126-132, 2001.
- [Mah02] P. Mähönen, A. Jamin, T. Saarinen, Z. Shelby, L. Muñoz, T. Sukuvaara, "Two-layer LMDS architecture: DAVIC-based approach and analysis," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2, no. 4, pp. 319-338, 2002.
- [Mal02] A. Malygin, M. Filip, E. Vilar, "Neural network implementation of a fade countermeasure controller for a VSAT link," *Int. J. Satell. Commun.*, vol. 20, no. 2, pp. 79-95, 2002.
- [Mar99] T. Martin, J. You, A. Marshall, "Analysis of a multiple service MAC layer for two-way two-layer LMDS networks," in *Proc. 4th Europ. Conf. Multimedia Applic., Services Techn.*, pp. 169-180, 1999.
- [Mas81] T. Maseng, P.M. Bakken, "A stochastic dynamic model of rain attenuation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 29, no. 5, pp. 660-669, 1981.
- [Mas02] G. Masini, A. Paraboni, M. Fissi, "A novel approach to adaptive-modulation LMDS performance analysis using a physical raincell method," in *8th Ka Band Util. Conf.*, Baveno, Italy, September 2002.
- [Mat82] E. Matricciani, "Effects of filtering on rate of change of rain-induced attenuation," *IEE Elect. Lett.*, vol. 18, no. 11, pp. 477-478, 1982.

- [Mct94] M.J. McTiffin, A.P. Hulbert, T.J. Ketseoglou, W. Heimsch, G. Crisp, "Mobile access to an ATM network using CDMA air interface," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 900-908, 1994.
- [Mil00] L.B. Milstein, "Wideband code division multiple access," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 8, pp. 1344-1354, August 2000.
- [Min00] T. Minn, K.-Y. Siu, "Dynamic assignment of orthogonal variable-spreading-factor codes in W-CDMA," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no. 8, pp. 1429-1440, August 2000.
- [Mor71] K. Morita, I. Higutti, "Statistical studies on electromagnetic wave attenuation due to rain," *Rev. Elec. Commun. Lab.*, vol. 19, no. 7-8, pp. 798-842, 1971.
- [Mor76] K. Morita, I. Higutti, "Prediction methods of rain attenuation distributions of micro and millimeter waves," *Rev. Elec. Commun. Lab.*, vol. 24, no. 7-8, pp. 651-668, 1976.
- [Nor00] A. Nordbotten, "LMDS systems and their application," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, no. 6, pp. 150-154, June 2000.
- [Nov02] C. Novák, D. Tóth, J. Bitó, "Uplink interference analysis of LMDS networks applying CDMA with interference cancellation," in *IEEE 7th Symp. Spread Spectrum Techn. Applic.*, vol. 1, pp. 288-292, 2002.
- [Nov03] C. Novák, A. Tikk, J. Bitó, "Code sectoring methods in CDMA-based broadband point-to-multipoint networks," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 13, no. 8, pp. 320-322, August 2003.
- [Ott95] T. Ottosson, A. Svensson, "Multi-rate schemes in DS/CDMA systems," in *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference, VTC 95*, pp. 1006-1010, Chicago, July 1995.
- [Pan02a] A.D. Panagopoulos, J.D. Kanellopoulos, "Cell-site diversity performance of millimeter-wave fixed cellular systems operating at frequencies above 20GHz," *IEEE Antennas Wirel. Propagat. Lett.*, vol. 1, pp. 183-185, 2002.

- [Pan02b] Α.Δ. Παναγόπουλος, *Στοχαστικά μοντέλα διάδοσης H/M κυμάτων σε συχνότητες άνω των 10 GHz με εφαρμογή στη σχεδίαση δορυφορικών συστημάτων επικοινωνίας*, Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχ/κων & Μηχ/κών Υπολογιστών, Ε.Μ.Π., Μάρτιος 2002.
- [Pan03a] A.D. Panagopoulos, J.D. Kanellopoulos, "On the rain attenuation dynamics: spatial-temporal analysis of rainfall rate and fade duration statistics," *Int. J. Satell. Commun. Network.*, vol. 21, no. 6, pp. 595-611, 2003.
- [Pan03b] A.D. Panagopoulos, V.S. Papanikolaou, J.E. Papoutsis, G. Chatzarakis, J.D. Kanellopoulos, P.G. Cottis, "General coverage prediction algorithm for LMD-S," *IEE Elect. Lett.*, vol. 39, no. 8, pp. 684-686, April 2003.
- [Pan03c] A.D. Panagopoulos, J.D. Kanellopoulos, "Statistics of differential rain attenuation on converging terrestrial propagation paths," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 9, pp. 2514-1517, September 2003.
- [Pan04] A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, P.G. Cottis, "Satellite communications at Ku, Ka, and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 6, no. 3, Third Quarter 2004.
- [Pan05a] A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, G.E. Chatzarakis, J.D. Kanellopoulos, P.G. Cottis, "LMDS diversity systems: A new performance model incorporating stratified rain," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 2, February 2005.
- [Pan05b] A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, J.D. Kanellopoulos, P.G. Cottis, "Long term rain attenuation probability and site diversity gain prediction formulas," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 53, no. 7, pp. 2307-2313, July 2005.
- [Pan06] A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, G.E. Chatzarakis, J.D. Kanellopoulos, P.G. Cottis, "Coexistence of the broadcasting satellite service with fixed service systems in frequency bands above 10 GHz," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 52, no. 1, pp. 100-107, March 2006.

- [Pan07] A.D. Panagopoulos, P.-D.M. Arapoglou, J.D. Kanellopoulos, P.G. Cottis, "Inter-cell radio interference studies in broadband wireless access networks," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 56, no. 1, pp. 3-12, January 2007.
- [Pap92] P.B. Papazian, D. Jones, R. Espeland, "Millimeter-wave propagation at 30.3 GHz through a Pecan Orchard in Texas," *NTIA Report 92-287*, September 1992.
- [Pap97] P.B. Papazian, G.A. Hufford, R.J. Achatz, R. Hoffman, "Study of the local multipoint distribution service radio channel," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 43, no. 2, pp. 175-184, June 1997.
- [Pap02] A. Papoulis, S. Unnikrishna Pilai, *Probability, random variables and stochastic processes*, McGraw-Hill, 4th edition, ISBN 0-07-366011-6, 2002.
- [Par02] A. Paraboni, G. Masini, A. Elia, "The effect of precipitation on microwave LMDS networks - Performance analysis using a physical raincell model," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 20, no. 3, pp. 615-619, April 2002.
- [Pra98] R. Prasad, T. Ojanperä, "An overview of CDMA evolution toward wideband CDMA," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 1, no. 1, Fourth Quarter 1998.
- [Pra06] M. Pratesi, F. Santucci, F. Graziosi, "Generalized moment matching for the linear combination of lognormal RVs: Application to outage analysis in wireless systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 5, pp. 1122-1132, May 2006.
- [Pro01] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw Hill, 4th Edition, ISBN 0-07-118183-0, 2001.
- [Rap99] T.S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles & Practices*, Prentice Hall PTR, 2nd Edition, ISBN: 0-13-375536-3, July 1999.
- [Rin04] R. Rinaldo, R. De Gaudenzi, "Capacity analysis and system optimization for the forward link of multi-beam satellite systems exploiting adaptive coding and modulation," *Int. J. Satell. Commun. Network.*, vol. 22, pp. 401-423, 2004.

- [Rom99] V.I. Roman, "Frequency reuse and system deployment in local multipoint distribution service," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 6, pp. 20-27, December 1999.
- [Sar99] H. Sari, "Broadband radio access to homes and businesses: MMDS and LMDS," *Computer Networks*, vol. 31, pp. 379-393, 1999.
- [Sar01] H. Sari, "A multimode CDMA with reduced intercell interference for broadband wireless networks," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, no. 7, pp. 1316-1323, July 2001.
- [Sch82] S. Schwartz, Y.S. Yeh, "On the distribution function and moments of power sums with log-normal components," *Bell System Tech. J.*, vol. 61, pp. 1441-1462, September 1982.
- [Sch88] F. Schwering, E. Violette, R. Espeland, "Millimeter-wave propagation in vegetation: Experiments and theory," *IEEE Trans. Geosc. Remote Sensing*, vol. 26, pp. 355-367, May 1988.
- [Som03] P. Soma, L.C. Ong, S. Sun, M.Y.W. Chia, "Propagation measurements and modeling of LMDS radio channel in Singapore," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 52, no. 3, pp. 595-606, May 2003.
- [Stu01] G.L. Stüber, *Principles of mobile communication*, Kluwer Academic Publish., 2nd edition, ISBN 0-7923-7998-5, 2001.
- [Swe92a] D.G. Sweeney, C.W. Bostian, "The dynamics of rain-induced fades," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 40, no. 3, pp. 275-278, 1992.
- [Swe92b] D.G. Sweeney, T. Pratt, C.W. Bostian, "Hysteresis effect in instantaneous frequency scaling of attenuation on 20 and 30 GHz satellite links," *IEE Elect. Lett.*, vol. 28, no. 1, pp. 76-78, January 1992.
- [Tan00] J. Tan, L. Pedersen, "Study of the simultaneous coverage and route diversity improvement under rainy periods for LMDS systems at 42GHz," in *ESA Millenium Conf. Antennas Propagat.*, Davos, Switzerland, April 9-14, 2000.

- [Tsa02] M.-K. Tsay, F.-T. Wang, "Cellular architecture on CDMA based LMDS," in *Third Int. Symp. CSNDSP, Staffordshire, UK, July 2002*.
- [Usm02] I.S. Usman, M.J. Willis, R.J. Watson, "Route diversity analysis and modelling for millimetre wave point to multi-point systems," in *1st International Workshop COST 280, PM3032, July 2002*.
- [Van99] M.M.J.L. van de Kamp, J.K. Tervonen, E.T. Salonen, J.P.V.P. Baptista, "Improved models for long-term prediction of tropospheric scintillation on slant paths," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 2, pp. 249-260, 1999.
- [Van03] M.M.J.L. van de Kamp, "Statistical analysis of rain fade slope," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 51, no. 8, pp. 1750-1759, 2003.
- [Vio88] E. Violette, R. Espeland, K.C. Allen, "Millimeter-wave propagation characteristics and channel performance for urban-suburban environments," *NTIA Report 88-239*, December 1988.
- [Vuc91] B. Vucetic, "An adaptive coding scheme for time-varying channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 39, no. 5, pp. 653-663, May 1991.
- [WIM06] <http://www.wimaxforum.org/>.
- [Woo02] T.-K. Woo, "Orthogonal variable spreading codes for wide-band CDMA," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 51, no. 4, pp. 700-709, July 2002.
- [Wu94] T.-H. Wu, E. Geraniotis, "CDMA with multiple chip rates for multi-media communications," in *Proceed. 28th Annual Conf. Inform. Sci. Sys.*, pp. 992-997, March 1994.
- [Xu00] H. Xu, T.S. Rappaport, R.J. Boyle, J.H. Schaffner, "Measurements and models for 38GHz point-to-multipoint radiowave propagation," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 18, no.3, pp. 310-321, March 2000.
- [Zan92] J. Zander, "Distributed cochannel interference control in cellular radio systems," *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, vol. 41, no. 3, pp. 305-311, August 1992.

- [Zva06] S. Zvanovec, P. Pechac, "Rain spatial classification for availability studies of point-to-multipoint systems," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 54, no. 12, pp. 3789-3796, December 2006.