



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

**Δυναμικά Στοχαστικά Μοντέλα Καναλιού για
Δορυφορικά και Ασύρματα Δίκτυα Επικοινωνιών με χρήση
πολυδιάστατων Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γεώργιος Α. Καραγιάννης
Απόφοιτος Σ.Ν.Δ.

Αθήνα, Ιούλιος 2013



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

**Δυναμικά Στοχαστικά Μοντέλα Απόσβεσης σε Δορυφορικές
και Ασύρματες Ζεύξεις με χρήση πολυδιάστατων
Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Γεώργιος Α. Καραγιάννης

Συμβουλευτική Επιτροπή : Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Παναγιώτης Γ. Κωττής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 15/7/2013.

.....
Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μιχαήλ Ε. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αριστείδης Ν. Μαγουλάς
Επικ. Καθηγητής Σ.Ν.Δ.

.....
Σπυρίδων Ν. Λιβιεράτος
Επικ. Καθηγητής ΑΣΠΑΙΤΕ

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....
Γεώργιος Α. Καραγιάννης
Διδάκτωρ Επιστήμων Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Α. Καραγιάννης, 2013
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

*Στη μνήμη του πατέρα μου
Αναστάσιου
και στη μητέρα μου
Χριστοδούλα
που είναι πάντα δίπλα μου...*

Πρόλογος

Η εξέλιξη των σύγχρονων ασύρματων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων θα μπορούσε συνοπτικά να ειπωθεί ότι στοχεύει στην επίτευξη αξιόπιστων επικοινωνιών ικανών να υποστηρίξουν οποιαδήποτε υπηρεσία – εντός των ορίων που θέτει ο ραδιοδιάυλος, οποτεδήποτε, οπουδήποτε και σε οποιονδήποτε χρήστη. Τις τελευταίες δεκαετίες κατέστη δυνατή η χρήση προηγμένων τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος μέσω της προόδου στην κατασκευή μικροηλεκτρονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων υψηλής αξιοπιστίας και ακρίβειας. Ο απαιτητικός ωστόσο ρόλος που καλείται ένα σύγχρονο σύστημα επικοινωνιών να αναλάβει μπορεί να προσεγγιστεί μόνο με παράλληλη ανάπτυξη σε διάφορους τομείς, όπως στην ανάπτυξη και χρήση σύγχρονων και αποδοτικών πρωτοκόλλων, στην αποδοτική χρήση του φάσματος, στην ορθολογιστική κατανομή των πόρων, αλλά και στην εκμετάλλευση της γνώσης του φυσικού επιπέδου.

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Τομέα Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών ΕΜΠ. Αντικείμενο της διατριβής είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων στην μοντελοποίηση του φυσικού στρώματος σε ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα μέσω της χρήσης πολυδιάστατων στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ). Οι ΣΔΕ αποτελούν έναν σύγχρονο κλάδο των μαθηματικών, με πλούσιο θεωρητικό υπόβαθρο αλλά και πλούσιο πεδίο εφαρμογών. Στην παρούσα διατριβή αντικείμενα μελέτης αποτελούν ειδικότερα τα εξής:

α. Η δυναμική στατιστική μελέτη και πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής σε δορυφορικά συστήματα, που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10GHz.

β. Η δυναμική στατιστική μελέτη και η εκτίμηση της απόσβεσης με χρήση μεθόδων κλιμάκωσης συχνότητας (frequency scaling), καθώς και εφαρμογές σε συστήματα ελέγχου ισχύος στην άνω ζεύξη δορυφορικών δικτύων.

γ. Η δυναμική στατιστική μελέτη και η πρόβλεψη του φαινομένου της σκίασης (shadowing) σε ασύρματα δίκτυα.

Από τα ερευνητικά αποτελέσματα στα πλαίσια της διατριβής έχει εκπονηθεί ένα νέο πολυδιάστατο δυναμικό στοχαστικό μοντέλο για την μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής σε πολλαπλές δορυφορικές ζεύξεις. Το μοντέλο λαμβάνει

υπόψη του τη χωρική και χρονική διακύμανση της απόσβεσης λόγω βροχής. Είναι ένα συνεχές στοχαστικό δυναμικό μοντέλο, που μπορεί να θεωρηθεί ως η γενίκευση του γνωστού μοντέλου Maseng-Bakken σε διάσταση n και βασίζεται σε ένα σύστημα στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ). Αποτελεί εκτός από ένα χρήσιμο εργαλείο αναπαραγωγής συσχετισμένων χρονοσειρών απόσβεσης λόγω βροχής σε n ζεύξεις, ένα γενικότερο θεωρητικό πλαίσιο για τον αναλυτικό υπολογισμό διάφορων χρήσιμων στατιστικών χαρακτηριστικών (πιθανότητες μετάβασης, διάρκεια διαλείψεων, φασματική περιγραφή).

Επιπρόσθετα αναπτύχθηκε ένα νέο δυναμικό μοντέλο για την πρόβλεψη της απόσβεσης σε μια υψηλότερη συχνότητα, δεδομένης της απόσβεσης λόγω βροχής σε χαμηλότερη συχνότητα. Το νέο αυτό δυναμικό μοντέλο επιτρέπει τη δυναμική μοντελοποίηση της μεθόδου κλιμάκωσης συχνότητας (frequency scaling), καλύπτοντας ένα κενό στη βιβλιογραφία. Η μοντελοποίηση γίνεται με χρήση ΣΔΕ και άμεση εφαρμογή του μοντέλου αποτελεί ένα σχήμα ελέγχου της ισχύος της άνω ζεύξης (Uplink Power Control) σε ένα δορυφορικό σύστημα.

Τέλος, αναπτύχθηκε ένα νέο δυναμικό μοντέλο για μελέτη και η πρόβλεψη του φαινομένου της σκίασης σε ασύρματα δίκτυα με χρήση ΣΔΕ. Το μοντέλο είναι σε θέση να αναπαραγάγει τη χρονική μεταβολή του φαινομένου της σκίασης σε πολλούς χρήστες λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα στάσιμα στατιστικά χαρακτηριστικά της σκίασης όσο και τη χωρο-χρονική συσχέτιση του φαινομένου. Επιπλέον, στην περίπτωση του n -διάστατου δυναμικού μοντέλου της σκίασης παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος μελέτης της διάρκειας των διαλείψεων με χρήση μεθόδων τμήσης στάθμης διανυσματικών ανελιξίων.

Η εξέλιξη των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων τα τελευταία χρόνια χαρακτηρίζεται από την εκμετάλλευση όλων των διαστάσεων του χώρου σηματοδοσίας, συμπεριλαμβανομένης της χωρικής για την επίτευξη συστημάτων υψηλής χωρητικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι τεχνικές MIMO που είναι πλέον βασικό συστατικό των σύγχρονων προτύπων ασύρματων δικτύων. Στο πλαίσιο αυτό η μοντελοποίηση του φυσικού επιπέδου στο χώρο και στο χρόνο καθίσταται η μόνη αποτελεσματική μέθοδος αποδοτικής του εκμετάλλευσης. Η παρούσα διατριβή καλύπτει αυτή ακριβώς την απαίτηση με χρήση ενός μαθηματικού εργαλείου, των ΣΔΕ, που με στέρεο μαθηματικό υπόβαθρο προσφέρουν το θεωρητικό πλαίσιο τόσο για την αποτελεσματική αναπαραγωγή χρονοσειρών όσο για την

εξαγωγή αναλυτικών αποτελεσμάτων. Η έρευνα στα πλαίσια της διατριβής στην αρχή εστιάστηκε στην απόσβεση λόγω βροχής που αποτελεί τον κύριο παράγοντα διαλείψεων σε συχνότητες άνω των 10 GHz. Έτσι, το μεγαλύτερο μέρος της διατριβής αφορά τις διαλείψεις που οφείλονται στην απόσβεση λόγω βροχής. Ωστόσο στην πορεία διαφάνηκε πως η μοντελοποίηση του φυσικού στρώματος μέσω πολυδιάστατων ΣΔΕ αποτελεί χρήσιμο εργαλείο και για την περιγραφή άλλων αιτίων διαλείψεων, όπως η σκίαση, οι σπινθηρισμοί και η πολυδιαδρομική διάδοση. Με την εκπόνηση του δυναμικού μοντέλου της σκίασης σε ασύρματα δίκτυα η διατριβή εκτιμάται πως ανοίγει το δρόμο προς το στόχο της ενοποιημένης μοντελοποίησης του φυσικού διαύλου με χρήση ΣΔΕ. Προτάσεις και ιδέες για τη συνέχιση της έρευνας περιλαμβάνονται αναλυτικά στο τελευταίο μέρος της διατριβής.

Στο σημείο αυτό, με την ολοκλήρωση των προσπαθειών εκπόνησης της Διδακτορικής Διατριβής οι οποίες ξεκίνησαν τον Ιανουάριο του 2008, νιώθω την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε μια σειρά ανθρώπων που υπήρξαν σημαντικοί αρωγοί αυτών των προσπαθειών όλα αυτά τα χρόνια.

Καταρχήν, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον κ. Ιωάννη Κανελλόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ., που ως επιβλέπων στο μεγαλύτερο στάδιο της Διδακτορικής Διατριβής με εμπιστεύτηκε χωρίς προηγούμενη συνεργασία μας και μου έδωσε τη δυνατότητα να ξεκινήσω αυτή την τόσο ενδιαφέρουσα, όσο και απαιτητική αναζήτηση, συνδράμοντάς με την πολύτιμη επιστημονική του πείρα. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Γ. Κωττή, Καθηγητή ΕΜΠ, ο οποίος επίσης συνέβαλλε στο να ξεκινήσω την εκπόνηση της διατριβής. Η ολοκλήρωση όμως της διατριβής δεν θα ήταν ποτέ δυνατή χωρίς τη συνδρομή και την επίβλεψη του κ. Αθανάσιου Παναγόπουλου, Επίκουρου Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντα της Διατριβής. Ο κ. Παναγόπουλος με τη διαρκή του καθοδήγηση, την ενθάρρυνση και τον ενθουσιασμό που μου ενέπνευσε, αλλά το σημαντικότερο με την πολύτιμη επιστημονική του συμβολή, που αποτελεί προϊόν βαθιάς ερευνητικής εμπειρίας, αποτέλεσε για μένα καθοριστικό παράγοντα στην επιτυχή έκβαση της Διατριβής. Το επιστημονικό του υπόβαθρό σε πεδία συναφή με το αντικείμενο της Διατριβής, αλλά και η συνεχής διαθεσιμότητά του έδωσαν αποτελεσματικές λύσεις σε καίρια σημεία της Διατριβής. Θα ήθελα ωστόσο να τον ευχαριστήσω και για έναν επιπλέον λόγο πέρα από την καθαρά επιστημονική του συμβολή, καθώς αποτέλεσε για μένα και έναν φίλο με τον οποίο μπορούσα να μοιραστώ τις ανησυχίες και τους προβληματισμούς μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σωτήριο

Κανελλόπουλο, Διδάκτορα ΕΜΠ, για την πολύτιμη συνεισφορά του στην αρχική διαμόρφωση του αντικειμένου της Διατριβής, καθώς και τον κ. Χαρίλαο Κουρόγιωργα, υποψήφιο Διδάκτορα, ΕΜΠ, με τον οποίο εργαστήκαμε κατά καιρούς παράλληλα και συνέβαλλε με τη συνεισφορά του στην ολοκλήρωση της Διατριβής.

Τέλος, σε προσωπικό επίπεδο, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη στα αγαπημένα μου πρόσωπα. Στους γονείς μου, Αναστάσιο και Χριστοδούλα, που είχα την τύχη να μεγαλώσω υπό τη σκέπη τους. Δυστυχώς πολύ πρόσφατα, ο πατέρας μου έφυγε από κοντά μας, ωστόσο ήταν τέτοια η αγάπη του και η φροντίδα του, τόσο έντονη η παρουσία του σε κάθε στιγμή της ζωής μου, που θα είναι πάντοτε δίπλα μου... Μαζί με τη μητέρα μου, μου έδωσαν την αμέριστη αγάπη τους, μου χάρισαν ξέγνοιαστες στιγμές χαράς και ευτυχίας και μου πρόσφεραν την κατανόησή τους, τη διαρκή στήριξή τους και τη συνεχή ενθάρρυνσή τους σε όλη την μέχρι σήμερα πορεία μου, προσωπική, επαγγελματική και ακαδημαϊκή. Δίπλα μου και με αμέριστη αγάπη, συμπαράσταση, υπομονή, στήριξη και εμπιστοσύνη η σύζυγός μου Ντόρα, που πλέον έχω ακόμη έναν λόγο να την ευχαριστώ... Και φυσικά στα παιδιά μου, Αναστάσιο και Χριστίνα, που μου δίνουν νόημα και ελπίδα και τους υπόσχομαι να αναπληρώσω το χρόνο που τους στέρησα...

Γεώργιος Α. Καραγιάννης
Αθήνα, Ιούλιος 2013

Περιεχόμενα

Πρόλογος	vi
Περιεχόμενα.....	x
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xv
Εισαγωγή	xvi
Συνεισφορές στη Διεθνή Βιβλιογραφία.....	xx
Κεφάλαιο 1	1
Σύγχρονες Ασύρματες και Δορυφορικές Επικοινωνίες.....	1
1.1. Εισαγωγή	1
1.1.1. Ιστορική αναδρομή	1
1.1.2. Οι Ασύρματες Επικοινωνίες Σήμερα.....	3
1.1.3. Μοντέλα OSI - TCP.....	6
1.1.4. Διαδίκτυο και παγκόσμιος ιστός.....	8
1.2. Δομή ψηφιακού συστήματος επικοινωνιών.....	10
1.2.1. Γενικά.....	10
1.2.2. Διαμόρφωση	12
1.2.3. Κωδικοποίηση.....	17
1.2.4. Πολλαπλή πρόσβαση	19
1.3. Δορυφορικές Επικοινωνίες	21
1.3.1. DVB-S2.....	30
1.3.2. DVB-RCS2	32
1.3.3. Terrabit Satellite.....	34
1.4. Κυβελωτά Δίκτυα.....	35
1.4.1. LTE - LTE advanced	40
1.5. Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLAN).....	40
1.6. Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (WMAN)	42
1.7. Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα (WPAN).....	43
1.8. Το όραμα των ασύρματων επικοινωνιών.....	44
Κεφάλαιο 2	46
Τεχνικές σύγχρονων ασύρματων δικτύων.....	46
2.1. Τεχνικές αύξησης της χωρητικότητας και άμβλυνσης διαλείψεων.....	46
2.2. Διαφορική λήψη.....	48
2.3. Χρήση πολλαπλού φέροντος	51
2.4. OFDM.....	51
2.5. Χρήση πολλαπλών κεραιών.....	52
2.6. Τεχνολογία MIMO.....	53
Κεφάλαιο 3	56
Μοντελοποίηση του Ραδιοδιαύλου.....	56
3.1. Γενικά.....	56
3.2. Χαρακτηρισμός του Κινητού Ραδιοδιαύλου	59
3.3. Επίδραση Ιονόσφαιρας	65
3.4. Τροποσφαιρικά Φαινόμενα.....	67
3.4.1. Απόσβεση λόγω βροχής.....	68
3.4.2. Απορρόφηση από αέρια.....	74
3.4.3. Απόσβεση λόγω νεφών και ομίχλης.....	75
3.4.4. Αποπόλωση λόγω βροχής και πάγου.....	75
3.4.5. Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί.....	75

3.4.6.	Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας	76
3.4.7.	Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας.....	82
Κεφάλαιο 4.	84
Πολυδιάστατο Χωρο-χρονικό Δυναμικό Μοντέλο Απόσβεσης λόγω Βροχής		84
4.1.	Πρόλογος	84
4.2.	Εισαγωγή	84
4.2.1.	Γενικά.....	84
4.2.2.	Δυναμικό μοντέλο απόσβεσης Maseng-Bakken (μονοδιάστατο)	88
4.3.	Πολυδιάστατο Δυναμικό μοντέλο για n ζεύξεις.....	90
4.3.1.	Εξαγωγή του μοντέλου	90
4.3.2.	Το πολυδιάστατο μοντέλο	95
4.4.	Κατανομή Πιθανοτήτων Μετάβασης.	97
4.5.	Αριθμητικές Εφαρμογές του Μοντέλου και Πειραματική Επιβεβαίωση....	98
4.5.1.	Προσομοίωση και αριθμητικά αποτελέσματα.....	98
4.5.2.	Εύρος εφαρμογής του μοντέλου για συστήματα διαφορικής προστασίας δορυφορικών επικοινωνιών και περιορισμοί.....	100
4.5.3.	Χρονική Εξέλιξη της Πιθανότητας Μετάβασης.....	101
4.5.4.	Εφαρμογή του μοντέλου σε συστήματα διαφορικής λήψης θέσης και διαφορικής λήψης δορυφόρου	105
Κεφάλαιο 5.	115
Δυναμικό Μοντέλο Απόσβεσης λόγω Βροχής με Κλιμάκωση στη Συχνότητα και Εφαρμογή στον Έλεγχο Ισχύος της άνω ζεύξης σε Δορυφορικά Συστήματα.		115
5.1.	Πρόλογος	115
5.2.	Εισαγωγή	115
5.3.	Στοχαστικό Μοντέλο Απόσβεσης με Κλιμάκωση στη Συχνότητα.....	118
5.3.1.	Το στοχαστικό δυναμικό μοντέλο	118
5.3.2.	Πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής στην άνω ζεύξη δοθείσας της τιμής απόσβεσης λόγω βροχής στην κάτω ζεύξη	121
5.4.	Διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων	124
5.5.	Αριθμητικές Εφαρμογές του Μοντέλου	127
5.6.	Συμπεράσματα	132
Κεφάλαιο 6.	139
Δυναμικό πολυδιάστατο μοντέλο λογαριθμοκανονικής σκίασης.....		139
6.1.	Πρόλογος	139
6.2.	Εισαγωγή	139
6.3.	Δυναμικό μοντέλο λογαριθμοκανονικής σκίασης.....	142
6.3.1.	Τυχαίο Πεδίο της Σκίασης.....	142
6.3.2.	Δυναμικό Μοντέλο	147
6.3.3.	Πιθανότητες Μετάβασης	151
6.3.4.	Διάρκεια Διαλείψεων και Ρυθμός Τμήσης Στάθμης.....	151
6.4.	Αριθμητικά Αποτελέσματα της Μεθόδου	155
6.4.1.	Εφαρμογή σε Dual-Hop WLAN.....	155
6.4.2.	Mobile WiMAX.....	156
6.5.	Συμπεράσματα	157
Κεφάλαιο 7.	162
Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα		162
7.1.	Συμπεράσματα	162
7.2.	Περαιτέρω Έρευνα.....	163
7.3.	Μοντέλα Άπειρης Διάστασης.....	167
Βιβλιογραφία		178

Παράρτημα Α.....	A-1
Μοντέλο ITU-R P. 618-10 για εξαγωγή της Πιθανότητας Υπέρβασης Απόσβεσης λόγω Βροχής.....	A-1
Παράρτημα Β.....	B-1
Χάρτες Βροχής (Μοντέλο ITU-R P.837-6).....	B-1
Παράρτημα Γ.....	Γ-1
Μακροπρόθεσμη Κλιμάκωση Συχνότητας (Μοντέλο ITU-R P.618-10).....	Γ-1
Παράρτημα Δ.....	Δ-1
Στατική μελέτη της απόσβεσης λόγω βροχής με το μοντέλο συνεκτικών βροχοπυρήνων και της προσέγγισης με λογαριθμοκανονική κατανομή.....	Δ-1
Παράρτημα Ε.....	E-1
Κανονική και Λογαριθμοκανονική κατανομή.....	E-1
Μονοδιάστατη.....	E-1
Διδιάστατη.....	E-Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
Πολυδιάστατη.....	E-3
Κατανομή διαφοράς δύο κανονικών τ.μ. και αντίστοιχης λογαριθμοκανονικής	E-4
Παράρτημα Στ.....	Στ-1
Τμήση στάθμης (Level Crossing) και διάρκεια διαλείψεων.....	Στ-1
Στάσιμες ροές ενδεχομένων.....	Στ-1
Τμήση στάθμης.....	Στ-3
Διάρκεια Διαλείψεων.....	Στ-4
Παράρτημα Ζ.....	Z-1
Βασική Θεωρία Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων (ΣΔΕ).....	Z-1
Γενικά.....	Z-1
Συνήθεις Διαφορικές Εξισώσεις.....	Z-1
Εισαγωγή στις Στοχαστικές Διαφορικές Εξισώσεις.....	Z-5
Λογισμός Ito και ΣΔΕ.....	Z-7
Παράρτημα Η.....	H-1
Υπολογισμός του ρυθμού τμήσης στάθμης και μέσου χρόνου διακοπής.....	H-1
Ρυθμός Μετάπτωσης σε Διακοπή για σύστημα N-πλής διαφορικής λήψης.....	H-1
Ρυθμός Μετάπτωσης σε Διακοπή για ζεύξη N τμημάτων (N-hop).....	H-3
Περίληψη.....	Π-1
Abstract.....	Ab1

Κατάλογος Σχημάτων

Εικ. 1 Μοντέλο OSI.....	7
Εικ. 2 Εξέλιξη χρηστών διαδικτύου παγκοσμίως (πηγή: http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/)	9
Εικ. 3 Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος επικοινωνίας.....	10
Εικ. 4 Δομικό διάγραμμα ενός ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας	12
Εικ. 5 Κατανομή δορυφόρων σύμφωνα με παρεχόμενες υπηρεσίες (πηγή UCS).....	23
Εικ. 6 Κατανομή δορυφόρων ανάλογα με την τροχιά (πηγή USC).....	24
Εικ. 7 Αρχιτεκτονική SCPC.....	27
Εικ. 8 Αρχιτεκτονική TDM/TDMA.....	28
Εικ. 9 Δομικό διάγραμμα συστήματος DVB-S2	31
Εικ. 10 Στατιστικά στοιχεία συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας.....	36
Εικ. 11 Σύστημα MIMO	53
Εικ. 12 Χωρική μεταβολή της περιβάλλουσας από υπέρθεση δύο επίπεδων κυμάτων	78
Εικ. 13 Δομικό διάγραμμα μοντέλου Maseng-Bakken.	89
Εικ. 14 Πολυδιάστατο δυναμικό μοντέλο απόσβεσης λόγω βροχής.....	97
Εικ. 15 Εξέλιξη της pdf για $t = 10$ δλ, $D = 5$ χλμ, $\beta = 0.0001$	102
Εικ. 16 Εξέλιξη της pdf για $t = 50$ δλ, $D = 5$ χλμ, $\beta = 0.0001$	102
Εικ. 17 Εξέλιξη της pdf για $t = 10$ δλ, $D = 15$ χλμ, $\beta = 0.0001$	103
Εικ. 18 Εξέλιξη της pdf για $t = 50$ δλ, $D = 15$ χλμ, $\beta = 0.0001$	103
Εικ. 19 Εξέλιξη της pdf για $t = 10$ δλ, $D = 15$ χλμ, $\beta = 0.0002$	104
Εικ. 20 Εξέλιξη της pdf για $t = 50$ δλ, $D = 15$ χλμ, $\beta = 0.0002$	104
Εικ. 21 Χρονοσειρές προσομοίωσης απόσβεσης λόγω βροχής, Crawford Hill, US.	107
Εικ. 22 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Crawford Hill.....	108
Εικ. 23 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Chibolton	109
Εικ. 24 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Hokkaido	110
Εικ. 23 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Fucino	111
Εικ. 24 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Tampa	112
Εικ. 25 Προσομοιωμένες χρονοσειρές απόσβεσης βροχής στο Tokyo, JP	113
Εικ. 26 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Tokyo.....	114
Εικ. 27 Συσχετισμένες χρονοσειρές απόσβεσης και εκτιμηθείσα τιμή για τη ζεύξη στην Αθήνα.....	133
Εικ. 28 Κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης στην κάτω και άνω ζεύξη με χρήση Συνθετικής Καταιγίδας και παραγόμενη στάσιμη κατανομή για την άνω ζεύξη με εφαρμογή του μοντέλου για τη ζεύξη της Αθήνας.	134
Εικ. 29 Κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης στην κάτω και άνω ζεύξη με χρήση πειραματικών δεδομένων και παραγόμενη στάσιμη κατανομή για την άνω ζεύξη με εφαρμογή του μοντέλου για τη ζεύξη του Spino d' Adda.....	134
Εικ. 30 Μέσο σφάλμα πρόβλεψης της απόσβεσης της άνω ζεύξης στην Αθήνα ως προς διαφορετικούς χρόνους πρόβλεψης για τις μεθόδους της ITU, PB και προτεινόμενου μοντέλου.....	135
Εικ. 31 Μέσο σφάλμα πρόβλεψης της απόσβεσης της άνω ζεύξης στο Spino d' Adda ως προς διαφορετικούς χρόνους πρόβλεψης για τις μεθόδους της ITU, PB και προτεινόμενου μοντέλου.....	135

Εικ. 32 Τυπική απόκλιση σφάλματος πρόβλεψης της απόσβεσης της άνω ζεύξης στην Αθήνα ως προς διαφορετικούς χρόνους πρόβλεψης για τις μεθόδους της ITU, PB και προτεινόμενου μοντέλου καθώς και θεωρητική καμπύλη.....	136
Εικ. 33 Τυπική απόκλιση σφάλματος πρόβλεψης της απόσβεσης της άνω ζεύξης στο Spino d' Adda ως προς διαφορετικούς χρόνους πρόβλεψης για τις μεθόδους της ITU, PB και προτεινόμενου μοντέλου καθώς και θεωρητική καμπύλη.....	136
Εικ. 34 Επιτευχθείσα διαθεσιμότητα ζεύξης στην Αθήνα σε σχέση με την επιθυμητή τιμή με χρήση του προτεινόμενου μοντέλου και του μοντέλου PB.	137
Εικ. 35 Επιτευχθείσα διαθεσιμότητα ζεύξης στο Spino d' Adda σε σχέση με την επιθυμητή τιμή με χρήση του προτεινόμενου μοντέλου και του μοντέλου PB.....	137
Εικ. 36 Επιτευχθείσα διαθεσιμότητα ζεύξης στην Αθήνα ως προς διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις στην πρόβλεψη για στόχο διαθεσιμότητας 99% με εφαρμογή προτεινόμενου μοντέλου, μοντέλου PB και προτεινόμενου μοντέλου χωρίς υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης.	138
Εικ. 37 Επιτευχθείσα διαθεσιμότητα ζεύξης στο Spino d' Adda ως προς διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις στην πρόβλεψη για στόχο διαθεσιμότητας 99% με εφαρμογή προτεινόμενου μοντέλου, μοντέλου PB και προτεινόμενου μοντέλου χωρίς υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης.	138
Εικ. 38 Γραμμοσκιασμένη περιοχή διακοπής λειτουργίας σε σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας με τη μέθοδο SC.....	158
Εικ. 39 Γραμμοσκιασμένη περιοχή διακοπής λειτουργίας σε αναγεννητικό σύστημα αναμετάδοσης δύο βημάτων	158
Εικ. 40 Θεωρητική και αναπαραγόμενη πιθανότητα διακοπής για ζεύξη δύο τμημάτων (dualhop).....	159
Εικ. 41 Θεωρητική και αναπαραγόμενη τιμή μέσης διάρκειας διάλειψης για ζεύξη δύο τμημάτων (dualhop).....	159
Εικ. 42 Εξάρτηση της μέσης διάρκειας διάλειψης για ζεύξη δύο τμημάτων (dualhop) για τρεις τιμές συσχέτισης της σκίασης.....	160
Εικ. 43 Θεωρητική και παραγόμενη πιθανότητα διακοπής σε συνάρτηση της καλυφθείσας απόστασης.....	160
Εικ. 44 Θεωρητική και παραγόμενη τιμή της μέσης διάρκειας διάλειψης σε σχέση με την καλυφθείσα απόσταση.....	161
Εικ. 45 Μέσος ρυθμός μεταπομπής για το σύστημα WiMAX.....	161
Εικ. 46 Απεικόνιση πεδίου βροχόπτωσης για $t=1\text{sec}$	169
Εικ. 47 Απεικόνιση πεδίου βροχόπτωσης για $t=1\text{min}$	169
Εικ. 48 Γεωμετρία κεκλιμένου ραδιοβήματος δορυφορικής ζεύξης.....	1

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Ονομασίες ζωνών συχνότητων	5
Πίνακας 2 Σύγκριση χαρακτηριστικών DVB-RCS/ DVB-RCS2.....	34
Πίνακας 3 Στάσιμες στατιστικές Παράμετροι συστήματος διπλής διαφορικής προστασίας στο Λονδίνο	101
Πίνακας 4 Θεωρούμενα συστήματα διαφορικής προστασίας και στάσιμες στατιστικές παράμετροι.....	106
Πίνακας 5 Υπολογισθείσες τιμές σφάλματος από την εφαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα της ITU-R SG3	112
Πίνακας 6 Στάσιμες και Δυναμικές Στατιστικές Παράμετροι της Δορυφορικής Ζεύξης, Αθήνα	128
Πίνακας 7 Στάσιμες και Δυναμικές Στατιστικές Παράμετροι της Δορυφορικής Ζεύξης, Spino.....	128

Εισαγωγή

Η απαίτηση για την επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης της πληροφορίας στα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα έχει οδηγήσει στη χρήση ολοένα και υψηλότερων συχνοτήτων. Ο πλέον σημαντικός παράγοντας υποβάθμισης της αξιοπιστίας ενός ασύρματου υπαίθριου τηλεπικοινωνιακού συστήματος, που λειτουργεί σε συχνότητες άνω των 10GHz είναι η βροχή. Σε χαμηλότερες συχνότητες η επίδραση της βροχής καθίσταται λιγότερο καθοριστική, καθώς άλλοι παράγοντες διαλείψεων όπως η σκίαση και η πολυδιαδρομική διάδοση υποβαθμίζουν τις ασύρματες ζεύξεις. Η χρήση υψηλών περιθωρίων διάλειψης στη σχεδίαση των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων για την αντιμετώπιση των διαλείψεων δεν είναι οικονομοτεχνικά συμφέρουσα και έρχεται σε αντίθεση με την ολοένα αυξανόμενη απαίτηση για οικονομία φάσματος και για ενεργειακή αποτελεσματικότητα των σύγχρονων ασύρματων και δορυφορικών επικοινωνιών. Για την αποτελεσματική σχεδίαση τέτοιων συστημάτων απαιτούνται σύγχρονες τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων, οι οποίες θα λαμβάνουν υπόψη τους τις παραμέτρους εκείνες, που καθορίζουν την επίδραση του διαύλου στη διαθεσιμότητα της ζεύξης.

Η βροχή αποτελεί ένα πολυσύνθετο δυναμικό φαινόμενο με χωροχρονική συσχέτιση, που μόνο με στατιστικές μεθόδους μπορεί να αναλυθεί και να μπορέσουμε να προβλέψουμε με ακρίβεια την επίδρασή της στις μικροκυματικές ζεύξεις. Για το σκοπό αυτό έχουν εκπονηθεί διάφορα μοντέλα πρόβλεψης της απόσβεσης που προκαλεί η βροχή και στηρίζονται σε πειραματικά δεδομένα και στα στατιστικά χαρακτηριστικά που εμφανίζουν ο ρυθμός βροχόπτωσης και η συνεπαγόμενη απόσβεση. Η στατιστική αυτή μελέτη της απόσβεσης λόγω βροχής μπορεί γενικά να διακριθεί στη στατική (μακροπρόθεσμη) και στη δυναμική εξέλιξη του φαινομένου. Η στατική μελέτη αφορά στα στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτης τάξης, ενώ η δυναμική στα στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης ως προς τη χρονική μεταβολή. Είναι κοινά αποδεκτό ότι για την αποτελεσματική σχεδίαση σύγχρονων τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων λόγω βροχής απαιτείται η μελέτη των δυναμικών χαρακτηριστικών της απόσβεσης, που επιτρέπουν τη μελέτη της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου.

Η σκίαση είναι το φαινόμενο της απόκλισης της λαμβανόμενης ισχύος από την υπολογιζόμενη μέση τιμή με βάση την απόσταση του δέκτη από τον πομπό. Οι

διαλείψεις που οφείλονται στη σκίαση προκαλούνται από την παρουσία εμποδίων που εξασθενούν το λαμβανόμενο σήμα. Η σκίαση αν και αποτελεί ένα καθαρά χωρικό φαινόμενο για δεδομένο περιβάλλον διάδοσης, ωστόσο κίνηση του δέκτη, του πομπού ή/και εμποδίων εισάγουν χρονική μεταβολή, που μετατρέπει το φαινόμενο της σκίασης σε ένα χωρο-χρονικό φαινόμενο. Η χρονική μεταβολή της σκίασης από την κίνηση εμποδίων ακόμα και για ακίνητους χρήστες μπορεί να έχει σοβαρή επίπτωση σε πυκνά περιβάλλοντα διάδοσης όπως σε εσωτερικούς χώρους. Επιπλέον η σκίαση αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τη σχεδίαση των ασύρματων δικτύων νέας γενιάς, καθώς επηρεάζει την περιοχή κάλυψης, τη διαδικασία της μεταπομπής (handover) στα κυβελωτά συστήματα, τις τεχνικές μακρο-διαφορικής λήψης και την ισχύ των παρεμβολών. Κατά συνέπεια η χωρο-χρονική μοντελοποίηση του φαινομένου της σκίασης λαμβάνοντας υπόψη τις στατιστικές παραμέτρους του φαινομένου τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο αποτελεί μια ακριβή και ρεαλιστική αντιμετώπιση των προβλημάτων σχεδίασης των συστημάτων ραδιοεπικοινωνιών.

Οι στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις (ΣΔΕ) επιτρέπουν την εισαγωγή της τυχαιότητας σε δυναμικά συστήματα στα οποία αυτή υπεισέρχεται είτε εγγενώς είτε λόγω μερικής γνώσης των παραμέτρων, που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά τους. Η γνώση φυσικών νόμων που περιγράφουν ένα φαινόμενο μπορεί να ληφθεί υπόψη στο σχηματισμό μιας διαφορικής εξίσωσης με την τυχαιότητα να υπεισέρχεται στις παραμέτρους ή/και στις αρχικές συνθήκες. Ωστόσο όταν η γνώση της φυσικής του προβλήματος είναι περιορισμένη, ακόμη και τότε μια στοχαστική διαφορική εξίσωση μπορεί να αποτελέσει μια φαινομενολογική περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος με την προϋπόθεση βέβαια ότι ανταποκρίνεται στα στατιστικά χαρακτηριστικά του, όπως προκύπτουν από τα πειραματικά δεδομένα. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζονται στοχαστικά δυναμικά μοντέλα για τη μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής και της σκίασης με χρήση πολυδιάστατων ΣΔΕ.

Η Διατριβή αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος παρέχεται μια εισαγωγική περιγραφή των σύγχρονων ασύρματων δικτύων, της επίδρασης του ραδιοδιαύλου και των σύγχρονων τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων. Τα κυρίως αποτελέσματα της έρευνας της διατριβής παρουσιάζονται στο δεύτερο μέρος.

Στο Κεφ. 1 της διατριβής γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών και της εξέλιξής τους. Σκιαγραφούνται τα χαρακτηριστικά συστήματα δικτύων διαφορετικής κλίμακας και δίνεται μια σύντομη περιγραφή χαρακτηριστικών προτύπων, όπως το DVB-S2 στις δορυφορικές

επικοινωνίες και το LTE στις κυβελωτές. Επίσης καταγράφονται οι σύγχρονες τάσεις και η κατεύθυνση της εξέλιξης των ασύρματων συστημάτων. Στο Κεφ. 2 παρουσιάζεται η επίδραση του ραδιοδιαύλου και περιγράφονται συνοπτικά οι κυρίαρχοι παράγοντες διαλείψεων όπως η απόσβεση λόγω βροχής, η σκίαση και η πολυδιαδρομική διάδοση, ενώ στο Κεφ. 3 γίνεται μια εισαγωγή στις χρησιμοποιούμενες τεχνικές των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων.

Το δεύτερο μέρος της Διατριβής αρχίζει με το Κεφ. 4 στο οποίο παρουσιάζεται το πολυδιάστατο δυναμικό μοντέλο απόσβεσης λόγω βροχής σε πολλαπλές ζεύξεις. Αρχικά δίνεται μια σύντομη περιγραφή του μοντέλου Maseng-Bakken και στη συνέχεια κατασκευάζεται το μοντέλο της μελέτης της απόσβεσης σε πολλαπλές η ζεύξεις. Περιγράφεται η μέθοδος διακριτοποίησης του μοντέλου, ενώ παρουσιάζονται τα θεωρητικά αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης της πυκνότητας πιθανότητας της απόσβεσης. Το μοντέλο εφαρμόζεται για την πρόβλεψη της πιθανότητας αποκοπής σε συστήματα διαφορικής προστασίας για δίκτυα δορυφορικών επικοινωνιών. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα της βάσης δεδομένων της ITU για την περίπτωση διαφορικής λήψης 2, 3 και 4 κλάδων, καθώς και για την περίπτωση τροχιακής διαφορικής λήψης. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν πολύ καλή συμφωνία του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά πρώτης τάξης.

Στο Κεφ. 5 παρουσιάζεται ένα νέο δυναμικό μοντέλο της απόσβεσης λόγω βροχής με κλιμάκωση στη συχνότητα, προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι χρονικές διακυμάνσεις της απόσβεσης σε δύο διαφορετικές συχνότητες. Το μοντέλο καλύπτει ένα κενό στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία καθώς δεν υφίσταται δυναμικό μοντέλο απόσβεσης με κλιμάκωση στη συχνότητα. Πρακτικές εφαρμογές του μοντέλου είναι ο έλεγχος της ισχύος της άνω ζεύξης σε δορυφορικά συστήματα με ανοιχτό βρόγχο ελέγχου. Παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις που πηγάζουν από τη μέθοδο και δίνονται αριθμητικά αποτελέσματα στα οποία διαφαίνεται η βελτίωση της απόδοσης του έλεγχου ισχύος.

Στο Κεφ. 6 παρουσιάζεται ένα νέο δυναμικό μοντέλο για τη μοντελοποίηση του φαινομένου της σκίασης ικανό να αναπαραγάγει τόσο τη χρονική μεταβολή του φαινομένου, όσο και τη χωρική του συσχέτιση. Παρουσιάζονται επίσης με βάση το θεωρητικό πλαίσιο του μοντέλου νέα αναλυτικά αποτελέσματα που αφορούν το μέσο χρόνο διαλείψεων (AOD, Average Outage Duration) και το ρυθμό τμήσης στάθμης

(LCR, Level Crossing Rate) με χρήση μεθόδων τμήσης στάθμης διανυσματικών ανελίξεων. Παρέχονται τέλος αριθμητικά αποτελέσματα που περιλαμβάνουν υπολογισμό της μέσης διάρκειας διαλείψεων αλλά και του ρυθμού μεταπομπής (hand-off), βασικές παραμέτρους σχεδίασης σύγχρονων κυψελωτών συστημάτων.

Συνεισφορές στη Διεθνή Βιβλιογραφία

Τα ερευνητικά αποτελέσματα που απορρέουν απευθείας από την παρούσα Διδακτορική Διατριβή έχουν δημοσιευτεί στα κατωτέρω διεθνή έγκριτα επιστημονικά περιοδικά με κριτές και πρακτικά διεθνών έγκριτων επιστημονικών συνεδρίων με κριτές:

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Έγκριτα Επιστημονικά Περιοδικά:

[Π1] G. Karagiannis, A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, "Multi-Dimensional Rain Attenuation Stochastic Dynamic Modeling: Application to Earth-Space Diversity Systems", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, November 2012.

[Π2] G. Karagiannis, A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, "Short-Term Rain Attenuation Frequency Scaling for Satellite Up-Link Power Control Applications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, June 2013.

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Έγκριτα Επιστημονικά Συνέδρια:

[Σ1] G. Karagiannis, M. Filippou, A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, "Outage Performance of Double Stratospheric Platforms Diversity Systems", EUCAP 2012, Prague, Czech, March, 2012.

[Σ2] G. Karagiannis, A. D. Panagopoulos, C. I. Kourogorgas, J. D. Kanellopoulos, "Multi-Dimensional First Order Stochastic Differential Equations for Simulating Correlated Space-Time Rain Attenuation Time Series", MCM7 COST IC0802 Meeting, Portsmouth, UK, April 2012.

[Σ3] C. I. Kourogorgas, G. A. Karagiannis, A. D. Panagopoulos, " Smart Gateway Diversity Outage Performance using Multi-Dimensional Rain Attenuation Synthesizer", CNES-ONERA Propagation Workshop, Toulouse, France.

[Σ4] C. I. Kourogorgas, G. A. Karagiannis, A. D. Panagopoulos, " Space-Time Rain Rate Field Generator for Multi-Antenna Satellite Communication Applications", EuCAP 2013, Gothenburg, Sweden, April 2013.

Συνεισφορά στην ITU-R

R12-WP3M.AR-C-0056!!MSW-E, Greece, Information document about the generation of correlated rain attenuation time series on multiple links - Multi-dimensional rain attenuation time series synthesizer for Earth-Space diversity application, Geneva, June 2013.

Κεφάλαιο 1.

Σύγχρονες Ασύρματες και Δορυφορικές Επικοινωνίες.

1.1. Εισαγωγή

1.1.1. Ιστορική αναδρομή

Οι ασύρματες επικοινωνίες αναμφισβήτητα αποτελούν την τεχνολογία που επέδρασε με τον πιο εντυπωσιακό τρόπο στην καθημερινή ζωή την τελευταία εικοσαετία. Από τα τέλη της δεκαετίας του 80' με την εμφάνιση των πρώτων αναλογικών κυβελωτών συστημάτων, μέχρι σήμερα με τις 'έξυπνες' συσκευές, τους φορητούς υπολογιστές και τους υπολογιστές χειρός, με ικανότητα πρόσβασης στο διαδίκτυο και με μια πληθώρα εφαρμογών πολυμέσων, οι ασύρματες επικοινωνίες επέδρασαν καταλυτικά στον τρόπο που επικοινωνούμε και δουλεύουμε και γενικά στον τρόπο ζωής και σκέψης. Δεν είναι υπερβολή να πει κανείς ότι διανύουμε ήδη την εποχή της 'ασύρματης επανάστασης' [Rappaport, 1991] , με τις ασύρματες επικοινωνίες να αποτελούν σήμερα ένα συνεχώς εξελισσόμενο πεδίο έρευνας με πλήθος νέων εφαρμογών και δυνατοτήτων. Η συνεχής αυτή εξέλιξη οδηγεί προς την επίτευξη αυτού, που θα μπορούσε να περιγραφεί ως το όραμα των ασύρματων επικοινωνιών, δηλαδή την ικανότητα δικτύωσης από οποιονδήποτε, από οπουδήποτε, οποιαδήποτε χρονική στιγμή και για οποιαδήποτε υπηρεσία. Ο δρόμος προς την επίτευξη αυτού του στόχου ωστόσο δεν είναι απλός, αφού θα πρέπει να επιλυθούν ένα πλήθος από τεχνικά ζητήματα, που ποικίλουν ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε ζεύξης.

Οι απαρχές της χρήσης της ασύρματης επικοινωνίας με μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μπορούν να τοποθετηθούν χρονολογικά στη θεωρητική θεμελίωση των νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού το 1864 από τον Σκωτσέζο φυσικομαθηματικό James Clerk Maxwell (1831-1879) και στα πειράματα του Γερμανού φυσικού Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), που το 1888 απέδειξε πειραματικά την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων [Sarkar et al., 2006]. Ωστόσο, τόσο πριν από το έργο των δύο σπουδαίων αυτών επιστημόνων, όσο και μετέπειτα, ένα πλήθος από σημαντικούς ερευνητές συνεισέφερε με το έργο του στην εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών, ώστε αυτή να μην μπορεί να αποδοθεί σε

συγκεκριμένα πρόσωπα ή κράτη [Salazar-Palma et al., 2011]. Μια συστηματική παρουσίαση της ιστορικής αυτής εξέλιξης δίνεται στο [Sarkar et al., 2006].

Σταθμό στην εξέλιξη των ασύρματων ζεύξεων αποτέλεσε η εργασία του ιταλού μηχανικού Guglielmo Marconi (1874-1937), ο οποίος εγκατέστησε το 1901 υπερατλαντική ασύρματη ζεύξη και θεωρείται ως ο πατέρας των ραδιοζεύξεων μεγάλων αποστάσεων [Bondyopadhyay, 1995]. Την ίδια περίοδο ο Καναδός Reginald Aubrey Fessenden (1866-1932) πέτυχε την πρώτη ασύρματη μετάδοση ομιλίας σε απόσταση 25 μιλίων, με συχνότητα 10KHz και θεωρείται ο πατέρας της διαμόρφωσης AM [Sarkar et al., 2006]. Οι χρησιμοποιούμενοι πομποί στις αρχές του 20ου αιώνα ήταν γεννήτριες ηλεκτρικού σπινθήρα διάκενου (spark-gap), χωρίς δυνατότητα διαμόρφωσης και χρησιμοποιούνταν για μετάδοση σημάτων Morse, γνωστή ως ραδιοτηλεγραφία. Η ανακάλυψη της τριόδου λυχνίας το 1907 από τον Αμερικανό εξερευνητή Lee de Forest (1873-1961), εγκαινίασε μια νέα εποχή στα ηλεκτρονικά, που οδήγησε σε μια σειρά από σημαντικές εξελίξεις στις ασύρματες ζεύξεις. Το 1912 ο Αμερικανός ερευνητής Edwin Howard Armstrong (1890-1954) κατασκεύασε ενισχυτή ανατροφοδοτώντας μια τρίοδο λυχνία και ανακάλυψε τη λειτουργία του ως ταλαντωτή με αύξηση της ανάδρασης. Το 1918 ανακάλυψε τον υπερετερόδουνο δέκτη βασισμένος στην αρχή της ετερόδυνης λήψης, όπως είχε διατυπωθεί το 1902 από τον Καναδό Reginald Aubrey Fessenden (1866-1932) και το 1936 τη διαμόρφωση συχνότητας (FM: Frequency Modulation).

Οι μετέπειτα εξελίξεις στην ηλεκτρονική και τις τηλεπικοινωνίες ήταν συνεχείς. Η ανακάλυψη της magnetron, της λυχνίας κλείστρον (klystron) και της λυχνίας οδεύοντος κύματος (TWT: Travelling Wave Tube) επέτρεψαν την εκπομπή ικανής ισχύος σε μικροκυματικές συχνότητες [Anderson, 2003]. Ειδικότερα οι λυχνίες κλείστρον αποτέλεσαν τα θεμέλια των ραδιοζεύξεων αναμετάδοσης (radio-relay), που τέθηκαν σε εφαρμογή πριν τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο [Huurdeeman, 2003]. Ο πόλεμος, ωστόσο πέραν της ώθησης στην εξέλιξη της μικροκυματικής τεχνολογίας (ραντάρ) επέφερε εξελίξεις και στην τεχνολογία της πυραυλοώθησης. Οι δύο αυτές διαφορετικές τεχνολογίες έθεσαν τη βάση για την ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών [Maral et al., 2009]. Ήδη το 1945 ο βρετανός συγγραφέας επιστημονικής φαντασίας Arthur C. Clarke είχε προτείνει την ιδέα της χρήσης δορυφόρων ως επικοινωνιακών αναμεταδοτών. Ωστόσο η εκτόξευση του πρώτου τεχνητού δορυφόρου σε τροχιά πραγματοποιήθηκε αρκετά αργότερα, το 1957, με τον Sputnik I από την πρώην Ε.Σ.Σ.Δ. Νωρίτερα, το 1948 είχε ανακαλυφθεί από τους

W.H. Brattain, J. Bardeen και W. Shockley των Bell Labs το τρανζίστορ, που θα αντικαθιστούσε τις λυχνίες και τους ηλεκτρομηχανικούς διακόπτες και θα έδινε νέα ώθηση στην εξέλιξη των ηλεκτρονικών και της ψηφιακής τεχνολογίας. Η δημιουργία του πρώτου ολοκληρωμένου κυκλώματος επετεύχθη το 1958 από τους Robert Noyce της INTEL και Jack Kilby της Texas Instruments. Το 1960 εκτοξεύτηκε από τη NASA ο παθητικός τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος ECHO I, ενώ η εκτόξευση του TELSTAR I το 1961 επέτρεψε την αναμετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων πέραν του Ατλαντικού. Ακολούθησε ο SYNCOM το 1963, ενώ το 1964 ιδρύθηκε ο πολυεθνικός οργανισμός INTELSAT, που από το 1965 έθεσε σε τροχιά 4 γενιές δορυφόρων εντός μιας δεκαετίας, με χαρακτηριστικό την εκτόξευση το 1972 του INTELSAT V, του πρώτου τηλεπικοινωνιακού μέσου με εφαρμογή πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (TDMA, Time Division Multiple Access). Το 1968 δημιουργήθηκε το ARPANET, ο πρόγονος του INTERNET, το οποίο τέθηκε σε εφαρμογή το 1971. Το πρώτο κυψελωτό δίκτυο κινητής τηλεφωνίας δοκιμάστηκε στα εργαστήρια AT&T Bell Laboratories το 1978, ενώ τέθηκε σε υπηρεσία το 1983.

1.1.2. Οι Ασύρματες Επικοινωνίες Σήμερα

Οι ασύρματες ζεύξεις αποτελούν σήμερα το ταχύτερα αναπτυσσόμενο τμήμα της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών. Με τον όρο πλέον ασύρματες επικοινωνίες περιγράφεται ένα σύνολο τεχνολογιών που αναφέρεται σε εφαρμογές, σε συστήματα και σε περιοχές κάλυψης [Κανάτας et al., 2008]. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν μετάδοση φωνής απευθείας ή μέσω πρωτοκόλλου διαδικτύου, πρόσβαση στο διαδίκτυο και πλοήγηση στον παγκόσμιο ιστό, ανταλλαγή γραπτών μηνυμάτων, ανταλλαγή αρχείων και δεδομένων, τηλε-ειδοποίηση (paging), συνδρομητικές εφαρμογές (διαδικτυακά παιχνίδια κλπ), τηλεδιασκέψεις video, εκπομπή live video streaming, συνδρομητική τηλεόραση, εφαρμογές τηλε-εκπαίδευσης, τηλεματική ιατρική, παραμετρική παρακολούθηση με δίκτυα αισθητήρων, εφαρμογές υλοποίησης της ψηφιακής οικίας και δίκτυα επί του σώματος. Οι διάφορες αυτές εφαρμογές υποστηρίζονται από υπηρεσίες οι οποίες ανάλογα με τα κοινά χαρακτηριστικά τους μπορούν να ταξινομηθούν σε [Molisch, 2011]:

- Υπηρεσίες ευρύ-εκπομπής (broadcasting)
- Υπηρεσίες τηλε-ειδοποίησης (paging)
- Υπηρεσίες κυψελωτής τηλεφωνίας (cellular telephony)
- Υπηρεσίες ασυρμάτου (trunking radio)

- Υπηρεσίες ασύρματης τηλεφωνίας (cordless telephony)
- Υπηρεσίες ασύρματων τοπικών δικτύων (WLAN)
- Υπηρεσίες προσωπικών δικτύων περιοχής (WPAN)
- Υπηρεσίες σταθερής ασύρματης πρόσβασης (FWA, Fixed Wireless Access)
- Υπηρεσίες αυτοκαθοριζόμενων δικτύων (ad hoc networks) και δικτύων αισθητήρων (sensor networks)
- Δορυφορικές υπηρεσίες.

Συστήματα ασύρματων επικοινωνιών αποτελούν τα κυριώτατα συστήματα επικοινωνιών (GSM, IS54, IS95, IS136, UMTS, κλπ), τα ασύρματα τηλεφωνικά συστήματα (DECT, PHS, κλπ), τα συστήματα για εφαρμογές έκτακτης ανάγκης (TETRA), τα συστήματα για εντοπισμό στόλων (Omnitrac), συστήματα ευρυεκπομπής ψηφιακού ήχου (DAB) και video (DVB), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα υπολογιστών LAN (802.11, HIPERPLAN I, HIPERPLAN II), τα δορυφορικά συστήματα επικοινωνιών, τα συστήματα ασύρματης δικτύωσης μικρών αποστάσεων WPAN (Bluetooth, IEEE 802.15), καθώς και δίκτυα σταθερής ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης WMAN (LMDS, MMDS, HiperACCESS, IEEE 802.16).

Σε ότι αφορά την περιοχή κάλυψης τα δίκτυα διακρίνονται σε αυτά εσωτερικών χώρων, εξωτερικών χώρων, που μπορεί να εκτείνονται από μια μικρή περιοχή, σε μια πόλη, σε μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή [Κανάτας et al., 2008].

Περαιτέρω τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να διακριθούν ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες. Αναλογικά ή ψηφιακά χαρακτηρίζονται τα ασύρματα δίκτυα ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μετάδοσης της πληροφορίας, αναλογική ή ψηφιακή αντίστοιχα. Τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα είναι σχεδόν κατ' αποκλειστικότητα ψηφιακά. Μεταγωγή (switching) είναι η διαδικασία φυσικής μετακίνησης των δυαδικών ψηφίων πληροφορίας (bits) από τη θύρα εισόδου στη θύρα εξόδου ενός τηλεπικοινωνιακού κόμβου, ενώ δρομολόγηση (routing) είναι η διαδικασία της προώθησης της πληροφορίας από τον αποστολέα στον παραλήπτη διαμέσω του δικτύου [Κανάτας et al., 2008]. Οι χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες μεταγωγής στα ασύρματα δίκτυα διακρίνονται σε μεταγωγή κυκλώματος και μεταγωγή πακέτων. Επιπλέον καθώς ο ασύρματος διάυλος αποτελεί ένα μέσο κοινής χρήσης τα δίκτυα διακρίνονται ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης και τον τρόπο επίτευξης αμφίδρομης επικοινωνίας ή μη.

Το φάσμα των ραδιοσυχνοτήτων αποτελεί ένα περιορισμένο φυσικό πόρο που καθώς μοιράζεται σε όλα τα δίκτυα ασύρματων και δορυφορικών επικοινωνιών θα πρέπει να κατανέμεται με τέτοιο τρόπο που να εξυπηρετεί αφενός τις παρεχόμενες υπηρεσίες περιορίζοντας ωστόσο τις παρεμβολές. Πρακτικά το ραδιοφάσμα που χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες κυμαίνεται από 3KHz έως 300GHz [Saunders, 2007]. Ο διαχωρισμός του ραδιοφάσματος σε περιοχές (μπάντες) συχνοτήτων φαίνεται στον Πίνακα 1. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1 υφίστανται δύο τρόποι ονοματοδοσίας των περιοχών συχνοτήτων: ο ένας προέρχεται από τις εφαρμογές των ραντάρ τη δεκαετία του 40' [Ippolito, 2008] και χρησιμοποιεί γράμματα, ενώ ο άλλος διαχωρίζει το μήκος κύματος ανά πολλαπλάσια του 10.

Πίνακας 1 Ονομασίες ζωνών συχνοτήτων

Περιοχή Συχνοτήτων	Εύρος	Μπάντα	Εύρος (GHz)
VLF (Very Low Frequency)	3-30KHz	L	1-2
LF (Low Frequency)	30-300KHz	S	2-4
MF (Medium Frequency)	0.3-3MHz	C	4-8
HF (High Frequency)	3-30MHz	X	8-12
VHF (Very High Frequency)	30-300MHz	Ku	12-18
UHF (Ultra High Frequency)	0.3-3GHz	K	18-26
SHF (Super High Frequency)	3-30GHz	Ka	26-40
EHF(Extra High Frequency)	30-300GHz	V	40-75
		W	75-111

Η κατανομή των συχνοτήτων γίνεται τόσο σε εγχώριο (domestic) όσο και σε διεθνές επίπεδο (international). Ο κατεξοχήν φορέας εκχώρησης συχνοτήτων σε διεθνές επίπεδο είναι η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU, International Telecommunication Union). Η ITU είναι φορέας των Ηνωμένων Εθνών και εδρεύει στη Γενεύη. Ιδρύθηκε το 1936 από την International Telegraphic Union, ενώ σήμερα αριθμεί 193 κράτη-μέλη και περισσότερους από 700 ιδιωτικούς φορείς και πανεπιστημιακούς οργανισμούς [ITU Web, 2013]. Η ITU εκχωρεί συχνότητες σε παγκόσμια και τοπική βάση έχοντας χωρίσει την υφήλιο σε τρεις ζώνες [ITU, 2012a]. Εκτός όμως από το έργο της στην διαχείριση των ραδιοσυχνοτήτων η ITU δραστηριοποιείται επίσης στον καθορισμό δορυφορικών τροχιών, στην ανάπτυξη διεθνών προτύπων για την εναρμόνιση των δικτύων και των τεχνολογιών και στην

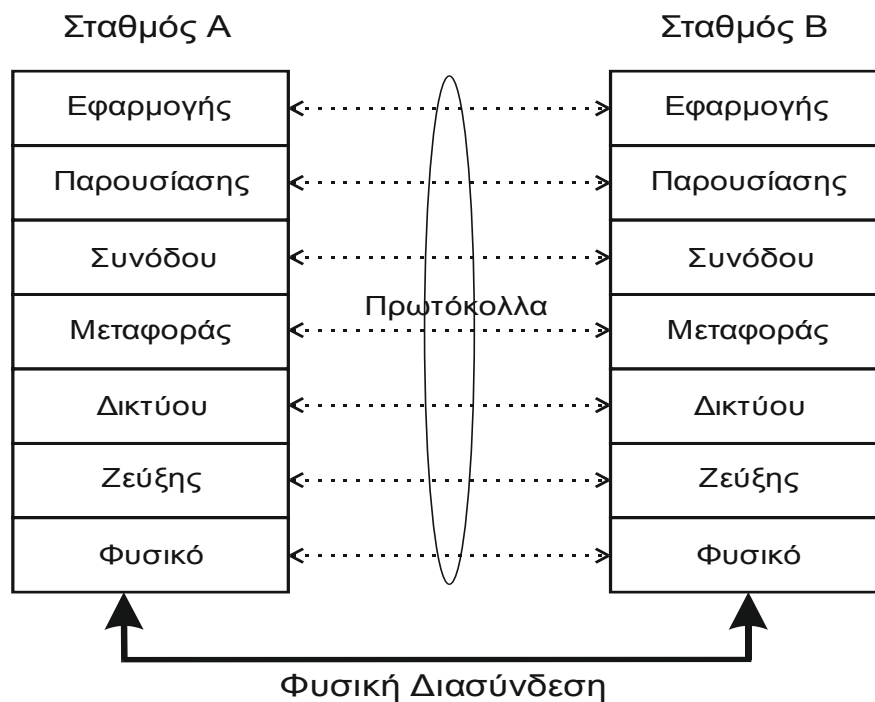
περαιτέρω προώθηση των τεχνολογιών πληροφορίας και επικοινωνιών (ICT, Information and Communication Technologies).

Το έργο της προτυποποίησης των διάφορων τεχνολογιών αποτελεί βασικό παράγοντα στην εξέλιξη των διαφόρων συστημάτων, ακόμη και στην εμπορική τους επιτυχία, αφού έτσι επιτυγχάνεται ευρεία αποδοχή τους. Έτσι εκτός από την ITU υφίσταται ένας σημαντικός αριθμός από εγχώριους και διεθνείς οργανισμούς που δραστηριοποιούνται στο έργο της προτυποποίησης. Στην Ευρώπη δραστηριοποιείται το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI, European Telecommunications Standards Institute) [ETSI, 2012a], που ιδρύθηκε το 1988 με σκοπό την καθιέρωση διεθνώς αναγνωρισμένων προτύπων συστημάτων ICT. Ο οργανισμοί 3GPP και 3GPP2 που ιδρύθηκαν το 1988 και δραστηριοποιούνται στην εκπόνηση προτύπων δικτύων 3ης γενιάς και στην περαιτέρω ανάπτυξή τους, αποτελούν ένα συνασπισμό από οργανισμούς προτυποποίησης διαφόρων χωρών. Το Αμερικάνικο Εθνικό Ινστιτούτο Προτυποποίησης (ANSI, American National Standards Institute) αναπτύσσει πρότυπα που εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα, ενώ σημαντικό έργο προτυποποίησης επιτελείται και στα πλαίσια του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineering). Ο Διεθνής Οργανισμός προτυποποίησης (ISO, International Organization for Standardization) ιδρύθηκε το 1947 και αποτελεί σήμερα έναν παγκόσμιο οργανισμό προτυποποίησης από 162 μέλη, που αναπτύσσει πρότυπα και προδιαγραφές που εκτείνονται σχεδόν σε όλο το εύρος της τεχνολογίας και της επιχειρηματικής δραστηριότητας. Ο οργανισμός ISO έχει αναπτύξει το γνωστό πρότυπο OSI (Open Systems Interconnection).

1.1.3. Μοντέλα OSI - TCP

Σε πολύπλοκα επικοινωνιακά συστήματα όπου πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν κοινούς πόρους του συστήματος, όπως το κανάλι, απαιτείται μια συντονισμένη και προσεκτικά σχεδιασμένη χρήση τους για τη βέλτιστη απόδοση του δικτύου. Επιπλέον διάφορες άλλες λειτουργίες εκτός της κοινής πρόσβασης στο μέσο, όπως αυτές της εγκατάστασης μιας σύνδεσης, ή της διόρθωσης σφαλμάτων κλπ μπορούν να θεωρηθούν ότι ανήκουν σε επίπεδα σχεδιάσεως που παρέχουν υπηρεσίες σε επίπεδα που ιεραρχικά βρίσκονται σε ανώτερη βαθμίδα με την έννοια ότι προϋποθέτουν την εκτέλεση των διεργασιών που προβλέπουν οι υπηρεσίες. Έτσι τα σύγχρονα συστήματα επικοινωνίας αναλύονται, αλλά και σχεδιάζονται ως ένα σύνολο

διαδοχικών επιπέδων. Αυτή η πολυεπίπεδη προσέγγιση στα συστήματα επικοινωνιών προέρχεται από τη σχεδίαση των δικτύων υπολογιστών και χαρακτηριστικό μοντέλο αποτελεί το μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection), που έχει προτυποποιηθεί επίσης από την ITU ως Rec. X.200 [ITU-T Rec. X.200, 1994]. Το πρότυπο φαίνεται στην Εικ. 1. Οι δύο πολυεπίπεδες στήλες αντιπροσωπεύουν δύο επικοινωνιακούς κόμβους, πχ τον πομπό και το δέκτη. Τα επτά διαφορετικά επίπεδα (layers) είναι το φυσικό επίπεδο (Physical), το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (Data Link), το επίπεδο δικτύου (Network), το επίπεδο μεταφοράς (Transport), το επίπεδο συνόδου (Session), το επίπεδο παρουσίασης (Presentation) και το επίπεδο εφαρμογών (Application). Τα επίπεδα επικοινωνούν εικονικά μεταξύ τους με χρήση αντίστοιχων πρωτοκόλλων, ενώ η πραγματική επικοινωνία γίνεται μέσω του φυσικού μέσου. Κάθε επίπεδο του σταθμού Α λαμβάνει ένα πλαίσιο δεδομένων με τη μορφή PDU, SDU.



Εικ. 1 Μοντέλο OSI

Κάθε επίπεδο εκτελεί καθορισμένες λειτουργίες και προσφέρει τις αντίστοιχες υπηρεσίες στο ανώτερο επίπεδο. Το φυσικό επίπεδο καθορίζει τα χαρακτηριστικά της επικοινωνίας διά μέσω του ασύρματου διαύλου, δηλαδή ασχολείται με τη μετάδοση ανεπεξέργαστης της πληροφορίας μέσω του φυσικού καναλιού. Η διαμόρφωση και η κωδικοποίηση του καναλιού αποτελούν λειτουργίες του φυσικού επιπέδου. Το επίπεδο ζεύξης δεδομένων παρέχει δεδομένα απαλλαγμένα από σφάλματα μετάδοσης

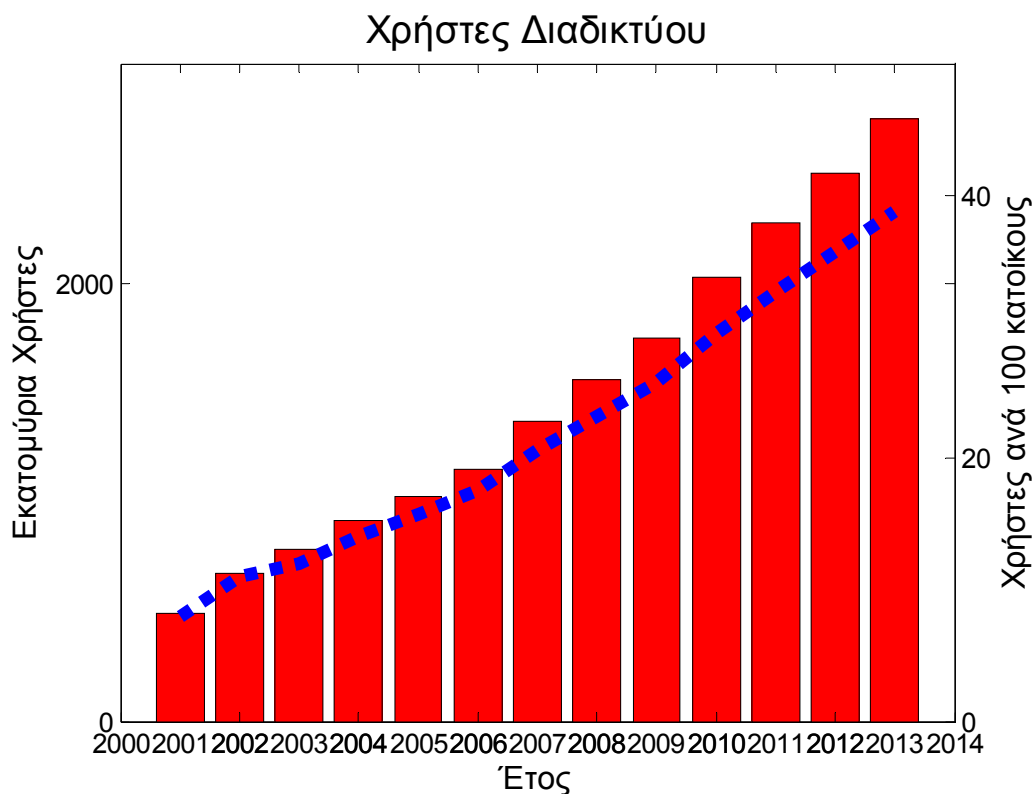
στα ανώτερα επίπεδα. Επίσης περιλαμβάνει το υπο-επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσω MAC που καθορίζει τον τρόπο πρόσβασης του καναλιού στο φυσικό επίπεδο. Το επίπεδο δικτύου εξασφαλίζει τη δρομολόγηση των δεδομένων από τον αποστολέα στον παραλήπτη. Εκτελεί επιπλέον λειτουργίες ελέγχου συμφόρησης του δικτύου ή διαλειτουργικότητας με ετερογενή δίκτυα. Το επίπεδο μεταφοράς εξασφαλίζει τον τρόπο μεταφοράς αμιγώς της πληροφορίας μεταξύ των δύο σταθμών, δεχόμενο πακέτα από το ανώτερο επίπεδο και μετατρέποντάς τα σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση. Το επίπεδο συνόδου επιτρέπει σε διαφορετικούς σταθμούς να εγκαθιδρύουν συνδιαλέξεις μεταξύ τους. Το επίπεδο παρουσίασης ασχολείται με τη μετατροπή των δεδομένων σε συγκεκριμένης μορφής, κρυπτοκάλυψη των δεδομένων κλπ. Τέλος το επίπεδο εφαρμογών αναλαμβάνει τη διαδραστικότητα μεταξύ του χρήστη και του επικοινωνιακού συστήματος.

Ωστόσο η διαρκής εξέλιξη των δικτύων τροφοδοτείται, αλλά και τροφοδοτεί νέες εφαρμογές, υπηρεσίες και νέους τύπους δικτύων μεταξύ συσκευών με διάφορες δυνατότητες και απαιτήσεις. Το μοντέλο αναφοράς OSI μνημονεύεται ως σημείο αναφοράς, ωστόσο στην πράξη συνήθως χρησιμοποιούνται απλούστερες προσεγγίσεις. Παράλληλα η ραγδαία εξάπλωση του διαδικτύου (Internet) προκαλεί σύγκλιση των χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών προς αυτές του διαδικτύου. Η στοίβα πρωτοκόλλων του διαδικτύου γνωστή και ως TCP/IP αποτελεί την πλέον διαδεδομένη στοίβα πρωτοκόλλων. Τα πρωτόκολλα TCP/IP χρησιμοποιούν επίσης προσέγγιση κατά επίπεδα. Στο επίπεδο δικτύου χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο IP βασισμένο σε πακέτα δεδομένων με χρήση της διευθυνσιοδότησης IP. Στο επίπεδο μεταφοράς χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα TCP και UDP. Το TCP είναι υπεύθυνο για την ασφαλή μετάδοση των πακέτων, ενώ το UDP δεν εγγυάται την παράδοση προς όφελος της χρονικής καθυστέρησης. Στο επίπεδο εφαρμογών χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα HTTP, FTP, SMTP, RTP, DNS κλπ.

1.1.4. Διαδίκτυο και παγκόσμιος ιστός

Μια από τις βασικές παραμέτρους στην ανάπτυξη των σύγχρονων ασύρματων επικοινωνιών αποτελεί το διαδίκτυο, καθώς η δυνατότητα ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης στο διαδίκτυο καθίσταται βασική παράμετρος στη σχεδίαση. Ο όρος διαδίκτυο χρησιμοποιείται στην επιστήμη των υπολογιστών για να περιγράψει ένα σύστημα από διασυνδεδεμένα δίκτυα υπολογιστών, ωστόσο στις μέρες μας έχει γίνει σχεδόν ταυτόσημος με το παγκόσμιο διαδίκτυο (Internet), το οποίο είναι ένα

συγκεκριμένο διαδίκτυο. Το διαδίκτυο αυτό είναι μια τεράστια συλλογή από διαφορετικά δίκτυα που χρησιμοποιούν κάποια κοινά πρωτόκολλα και παρέχουν κάποιες κοινές υπηρεσίες [Tanenbaum-Wetherall, 2011]. Πρόγονος του διαδικτύου αποτέλεσε το ARPANET στα τέλη της δεκαετίας του '60 ενώ σημαντική αύξηση των χρηστών παρατηρήθηκε μετά την καθιέρωση του πρωτοκόλλου TCP/IP στις αρχές της δεκαετίας του '80. Οι αρχικοί χρήστες του διαδικτύου ήταν κυρίως ακαδημαϊκοί και κρατικοί οργανισμοί με κύριες εφαρμογές το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, ομάδες συζητήσεων, εφαρμογές τηλεσυνδέσεων και μεταφορά αρχείων. Ωστόσο καθώς η εξέλιξη στα ηλεκτρονικά κατέστησε εφικτή την αγορά οικιακών υπολογιστών [Seel, 2012] και σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της εφαρμογής του παγκόσμιου ιστού (WWW, World Wide Web) [Walrand, 1991], που διευκόλυνε την πλοήγηση, το διαδίκτυο γνώρισε από τα μέσα της δεκαετία του '90 ραγδαία ανάπτυξη. Επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων, μέθοδοι ασύρματης πρόσβασης, νέες συσκευές και εφαρμογές, δυνατότητα υποστήριξης πολυμέσων εξελίσσουν διαρκώς το διαδίκτυο. Από στατιστικά στοιχεία της βάσης δεδομένων της ITU [ITU, 2012b] η συνεχής εξέλιξη των χρηστών του διαδικτύου φαίνεται στο διάγραμμα της Εικ. 2.

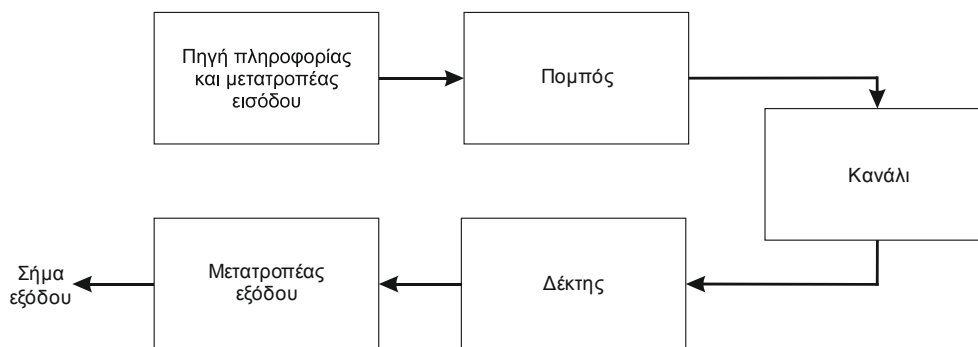


Εικ. 2 Εξέλιξη χρηστών διαδικτύου παγκοσμίως (πηγή: <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>)

1.2. Δομή ψηφιακού συστήματος επικοινωνιών

1.2.1. Γενικά

Ένα σύστημα επικοινωνιών εξυπηρετεί γενικά την αποστολή ενός μηνύματος ή πληροφορίας από μια πηγή σε έναν ή περισσότερους προορισμούς. Ένα απλοποιημένο δομικό διάγραμμα των βασικών λειτουργιών ενός συστήματος επικοινωνίας φαίνεται στην Εικ. 3 [Proakis-Salehi, 2002].



Εικ. 3 Δομικό διάγραμμα ενός συστήματος επικοινωνίας

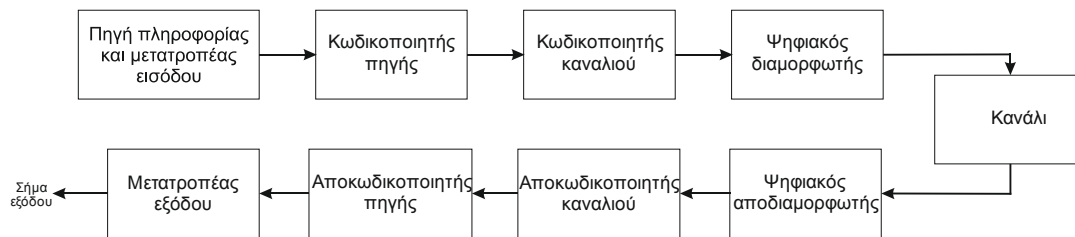
Η πληροφορία της πηγής μπορεί να είναι φωνή, εικόνα, κείμενο κλπ, ενώ ο μετατροπέας μετατρέπει την έξοδο της πηγής σε ηλεκτρικό σήμα κατάλληλο για μετάδοση. Στον προορισμό η αντίστροφη μετατροπή εφαρμόζεται στο ληφθέν ηλεκτρικό σήμα για αναπαραγωγή της μεταδοθείσας πληροφορίας. Ο πομπός μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση μέσα από το φυσικό κανάλι. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με τη κατάλληλη διαμόρφωση ενός ημιτονοειδούς φέροντος σήματος στην επιθυμητή συχνότητα μετάδοσης. Η διαμόρφωση επιτρέπει επίσης τη μετάδοση πολλών μηνυμάτων από διάφορους χρήστες μέσω του ίδιου καναλιού με επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων. Μάλιστα σε πιο πολύπλοκα συστήματα επικοινωνιών, όπου πολλοί χρήστες χρησιμοποιούν από κοινού το ίδιο φυσικό μέσο, απαιτούνται πρόσθετες λειτουργίες σε επίπεδο δικτύου και ελέγχου μεταξύ της πηγής της πληροφορίας και του πομπού, αλλά και στον δέκτη, ώστε να συντονίζεται ορθά η κοινή χρήση [Haykin-Moher, 2010]. Σε κάθε περίπτωση ωστόσο, το κανάλι είναι το φυσικό μέσο που χρησιμεύει για την αποστολή του σήματος από τον πομπό στο δέκτη. Στην περίπτωση των ασύρματων

επικοινωνιών το κανάλι αυτό είναι η ατμόσφαιρα. Το σήμα κατά τη μετάδοσή του διαμέσω του καναλιού αλλοιώνεται κατά τυχαίο τρόπο από μια ποικιλία πιθανών μηχανισμών [Proakis-Salehi, 2002]. Συνήθεις τέτοιοι μηχανισμοί στην περίπτωση ασύρματης μετάδοσης αποτελούν ο προσθετικός θόρυβος, οι παρεμβολές, η διάδοση μέσω πολλαπλών διαδρομών, ατμοσφαιρικά φαινόμενα όπως βροχή, χιόνι, χαλάζι κλπ. Τα φαινόμενα αυτά λαμβάνονται υπόψη στη σχεδίαση και αντιμετωπίζονται με στατιστικό τρόπο. Στο δέκτη λαμβάνει χώρα η αποδιαμόρφωση του φέροντος σήματος για την εξαγωγή του μηνύματος της πληροφορίας. Φιλτράρισμα και ενίσχυση του σήματος λαμβάνουν χώρα τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη για την αναγωγή του σήματος στην επιθυμητή στάθμη και περιοχή συχνοτήτων.

Η γενική αυτή περιγραφή ενός επικοινωνιακού συστήματος αντιστοιχεί περισσότερο σε ένα αναλογικό σύστημα, όπου το σήμα προς μετάδοση είναι μια συνεχής, εξαρτώμενη από το χρόνο κυματομορφή. Ωστόσο η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και οι μέθοδοι ψηφιακής επεξεργασίας των σημάτων που έχουν αναπτυχθεί έχουν επιφέρει την κυριαρχία των ψηφιακών συστημάτων επικοινωνιών, όπου η προς μετάδοση πληροφορία μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα και μεταδίδεται με τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης. Η μεγάλη αυτή εξάπλωση των ψηφιακών επικοινωνιών οφείλεται επίσης σε εγγενή πλεονεκτήματα της ψηφιακής μετάδοσης έναντι της αναλογικής, όπως η αντοχή στο θόρυβο με τη δυνατότητα αναγέννησης του ψηφιακού σήματος σε οποιοδήποτε στάδιο της μετάδοσης, καθώς και η δυνατότητα συμπίεσης των δεδομένων. Οι πρόσθετες λειτουργίες που επιτελούνται σε ένα ψηφιακό σύστημα επικοινωνιών φαίνονται στο δομικό διάγραμμα της Εικ. 4 [Proakis-Salehi, 2002].

Σε ένα ψηφιακό σύστημα τα μηνύματα της πηγής μετατρέπονται σε μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων με τη διαδικασία της κωδικοποίησης πηγής, που αποσκοπεί στην όσο δυνατόν αποδοτικότερη αναπαράσταση της πληροφορίας. Ο κωδικοποιητής καναλιού εισάγει κατά ελεγχόμενο τρόπο κάποιο πλεονασμό στη δυαδική ακολουθία ο οποίος χρησιμοποιείται στο δέκτη για αντιμετώπιση των σφαλμάτων. Ο ψηφιακός διαμορφωτής αντιστοιχεί δυαδικές ακολουθίες πληροφορίας σε κυματομορφές σήματος. Οι αντίστροφες διεργασίες εκτελούνται κατά τη λήψη. Μέτρο της απόδοσης του συστήματος αποτελεί ο ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων (bps, bit per second) σε συνδυασμό με τη μέση πιθανότητα σφάλματος δυαδικού ψηφίου. Μάλιστα οι θεωρητικές εργασίες των Nyquist, Hartley και κυρίως του Shannon, που έθεσαν τα θεμέλια της θεωρίας της πληροφορίας, απέδειξαν ότι δεν

είναι δυνατό να μεταδοθεί αξιόπιστα μια ποσότητα πληροφορίας με ρυθμό αυθαίρετα υψηλό, αλλά η δυνατότητα αυτή περιορίζεται με βάση τη χωρητικότητα του καναλιού. Ωστόσο καθώς καθόσον η ανάγκη για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ολοένα αυξάνεται καθώς επιβάλλεται από νέες εφαρμογές και από την αύξηση του αριθμού των χρηστών τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών σχεδιάζονται με ολοένα πιο προηγμένες τεχνικές ώστε να προσεγγίζουν το δυνατό το θεωρητικό όριο του Shannon.



Εικ. 4 Δομικό διάγραμμα ενός ψηφιακού συστήματος επικοινωνίας

1.2.2. Διαμόρφωση

Η διαμόρφωση επιτρέπει τη μετάδοση ενός σήματος βασικής ζώνης μέσω της αλλαγής των χαρακτηριστικών ενός φέροντος κύματος. Τα σύγχρονα επικοινωνιακά συστήματα χρησιμοποιούν σχεδόν αποκλειστικά μεθόδους ψηφιακής διαμόρφωσης καθώς έτσι επιτυγχάνονται υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης, γίνεται εκμετάλλευση ισχυρών κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ασφάλεια στη μεταδιδόμενη πληροφορία και επιπλέον τα συστήματα γίνονται πιο ανθεκτικά στις δυσμενείς επιπτώσεις του ραδιοδιαύλου [Goldsmith, 2005]. Υφίστανται διάφοροι τρόποι διαμόρφωσης, ωστόσο η εκάστοτε επιλογή εξαρτάται από παραμέτρους όπως ο επιθυμητός ρυθμός μετάδοσης, η φασματική απόδοση, το κόστος, η ανθεκτικότητα στις διαλείψεις και στο θόρυβο, η απόδοση ισχύος κλπ.

Ένα σήμα βασικής ζώνης είναι ένα σήμα που το φασματικό του περιεχόμενο εκτείνεται από τη μηδενική συχνότητα μέχρι μια μέγιστη τιμή. Ένα ψηφιακό σήμα είναι ένα σήμα που φέρει διακριτή πληροφορία με τη μορφή συμβόλων, που αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες καταστάσεις. Το ψηφιακό σήμα μπορεί να προκύπτει στην έξοδο ενός υπολογιστή ή να προέρχεται από κατάλληλη ψηφιοποίηση ενός αναλογικού σήματος. Η απλούστερη και συνηθέστερη μορφή είναι μια ακολουθία

δυναδικών ψηφίων (bit, binary digit), όπου το σήμα εναλλάσσει δύο καταστάσεις, μια που αντιστοιχεί στο λογικό 0 και μια που αντιστοιχεί στο λογικό 1. Εν γένει οποιαδήποτε διακριτή ακολουθία συμβόλων είναι πιθανή. Αν T_s είναι η διάρκεια ενός συμβόλου, ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (baud rate) είναι $R_s = 1/T_s$. Αν θεωρηθεί ότι ένα σύμβολο προκύπτει από το συνδυασμό m διαδοχικών δυναδικών ψηφίων (bits), τότε ο αριθμός των συμβόλων είναι $M = 2^m$, όσοι και οι πιθανοί συνδυασμοί των m δυναδικών ψηφίων. Ο ρυθμός δυναδικών ψηφίων R_b ισούται τότε με m φορές το ρυθμό συμβόλων.

Προκειμένου το ψηφιακό σήμα να μεταδοθεί εφαρμόζεται μια ένα προς ένα αντιστοιχία των M συμβόλων σε M χαρακτηριστικές κυματομορφές, που προκύπτουν από αλλαγή των χαρακτηριστικών ενός φέροντος κύματος. Το σήμα προς μετάδοση είναι εκ φύσεως αναλογικό, ωστόσο η ψηφιακή του υπόσταση έγκειται στο ότι οι μεταβολές αυτές επιλέγονται από ένα πεπερασμένο πλήθος καταστάσεων. Ο ρυθμός μετάδοσης των συμβόλων καθορίζει το φασματικό περιεχόμενο του σήματος, καθώς γρήγορες εναλλαγές των καταστάσεων δημιουργούν φασματικές συνιστώσες σε υψηλές συχνότητες. Καθώς όμως το σήμα μεταδίδεται μέσω του καναλιού, τυχόν περιορισμοί στο διατιθέμενο εύρος ζώνης, πχ λόγω φυσικών περιορισμών του καναλιού, θα προκαλέσουν αλλοίωση των μεταδιδόμενων κυματομορφών, με αποτέλεσμα την ύπαρξη ενός άνω ορίου στο δυνατό ρυθμό μετάδοσης για δεδομένο εύρος ζώνης. Στην ουσία η άπειρη στο χρόνο κρουστική απόκριση του καναλιού λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης προκαλεί φαινόμενα διασυμβολικής παρεμβολής (ISI, Intersymbol Interference). Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται συνήθως ένας μορφοποιητικός παλμός για τη διάρκεια συμβόλου, προκειμένου το φασματικό περιεχόμενο του προς μετάδοση σήματος να προσαρμόζεται στις δυνατότητες του καναλιού. Για ένα κανάλι βασικής ζώνης με απόκριση συχνότητας ως ένα ιδανικό χαμηλοπερατό φίλτρο με εύρος ζώνης B ο Nyquist [Nyquist, 1924] υπολόγισε ότι απουσία θορύβου ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης για μηδενική διασυμβολική παρεμβολή είναι $2B$. Ωστόσο η απόκριση του ιδανικού χαμηλοπερατού φίλτρου είναι θεωρητική, ενώ πιο ρεαλιστική είναι η απόκριση του ανυψωμένου συνημίτονου (RC, Raised Cosine), που δίνεται από τη σχέση

$$H(f) = \begin{cases} 1, & 2T_s |f| \leq (1-\beta) \\ \cos^2 \left[\frac{\pi T_s}{2\beta} \left(|f| - \frac{1-\beta}{2T_s} \right) \right], & (1-\beta) < 2T_s |f| \leq (1+\beta) \\ 0, & (1+\beta) < 2T_s |f| \end{cases} \quad (1.1)$$

όπου β ο συντελεστής αναδίπλωσης (roll-off factor). Πρακτικά η απόκριση του καναλιού στη βασική ζώνη εξομοιώνεται με την απόκριση του φίλτρου RC εφαρμόζοντας τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη φίλτρο RRC (Root Raised Cosine), με απόκριση δηλαδή όσο η τετραγωνική ρίζα του φίλτρου RC. Η διαμόρφωση του φέροντος διπλασιάζει το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος σε σχέση με αυτό της βασικής ζώνης.

Παρουσία θορύβου ο δέκτης προκειμένου να αναγνωρίσει το εκπεμπόμενο σύμβολο εφαρμόζει φίλτρο στο λαμβανόμενο σήμα, ώστε να μεγιστοποιήσει την ισχύ του σήματος σε σχέση με την ισχύ του θορύβου. Αυτό επιτυγχάνεται με το προσαρμοσμένο φίλτρο (matched filter), που η κρουστική του απόκριση αποδεικνύεται ότι πρέπει να ισούται με το λαμβανόμενο σήμα ανεστραμμένο χρονικά. Στα ψηφιακά συστήματα χαρακτηριστική ποσότητα του λόγου ισχύος του σήματος προς θόρυβο αποτελεί ο λόγος της ενέργειας δυαδικού ψηφίου E_b προς την φασματική πυκνότητα ισχύος N_0 του θορύβου, E_b / N_0 . Η ποσότητα αυτή συνδέεται άμεσα με το λόγο ισχύος σήματος προς θόρυβο ως $S / N = R_b E_b / B N_0$, αλλά και με τη χωρητικότητα C του καναλιού, που σύμφωνα με τον Shannon [Shannon, 1948] είναι ο μέγιστος δυνατός ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί στο κανάλι με αυθαίρετα χαμηλά ποσοστά λάθους και που στην περίπτωση λευκού προσθετικού θορύβου (AWGN, Additive White Gaussian Noise) δίνεται από τη σχέση

$$C = B \cdot \log \left(1 + \frac{S}{N} \right). \quad (1.2)$$

Αντικαθιστώντας $S = E_b \cdot R_b$ και $N = N_0 \cdot B$ προκύπτει ότι

$$\frac{E_b}{N_0} \geq \frac{2^q - 1}{q} \quad (1.3)$$

όπου $q = R_b / B$ η φασματική απόδοση, δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης ανά Hz διαθέσιμου φάσματος. Υφίσταται δηλαδή ένα ελάχιστο όριο στην απαιτούμενη τιμή E_b / N_0 στο δέκτη, σε συνάρτηση της φασματικής απόδοσης.

Ο δέκτης καλείται να λάβει μια απόφαση για το ποιο σύμβολο μεταδόθηκε. Αν η απόφαση αυτή είναι οριστική και προκύπτει αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του ληφθέντος συμβόλου, τότε λέγεται *hard decision*, ενώ αν δεν είναι οριστική μέχρι να εξετασθούν τυχόν χρησιμοποιούμενοι κώδικες διόρθωσης σφαλμάτων τότε λέγεται *soft decision*. Στην περίπτωση αυτή η απόφαση αφορά το πόσο πιθανό είναι να μεταδόθηκε ένα σύμβολο και με τη χρήση κατάλληλων κωδικών διόρθωσης σφαλμάτων η απόδοση του συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σε σχέση με την περίπτωση *hard decision* με επιπλέον ωστόσο αύξηση της πολυπλοκότητας του δέκτη. Γενικά η απόφαση στο δέκτη λαμβάνεται με κριτήριο να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου P_{SER} , δηλαδή η πιθανότητα αν έχει μεταδοθεί ένα σύμβολο αυτό να εκληφθεί εσφαλμένα ως κάποιο άλλο. Αυτό επιτυγχάνεται προβάλλοντας το ληφθέν σήμα υπό την επίδραση του θορύβου στον διανυσματικό χώρο των συμβόλων της διαμόρφωσης και επιλέγοντας το πλησιέστερο σύμβολο στην προβολή του. Στην περίπτωση AWGN καναλιού η πιθανότητα λανθασμένου συμβόλου υπολογίζεται με χρήση των στατιστικών ιδιοτήτων του λευκού θορύβου και θεωρώντας ότι το σφάλμα θα προκύπτει όταν το ληφθέν σήμα βρεθεί σε περιοχή εκτός αυτής που θεωρείται πλησιέστερα στο μεταδοθέν σύμβολο [Goldsmith, 2005]. Η πιθανότητα αυτή διαφοροποιείται για κάθε τύπο διαμόρφωσης και ανάλογα με το αν η αποδιαμόρφωση στο δέκτη είναι σύμφωνη (coherent) ή μη σύμφωνη (non-coherent). Σύμφωνη είναι η αποδιαμόρφωση όταν το φέρον μπορεί να αναπαραχθεί στον δέκτη επακριβώς, διαφορετικά είναι ασύμφωνη. Η πιθανότητα εσφαλμένου συμβόλου μπορεί επίσης να προσεγγιστεί συναρτήσει της ελάχιστης απόστασης (κατά την έννοια του διανυσματικού χώρου) μεταξύ 2 συμβόλων του αστερισμού της διαμόρφωσης. Καθόσον η απόσταση αυτή αντιστοιχεί σε ενεργειακή διαφορά η πιθανότητα σφάλματος εκφράζεται εύκολα συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου E_b / N_0 . Η πιθανότητα σφάλματος δυαδικού ψηφίου BER (Bit Error Rate) P_{BER} εξαρτάται τόσο από την πιθανότητα εσφαλμένου ψηφίου όσο και από την αντιστοίχιση των συμβόλων σε δυαδικά ψηφία. Συνήθως χρησιμοποιείται η προσέγγιση $P_{BER} = P_{SER} / \log_2 M$.

Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι διαμόρφωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διάφορα κριτήρια. Σε ότι αφορά τη γραμμικότητα η διαμόρφωση συχνότητας ανήκει στις μη γραμμικές ενώ οι διαμορφώσεις πλάτους/γωνίας ανήκουν στις

γραμμικές. Επίσης η διαμόρφωση συχνότητας ανήκει στις διαμορφώσεις σταθερής περιβάλλουσας.

Η **διαμόρφωση πλάτους ASK (Amplitude Shift Keying)** ή **PAM (Pulse Amplitude Modulation)** χρησιμοποιεί το πλάτος του φέροντος κύματος και περιγράφεται από τη σχέση

$$s_i(t) = A_i g(t) \cos(2\pi f_c t), \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (1.4)$$

όπου $A_i = (2i-1-M)d$, $i=1, \dots, M$ οι στάθμες του σήματος παραμετροποιημένες από την παράμετρο d , σχετιζόμενη με την ενέργεια του σήματος και $g(t)$ ο εφαρμοζόμενος μορφοποιητικός παλμός.

Η **διαμόρφωση φάσης PSK (Phase Shift Keying)** χρησιμοποιεί τη φάση του φέροντος και περιγράφεται από τη σχέση

$$s_i(t) = A g(t) \cos \left[\frac{2\pi(i-1)}{M} \right] \cos 2\pi f_c t - A g(t) \sin \left[\frac{2\pi(i-1)}{M} \right] \sin 2\pi f_c t \quad (1.5)$$

όπου $0 \leq t \leq T_s$, $i=1, \dots, M$ και $g(t)$ ο εφαρμοζόμενος μορφοποιητικός παλμός.

Η **διαμόρφωση QAM (Quadrature Amplitude Modulation)** χρησιμοποιεί τόσο το πλάτος όσο και τη φάση του φέροντος και περιγράφεται από τη σχέση

$$s_i(t) = A_i g(t) \cos \theta_i \cos 2\pi f_c t - A_i g(t) \sin \theta_i \sin 2\pi f_c t \quad (1.6)$$

όπου $0 \leq t \leq T_s$, $i=1, \dots, M$ και $g(t)$ ο εφαρμοζόμενος μορφοποιητικός παλμός.

Η **διαμόρφωση συχνότητας FSK (Frequency Shift Keying)** χρησιμοποιεί τη συχνότητα του φέροντος και περιγράφεται από τη σχέση

$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_c t + 2\pi a_i \Delta f_c t + \varphi_i), \quad 0 \leq t \leq T_s \quad (1.7)$$

όπου $a_i = (2i-1-M)$, $i=1, \dots, M$.

Η **διαμόρφωση MSK (Minimum Shift Keying)** είναι μια ειδικού τύπου διαμόρφωση FSK όπου $2\Delta f_c = 1/2T_s$ που χρησιμοποιεί την ελάχιστη δυνατή διαφορά στη συχνότητα (για να ικανοποιείται η ορθογωνικότητα) προκειμένου να μειωθεί το φασματικό περιεχόμενο του σήματος.

Η **διαμόρφωση CPFSK (Continuous-Phase Frequency Shift Keying)** χρησιμοποιεί συνεχή διαμόρφωση της συχνότητας του φέροντος, προκειμένου να αποφευχθούν οι ασυνέχειες της FSK που αυξάνουν το φασματικό περιεχόμενο του σήματος και περιγράφεται από τη σχέση

$$s_i(t) = A \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi\beta \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau \right] \quad (1.8)$$

όπου $u(t) = \sum_k a_k g(t - kT_s)$ είναι ένα σήμα PAM διαμορφωμένο από την ψηφιολέξη.

1.2.3. Κωδικοποίηση

Η κωδικοποίηση καναλιού εισάγει πλεονάζοντα δυαδικά ψηφία στο προς μετάδοση ψηφιακό σήμα με σκοπό τον εντοπισμό ή/και διόρθωση σφαλμάτων στο δέκτη. Οι μέθοδοι εντοπισμού και διόρθωσης σφαλμάτων λέγονται FEC (Forward Error Correction) και διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στους συμπαγείς κώδικες και στους συνελκτικούς κώδικες. Διαδοχική κωδικοποίηση (concatenated) με χρήση δύο κωδικών παράλληλα ή σε σειρά καθώς επίσης επαναληπτική κωδικοποίηση (iterative) με χρήση κάποιας μορφής ανάδρασης από την έξοδο του αποκωδικοποιητή αποτελούν δύο συχνά χρησιμοποιούμενες μεθόδους για βελτίωση της απόδοσης της χρησιμοποιούμενης κωδικοποίησης. Ο λόγος κωδικοποίησης (code rate) είναι η τιμή $r = k/n$, όπου k ο αριθμός δυαδικών ψηφίων πληροφορίας και n ο συνολικός αριθμός δυαδικών ψηφίων, όταν προστεθούν δηλαδή και τα επιπλέον δυαδικά ψηφία της κωδικοποίησης. Έτσι αν R_c είναι ο ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων στο κανάλι, ο ρυθμός μετάδοσης δυαδικών ψηφίων πληροφορίας R_b είναι $R_b = rR_c$. Κέρδος κωδικοποίησης είναι το κέρδος στην τιμή E_b/N_0 του σήματος που επιτυγχάνεται με χρήση κωδικοποίησης για τον ίδιο ρυθμό σφαλμάτων. Επιπλέον ως ένα μέτρο της διαφορετικότητας δύο κωδικών λέξεων χρησιμοποιείται η απόσταση Hamming d , που ορίζεται ως ο αριθμός των διαφορετικών ψηφίων, ενώ η ελάχιστη απόσταση Hamming d_{\min} είναι ένα μέτρο της ισχύος του κωδικού.

Στους συμπαγείς κώδικες τα δεδομένα κωδικοποιούνται σε μπλοκ σταθερού μεγέθους. Αν k ο αριθμός ψηφίων στο μπλοκ δεδομένων, τότε η κωδικολέξη περιλαμβάνει n δυαδικά ψηφία μετά την προσθήκη των $n-k$ επιπλέον ψηφίων. Συμβολίζοντας με το διάνυσμα γραμμή \mathbf{d} τη λέξη δεδομένων και με το διάνυσμα γραμμή \mathbf{c} την κωδικολέξη, τότε θεωρούμε ότι η τελευταία προκύπτει ως

$$\mathbf{c} = \mathbf{dG} \quad (1.9)$$

όπου \mathbf{G} ο $k \times n$ γεννήτορας πίνακας. Αν η κωδικολέξη γραφεί σε συστηματική μορφή, αυτή δηλαδή που τα ψηφία δεδομένων γράφονται πρώτα, τότε ο

γεννήτορας έχει τη μορφή $\mathbf{G} = [\mathbf{I} | \mathbf{P}]$, όπου \mathbf{I} ο k -διάστατος μοναδιαίος πίνακας και \mathbf{P} πίνακας $k \times (n-k)$ που παράγει τα ψηφία κωδικοποίησης. Η περιγραφή ενός συμπαγούς κώδικα μπορεί να γίνει επίσης μέσω του πίνακα ελέγχου ισοτιμίας \mathbf{H} ο οποίος ορίζεται από την ιδιότητα $\mathbf{cH}^T = \mathbf{0}$ για κάθε κωδικοποιημένη λέξη \mathbf{c} . Ισχύει επίσης $\mathbf{GH}^T = \mathbf{0}$. Αν λαμβάνεται η κωδικολέξη $\mathbf{r} = \mathbf{c} + \mathbf{e}$, όπου \mathbf{e} το πιθανό σφάλμα, τότε σύνδρομο \mathbf{s} ονομάζεται το γινόμενο $\mathbf{s} = \mathbf{rH}^T$, το οποίο αν διαφέρει του $\mathbf{0}$ φανερώνει ύπαρξη σφάλματος στη μετάδοση. Μάλιστα αν ο κώδικας μπορεί να διορθώσει κάποια σφάλματα αυτό μπορεί να γίνει με αντιστοιχία της τιμής του συνδρόμου με τα πιθανά σφάλματα.

Στους γραμμικούς συμπαγείς κωδικούς ανήκουν οι κώδικες Hamming, οι κυκλικοί κώδικες, οι κώδικες BCH και οι κώδικες Reed-Solomon. Οι κώδικες Hamming μπορούν να διορθώσουν ένα λάθος και να ανιχνεύσουν ένα ακόμη. Για τους κώδικες Hamming ισχύει $n = 2^m - 1$, $n - k = m$ για κάποιον ακέραιο m και $d_{\min} = 3$. Οι κυκλικοί κώδικες είναι μια ειδική κατηγορία γραμμικών συμπαγών κωδικών που χαρακτηρίζονται από το ότι κάθε ολίσθηση κωδικής λέξης κατά μία θέση δίνει πάλι κωδική λέξη. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει πιο εύκολη υλοποίηση συγκριτικά με τις πράξεις πινάκων στους απλούς γραμμικούς συμπαγείς κώδικες [Goldsmith, 2005]. Μια σημαντική κατηγορία των κυκλικών γραμμικών συμπαγών κωδικών αποτελούν οι κώδικες BCH (Bose, Ray-Chaudhuri, Hocquenghem). Οι κώδικες BCH μπορούν να διορθώσουν t σφάλματα και ισχύει $n = 2^m - 1$, $n - k = mt$ και $d_{\min} \geq 2t + 1$. Οι κώδικες RS (Reed-Solomon) αποτελούν μια σημαντική κατηγορία μη δυαδικών BCH κωδικών. Έχουν την ικανότητα να διορθώνουν πολλαπλά σφάλματα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν παρατηρούνται ριπές σφαλμάτων.

Στους συνελκτικούς κώδικες τα k δυαδικά ψηφία δεδομένων εισέρχονται στον κωδικοποιητή, ο οποίος βρίσκεται στην κατάσταση s_{i-1} και προκαλούν τη μετάβασή του στην κατάσταση s_i ενώ παράγονται στην έξοδο $n - k$ δυαδικά ψηφία κωδικοποίησης. Ο κωδικοποιητής είναι μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων που εκτελεί στην ουσία συνέλιξη στην εισερχόμενη ροή δεδομένων με την κρουστική του απόκριση. Η αποκωδικοποίηση Viterbi είναι ένας αλγόριθμος μέγιστης πιθανοφάνειας για την αποκωδικοποίηση συνελκτικών κωδικών. Προκειμένου να αποφεύγονται τα σφάλματα σε ριπές που εμφανίζονται στην έξοδο των συνελκτικών

αποκωδικοποιητών όταν ο κώδικας δεν είναι σε θέση να διορθώσει όλα τα σφάλματα χρησιμοποιούνται τεχνικές αναδιάταξης (interleaving) των δυαδικών ψηφίων μετά τον κωδικοποιητή. Συχνά προκειμένου να γίνει εκμετάλλευση των κωδικών RS για διόρθωση ριπών σφαλμάτων χρησιμοποιείται συνδυασμός διαδοχικών κωδικοποιητών σε σειρά με εξωτερική κωδικοποίηση RS και εσωτερική με συνελκτικό κώδικα. Ωστόσο η χρήση δύο ή περισσότερων κωδικών παράλληλα, μέθοδος γνωστή ως κώδικας Turbo προσεγγίζουν περισσότερο το όριο του Shannon αν και με κόστος τη μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην αποκωδικοποίηση. Η μελέτη της επαναληπτικής (iterative) αποκωδικοποίησης που επανήλθε στο προσκήνιο με τους κώδικες Turbo οδήγησε στην εκ νέου θεώρηση των κωδικών LDPC (Low Density Parity Check) που ενώ είχαν ανακαλυφθεί το 1963 δεν είχε καταστεί εφικτή η πρακτική τους εκμετάλλευση. Η επανεξέτασή τους απέδειξε ότι υπό προϋποθέσεις ξεπερνούν σε απόδοση τους κώδικες Turbo. Οι κώδικες LDPC είναι γραμμικοί συμπαγείς κώδικες που χαρακτηρίζονται από έναν αραιό (sparse) πίνακα ελέγχου ισοτιμίας.

1.2.4. Πολλαπλή πρόσβαση

Σε συστήματα επικοινωνιών που εξυπηρετούν πολλούς χρήστες οι πόροι του συστήματος θα πρέπει να κατανεμηθούν μεταξύ των χρηστών. Η κατανομή αυτή των πόρων του συστήματος στους διαφορετικούς χρήστες λέγεται πολλαπλή πρόσβαση. Τα κανάλια σε ένα τέτοιο σύστημα διακρίνονται στο κανάλι της κάτω ζεύξης (downlink) και στο κανάλι της άνω ζεύξης (uplink). Το κανάλι της κάτω ζεύξης είναι αυτό στο οποίο ένας σταθμός εκπέμπει προκειμένου να ληφθεί από K σταθμούς, ενώ το κανάλι της άνω ζεύξης είναι αυτό στο οποίο οι K σταθμοί εκπέμπουν προκειμένου να ληφθούν από έναν σταθμό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα από τα δορυφορικά και κυβελωτά συστήματα είναι η εκπομπή αναμετάδοσης από έναν δορυφόρο ή έναν σταθμό βάσης σε πολλούς χρήστες και αντίστοιχα οι εκπομπές των χρηστών αυτών προς το δορυφόρο ή το σταθμό βάσης. Καθώς η επικοινωνία και προς τις δυο κατευθύνσεις λαμβάνει συνήθως χώρα ταυτόχρονα με χρήση αμφίδρομης επικοινωνίας τα κανάλια της άνω και της κάτω ζεύξης διαχωρίζονται. Ο διαχωρισμός αυτός λέγεται διπλεξία (duplexing) και υφίσταται η διπλεξία στο χρόνο (TDD, Time Division Duplexing) και στη συχνότητα (Frequency Division Duplexing).

Ανάλογα με τον τρόπο κατανομής των πόρων του συστήματος στους χρήστες διακρίνονται οι μέθοδοι:

- FAMA (Fixed Assignment Multiple Access)
- DAMA (Demand Assignment Multiple Access)
- RMA (Random Multiple Access)

Στη μέθοδο FAMA ανατίθεται σε κάθε σταθμό συγκεκριμένη χωρητικότητα ανεξάρτητα από τυχόν διακυμάνσεις στις απαιτήσεις του, που μπορεί να μεταβάλλονται χρονικά. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει την παραχωρηθείσα χωρητικότητα και είναι κατάλληλη σε ζεύξεις που υπάρχει συνεχής μετάδοση δεδομένων με μικρές διακυμάνσεις. Διαφορετικά παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι είναι φασματικά μη αποδοτική, καθώς πχ σε κίνηση πακέτων ενδέχεται να μην γίνεται εκμετάλλευση της διατιθέμενης χωρητικότητας και το ότι δεν μπορεί να εξασφαλίσει την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας σε περίπτωση αυξημένης ζήτησης. Στη μέθοδο DAMA ο σταθμός αιτεί την απαιτούμενη χωρητικότητα σε κάποιον σταθμό ελέγχου, ο οποίος με τη σειρά του με βάση τις συνολικές απαιτήσεις κατανέμει τους πόρους με βάση κάποιον αλγόριθμο για βέλτιστη κατανομή. Η μέθοδος αυτή επιφέρει πολυπλοκότητα στο σύστημα, ωστόσο επιτυγχάνει αποδοτική κατανομή των πόρων. Η μέθοδος RMA χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα έχουν τη μορφή πακέτων και δεν υπάρχει συνεχής απαίτηση αποστολής τους, οπότε οι ενεργοί χρήστες του καναλιού είναι λιγότεροι από τους συνολικούς χρήστες. Στην περίπτωση αυτή οι ενεργοί σταθμοί μπορούν ελεύθερα να χρησιμοποιούν το κανάλι όταν αυτό είναι διαθέσιμο.

Ανεξάρτητα του τρόπου με τον οποίο προγραμματίζεται η κατανομή των πόρων, αυτή αφορά τη διάθεση στους χρήστες συγκεκριμένων περιοχών του διαθέσιμου χώρου σηματοδότησης, ο οποίος οριοθετείται από τις διαστάσεις του χρόνου, της συχνότητας, του κώδικα ή/και του χώρου. Ανάλογα με τη διάσταση στην οποία διαμερίζεται το κανάλι η πολλαπλή πρόσβαση διακρίνεται σε

- TDMA (Time Division Multiple Access)
- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
- CDMA (Code Division Multiple Access)
- SDMA (Space Division Multiple Access)

Στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου TDMA οι χρήστες καταλαμβάνουν το κανάλι σε διαφορετικά μη επικαλυπτόμενα χρονικά πλαίσια. Εγγενής δυσκολία της μεθόδου είναι η ανάγκη συγχρονισμού των χρηστών για την

πολλαπλή πρόσβαση του καναλιού στην άνω ζεύξη. Στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας FDMA οι χρήστες καταλαμβάνουν το εύρος ζώνης του καναλιού σε διαφορετικές μη επικαλυπτόμενες περιοχές συχνότητας. Η μέθοδος αυτή σε συστήματα OFDM χαρακτηρίζεται ως OFDMA και αναθέτει στους χρήστες διαφορετικά υπο-φέροντα (subcarriers). Στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα CDMA τα σήματα διαχωρίζονται με χρήση ορθογώνιων ή μη κωδικών και καταλαμβάνουν ολόκληρη τη διαθέσιμη περιοχή χρόνου και συχνότητας. Η πιο κοινή μορφή CDMA είναι με χρήση τεχνικής εξάπλωσης φάσματος (SS, Spread Spectrum) είτε απευθείας ακολουθίας (DS, Direct Sequence), είτε με μεταπήδηση συχνότητας (FH, Frequency Hopping) [Goldsmith, 2005]. Η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χώρου SDMA διαχωρίζει τα κανάλια που ανατίθενται στους συμμετέχοντες σταθμούς με βάση τη γωνία και χρήση κατευθυντικών κεραιών. Οι χρησιμοποιούμενες διατάξεις κεραιών διαχωρίζουν την περιοχή κάλυψης σε τομείς. Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι πολλαπλής πρόσβασης συνήθως αποτελούν ένα συνδυασμό των ανωτέρω μεθόδων. Επιπλέον καθώς στην κάτω ζεύξη εκπέμπει μόνο ένας σταθμός η πολλαπλή πρόσβαση αναφέρεται και ως πολυπλεξία οπότε χρησιμοποιούνται οι συντημήσεις TDM, FDM, SDM.

1.3. Δορυφορικές Επικοινωνίες

Οι δορυφορικές επικοινωνίες αποτελούν ένα βασικό κλάδο των σύγχρονων ασύρματων δικτύων και βασικό πυλώνα της παγκόσμιας τηλεπικοινωνιακής υποδομής. Οι δορυφόροι παρέχουν τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών παρέχοντας υπηρεσίες σε περιοχές που η εγκατάσταση ενσύρματης υποδομής είναι μη συμφέρουσα ή αδύνατη. Μια από τις πρώτες εφαρμογές των δορυφόρων ήταν η τηλεφωνία με διασύνδεση μεγάλων τηλεπικοινωνιακών κόμβων, καθώς και η ευρυεκπομπή τηλεοπτικών προγραμμάτων [ITU, 2012c]. Επιπλέον η ανάγκη επικοινωνίας με τα πλοία εν πλω οδήγησε ήδη από τα τέλη της δεκαετία του 70' στην ανάπτυξη κινητών δορυφορικών υπηρεσιών [Swan, 2003]. Η εξέλιξη ωστόσο των δορυφορικών συστημάτων επέτρεψε τη χρήση τερματικών επίγειων σταθμών μικρού μεγέθους (VSAT, Very Small Aperture Terminals) και ήδη από τη δεκαετία του 90' δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιήθηκαν στην παροχή προσωπικών κινητών υπηρεσιών [Ippolito, 2008]. Τα δίκτυα VSAT εκμεταλλεύονται την εγγενή ικανότητα των δορυφόρων για ευρυεκπομπή (broadcasting) και επιλεκτική

πολυεκπομπή (multicast) σε πολλούς χρήστες ταυτόχρονα, περιορίζοντας σημαντικά το κόστος χρήσης του δορυφορικού διαύλου. Έτσι παρατηρήθηκε μια διεύρυνση των παρεχόμενων δορυφορικών υπηρεσιών προς τον καταναλωτή με υπηρεσίες DTH (Direct to Home). Επιπλέον η ραγδαία εξάπλωση του διαδικτύου και η μετάβαση στην τεχνολογία μεταγωγής πακέτων με σύγκλιση επιμέρους τεχνολογιών, έχει καταστήσει τους δορυφόρους βασικό μέσο παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών [ITU, 2012c], που παρέχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο σε περιοχές μη εξυπηρετούμενες από επίγειες υποδομές. Οι δορυφόροι εξυπηρετούν επίσης άλλα επίγεια δίκτυα παρέχοντας υπηρεσίες υποστήριξης κορμού (backhaul), αλλά και αποτελούν βασικό μέσο παροχής επικοινωνιών σε καταστάσεις ανάγκης.

Στα πλεονεκτήματα των δορυφόρων εκτός από τη δυνατότητα ευρείας γεωγραφικής κάλυψης ακόμη και σε δυσπρόσιτες περιοχές, συγκαταλέγονται το ότι το κόστος χρήσης του δορυφορικού διαύλου είναι ανεξάρτητο της απόστασης μεταξύ των σταθμών και σταθερό ανεξάρτητα του αριθμού των χρηστών που λαμβάνουν εκπομπή αναμετάδοσης. Επίσης η υψηλή χωρητικότητα των δορυφορικών ζεύξεων επιτρέπει τη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων και με συγκριτικά χαμηλότερο ρυθμό λανθασμένων ψηφίων (BER, Bit Error Rate) [Ippolito, 2008].

Γενικά οι δορυφόροι παρέχουν υπηρεσίες για υποστήριξη διάφορων εφαρμογών. Η αδειοδότηση χρήσης συγκεκριμένων περιοχών του φάσματος από την ITU για τις διάφορες δορυφορικές υπηρεσίες τις διακρίνει σε κατηγορίες υπηρεσιών. Σύμφωνα με τους ορισμούς στον τόμο 1 των κανονισμών της ITU [ITU, 2012a] οι δορυφορικές υπηρεσίες μπορούν να ταξινομηθούν σε:

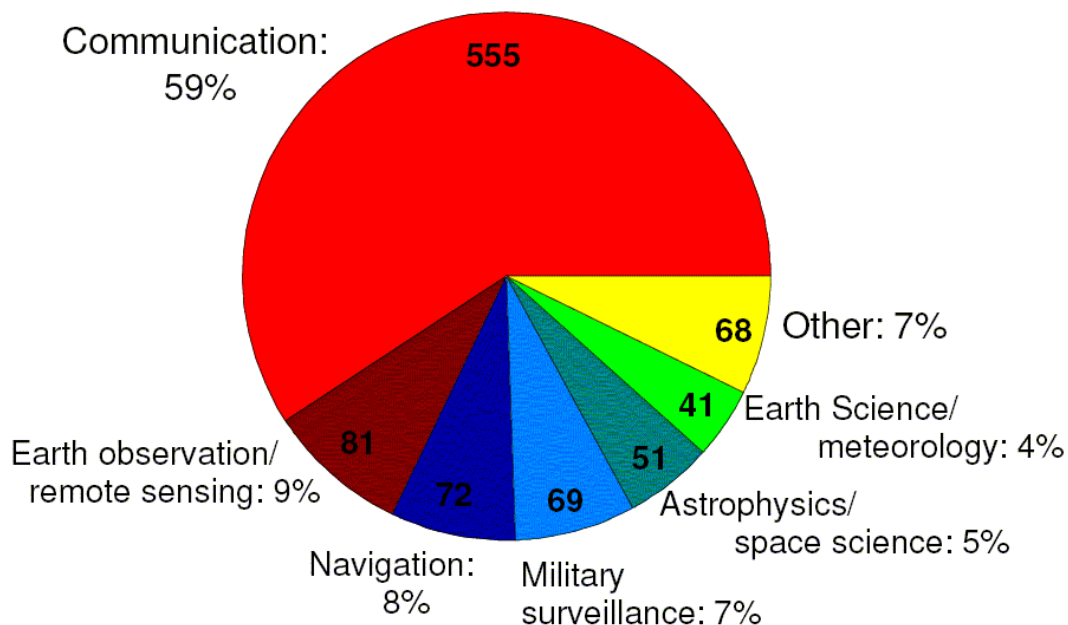
Σταθερές Δορυφορικές Υπηρεσίες (FSS: Fixed Satellite Services): Είναι οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες μεταξύ επίγειων σταθμών (earth stations) σε συγκεκριμένες θέσεις με χρήση ενός ή περισσότερων δορυφόρων. Η θέση μπορεί να είναι ένα καθορισμένο σημείο ή οποιοδήποτε σταθερό σημείο εντός μιας προκαθορισμένης περιοχής. Οι υπηρεσίες αυτές μπορεί να συμπεριλαμβάνουν ζεύξεις μεταξύ δορυφόρων (satellite-to-satellite), που υπάγονται και στις υπηρεσίες μεταξύ δορυφόρων (inter-satellite services) ή ζεύξεις τροφοδότησης (feeder links) για άλλες διαστημικές τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες.

Κινητές Δορυφορικές Υπηρεσίες (MSS: Mobile Satellite Services): Είναι οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες μεταξύ ενός κινητού επίγειου σταθμού και ενός ή περισσότερων δορυφόρων ή μεταξύ δορυφόρων που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις υπηρεσίες, καθώς και μεταξύ κινητών επίγειων σταθμών με χρήση ενός ή

περισσότερων δορυφόρων. Αυτές μπορούν περαιτέρω να διακριθούν σε χερσαίες (LMSS: Land Mobile Satellite Service), θαλάσσιες (MMSS: Maritime Mobile Satellite Service) και αέρος (AMSS: Aeronautical Mobile Satellite Service) ανάλογα με το αν ο κινητός επίγειος σταθμός βρίσκεται στην ξηρά, στη θάλασσα ή στον αέρα αντίστοιχα.

Δορυφορικές Υπηρεσίες Ευρυεκπομπής (BSS: Broadcasting Satellite Services): Είναι οι τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες στις οποίες μεταδίδονται σήματα από δορυφόρους για απευθείας λήψη από το κοινό, συμπεριλαμβανομένου της μεμονωμένη λήψης (individual) και της κοινοτικής (community).

Εκτός όμως από τις καθαρά τηλεπικοινωνιακές χρήσεις τους οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται ευρέως και σε άλλες εφαρμογές, παρέχοντας υπηρεσίες ραδιοναυτιλίας (Radionavigation Satellite Service), ραδιοεντοπισμού (Radiolocation Satellite Service), ερευνητικές (Earth-Exploration Satellite Service), μετεωρολογικές (Meteorological Satellite Service) και ραδιοερασιτεχνών (Amateur Satellite Service). Οι στρατιωτικές εφαρμογές των δορυφόρων αποτελούν ένα ιδιαίτερο πεδίο εφαρμογών καθώς έχουν παραδοσιακά αποτελέσει και την κινητήρια δύναμη στην ανάπτυξη νέων διαστημικών τεχνολογιών.

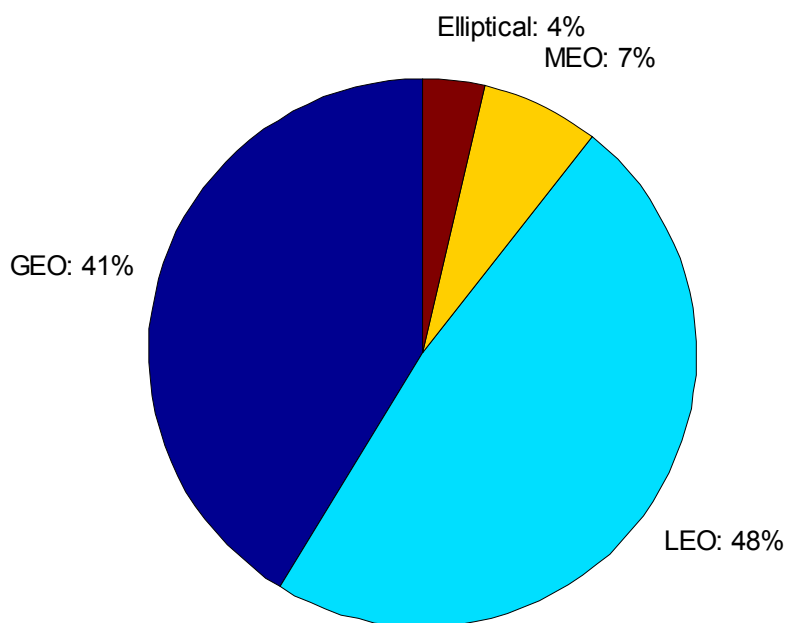


Εικ. 5 Κατανομή δορυφόρων σύμφωνα με παρεχόμενες υπηρεσίες (πηγή UCS)

Σύμφωνα με τη βάση δεδομένων δορυφόρων UCS [UCS, 2012] την 30-11-12 (τελευταία ανανέωση) βρίσκονταν σε τροχιά 1046 δορυφόροι. Οι τηλεπικοινωνιακοί δορυφόροι αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών (59%), ενώ η κατανομή τους σε παρεχόμενες υπηρεσίες φαίνεται αναλυτικότερα στην **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** Εικ. 5.

Οι δορυφόροι κινούνται στο διάστημα διαγράφοντας τροχιές γύρω από τη γη σύμφωνα με τους νόμους του Kepler. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της τροχιάς τους οι δορυφορικές τροχιές ταξινομούνται με κριτήρια [Maini-Agrawal, 2011]

- τον προσανατολισμό του τροχιακού επιπέδου
- την εκκεντρότητα
- την απόσταση από τη γη



Εικ. 6 Κατανομή δορυφόρων ανάλογα με την τροχιά (πηγή USC)

Η πιο διαδεδομένη κατηγορία δορυφόρων [Ippolito, 2008] είναι οι γεωστατικοί δορυφόροι (GEO, Geostationary Orbit) οι οποίοι περιφέρονται σε

κυκλικές τροχιές στο επίπεδο του ισημερινού σε ύψος 35786 km από την επιφάνεια της γης και με περίοδο όση της γης, ώστε να παραμένουν σε σταθερά σημεία στον ουρανό.

- Οι δορυφόροι LEO (Low Earth Orbit) περιφέρονται σε κυκλική τροχιά περί τη γη σε ύψος 160-640 km από την επιφάνειά της.
- Οι δορυφόροι MEO (Medium Earth Orbit) περιφέρονται σε κυκλική τροχιά περί τη γη σε ύψος 1600-4200 km από την επιφάνειά της.
- Οι δορυφόροι HEO (High Elliptical Orbit) περιφέρονται σε ελλειπτικές τροχιές με απόγειο παρόμοιο ενός γεωστατικού δορυφόρου και περίγειο παρόμοιο με ενός δορυφόρου LEO.

Οι δορυφόροι σε τροχιές LEO, MEO, HEO αναφέρονται και ως μη γεωσύγχρονοι δορυφόροι (NGSO). Η κατανομή των υφιστάμενων δορυφόρων ανάλογα με την τροχιά τους σύμφωνα με τη βάση δεδομένων USC φαίνεται στην Εικ. **6Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε..**

Ένα τυπικό δορυφορικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα αποτελείται από το δορυφορικό τμήμα και το επίγειο τμήμα [Ippolito, 2008]. Το δορυφορικό τμήμα του συστήματος περιλαμβάνει το δορυφόρο με το δορυφορικό αναμεταδότη και τον επίγειο σταθμό ελέγχου (TTC&M, Tracking, Telemetry, Command and Monitoring) στον οποίο πραγματοποιούνται οι διαδικασίες τηλεμετρίας και ο έλεγχος του δορυφόρου. Ο δορυφορικός αναμεταδότης καθώς και οι κεραίες εκπομπής και λήψης αποτελούν στην περίπτωση ενός τηλεπικοινωνιακού δορυφόρου το ωφέλιμο φορτίο του (payload). Οι δορυφορικοί αναμεταδότες διακρίνονται στους απλούς επαναλήπτες (transparent ή bent-pipe) που επανεκπέμπουν το λαμβανόμενο σήμα μετά από ενίσχυση και μετάθεση στη συχνότητα και στους αναγεννητικούς (regenerative) αναμεταδότες που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε ψηφιακά συστήματα και επεξεργάζονται το λαμβανόμενο σήμα πριν το επανεκπέμψουν. Στους επαναλήπτες λόγω τεχνικών περιορισμών που αφορούν την ενίσχυση το ολικό εύρος ζώνης υποδιαιρείται σε περιοχές συχνοτήτων στις οποίες τα φέροντα σήματα ενισχύονται ξεχωριστά σχηματίζοντας ένα κανάλι ή πομποδέκτη (transponder). Ο διαχωρισμός σε κανάλια επιτυγχάνεται με μια διάταξη φίλτρων, που λέγεται αποπολυπλέκτης εισόδου (IMUX, input multiplexer), ενώ τα σήματα συνδυάζονται εκ νέου μετά από την ενίσχυση πριν την εκπομπή στον πολυπλέκτη εξόδου (OMUX, output multiplexer) [Maral et al., 2009]. Στην περίπτωση των αναγεννητικών

αναμεταδοτών το λαμβανόμενο σήμα της άνω ζεύξης αποκωδικοποιείται και επεξεργάζεται στον δορυφόρο για διόρθωση σφαλμάτων (OBP, onboard processing).

Οι δορυφόροι OBP παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους απλούς επαναλήπτες. Τα πλεονεκτήματα αφορούν όχι μόνο την ποιότητα της ζεύξης λόγω της αναγέννησης του σήματος, αλλά και τη δυνατότητα αποδοτικής κατανομής των πόρων καθώς με τεχνικές επεξεργασίας σήματος και χρήση πολλαπλών δεσμών επιτελούν λειτουργίες δρομολόγησης και δυναμικής κατανομής των πόρων.

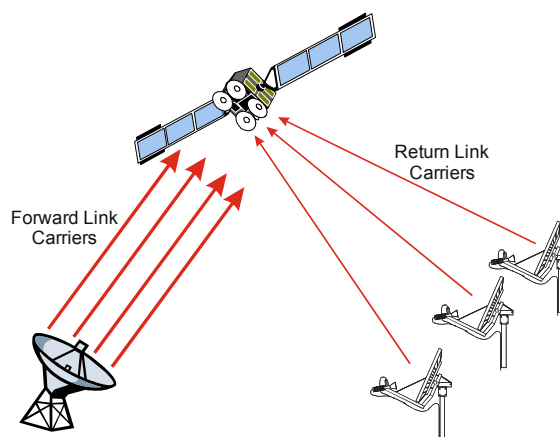
Ο δορυφόρος στο τμήμα κεραιών μπορεί να περιλαμβάνει μια κεραία εκπομπής και μια λήψης, οπότε πρόκειται για δορυφόρο απλής δέσμης (single beam), ή να περιλαμβάνει περισσότερα ζεύγη κεραιών για κάλυψη της γήινης επιφάνειας με πολλαπλές δέσμες (multibeam). Στην περίπτωση αυτή σχεδιάζονται τρόποι δρομολόγησης των σημάτων στις διαφορετικές δέσμες στον δορυφόρο. Η περιοχή κάλυψης του δορυφόρου στη γήινη επιφάνεια λέγεται και αποτύπωμα του δορυφόρου (footprint). Ο δορυφόρος ως πλατφόρμα περιλαμβάνει επίσης εκτός από το ωφέλιμο φορτίο του τα υποσυστήματα πρόωσης, ηλεκτρικής ισχύος, τηλεμετρίας και ελέγχου.

Το επίγειο τμήμα αποτελείται από τους επίγειους σταθμούς που χρησιμοποιούν τις τηλεπικοινωνιακές δυνατότητες του δορυφορικού αναμεταδότη. Οι σταθμοί αυτοί μπορεί να είναι σταθερά εγκατεστημένοι, μετακινούμενοι ή κινητοί. Οι μετακινούμενοι σταθμοί, ενώ γενικά μπορούν να αλλάζουν θέση, ωστόσο όταν χρησιμοποιούν το δορυφορικό δίκτυο παραμένουν σε σταθερό σημείο, σε αντίθεση με τους κινητούς, που μπορούν να βρίσκονται σε κίνηση. Οι επίγειοι σταθμοί μπορούν επίσης να διακριθούν ανάλογα με το μέγεθός τους και με το είδος των υπηρεσιών που παρέχουν. Διακρίνονται σε επίγειους σταθμούς FSS, BSS και MSS. Επίσης σε σταθμούς μεγάλου, μεσαίου, μικρού και πολύ μικρού μεγέθους με την τελευταία κατηγορία να περιλαμβάνει επίσης σταθμούς μόνο λήψης (RCVO). Μια άλλη λειτουργική διάκριση των επίγειων σταθμών τους διακρίνει σε σταθμούς χρηστών, διασύνδεσης και υπηρεσίας. [Maral et al., 2009]. Οι σταθμοί των χρηστών (user stations) παρέχουν υπηρεσίες απευθείας στους χρήστες, χαρακτηρίζονται από μικρότερα μεγέθη, και περιλαμβάνουν συσκευές χειρός, κινητές συσκευές και VSAT. Οι σταθμοί διασύνδεσης (interface stations), γνωστοί και ως πύλες (gateways) είναι σταθμοί μεγάλου μεγέθους και χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση του δορυφορικού δικτύου με επίγεια δίκτυα. Τέλος οι σταθμοί υπηρεσίας (service stations) όπως είναι τα hub και τα feeder stations χρησιμοποιούνται για τη συλλογή

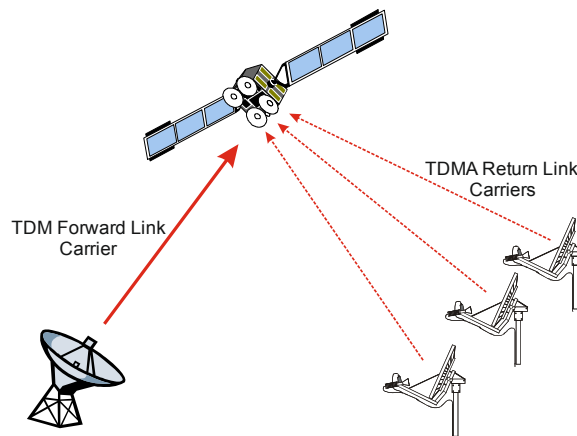
και διανομή πληροφορίας στους χρήστες μέσω του δορυφορικού δικτύου. Οι σταθμοί teleports είναι μια ειδική κατηγορία σταθμών gateways που διευθύνονται από εταιρείες που δεν αποτελούν μέρος του δορυφορικού συστήματος [Maini-Agrawal, 2011] και παρέχουν δορυφορικές υπηρεσίες σε χρήστες που δεν διαθέτουν δορυφορικές κεραιές. Γενικά οι χρήστες χρησιμοποιούν τις δορυφορικές υπηρεσίες μέσω των τερματικών χρήστη (user terminals), τα οποία διασυνδέονται στο επίγειο δίκτυο ή στους σταθμούς χρηστών ή αποτελούν τα ίδια σταθμό χρήστη.

Η τοπολογία ενός δορυφορικού δικτύου μπορεί να είναι τοπολογία αστέρος ή πλέγματος. Ο δορυφόρος χρησιμοποιείται στη διασύνδεση δύο οποιωνδήποτε κόμβων, ωστόσο στην τοπολογία αστέρος υφίσταται ένας επίγειος σταθμός ως κεντρικός κόμβος (hub) που παρεμβάλλεται στην επικοινωνία δύο οποιωνδήποτε επίγειων σταθμών. Η αρχιτεκτονική αυτή συναντάται κυρίως σε δίκτυα VSAT όπου οι σταθμοί περιορίζονται στη διαθέσιμη ισχύ. Στην τοπολογία πλέγματος δύο οποιοδήποτε επίγειοι σταθμοί μπορούν να επικοινωνήσουν απευθείας μεταξύ τους διαμέσω του δορυφόρου.

Η επικοινωνία από ένα τερματικό σε ένα άλλο μπορεί να επιτυγχάνεται με τεχνικές απλής σύνδεσης ανά φέρον (SCPC, single channel per carrier) ή πολλαπλής σύνδεσης ανά φέρον (MCPC, multiple channel per carrier). Η τεχνική SCPC (Εικ. 7) χρησιμοποιεί αποκλειστικά φέροντα για κάθε κανάλι.



Εικ. 7 Αρχιτεκτονική SCPC



Εικ. 8 Αρχιτεκτονική TDM/TDMA

Η αρχιτεκτονική MCPC χρησιμοποιεί φέροντα που υποστηρίζουν πολλαπλά κανάλια. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση πολυπλεξίας των σημάτων. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη αρχιτεκτονική που βασίζεται σε MCPC είναι η αρχιτεκτονική TDM/TDMA, που φαίνεται στην Εικ. 8. Τα κανάλια επιστροφής από τους επίγειους σταθμούς προς το δορυφόρο χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA). Η αρχιτεκτονική αυτή χρησιμοποιείται στο ιδιαίτερο επιτυχημένο πρότυπο DVB-S2.

Σήμερα τα δορυφορικά συστήματα παρέχουν υπηρεσίες που υποστηρίζουν ένα πλήθος εφαρμογών. Εξυπηρετούν ένα ευρύ φάσμα χρηστών παρέχοντας ήχο, εικόνα και δεδομένα σε επίγειους σταθμούς, που κυμαίνονται σε μέγεθος από τους μεγάλους σταθερούς επίγειους σταθμούς, μέχρι σταθμούς VSAT και μικρές φορητές συσκευές. Η βασικότερη εφαρμογή των τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων εξακολουθεί να είναι ωστόσο η μετάδοση τηλεοπτικής εικόνας. Το 80% των εσόδων στην αγορά των δορυφορικών τηλεπικοινωνιών πηγάζουν από τη μετάδοση τηλεοπτικών προγραμμάτων [SIA, 2012]. Οι εφαρμογές των δορυφορικών δικτύων διακρίνονται σε [Elbert, 2004]

- Ευρυεκπομπή και πολυεκπομπή ψηφιακού περιεχομένου
- Τηλεφωνία
- Μετάδοση δεδομένων και πρόσβαση στο διαδίκτυο
- Κινητές και προσωπικές επικοινωνίες.

Στις ανωτέρω γενικές κατηγορίες εφαρμογών μπορεί να ταξινομηθεί μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, όπως οι ακόλουθες:

α. Μετάδοση τηλεόρασης για συστήματα επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης (DTT, Digital Terrestrial Television) και καλωδιακής (CATV, Cable TV). Οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται στη διανομή της τηλεοπτικής εικόνας από ένα κεντρικό σταθμό στους επιμέρους σταθμούς που εξυπηρετούν ασύρματα ή ενσύρματα τους χρήστες.

β. Μετάδοση τηλεόρασης απευθείας στους χρήστες (DTH, Direct-To Home). Με εμπορικό εξοπλισμό οι τηλεθεατές μπορούν να λαμβάνουν απευθείας τα τηλεοπτικά προγράμματα από τον δορυφόρο.

γ. Μετάδοση τηλεόρασης στα πλαίσια περισυλλογής ειδήσεων (SNG, Satellite News Gathering) από φορητούς σταθμούς τοποθετημένους σε οχήματα (OB VAN, Outside Broadcasting Van).

δ. Ευρυεκπομπή περιεχομένου για διανομή σε μια ομάδα σταθμών (CDN, Content Delivery Networks), όπως κινηματογράφοι, studio κλπ.

ε. Υποστήριξη τηλε-εκπαίδευσης μέσω της μετάδοσης εικόνας, ήχου και δεδομένων στα πλαίσια εκπαιδευτικών δικτύων.

στ. Υπηρεσίες IP Backhaul, στις οποίες ο δορυφόρος συνδέει επίγειους αναμεταδότες για την περαιτέρω διανομή φωνής, εικόνας και δεδομένων με πρωτόκολλο IP σε κινητούς χρήστες.

ζ. Υπηρεσίες Mobile Backhaul, στις οποίες ο δορυφόρος συνδέει επίγειους αναμεταδότες για την περαιτέρω διανομή φωνής και δεδομένων σε κινητούς χρήστες.

η. Υπηρεσίες IP Trunking που διασυνδέουν απομακρυσμένα σημεία πρόσβασης στο δίκτυο κορμού (backbone), ώστε να παρέχεται πρόσβαση στο δίκτυο σε περιοχές χωρίς επίγεια υποδομή.

θ. Υπηρεσίες διασύνδεσης σημείου προς σημείο (point to point) και σημείου προς πολλαπλά σημεία (point to multipoint) για μετάδοση ήχου, εικόνας και δεδομένων στα πλαίσια ιδιωτικών δικτύων μεγάλων επιχειρήσεων (enterprise networking), καθώς και για πρόσβαση στο διαδίκτυο. Με τον τρόπο αυτό τα κεντρικά γραφεία των μεγάλων επιχειρήσεων επικοινωνούν με απομακρυσμένα γραφεία και αντιπροσώπους και εγκαθιστούν ιδιωτικά δίκτυα.

ι. Διασυνδέσεις VSAT στις υπηρεσίες των καταναλωτών και μικρών επιχειρήσεων (consumer and business) για μετάδοση ήχου, εικόνας και δεδομένων .

ια. Ευρυζωνικές υπηρεσίες πρόσβασης στο δίκτυο απευθείας στον καταναλωτή.

ιβ. Υπηρεσίες παραμετρικής παρακολούθησης και ελέγχου εγκαταστάσεων (SCADA , LDR) από απομακρυσμένους σταθμούς ελέγχου στην ενεργειακή βιομηχανία.

ιγ. Τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες σε κυβερνητικούς και στρατιωτικούς οργανισμούς.

ιδ. Τηλεπικοινωνίες σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών.

ιε. Τηλεφωνία και υπηρεσίες δεδομένων σε κινητούς χρήστες

ιστ. Τηλεφωνία και υπηρεσίες δεδομένων σε πλοία εν πλω.

ιζ. Ευρυζωνική πρόσβαση σε τραίνα και αεροπλάνα.

ιη. Ευρυεκπομπή ψηφιακού ήχου (DARS, Digital Audio Radio Service)

1.3.1. DVB-S2

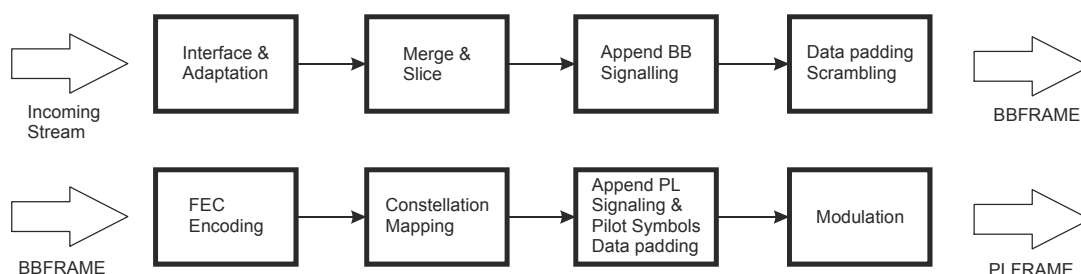
Η τεχνολογία των προτύπων DVB αποτελεί μια επιτυχημένη μέθοδο μετάδοσης ψηφιακών δεδομένων μέσω δορυφορικών δικτύων. Το πρότυπο DVB-S εμφανίστηκε το 1994 και η πιο πρόσφατη έκδοσή του είναι το πρότυπο EN 300 421 v1.1.2. Το πρότυπο περιγράφει τις μεθόδους διαμόρφωσης και κωδικοποίησης καναλιού για σύστημα παροχής υπηρεσιών ψηφιακής μετάδοσης τηλεόρασης TV/HDTV στα πλαίσια FSS και BSS. Το σύστημα μπορεί επίσης να παρέχει υπηρεσίες DTH με χρήση εμπορικού δέκτη με ενσωματωμένο αποκωδικοποιητή (IRD, Integrated Receiver Decoder) καθώς και να χρησιμοποιείται σε εφαρμογές SMATV και καλωδιακής. Το πρότυπο DVB-S προβλέπει διαμόρφωση QPSK και διόρθωση σφαλμάτων βασισμένη σε διαδοχική συνελικτική κωδικοποίηση με κωδικοποίηση RS.

Το 1997 εκδόθηκε το πρότυπο DVB-DSNG ως EN 301 210, που αφορά τη δορυφορική υπηρεσία DSNG (Digital Satellite News Gathering) η οποία ορίζεται ως η σύντομη και ευκαιριακή αναμετάδοση μέσω δορυφόρου τηλεόρασης ή ήχου με σύντομη προειδοποίηση και χρήση φορητών ή μετακινούμενων επίγειων σταθμών. Οι προδιαγραφές του προτύπου ήταν σε πλήρη συμφωνία με αυτές του DVB-S, ωστόσο προβλέφθηκαν δύο επιπλέον μέθοδοι διαμόρφωσης, οι 8PSK και 16QAM, για βελτίωση της φασματικής απόδοσης. Επίσης το πρότυπο DVB-DSNG προέβλεπε την αναμετάδοση ροής δεδομένων αποκλειστικά της μορφής MPEG-TS, όπως επίσης και το πρότυπο DVB-S.

Διάφορες εξελίξεις ωστόσο στην τεχνολογία της ψηφιακής δορυφορικής αναμετάδοσης επέβαλλαν την περαιτέρω εξέλιξη των προτύπων DVB-S και DVB-

DSNG. Εξελιγμένα σχήματα κωδικοποίησης και μέθοδοι διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης επιτρέπουν την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Επιπλέον μέθοδοι μεταβλητής ή προσαρμοσμένης κωδικοποίησης και διαμόρφωσης επιτρέπουν την προσαρμογή του συστήματος στις συνθήκες του ραδιοδιαύλου και κατ' επέκταση τη βελτίωση της ανοχής σε σφάλματα και την αύξηση των χρόνων διαθεσιμότητας. Τέλος νέες εφαρμογές όπως η ανάγκη ευρυζωνικής δορυφορικής πρόσβασης επέβαλαν την πρόβλεψη υποστήριξης και άλλων μορφών δεδομένων, εκτός των MPEG-TS, καλύτερα προσαρμοσμένων στις συγκεκριμένες εφαρμογές.

Το νέο πρότυπο με την ονομασία DVB-S2 εκδόθηκε το 2005 ως EN 302 307 και αποτελεί το πρότυπο της δεύτερης γενιάς των δορυφορικών συστημάτων αναμετάδοσης. Η τελευταία του εγκεκριμένη έκδοση είναι η v. 1.2.1 [ETSI, 2009], ενώ η v.1.3.1 βρίσκεται στο στάδιο τελικής έγκρισης. Το πρότυπο έχει επίσης προταθεί ως σύστημα E στα προτεινόμενα από ITU συστήματα BSS [ITU-R Rec. BO.1516-1, 2012] με βάση τη σύσταση ITU-R BO. 1784 [ITU-R Rec. BO.1784, 2007]. Το πρότυπο βελτιστοποιεί την απόδοση του συστήματος για την υποστήριξη των δορυφορικών υπηρεσιών αναμετάδοσης ψηφιακής τηλεόρασης (BS DTV/HDTV, Broadcast Services Digital Multi-Programme Television - High Definition Television), διαδραστικών υπηρεσιών δεδομένων συμπεριλαμβανομένου της πρόσβασης στο διαδίκτυο (IS, Interactive Services), διανομής ψηφιακής τηλεόρασης (DTVC, Digital TV Contribution), διανομής ειδήσεων (DSNG), διανομής ψηφιακού περιεχομένου και άλλων επαγγελματικών εφαρμογών. Η αναμετάδοση ψηφιακής τηλεόρασης μπορεί να είναι συμβατή με το παλαιότερο πρότυπο DVB-S ή όχι, ενώ οι εφαρμογές διαδραστικών υπηρεσιών μπορούν να χρησιμοποιούν κανάλι ανάδρασης (return path) σύμφωνα με διάφορα πρότυπα, όπως πχ το DVB-RCS.



Εικ. 9 Λογικό διάγραμμα συστήματος DVB-S2

Το δομικό διάγραμμα ενός συστήματος φαίνεται στην Εικ. 9 [Richharia-Westbrook, 2010] σε δύο επίπεδα πλαίσιας των δεδομένων, ένα στη βασική ζώνη (BBFRAME) και ένα στο φυσικό επίπεδο (PLFRAME).

Το πρώτο δομικό στοιχείο (Interface & Adaptation) δέχεται τη ροή των δεδομένων και παρέχει συγχρονισμό, ενώ υποστηρίζει το σχήμα προσαρμοσμένης κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (ACM, Adaptive Coding & Modulation). Στη συνέχεια διάφορες ροές δεδομένων (streams) συνδυάζονται και διαχωρίζονται σε μπλοκ, που το καθένα κωδικοποιείται και διαμορφώνεται ομοιόμορφα. Έπειτα προστίθεται ένα πρόθεμα των 80 bit με τα χαρακτηριστικά της εκπομπής, όπως πχ αριθμό ροών δεδομένων, τύπο κωδικοποίησης και διαμόρφωσης κλπ. Αν η ποσότητα των δεδομένων δεν επαρκεί για να συμπληρωθεί το πλαίσιο, αυτό συμπληρώνεται με ψευδοπληροφορία (data padding), ενώ εισάγεται και μια ψευδοτυχαιότητα στο σήμα (scrambling) για αποφυγή σταθερών τιμών στο σήμα. Στη συνέχεια το σήμα υφίσταται κωδικοποίηση για διόρθωση σφαλμάτων (FEC, Forward Error Correction) με κώδικα LDPC (Low Density Parity Check) και BCH. Το μέγεθος του μπλοκ είναι 64800 bits για εφαρμογές λιγότερο ευαίσθητες στις καθυστερήσεις και 16200 bits για εφαρμογές περισσότερο απαιτητικές. Ο ρυθμός κωδικοποίησης ποικίλει ανάλογα με τη διαμόρφωση, τις συνθήκες του καναλιού και την εφαρμογή, από 1/4 έως 9/10 με στόχο την επίτευξη πιθανότητας λανθασμένου ψηφίου (BER, Bit Error Rate) 10^{-7} .

Στη συνέχεια το σήμα διαμορφώνεται με μέθοδο QPSK, 8-PSK, 16-PSK ή 32-PSK ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής σε ρυθμό μετάδοσης και τις συνθήκες του καναλιού. Το σήμα στο φυσικό επίπεδο αποτελείται από μια ακολουθία πλαισίων, που το καθένα διαμορφώνεται και κωδικοποιείται με ενιαίο τρόπο. Κεφαλίδα μήκους 90 bits εξυπηρετεί το συγχρονισμό στο δέκτη και τον εντοπισμό των χαρακτηριστικών της εκπομπής. Επιπλέον τα πλαίσια συμπληρώνονται αν δεν είναι πλήρη και προβλέπεται και η εκπομπή πιλοτικών συμβόλων (pilot symbols) για συγχρονισμό.

1.3.2. DVB-RCS2

Το πρότυπο DVB-RCS προβλέπει τις προδιαγραφές για το επιστρεφόμενο κανάλι (άνω ζεύξη) σε αμφίδρομα δορυφορικά συστήματα VSAT και αποτελεί μέρος των μεθόδων παροχής διαδραστικών υπηρεσιών σε συστήματα DVB. Γενικά στις διαδραστικές υπηρεσίες DVB υφίστανται 2 κανάλια μεταξύ του πάροχου και του χρήστη. Ένα μονόδρομο κανάλι αναμετάδοσης από τον πάροχο στο χρήστη και ένα

αμφίδρομο κανάλι διαδραστικότητας με το χρήστη. Στο DVB-RCS αυτά υλοποιούνται μέσω ενός γεωστατικού δορυφόρου.

Το πρότυπο εμφανίσθηκε το 2000 ως EN 301 790 [ETSI, 2009b] και έκτοτε υπέστη συγκεκριμένες βελτιώσεις, με την παρούσα έκδοσή του να είναι η v.1.5.1 από το 2009. Αφορά δορυφορικές υπηρεσίες από γεωστατικούς δορυφόρους και αρχικά σταθερούς επίγειους σταθμούς RCST (Return Channel Satellite Terminals), ενώ στη συνέχεια επεκτάθηκε για να συμπεριλάβει κινητούς ή μετακινούμενους σταθμούς. Χρησιμοποιείται ευρέως σε δίκτυα VSAT με εφαρμογές πρόσβασης στο διαδίκτυο, δίκτυα επιχειρήσεων ή άλλων οργανισμών, φωνητικά δίκτυα VoIP κλπ. Η τοπολογία των δικτύων είναι συνήθως αστέρος με τη χρήση ενός κεντρικού κόμβου (hub). Η ζεύξη από τον δορυφόρο προς τον επίγειο σταθμό υλοποιείται με το πρότυπο DVB-S ή DVB-S2, ενώ η επιστρεφόμενη ζεύξη προς το δορυφόρο υλοποιείται με MF-TDMA και πολλαπλή πρόσβαση με ανάθεση πόρων κατόπιν απαίτησης (DAMA, Demand Assignment Multiple Access) . Τα προβλεπόμενα στο επίπεδο 2 πλαίσια περιλαμβάνουν πακέτα IP πλαισιωμένα σε πακέτα ATM ή MPEG-2 TS. Το πρότυπο DVB-RCS προβλέπει 4 μεθόδους κατανομής των πόρων της μεθόδου MF-TDMA στους χρήστες: CRA (Constant Rate Assignment), RBDC (Rate Based Dynamic Capacity), VBDC (Volume Based Dynamic Capacity) και FCA (Free Capacity Assignment).

Γενικά το πρότυπο DVB-RCS με τα συνοδευτικά του έγγραφα (TR 101 790 και TR 102 768) καθορίζουν το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο πρόσβασης μέσω (MAC), ώστε ένα δορυφορικό σύστημα αναμετάδοσης τηλεόρασης να μπορεί να μετατραπεί σε ένα πλήρως αξιοποιήσιμο σύστημα VSAT ανταλλαγής δεδομένων IP [DVB, 2013]. Έκτοτε οι διάφορες βελτιώσεις επέτρεψαν στο πρότυπο να προσαρμοσθεί στις απαιτήσεις της αγοράς, ωστόσο οι εξελίξεις στις χρησιμοποιούμενες τεχνικές στο φυσικό επίπεδο και η καταστάλαξη των προτύπων IP οδήγησαν στην ανάγκη προδιαγραφής ενός συστήματος δεύτερης γενιάς.

Το πρότυπο DVB-RCS2 το οποίο αποτελείται από τρία μέρη εκδόθηκε αρχικά το 2011, ενώ το 2012 προδιαγράφηκαν οι προσθήκες για κινητούς δέκτες και δίκτυα τοπολογίας πλέγματος (mesh) [ETSI, 2012b]. Το πρότυπο DVB-RCS2 προσφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοση σε σχέση με το DVB-RCS και είναι βελτιστοποιημένο για χρήση συχνοτήτων στη μπάντα Ka και υψηλότερα με χρήση τεχνικών προσαρμοσμένης κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, τόσο στην κάτω, όσο και στην άνω ζεύξη. Επίσης παρέχει τις κατάλληλες μεθόδους για τη μεταφορά

απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσιών (QoS, Quality of Service) στο επίπεδο διαχείρισης πόρων του δορυφόρου. Ο πυρήνας του προτύπου παραμένει η μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης MF-TDMA με ευέλικτη κατανομή πόρων ανάλογα με την υπηρεσία. Η τοπολογία των δικτύων είναι συνήθως αστέρος με τη χρήση ενός κεντρικού κόμβου (hub), ωστόσο προβλέπεται η υποστήριξη απευθείας επικοινωνίας τερματικών μέσω δορυφόρου με τοπολογία πλέγματος. Αυτό μπορεί να υλοποιείται μέσω αναγεννητικών δορυφόρων με επεξεργασία του σήματος (OBP) ή μέσω δορυφόρων επαναληπτών. Η ζεύξη από τον δορυφόρο προς τον επίγειο σταθμό υλοποιείται με το βελτιωμένο πρότυπο DVB-S2. Προσαρμογή στην εκπομπή για άμβλυνση διαλείψεων λόγω πχ βροχής είναι δυνατή τόσο στην κάτω, όσο και στην άνω ζεύξη. Στον πίνακα φαίνονται συνοπτικά οι διαφορές στα χαρακτηριστικά του προτύπου DVB-RCS2 σε σχέση με το DVB-RCS [DVB, 2012].

Πίνακας 2 Σύγκριση χαρακτηριστικών DVB-RCS/ DVB-RCS2

Χαρακτηριστικό	DVB-RCS	DVB-RCS2
Εναρμόνιση με QoS σε επίπεδο IP	OXI	NAI
Υποστήριξη πολλών εικονικών δικτύων	OXI	NAI
Ασφάλεια	Μία μέθοδος	Υποστήριξη πολλών μεθόδων
Πολλαπλή πρόσβαση στην άνω ζεύξη	TDMA, συνεχόμενο φέρον	TDMA, συνεχόμενο φέρον, τυχαία πρόσβαση
Διαμόρφωση	QPSK	BPSK, QPSK, 8PSK, 16 QAM, CPM
Κωδικοποίηση	RS/convolutional, 8-state PCCC turbo code	16-state PCCC turbo code, SCCC (CPM)
Burst spread-spectrum	Burst Repetition	Direct-Sequence
Προσαρμοστικότητα άνω ζεύξης	Περιορισμένη	NAI
Φασματική Απόδοση	--	30% βελτιωμένη

1.3.3. Terabit Satellite

Ο όρος Terabit Satellite αναφέρεται στο μελλοντικό δορυφόρο με χρονικό ορίζοντα δεκαετίας που με χρήση της κατάλληλης τεχνολογίας θα επιτυγχάνει χωρητικότητα της τάξης του 1 TBps [Evans et al., 2011]. Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση σε χωρητικότητα και ο κορεσμός των γεωστατικών δορυφόρων στις

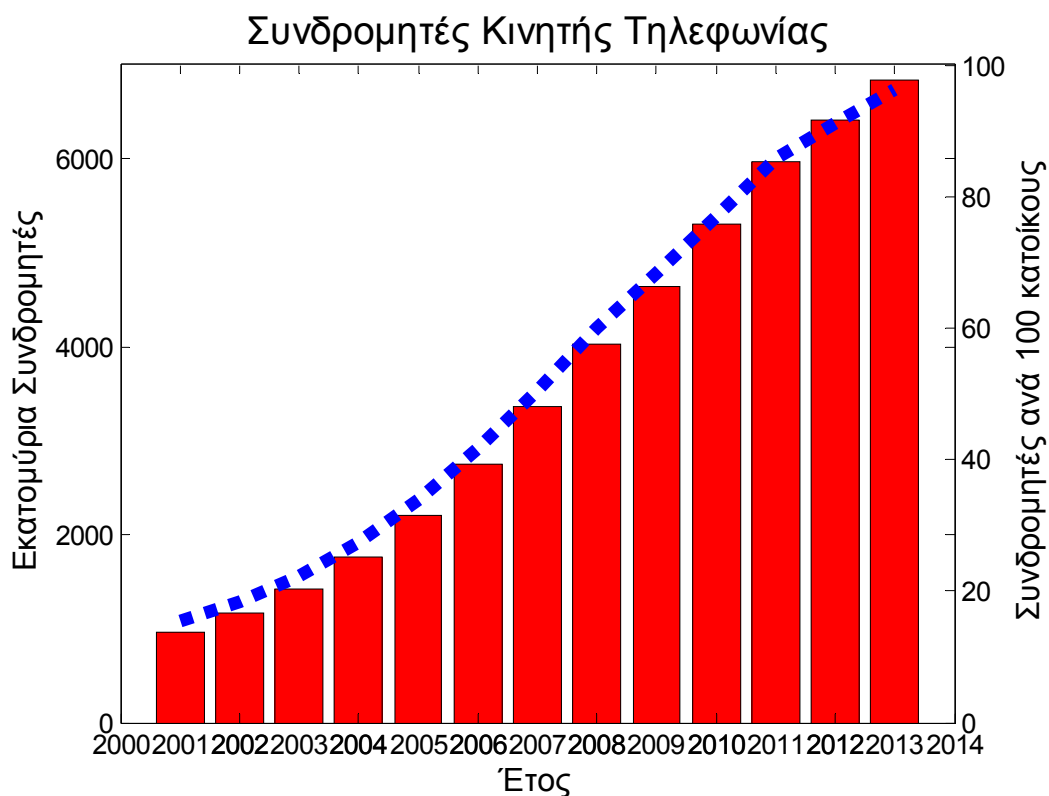
χαμηλότερες μπάντες C και Ku αποτελεί μονόδρομο στην επιλογή υψηλότερων συχνοτήτων όπως στις μπάντες Ka και Q/V καθώς και στη χρήση πολλαπλών δεσμών (multibeam). Εδικά για συστήματα FSS με εστίαση στις ανάγκες παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών στο [Evans et al., 2011] εξετάζονται οι πιθανές περιοχές συχνοτήτων και η πιθανή αρχιτεκτονική του νέου δορυφόρου. Λαμβάνοντας υπόψη τις αυξανόμενες ανάγκες και τη διαθεσιμότητα σε εύρος ζώνης προτείνεται η μικτή επιλογή χρήσης ζώνης Ka για την επικοινωνία με τους χρήστες και ζώνης Q/V για τις ζεύξεις τροφοδότησης (feeder). Επιπλέον για την άμβλυνση των διαλείψεων λόγω βροχής προτείνεται η υιοθέτηση της έννοιας των έξυπνων επίγειων σταθμών-πύλες (smart gateways), οι οποίοι συνδεδεμένοι μεταξύ τους θα παρέχουν το απαραίτητο σχήμα διαφορικής λήψης.

1.4. Κυβελωτά Δίκτυα

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας αναμφισβήτητα γνωρίζουν τη μεγαλύτερη επιτυχία από τα ασύρματα δίκτυα [Goldsmith, 2005]. Η αλματώδης εξάπλωση της χρήσης των κινητών τηλεφώνων που συντελέστηκε τη δεκαετία του 90' ταυτίζεται χρονικά με την εξίσου εντυπωσιακή εξέλιξη της χρήσης του διαδικτύου και του παγκόσμιου ιστού. Από στατιστικά στοιχεία της βάσης δεδομένων της ITU [ITU, 2012b] η συνεχής εξέλιξη των χρηστών του διαδικτύου φαίνεται στο διάγραμμα της Εικ. 2. Παράλληλα τα αντίστοιχα στατιστικά δεδομένα για τους χρήστες κινητής τηλεφωνίας φαίνονται στην Εικ. 10.

Σκιαγραφώντας την εξέλιξη των κυβελωτών συστημάτων τα αναλογικά συστήματα πρώτης γενιάς της δεκαετίας του 80' εξελίχθηκαν στα συστήματα δεύτερης γενιάς (2G) τη δεκαετία του 90' που βασίζονταν σε ψηφιακή τεχνολογία. Ενώ τα συστήματα αυτά ήταν προσανατολισμένα κυρίως στη μετάδοση φωνής σταδιακά εξελίχθηκαν ώστε να υποστηρίξουν μετάδοση δεδομένων. Στην Ευρώπη αναπτύχθηκε το σύστημα GSM (Global System for Mobile Communications, αρχικά Groupe Speciale Mobile) στα μέσα της δεκαετίας του 80' για να παρέχει ένα πανευρωπαϊκό σύστημα κινητής τηλεφωνίας. Την ίδια περίοδο αναπτύχθηκαν τα συστήματα US-TDMA στις Η.Π.Α και PDC στην Ιαπωνία, τα οποία όπως και το GSM χρησιμοποιούσαν την τεχνική πολλαπλής πρόσβαση με διαίρεση χρόνου TDMA (Time Division Multiple Access). Το σύστημα US-TDMA ήταν ευρύτερα γνωστό με την ονομασία D-AMPS (Digital AMPS) και αποτελούσε την ψηφιακή

εξέλιξη του αναλογικού συστήματος πρώτης γενιάς AMPS (Advanced Mobile Phone System). Το σύστημα D-AMPS βασιζόταν στο σύστημα IS-54, που μετεξελίχτηκε στο IS-136 το 1996. Στις Η.Π.Α χρησιμοποιήθηκε και η τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα CDMA (Code Division Multiple Access) στο πρότυπο IS-95 (Interim Standard 95), γνωστό και ως cdmaone, που αναπτύχθηκε το 1993, με την επέκτασή του ως IS-95b ή cdmatwo αργότερα. Το σύστημα αυτό ήταν το μοναδικό σύστημα δεύτερης γενιάς με διαίρεση κώδικα.



Εικ. 10 Στατιστικά στοιχεία συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας.

Τα συστήματα που χαρακτηρίζονται ως δεύτερης γενιάς (2G) ήταν γενικά συστήματα στενού εύρους ζώνης (narrowband), καθώς ήταν προσανατολισμένα σε υπηρεσίες με χαμηλές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, όπως η μετάδοση φωνής. Ωστόσο η χρήση ψηφιακής τεχνολογίας επέτρεψε τη μετάδοση και δεδομένων με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, όπως SMS (Short Message Services), ηλεκτρονικό ταχυδρομείο (email) κλπ. Οι υπηρεσίες αυτές δεδομένων βασίζονταν σε μεταγωγή κυκλώματος (circuit switched), όπως και οι συνομιλίες. Υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης

επετεύχθησαν αργότερα με εξέλιξη των συστημάτων 2G με διάφορες τεχνικές, όπως πολλαπλές χρονικές θυρίδες σε ένα χρήστη (HSCD, High Speed Circuit Switched Data στο GSM) και με τροποποίηση των μεθόδων κωδικοποίησης [Dahlman et al., 2011]. Η μετακίνηση πακέτων δεδομένων έγινε εφικτή στο GSM με το GPRS (General Packet Radio Services) που εισήχθη στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του 90, με ανάλογες τεχνικές να εμφανίζονται σε αντίστοιχες με το GSM τεχνολογίες. Η τεχνολογία EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) επέτρεψε ακόμη μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης στα δίκτυα GSM με χρήση προσαρμοσμένης διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Ανάλογες προσθήκες στο D-AMPS για υπηρεσίες δεδομένων αποτελούσαν τα D-AMPS+ και CDPD (Cellular Digital Packet Data). Αντίστοιχες βελτιώσεις εφαρμόστηκαν στο Ιαπωνικό PDC. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίστηκαν και ως 2.5G [Dahlman et al., 2011]. Ωστόσο παρά τους σχετικά χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης τα συστήματα αυτά κατέδειξαν τη δυναμική της μετάδοσης πακέτων στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.

Η σκέψη για την ανάπτυξη συστημάτων τρίτης γενιάς (3G) απασχόλησε από νωρίς διάφορες ομάδες εργασίας παγκοσμίως. Η ITU εγκαινίασε από τις αρχές του 90' το πρόγραμμα FPLMTS (Future Public Land Mobile Telecommunications System), που αποσκοπούσε στην ενοποίηση των προτύπων ασύρματης επικοινωνίας. Το πρόγραμμα μετονομάστηκε σε IMT-2000 [ITU-R Rec. M.687-2, 1997], [ITU-R Rec. M.817, 1992] και περιελάμβανε εκτός από τις προδιαγραφές για κυψελωτά συστήματα, αντίστοιχες για δορυφορικές ζεύξεις, τοπικά ασύρματα δίκτυα (WLAN) και σταθερές ασύρματες ζεύξεις. Ωστόσο η προσπάθεια ενοποίησης αυτών των τεχνολογιών σε ένα πρότυπο, αντιμετώπισε σημαντικές δυσκολίες λόγω της διαφορετικής τους φύσης, με αποτέλεσμα το πρόγραμμα IMT-2000 να επικεντρωθεί στα κυψελωτά δίκτυα νέας γενιάς [Nicolopolitidis et al., 2003], συνδυάζοντας ένα σύνολο τεχνολογιών για τη μετάβαση από τα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) στα τρίτης (3G). Στην ουσία η εργασία καθόρισε τις απαιτήσεις χωρίς να προσδιορίσει πρωτόκολλα, ώστε να είναι εφικτή η χρήση υφιστάμενων διαφορετικών τεχνολογιών. Σε ότι αφορά το καθαρά ασύρματο τμήμα του δικτύου (RAN, Radio Access Network) η ITU δέχτηκε προτάσεις από άλλες ομάδες προτυποποίησης παγκοσμίως, με αρκετές από αυτές να εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά.

Οι εργασίες προτυποποίησης από τον ευρωπαϊκό οργανισμό ETSI (European Telecommunications Standards Institute) που εγκαινιάστηκαν το 1996 συμπεριελάμβαναν διάφορες προτάσεις συστημάτων WCDMA, που οδήγησαν στο

σύστημα UMTS (Universal Mobile Telecommunication Services), το οποίο προτάθηκε από ευρωπαϊκής πλευράς στην ITU. Το UMTS είναι βασισμένο σε δύο μοντέλα πολλαπλής πρόσβασης WCDMA, ένα με FDD και ένα με TDD. Ο ιαπωνικός οργανισμός ARIB (Association of Radio Industries and Business) πρότεινε επίσης WCDMA, συμβατό με την ευρωπαϊκή πρόταση. Ο αμερικάνικος οργανισμός TTA (Telecommunications Industry Association) πρότεινε τρία συστήματα, το UWC-136 ως εξέλιξη του IS-136 βασισμένο σε TDMA, το cdma2000 ως εξέλιξη του IS-95 και το πρότυπο WIMS βασισμένο σε WCDMA. Η αμερικάνικη επιτροπή T1P1 (επιτροπή της T1, μέλος πλέον της ATIS, Alliance for Telecommunications Industry Solutions του οργανισμού ANSI) πρότεινε το WCDMA-NA βασισμένο σε WCDMA και FDD. Ο κορεάτικος οργανισμός TTA πρότεινε δύο συστήματα, ένα όμοιο με το ιαπωνικό και ένα κοντά στο αμερικάνικο cdma2000. Τέλος η Κίνα πρότεινε το σύστημα TD-SCDMA, που βασίζεται σε σύγχρονο TD-CDMA. Γενικά οι προτάσεις περιελάμβαναν συστήματα CDMA (WCDMA, TD-WCDMA, cdma2000, TD-SCDMA) και TDMA (UWC-136, DECT).

Τελικά με βάση τα προταθέντα συστήματα καθορίστηκαν στο πλαίσιο του IMT-2000 πέντε ραδιο-επαφές (radio-interfaces), ενώ μια έκτη προστέθηκε το 2007 [ITU-R Rec. M.1457-10, 2011] :

- IMT-DS (Direct Sequence) - WCDMA/ UTRA FDD
- IMT-MC (Multi-Carrier) - cdma2000
- IMT-TC (Time-Code) - UTRA TDD (TD-CDMA, TD-SCDMA)
- IMT-SC (Single-Carrier) - EDGE/UWC-136
- IMT-FT (Frequency-Time) - DECT
- IMT-OFDMA TDD WMAN - WiMAX

Παράλληλα στην προσπάθεια ενοποιημένης τυποποίησης ιδρύθηκε το 1998 ο οργανισμός 3GPP, που ασχολείται με την προτυποποίηση και εξέλιξη του WCDMA και γενικότερα με την εξέλιξη των συστημάτων GSM. Αργότερα προστέθηκε στα έργα του οργανισμού η προτυποποίηση και εξέλιξη του GSM EDGE. Ο οργανισμός 3GPP2 ιδρύθηκε παράλληλα με τον 3GPP και ασχολείται με την εξέλιξη του cdma2000. Οι δυο οργανισμοί εργάζονται με σκοπό την εξέλιξη και τον εναρμονισμό των διαφορετικών προτύπων. Αντικείμενό τους εκτός από τα δίκτυα ασύρματης πρόσβασης RAN (Radio Access Network) των αντίστοιχων συστημάτων αποτελούν και τα τμήματα του κυρίως δικτύου (Core Network). Οι εργασίες τους εκδίδονται σε μορφή προτύπων και ανατροφοδοτούν την ITU η οποία επικαιροποιεί αντίστοιχα τις

εκδιδόμενες από αυτήν προδιαγραφές. Οι πρώτες εκδόσεις του οργανισμού 3GPP αφορούσαν προδιαγραφές των δικτύων GSM, ενώ με την έκδοση 1999 καθορίστηκαν τα χαρακτηριστικά του δικτύου 3ης γενιάς UMTS. Από το 2000 και έπειτα οι εκδόσεις μετονομάστηκαν σε έκδοση 4 (release 4) και μεταγενέστερες. Αντίστοιχα στα πλαίσια του οργανισμού 3GPP2 μετά από την αρχική έκδοση του προτύπου cdma2000 γνωστή ως cdma2000 1X (IS-2000), ή 1x ή 1xRTT με τις εκδόσεις rev0, revA και revB ακολούθησαν οι βελτιωμένες εκδόσεις CDMA2000 1xEV-DO (Evolution-Data Optimized) που αποτελεί τον κύριο κορμό εξέλιξης του CDMA2000, καθώς και η CDMA2000 1xEV-DV (Evolution-Data Voice), που ωστόσο πλέον δεν αναπτύσσεται περαιτέρω.

Η συνεχής αυτή εξέλιξη των αντίστοιχων προτύπων από τους οργανισμούς 3GPP και 3GPP2 οδήγησε στην περαιτέρω βελτίωση των δικτύων τρίτης γενιάς και στη μετάβαση στα δίκτυα 4ης γενιάς (4G). Έτσι με την έκδοση 8 (release 8) του οργανισμού 3GPP καθιερώθηκε το πρότυπο LTE (Long Term Evolution), που θεωρείται ως γενιάς 3.9G, δηλαδή ως το σύστημα που οδηγεί στη μετάβαση των δικτύων 4ης γενιάς. Η έκδοση 10 (release 10) είναι αυτή που με τις βελτιώσεις στο σύστημα LTE ως LTE-advanced θεωρείται ως αντιπροσωπευτική των δικτύων 4ης γενιάς, 4G. Παράλληλα ο οργανισμός 3GPP2 εξέλιξε τα συστήματα σε 4ης γενιάς με τα εξελιγμένα πρότυπα CDMA2000 1xEV-DO γνωστά και ως HRPD (High-Rate Packet Data) με τελευταία την έκδοση C (revision C). Το σύστημα UMB (Ultra Mobile Broadband) που αποτέλεσε σχέδιο για τη μετάβαση των δικτύων CDMA2000 σε 4G δεν εξελίχθηκε περαιτέρω, καθώς επισκιάστηκε από το αντίστοιχο LTE. Παράλληλα με την εξέλιξη των προτύπων από τους οργανισμούς 3GPP και 3GPP2 η ITU με την ομάδα εργασίας WP5D καθόρισε τα πρότυπα για την επόμενη γενιά δικτύων με την προσωνομία IMT-advanced. Οι απαιτήσεις για τα δίκτυα IMT-advanced καθορίστηκαν με την προδιαγραφή ITU-R rec. M.2012 [ITU-R Rec. M.2012, 2012].

Ενώ σε ερευνητικό επίπεδο ήδη μελετώνται τα συστήματα 5ης γενιάς (5G), που αναμένονται περί το 2020 η γενική τάση της εξέλιξης των ασύρματων δικτύων βαίνει προς τη σχεδίαση συστημάτων που θα παρέχουν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης με μεταγωγή πακέτων δεδομένων και χρήση ασύρματων τεχνολογιών που θα υποστηρίξουν απαιτητικές εφαρμογές πολυμέσων. Η γενική αυτή τάση επικρατεί και στις υπόλοιπες κατηγορίες ασύρματων δικτύων.

1.4.1. LTE - LTE advanced

Οι προδιαγραφές για το σύστημα LTE εμφανίστηκαν με την έκδοση 8 του προτύπου 3GPP ως αποτέλεσμα μελέτης που ξεκίνησε το 2004 για την εξέλιξη των συστημάτων UMTS. Στη νέα αρχιτεκτονική του συστήματος το κυρίως μέρος του δικτύου (core network) είναι το EPC (Evolved Packet Core), που αποτελεί αντικατάσταση του πεδίου μεταγωγής πακέτων (PS domain) των προηγούμενων συστημάτων GSM και UMTS, αλλά και του πεδίου μεταγωγής κυκλωμάτων (CS domain), καθώς το EPC διαχειρίζεται κάθε είδους πληροφορία, φωνή και δεδομένα. Έτσι οι φωνητικές κλήσεις μεταδίδονται με VoIP (Voice over IP). Το τμήμα ασύρματης πρόσβασης του δικτύου είναι το e-UTRAN (evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) ως εξέλιξη του αντίστοιχου UTRAN του UMTS. Η εξέλιξη της αρχιτεκτονικής ήταν αποτέλεσμα δύο εργασιών από 3GPP, μιας γνωστής ως SAE (System Architecture Evolution), που αφορούσε την εξέλιξη του κυρίως δικτύου και μιας γνωστής ως LTE (Long Term Evolution), που αφορούσε την εξέλιξη του δικτύου ασύρματης πρόσβασης και του κινητού αντίστοιχα. Επίσης το πλήρες σύστημα έχει την ονομασία EPS (Evolved Packet System), ωστόσο έχει γίνει ευρύτερα γνωστό με την ονομασία LTE, που έχει πλέον καθιερωθεί [Cox, 2012].

Το σύστημα LTE χρησιμοποιεί μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης OFDMA και SC-FDMA. Υπερέχει κατά πολύ σε επιδόσεις σε σχέση με το προγενέστερο UMTS, με την υλοποίηση WCDMA, σε ότι αφορά μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης, φασματική απόδοση και καθυστέρηση (latency).

Προκειμένου το σύστημα LTE να εναρμονιστεί πλήρως με τις προδιαγραφές IMT-advanced της ITU για τα συστήματα 4ης γενιάς (4G), που έθετε ως κάτω όρια στους μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης τα 600Mbps στην κάτω ζεύξη και τα 270 Mbps στην άνω, με εύρος ζώνης 40 MHz, δημιουργήθηκε το σύστημα LTE-advanced. Το σύστημα LTE-advanced, μαζί με το σύστημα WiMAX 2.0 (IEEE 802.16m) αποτελούν σήμερα τα δύο συστήματα 4ης γενιάς (4G), που πληρούν τις προϋποθέσεις της ITU.

1.5. Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα (WLAN)

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (WLAN) χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο συσκευών σε μια απόσταση της τάξης των μερικών δεκάδων μέτρων. Η χρησιμοποιούμενη περιοχή συχνοτήτων είναι η ελεύθερη στη χρήση χωρίς ανάγκη αδειοδότησης περιοχή ISM (Industrial, Scientific, Medical) στα 2.4GHz και 5

GHz, και για το λόγο αυτό υπάρχει περιορισμός στην ισχύ εκπομπής των χρησιμοποιούμενων συσκευών. Η σύνδεση των συσκευών μπορεί να γίνεται απευθείας (ad-hoc) ή συνηθέστερα μέσω ενός σημείου πρόσβασης (access point), που λειτουργεί ως πύλη διασύνδεσης με το διαδίκτυο. Η ραγδαία εξάπλωση του παγκόσμιου ιστού και η ευκολία χρήσης ενός τοπικού ασύρματου δικτύου για πρόσβαση στο διαδίκτυο με δυνατότητα υποστήριξης κινητικότητας του χρήστη συνέβαλλαν καθοριστικά στην ευρεία αποδοχή των WLANs [Rappaport, 2001]. Τα πιο διαδεδομένα πρότυπα είναι της ομάδας εργασίας 802.11 του IEEE. Η οικογένεια των προτύπων 802.11 καθορίζει τα πρωτόκολλα του φυσικού επιπέδου (PHY, physical-layer) και του επιπέδου ελέγχου πρόσβασης μέσων (MAC, media access control) για WLAN στις συχνότητες 2.4 GHz και 5 GHz.

Το αρχικό πρότυπο 802.11 εμφανίστηκε το 1997 και επετύγχανε μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 2 Mbps, με μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance). Οι προβλεπόμενες τεχνικές εξάπλωσης φάσματος στο αρχικό πρότυπο ήταν η μεταπήδηση συχνότητας (FH-SS, Frequency Hopping Spread Spectrum), αλλά και η εξάπλωση φάσματος απευθείας ακολουθίας (DS-SS, Direct Sequence Spread Spectrum), ωστόσο στις μετέπειτα εκδόσεις χρησιμοποιήθηκε μόνο η DS-SS. Το πρότυπο 802.11b που εγκρίθηκε το 1999 προέβλεπε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 11 Mbps στην περιοχή των 2.4 GHz. Αποτελεί το πιο διαδεδομένο πρότυπο της οικογένειας 802.11 και έγινε ευρύτερα γνωστό με την επωνυμία Wi-Fi (Wireless Fidelity). Χρησιμοποιεί μια μέθοδο DS-SS γνωστή ως CCK (Complementary Code Keying) με εύρος ζώνης 22 MHz και ακτίνα 100 m. Το πρότυπο 802.11a που εμφανίστηκε το 1999 προέβλεπε τη χρήση OFDM στην περιοχή των 5 GHz. Το μεταγενέστερο πρότυπο 802.11g του 2003 είναι παρόμοιο με το 802.11a με τη μόνη διαφορά ότι η συχνότητα λειτουργίας είναι στην περιοχή των 2.4 GHz. Και στα δύο πρότυπα το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης είναι 20 MHz, ενώ οι προβλεπόμενες μέθοδοι διαμόρφωσης είναι οι BPSK, QPSK, 16QAM και 64QAM με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 54 Mbps.

Το πρότυπο 802.11n που εμφανίστηκε το 2009 αποτέλεσε μια σημαντική αναβάθμιση στην οικογένεια των προτύπων 802.11 εισάγοντας νέες τεχνολογίες και επιτυγχάνοντας ρυθμούς μέχρι 300 Mbps, ενώ χαρακτηρίζεται και ως πρότυπο HT (High Throughput). Χρησιμοποιεί τεχνολογία MIMO-OFDM, τεχνικές Adaptive Beamforming, STBC (Space-Time Block Codes) και LDPC (Low Density Parity

Code), ενώ το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης είναι 20 και 40 MHz στις συχνότητες 2.4 και 5 GHz.

Συστήματα 802.11 VTH (Very High Throughput) αποτελούν τα πρότυπα 802.11ac και 802.11ad. Αποσκοπούν στην επίτευξη πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης και εναρμονίζονται με τις προδιαγραφές IMT-advanced της ITU. Το πρότυπο 802.11ac αναφέρεται σε συστήματα σε συχνότητες <5 GHz ως εξέλιξη του 802.11n και επιτυγχάνει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 1 Gbps, ενώ το 802.11ad λειτουργεί στα 60 GHz και με ταχύτητες μέχρι 7 Gbps.

Επιπλέον εκδόσεις (amendments) προβλέπουν βελτιώσεις σε διάφορους τομείς όπως ασφάλειας, ποιότητας υπηρεσιών, κάλυψης, κινητικότητας κλπ. Μια πλήρης καταγραφή της εξέλιξης των προτύπων 802.11 μπορεί να βρεθεί στο [Hiertz et al., 2010]. Ωστόσο οι βελτιώσεις στο φυσικό επίπεδο και συγκεκριμένα η χρήση των σύγχρονων τεχνικών MIMO και OFDM ήταν αυτές που επέφεραν σημαντική εξέλιξη στα συστήματα WLAN της οικογένειας 802.11.

1.6. Ασύρματα Μητροπολιτικά Δίκτυα (WMAN)

Τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα παρέχουν υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων σε εμβέλειες της τάξης των δεκάδων χιλιομέτρων και αποσκοπούν στη γεφύρωση μεταξύ των ασύρματων τοπικών δικτύων με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και των κυψελωτών συστημάτων με υποστήριξη υψηλής κινητικότητας [Du-Swamy, 2010]. Τα πιο διαδεδομένα συστήματα WMAN στηρίζονται στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.16, των οποίων οι εμπορικές εφαρμογές έγιναν ευρύτερα γνωστές ως WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Η αρχική έκδοση του προτύπου εμφανίσθηκε το 2001 και έκτοτε έχει υποστεί διάφορες τροποποιήσεις με τελευταία έκδοση την 802.16-2009 με τις μεταγενέστερες συμπληρώσεις 802.16j,h,m. Το αρχικό πρότυπο προέβλεπε λειτουργία στην περιοχή 10 έως 66 GHz με απλό φέρον και μέθοδο TDMA. Ωστόσο στις μεταγενέστερες εκδόσεις προβλέφθηκε η χρήση τεχνολογίας OFDM και λειτουργία σε χαμηλότερες συχνότητες (2-11GHz, 2-6GHz). Η έκδοση 802.16-2004 που συμπεριέλαβε τις τροποποιήσεις 802.16a/c/d χαρακτηρίζεται και ως Fixed WiMAX καθώς δεν υποστήριζε κινητικότητα των χρηστών, κάτι που προβλέφθηκε με την τροποποίηση 802.16e, γνωστή και ως Mobile WiMAX.

1.7. Ασύρματα Προσωπικά Δίκτυα (WPAN)

Τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN, Wireless Personal Area Networks) εξυπηρετούν τη μετάδοση δεδομένων σε μια μικρή περιοχή εμβέλειας μικρότερης των 10 m. Λειτουργούν συνήθως στην ελεύθερη περιοχή ISM των 2.4 GHz και χαρακτηρίζονται από χαμηλή ισχύ εκπομπής. Η έννοια των προσωπικών δικτύων επεκτείνεται και στα ασύρματα δίκτυα περιοχής σώματος, τα λεγόμενα WBAN (Wireless Body Area Networks). Τα WPAN χρησιμοποιούνται ευρέως στον οικιακό αυτοματισμό και δικτύωση, στον βιομηχανικό έλεγχο, κλπ, ενώ η χρήση των WBAN διερευνάται ως επί το πλείστον στις ιατρικές εφαρμογές, αλλά και σε ψυχαγωγικές. Η δημοφιλέστερη κατηγορία προτύπων WPAN ανήκει στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.15. Το πρότυπο 802.15.1 είναι το ευρύτερα γνωστό Bluetooth με τις τελευταίες του εκδόσεις να είναι η v.4.0, που υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 1Mbps με στόχο τη μικρότερη δυνατή κατανάλωση ισχύος, και η v.3.0 με ρυθμούς μέχρι 24 Mbps. Σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης αποσκοπούν τα πρότυπα 802.15.3 (HR-WPAN, High-Rate WPAN). Το πρότυπο 802.15.3 εκδόθηκε το 2003 και επετύγχανε ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 55 Mbps στα 2.4 GHz με χρήση μονού φέροντος και TDMA με διαμόρφωση QPSK, DQPSK, 16QAM, 32QAM και 64QAM. Ωστόσο η ανάγκη υποστήριξης πιο απαιτητικών εφαρμογών όπως ροή HD video επέβαλλε την υιοθέτηση τεχνολογίας UWB. Η ομάδα εργασίας 802.15.3a εξέτασε τις δύο πιθανές υλοποιήσεις με DS-UWB και MB-OFDM, όμως δεν ολοκλήρωσε το έργο της. Η έκδοση 802.15.3b επέφερε μικρές τροποποιήσεις, ενώ η τελευταία έκδοση 802.15.3c λειτουργεί στην περιοχή των 57-64 GHz και επιτυγχάνει ρυθμούς μέχρι 2 Gbps. Με βάση τα πρότυπα 802.15.3 δημιουργήθηκε η κοινοπραξία WiMedia με σκοπό την προώθηση των συστημάτων δικτύωσης για εφαρμογές πολυμέσων και τη διαλειτουργικότητα των ασύρματων συσκευών στο πλαίσιο προσωπικών δικτύων. Τα πρότυπα 802.15.4 αποσκοπούν σε συστήματα χαμηλής πολυπλοκότητας με μέγιστη διάρκεια μπαταρίας, αλλά χαμηλότερους ρυθμούς μετάδοσης. Τελευταία έκδοση είναι η 802.15.4-2011, ενώ έχει έκτοτε συμπληρωθεί με τις τροποποιήσεις 802.15.4e,f,g. Η κοινοπραξία Zigbee αποσκοπεί στην ανάπτυξη και προώθηση συστημάτων WPAN και για το στόχο αυτό εκδίδει προδιαγραφές συμπληρώνοντας το πρότυπο 802.15.4 με τελευταία τη Zigbee Pro. Το πρότυπο 802.15.5 προδιαγράφει την αρχιτεκτονική των δικτύων πλέγματος (mesh) για δίκτυα WPAN τόσο χαμηλών, όσο και υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης. Οι τεχνολογίες WBAN προδιαγράφονται

στο πρότυπο 802.15.6, ενώ το πρότυπο 802.15.7 καθορίζει τις προδιαγραφές για επικοινωνίες στην περιοχή ορατού φωτός (VLC, Visible Light Communications).

1.8. Το όραμα των ασύρματων επικοινωνιών

Το όραμα των ασύρματων επικοινωνιών το οποίο θα κατευθύνει την εξέλιξή τους τις επόμενες δεκαετίες αφορά τη δυνατότητα επικοινωνίας πολυμέσων από οπουδήποτε με χρήση κάποιας φορητής συσκευής [Goldsmith, 2005]. Με τον τρόπο αυτό θα είναι διαθέσιμες στον χρήστη υπηρεσίες, όπως αυτές που αναφέρθηκαν, αλλά και νέες που θα προκύψουν στο μέλλον. Οι διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με τις υπηρεσίες και την περιοχή κάλυψης έχουν ωστόσο οδηγήσει μέχρι σήμερα στην ανάπτυξη διαφορετικών συστημάτων και προτύπων, που αντιμετωπίζουν με διαφορετικό τρόπο τις ιδιαιτερότητες της κάθε ζεύξης. Ζητούμενη είναι η σύγκλιση των διαφορετικών τεχνολογιών, με τρόπο που να μπορεί ο χρήστης με την ίδια φορητή συσκευή να εξυπηρετείται από διαφορετικής τεχνολογίας δίκτυα κατά περίπτωση, διατηρώντας τη συνδεσιμότητά του.

Γενικά η τάση στην εξέλιξη των ασύρματων δικτύων μπορεί να συνοψιστεί σε τρεις άξονες [Molisch, 2011] α) υποστήριξη μιας μεγάλης ποικιλίας υπηρεσιών β) επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων μετάδοσης για υφιστάμενες υπηρεσίες και γ) υποστήριξη μεγαλύτερου αριθμού χρηστών

Για την επίτευξη του οράματος των μελλοντικών ασύρματων επικοινωνιών θα πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά αρκετά τεχνικά ζητήματα. Σε ότι αφορά το υλικό οι νέες συσκευές θα πρέπει να μπορούν να συνδυάσουν σε προσιτές οικονομικά υλοποιήσεις τη δυνατότητα δικτύωσης σε ετερογενή δίκτυα με διαφορετικές συχνότητες χωρίς ιδιαίτερες ενεργειακές απαιτήσεις για ενίσχυση της φορητότητας. Επίσης θα πρέπει να μπορούν να επεξεργαστούν τις ροές δεδομένων διαφορετικής τεχνολογίας με χρήση φτηνών ολοκληρωμένων. Η ανάγκη για υποστήριξη απαιτητικών εφαρμογών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης έρχεται σε αντιδιαστολή με το περιορισμένο φάσμα, αλλά και τις δυσκολίες που επιφυλάσσει ο ασύρματος διάυλος. Η αύξηση των χρηστών και η ολοένα αυξανόμενη απαίτηση σε φάσμα απαιτεί τη προσεκτική κατανομή των περιορισμένων πόρων και την εκμετάλλευση σύγχρονων και φασματικά αποδοτικών τεχνικών που θα αντιμετωπίζουν επίσης αποτελεσματικά τον τυχαίο χαρακτήρα του ραδιοδιαύλου και

τις παρεμβολές. Οι πολυσύνθετες αυτές απαιτήσεις ίσως καθιστούν αποτελεσματικότερη την κάθετη σχεδίαση με ενοποιημένη αντιμετώπιση όλων των στρωμάτων (cross-layer design) σε αντίθεση με την οριζόντια σχεδίαση ανά επίπεδο, που έχει επικρατήσει από τη σχεδίαση ενσύρματων δικτύων.

Κεφάλαιο 2.

Τεχνικές σύγχρονων ασύρματων δικτύων.

2.1. Τεχνικές αύξησης της χωρητικότητας και άμβλυνσης διαλείψεων

Από τη σχέση (1.2) προκύπτει ότι οι περιοριστικοί παράγοντες στη χωρητικότητα του καναλιού είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Μάλιστα από τη σχέση (1.3) προκύπτει ότι υφίσταται ένα ελάχιστο όριο στην απαιτούμενη τιμή E_b / N_0 στο δέκτη, σε συνάρτηση της φασματικής απόδοσης. Αυτό σημαίνει πως αν η μετάδοση γίνεται με ρυθμό χαμηλότερο της χωρητικότητας υπάρχει πλεόνασμα της διαθέσιμης ισχύος, οπότε μπορεί να ελαττωθεί η ισχύς ή να μειωθεί το εύρος ζώνης. Στο θεωρητικό όριο της μετάδοσης με ρυθμό όσο η χωρητικότητα τότε η (1.3) γίνεται ισότητα. Το όριο αυτό είναι καθαρά θεωρητικό, καθώς δεν υποδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να επιτευχθεί, αλλά έχει αποδειχθεί ότι θα υφίσταται κάποιος τρόπος κωδικοποίησης, ώστε να επιτευχθεί. Στην πράξη τα σχεδιαζόμενα συστήματα χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές κωδικοποίησης καναλιού και διαμόρφωσης, ώστε να προσεγγίζουν κατά το δυνατό το θεωρητικό όριο του Shannon.

Θεωρώντας πως ένας τέτοιος τρόπος έχει βρεθεί, από τη σχέση (1.3) προκύπτει ότι για χαμηλές τιμές της φασματικής απόδοσης, μια μικρή αύξηση του ρυθμού μετάδοσης απαιτεί αντίστοιχης τάξης μεγέθους αύξηση στο λόγο E_b / N_0 . Αντίθετα σε υψηλές τιμές φασματικής απόδοσης μια μικρή αύξηση του ρυθμού μετάδοσης απαιτεί σημαντική αύξηση στο λόγο E_b / N_0 , με αποτέλεσμα αυτή να καθιστά την περαιτέρω αύξηση του ρυθμού μετάδοσης ανέφικτη, εκτός αν αυξηθεί το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Προκύπτουν έτσι δυο πιθανές περιοχές περιορισμού του ρυθμού μετάδοσης, μια για $q < 1$, οπότε ο περιορισμός οφείλεται στη διαθέσιμη ισχύ και μια για $q > 1$, όπου ο περιορισμός οφείλεται στο διαθέσιμο εύρος ζώνης [Dahlman et al., 2011]. Επομένως για αποδοτική σχεδίαση το διαθέσιμο εύρος ζώνης θα πρέπει να είναι περίπου της ίδιας τάξης μεγέθους, όσο ο υποστηριζόμενος ρυθμός μετάδοσης. Αντίστοιχα αποτελέσματα ισχύουν και στην περίπτωση καναλιών περιοριζόμενα από παρεμβολές.

Με δεδομένη ισχύ εκπομπής η λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να αυξηθεί με μείωση της απόστασης. Έτσι σε ένα κυψελωτό σύστημα με μείωση του μεγέθους του κελιού επιτυγχάνεται αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Άλλη μέθοδος αύξησης της λαμβανόμενης ισχύος είναι η χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης με κατάλληλη σύνθεση των λαμβανομένων σημάτων. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως διαφορική λήψη. Χρήση πολλαπλών κεραιών εκπομπής μπορεί να κατευθύνει τη διαθέσιμη ισχύ προς το δέκτη. Ωστόσο η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης με χρήση πολλαπλών κεραιών μπορεί να επιτευχθεί, όσο ο ρυθμός περιορίζεται από την ισχύ. Στην περιοχή περιορισμού από το εύρος ζώνης η περαιτέρω αύξηση με χρήση πολλαπλών κεραιών μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τεχνικές χωρικής πολυπλεξίας ή αλλιώς MIMO.

Η αύξηση του ρυθμού μετάδοσης χωρίς αύξηση του εύρους ζώνης, όταν διατίθεται κατάλληλη ισχύς, επιτυγχάνεται με χρήση υψηλότερης τάξης διαμόρφωσης. Με τον τρόπο αυτό μεγαλύτερες δυαδικές ακολουθίες σχηματίζουν σύμβολα, που αντιστοιχίζονται σε περισσότερες κυματομορφές, όσες τα πιθανά σύμβολα, οπότε με διατήρηση του ίδιου ρυθμού μετάδοσης συμβόλων επιτυγχάνεται υψηλότερος ρυθμός μετάδοσης. Η χρήση όμως διαμόρφωσης υψηλότερης τάξης κάνει τη μετάδοση πιο επιρρεπή στην επίδραση του θορύβου και των παρεμβολών, με αποτέλεσμα να απαιτείται υψηλότερη τιμή E_b / N_0 για την επίτευξη του ίδιου ρυθμού σφαλμάτων, σε συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα, όπου η αύξηση της φασματικής απόδοσης απαιτούσε αύξηση της διαθέσιμης ισχύος. Σε διαμόρφωση υψηλότερης τάξης ωστόσο, διατίθεται μεγαλύτερο περιθώριο κωδικοποίησης. Βέβαια έτσι περιορίζεται και ο διατιθέμενος ρυθμός λόγω της επιπλέον κωδικοποίησης. Προκύπτει λοιπόν πως για δεδομένο σηματοθορυβικό λόγο υπάρχει ένας βέλτιστος συνδυασμός διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που επιτυγχάνει την καλύτερη δυνατή φασματική απόδοση.

Η διάθεση μεγαλύτερου εύρους ζώνης αποτελεί τον πιο αποδοτικό τρόπο σε ότι αφορά τη διαθέσιμη ισχύ για την αύξηση του ρυθμού μετάδοσης. Η αύξηση του εύρους ζώνης όμως, πέρα από το γεγονός ότι αποτελεί ένα περιορισμένο πόρο του συστήματος, επιφέρει κάποιες επιπλέον επιπλοκές στη σχεδίαση του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Για το λόγο αυτό υφίστανται επίσης τεχνικές όπως η χρήση πολλαπλού φέροντος, που ενώ κάνουν χρήση μεγαλύτερου εύρους ζώνης για επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, συνδυάζουν πολλαπλές ζεύξεις μικρότερου εύρους ζώνης [Dahlman et al., 2011].

Η ύπαρξη διαλείψεων εξαιτίας της επίδρασης του ραδιοδιαύλου διαφοροποιεί σημαντικά το σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη, σε σχέση με την περίπτωση του καναλιού με προσθετικό λευκό θόρυβο (AWGN). Αντίστοιχα η χωρητικότητα του συστήματος εξαρτάται σημαντικά από την επίδραση του ραδιοδιαύλου με αποτέλεσμα οποιοδήποτε μέτρο αύξησης της χωρητικότητας του καναλιού να πρέπει να προσαρμοστεί στις επικρατούσες συνθήκες του ραδιοδιαύλου. Για το λόγο αυτό οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές αποσκοπούν στη βέλτιστη λήψη στο δέκτη σε περιβάλλον διαλείψεων, αλλά και σε συνδυασμό με τυχόν παρεμβολές και θόρυβο. Με τον όρο τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων περιγράφονται οι μέθοδοι εκείνες, που αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση της δυσμενούς επίδρασης του ραδιοδιαύλου. Οι τεχνικές αυτές συνοπτικά είναι:

- Διαφορική λήψη
- Έλεγχος Ισχύος
- Προσαρμοσμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση
- Μείωση ρυθμού μετάδοσης
- Χρήση ισοσταθμιστών
- Δέκτης Rake

Οι τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων σε συνδυασμό με τις τεχνικές που αποσκοπούν στην αύξηση της χωρητικότητας, όπως η χρήση πολλαπλού φέροντος, η τεχνολογία MIMO καθορίζουν το πλαίσιο των σύγχρονων χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών στις ασύρματες επικοινωνίες.

2.2. Διαφορική λήψη

Η ύπαρξη διαλείψεων εξαιτίας της επίδρασης του ραδιοδιαύλου διαφοροποιεί σημαντικά το σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη, σε σχέση με την περίπτωση του καναλιού με προσθετικό λευκό θόρυβο (AWGN). Αντίστοιχα η χωρητικότητα του συστήματος εξαρτάται σημαντικά από την επίδραση του ραδιοδιαύλου με αποτέλεσμα οποιοδήποτε τεχνική για βελτίωση της χωρητικότητας του καναλιού να πρέπει να προσαρμοστεί στις επικρατούσες συνθήκες του ραδιοδιαύλου. Για το λόγο αυτό οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές αποσκοπούν στη βέλτιστη λήψη στο δέκτη σε περιβάλλον διαλείψεων, αλλά και σε συνδυασμό με τυχόν παρεμβολές και θόρυβο. Μια από τις πιο αποτελεσματικές τεχνικές για άμβλυνση του φαινομένου των διαλείψεων είναι η διαφορική λήψη, δηλαδή ο συνδυασμός στο δέκτη σημάτων που

υφίστανται ανεξάρτητα το φαινόμενο των διαλείψεων. Αυτό γίνεται εφικτό καθώς σήματα που μεταδίδονται με διαφορετικό τρόπο υπόκεινται με διαφορετικά στις διαλείψεις, που με προϋποθέσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτουν ανεξάρτητα. Η διαφορετική μετάδοση μπορεί να επιτευχθεί με διαφορετικούς τρόπους, ώστε η διαφορική λήψη διακρίνεται σε

- Διαφορική λήψη χώρου (space diversity)
- Διαφορική λήψη συχνότητας (frequency diversity)
- Διαφορική λήψη πόλωσης (polarization diversity)
- Διαφορική λήψη χρόνου (time diversity)

Η διαφορική λήψη αποτελεί αποτελεσματική μέθοδο για την άμβλυνση των διαλείψεων που οφείλονται είτε στην πολυδιαδρομική διάδοση, είτε στη σκίαση, είτε στην απόσβεση λόγω βροχής. Ανάλογα με το κυρίαρχο φαινόμενο των διαλείψεων στην άμβλυνση του οποίου αποσκοπεί ένα σύστημα διαφορικής λήψης χρησιμοποιεί τεχνικές διαφορετικής κλίμακας. Αν στόχος είναι η άμβλυνση της πολυδιαδρομικής διάδοσης χρησιμοποιούνται τεχνικές μικροδιαφορισμού (microdiversity), διαφορετικά αν είναι της σκίασης ή απόσβεσης λόγω βροχής μακροδιαφορισμού (macrodiversity) [Goldsmith, 2005]. Η διαφορά είναι η γεωγραφική κλίμακα στην οποία τα φαινόμενα αυτά μεταβάλλονται. Για παράδειγμα η διαφορική λήψη χώρου μπορεί να επιτευχθεί με χρήση πολλαπλών κεραιών στο δέκτη ή στον πομπό. Σε ένα σύστημα μικροδιαφορισμού οι διαφορετικές κεραιές στον δέκτη μπορούν να ενσωματωθούν στην ίδια μονάδα, ενώ σε ένα σύστημα μακροδιαφορισμού απαιτείται συνεργασία των σταθμών λήψης, αφού οι κεραιές θα είναι γεωγραφικά διαχωρισμένες.

Σχετικά με τη διαφορική λήψη χώρου με χρήση πολλαπλών κεραιών στο δέκτη (receiver diversity), ανάλογα με τον τρόπο του συνδυασμού των σημάτων από τους διαφορετικούς κλάδους στο δέκτη διακρίνονται οι μέθοδοι

- Selection Combining (SC)
- Maximal Ratio Combining (MRC)
- Equal Gain Combining (EGC)

Το μέτρο που συνήθως χρησιμοποιείται για την περιγραφή της αποτελεσματικότητας της διαφορικής λήψης είναι η διαφοροποίηση της πιθανότητας διακοπής της υπηρεσίας (outage) και το κέρδος διαφορισμού (diversity gain). Λόγω του συνδυασμού των σημάτων η κατανομή $p(\gamma)$ του σηματοθορυβικού λόγου γ_D

του διαφορικού συστήματος είναι πιο ευνοϊκή από την περίπτωση του απλού κλάδου γ με αποτέλεσμα οι τιμές της μέσης πιθανότητας σφάλματος

$$\bar{P}_s = \int_0^{\infty} P_s(\gamma) p(\gamma) d\gamma \quad (2.1)$$

και της πιθανότητας διακοπής

$$P_{out} = P(\gamma \leq \gamma_0) = \int_0^{\gamma_0} p(\gamma) d\gamma \quad (2.2)$$

να είναι μικρότερες στην περίπτωση της διαφορικής λήψης ($\gamma = \gamma_D$). $P_s(\gamma)$ είναι η πιθανότητα σφάλματος σε AWGN κανάλι και γ_0 μια τιμή σηματοθορυβικού λόγου που χαμηλότερα αυτής η υπηρεσία διακόπτεται. Ο υπολογισμός των (2.1) και (2.2) ωστόσο δεν είναι εύκολος, αφού απαιτεί ολοκλήρωση της κατανομής πυκνότητας πιθανότητας $p(\gamma_D)$. Μια συστηματική μέθοδος με χρήση της ροπογεννήτριας συνάρτησης (MGF, Moment Generating Function) μπορεί να βρεθεί στο [Simon-Alouini, 2005].

Στη μέθοδο SC ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του δέκτη είναι ίσος με το μεγαλύτερο σηματοθορυβικό λόγο από όλους τους κλάδους. Στη μέθοδο MRC ο σηματοθορυβικός λόγος στην είσοδο του δέκτη είναι το άθροισμα των σηματοθορυβικών λόγων σε κάθε διαφορικό κλάδο, ενώ στη μέθοδο EGC οι διαφορικοί σηματοθορυβικοί λόγοι αθροίζονται με κοινό κέρδος. Η μέθοδος MRC πετυχαίνει το βέλτιστο αποτέλεσμα, ενώ ακολουθεί η EGC και τέλος η SC.

Στη διαφορική λήψη χώρου με χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό (transmitter diversity) αν ο πομπός γνωρίζει την κατάσταση του διαύλου (CSI, Channel State Information) τότε μπορεί να επιτύχει απόδοση ανάλογη με την τεχνική MRC, αποδίδοντας κέρδος σε κάθε κεραία εκπομπής ανάλογα με την κατάσταση του καναλιού. Ωστόσο η συνολική ισχύς του πομπού διαμοιράζεται στις χρησιμοποιούμενες κεραιές και γι' αυτό υστερεί σε σχέση με τη διαφορική λήψη στο δέκτη [Goldsmith, 2005]. Όταν η κατάσταση του καναλιού δεν είναι γνωστή μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Alamouti [Alamouti, 2006] για βελτιστοποίηση του κέρδους διαφορισμού.

2.3. Χρήση πολλαπλού φέροντος

Η σηματοδοσία πολλαπλού φέροντος αποτελεί μια πιθανή λύση, όταν είναι επιθυμητή η αύξηση του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης για υποστήριξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης, αλλά ταυτόχρονα η αποφυγή των δυσμενών επιπτώσεων από την επιλεκτικότητα του καναλιού στη συχνότητα. Όταν το εύρος ζώνης της εκπομπής είναι αρκετά μεγάλο οι παραδοσιακές τεχνικές της ισοστάθμισης στο δέκτη δεν είναι επαρκείς. Για το λόγο αυτό εκπέμπονται αντί ενός σήματος ευρείας ζώνης συχνοτήτων, πολλαπλά σήματα με μικρότερο εύρος ζώνης, πολυπλεγμένα στη συχνότητα, τα λεγόμενα και ως υπο-φέροντα (subcarriers). Ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης είναι ίσος με το άθροισμα των ρυθμών μετάδοσης από όλα τα υπο-φέροντα. Η τεχνική αυτή επιπλέον μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε υφιστάμενα συστήματα.

Ένα μειονέκτημα της τεχνικής πολλαπλών φερόντων είναι ότι η ανάγκη επαρκούς διαχωρισμού των υπο-φερόντων στο χώρο της συχνότητας επιδρά δυσμενώς στη συνολική φασματική απόδοση. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της εκπομπής πολλαπλών φερόντων είναι η εμφάνιση υψηλών διακυμάνσεων στη στιγμιαία ισχύ στο δέκτη, κάτι που επιδρά δυσμενώς στην απόδοση του ενισχυτή ισχύος στον πομπό [Dahlman et al., 2011].

2.4. OFDM

Η τεχνολογία OFDM είναι μια εξελιγμένη περίπτωση εκπομπής πολλαπλού φέροντος, που χρησιμοποιείται ευρέως σε σύγχρονα συστήματα, όπως LTE, WiMAX, DVB. Τα χαρακτηριστικά της μεθόδου OFDM είναι η χρήση μεγάλου αριθμού υπο-φερόντων και η τοποθέτηση τους εγγύτερα στο φάσμα συχνοτήτων για αύξηση της φασματικής απόδοσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνονται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης χωρίς τα μειονεκτήματα της χρονικής διασποράς του καναλιού και τη συνεπαγόμενη διασυμβολική παρεμβολή (ISI, Intersymbol Interference).

Θεωρώντας N υποφέροντα, τα οποία χρησιμοποιούν σύμβολα διάρκειας T , τότε το OFDM μιγαδικό σήμα βασικής ζώνης $x(t)$ στο διάστημα $mT \leq t < (m+1)T$ δίνεται από τη σχέση

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k^{(m)} e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (2.3)$$

όπου $x_k(t)$ το k -ιοστό διαμορφωμένο υποφέρων με συχνότητα $f_k = k\Delta f$ και $a_k^{(m)}$ το μιγαδικό σύμβολο διαμόρφωσης του k -ιοστού υποφέροντος στο χρονικό διάστημα $mT \leq t < (m+1)T$. Ο όρος OFDM οφείλεται στο ότι οποιαδήποτε δύο διαμορφωμένα υποφέροντα x_{k_1}, x_{k_2} είναι ορθογώνια, κατά τη χρονική διάρκεια του συμβόλου, δηλαδή

$$\int_{mT}^{(m+1)T} x_{k_1}(t)x_{k_2}^*(t) dt = 0, \quad k_1 \neq k_2 \quad (2.4)$$

Ο φυσικός πόρος του συστήματος στην περίπτωση της εκπομπής OFDM συνήθως απεικονίζεται στο επίπεδο χρόνου-συχνότητας, όπου η κατανομή γίνεται ανά υπο-φέρων και σύμβολο.

Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου οφείλεται στο ότι ο διαχωρισμός των πολλαπλών φερόντων οφείλεται στην ορθογωνιότητά τους, ώστε με ένα συσχετιστή στο δέκτη και ολοκλήρωση στη διάρκεια συμβόλου να επιτυγχάνεται ορθός διαχωρισμός και αποφυγή παρεμβολής των διαφορετικών σημάτων. Μάλιστα λόγω της δομής του σήματος η ύπαρξη συσχετιστή δεν είναι απαραίτητη, καθόσον τόσο η διαμόρφωση στον πομπό, όσο και η αποδιαμόρφωση στο δέκτη μπορούν εύκολα να υλοποιηθούν με τεχνικές ευθύ και αντίστροφου διακριτού μετασχηματισμού Fourier αντίστοιχα. Ωστόσο τυχόν διαταραχή της ορθογωνιότητας λόγω επίδρασης του καναλιού (χρονική διασπορά) θα οδηγούσε σε παρεμβολή μεταξύ των υπο-φερόντων, οπότε για το λόγο αυτό συνήθως χρησιμοποιείται στη διάρκεια συμβόλου ένα πρόθεμα (cyclic prefix). Η εισαγωγή του προθέματος ωστόσο μειώνει ανάλογα το ρυθμό μετάδοσης και προκαλεί απώλειες ισχύος και γι 'αυτό απαιτείται προσεκτική επιλογή της χρονικής διάρκειας του προθέματος. Η τεχνική OFDM παρουσιάζει επίσης το μειονέκτημα της διακύμανσης της στιγμιαίας ισχύος και για το λόγο αυτό μπορεί να εφαρμοσθούν μέθοδοι εκπομπής τόνων, προ-φιλτραρίσματος ή προ-κωδικοποίησης και επιπλέον εισαγωγής ψευδοτυχειότητας (scrambling).

2.5. Χρήση πολλαπλών κεραιών

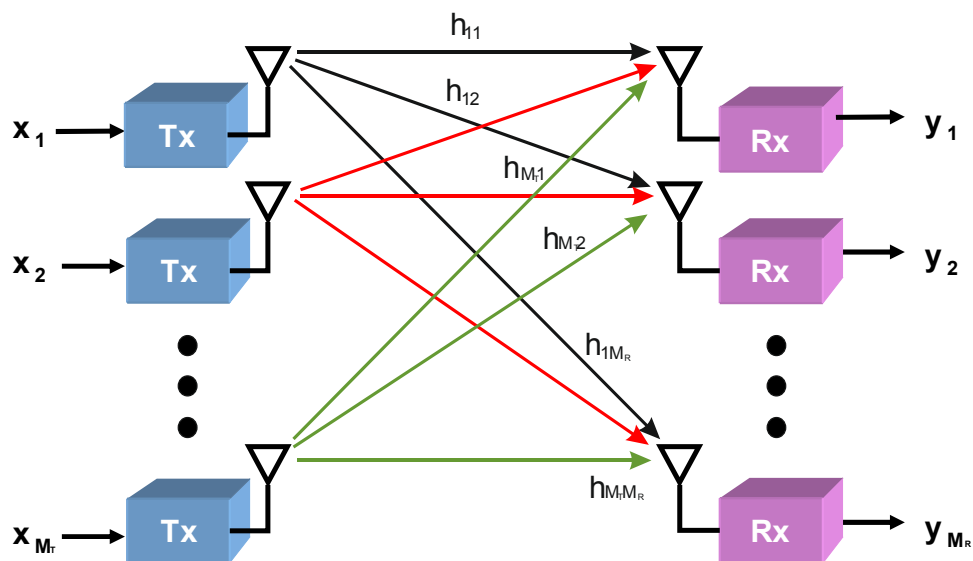
Η χρήση πολλαπλών κεραιών στον πομπό ή/και στο δέκτη αποτελεί μια πολύ ισχυρή τεχνική για βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών. Η τεχνική αυτή είναι ευρύτερα γνωστή ως MIMO (Multiple Input Multiple Output) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την αύξηση της

χωρητικότητας του συστήματος με εκμετάλλευση της χωρικής πολυπλεξίας, όσο και για βελτίωση της αξιοπιστίας με χρήση διαφορικής λήψης. Ειδικότερα η χρήση πολλαπλών κεραιών στον δέκτη ή/και στον πομπό ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη τεχνική προσφέρει πλεονεκτήματα σε σχέση με τη ζεύξη σημείου προς σημείο που μπορούν να περιγραφούν με τις εξής έννοιες:

- Κέρδος Κεραίας
- Κέρδος Διαφορισμού
- Χωρική Πολυπλεξία
- Περιορισμός παρεμβολών

2.6. Τεχνολογία MIMO

Ένα σύστημα MIMO αποτελούμενο από M_T κεραιές εκπομπής και M_R κεραιές λήψης φαίνεται στην Εικ. 11.



Εικ. 11 Σύστημα MIMO

Ένα στάσιμο σύστημα MIMO στενού εύρους ζώνης μπορεί να μοντελοποιηθεί από τη σχέση [Goldsmith, 2005]

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.5)$$

όπου $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_{M_T}]^T$ το M_T -διάστατο διάνυσμα του εκπεμπόμενου συμβόλου, $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_{M_R}]^T$ το M_R -διάστατο διάνυσμα του θορύβου και \mathbf{H} ο $M_R \times M_T$ πίνακας των μιγαδικών κερδών του καναλιού h_{ij} από την j κεραία εκπομπής στην i κεραία λήψης. Το σύστημα θεωρείται ότι καταλαμβάνει εύρος ζώνης B και ότι οι συνιστώσες θορύβου είναι ανεξάρτητες, κανονικές τ.μ. μηδενικής μέσης τιμής και διακύμανσης $N_0 B$. Το μοντέλο αναπαριστά το σύστημα για τη διάρκεια του συμβόλου. Η γνώση της κατάστασης του καναλιού (CSI), δηλαδή του πίνακα \mathbf{H} διαφοροποιεί την ανάλυση ανάλογα με το αν θεωρείται δεδομένη στο δέκτη ή/και στον πομπό ή όχι. Στην γενική περίπτωση θεωρείται μια από κοινού κανονική κατανομή για τα κέρδη των διαφορικών κλάδων, οπότε το μέσο διάνυσμα και ο πίνακας συνδιακύμανσης της κατανομής διαφοροποιούν ανάλογα την επικρατούσα κατάσταση του διαύλου. Κέρδος πολυπλεξίας στο σύστημα MIMO ονομάζεται η αύξηση στο ρυθμό μετάδοσης όταν στους διαφορικούς κλάδους μεταδίδεται ανεξάρτητη πληροφορία.

Στην περίπτωση που ο πίνακας \mathbf{H} είναι γνωστός τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη τότε με κατάλληλη επεξεργασία στον πομπό (precoding) και στο δέκτη (shaping) μπορούν να προκύψουν $n = M_T \times M_R$ ανεξάρτητα κανάλια. Αν ο πίνακας \mathbf{H} αναλύεται ως $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^H$ όπου \mathbf{S} ο διαγώνιος με στοιχεία τις ιδιοτιμές του \mathbf{H} και \mathbf{U}, \mathbf{V} τέτοιοι ώστε $\mathbf{U}\mathbf{U}^H = \mathbf{I}$ και $\mathbf{V}\mathbf{V}^H = \mathbf{I}$, τότε με εκπομπή του σήματος $\mathbf{x} = \mathbf{V}^H \tilde{\mathbf{x}}$ στον πομπό και μετασχηματισμό του λαμβανόμενου σήματος στο δέκτη ως $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{U}^H \mathbf{y}$ προκύπτει ότι $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{S} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{n}}$, όπου $\tilde{\mathbf{n}} = \mathbf{U}^H \mathbf{n}$.

Η χωρητικότητα ενός συστήματος MIMO είναι σαφώς υψηλότερη της αντίστοιχης ζεύξης σημείο προς σημείο σε βαθμό όμως που ποικίλει ανάλογα με τη διαθέσιμη γνώση της κατάστασης του καναλιού στο δέκτη ή/και στον πομπό. Στην περίπτωση του ντετερμινιστικού διαύλου της (2.5) θεωρώντας ότι τόσο ο δέκτης όσο και ο πομπός γνωρίζουν την κατάσταση του καναλιού, τότε η συνολική χωρητικότητα προκύπτει ως το άθροισμα των χωρητικότητων των ισοδύναμων ανεξάρτητων καναλιών και δίνεται από τη σχέση

$$C = B \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_{M_R} + \frac{\gamma}{M_T} \mathbf{H} \mathbf{R}_{xx} \mathbf{H}^H \right) \right] \quad (2.6)$$

όπου B το εύρος ζώνης, γ ο μέσος σηματοθορυβικός λόγος και \mathbf{R}_{xx} ο πίνακας συνδιακύμανσης της εκπεμπόμενης πληροφορίας.

Η τεχνική MIMO αποτελεί μια σύγχρονη και πολλά υποσχόμενη τεχνική που εμφανίσθηκε σχετικά πρόσφατα [Foschini, 1996], ενώ ήδη έχει χρησιμοποιηθεί σε πρότυπα ασύρματων δικτύων IEEE 802.11, 802.16, 802.20, 802.22, LTE κλπ. Σε ότι αφορά τις δορυφορικές επικοινωνίες μια εκτενής αναφορά στις δυνατότητες εφαρμογής της τεχνικής MIMO μπορεί να βρεθεί στο [Arapoglou et al., 2011].

Κεφάλαιο 3.

Μοντελοποίηση του Ραδιοδιαύλου

3.1. Γενικά

Στις ασύρματες επικοινωνίες το φυσικό κανάλι μετάδοσης της πληροφορίας είναι ο ραδιοδιάυλος ή ασύρματο κανάλι, δηλαδή ο χώρος μεταξύ του πομπού και του δέκτη. Τα χαρακτηριστικά του ασύρματου καναλιού μεταβάλλονται με τρόπο που εξαρτάται από τη συχνότητα και τον τρόπο μετάδοσης. πχ ραδιοζεύξεις οπτικής επαφής (LOS, Line Of Sight), μέσω ανάκλασης ή διάθλασης, δορυφορικές ζεύξεις κλπ [Stüber, 2001]. Ο ραδιοδιάυλος ωστόσο αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για την επίτευξη αξιόπιστων επικοινωνιών υψηλού ρυθμού μετάδοσης, καθόσον είναι εκτεθειμένος στο θόρυβο και τις παρεμβολές, αλλά και σε άλλους μηχανισμούς υποβάθμισης του λαμβανόμενου σήματος, οι οποίοι επιπλέον μεταβάλλονται χρονικά με απρόβλεπτο τρόπο [Goldsmith, 2005]. Η σχεδίαση φασματικά αποδοτικών ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων επιβάλλει επομένως τη λεπτομερή κατανόηση της επίδρασης του ραδιοδιαύλου [Stüber, 2001].

Οι ασύρματες ζεύξεις υλοποιούνται με τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών (H/M) κυμάτων από τον πομπό στον του δέκτη. Τα H/M κύματα ανάλογα με τη συχνότητα διαδίδονται με διαφορετικό τρόπο. Διακρίνονται σε ιονοσφαιρικά ή ουράνια κύματα, σε τροποσφαιρικά κύματα και σε κύματα εδάφους. Τα κύματα εδάφους είναι τα κύματα που μεταδίδονται κοντά στη γήινη επιφάνεια. Διακρίνονται σε κύματα επιφανείας και κύματα χώρου, ενώ τα κύματα χώρου διακρίνονται σε απευθείας, ανακλώμενα και περιθλώμενα . Επιπλέον παράμετροι εκτός από τη συχνότητα, που καθορίζουν τον επικρατέστερο τρόπο διάδοσης, είναι η απόσταση της διάδοσης, που εξαρτάται από την εκπεμπόμενη ισχύ, αλλά και το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας εκπομπής, καθώς και οι επικρατούσες ατμοσφαιρικές συνθήκες και ο περιβάλλον χώρος.

Τα ραδιοκύματα στις συχνότητες VLF (3-30 KHz) διαδίδονται αποκλειστικά ως κύματα εδάφους ακολουθώντας την καμπυλότητα της γης, παρέχοντας κάλυψη σε πολύ μεγάλες αποστάσεις πέραν του ορίζοντος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του φαινομένου της κυματοδήγησης της εκπεμπόμενης ενέργειας μεταξύ της ιονόσφαιρας και της γήινης επιφάνειας. Το μικρό διατιθέμενο εύρος ζώνης (27 KHz) δεν επιτρέπει

επικοινωνίες, παρά μόνο δεδομένων σε χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Τα κύματα VLF μπορούν να διεισδύουν στη θάλασσα μέχρι βάθους 10-40 m εξαρτώμενο από τη συχνότητα και την αλατότητα και γι' αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως στις επικοινωνίες υποβρυχίων. Στις συχνότητες LF (30 - 300 KHz) και MF (300 KHz - 3 MHz) τα κύματα διαδίδονται ως επί το πλείστον με κύματα εδάφους και σε ένα πολύ μικρό ποσοστό με ουράνια κύματα, ειδικά στις ψηλότερες συχνότητες. Εφαρμογές αποτελούν η μετάδοση ραδιόφωνου AM και η μετάδοση σημάτων συγχρονισμού. Στις συχνότητες HF (3-30 MHz) ο κύριος τρόπος μετάδοσης είναι μέσω ουράνιων σημάτων. Στις συχνότητες VHF (30-300 MHz) και UHF (300 MHz - 3 GHz) η διάδοση μέσω της ιονόσφαιρας είναι ιδιαίτερα περιορισμένη, καθώς σε συχνότητες μεγαλύτερες από 30 MHz τα κύματα δεν ανακλώνται από αυτήν. Ο κύριος τρόπος διάδοσης είναι μέσω κυμάτων εδάφους και συγκεκριμένα χώρου, απευθείας ή μέσω ανακλάσεων. Υφίστανται ωστόσο περιπτώσεις διάδοσης με τροποσφαιρικά κύματα, όταν οι συνθήκες ευνοούν. Οι συχνότητες αυτές είναι κατάλληλες για κινητές επικοινωνίες, καθώς το μέγεθος των κεραιών είναι μικρό και επιπλέον μπορούν να περιθλώνται από εμπόδια. Επίσης είναι δυνατές τεχνικές αναχρησιμοποίησης συχνότητας. Επιπλέον λόγω της δυνατότητας διείσδυσης της ιονόσφαιρας με μικρές απώλειες χρησιμοποιούνται ευρέως στις δορυφορικές επικοινωνίες. Στις συχνότητες SHF (3 - 30 GHz) και EHF (30 -300 GHz) απαιτείται σχεδόν αποκλειστικά οπτική επαφή πομπού και δέκτη, καθώς οι απώλειες διάδοσης είναι πολύ μεγάλες. Οι συχνότητες αυτές χρησιμοποιούνται για δορυφορικές επικοινωνίες και ασύρματα μικροκυματικά δίκτυα με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Δεν επηρεάζονται από την ιονόσφαιρα, ωστόσο τροποσφαιρικά φαινόμενα, όπως η βροχή, το χιόνι, κλπ, αλλά και φαινόμενα απορρόφησης από αέρια της ατμόσφαιρας αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους.

Στη διάδοσή τους τα ραδιοκύματα υφίστανται διάφορες επιδράσεις από τη γήινη επιφάνεια και την ατμόσφαιρα, ανάλογα με τον κύριο τρόπο μετάδοσης. Σημαντική επίδραση ανάλογα της συχνότητας και του τρόπου εκπομπής έχουν η μορφολογία της γήινης επιφάνειας, τα περιβάλλοντα αντικείμενα (κτίρια, δένδρα, οχήματα κλπ), η τροπόσφαιρα και η ιονόσφαιρα. Γενικά η επίδραση του ραδιοδιαύλου στο μεταδιδόμενο σήμα είναι πολλαπλή και γίνεται αισθητή με τις απώλειες διάδοσης και το φαινόμενο των διαλείψεων [Κανάτας et al., 2008]. Οι γενικοί μηχανισμοί διάδοσης εκτός της απευθείας συνιστώσας είναι η ανάκλαση (reflection), η περίθλαση (diffraction) και η σκέδαση ή διάχυση (scattering)

[Rappaport, 2001], [Κανάτας et al., 2008]. Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation), σύμφωνα με την οποία πολλαπλές εκδόσεις του εκπεμπόμενου σήματος καταφθάνουν στο δέκτη από διαφορετικές διαδρομές, όπου αθροίζονται διανυσματικά με αποτέλεσμα την αθροιστική ή αφαιρετική συμβολή τους. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις κινητές επικοινωνίες, όπου οι φάσεις των λαμβανόμενων εκδόσεων του σήματος μεταβάλλονται σημαντικά καθώς ο κινητός δέκτης μετακινείται σε αποστάσεις της τάξης του μήκους κύματος με αποτέλεσμα τις γρήγορες διακυμάνσεις στη λαμβανόμενη ισχύ, γνωστές και ως διαλείψεις μικρής κλίμακας. Οι απώλειες διάδοσης ή αλλιώς εξασθένιση είναι ο όρος που περιγράφει τη μείωση της μέσης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε συνάρτηση με την απόσταση πομπού-δέκτη. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας είναι διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος σε σχέση με τη μέση ισχύ όπως αυτή προκύπτει από τις απώλειες διάδοσης και οφείλονται σε σκίαση από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια. Η απόδοση των ασύρματων ζεύξεων επηρεάζεται επιπλέον σημαντικά από τον θόρυβο και τις παρεμβολές.

Η μετάδοση στις ασύρματες επικοινωνίες διέπεται από τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού (H/M), που περιγράφουν τη διάδοση των ραδιοκυμάτων. Οι εξισώσεις του Maxwell μέσω της κυματικής εξίσωσης περιγράφουν τη χωροχρονική κατανομή της H/M ενέργειας σε ένα δεδομένο περιβάλλον διάδοσης. Ωστόσο η αναλυτική επίλυση των εξισώσεων αυτών για τα δεδομένα χαρακτηριστικά μιας ζεύξης δεν είναι εφικτή λόγω του μεγάλου πλήθους των σκεδαστών και των άγνωστων παραμέτρων που διαμορφώνουν το περιβάλλον διάδοσης. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορα προσεγγιστικά μοντέλα κατάλληλα για δεδομένες συνθήκες, ενώ ιδιαίτερα χρήσιμες αποδεικνύονται οι μέθοδοι στατιστικής ανάλυσης. Τα υφιστάμενα στη διεθνή βιβλιογραφία μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν σε εμπειρικά, στατιστικά, αναλυτικά και υβριδικά [Κανάτας et al., 2008].

Γενικά με τον όρο μικροκύματα περιγράφονται τα ραδιοκύματα με συχνότητα στην περιοχή 300 MHz - 300 GHz ή ισοδύναμα με μήκος κύματος από 1m έως 1mm [Pozar, 2005]. Τα κύματα στην περιοχή EHF (30 - 300 GHz) με μήκος κύματος της τάξης του mm (10mm-1mm) λέγονται συχνά και χιλιοστομετρικά (mm waves). Τα μικροκύματα αποτελούν την κύρια περιοχή λειτουργίας των σύγχρονων επίγειων και δορυφορικών επικοινωνιακών συστημάτων, που αποτελούν και αντικείμενο της διατριβής. Για το λόγο αυτό η περιγραφή της επίδρασης του ραδιοδιαύλου που ακολουθεί εστιάζει στα μικροκύματα.

3.2. Χαρακτηρισμός του Κινητού Ραδιοδιαύλου

Ο ραδιοδιάυλος αποτελεί ένα χρονικά μεταβαλλόμενο γραμμικό στοχαστικό σύστημα. Η γραμμικότητα δικαιολογείται εξαιτίας της γραμμικότητας των εξισώσεων του Maxwell [Costa-Haykin, 2010], η χρονική μεταβολή εξαιτίας της μεταβολής στο χρόνο των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το ραδιοδιάυλο και η στοχαστικότητα λόγω του ότι η μεταβολή αυτή εκτελείται με τυχαίο τρόπο. Για λόγους απλότητας ενίοτε ο διάυλος περιγράφεται ως ντετερμινιστικό σύστημα οπότε θεωρείται ότι αντιστοιχεί σε μια πραγματοποίηση του στοχαστικού συστήματος, ενώ στην ουσία η στατιστική περιγραφή επιτυγχάνεται με βάση τις προσδοκώμενες τιμές στο σύνολο των πραγματοποιήσεων.

Στη γενική περίπτωση ενός LTV συστήματος η έξοδος $y(t)$ σε ένα σήμα εισόδου $x(t)$ δίνεται μέσω ενός ολοκληρωτικού μετασχηματισμού [Molisch, 2011]

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t') K(t, t') dt' \quad (3.1)$$

όπου $K(t, t')$ είναι ο πυρήνας του μετασχηματισμού που σχετίζεται με την απόκριση του συστήματος στο χρόνο t σε ένα κρουστικό παλμό που εφαρμόστηκε στον χρόνο t' . Αντί του πυρήνα $K(t, t')$ χρησιμοποιείται συχνά ο πυρήνας $h(t, \tau) = K(t, t - \tau)$ που σχετίζεται με την κρουστική απόκριση στο χρόνο t σε έναν παλμό που εφαρμόστηκε πριν χρόνο τ . Η απόκριση του συστήματος δίνεται από

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \tau) h(t, \tau) d\tau \quad (3.2)$$

Σε πολλές περιπτώσεις ενδιαφέρει η αναπαράσταση της συμπεριφοράς του διαύλου σε περισσότερες της μιας ζεύξης ταυτόχρονα, όπως στην περίπτωση των συστημάτων MIMO. Αν συμβολίσουμε με $h_{ij}(\tau, t)$ την κρουστική απόκριση βασικής ζώνης στην i κεραία λήψης εξαιτίας της εκπομπής της j κεραίας, τότε η επίδραση του διαύλου περιγράφεται από τον πίνακα $\mathbf{H}(\tau, t)$, που ορίζεται ως

$$\mathbf{H}(\tau, t) = \begin{bmatrix} h_{11}(\tau, t) & h_{12}(\tau, t) & \dots & h_{1M_T}(\tau, t) \\ h_{21}(\tau, t) & h_{22}(\tau, t) & \dots & h_{2M_T}(\tau, t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M_R 1}(\tau, t) & h_{M_R 2}(\tau, t) & \dots & h_{M_R M_T}(\tau, t) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Αν το εκπεμπόμενο σήμα από τη j κεραία εκπομπής είναι το $x_j(t)$, τότε το λαμβανόμενο σήμα στη i κεραία λήψης είναι αγνοώντας το θόρυβο

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^{M_T} h_{ij}(\tau, t) * x_j(\tau) \quad (3.4)$$

όπου με $*$ συμβολίζεται η συνέλιξη. Συνολικά το λαμβανόμενο σήμα δίνεται με συμβολισμό πινάκων από τη σχέση

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(\tau, t) * \mathbf{x}(\tau) \quad (3.5)$$

Ο πίνακας $\mathbf{H}(\tau, t)$ έχει ως στοιχεία τις κρουστικές αποκρίσεις για κάθε ζεύγος κεραίας εκπομπής-λήψης. Οι αποκρίσεις αυτές είναι στοχαστικές ανελίξεις, ωστόσο θεωρώντας μια συγκεκριμένη πραγματοποίηση, τότε ο πίνακας μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ντετερμινιστικός, προσέγγιση χρήσιμη στην κατανόηση των βασικών ιδιοτήτων των καναλιών MIMO.

Αν το κανάλι θεωρηθεί ως μη επιλεκτικό στη συχνότητα τότε το λαμβανόμενο σήμα δίνεται από τη σχέση

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) \quad (3.6)$$

Στην περίπτωση αργά χρονικά μεταβαλλόμενου καναλιού μπορεί να θεωρηθεί ότι το κανάλι παραμένει στάσιμο κατά τη διάρκεια ενός συμβόλου.

Στη συνέχεια για απλότητα περιοριζόμαστε στη μονοδιάστατη περίπτωση. Η απόκριση του συστήματος χαρακτηρίζεται έτσι σε δύο πεδία, στο πεδίο του χρόνου (time domain) που η μεταβολή της δείχνει τη χρονική μεταβολή του συστήματος και στο πεδίο της καθυστέρησης (delay domain) που για έναν δεδομένο χρόνο αναφοράς φαίνεται η χρονική εξάπλωση της κρουστικής απόκρισης. Ο μετασχηματισμός Fourier ως προς τη μεταβλητή τ οδηγεί στη χρονικά μεταβαλλόμενη συνάρτηση μεταφοράς (time variant transfer function)

$$H(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3.7)$$

ενώ ως προς τη μεταβλητή t δίνει τη συνάρτηση διασποράς καθυστέρησης και Doppler (Delay-Doppler spread function)

$$s(v, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t, \tau) e^{-j2\pi vt} dt \quad (3.8)$$

Ο διπλός μετασχηματισμός Fourier δίνει τη μεταβαλλόμενη κατά Doppler συνάρτηση μεταφοράς $B(v, f)$ (doppler variant transfer function), ενώ οι συναρτήσεις

αυτές συνδέονται μεταξύ τους με ευθείς και αντίστροφους μετασχηματισμούς Fourier.

Ο ασύρματος διάυλος ωστόσο αποτελεί ένα στοχαστικό χρονικά μεταβαλλόμενο γραμμικό σύστημα, οπότε στην περίπτωση αυτή η κρουστική του απόκριση είναι μια στοχαστική ανέλιξη. Η περιγραφή των ανελιξεων με βάση τα στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης βασίζεται στις συναρτήσεις συσχέτισης. Στην περίπτωση αυτή αν $R_h(t, t', \tau, \tau') = E[h(t, \tau)h^*(t', \tau')]$ είναι η συνάρτηση συσχέτισης της κρουστικής απόκρισης, τότε η αντίστοιχη συνάρτηση συσχέτισης $R_y(t, t')$ της εξόδου σε σχέση με αυτήν της εισόδου $R_x(t, t')$ δίνεται από τη σχέση [Molisch, 2011]

$$R_y(t, t') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R_x(t-\tau, t'-\tau') R_h(t, t', \tau, \tau') d\tau d\tau' \quad (3.9)$$

Αντίστοιχα οι συναρτήσεις $H(t, f)$, $s(v, \tau)$ και $B(v, f)$ αποτελούν επίσης στοχαστικές ανελιξεις που οι συναρτήσεις συσχέτισής τους μπορούν να προκύψουν από την ανέλιξη της κρουστικής απόκρισης με μετασχηματισμό Fourier.

Καθώς οι συναρτήσεις συσχέτισης εξαρτώνται από τέσσερεις μεταβλητές συνήθως θεωρούνται κάποιες υποθέσεις που βασίζονται στη φυσική συμπεριφορά του διαύλου και οδηγούν σε απλοποιημένα μοντέλα. Οι συνηθέστερες από τις υποθέσεις αυτές είναι η υπόθεση της στασιμότητας με την ευρεία έννοια (WSS, Wide-Sense Stationary) και η υπόθεση της ασυσχέτιστης σκέδασης (US, Uncorrelated Scatterers). Η υπόθεση WSS θεωρεί ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά του διαύλου δεν εξαρτώνται από τις εκάστοτε χρονικές στιγμές, αλλά μόνο από τη χρονική διαφορά μεταξύ τους, δηλαδή

$$R_h(t, t', \tau, \tau') = R_h(t-t', \tau, \tau') \quad (3.10)$$

Η υπόθεση αυτή βέβαια μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ότι αντιστοιχεί σε ένα ημι-στατικό κανάλι για περιορισμένο χώρο, αφού για ένα κινητό δέκτη η μέση λαμβανόμενη ισχύς δεν θα μένει σταθερή όπως προβλέπει το μοντέλο WSS, αλλά θα μεταβάλλεται καθώς αλλάζει θέση ως προς τον πομπό. Η υπόθεση αυτή αποδεικνύεται επίσης ισοδύναμη με την υπόθεση ανεξάρτητης επίδρασης του διαύλου σε διαφορετικές συχνότητες doppler, δηλαδή ότι ισχύει για την αυτοσυσχέτιση της $s(v, \tau)$ ότι $R_s(v, v', \tau, \tau') = P_s(v, \tau, \tau')\delta(v-v')$ και για την αυτοσυσχέτιση της $B(v, f)$ ότι $R_B(v, v', f, f') = P_B(v, f, f')\delta(v-v')$.

Η υπόθεση US θεωρεί ότι οι συνεισφορές στην απόκριση από διαφορετικές καθυστερήσεις είναι ανεξάρτητες, δηλαδή ότι

$$R_h(t, t', \tau, \tau') = P_h(t, t', \tau) \delta(\tau - \tau') \quad (3.11)$$

ή ισοδύναμα ότι $R_s(v, v', \tau, \tau') = P_s(v, v', \tau) \delta(\tau - \tau')$. Η φυσική ερμηνεία της υπόθεσης είναι ότι αν οι σκεδαστές είναι διασκορπισμένοι τυχαία στο χώρο τότε οι φάσεις των πολυδιαδρομικών συνιστωσών μεταβάλλονται ασυσχέτιστα μεταξύ τους. Η υπόθεση αποδεικνύεται ισοδύναμη με την στασιμότητα στο πεδίο της συχνότητας, δηλαδή $R_H(t, t', f, f') = R_H(t, t', f - f')$.

Ο συνδυασμός των δύο υποθέσεων οδηγεί στο απλουστευμένο μοντέλο WSSUS, στο οποίο η περιγραφή επιτυγχάνεται με χρήση δύο παραμέτρων. Μάλιστα καθώς ο μετασχηματισμός Fourier της συνάρτησης συσχέτισης μιας στάσιμης διαδικασίας είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος, στην περίπτωση των δύο παραμέτρων ο μετασχηματισμός ως προς τη μία οδηγεί σε μια φασματική περιγραφή της συχνότητας εξαρτώμενη από την άλλη παράμετρο. Επίσης με την εισαγωγή περαιτέρω υποθέσεων που αφορούν τις συναρτήσεις αυτές επιτυγχάνεται ο στατιστικός χαρακτηρισμός του διαύλου.

Η σημασία της χωρικής και χρονικής συσχέτισης των διαλείψεων έχει διερευνηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία εκτεταμένα. Ανάλογα με το υπό μελέτη είδος των διαλείψεων η χωρική και χρονική τους συσχέτιση επιδρά σημαντικά στην απόδοση των χρησιμοποιούμενων τεχνικών άμβλυνσης και κατ' επέκταση στην ποιότητα των ζεύξεων.

Η χωρική συσχέτιση των διαλείψεων αφορά τη χωρική δομή του τυχαίου πεδίου της απόσβεσης που προκαλεί το υπό μελέτη φαινόμενο. Έτσι τόσο η απόσβεση λόγω βροχής, όσο και οι διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης και λόγω σκίασης παρουσιάζουν χωρική συσχέτιση σε διαφορετικές ωστόσο κλίμακες. Η χρονική συσχέτιση των υπό μελέτη φαινομένων εισάγεται είτε λόγω κίνησης του χρήστη διαμέσω του τυχαίου πεδίου, είτε λόγω μεταβολής με το χρόνο του φαινομένου της διάλειψης. Στην πρώτη περίπτωση η χωρική συσχέτιση μετατρέπεται εύκολα σε χρονική λόγω της κίνησης, ενώ στη δεύτερη σημασία έχει ο φυσικός τρόπος χρονικής μεταβολής του φαινομένου. Έτσι στην απόσβεση λόγω βροχής η χρονική μεταβολή οφείλεται στα δυναμικά χαρακτηριστικά του φαινομένου της βροχής, ενώ στις διαλείψεις λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης και σκίασης στη

μεταβολή της σύνθεσης του ραδιοδιαύλου λόγω της μετακίνησης εμποδίων και σκεδαστών.

Η στατιστική περιγραφή του φαινομένου των διαλείψεων επιτυγχάνεται με χρήση των κατανομών που μοντελοποιούν τις διαλείψεις. Οι χρησιμοποιούμενες κατανομές αναφέρονται είτε στην παρατηρούμενη απόσβεση ως ελάττωση της λαμβανόμενης ισχύος (περίπτωση βροχής), είτε στην λαμβανόμενη ισχύς (πολυδιαδρομική διάδοση και σκίαση). Μια κατανομή μπορεί να περιγραφεί πλήρως στατιστικά με διάφορους ισοδύναμους τρόπους, ενώ οι συνηθέστεροι είναι μέσω της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας, ή μέσω της αθροιστικής συνάρτησης πιθανότητας ή μέσω των ροπών της. Όταν η περιγραφή γίνεται μέσω των ροπών της κατανομής για να περιγραφεί αυτή πλήρως θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι ροπές όλων των τάξεων, ωστόσο καθώς αυτό είναι πρακτικά αδύνατο, η περιγραφή περιορίζεται στη χρήση των πρώτων δύο ροπών. Μια τέτοια περιγραφή είναι επαρκής μόνο στην περίπτωση των κανονικών κατανομών, διαφορετικά αποτελεί μια πρακτική προσέγγιση. Γενικά η απόδοση των ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων σε περιβάλλον διαλείψεων περιγράφεται μέσω των εξής μεγεθών

- Σηματοθορυβικός λόγος (SNR, Signal-to-Noise Ratio, end to end)
- Μέσος σηματοθορυβικός λόγος (Average Signal-to-Noise Ratio, SNR)
- Πιθανότητα διακοπής (Outage Probability)
- Μέση πιθανότητα σφάλματος (Average Bit Error Probability, BEP)
- Ποσού διάλειψης (AF, Amount of Fading)
- Χωρητικότητα
- Μέση Διάρκεια Διαλείψεων (AOD, Average Outage Duration)
- Ρυθμός τμήσης στάθμης (LCR, Level Crossing Rate)

Από τα παραπάνω μέτρα απόδοσης η πιθανότητα διακοπής προκύπτει από την κατανομή της λαμβανόμενης ισχύος (ή σηματοθορυβικού λόγου), ενώ ο μέσος σηματοθορυβικός λόγος είναι η πρώτη ροπή της κατανομής (μέση τιμή). Η μέση πιθανότητα σφάλματος αποτελεί μια σχετικά δύσκολα υπολογιζόμενη παράμετρο [Simon-Alouini, 2005], αφού είναι μη γραμμική συνάρτηση του λαμβανόμενου σηματοθορυβικού λόγου και εξαρτάται από τις παραμέτρους διαμόρφωσης και εντοπισμού του συστήματος. Τα μέτρα αυτά αφορούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτης τάξης σε αντίθεση με το ποσό διάλειψης και τη μέση διάρκεια των διαλείψεων που προκύπτουν από τα στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης. Γενικά ως τάξη των στατιστικών χαρακτηριστικών ορίζεται ο αριθμός των τυχαίων

δειγμάτων που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό [Durgin, 2003]. Το ποσό διάλειψης αποτελεί μια κανονικοποιημένη δεύτερη ροπή του σηματοθορυβικού λόγου, ενώ η μέση διάρκεια διαλείψεων σχετίζεται άμεσα με την πιθανότητα διακοπής και το ρυθμό τμήσης στάθμης (LCR, Level Crossing Rate).

Εκτός από την τάξη των στατιστικών χαρακτηριστικών της διάλειψης (πρώτης ή δεύτερης τάξης συνήθως) σημασία έχει αν θεωρούνται τα στάσιμα ή δυναμικά χαρακτηριστικά της. Τα δυναμικά χαρακτηριστικά προκύπτουν όταν υπολογίζονται τα στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης που αφορούν δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές, οπότε περιγράφεται η χρονική μεταβολή του φαινομένου. Έτσι η μέση διάρκεια διαλείψεων αποτελεί αντικείμενο μελέτης των δυναμικών χαρακτηριστικών της διάλειψης και λαμβάνεται υπόψη η χρονική συσχέτιση. Αποκτούν σημασία στη σχεδίαση προσαρμοσμένων τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων, που ανταποκρίνονται στις μεταβολές του διαύλου και χαρακτηρίζουν την απόδοση συστημάτων διαφορικής λήψης στο χρόνο. Επίσης καθορίζουν τη μέση διάρκεια των διαλείψεων.

Τα στάσιμα χαρακτηριστικά προκύπτουν όταν οποιοσδήποτε αριθμός στατιστικών δειγμάτων αναφέρεται στην ίδια χρονική στιγμή. Η χωρική συσχέτιση υπεισέρχεται στην περιγραφή στάσιμων χαρακτηριστικών δεύτερης τάξης και πάνω. Στη στάσιμη περιγραφή δεύτερης τάξης θεωρούνται δύο δείγματα την ίδια χρονική στιγμή αλλά σε δύο διαφορετικά σημεία στο χώρο. Μια τέτοια μελέτη απαιτείται όταν εξετάζεται η απόδοση σχημάτων διαφορικής λήψης, ζεύξεων που αποτελούνται από πολλαπλά τμήματα (multi-hop) και γενικά η απόδοση συστημάτων MIMO.

Οι περιορισμένοι πόροι των ασύρματων δικτύων σε συνδυασμό με τις αυξημένες απαιτήσεις σε χωρητικότητα καθιστούν απαραίτητη την εφαρμογή αποδοτικών μεθόδων κατανομής των πόρων του συστήματος στους χρήστες. Ο γεωγραφικός διαχωρισμός των χρηστών, οι διαφορετικές συνθήκες του διαύλου στις οποίες υπόκεινται και οι διαφορετικές τους απαιτήσεις τους καθορίζουν ένα δυναμικό πεδίο εφαρμογής των μεθόδων κατανομής των πόρων, με αποτέλεσμα οι λειτουργίες αυτές στο επίπεδο διαχείρισης του δικτύου να πρέπει να εκτελούνται δυναμικά ανάλογα με την εκάστοτε κατάσταση του διαύλου και την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Η σωστή εκμετάλλευση της χωρο-χρονικής δομής του διαύλου αποτελεί απαραίτητο στοιχείο σε κάθε αλγόριθμο δυναμικής εκχώρησης των πόρων του συστήματος. Οι αλγόριθμοι αυτοί σχεδιάζονται με βάση τη βελτιστοποίηση κάποιας παραμέτρου που χαρακτηρίζει την απόδοση του συστήματος, με προϋπόθεση την ικανοποίηση

απαιτήσεων που αφορούν την ποιότητα των υπηρεσιών και λαμβάνοντας υπόψη τους διαθέσιμους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος, που πηγάζουν από την αρχιτεκτονική του και από τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές.

3.3. Επίδραση Ιονόσφαιρας

Η ιονόσφαιρα είναι το ιονισμένο τμήμα της ατμόσφαιρας που εκτείνεται σε ύψος περίπου από 15 km έως ένα άνω όριο που κυμαίνεται από 400 km έως περίπου 2000 km από την επιφάνεια της γης. Τα διάφορα στρώματα της ιονόσφαιρας που χαρακτηρίζονται ως D, E και F κατά αυξανόμενο υψόμετρο απορροφούν και ανακλούν τα ραδιοκύματα με συχνότητα μικρότερη των 30 MHz, οπότε δεν επιτρέπουν τη χρήση τους για δορυφορικές επικοινωνίες [Ippolito, 2008]. Αυξανόμενης της συχνότητας άνω των 30 MHz τα κύματα αρχίζουν να διαπερνούν την ιονόσφαιρα, επηρεαζόμενα σε διαφορετικό βαθμό. Γενικά η επίδραση της ιονόσφαιρας μικραίνει με την αύξηση της συχνότητας και άνω των 3 GHz θεωρείται αμελητέα. Σε συχνότητες χαμηλότερες των 300 MHz η ιονόσφαιρα επιτρέπει τη μετάδοση των ουράνιων ή ιονοσφαιρικών κυμάτων, που μεταδίδονται στη γήινη επιφάνεια με αναπήδηση μέσω της ιονόσφαιρας. Γενικά η επίδραση της ιονόσφαιρας είναι σημαντική σε δορυφορικές ζεύξεις σε συχνότητες μικρότερες των 3 GHz [Ippolito, 2008],[Κωττής-Καψάλης, 2006], όπως οι κινητές δορυφορικές επικοινωνίες και οι ζεύξεις τηλεμετρίας και ελέγχου.

Σημαντικά χαρακτηριστικά της ιονόσφαιρας που επηρεάζουν την επίδραση στα ραδιοκύματα είναι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων και ανωμαλίες κατά μήκος του ραδιοβήματος. Η πρώτη είναι υπεύθυνη για το φαινόμενο της περιστροφής Faraday, της καθυστέρησης ομάδας (group delay), της διασποράς, της μετατόπισης Doppler, της απορρόφησης και της αλλαγής στη γωνία πρόσπτωσης. Οι ανωμαλίες της τροπόσφαιρας προκαλούν το φαινόμενο των σπινθηρισμών (scintillation) [Ippolito, 2008]. Η ιονόσφαιρα ιονίζεται από την ηλιακή ακτινοβολία και αποτελείται από ηλεκτρόνια, θετικά φορτισμένα ιόντα και ουδέτερα μόρια. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιδρούν στη διάδοση των H/M κυμάτων δια μέσω της ιονόσφαιρας. Η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το υψόμετρο και προκαλείται έτσι μεταβολή στην πυκνότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων που

διαχωρίζει την ιονόσφαιρα σε στρώματα. Η πυκνότητα των ελευθέρων ηλεκτρονίων ποικίλει επίσης εκτός από το υψόμετρο, ανάλογα με το γεωμαγνητικό πλάτος, τον ημερήσιο κύκλο, τον ετήσιο κύκλο, τον ηλιακό κύκλο κλπ [Ippolito, 2008].

Το στρώμα D είναι το χαμηλότερο στρώμα της ιονόσφαιρας που εκτείνεται σε ύψος από 50 km έως 90 km με πυκνότητα ηλεκτρονίων μέγιστης τιμής $10^9/m^3$, η οποία μειώνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας. Το στρώμα D έχει μικρή επίδραση στους σπινθηρισμούς λόγω χαμηλής συγκέντρωσης ηλεκτρονίων, ωστόσο έχει σημαντική επίπτωση στην απόσβεση, γιατί η απόσβεση οφείλεται σε συγκρούσεις ηλεκτρονίων με ουδέτερα σωματίδια. Καθώς το στρώμα D είναι το χαμηλότερο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε ουδέτερα σωματίδια και μόρια με αποτέλεσμα υψηλή συχνότητα συγκρούσεων. Με τον τρόπο αυτό εξηγείται και το φαινόμενο της επίτευξης μεγάλων αποστάσεων διάδοσης HF συχνοτήτων κατά τη διάρκεια της νύχτας, που το στρώμα D εξαφανίζεται.

Το στρώμα E εκτείνεται σε ύψος από 90 km έως 140 km με συγκέντρωση ηλεκτρονίων που εξαρτάται από τον 11ετή ηλιακό κύκλο με ελάχιστη τιμή περίπου $10^{11}/m^3$ στο ελάχιστο του κύκλου και κατά 50% αυξημένη κατά το μέγιστο. Η συγκέντρωση ελαττώνεται κατά 100 φορές περίπου τη νύχτα. Το στρώμα E είναι το κύριο μέσο διάδοσης μέσω διάθλασης των ουράνιων κυμάτων στις συχνότητες HF. Διάφορα άλλα φαινόμενα τοπικών διαταραχών που εμφανίζονται στο στρώμα αυτό παρέχουν ευκαιριακές συνθήκες διάδοσης, που ωστόσο δεν είναι εκμεταλλεύσιμα, απεναντίας συνιστούν αιτία παρεμβολών.

Το στρώμα F είναι το στρώμα υψηλότερης συγκέντρωσης και την ημέρα διακρίνεται σε δύο στρώματα, το F1 και το F2. Το στρώμα F1 εξαφανίζεται το βράδυ, ενώ η μέγιστη περιεκτικότητά του σε ηλεκτρόνια κυμαίνεται από $1.5 \times 10^{11}/m^3$ έως $4 \times 10^{11}/m^3$ το απόγευμα, ανάλογα με τον ηλιακό κύκλο. Το στρώμα F2 έχει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση ηλεκτρονίων η οποία διατηρείται και τη νύχτα παρότι μειωμένη.

Μια από τις παραμέτρους από την τιμή της οποίας εξαρτάται η ένταση των παρατηρούμενων φαινομένων της διασποράς, της καθυστέρησης ομάδας και της περιστροφής Faraday είναι ο συνολικός αριθμός N_T των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά μήκος του ραδιοβήματος (TEC, Total Electron Content), που ορίζεται ως

$$N_T = \int_s n_e(s) ds \quad (3.12)$$

όπου με s συμβολίζεται το ραδιοβήμα και n_e η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων (el/m^3). Τρόποι προσδιορισμού της τιμής TEC παρέχονται στο [ITU-R Rec. P. 531-11, 2012].

Οι ιονοσφαιρικοί σπινθηρισμοί είναι γρήγορες μεταβολές του πλάτους και της φάσης του ραδιοκύματος, που οφείλονται σε διαταραχές της πυκνότητας ηλεκτρονίων της ιονόσφαιρας. Το φαινόμενο μπορεί να εμφανισθεί σε συχνότητες μέχρι 10 GHz, ενώ επηρεάζει σημαντικά τις ιονοσφαιρικές ζεύξεις σε συχνότητες μικρότερες των 3 GHz [ITU-R Rec. P. 531-11, 2012]. Οι σπινθηρισμοί εμφανίζονται εντονότερα στις πολικές περιοχές και σε περιοχές του ισημερινού, ενώ εμφανίζουν διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη παράμετρος χαρακτηρισμού των ιονοσφαιρικών σπινθηρισμών πλάτους είναι ο δείκτης S_4 , που ορίζεται στη σύσταση ITU-R P. 531-11 ως

$$S_4 = \left(\frac{E[I^2] - E[I]^2}{E[I]^2} \right)^{1/2} \quad (3.13)$$

όπου με $E[\cdot]$ συμβολίζεται η μέση τιμή και I είναι η στιγμιαία ισχύς του σήματος, ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους. Η ένταση των σπινθηρισμών ταξινομείται σε ασθενής, μέση ή ισχυρή με τιμές του δείκτη S_4 να κυμαίνονται στις περιοχές $S_4 < 0.3$, $0.3 < S_4 < 0.6$ και $S_4 > 0.6$ αντίστοιχα. Οι σπινθηρισμοί πλάτους θεωρείται ότι ακολουθούν κατανομή Nakagami, όπου η πυκνότητα πιθανότητας της έντασης I δίνεται από

$$p(I) = \frac{m^m}{\Gamma(m)} I^{m-1} \exp(-mI) \quad (3.14)$$

όπου η παράμετρος m συνδέεται με το δείκτη S_4 ως $m = 1/S_4^2$. Οι σπινθηρισμοί φάσης συνήθως μοντελοποιούνται με κανονική κατανομή μηδενικής μέσης τιμής.

3.4. Τροποσφαιρικά Φαινόμενα

Η τροπόσφαιρα είναι η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, που περιβάλλει τη γη από το έδαφος μέχρι ένα ύψος 10-20 km. Σε συχνότητες από 30 MHz μέχρι περίπου 3 GHz μπορούν να παρατηρηθούν ζεύξεις πέραν του ορίζοντος με φαινόμενα τροποσφαιρικής σκέδασης που οφείλονται σε ανωμαλίες του δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας [Ippolito, 2008]. Ωστόσο, σε συχνότητες άνω των 3 GHz τα

τροποσφαιρικά φαινόμενα αποτελούν τη κυριότερη αιτία υποβάθμισης των μικροκυματικών ζεύξεων [Κωττής-Καυάλης, 2006]. Τα περισσότερα δορυφορικά συστήματα ανήκουν στην κατηγορία αυτή, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων στις μπάντες C, Ku, Ka και V. Τα εν λόγω φαινόμενα είναι η απόσβεση λόγω βροχής, η απορρόφηση από τα αέρια της ατμόσφαιρας, η απόσβεση λόγω νεφών και φαινόμενα αποπόλωσης λόγω βροχής ή πάγου. Σε συχνότητες άνω των 10 GHz η βροχή μάλιστα αποτελεί τη σημαντικότερη αιτία διαλείψεων και υποβάθμισης της ζεύξης.

3.4.1. Απόσβεση λόγω βροχής

Σε συχνότητες άνω των 3 GHz η ύπαρξη βροχής κατά μήκος του ραδιοβήματος αποτελεί το καιρικό φαινόμενο με τη δυσμενέστερη επίπτωση στη ζεύξη, με την επίδρασή της να γίνεται ιδιαίτερα σημαντική σε συχνότητες πάνω από 10 GHz [Ippolito, 2008]. Η βροχή απορροφά και σκεδάζει μέρος της H/M ενέργειας με αποτέλεσμα να επιφέρει απόσβεση του λαμβανόμενου σήματος, ενώ η μη σφαιρική δομή των σταγόνων της βροχής προκαλεί αποπόλωση. Τα φαινόμενα εξαρτώνται από τη συχνότητα, την ένταση βροχόπτωσης, την κατανομή του μεγέθους των σταγόνων της βροχής, το σχήμα τους και σε χαμηλότερο βαθμό από την πίεση και θερμοκρασία του περιβάλλοντος [Ippolito, 2008].

Η δομή του μέσου βροχής επηρεάζει τα παρατηρούμενα φαινόμενα τόσο σε μακροσκοπική όσο και σε μικροσκοπική κλίμακα. Σε μικροσκοπική κλίμακα η κατανομή του μεγέθους των σταγόνων της βροχής και το σχήμα έχουν σημαντική επίδραση στην απόσβεση αλλά και στην αποπόλωση του σήματος. Γενικά η απόσβεση προκαλείται από σκέδαση και απορρόφηση της H/M ενέργειας από τις σταγόνες της βροχής, αλλά και τους λοιπούς υδρομετεωρίτες, όπως χιόνι, χαλάζι κλπ. Το σχήμα των σταγόνων δεν είναι σφαιρικό, με μέγεθος που ποικίλει, υπόθεση που επιβεβαιώνεται και από πειραματικές μετρήσεις [Pruppacher-Pitter, 1971], [Beard-Pruppacher, 1969]. Αντιπροσωπευτικές κατανομές του μεγέθους των σταγόνων μπορούν να βρεθούν στις εργασίες [Laws-Parsons, 1943], [Marshall-Palmer, 1948], [Ulbrich, 1983]. Η κατανομή των σταγόνων της βροχής (DSD, Drop Size Distribution) αναφέρεται στον αριθμό των σταγόνων της βροχής στη μονάδα όγκου $N(D)dD$, με διάμετρο στην περιοχή $[D, D + dD]$, αν υποθεθεί μια ισόογκη σφαιρική επιφάνεια ως το σχήμα τους. Η κατανομή του μεγέθους θεωρείται συνήθως ότι ακολουθεί την εκθετική κατανομή [Marshall-Palmer, 1948], [Waldvogel, 1974] ή την κατανομή

γόμα [Ulbrich, 1983]. Η κατανομή του μεγέθους συνδέεται με το ρυθμό βροχόπτωσης μέσω της οριακής ταχύτητας.

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης που προκαλούν οι σταγόνες της βροχής στη μονάδα μήκους, που ονομάζεται ειδική απόσβεση, έχουν ακολουθηθεί δύο μέθοδοι: μια αναλυτική με βάση το θεωρούμενο μέγεθος και σχήμα της σταγόνας με εφαρμογή της θεωρίας σκέδασης και μια προσεγγιστική με βάση την έκφραση της απόσβεσης συναρτήσει του ρυθμού βροχόπτωσης. Μετρήσεις έχουν δείξει ότι η ειδική απόσβεση μπορεί να προσεγγιστεί με τη σχέση

$$\gamma = kR^\alpha \quad (3.15)$$

όπου R η ένταση βροχόπτωσης σε mm/h και k, α σταθερές εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα [Olsen et al., 1978].

Η συνολική απόσβεση που παρατηρείται στο ραδιοκύμα όταν διέρχεται από μια περιοχή βροχής μήκους L επί του ραδιοβήματος εκφράζεται συναρτήσει της ειδικής απόσβεσης ως

$$A = \int_0^L \gamma dx \quad (3.16)$$

όπου γ είναι η ειδική απόσβεση λόγω βροχής, εκφραζόμενη σε dB/km και η ολοκλήρωση αναφέρεται στο μήκος L του ραδιοβήματος εντός της βροχής.

Σε μακροσκοπική κλίμακα η χωρική δομή της βροχής διακρίνεται σε στρωσιγενής βροχή και σε συνεκτικούς βροχοπυρήνες. Η στρωσιγενής βροχή είναι το είδος της βροχής που εμφανίζεται περισσότερο την άνοιξη και το φθινόπωρο, συνήθως σε μεσαία γεωγραφικά πλάτη και χαρακτηρίζεται από ομοιομορφία σε εκτεταμένη οριζόντια έκταση και ύψος μέχρι 4-6 km, χρονική διάρκεια που υπερβαίνει τη 1 ώρα και ένταση μικρότερη από 25 mm/h. Οι συνεκτικοί βροχοπυρήνες είναι περιοχές έκτασης μερικών χιλιομέτρων στις οποίες παρατηρείται υψηλή ένταση βροχόπτωσης για περιορισμένη χρονική διάρκεια. Οι βροχοπυρήνες μπορεί να είναι ανεξάρτητοι ή να ανήκουν σε σύστημα καταιγίδας και να κινούνται σύμφωνα με ένα διερχόμενο μέτωπο.

Λόγω της σημαντικής επίδρασης της βροχής στις μικροκυματικές ζεύξεις υφίστανται διάφορα μοντέλα με σκοπό τον υπολογισμό των στάσιμων στατιστικών παραμέτρων της απόσβεσης λόγω βροχής. Γενικά τα μοντέλα υπολογισμού της απόσβεσης λόγω βροχής μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες [Panagoroulos et al., 2005]. Στην πρώτη ανήκουν αυτά που με μεθόδους στατιστικής

προσαρμογής σε πειραματικά δεδομένα απόσβεσης καταλήγουν σε εμπειρικές εκφράσεις για την απόσβεση, που είναι όμως έγκυρες μόνο για δεδομένες περιοχές [Hodge, 1982]. Στη δεύτερη ανήκουν τα φυσικά μοντέλα τα οποία υπολογίζουν την απόσβεση μέσω της κατανόησης της δομής του μέσου βροχής και τα οποία μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε μέρος. Δύο από τα πιο διαδεδομένα και αντιπροσωπευτικά μοντέλα υπολογισμού της απόσβεσης λόγω βροχής είναι το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων και το μοντέλο της ITU-R.

Το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων [J. D. Kanellopoulos et al., 1990], [Κανελλόπουλος, 1999] λαμβάνει υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά της σημειακής έντασης βροχόπτωσης, όπως προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις ή βάσεις δεδομένων. Με βάση τις σχέσεις (3.15) και (3.16) και σύμφωνα με τη μακροσκοπική δομή του μέσου βροχής υπολογίζει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής. Η περιγραφή των βημάτων υπολογισμού περιλαμβάνεται στο παράρτημα Δ.

Το μοντέλο της ITU-R για την απόσβεση λόγω βροχής σε επίγειες ζεύξεις οπτικής επαφής περιλαμβάνεται στη σύσταση P. 530 [ITU-R Rec. P. 530-14, 2012]. Το μοντέλο είναι ημιεμπειρικό και βασίζεται στα στατιστικά στοιχεία της έντασης βροχόπτωσης, ενώ θεωρείται έγκυρο για συχνότητες μέχρι 100 GHz και αποστάσεις ζεύξεων μέχρι 60 Km. Το μοντέλο της ITU-R για την απόσβεση λόγω βροχής σε δορυφορικές ζεύξεις περιλαμβάνεται στη σύσταση P. 618 [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009]. Το μοντέλο είναι ημιεμπειρικό και βασίζεται στα στατιστικά στοιχεία της έντασης βροχόπτωσης και τη σχέση (3.15) της ειδικής απόσβεσης. Το μοντέλο εγκρίθηκε για πρώτη φορά το 1982 και έκτοτε έχει υποστεί διάφορες βελτιώσεις. Από το 1999 βασίζεται στο μοντέλο DAH (Dissanayake, Allnut, Haidara) [Dissanayake et al., 1997] [Ippolito, 2008]. Το μοντέλο αναπαράγει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής σε ετήσια βάση για ένα δεδομένο τόπο σε συχνότητες μέχρι 55 GHz. Η περιγραφή των βημάτων υπολογισμού περιλαμβάνεται στο παράρτημα Α.

Στον υπολογισμό των μοντέλων της ITU γίνεται χρήση και άλλων συστάσεων της ITU-R για τον υπολογισμό των απαιτούμενων παραμέτρων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η σύσταση P. 839 για τον υπολογισμό του μέσου ύψους μηδενικής θερμοκρασίας, η σύσταση P. 837 για τον υπολογισμό των στατιστικών της σημειακής έντασης βροχόπτωσης, η σύσταση P. 838 για τον υπολογισμό των συντελεστών υπολογισμού της ειδικής απόσβεσης και η σύσταση P. 841 για τη μετατροπή των

στατιστικών χαρακτηριστικών με βάση αυτά του χειρότερου μήνα (worst month). Η μέθοδος υπολογισμού των στατιστικών χαρακτηριστικών της σημειακής έντασης βροχόπτωσης σύμφωνα με τη σύσταση P. 837 βασίζεται σε χάρτες μετεωρολογικών παραμέτρων που έχουν προκύψει από την Ευρωπαϊκή Μετεωρολογική Βάση Δεδομένων (ECMWF) ERA-40. Η προτεινόμενη μέθοδος περιγράφεται στο Παράρτημα Β.

Γενικά στην περίπτωση που υφίστανται στατιστικά δεδομένα από μετρήσεις για τον τόπο ενδιαφέροντος σε διαφορετική γωνία ύψωσης ή συχνότητας από τις επιθυμητές τιμές, τότε είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν οι τιμές αυτές με την κατάλληλη μέθοδο κλιμάκωσης (scaling) ως προς τη γωνία ανύψωσης και τη συχνότητα αντίστοιχα [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009]. Η προτεινόμενη από ITU-R μέθοδος κλιμάκωσης στη συχνότητα των στάσιμων χαρακτηριστικών της απόσβεσης περιλαμβάνεται επίσης στη σύσταση ITU-R P. 618 και περιγράφεται στο παράρτημα Γ.

Τα ανωτέρω μοντέλα υπολογισμού της απόσβεσης λόγω βροχής αφορούν τον υπολογισμό της απόσβεσης λόγω βροχής μέσω της στατιστικής περιγραφής πρώτης τάξης. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει η περιγραφή της απόσβεσης μέσω των στατιστικών χαρακτηριστικών δεύτερης τάξης. Η περιγραφή αυτή βρίσκει εφαρμογές σε σχήματα διαφορετικής προστασίας και συστήματα με ζεύξεις πολλαπλών τμημάτων (multi-hop), που περιγράφονται με τη μελέτη των στάσιμων στατιστικών χαρακτηριστικών δεύτερης τάξης. Η δυναμική περιγραφή του φαινομένου της απόσβεσης χρησιμοποιείται για την έγκαιρη λήψη μέτρων από πλευράς διαχείρισης του δικτύου στα πλαίσια χρήσης τεχνικών άμβλυνσης της διάλειψης που προκαλεί η βροχή. Στις περιπτώσεις αυτές υπεισέρχεται ως βασική παράμετρος στους υπολογισμούς η χωρική και η χρονική συσχέτιση της απόσβεσης. Υφίσταται ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων στη βιβλιογραφία για τη μοντελοποίηση συστημάτων διαφορετικής προστασίας με βάση τη χωρική συσχέτιση της βροχής και της απόσβεσης. Το μοντέλο των συνεκτικών βροχοπυρήνων [J. D. Kanellopoulos et al., 1990], [Κανελλόπουλος, 1999] λαμβάνει υπόψη τη χωρική συσχέτιση της βροχής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περίπτωση διαφορεικών σχημάτων. Στις συστάσεις της ITU-R P. 530 και P.618 υφίσταται επίσης μέθοδος για τη μοντελοποίηση σχημάτων διαφορετικής προστασίας. Στη σύσταση P.618 συγκεκριμένα η προτεινόμενη περιλαμβάνεται μέθοδος υπολογισμού της απόσβεσης σε σχήμα διπλής διαφορετικής προστασίας βασίζεται στη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή.

Σε ότι αφορά τα δυναμικά μοντέλα σημαντική εργασία αποτελεί αυτή των [Maseng-Bakken, 1981], η οποία έχει υιοθετηθεί και από την ITU-R [ITU-R Rec. P. 1853-1, 2012]. Υφίσταται επίσης ένας σημαντικός αριθμός μεταγενέστερων δυναμικών μοντέλων. Λιγότερα στη διεθνή βιβλιογραφία είναι τα μοντέλα που συνυπολογίζουν τη χωρική και τη χρονική συσχέτιση. Τα χωρο-χρονικά μοντέλα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα στην επίλυση του προβλήματος ανάθεσης πόρων στα μικροκυματικά δίκτυα, στη σχεδίαση, αλλά και στην προσομοίωση των συστημάτων.

Αναφορικά με την απόσβεση λόγω βροχής η επίδραση τόσο της χρονικής όσο και της χωρικής συσχέτισης έχει μελετηθεί εκτεταμένα. Η χωρική συσχέτιση έχει χρησιμοποιηθεί στη μελέτη των στάσιμων χαρακτηριστικών, όπως η πιθανότητα διακοπής σε σχήματα διαφορετικής προστασίας. Στα συστήματα διαφορετικής προστασίας εκτός από αυτά που αφορούν τη χρήση δύο ή περισσότερων σταθμών (site diversity), έχουν μελετηθεί και συστήματα τροχιακής διαφορετικής προστασίας (orbital diversity) με χρήση δύο ή περισσότερων δορυφόρων [Matricciani, 1997], [Panagopoulos-Kanelloropoulos, 2002]. Διάφορα μοντέλα υφίστανται στη διεθνή βιβλιογραφία για τη στάσιμη από κοινού κατανομή της απόσβεσης λόγω βροχής. Η λογαριθμοκανονική κατανομή αποτελεί μια ευρέως αποδεκτή κατανομή για τη μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής επιβεβαιωμένη από ένα πλήθος πειραματικών μετρήσεων [Lin et al., 1980]. Στο [J. D. Kanelloropoulos-Koukoulas, 1987] χρησιμοποιήθηκε η από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή για την πρόβλεψη του διαφορικού κέρδους σε συστήματα τριπλής διαφορετικής προστασίας με την υπόθεση της αδέσμευτης λογαριθμοκανονικής κατανομής, ενώ στο [J. D. Kanelloropoulos-Ventouras, 1990] το μοντέλο επεκτάθηκε ώστε να λαμβάνει υπόψη και την περίπτωση της στρωσιγενούς βροχής. Στο [Panagopoulos-Kanelloropoulos, 2002] μελετήθηκε το κέρδος διαφορισμού της τριπλής τροχιακής διαφορετικής λήψης. Στο [Panagopoulos et al., 2007] μελετήθηκε η χρήση διπλής διαφορετικής προστασίας σε δίκτυο HAP. Στο [Sakarellos et al., 2010] λαμβάνεται υπόψη η χωρική συσχέτιση της βροχής για τη μελέτη της απόδοσης ενός συστήματος αναμετάδοσης με ζεύξη διπλού τμήματος (dual-hop). Στο [Karagiannis et al., 2012] μελετήθηκε το πλεονέκτημα της χρήσης διπλής τροχιακής διαφορετικής λήψης με χρήση HAP (High Altitude Platforms) για την περίπτωση της διαφορετικής λήψης με μεθόδους SC (Selection Combining) και MRC (Maximal Ratio Combining).

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής μελετήθηκαν στην ευρέως πλέον γνωστή εργασία των Maseng και Bakken [Maseng-Bakken, 1981] με

την εισαγωγή μιας δυναμικής παραμέτρου με σκοπό τη μελέτη της επίπτωσης της χρονικής καθυστέρησης στην εφαρμογή αποτελεσματικών μέτρων άμβλυνσης της προκαλούμενης διάλειψης σε απόκριση των αλλαγών του διαύλου. Η πρόβλεψη της δυναμικής συμπεριφοράς της απόσβεσης λόγω βροχής είναι πολύ σημαντική για τη σχεδίαση προσαρμοσμένων τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων, όπως ο έλεγχος ισχύος (PC – Power Control) στην άνω (uplink) ή κάτω ζεύξη (downlink), η προσαρμοσμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση (AMC – Adaptive Modulation and Coding) και τα συστήματα διαφορικής λήψης (diversity), που περιλαμβάνουν χρονική διαφορική λήψη (TD – Time Diversity), διαφορική λήψη στη συχνότητα (FD – Frequency Diversity), επίγεια χωρική διαφορική λήψη (SD – Site Diversity) και τροχιακή διαφορική λήψη (OD – Orbital Diversity). Η εργασία των Maseng και Bakken θα παρουσιαστεί αναλυτικότερα στη συνέχεια, ωστόσο αποτέλεσε σταθμό στη χρήση δυναμικών μοντέλων της απόσβεσης λόγω βροχής και την αφετηρία για ένα μεγάλο αριθμό ερευνητικών εργασιών. Το μοντέλο αυτό (M-B) έχει τροποποιηθεί με διάφορες εργασίες [Carrie et al., 2008], [Carrie et al., 2011] συμπεριλαμβανομένου της εισαγωγής μιας τιμής διόρθωσης (offset) στην απόσβεση, ενώ πρόσφατα έχει υιοθετηθεί από την ITU-R [ITU-R Rec. P. 1853-1, 2012]. Ωστόσο το μοντέλο M-B και οι διάφορες τροποποιήσεις του μέχρι τώρα αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη ζεύξη και για ένα συγκεκριμένο σημείο, ενώ δεν μοντελοποιούν τη χωρική συσχέτιση της απόσβεσης λόγω βροχής.

Διάφορα χωρο-χρονικά μοντέλα για την απόσβεση λόγω βροχής συναντώνται στη βιβλιογραφία [Grémont-Filip, 2004], [Manning, 1990], [Panagopoulos-Kanellopoulos, 2003]. Στα [Grémont-Filip, 2004] και [Jeannin et al., 2008] τα πεδία της βροχόπτωσης προκύπτουν με συγκεκριμένες υποθέσεις για τη χωροχρονική συνάρτηση συσχέτισης και την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου. Τα μοντέλα EXCELL [Capsoni et al., 1987], το HYCELL [Féral et al., 2003] και το MULTI-EXCELL [Luini-Capsoni, 2011] δεν αναπαραγάγουν τη χρονική εξέλιξη της βροχής [Bousquet et al., 2004]. Άλλες σημαντικές εργασίες στην προσομοίωση των συσχετισμένων χρονοσειρών μπορούν να βρεθούν στα [Bertorelli-Paraboni, 2005], [Cheffena et al., 2009],[Mauludiyanto et al., 2010]. Στο [Bertorelli-Paraboni, 2005] προτείνεται μια μέθοδος για την εξαγωγή χρονοσειρών σταθερής διάρκειας (1 ώρα) μέσω κατάλληλης επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων από τον ITALSAT. Στο [Cheffena et al., 2009] παρουσιάζεται ένα διακριτό μοντέλο, το οποίο παρέχει μια μέθοδο για την παραγωγή πολλαπλών συσχετισμένων χρονοσειρών απόσβεσης λόγω

βροχής, ενώ ένα παρόμοιο διακριτό μοντέλο μπορεί να βρεθεί στο [Mauludiyanto et al., 2010]. Και τα δύο μοντέλα έχουν προταθεί για μικροκυματικές ζεύξεις και έχουν επαληθευτεί συγκριτικά με πειραματικά δεδομένα από επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις.

Στα δορυφορικά δίκτυα με βάση το πρότυπο DVB-RCS στην κάτω ζεύξη χρησιμοποιείται τεχνική TDM, ενώ στην άνω ζεύξη MF-TDMA. Οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι κατανομής των πόρων του συστήματος αποσκοπούν έτσι στην κατανομή των χρονικών πλαισίων στους χρήστες στην κάτω ζεύξη και στην συνδυασμένη κατανομή εύρους ζώνης και χρονικών πλαισίων στην άνω ζεύξη. Η κατανομή αυτή γίνεται λαμβάνοντας υπόψη την απόσβεση λόγω βροχής που αποτελεί τον κυρίαρχο μηχανισμό διάλειψης στις χρησιμοποιούμενες συχνότητες στην μπάντα K_u και άνωθεν. Με βάση τη χωρο-χρονική δομή της απόσβεσης οι χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι μπορούν να βελτιστοποιηθούν στη φάση της σχεδίασης, αλλά και να δοκιμασθούν στη φάση του ελέγχου της απόδοσης. Έτσι στο [Petraki et al., 2008] έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο για τη χωρο-χρονική δομή του μέσου βροχής που προτάθηκε στο [Grémont-Filip, 2004], προκειμένου να εφαρμοσθεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος κατανομής των πόρων σε δίκτυα DVB-RCS. Στο [Anastasopoulos et al., 2009] έχει χρησιμοποιηθεί το ίδιο μοντέλο για τη χωρο-χρονική δομή του μέσου βροχής που προτάθηκε στο [Grémont-Filip, 2004], προκειμένου να εφαρμοσθεί σε προσομοιούμενα δεδομένα απόσβεσης ο προτεινόμενος αλγόριθμος καταστολής (suppression) των σημάτων ανατροφοδότησης (feedback signals) που κατακλύζουν τον δορυφορικό δέκτη σε δίκτυα πολυ-εκπομπής.

3.4.2. Απορρόφηση από αέρια

Η ατμόσφαιρα περιέχει τα εξής αέρια με τις αντίστοιχες περιεκτικότητες κατ' όγκο: οξυγόνο (21%), άζωτο (78%), αργόν (0.9%), διοξείδιο του άνθρακα (0.1%) και υδρατμούς. Η παρουσία των αερίων αυτών στην ατμόσφαιρα προκαλεί απόσβεση του μεταδιδόμενου σήματος εξαιτίας απορρόφησης ενέργειας από τα μόρια των αερίων σε κβαντικό επίπεδο. Η απόσβεση που προκαλείται εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη μερική πίεση των αερίων. Το φαινόμενο εμφανίζεται σε μια στενή περιοχή

συχνοτήτων συντονισμού. Στην περιοχή συχνοτήτων ενδιαφέροντος (<100 GHz) μόνο το οξυγόνο και οι υδρατμοί παρουσιάζουν σημαντική απορρόφηση. Οι υδρατμοί εμφανίζουν τη μέγιστη απορρόφηση σε συχνότητα περίπου 22 GHz και το οξυγόνο σε συχνότητα 60 GHz. Οι περιοχές συχνοτήτων ανάμεσα σε αυτές τις συχνότητες συντονισμού λέγονται ατμοσφαιρικά παράθυρα. Σε συχνότητες υψηλότερες των 60 GHz ενώ η απορρόφηση από το οξυγόνο μειώνεται, αυτή των υδρατμών αυξάνεται.

3.4.3. Απόσβεση λόγω νεφών και ομίχλης

Η επίδραση των νεφών και της ομίχλης στην απόσβεση αν και μικρότερη σε σχέση με αυτή της βροχής, ωστόσο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Τα νέφη και η βροχή αποτελούνται από μικρά σταγονίδια διαμέτρου μικρότερης από 0.1 mm. Νέφη σε μεγάλο ύψος αποτελούνται από παγοκρυστάλλους, που δεν επιδρούν ιδιαίτερα στην απόσβεση, όσο σε αποπόλωση του σήματος. Σε συχνότητες μικρότερες των 100 GHz η ομίχλη δεν επιδρά ιδιαίτερα στην απόσβεση του σήματος και μπορεί να αγνοηθεί.

3.4.4. Αποπόλωση λόγω βροχής και πάγου

Η αποπόλωση λόγω βροχής προκαλείται από το μη σφαιρικό σχήμα των σταγόνων. Επιπλέον τυχόν κεκλιμένος προσανατολισμός των σφαιροειδών σταγονιδίων λόγω ανέμου επιδρά περαιτέρω στην αποπόλωση του μεταδιδόμενου σήματος [Ippolito, 2008]. Η αποπόλωση που προκαλείται σε ένα γραμμικά πολωμένο κύμα εξαρτάται από τον προσανατολισμό της πόλωσης. Το φαινόμενο αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε συστήματα διπλής πόλωσης, που χρησιμοποιούν δύο ορθογώνια πολωμένα σήματα ίδιας συχνότητας, καθώς αποτελεί αίτιο διασταύρωσης της πόλωσης. Ύπαρξη παγοκρυστάλλων σε μεγάλα υψόμετρα προκαλεί επίσης φαινόμενα αποπόλωσης του σήματος [Arnold et al., 1980]. Μοντέλα εκτίμησης της αποπόλωσης λόγω των παγοκρυστάλλων μπορούν να βρεθούν στα [Bostian-Allnutt, 1979], [Tsolakis-Stutzman, 1983], [Papatsoris, 1997]

3.4.5. Τροποσφαιρικοί σπινθηρισμοί

Διακυμάνσεις στο δείκτη διάθλασης της τροπόσφαιρας προκαλούν σπινθηρισμούς στο διαδιδόμενο σήμα που εκδηλώνονται ως ταχείες μεταβολές περισσότερο του πλάτους, αλλά και της φάσης, της κατεύθυνσης διάδοσης και της πόλωσης του κύματος [Ippolito, 2008]. Το φαινόμενο παρουσιάζει εποχικές και ημερήσιες διακυμάνσεις και εξαρτάται από το τοπικό κλίμα. Επηρεάζει δίκτυα

οπτικής επαφής σε συχνότητες από 3 μέχρι 12 περίπου GHz, ενώ η επίδρασή του σε δορυφορικά δίκτυα μπορεί να εκτείνεται μέχρι τα 50 GHz. Ο δείκτης διάθλασης μπορεί να θεωρηθεί ότι μεταβάλλεται με λεπτά στρώματα, ομοιόμορφα κατά το οριζόντιο, οπότε ζεύξεις χαμηλής γωνίας ύψωσης επηρεάζονται δυσμενέστερα από τους τροποσφαιρικούς σπινθηρισμούς με ιδιαίτερα σημαντικές επιπτώσεις σε γωνίες μικρότερες από 10.

3.4.6. Διαλείψεις Μικρής Κλίμακας

Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας αφορούν το φαινόμενο της διακύμανσης της λαμβανόμενης ισχύος σε αποστάσεις συγκρινόμενες με το μήκος κύματος και οφείλονται στην πολυδιαδρομική διάδοση, δηλαδή στη λήψη πολλαπλών εκδοχών του μεταδιδόμενου σήματος τα οποία καταφθάνουν στο δέκτη από διαφορετικές διαδρομές, όπου και συντίθενται διανυσματικά. Λόγω του πλήθους των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης οι διαλείψεις μικρής κλίμακας περιγράφονται ως επί το πλείστον στατιστικά. Επιπλέον εξαιτίας της γραμμικότητας των εξισώσεων του Maxwell, που περιγράφουν τη διάδοση των Η/Μ κυμάτων χρησιμοποιούνται ευρέως όροι και έννοιες από τη θεωρία γραμμικών συστημάτων. Ο ντετερμινιστικός διάυλος στον οποίο τα μεγέθη ενδιαφέροντος δεν αναπαριστώνται με τυχαίες διαδικασίες αλλά με συναρτήσεις χρησιμοποιείται συχνά ως εισαγωγή στα φαινόμενα πολυδιαδρομικής διάδοσης.

Αν υποθέσουμε ότι ο πομπός εκπέμπει ένα αδιαμόρφωτο φέρον κύμα συχνότητας f_c και πλάτους E , τότε η χρονική μεταβολή του εκπεμπόμενου σήματος δίνεται από τη σχέση $E_{Tx}(t) = E \cos(2\pi f_c t)$. Σε ένα σημείο σε απόσταση d από τον πομπό με την παραδοχή της διάδοσης με επίπεδο κύμα, το λαμβανόμενο σήμα περιγράφεται από τη σχέση $E(t) = E_0 \cos(2\pi f_c t - k_0 d)$, όπου E_0 το μειωμένο πλάτος κατά τις απώλειες διάδοσης και $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ο κυματάρηθος, που περιγράφει τη μεταβολή της φάσης του επίπεδου κύματος ανά μονάδα μήκους διάδοσης. Απαλείφοντας τη χρονική εξάρτηση με χρήση μιγαδικού φασιθέτη το μιγαδικό σήμα βασικής ζώνης περιγράφεται ως $\tilde{E} = E_0 \exp(-jk_0 d)$.

Θεωρώντας τώρα ότι σε ένα σημείο αναφοράς καταφθάνουν δύο εκδόσεις του εκπεμπόμενου σήματος οι οποίες έχουν προκύψει από σκέδαση από περιβάλλοντα αντικείμενα, τότε το πλάτος και η φάση του κύματος έχουν υποστεί επιπλέον

μεταβολή από τη σκέδαση και έστω $\underline{E}_1 = E_{0,1} \exp(j\varphi_1)$ και $\underline{E}_2 = E_{0,2} \exp(j\varphi_2)$. Τότε σε ένα σημείο σε θέση r από το σημείο αναφοράς το λαμβανόμενο σήμα δίνεται από την υπέρθεση των δυο επίπεδων κυμάτων ως

$$\underline{E}(r) = \underline{E}_1 \exp(-jk_1 r) + \underline{E}_2 \exp(-jk_2 r) \quad (3.17)$$

όπου k_1, k_2 οι διανυσματική κυματάρθρωμοι με κατεύθυνση αυτή της διάδοσης και επιπλέον έχει θεωρηθεί ότι οι απώλειες διάδοσης από το σημείο αναφοράς στη θέση r είναι αμελητέες. Κάτι τέτοιο είναι αποδεκτό αν θεωρηθούν τα σημεία σε αποστάσεις 10λ από το σημείο αναφοράς [Molisch, 2011]. Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης είναι η ύπαρξη σημείων στα οποία το λαμβανόμενο σήμα αποκτά ελάχιστη τιμή λόγω της διαφοράς φάσης των συμβαλλόμενων κυμάτων.

Στην περίπτωση που οι σκεδαστές, ο πομπός και ο δέκτης είναι ακίνητοι το φαινόμενο είναι καθαρά χωρικό. Στην Εικ. 12 φαίνεται η χωρική μεταβολή της περιβάλλουσας σε μια περιοχή πλάτους 10λ περίξ του σημείου αναφοράς στο κέντρο των αξόνων για την περίπτωση της συμβολής δύο επιπέδων κυμάτων συχνότητας $f = 1$ GHz. Ωστόσο αν υποθεθεί ότι ο δέκτης κινείται με ταχύτητα v τότε η χωρική μεταβολή μετατρέπεται σε χρονική και η στιγμιαία τιμή του λαμβανόμενου σήματος στον κινητό δέκτη περιγράφεται ως

$$E(t) = \text{Re} \{ \underline{E}_1 \exp(-jk_1 vt) \exp(j2\pi ft) + \underline{E}_2 \exp(-jk_2 vt) \exp(j2\pi ft) \} \quad (3.18)$$

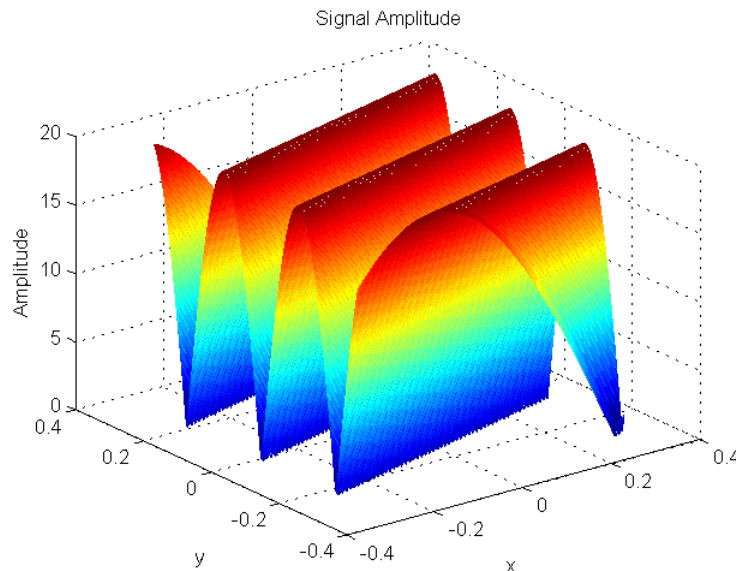
Ο φασιθέτης του λαμβανόμενου σήματος δίνεται δηλαδή από το άθροισμα των δύο χρονικά μεταβαλλόμενων φασιθετών, σύμφωνα με την κίνηση του δέκτη. Η σχέση (3.18) ωστόσο μπορεί να γραφεί και ως

$$E(t) = \text{Re} \{ \underline{E}_1 \exp(j2\pi f_1 t) + \underline{E}_2 \exp(j2\pi f_2 t) \} \quad (3.19)$$

όπου $f_1 = f - f_{d1}$, $f_2 = f - f_{d2}$ και f_{d1} , f_{d2} οι μετατοπίσεις Doppler, που δίνονται από τη σχέση $f_{di} = \frac{\underline{k}_i \cdot \underline{v}}{|\underline{k}_i|} \cdot \frac{1}{\lambda} = \frac{|\underline{v}_{pi}|}{\lambda} = v_{\max} \cos(\gamma_i)$, $i = 1, 2$, με v_{pi} την προβολή του ανύσματος της ταχύτητας στην κατεύθυνση διάδοσης του κάθε κύματος και $v_{\max} = \frac{|\underline{v}|}{\lambda}$, ενώ γ_i η γωνία των ανυσμάτων \underline{v} και \underline{k}_i .

Δηλαδή η χρονική μεταβολή του καναλιού του κινητού δέκτη περιγράφεται με τη μετατόπιση συχνότητας Doppler, που είναι υπεύθυνη για τη μεταβολή της φάσης του κάθε λαμβανόμενου επίπεδου κύματος. Το συνολικά λαμβανόμενο σήμα από τη

συμβολή των δύο κυμάτων δεν προκύπτει πλέον από άθροισμα φασιθετών, καθώς αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες, αλλά από το άθροισμα των στιγμιαίων τιμών.



Εικ. 12 Χωρική μεταβολή της περιβάλλουσας από υπέρθεση δύο επίπεδων κυμάτων

Στην πραγματικότητα σε περιβάλλον πολυδιαδρομικής διάδοσης ένας μεγάλος αριθμός από εκδοχές του σήματος καταφθάνουν στον δέκτη από διαφορετικές κατευθύνσεις. Το λαμβανόμενο σήμα στον κινητό δέκτη μπορεί να παρασταθεί ως

$$E(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=1}^N |E_i| \exp(\varphi_i + 2\pi ft - 2\pi v_{\max} \cos(\gamma_i) t) \right\} \quad (3.20)$$

όπου $\tilde{E}_i = |E_i| \exp(\varphi_i)$ και αφού οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες προκύπτουν από την εκπομπή δεδομένης ισχύος του πομπού θα πρέπει $\sum_{i=1}^N |E_i|^2 = C$, με C σταθερά για τη δεδομένη περιοχή, που θεωρούμε σταθερές απώλειες διάδοσης [Molisch, 2011].

Παραλείποντας τη χρονική εξάρτηση με χρήση μιγαδικών σημάτων βασικής ζώνης το λαμβανόμενο σήμα γράφεται και ως

$$\tilde{E}(t) = \sum_{i=1}^N |E_i| \exp(\varphi_i - 2\pi v_{\max} \cos(\gamma_i) t) = I(t) + jQ(t) \quad (3.21)$$

όπου $I(t)$ και $Q(t)$ τα πραγματικά βασικής ζώνης σήματα της συμφασικής και της ορθογώνιας συνιστώσας της μιγαδικής περιβάλλουσας, που δίνονται από τις σχέσεις

$$I(t) = \sum_{i=1}^N |E_i| \cos(\varphi_i - 2\pi\nu_{\max} \cos(\gamma_i) t) \quad (3.22)$$

και

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N |E_i| \sin(\varphi_i - 2\pi\nu_{\max} \cos(\gamma_i) t) \quad (3.23)$$

Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι ανάλογη του μέτρου της μιγαδικής περιβάλλουσας. Ωστόσο λόγω του πλήθους των πολυδιαδρομικών συνιστωσών ανεξάρτητα από την υποτιθέμενη κατανομή για τα πλάτη $|E_i|$, αν πληρούνται οι προϋποθέσεις του κεντρικού οριακού θεωρήματος Lindeberg-Fellner [Molisch, 2011], τότε προκύπτει ότι οι κατανομές των $I(t)$ και $Q(t)$ σε απουσία απευθείας συνιστώσας (LOS), είναι κανονικές (Gauss) μηδενικής μέσης τιμής. Από τον μετασχηματισμό $r(t) = \sqrt{I^2(t) + Q^2(t)}$ το πλάτος της περιβάλλουσας δίνεται από την κατανομή Rayleigh

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.24)$$

όπου σ^2 η κοινή διακύμανση των κανονικών τ.μ. $I(t)$ και $Q(t)$.

Στην περίπτωση ωστόσο που υφίσταται απευθείας μετάδοση, δηλαδή επίπεδο κύμα με ισχύ που υπερσχύει των υπολοίπων τότε οι κατανομές των $I(t)$ και $Q(t)$ δεν είναι πλέον μηδενικής μέσης τιμής. Τότε προκύπτει ότι η κατανομή του πλάτους της περιβάλλουσας δίνεται από την κατανομή Rice [Molisch, 2011]

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad (3.25)$$

όπου $I_0(x)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους, μηδενικής τάξης.

Υποθέτουμε τώρα ότι τη στιγμή $t=0$ ο δέκτης βρίσκεται στη θέση r και προς το παρόν τον θεωρούμε ακίνητο. Το λαμβανόμενο σήμα δίνεται από τη σχέση (3.17). Ισχύει

$$\frac{ur}{k_i r} = \frac{2\pi}{\lambda} r \cos(\alpha_i) = 2\pi f \frac{r \cos(\alpha_i)}{c} = 2\pi f \tau_i \quad (3.26)$$

όπου α_i η γωνία των ανυσμάτων \vec{k}_i , $r = |\vec{r}|$ και τ_i η χρονική διαφορά (time delay), που απαιτείται για το επίπεδο κύμα να φθάσει από το σημείο αναφοράς στο σημείο του δέκτη \vec{r} . Με χρήση της (3.26) στην (3.17) προκύπτει ότι το λαμβανόμενο σήμα δίνεται από

$$\vec{E} = \vec{E}_1 \exp(-j2\pi f \tau_1) + \vec{E}_2 \exp(-j2\pi f \tau_2) \quad (3.27)$$

και αφού το εκπεμπόμενο σήμα είναι αδιαμόρφωτο θεωρώντας αναπαράσταση βασικής ζώνης ως $\mathcal{S} \ll \Omega$ προκύπτει ότι το κανάλι ισοδυναμεί με ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο σύστημα (LTI, Linear Time Invariant) (Σημ: παρόλο που χρησιμοποιούμε ως είσοδο και έξοδο του συστήματος τα μιγαδικά σήματα βασικής ζώνης η απόκριση του συστήματος αναφέρεται σε απεριόριστο εύρος ζώνης και όχι στο ισοδύναμο βασικής ζώνης, δηλαδή στο ίδιο αποτέλεσμα θα καταλήγαμε με χρήση των ζωνοπερατών σημάτων εισόδου-εξόδου) με απόκριση συχνότητας

$$H(f) = \vec{E}_1 \exp(-j2\pi f \tau_1) + \vec{E}_2 \exp(-j2\pi f \tau_2) \quad (3.28)$$

Η κρουστική απόκριση του συστήματος είναι η

$$h(t) = \vec{E}_1 \delta(t - \tau_1) + \vec{E}_2 \delta(t - \tau_2) \quad (3.29)$$

η οποία περιγράφεται στο πεδίο της χρονικής καθυστέρησης και δείχνει τις δύο εκδοχές του σήματος που καταφθάνουν στο δέκτη με καθυστερήσεις τ_1, τ_2 αντίστοιχα. Το χαρακτηριστικό της μορφής αυτής της κρουστικής απόκρισης που είναι διεσπαρμένη στο χρόνο (time dispersive), είναι ότι συνδυάζεται με απόκριση συχνότητας που δεν είναι σταθερή στο πεδίο της συχνότητας. Προκαλούνται έτσι οι λεγόμενες επιλεκτικές στη συχνότητα διαλείψεις (frequency selective fading), αλλά και το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής (ISI, Inter-Symbol Interference). Ωστόσο στην περίπτωση της εκπομπής του αδιαμόρφωτου φέροντος τέτοια φαινόμενα δεν επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση εκπομπής σήματος στενού εύρους ζώνης (narrowband), όπου η απόκριση συχνότητας στη ζώνη ενδιαφέροντος μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Σε κάθε περίπτωση σε ένα σύστημα LTI με κρουστική απόκριση $h(t)$ και απόκριση συχνότητας $H(f)$ (συμβολίζουμε με $h(t) \xleftrightarrow{f} H(f)$ τα ζεύγη μετασχηματισμού Fourier) η απόκριση $y(t) \xleftrightarrow{f} Y(f)$ του συστήματος σε σήμα εισόδου $x(t) \xleftrightarrow{f} X(f)$ δίνεται στο πεδίο της συχνότητας ως $Y(f) = H(f)X(f)$ ή εναλλακτικά στο πεδίο

του χρόνου ως $y(t) = h(t) * x(t)$, όπου $*$ το σύμβολο της συνέλιξης. Όταν η κρουστική απόκριση δεν είναι διεσπαρμένη στο χρόνο, δηλαδή είναι ένας κρουστικός παλμός, τότε αρκεί μια μιγαδική σταθερά να περιγράψει το σήμα εξόδου ως $y(t) = h \cdot x(t)$, με $h(t) = h \cdot \delta(t)$.

Στην περίπτωση τώρα που ο δέκτης κινείται με ταχύτητα \dot{v} τότε ισχύει ότι

$$\dot{k}_i(r + vt) = 2\pi f \tau_i(t) = 2\pi f(\tau_i + \Delta\tau(t)) \quad (3.30)$$

δηλαδή η χρονική καθυστέρηση που κάνει το κύμα να φτάσει από το σημείο αναφοράς στη θέση του δέκτη εξαρτάται προφανώς από το χρόνο t . Ο χρονικά μεταβαλλόμενος φασιθέτης του λαμβανόμενου σήματος δίνεται από

$$\dot{E}(t) = \dot{E}_1 \exp(-j2\pi f \tau_1(t)) + \dot{E}_2 \exp(-j2\pi f \tau_2(t)) \quad (3.31)$$

που μπορεί να γραφεί συναρτήσει των μετατοπίσεων Doppler ως

$$\dot{E}(t) = \dot{E}_1 \exp(-j2\pi f_{d1}t - j2\pi f \tau_1) + \dot{E}_2 \exp(-j2\pi f_{d2}t - j2\pi f \tau_2) \quad (3.32)$$

Η κρουστική απόκριση του συστήματος εξαρτάται πλέον από το χρόνο και είναι της μορφής $h(t, \tau)$, δηλαδή το σύστημα είναι ένα γραμμικό χρονικά μεταβαλλόμενο σύστημα (LTV, Linear Time Variant). Στην περίπτωση τέτοιων συστημάτων χρησιμοποιούνται μέθοδοι της θεωρίας συστημάτων και των συναρτήσεων συστήματος του Bello [Bello, 1963].

Σημειώνεται ότι οι χρονικές καθυστερήσεις τ_i που έχουν χρησιμοποιηθεί από τη σχέση (3.26) αναφέρονται στα χρονικά διαστήματα που τα επίπεδα κύματα χρειάζονται για να φθάσουν από το σημείο αναφοράς στο σημείο του δέκτη. Η χρήση του σημείου αναφοράς έγινε καθόσον η περιγραφή με τους διανυσματικούς κυματάρθμους, όπως στις (3.17) και (3.18), έχει την ιδιαιτερότητα ότι ύστερα από κάθε αλληλεπίδραση με σκεδαστή το κύμα αλλάζει κατεύθυνση, οπότε απαιτήθηκε η επιλογή ενός σημείου αναφοράς πλησίον του δέκτη, ώστε τα κύματα να φθάνουν σε αυτόν χωρίς άλλη αλληλεπίδραση. Στην περίπτωση αυτή οι μιγαδικοί φασιθέτες \dot{E}_i αντιστοιχούν στο σήμα στο σημείο αναφοράς, δηλαδή περιλαμβάνουν την επίδραση της διάδοσης μέχρι εκεί καθώς και των σκεδαστών που παρεμβλήθηκαν. Ωστόσο η περιγραφή με τις χρονικές καθυστερήσεις είναι πιο βολικό να αναφέρεται στην καθυστέρηση που χρειάζεται πχ ένας κρουστικός παλμός να φθάσει στον δέκτη από το χρόνο εκπομπής του στον πομπό. Ανεξάρτητα από τον αριθμό των επιδρώντων σκεδαστών, αν υποθέσουμε ότι για μια πολυδιαδρομική διάδοση αυτός είναι $M - 1$,

με ενδιάμεσα σκέλη διάδοσης $R_j, j=1, \dots, M$ και με επίδραση από κάθε σκεδαστή περιγραφόμενη με το μιγαδικό συντελεστή $G_j, j=1..M-1$, τότε για εκπομπή αδιαμόρφωτου φέροντος \tilde{E}_{Tx} θα ισχύει για το λαμβανόμενο σήμα στον δέκτη ότι $\tilde{E} = \tilde{E}_{Tx} \exp(-j2\pi f\tau_1)G_1 \exp(-j2\pi f\tau_2)G_2 \dots G_{M-1} \exp(-j2\pi f\tau_M)$, που μπορεί να συμπυκνωθεί σε $\tilde{E} = \tilde{E}_{Tx}C \exp(-j2\pi f\tau)$, όπου $C = G_1 \dots G_{M-1}$ η συνολική επίδραση των σκεδαστών και τ ο συνολικός χρόνος διάδοσης από τον πομπό στον δέκτη.

Ο ντετερμινιστικός διάυλος αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την κατανόηση των βασικών μηχανισμών της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Στην πραγματικότητα ωστόσο η τυχαιότητα στην κατανομή των σκεδαστών αντιμετωπίζεται με στοχαστικό τρόπο και οι κρουστικές αποκρίσεις γίνονται στοχαστικές ανελίξεις. Η στατιστική περιγραφή επιτυγχάνεται μέσω των αντίστοιχων συναρτήσεων συσχέτισης.

3.4.7. Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας

Όταν υπολογισθεί η μέση τιμή του λαμβανόμενου σήματος σε μια μικρή περιοχή της τάξης 10λ , όπου λ το μήκος κύματος, τότε προκύπτει μια μέση ισχύς απαλλαγμένη από τις διακυμάνσεις των διαλείψεων μικρής κλίμακας, που προκαλούνται από την πολυδιαδρομική διάδοση και η οποία θεωρείται σταθερή και χαρακτηριστική για τη δεδομένη απόσταση από τον πομπό. Ωστόσο, καθώς η διάδοση απέχει από αυτή του ελευθέρου χώρου και εκτός των σκεδαστών στο χώρο υφίστανται επίσης εμπόδια, με μέγεθος συγκρινόμενο με αυτό του μήκους κύματος, τα οποία πολλές φορές σκιάζουν τη λήψη, έχει παρατηρηθεί ότι αν καταγραφεί αυτή η μέση τιμή για τη δεδομένη χαρακτηριστική απόσταση από τον πομπό, αυτή παρουσιάζει διακυμάνσεις σε σχέση με τη μέση τιμή. Το φαινόμενο των διακυμάνσεων αυτών λέγεται σκίαση (shadowing) και για έναν κινητό δέκτη εμφανίζεται με τη μορφή των διαλείψεων μεγάλης κλίμακας (LSF, Large Scale Fading). Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι το φαινόμενο της σκίασης μπορεί να μοντελοποιηθεί με τη λογαριθμοκανονική κατανομή.

Σε ότι αφορά το φαινόμενο της σκίασης έχει μελετηθεί ευρέως η επίδραση της συσχέτισης σε ότι αφορά:

- εκτέλεση μεταπομπών
- ισχύς παρεμβολών

➤ απόδοση διαφορικών σχημάτων

Στο [Alouini-Simon, 2002] υπολογίζονται ο μέσος σηματοθορυβικός λόγος, το ποσό διάλειψης και η πιθανότητα διακοπής για σχήματα διπλής διαφορικής προστασίας σε περιβάλλον συσχετισμένων λογαριθμοκανονικών διαλείψεων. Στο [Skraparlis et al., 2009] μελετάται η επίδραση της συσχέτισης στην πιθανότητα διακοπής σε δίκτυα με συνεργατική διαφορική λήψη (cooperative diversity). Η επίδραση της συσχέτισης της σκίασης στη πιθανότητα διακοπής σε δίκτυα με ζεύξεις πολλαπλών τμημάτων (multi-hop) όπως είναι τα δίκτυα αισθητήρων, τα αυτοκαθοριζόμενα δίκτυα και τα δίκτυα πλέγματος εξετάζεται στο [Agrawal-Patwari, 2009], όπου και προτείνεται ένα μοντέλο υπολογισμού της. Στο [Mukherjee-Avidor, 2001] εξετάζεται η επίδραση της συσχέτισης της σκίασης ως προς το μέσο ρυθμό εκτέλεσης μεταπομπών (handoff rate) τις οποίες υφίσταται ένας κινητός χρήστης κυψελωτού συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική δομή της σκίασης. Στο [Graziosi, 1999] εξετάζεται η επίδραση της συσχέτισης της σκίασης στη διάρκεια των διαλείψεων και στο ρυθμό εμφάνισης των διαλείψεων σε περίπτωση κινούμενου χρήστη και διαφορικής λήψης από δύο σταθμούς βάσης. Αλγόριθμοι μεταπομπής μελετήθηκαν επίσης στο [Agarwal-Holtzman, 1997] υπό περιβάλλον συσχετισμένης σκίασης. Στο [Butterworth et al., 2000] έχει μελετηθεί η επίδραση της συσχέτισης της σκίασης σε ότι αφορά το πρόβλημα της τοποθέτησης των σταθμών βάσης σε εσωτερικούς χώρους. Στο εξετάζεται η επίδραση της συσχέτισης της σκίασης στην ισχύ των παρεμβολών. Γενικά μια πιο πλήρης καταγραφή αναφορών σε εργασίες που μελετούν την επίδραση της συσχέτισης της σκίασης μπορεί να βρεθεί στο [Szyszkowicz et al., 2010]

Κεφάλαιο 4.

Πολυδιάστατο Χωρο-χρονικό Δυναμικό Μοντέλο Απόσβεσης λόγω Βροχής

4.1. Πρόλογος

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ένα νέο στοχαστικό δυναμικό μοντέλο της απόσβεσης λόγω βροχής σε πολλαπλές ζεύξεις. Το μοντέλο αποτελεί τη γενίκευση του γνωστού μοντέλου Maseng-Bakken σε n διαστάσεις. Ενσωματώνει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της χωρικής και χρονικής συμπεριφοράς της απόσβεσης λόγω βροχής και παρέχει αναλυτικές εκφράσεις της πιθανοθεωρητικής περιγραφής του φαινομένου. Αποτελείται από ένα σύστημα στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ), το οποίο εκτός από τη περιγραφή των συσχετισμένων ανελίξεων της απόσβεσης παρέχει ένα στέρεο μαθηματικό υπόβαθρο για τον υπολογισμό σημαντικών παραμέτρων που αφορούν τη σχεδίαση δορυφορικών συστημάτων. Τα στάσιμα στατιστικά χαρακτηριστικά (longterm) και τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής χρησιμοποιούνται για την παραμετροποίηση του μοντέλου, χωρίς περαιτέρω περιοριστικές υποθέσεις για το τυχαίο πεδίο της απόσβεσης. Το μοντέλο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή των συσχετισμένων χρονοσειρών της απόσβεσης σε πολλαπλές δορυφορικές ζεύξεις και ιδιαίτερα σε σχήματα διαφορικής λήψης, τόσο επίγειας όσο και τροχιακής. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου συγκριτικά με τα στάσιμα χαρακτηριστικά υφιστάμενων πειραματικών δεδομένων, για διαφορετικές ζεύξεις με ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Οι περιορισμοί και το πεδίο εφαρμογής του μοντέλου σε διάφορα σχήματα διαφορισμού αναφέρονται και παρουσιάζεται επίσης η ευαισθησία του μοντέλου ως προς τις κρίσιμες παραμέτρους.

4.2. Εισαγωγή

4.2.1. Γενικά

Οι δορυφορικές επικοινωνίες καταλαμβάνουν κύρια θέση στα σύγχρονα επικοινωνιακά συστήματα, παρέχοντας ευρυζωνική συνδεσιμότητα σε επίγεια ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα. Η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ακόμα και σε απλές εμπορικές εφαρμογές έχει οδηγήσει στη χρήση υψηλότερων συχνοτήτων της μπάντας Ku τόσο σε οικιακές δορυφορικές

υπηρεσίες (direct-to-home), όσο και σε μεγαλύτερα δίκτυα (backhaul networks). Ωστόσο σε αυτές τις περιοχές του φάσματος η επικοινωνία δυσχεραίνεται εξαιτίας τροποσφαιρικών φαινομένων [Crane, 1996], [Panagopoulos et al., 2004]. Η εξασθένηση λόγω βροχής είναι ο πρωτεύον μηχανισμός εξασθένησης του σήματος, ο οποίος μάλιστα επιδεικνύει σημαντική χωρική και χρονική διακύμανση [Crane, 1996]. Στα σύγχρονα δορυφορικά συστήματα, που η συχνότητα λειτουργίας είναι υψηλή (μπάντα Ku και άνω) η χρήση σταθερών περιθωρίων διάλειψης (FM - Fade Margins) δεν είναι οικονομοτεχνικά συμφέρουσα λύση για την άμβλυνση των διαλείψεων. Κατ' επέκταση άλλες τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων (FMT – Fade Mitigation Techniques) εφαρμόζονται από τους σχεδιαστές των συστημάτων, προκειμένου να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών (QoS – Quality of Service) στους χρήστες. Ωστόσο η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής άμβλυνσης διαλείψεων προϋποθέτει τη γνώση της κατάστασης του καναλιού (channel state information), όπως για παράδειγμα στα επιτυχημένα πρότυπα DVB-S2 [Morello-Mignone, 2006], DVB-RCS [ETSI, 2009].

Η πρόβλεψη της δυναμικής συμπεριφοράς της απόσβεσης λόγω βροχής είναι πολύ σημαντική για τη σχεδίαση προσαρμοσμένων τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων, όπως ο έλεγχος ισχύος (PC – Power Control) στην άνω (uplink) ή κάτω ζεύξη (downlink), η προσαρμοσμένη διαμόρφωση και κωδικοποίηση (AMC – Adaptive Modulation and Coding) και τα συστήματα διαφορικής λήψης (diversity), που περιλαμβάνουν χρονική διαφορική λήψη (TD – Time Diversity), διαφορική λήψη στη συχνότητα (FD – Frequency Diversity), επίγεια χωρική διαφορική λήψη (SD – Site Diversity) και τροχιακή διαφορική λήψη (OD – Orbital Diversity). Οι μέθοδοι αυτές υλοποιούνται μέσω ενός βρόχου ελέγχου που λαμβάνει υπόψη του τη διαθέσιμη πληροφορία για την κατάσταση της ζεύξης και μπορεί να επιλέξει τη βέλτιστη τακτική, προκειμένου να διατηρήσει τη διαθεσιμότητα της ζεύξης. Ωστόσο ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για την αντίδραση του συστήματος θα πρέπει να είναι μικρότερος από το χρόνο ανοχής που τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής επιτρέπουν. Αυτή η απαίτηση επιβάλλει τη γνώση των στατιστικών χαρακτηριστικών της απόσβεσης λόγω βροχής όχι μόνο αυτών της πρώτης τάξης, αλλά και των στατιστικών χαρακτηριστικών δεύτερης τάξης. Επιπλέον καθόσον πραγματικές χρονοσειρές απόσβεσης από πραγματικά δορυφορικά συστήματα δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες, εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σχεδίαση μοντέλα προσομοίωσης, ικανά να αναπαραγάγουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της βροχής.

Το μοντέλο Maseng-Bakken (M-B) [Maseng-Bakken, 1981], που θα περιγραφεί περισσότερο στη συνέχεια, είναι ένα στοχαστικό δυναμικό μοντέλο βασισμένο στην υπόθεση ότι η απόσβεση λόγω βροχής είναι μια Μαρκοβιανή στάσιμη στοχαστική ανέλιξη. Η Μαρκοβιανή ιδιότητα είναι η απλούστερη πιθανοθεωρητική υπόθεση, μετά τη στοχαστική ανεξαρτησία, που λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση από την πιο πρόσφατη παρατήρηση μόνο. Η φαινομενολογική περιγραφή που επιτυγχάνεται με τη χρήση μιας στοχαστικής διαφορικής εξίσωσης (ΣΔΕ) 1ης τάξης έχει αποδειχθεί συνεπής σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα [Lacoste et al., 2005],[Carrie et al., 2008],[Carrie et al., 2011]. Το μοντέλο M-B έχει τροποποιηθεί με διάφορες εργασίες [Carrie et al., 2008], [Carrie et al., 2011] συμπεριλαμβανομένου της εισαγωγής μιας τιμής διόρθωσης (offset) στην απόσβεση, ενώ πρόσφατα έχει υιοθετηθεί από την ITU-R [ITU-R Rec. P. 1853-1, 2012]. Ωστόσο το μοντέλο M-B και οι διάφορες τροποποιήσεις του μέχρι τώρα αναφέρονται σε μια συγκεκριμένη ζεύξη και για ένα συγκεκριμένο σημείο, ενώ δεν μοντελοποιούν τη χωρική συσχέτιση της απόσβεσης λόγω βροχής.

Διάφορα χωρο-χρονικά μοντέλα για την απόσβεση λόγω βροχής συναντώνται στη βιβλιογραφία [Grémont-Filip, 2004], [Manning, 1990], [Panagopoulos-Kanelloroulos, 2003]. Εξαιτίας του ότι η απόσβεση λόγω βροχής σχετίζεται άμεσα με την ένταση βροχόπτωσης, αρκετά από αυτά περιγράφουν την απόσβεση μέσω της περιγραφής της σημειακής έντασης βροχόπτωσης [Jeannin et al., 2008], ενώ άλλα περιγράφουν απευθείας την απόσβεση. Γενικά τα δισδιάστατα μοντέλα βροχόπτωσης μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες [Bousquet et al., 2004]. Στην πρώτη ανήκουν τα στοχαστικά μοντέλα, δηλαδή αυτά που περιγράφουν τη σημειακή ένταση βροχόπτωσης ως τυχαία μεταβλητή (τ.μ.). Σε αυτά περιλαμβάνονται και τα μοντέλα περιγραφής της βροχόπτωσης με φράκταλ ή με περιγραφή της συνάρτησης συνδιακύμανσης. Στα [Grémont-Filip, 2004] και [Jeannin et al., 2008] τα πεδία της βροχόπτωσης προκύπτουν με συγκεκριμένες υποθέσεις για τη χωροχρονική συνάρτηση συσχέτισης και την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι προσεγγίσεις στις οποίες η βροχόπτωση χωρίζεται σε ξεχωριστές περιοχές, τις κυψέλες. Τέτοια μοντέλα όπως το EXCELL [Capsoni et al., 1987], το HYCELL [Féral et al., 2003] και το MULTI-EXCELL [Luini-Capsoni, 2011] δεν αναπαραγάγουν ωστόσο τη χρονική εξέλιξη της βροχής [Bousquet et al., 2004]. Άλλες σημαντικές εργασίες στην προσομοίωση των συσχετισμένων χρονοσειρών μπορούν να βρεθούν στα [Bertorelli-Paraboni, 2005], [Cheffena et al.,

2009],[Mauludiyanto et al., 2010]. Στο [Bertorelli-Paraboni, 2005] προτείνεται μια μέθοδος για την εξαγωγή χρονοσειρών σταθερής διάρκειας (1 ώρα) μέσω κατάλληλης επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων από τον ITALSAT. Στο [Cheffena et al., 2009] παρουσιάζεται ένα διακριτό μοντέλο, το οποίο παρέχει μια μέθοδο για την παραγωγή πολλαπλών συσχετισμένων χρονοσειρών απόσβεσης λόγω βροχής, ενώ ένα παρόμοιο διακριτό μοντέλο μπορεί να βρεθεί στο [Mauludiyanto et al., 2010]. Και τα δύο μοντέλα έχουν προταθεί για μικροκυματικές ζεύξεις και έχουν επαληθευτεί συγκριτικά με πειραματικά δεδομένα από επίγειες μικροκυματικές ζεύξεις.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα νέο πολυδιάστατο μοντέλο για την πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής σε πολλαπλές ζεύξεις. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τη χωρική και χρονική διακύμανση της απόσβεσης. Είναι ένα συνεχές στοχαστικό δυναμικό μοντέλο, που μπορεί να θεωρηθεί ως η γενίκευση του γνωστού μοντέλου Maseng-Bakken σε διάσταση n και βασίζεται σε ένα σύστημα στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ). Αποτελεί εκτός από ένα χρήσιμο εργαλείο αναπαραγωγής συσχετισμένων χωροχρονικών ανελίξεων απόσβεσης λόγω βροχής σε n ζεύξεις, ένα γενικότερο θεωρητικό πλαίσιο για τον αναλυτικό υπολογισμό διάφορων χρήσιμων στατιστικών χαρακτηριστικών (πιθανότητες μετάβασης, διάρκεια διαλείψεων, φάσμα ετεροσυσχέτισης).

Για τον υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης θεωρούμε στασιμότητα στο χρόνο και χωρική ισοτροπία. Η χωρική συσχέτιση, οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι και οι δυναμικές παράμετροι αποτελούν τις απαιτούμενες εισόδους του μοντέλου, τα οποία μπορούν να εξαχθούν είτε από πειραματικά δεδομένα ή να εκτιμηθούν από υφιστάμενα φυσικά μοντέλα. Το μοντέλο είναι ευέλικτο και μπορεί να προσαρμοσθεί στην επιθυμητή χωρική συσχέτιση. Η εγγενώς συνεχής φύση του μοντέλου και η ικανότητα θεώρησης διάφορων μορφών χωρικής συσχέτισης διαφοροποιούν το μοντέλο από άλλες δημοσιευμένες εργασίες και το καθιστούν ένα μαθηματικά πλήρες και συνεπές θεωρητικό πλαίσιο, κατάλληλο για αναλυτικούς υπολογισμούς διάφορων χρήσιμων παραμέτρων. Επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης στο θεωρητικό του πλαίσιο και άλλων μηχανισμών διάλειψης που παρατηρούνται σε δορυφορικά και επίγεια δίκτυα.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιαστεί αρχικά το μοντέλο Maseng-Bakken συνοπτικά για λόγους πληρότητας της περιγραφής. Στη συνέχεια θα αναπτυχθεί το προτεινόμενο πολυδιάστατο μοντέλο, ενώ θα παρουσιαστούν και οι

αναλυτικοί πιθανοθεωρητικοί υπολογισμοί που δίνουν την πυκνότητα πιθανότητας μετάβασης. Τέλος το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιείται σε αριθμητικές εφαρμογές και συγκρίνεται σε σχέση με πειραματικά δεδομένα από χωρικά διαφορικά συστήματα τόσο επίγεια, όσο και τροχιακά με πολύ ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Τέλος παρουσιάζεται το εύρος της εφαρμογής του μοντέλου βάσει των συγκρίσεων με τα πειραματικά δεδομένα, καθώς και η ευαισθησία του μοντέλου στις κρίσιμες παραμέτρους.

4.2.2. Δυναμικό μοντέλο απόσβεσης Maseng-Bakken (μονοδιάστατο)

Το μοντέλο Maseng-Bakken (M-B) [Maseng-Bakken, 1981] περιγράφει τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής με την υπόθεση ότι η απόσβεση αποτελεί μια πρώτης τάξης διαδικασία Markov της μορφής

$$da(t) = K_{1a}(a)dt + dW_a(a) \quad (4.1)$$

όπου $dW_a(a)$ είναι μια ανέλιξη με ανεξάρτητες προσαυξήσεις η οποία ικανοποιεί τις $E\{dW_a | a\} = 0$ και $E\{|dW_a|^2 | a\} = K_{2a}(a)dt$, όπου οι K_{1a}, K_{2a} είναι ντετερμινιστικές συναρτήσεις της απόσβεσης a που αντιστοιχούν στις δύο πρώτες δεσμευμένες ροπές

$$K_{na}(a) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} E\{(a(t + \Delta t) - a(t))^n | a(t)\}, \quad n = 1, 2 \quad (4.2)$$

Η ανέλιξη της απόσβεσης μπορεί να παρασταθεί από την ανέλιξη Ito

$$da(t) = K_{1a}(a)dt + \sqrt{K_{2a}(a)}dB_t \quad (4.3)$$

όπου dB_t είναι η κίνηση Brown για την οποία ισχύει

$$E[dB_t] = 0 \quad \text{και} \quad E[dB_t^2] = dt \quad (4.4)$$

Δηλαδή

$$dW_a(a) = \sqrt{K_{2a}(a)}dB_t \quad (4.5)$$

Η πυκνότητα πιθανότητας $p(a, t)$ δίνεται κατά τα γνωστά από την εξίσωση Fokker-Planck

$$\frac{\partial p(a, t)}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial a^2} (K_{2a}(a)p(a, t)) - \frac{\partial}{\partial a} (K_{1a}(a)p(a, t)) \quad (4.6)$$

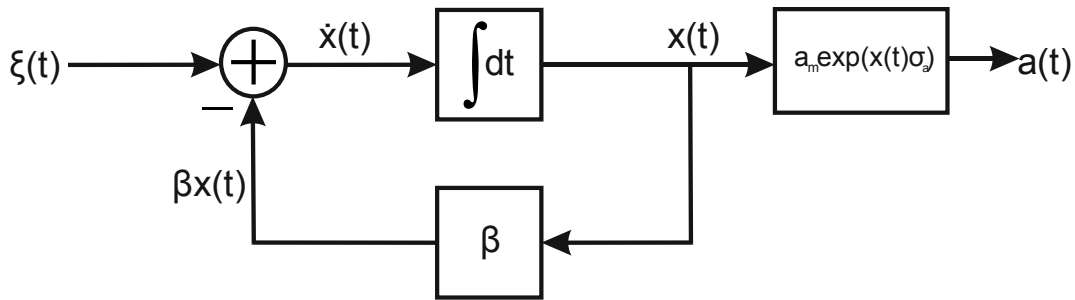
Με δεδομένο ότι ο τυχαίος ρυθμός αύξησης της απόσβεσης αυξάνεται με την τιμή της απόσβεσης, οι M-B πρότειναν την ακόλουθη τιμή για τη δεσμευμένη ροπή K_{2a}

$$K_{2a}(a) = 2\beta a^2 \sigma_{\ln a}^2 \quad (4.7)$$

Με δεδομένο τώρα ότι η στάσιμη κατανομή της απόσβεσης είναι λογαριθμοκανονική [Lin] η ροπή $K_{1a}(a)$ επιλέχθηκε έτσι, ώστε ο μετασχηματισμός $x(t) = \ln(a(t)/a_m)/\sigma_{\ln a}$ να οδηγεί στην πρώτης τάξης στοχαστική διαφορική εξίσωση Ornstein-Uhlenbeck της μορφής

$$dx = -\beta x dt + \sqrt{2\beta} dB_t \quad (4.8)$$

Στις ανωτέρω σχέσεις β είναι μια παράμετρος που περιγράφει τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης, ενώ $\sigma_{\ln a}$ και $\mu = \ln a_m$ είναι η τυπική απόκλιση και μέση τιμή της κανονικής τ.μ. $\ln a$.



Εικ. 13 Δομικό διάγραμμα μοντέλου Maseng-Bakken.

Συνοψίζοντας για το μοντέλο M-B στην περίπτωση της απλής ζεύξης παρατηρούμε ότι αφού η τ.μ. $\ln a$ είναι στάσιμη κανονική με παραμέτρους $\ln a_m$ και $\sigma_{\ln a}$ τότε η τ.μ. $\ln(a(t)/a_m)/\sigma_{\ln a}$ είναι τυποποιημένη κανονική $N(0,1)$. Με δεδομένο ότι η μόνη στοχαστική ανέλιξη που είναι ταυτόχρονα κανονική, στάσιμη και Markov είναι η ανέλιξη Ornstein-Uhlenbeck επιλέγεται η $\ln(a(t)/a_m)\sigma_{\ln a}$ να μοντελοποιείται με την $dx = -\beta x dt + \sqrt{2\beta} dB_t$.

Ο λογισμός Ito με δεδομένη την επιλογή $K_{2a}(a) = 2\beta a^2 \sigma_{\ln a}^2$ οδηγεί στην επιλογή $K_{1a}(a) = a\beta[\sigma_{\ln a}^2 - \ln(a/a_m)]$. Με τον τρόπο αυτό η ΣΔΕ $da(t) = K_{1a}(a)dt + \sqrt{K_{2a}(a)}dB_t$ μετασχηματίζεται με την αντικατάσταση $x(t) = \ln(a(t)/a_m)\sigma_{\ln a}$ στην $dx = -\beta x dt + \sqrt{2\beta} dB_t$.

Το μοντέλο M-B αντιστοιχεί σε ένα δυναμικό σύστημα που περιγράφεται με μια ΣΔΕ πρώτης τάξης και στο μη γραμμικό μετασχηματισμό, όπως φαίνεται στο

δομικό διάγραμμα της Εικ. 13. Στην ουσία δηλαδή το μοντέλο αντιστοιχεί σε ένα σύστημα που η είσοδος λευκού θορύβου διέρχεται από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο (Ornstein-Uhlenbeck) και στη συνέχεια υφίσταται τον μη γραμμικό μετασχηματισμό χωρίς μνήμη $a_m \cdot \exp[\sigma_a x(t)]$.

4.3. Πολυδιάστατο Δυναμικό μοντέλο για n ζεύξεις.

4.3.1. Εξαγωγή του μοντέλου

Έστω $a_i(t)$, $i = 1, \dots, n$ οι ανελίξεις της απόσβεσης λόγω βροχής (σε db) που παρατηρούνται σε n ζεύξεις. Οι αποσβέσεις αυτές είναι προφανώς συσχετισμένες. Έχει επαληθευτεί πειραματικά [J. D. Kanelloropoulos et al., 2000], [Panagoropoulos et al., 2002] ότι μπορεί να θεωρηθεί ότι ακολουθούν στάσιμη από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους σ_{a_i} , $\ln(a_{m_i})$ και πίνακα συνδιακύμανσης έστω \mathbf{C} . Αυτή η υπόθεση αποτελεί και μια από τις βασικές προϋποθέσεις του μοντέλου, που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Ο πίνακας συνδιακύμανσης \mathbf{C} περιέχει την πληροφορία της χωρικής δομής της απόσβεσης. Οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι σ_{a_i} , $\ln(a_{m_i})$ μπορούν να βρεθούν είτε από πειραματικά δεδομένα, είτε να υπολογιστούν από υπάρχοντα φυσικά μοντέλα, όπως αυτά που χρησιμοποιούν τη σημειακή ένταση βροχόπτωσης.

Προτείνουμε το πολυδιάστατο στοχαστικό μοντέλο της απόσβεσης υποθέτοντας ότι η ανυσματική ανελίξη της απόσβεσης $\mathbf{a}(t) = [a_1(t), \dots, a_n(t)]^T$ ικανοποιεί την πολυδιάστατη ΣΔΕ

$$d\mathbf{a}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{a}(t))dt + \mathbf{Z}(\mathbf{a}(t))d\mathbf{W}(t) \quad (4.9)$$

όπου

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}(\mathbf{a}(t)) &= [F_1(a_1(t), \dots, a_n(t)), \dots, F_n(a_1(t), \dots, a_n(t))]^T, \\ \mathbf{Z}(\mathbf{a}(t)) &= [z_{ij}(a_1(t), \dots, a_n(t))]_{1 \leq i, j \leq n}, \\ \mathbf{W}(t) &= [W_1(t), \dots, W_n(t)]^T, \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

και $\mathbf{W}(t)$ είναι η n -διάστατη διαδικασία Wiener, δηλαδή οι $W_i(t)$, $1 \leq i \leq n$ είναι ανεξάρτητες διαδικασίες Wiener, ή όπως αλλιώς λέγονται κινήσεις Brown [Karlin-Taylor, 1975]. Η ανελίξη της απόσβεσης στις n ζεύξεις $\mathbf{a}(t)$, όπως προκύπτει από την (4.9) είναι μια n -διάστατη Μαρκοβιανή διαδικασία, γνωστή ως

ανέλιξη διάχυσης. Οι διανυσματικές συναρτήσεις $\mathbf{F}: R^n \rightarrow R^n$ και $\mathbf{Z}: R^n \rightarrow R^{n \times n}$ θα επιλεγούν με τέτοιο τρόπο, ώστε

α) Ο συντελεστής διάχυσης της κάθε μιας ανέλιξης $a_i(t)$, $i = 1, \dots, n$, είναι μια τετραγωνική αύξουσα συνάρτηση της στιγμιαίας τιμής της απόσβεσης λόγω βροχής [Maseng-Bakken, 1981]

β) ο μη γραμμικός μετασχηματισμός

$$X_i(t) = \ln(a_i(t)/a_{m_i}), \quad 1 \leq i \leq n \quad (4.11)$$

εφαρμοζόμενος σε κάθε μια συνιστώσα ανέλιξη, μετασχηματίζει την (4.9) σε μια γραμμική n -διάστατη ΣΔΕ τύπου Ornstein-Uhlenbeck [Karatzas-Shreve, 1991]

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{B} \cdot \mathbf{X}_t dt + \mathbf{S} \cdot d\mathbf{W}_t, \quad \mathbf{X}_0 = \mathbf{x}_0 \quad (4.12)$$

όπου \mathbf{B} είναι ένας διαγώνιος πίνακας $\mathbf{B} = [b_{ij}]_{1 \leq i, j \leq n}$ με στοιχεία

$$b_{ij} = -\beta_i \cdot \delta_{ij} \quad (4.13)$$

με δ_{ij} τη συνάρτηση δέλτα του Kronecker και $\beta_i, 1 \leq i \leq n$ τις δυναμικές παραμέτρους της απόσβεσης λόγω βροχής, εν γένει διαφορετικές για κάθε ζεύξη. Οι παράμετροι αυτές χαρακτηρίζουν τη δυναμική συμπεριφορά της απόσβεσης στις αντίστοιχες ζεύξεις [Maseng-Bakken, 1981]. Η τιμή τους εξαρτάται από τη γωνία ύψωσης, τη συχνότητα, την πόλωση και τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, όσον αφορά το ρυθμό βροχόπτωσης [Panagoroulos-Kanelloroulos, 2003]. Στην (4.12) $\mathbf{S} = [s_{ij}]_{1 \leq i, j \leq n}$ είναι ο πίνακας ενός γραμμικού μετασχηματισμού που θα υπολογιστεί με βάση τις υποθέσεις α) και β) και $\mathbf{X}(0) = \mathbf{x}_0$ είναι η αρχική συνθήκη της ΣΔΕ. Αυτή είναι ένα τυχαίο διάνυσμα που αναπαριστά με μοναδιαία πιθανότητα την τιμή της ανέλιξης \mathbf{X}_t κατά την αρχική χρονική στιγμή $t = 0$, δηλαδή $P[\mathbf{X}(0) = \mathbf{x}_0] = 1$.

Ξεκινώντας από την (4.12) εφαρμόζουμε τον αντίστροφο μη γραμμικό μετασχηματισμό της (4.11) στην ανέλιξη \mathbf{X}_t , προκειμένου να βρούμε την έκφραση (4.9) της ΣΔΕ της ανέλιξης $\mathbf{a}(t)$, συναρτήσει των παραμέτρων \mathbf{B} και \mathbf{S} της (4.12). Με τον τρόπο αυτό οι συναρτήσεις $\mathbf{F}: R^n \rightarrow R^n$ και $\mathbf{Z}: R^n \rightarrow R^{n \times n}$ θα εκφραστούν συναρτήσει των \mathbf{B} και \mathbf{S} . Για το λόγο αυτό θεωρούμε τη συνάρτηση $\mathbf{g}: [0, +\infty) \times R^n \rightarrow R^n$, που ορίζεται ως

$$\begin{aligned} \mathbf{g}(t, \mathbf{x}) &= (g_1(t, \mathbf{x}), \dots, g_n(t, \mathbf{x})) \\ g_i(t, \mathbf{x}) &= g_i(t, x_1, \dots, x_n) = a_{m_i} e^{x_i} \end{aligned} \quad (4.14)$$

και βρίσκουμε την έκφραση για την ανέλιξη $\mathbf{a}(t) = \mathbf{g}(t, \mathbf{X}_t)$, εφαρμόζοντας τους κανόνες του λογισμού Ito [Karlin-Taylor, 1975]. Προκύπτει έτσι ότι

$$da_i(t) = a_{m_i} e^{X_t^i} dX_t^i + \frac{1}{2} a_{m_i} e^{X_t^i} (dX_t^i)^2 \quad (4.15)$$

που με τη χρήση της έκφρασης

$$dX_t^i = -\beta_i X_t^i dt + \sum_{j=1}^n s_{ij} dW_t^j \quad (4.16)$$

όπως προκύπτει από την (4.12) οδηγεί στην

$$da_t^i = a_t^i \left[-\beta_i \ln \frac{a_t^i}{a_{m_i}} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n s_{ij}^2 \right] dt + a_t^i \sum_{j=1}^n s_{ij} dW_t^j \quad (4.17)$$

Με σύγκριση με την (4.9) προκύπτουν οι ακόλουθες εκφράσεις

$$F_i(\mathbf{x}) = x_i \cdot \left[\frac{1}{2} (s_{i1}^2 + \dots + s_{in}^2) - \beta_i \cdot \ln \left(\frac{x_i}{a_{m_i}} \right) \right] \quad (4.18)$$

και

$$z_{ij}(\mathbf{x}) = x_i \cdot s_{ij} \quad (4.19)$$

όπου $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n] \in R^n$.

Τώρα προκειμένου να εφοδιαστεί η ανέλιξη \mathbf{X}_t με τις επαγόμενες ιδιότητες που προκύπτουν μετασχηματίζοντας την $\mathbf{a}(t)$, με τις ιδιότητες της τελευταίας να προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα, εστιάζομαστε στη λύση της (4.12). Με τον τρόπο αυτό θα μπορέσουμε να προσδώσουμε στις εκφράσεις για τις παραμέτρους \mathbf{B} και \mathbf{S} και κατ' επέκταση στις συναρτήσεις \mathbf{F} και \mathbf{Z} την κατάλληλη φυσική ερμηνεία, παρέχοντας τη σύνδεση μεταξύ μοντέλου και πραγματικότητας.

Η λύση στη ΣΔΕ (4.12) δίνεται από [Karlin-Taylor, 1975], [Karatzas-Shreve, 1991]

$$\mathbf{X}_t = e^{t \cdot \mathbf{B}} \cdot \mathbf{X}_0 + e^{t \cdot \mathbf{B}} \cdot \int_0^t e^{-s \cdot \mathbf{B}} \cdot \mathbf{S} \cdot d\mathbf{W}_s \quad (4.20)$$

όπου

$$e^{t \cdot \mathbf{B}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} \mathbf{B}^n \quad (4.21)$$

Η λύση αυτή αποτελεί ένα κλασσικό αποτέλεσμα στη στοχαστική ανάλυση και μπορεί διαισθητικά να κατανοηθεί μέσω της ομοιότητας με τη λύση της αντίστοιχης ντετερμινιστικής γραμμικής ΔΕ 1ης τάξης με χρήση του θεμελιώδους πίνακα. Επαληθεύεται εύκολα με χρήση λογισμού Ito, ενώ ισχύοντα θεωρήματα

εξασφαλίζουν τη μοναδικότητά της (4.20) [Karlin-Taylor, 1975], [Karatzas-Shreve, 1991].

Εξαιτίας του ότι ο πίνακας \mathbf{B} είναι διαγώνιος μπορεί εύκολα να επαληθευτεί ότι

$$\left[e^{t\mathbf{B}} \right]_{ij} = e^{-\beta_i t} \delta_{ij} \quad (4.22)$$

Η στοχαστική ανέλιξη \mathbf{X}_t όπως προκύπτει από την (4.20) είναι μια κανονική ανέλιξη (Gauss) εφόσον η \mathbf{X}_0 ακολουθεί τη n -διάστατη κανονική κατανομή. Αυτό ισχύει και στην δεσμευμένη περίπτωση που η αρχική συνθήκη για τη \mathbf{X}_0 είναι ντετερμινιστική, ως μια εκφυλισμένη κανονική κατανομή. Η μέση τιμή $\mathbf{M}_X(t)$ της \mathbf{X}_t δίνεται από

$$\mathbf{M}_X(t) = e^{t\mathbf{B}} \cdot \mathbf{M}_X(0) \quad (4.23)$$

Ο πίνακας συνδιακύμανσης $\mathbf{C}_X(t)$ της \mathbf{X}_t δίνεται για κάθε χρονική στιγμή από [Karlin-Taylor, 1975], [Karatzas-Shreve, 1991]

$$\mathbf{C}_X(t) = e^{t\mathbf{B}} \left[\mathbf{C}_X(0) + \int_0^t e^{-s\mathbf{B}} \mathbf{S} \mathbf{S}^T e^{-s\mathbf{B}^T} ds \right] e^{t\mathbf{B}^T} \quad (4.24)$$

που είναι η λύση της γραμμικής ΔΕ

$$\dot{\mathbf{C}}_X(t) = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C}_X(t) + \mathbf{C}_X(t) \cdot \mathbf{B}^T + \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T \quad (4.25)$$

Ο πίνακας \mathbf{B} έχει εξ' ορισμού όλες τις ιδιοτιμές του αρνητικούς πραγματικούς αριθμούς (ίσες με $-\beta_i$), ώστε εξασφαλίζεται η σύγκλιση του ολοκληρώματος

$$\mathbf{C}_X = \int_0^\infty e^{s\mathbf{B}} \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T e^{s\mathbf{B}^T} ds \quad (4.26)$$

Μπορεί εύκολα να επαληθευτεί ότι αν $\mathbf{C}_X(0) = \mathbf{C}_X$, τότε η $\mathbf{C}_X(t) = \mathbf{C}_X$ είναι μια λύση της (4.25). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει στάσιμη λύση της (4.12) και σε αυτή την περίπτωση η (4.25) οδηγεί στην ακόλουθη αλγεβρική εξίσωση

$$\mathbf{B} \mathbf{C}_X(t) + \mathbf{C}_X(t) \mathbf{B}^T = -\mathbf{S} \mathbf{S}^T \quad (4.27)$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί τη βάση του μοντέλου ως προς τη σύνδεσή του με τα πειραματικά δεδομένα. Υποθέτοντας ότι η ανέλιξη της απόσβεσης $\mathbf{a}(t)$ είναι μια στάσιμη στοχαστική διαδικασία, πειραματικά δεδομένα ή χρήση υφιστάμενων φυσικών μοντέλων επιτρέπουν τον προσδιορισμό του πίνακα συνδιακύμανσης \mathbf{C} .

Εξαιτίας του μη γραμμικού μετασχηματισμού (4.11) ο στάσιμος πίνακας συνδιακύμανσης C_X της μετασχηματισμένης ανέλιξης X_t μπορεί εύκολα να υπολογιστεί. Η εξίσωση (4.27) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του πίνακα μετασχηματισμού S , ο οποίος απαιτείται για τη μοντελοποίηση της διαδικασίας X_t μέσω της (4.12). Ο πίνακας B και ο στάσιμος πίνακας συνδιακύμανσης C_X θεωρούνται γνωστοί. Με τον τρόπο αυτό οι διανυσματικές συναρτήσεις F και Z της (4.9) προσδιορίζονται επίσης μέσω των (4.18) και (4.19) αντίστοιχα.

Ορίζοντας τον πίνακα

$$G = S \cdot S^T \quad (4.28)$$

από την (4.27) μπορούμε να τον υπολογίσουμε ως

$$[G]_{ij} = (\beta_i + \beta_j)[C_X]_{ij} \quad (4.29)$$

Ο πίνακας C_X ως πίνακας συνδιακύμανσης είναι πραγματικός και συμμετρικός, οπότε από την (4.29) το ίδιο προκύπτει και για τον πίνακα G . Επομένως η ανάλυση του G ως γινόμενο $S \cdot S^T$ είναι άμεση και μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της ανάλυσης Cholesky ή ως

$$S = E \cdot \Lambda^{1/2} \quad (4.30)$$

όπου E είναι ο πίνακας με στήλες τα ορθογώνια ιδιοδιανύσματα του πίνακα G και Λ είναι ο διαγώνιος πίνακας των ιδιοτιμών του.

Τώρα η σχέση του προτεινόμενου n -διάστατου μοντέλου με το μοντέλο M-B μπορεί να γίνει προφανής. Το τετραγωνικό άθροισμα $\sum_{j=1}^n s_{ij}^2$ στις (4.17),(4.18) σύμφωνα με την (4.28) μπορεί εύκολα να φανεί ότι είναι το διαγώνιο στοιχείο g_{ii} του πίνακα G , το οποίο σύμφωνα με την (4.29) δίνεται από $[G]_{ii} = 2\beta_i \sigma_{a_i}^2$, όπου $\sigma_{a_i}^2$ είναι η διακύμανση της συνιστώσας i της ανέλιξης X_t . Έτσι η (4.18) μπορεί να γραφεί ως

$$F_i(\mathbf{x}) = x_i \cdot \beta_i \cdot \left[\sigma_{a_i}^2 - \ln \left(\frac{x_i}{a_{m_i}} \right) \right] \quad (4.31)$$

Στην ουσία θεωρώντας τις ανελίξεις $\widehat{W}_t^i = \sum_{j=1}^n s_{ij} W_t^j$, οι οποίες εύκολα μπορεί να αναγνωριστούν ως ανελίξεις Wiener με διακύμανση $t \sum_{j=1}^n s_{ij}^2$ και αγνοώντας την εξάρτηση των συνιστωσών ανελίξεων, βλέπουμε ότι κάθε \widehat{W}_t^i μπορεί να αντικατασταθεί από την ανελίξη $\sqrt{2\beta_i \sigma_{a_i}} \mathbb{W}_t^i$, όπου \mathbb{W}_t^i είναι η τυπική διαδικασία Wiener. Με τον τρόπο αυτό κάθε συνιστώσα ανελίξη μπορεί να μοντελοποιηθεί ανεξάρτητα από τη ΣΔΕ

$$da_i(t) = a_i(t) \beta_i \left[\sigma_{a_i}^2 - \ln \left(\frac{a_i(t)}{a_{m_i}} \right) \right] dt + a_i(t) \sqrt{2\beta_i \sigma_{a_i}} d\mathbb{W}_t^i \quad (4.32)$$

αποτέλεσμα που βρίσκεται σε άμεση αντιστοιχία με τη μονοδιάστατη περίπτωση από το μοντέλο M-B.

Από την (4.32) βλέπουμε επίσης ότι η υπόθεση α) που αναφέρθηκε στην αρχή της ενότητας ικανοποιείται, καθώς είχε σιωπηλά συμπεριληφθεί στην υπόθεση β) Στην ουσία η μορφή της (4.12) στην υπόθεση β) υπαγορεύτηκε από το γεγονός ότι η μόνη στάσιμη, κανονική και μαρκοβιανή ανελίξη είναι η διαδικασία Ornstein-Uhlenbeck [Karlin-Taylor, 1975]. Η έκφραση του πίνακα \mathbf{B} στην (4.13) επιλέχθηκε για την εξάρτηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της κάθε ανελίξης μόνο από τις τιμές της και για αναλογία με το μονοδιάστατο μοντέλο.

4.3.2. Το πολυδιάστατο μοντέλο

Συνοψίζοντας το δυναμικό μοντέλο της απόσβεσης σε n ζεύξεις δίνεται από την

$$d\mathbf{a}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{a}(t))dt + \mathbf{Z}(\mathbf{a}(t))d\mathbf{W}(t) \quad (4.33)$$

όπου

$$F_i(\mathbf{x}) = x_i \cdot \left[\frac{1}{2} (s_{i1}^2 + \dots + s_{in}^2) - \beta_i \cdot \ln \left(\frac{x_i}{a_{m_i}} \right) \right] \quad (4.34)$$

και

$$z_{ij}(\mathbf{x}) = x_i \cdot s_{ij} \quad (4.35)$$

με $\mathbf{S} = [s_{ij}]_{1 \leq i, j \leq n}$ ένα πίνακα $n \times n$.

Στις ανωτέρω σχέσεις οι είσοδοι είναι:

α) Οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι της απόσβεσης λόγω βροχής που είναι οι μέσες τιμές $\ln(a_{m_i})$ και οι διακυμάνσεις σ_{a_i} των θεωρούμενων κανονικών τ.μ. $\ln a_i(t)$. Επίσης οι συντελεστές συσχέτισης $\rho_{n,ij}$ των φυσικών λογάριθμων (\ln) των αποσβέσεων λόγω βροχής στις ζεύξεις i, j . Οι τιμές αυτές σχηματίζουν τον πίνακα συνδιακύμανσης C_X

$$C_X = \begin{bmatrix} \sigma_{a_1}^2 & L & \rho_{n,1n} \sigma_{a_1} \sigma_{a_n} \\ M & O & M \\ \rho_{n,n1} \sigma_{a_n} \sigma_{a_1} & L & \sigma_{a_n}^2 \end{bmatrix} \quad (4.36)$$

της ανέλιξης X_t , και μπορούν να προκύψουν από πειραματικά δεδομένα αν είναι διαθέσιμα [Carrie et al., 2008],[Carrie et al., 2011] ή χρησιμοποιώντας υφιστάμενα φυσικά μοντέλα όπως στα [J. D. Kanellopoulos et al., 2000], [Panagopoulos et al., 2002]. Οι συντελεστές συσχέτισης μπορούν να υπολογιστούν με χρήση του μοντέλου Paraboni-Barbaliscia [Luglio et al., 2002] προκειμένου για επίγεια διαφορικά συστήματα ή με το τροποποιημένο μοντέλο του Lin [Lin, 1975] προκειμένου για τροχιακά διαφορικά συστήματα. Αναλυτικές εκφράσεις μπορούν να βρεθούν στο [Panagopoulos-Kanellopoulos, 2002]. Τέλος ο πίνακας S υπολογίζεται σύμφωνα με τις (4.28) και (4.29) ως

$$[SS^T]_{ij} = (\beta_i + \beta_j)[C_X]_{ij} \quad (4.37)$$

β) Οι δυναμικές παράμετροι β_i (sec^{-1}), μία για κάθε ζεύξη, που περιγράφουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής. Για τον υπολογισμό των δυναμικών παραμέτρων από πειραματικά δεδομένα διάφορες μέθοδοι έχουν προταθεί, ωστόσο η μέθοδος που βασίζεται στην δεσμευμένη ροπή δεύτερης τάξης είναι η πιο άμεση. Στο [Lacoste et al., 2005] μπορεί να βρεθεί μια μέθοδος υπολογισμού της δυναμικής παραμέτρου που δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα, ενώ στο [S. A. Kanellopoulos et al., 2007] η παράμετρος έχει υπολογισθεί βάσει της βελτιστοποίησης της μοντελοποίησης συγκριτικά με τη διάρκεια των διαλείψεων. Στα επόμενα θα θεωρείται ότι η δυναμική παράμετρος είναι γνωστή.

Με τις ανωτέρω τιμές διαθέσιμες το μοντέλο που αποτελείται από τις (4.33), (4.34) και (4.35) μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ωστόσο είναι ευκολότερο να εργαζόμαστε με την (4.12) αντί με την (4.33) αφού πρώτα εφαρμόσουμε το μη

γραμμικό μετασχηματισμό (4.11). Έτσι μια ισοδύναμη και πιο εύχρηστη έκφραση του μοντέλου δίνεται από την

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{B} \cdot \mathbf{X}_t dt + \mathbf{S} \cdot d\mathbf{W}_t, \quad \mathbf{X}_0 = \mathbf{x}_0 \quad (4.38)$$

με

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 0 & L & 0 \\ 0 & -\beta_2 & L & 0 \\ M & M & O & M \\ 0 & 0 & L & -\beta_n \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

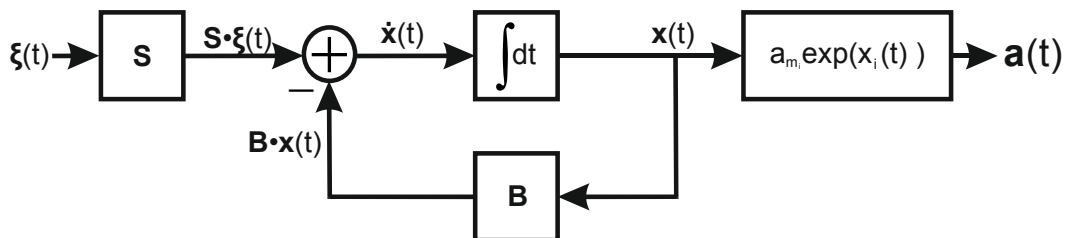
$$[SS^T]_{ij} = (\beta_i + \beta_j)[C_X]_{ij} \quad (4.40)$$

και

$$a_i^i = a_{m_i} e^{x_i} \quad (4.41)$$

Με τον τρόπο αυτό οι ιδιότητες της ανέλιξης της απόσβεσης $\mathbf{a}(t)$ μπορούν να μελετηθούν εξετάζοντας πρώτα τις ιδιότητες της στάσιμης, κανονικής και μαρκοβιανής από την υπόθεση ανέλιξης $\mathbf{X}(t)$.

Στην ουσία το μοντέλο αποτελεί γενίκευση του μονοδιάστατου μοντέλου M-B, όπως φαίνεται στην Εικ. 14, όπου ο λευκός θόρυβος $\xi(t)$ είναι διάστασης n .



Εικ. 14 Πολυδιάστατο δυναμικό μοντέλο απόσβεσης λόγω βροχής.

4.4. Κατανομή Πιθανοτήτων Μετάβασης.

Η δεσμευμένη περίπτωση στην οποία η αρχική τιμή \mathbf{X}_0 είναι ντετερμινιστική έχει ιδιαίτερη σημασία στο πρόβλημα της πρόβλεψης. Σε αυτή την περίπτωση ζητούνται οι πιθανότητες μετάβασης της ανέλιξης \mathbf{X}_t σε συγκεκριμένες τιμές μετά από χρόνο t . Ο υπολογισμός αυτό μπορεί να γίνει μέσω των πυκνοτήτων πιθανότητας μετάβασης που ορίζονται ως

$$P[\mathbf{x} < \mathbf{X}(t) \leq \mathbf{x} + d\mathbf{x} | \mathbf{X}(s) = \mathbf{y}] = p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s) d\mathbf{x} \quad (4.42)$$

Αυτές μπορούν να υπολογισθούν από της λύση (4.20) της ΣΔΕ και τις ιδιότητες του στοχαστικού ολοκληρώματος ή λύνοντας την αντίστοιχη εξίσωση Fokker Planck (FP) [Gardiner, 1990]

$$\begin{aligned} \partial_t p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s) = & \sum_i \partial_{x_i} [\beta_i x_i p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s)] + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \partial_{x_i} \partial_{x_j} [G_{ij} p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s)]. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Χρησιμοποιώντας την υπόθεση της στασιμότητας έχουμε ότι

$$p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s) = p(\mathbf{x}, t - s | \mathbf{y}, 0) \quad (4.44)$$

Το γεγονός ότι η \mathbf{X}_t είναι κανονική και οι (4.23), (4.24) επιτρέπουν τον υπολογισμό της $p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s)$:

$$\begin{aligned} p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s) = & \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \Delta}} \exp(K) \\ K = & -\frac{1}{2} (\mathbf{x} - e^{(t-s)\mathbf{B}} \cdot \mathbf{y}) \mathbf{C}_X^{-1}(t) (\mathbf{x} - e^{(t-s)\mathbf{B}} \cdot \mathbf{y})^T \end{aligned} \quad (4.45)$$

όπου Δ είναι η ορίζουσα του πίνακα συνδιακύμανσης $\mathbf{C}_X(t)$ και $\mathbf{C}_X^{-1}(t)$ ο αντίστροφος πίνακας υποθέτοντας την ύπαρξή τους. Το γεγονός ότι η $p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s)$ υπολογίστηκε από τις ιδιότητες της λύσης και του στοχαστικού ολοκληρώματος καταδειχνει τη δυσκολία που υφίσταται στη μελέτη ενός προβλήματος μέσω της ΣΔΕ με τη μελέτη μέσω της αντίστοιχης εξίσωσης FP. Ωστόσο όπως αναφέρεται στο [Gardiner, 1990] υπάρχουν διάφορες τεχνικές που σχετίζονται με την εξίσωση FP οι οποίες καταλήγουν σε πιο άμεσα αποτελέσματα από ότι με τη ΣΔΕ, αλλά και αντίστροφα, με αποτέλεσμα η μελέτη μέσω και των δύο μεθόδων να είναι απαραίτητη, ώστε να διαφανούν όλες οι πτυχές του υπό μελέτη φαινομένου.

4.5. Αριθμητικές Εφαρμογές του Μοντέλου και Πειραματική Επιβεβαίωση.

4.5.1. Προσομοίωση και αριθμητικά αποτελέσματα

Η αριθμητική εφαρμογή του μοντέλου βασίζεται στην προσομοίωση της μετασχηματισμένης ανέλιξης \mathbf{X}_t μέσω διακριτοποίησης της λύσης της (4.38) και κατόπιν στην εφαρμογή του μη γραμμικού μετασχηματισμού (4.41) στη λύση.

Η διακριτή ισοδύναμη ανέλιξη της λύσης της (4.38) είναι μια διανυσματική ανέλιξη AR(1) με τη γενική μορφή

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{B}_d \cdot \mathbf{X}_k + \mathbf{S}_d \cdot \mathbf{n}_k \quad (4.46)$$

όπου $\mathbf{n}_k = [n_k^1, \dots, n_k^n]^T$ είναι ένα διάνυσμα από n ανεξάρτητους λευκούς θορύβους Gauss με μηδενικό μέσο και μοναδιαία διακύμανση. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η (4.46) οι πίνακες $\mathbf{B}_d, \mathbf{S}_d$ θα πρέπει να υπολογιστούν συναρτήσει των αντίστοιχων πινάκων \mathbf{B}, \mathbf{S} του συνεχούς μοντέλου. Οι τιμές της διακριτής ανέλιξης θεωρούνται ως δείγματα της συνεχούς ανέλιξης στις χρονικές στιγμές $k \cdot \Delta t$, όπου Δt είναι το διάστημα δειγματοληψίας.

Παρόλο που υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την προσομοίωση των λύσεων μιας ΣΔΕ η ακρίβεια της αναπαράστασης εξαρτάται γενικά από το χρονικό διάστημα Δt . Ωστόσο το γεγονός ότι η (4.38) έχει αναλυτική λύση επιτρέπει την διακριτοποίηση της λύσης με ακρίβεια. Αυτό επιτυγχάνεται ταυτίζοντας τις ροπές δεύτερης τάξης μεταξύ της διακριτής και της συνεχούς ανέλιξης. Συμβολίζοντας

$$\mathbf{G}_d = \mathbf{S}_d \cdot \mathbf{S}_d^T \quad (4.47)$$

σε αναλογία με τη σχέση $\mathbf{G} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T$ προκύπτουν οι εξής σχέσεις

$$\mathbf{B}_d = \exp(\mathbf{B} \cdot \Delta t) \quad (4.48)$$

και

$$\mathbf{G}_d = \int_0^{\Delta t} e^{\mathbf{B}s} \cdot \mathbf{G} \cdot e^{\mathbf{B}^T s} ds \quad (4.49)$$

Εφαρμογή της (4.49) για τη συγκεκριμένη έκφραση του πίνακα \mathbf{B} της (4.39) συνεπάγεται ότι

$$[G_d]_{ij} = [G]_{ij} \frac{1 - e^{-(b_i + b_j)\Delta t}}{b_i + b_j} \quad (4.50)$$

η οποία με χρήση της (4.29) συνδέει τον πίνακα \mathbf{G}_d του διακριτού μοντέλου με το στάσιμο πίνακα συνδιακύμανσης \mathbf{C}_x με τη σχέση

$$[G_d]_{ij} = [C_x]_{ij} (1 - e^{-(\beta_i + \beta_j)\Delta t}) \quad (4.51)$$

Μια παρόμοια σχέση μεταξύ του πίνακα συνδιακύμανσης του λευκού θορύβου της (4.46) και του στάσιμου πίνακα συνδιακύμανσης της \mathbf{X}_t μπορεί επίσης να βρεθεί στο [Cheffena et al., 2009], όπου προτείνεται ένα διακριτό μοντέλο.

Τελικά οι σχέσεις (4.46), (4.51) και (4.47) επιτρέπουν τη προσομοίωση της διαδικασίας $\mathbf{X}_t = [X_t^1, \dots, X_t^n]^T$, από την οποία εφαρμόζοντας το μη γραμμικό μετασχηματισμό

$$a_i = a_{m_i} \exp(X_i) \quad (4.52)$$

αναπαράγουμε τις συσχετισμένες χρονοσειρές της απόσβεσης για τις n ζεύξεις.

4.5.2. Εύρος εφαρμογής του μοντέλου για συστήματα διαφορικής προστασίας δορυφορικών επικοινωνιών και περιορισμοί

Στην ενότητα αυτή αναφέρονται το εύρος της εφαρμογής του μοντέλου και οι περιορισμοί του για την εφαρμογή του σε διαφορικά δορυφορικά συστήματα, επίγεια και τροχιακά. Το εύρος της εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου εξαρτάται βασικά από την ακρίβεια της προσέγγισης των στάσιμων στατιστικών χαρακτηριστικών της απόσβεσης από την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή, καθώς επίσης και από την καταλληλότητα της χρησιμοποιούμενης τιμής της δυναμικής παραμέτρου.

Οι περιορισμοί και το εύρος εφαρμογής του προτεινόμενου μοντέλου που θα αναφερθούν εδώ προέρχονται κυρίως από την εφαρμογή του μοντέλου σε διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από δορυφορικά διαφορικά συστήματα που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία ή σε βάσεις δεδομένων. Ωστόσο ευρύτερες περιοχές εφαρμογής του μοντέλου πέραν αυτών που δοκιμάστηκαν αριθμητικά δεν αποκλείονται.

Η περιοχή συχνότητας στην οποία το μοντέλο δοκιμάστηκε είναι η περιοχή 10-30GHz, ενώ η γωνία ύψωσης κυμαινόταν από $5^\circ - 60^\circ$. Οι περιοχή πιθανότητας εντός της οποίας το μοντέλο δίνει πολύ καλά αποτελέσματα είναι η περιοχή 0.001%-5% για την πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης και για τιμές απόσβεσης μεγαλύτερες του 1dB. Τέλος η απόσταση μεταξύ των επίγειων σταθμών κυμάνθηκε σε αποστάσεις από 1.7km μέχρι 200km, ενώ η γωνιακή διαφορά προκειμένου για τροχιακά διαφορικά συστήματα δεν υπερέβη τις 50° .

Αναφορικά ωστόσο με τα στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης, πχ το φάσμα ισχύος, τη διάρκεια διαλείψεων και την κλίση της απόσβεσης το προτεινόμενο μοντέλο δεν έχει δοκιμαστεί συγκριτικά με πειραματικά δεδομένα. Έτσι, παρόλο που το θεωρητικό του πλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση αυτών

των παραμέτρων, η ακρίβεια της μοντελοποίησης δεν έχει αποδειχθεί σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα.

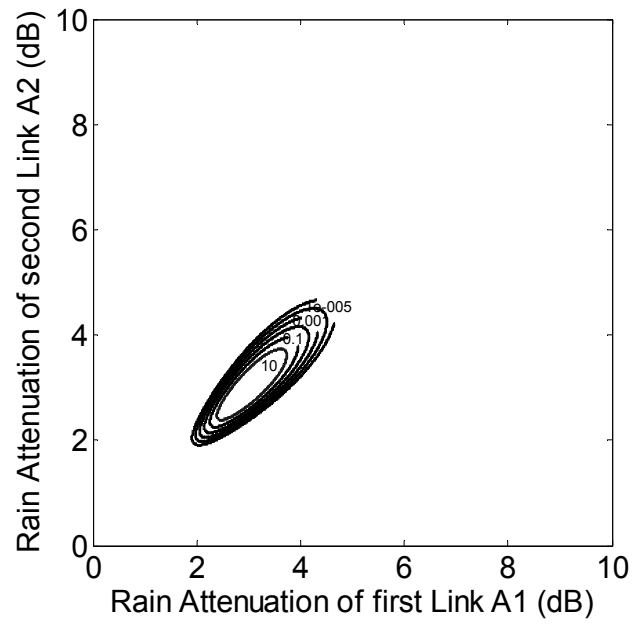
4.5.3. Χρονική Εξέλιξη της Πιθανότητας Μετάβασης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής σε δύο ξεχωριστά γεωγραφικά σημεία αναπαριστώντας γραφικά τη χρονική εξέλιξη των πυκνοτήτων πιθανότητας μετάβασης, όπως αυτές υπολογίζονται από το μοντέλο (4.45). Για το λόγο αυτό θεωρούμε ένα τυπικό διαφορικό σύστημα με δύο κλάδους στο Λονδίνο (UK) το οποίο αποτελείται από δύο επίγειους σταθμούς που βρίσκονται σε απόσταση D . Η γωνία υψώσεως έχει επιλεγεί $\varphi = 31^\circ$ και η συχνότητα λειτουργίας η $f = 21$ GHz. Τα στάσιμα στατιστικά χαρακτηριστικά του Πίνακα 3 έχουν υπολογιστεί με προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής στις καμπύλες πρόβλεψης της απόσβεσης όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της σύστασης ITU-R P.618-10 [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009].

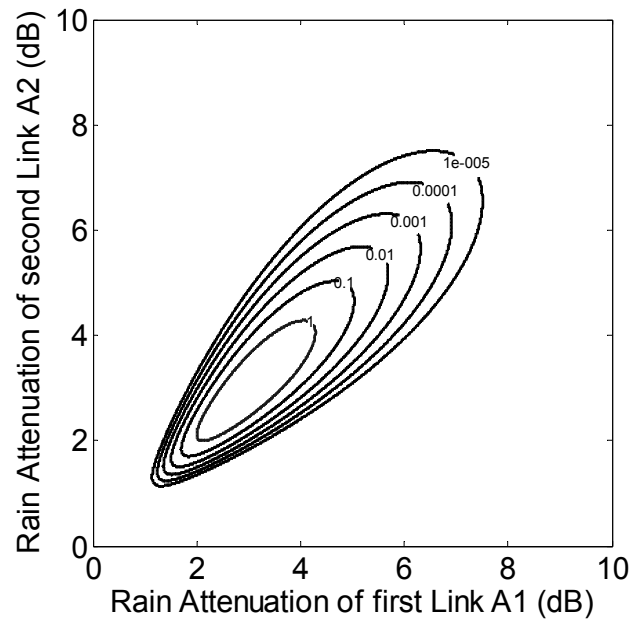
Πίνακας 3 Στάσιμες στατιστικές Παράμετροι συστήματος διπλής διαφορικής προστασίας στο Λονδίνο

Παράμετρος	Τιμή
a_{m_i} ($i = 1, 2$)	0.0193
σ_{a_i} , ($i = 1, 2$)	1.8
ρ_n ($D=5$ χλμ/ $D=15$ χλμ)	0.856 / 0.63

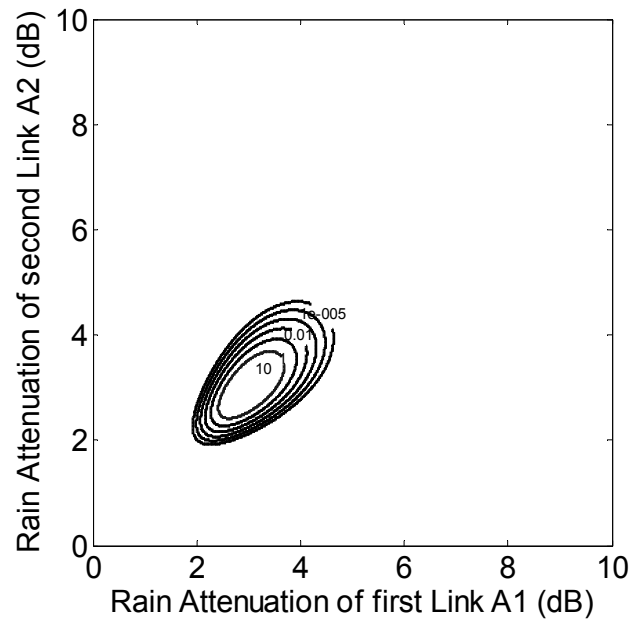
Ο συντελεστής συσχέτισης έχει υπολογιστεί με χρήση του μοντέλου Paraboni-Barbaliscia [Luglio et al., 2002], ο οποίος χρησιμοποιείται επίσης από την ITU στο [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009] για αποστάσεις $D = 5$ km και $D = 15$ km και συμπεριλαμβάνεται στον πίνακα 1. Η δυναμική παράμετρος β έχει επιλεγεί κοινή και για τις δύο ζεύξεις για τις τιμές $\beta = 10^{-4}$ and $\beta = 2 \cdot 10^{-4}$ [Lacoste et al., 2005]. Τα αποτελέσματα αναπαρίστανται γραφικά στις εικόνες 15-20.



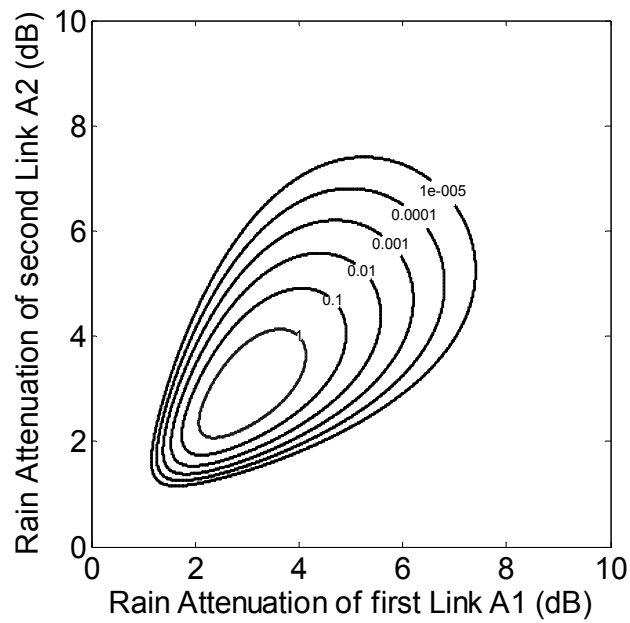
Ευκ. 15 Εξέλιξη της pdf για $t = 10$ δλ, $D = 5$ χλμ, $\beta = 0.0001$



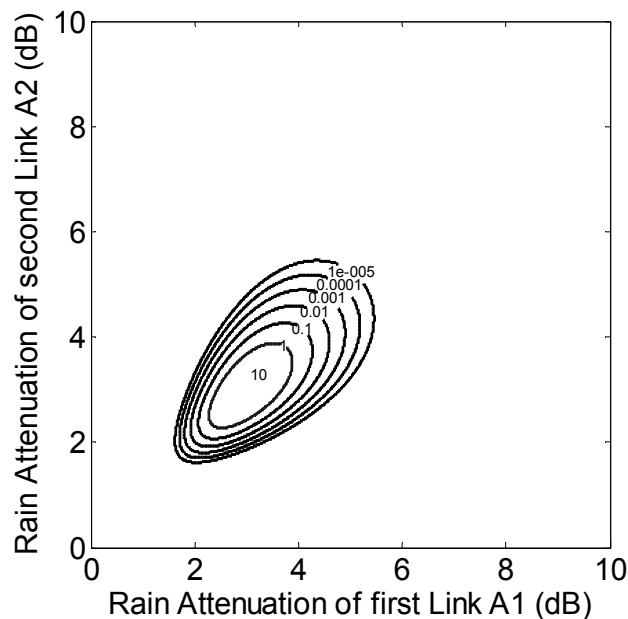
Ευκ. 16 Εξέλιξη της pdf για $t = 50$ δλ, $D = 5$ χλμ, $\beta = 0.0001$



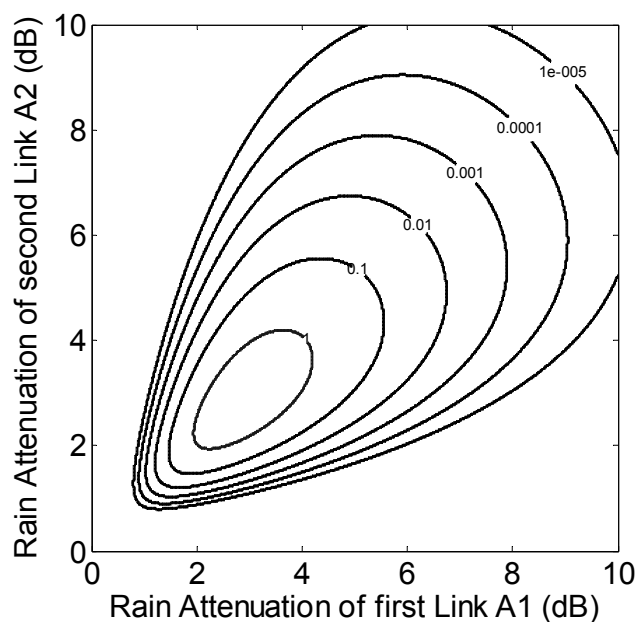
Εικ. 17 Εξέλιξη της pdf για $t = 10$ δλ, $D = 15$ χλμ, $\beta = 0.0001$



Εικ. 18 Εξέλιξη της pdf για $t = 50$ δλ, $D = 15$ χλμ, $\beta = 0.0001$



Εικ. 19 Εξέλιξη της pdf για $t = 10 \delta\lambda$, $D = 15 \chi\lambda\mu$, $\beta = 0.0002$



Εικ. 20 Εξέλιξη της pdf για $t = 50 \delta\lambda$, $D = 15 \chi\lambda\mu$, $\beta = 0.0002$

Οι καμπύλες αναπαριστούν τη τιμή της πυκνότητας πιθανότητας μετάβασης στο επίπεδο $a_1 - a_2$ για διάφορες χρονικές στιγμές. Η pdf εκκινεί ως μια συνάρτηση δέλτα του Dirac τη χρονική στιγμή $t = 0$, ευρισκόμενη στο σημείο των αρχικών τιμών της απόσβεσης, οι οποίες εδώ έχουν επιλεγεί ως $a_1(0) = a_2(0) = 3 \text{ dB}$. Στη συνέχεια εξελίσσεται μετακινώντας το μέγιστο της επιφάνειάς της προς τη μέση τιμή

απόσβεσης με μια ταχύτητα που εξαρτάται από τη δυναμική παράμετρο β , ενώ απλώνεται στο επίπεδο.

Οι εικόνες 15 και 16 δείχνουν την εξέλιξη της pdf από τη χρονική στιγμή $t = 10$ sec στη στιγμή $t = 50$ sec. Η απόσταση εδώ έχει επιλεγεί $D = 5$ km και η δυναμική παράμετρος $\beta = 10^{-4}$. Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση του χωρικού συντελεστή συσχέτισης στην εξέλιξη της pdf οι εικόνες 17 και 18 αναπαριστούν τις ίδιες χρονικές στιγμές για απόσταση $D = 15$ km. Είναι φανερό ότι καθώς ο συντελεστής χωρικής συσχέτισης μειώνεται (μεγαλύτερες αποστάσεις) η διάχυση των τιμών της pdf ως προς το κάθετο άξονα της κύριας διαγωνίου είναι μεγαλύτερο, κάτι που οδηγεί σε υψηλότερες τιμές διαφορικού κέρδους (diversity gain). Η εξάρτηση της pdf στη δυναμική παράμετρο β φαίνεται στις εικόνες 19 και 20 όπου πάλι για τις ίδιες χρονικές στιγμές και απόσταση $D = 15$ km η δυναμική παράμετρος έχει διπλάσια τιμή ($\beta = 2 \cdot 10^{-4}$). Η εξάπλωση των τιμών της pdf είναι χαρακτηριστικά ταχύτερη με τη μεγαλύτερη τιμή της δυναμικής παραμέτρου.

4.5.4. Εφαρμογή του μοντέλου σε συστήματα διαφορικής λήψης θέσης και διαφορικής λήψης δορυφόρου

Στην ενότητα αυτή εφαρμόζουμε το προτεινόμενο αναλυτικό μοντέλο της απόσβεσης λόγω βροχής στον υπολογισμό της πιθανότητας διάλειψης σε διαφορικά συστήματα προστασίας θέσης (με 2,3 και 4 ζεύξεις) και τροχιακά. Στη συνέχεια συγκρίνουμε τα εξαγόμενα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου με υφιστάμενα πειραματικά δεδομένα, προκειμένου να διαπιστωθεί η εγκυρότητα του μοντέλου ως προς την αναπαραγωγή των στάσιμων στατιστικών χαρακτηριστικών. Αρχικά θα πρέπει να υπολογίζουμε τις παραμέτρους της λογαριθμοκανονικής κατανομής που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο μοντέλο, για κάθε ζεύξη. Επίσης τους συντελεστές συσχέτισης καθώς και τις δυναμικές παραμέτρους. Στη συνέχεια αναπαραγάγουμε προσομοιωμένες χρονοσειρές απόσβεσης για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα και υπολογίζουμε τα παραγόμενα στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτης τάξης. Ο χρόνος προσομοίωσης έχει επιλεγεί 5 χρόνια με υπολογιστικό βήμα κάθε 1 δευτερόλεπτο. Η δυναμική παράμετρος β έχει επιλεγεί $\beta = 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ [Lacoste et al., 2005], με την ίδια τιμή για όλες τις ζεύξεις των περιπτώσεων που θα εξεταστούν. Η από κοινού απόσβεση από τη συνδυασμένη χρήση των διαφορικών

κλάδων κάθε σχήματος έχει επιλεγεί ως η ελάχιστη τιμή της απόσβεσης μεταξύ των ζεύξεων, μέθοδος που αποτελεί τη γνωστή τεχνική συνδυασμού σημάτων με την επιλογή του ισχυρότερου (SC - Selection Combining).

Οι περιπτώσεις που εξετάζονται με τις αντίστοιχες παραμέτρους του μοντέλου συμπεριλαμβάνονται στον Πίνακα 4. Στη συνέχεια θα αναφερόμαστε σε κάθε περίπτωση με τον όρο Περίπτωση A, B, C, D, E και F.

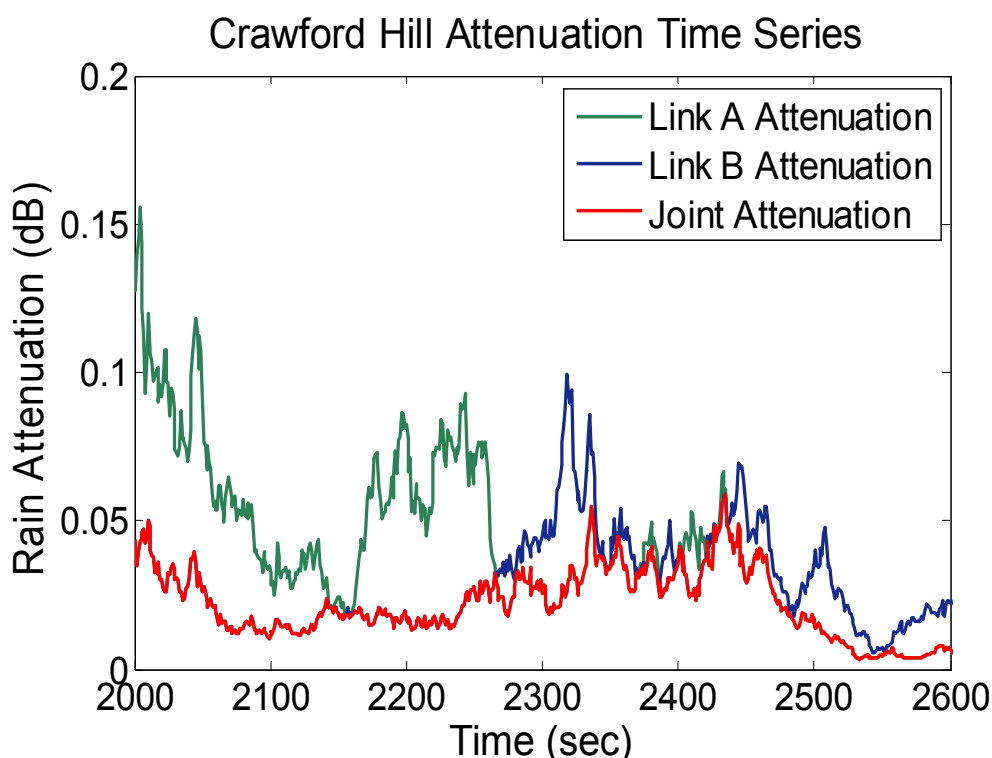
Πίνακας 4 Θεωρούμενα συστήματα διαφορικής προστασίας και στάσιμες στατιστικές παράμετροι

Σενάριο	Τοποθεσία	Χώρα	Έτος	Διαφορική Προστασία	Στάσιμες Στατιστικές Παράμετροι	Τιμή
A	Crawford Hill	US	1969	Dual	(a_{m_1}, a_{m_2})	(0.006, 0.006)
					$(\sigma_{a_1}, \sigma_{a_2})$	(2.32, 2.29)
					$P_{n,12}$	0.9
B	Chibolton	GB	1981 -82	Dual	$\alpha_{m_i}, i = 1,2$	0.04
					$\sigma_{a_i}, i = 1,2$	1.36
					$P_{n,12}$	0.8
C	Hokkaido	JP	1996	Dual Orbital	(a_{m_1}, a_{m_2})	(0.41, 0.27)
					$(\sigma_{a_1}, \sigma_{a_2})$	(1.09, 1.37)
					$P_{n,12}$	0.7
D	Fucino	IT	1978-80	Dual Orbital	(a_{m_1}, a_{m_2})	(0.51, 0.58)
					$(\sigma_{a_1}, \sigma_{a_2})$	(1.48, 1.25)
					$P_{n,12}$	0.7
E	Tampa	US	1978-80	Triple	$(a_{m_1}, a_{m_2}, a_{m_3})$	$(2.5, 4.6, 2.7) \times 10^{-5}$
					$(\sigma_{a_1}, \sigma_{a_2}, \sigma_{a_3})$	(4.49, 4.37, 4.44)
					$(P_{n,12}, P_{n,13}, P_{n,23})$	(0.7, 0.5, 0.6)
F	Tokyo	JP	Hypothetical	Quadraple	$\alpha_{m_i}, i = 1, \dots, 4$	0.04
					$\sigma_{a_i}, i = 1, \dots, 4$	1.73
					$(P_{n,12} = P_{n,23} = P_{n,34} = P_{n,14}, P_{n,13} = P_{n,24})$	(0.85, 0.8)

Η περίπτωση A είναι ένα σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας που υπάρχει στη βάση πειραματικών δεδομένων ITU-R SG3 [ITU-R DBSG3, 2012]. Η τοποθεσία είναι το Crawford Hill (US) και η απόσταση μεταξύ των επίγειων σταθμών είναι 3.2 km. Τα γεωμετρικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ζεύξεων έχουν εξαχθεί από τη βάση δεδομένων [ITU-R DBSG3, 2012]. Συγκεκριμένα η συχνότητα είναι 15,5 GHz, η γωνία ύψωσης 32° και η πόλωση γραμμική, κατακόρυφη. Στη βάση

πειραματικών δεδομένων υπάρχουν διαθέσιμες οι στάσιμες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης για κάθε ζεύξη ξεχωριστά. Τα στοιχεία αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των στάσιμων παραμέτρων $a_m, \sigma_{a_i}, (i=1,2)$, που παραμετροποιούν το μοντέλο.

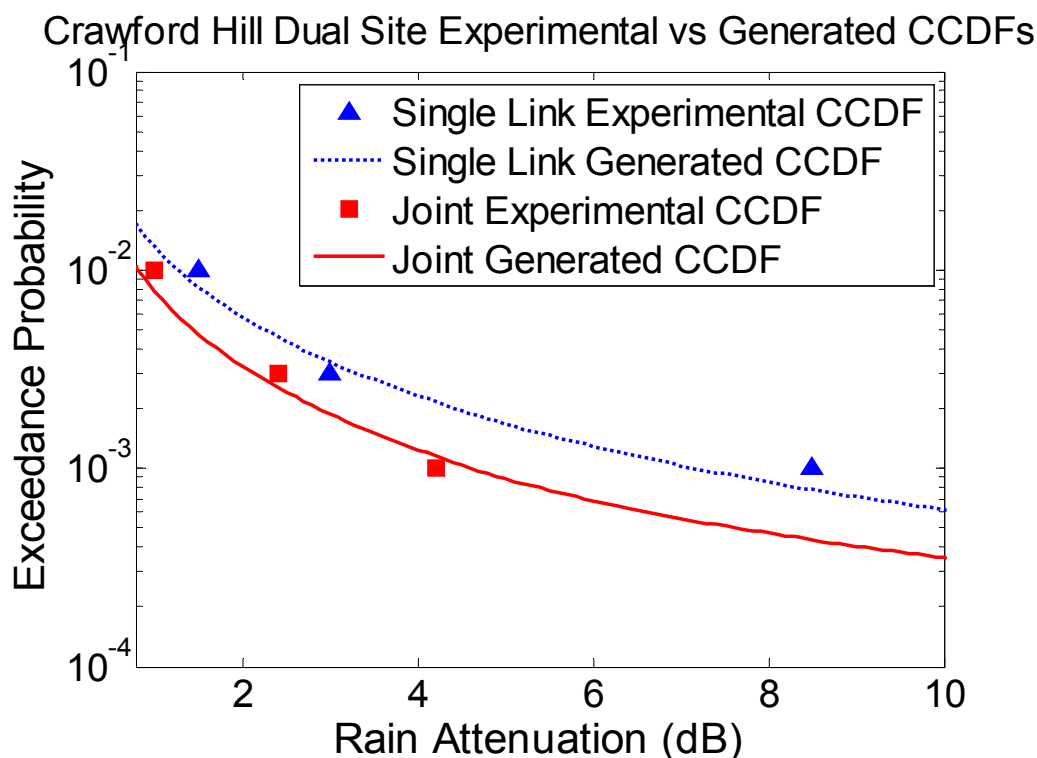
Για την αναπαραγωγή των συσχετισμένων χρονοσειρών και τον υπολογισμό της από κοινού πιθανότητας υπέρβασης έχει χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής συσχέτισης του μοντέλου Paraboni-Barbaliscia [Luglio et al., 2002], ενώ η τιμή του περιλαμβάνεται στον πίνακα 2. Φυσικά η υψηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης εξαιτίας της μικρής απόστασης διαχωρισμού των επίγειων σταθμών συνεπάγεται τη σχετικά χαμηλή τιμή διαφορικού κέρδους. Στην Εικ. 21 απεικονίζεται ένα χρονικό διάστημα των παραγόμενων συσχετισμένων χρονοσειρών απόσβεσης μαζί με την συνδυασμένη απόσβεση. Στην απεικόνιση παρουσιάζεται πως λειτουργεί το σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας και είναι προφανής η επιλογή της ελάχιστης απόσβεσης μεταξύ των ζεύξεων ως την απόσβεση του διαφορικού συστήματος.



Εικ. 21 Χρονοσειρές προσομοίωσης απόσβεσης λόγω βροχής, Crawford Hill, US (Απόσταση σταθμών 3.2 χλμ, συχνότητα 15.5 GHz γωνία ύψωσης 32°)

Στην Εικ. 22 συγκρίνουμε τα πειραματικά δεδομένα για τη μια ζεύξη και για το σύστημα διαφορικής λήψης με αυτά που προέκυψαν από την προσομοίωση των

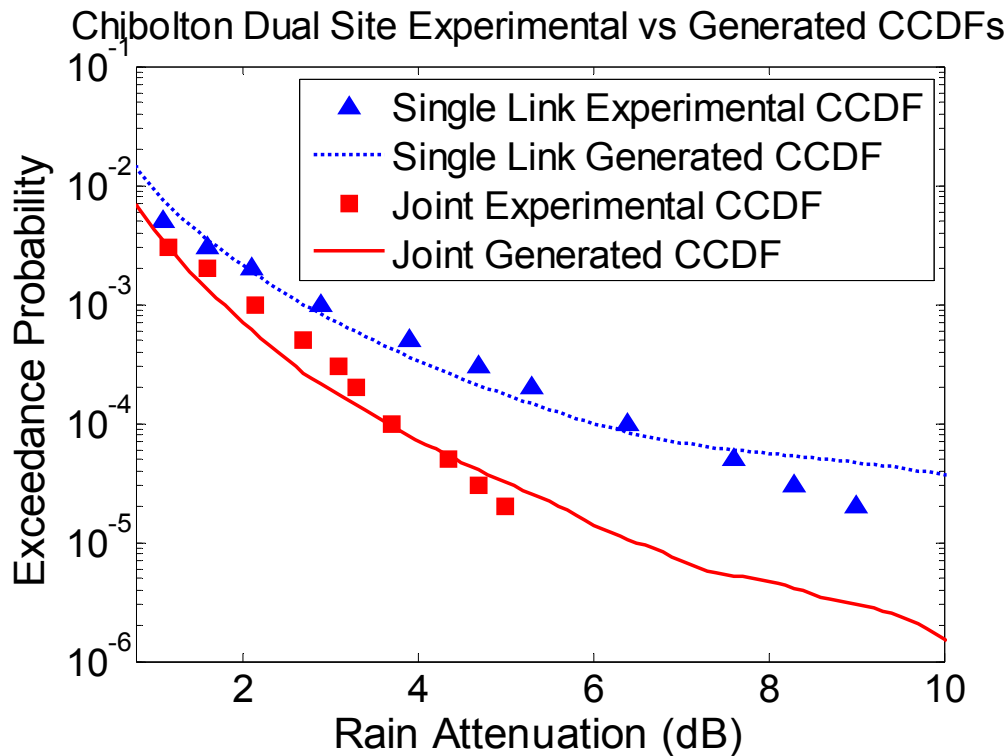
χρονοσειρών απόσβεσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν συμφωνία των παραγόμενων με τα πειραματικά δεδομένα. Ωστόσο όπως έχει ήδη αναφερθεί το μοντέλο είναι τόσο ικανοποιητικό όσον αφορά τα στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτης τάξης όσο επακριβώς μπορούν τα πειραματικά μετρηθέντα να προσεγγιστούν από τη λογαριθμοκανονική κατανομή.



Εικ. 22 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Crawford Hill

Η περίπτωση B είναι επίσης ένα διαφορετικό σύστημα με 2 ζεύξεις ευρισκόμενο όμως σε διαφορετική κλιματική περιοχή και συγκεκριμένα στο Chibolton (GB). Οι επίγειοι σταθμοί βρίσκονται σε απόσταση 6 km [ITU-R DBSG3, 2012], η συχνότητα είναι 11.6 GHz, η γωνία ύψωσης 20° και η πόλωση γραμμική κατακόρυφη. Οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι έχουν υπολογιστεί με τρόπο όμοιο με την περίπτωση A και φαίνονται στον Πίνακα 2. Οι υπολογισμένες από την προσομοίωση και οι πειραματικές καμπύλες φαίνονται στην Εικ. 23. Η συμφωνία μεταξύ τους είναι επίσης πολύ καλή, ωστόσο μπορούμε να διακρίνουμε κάποιες συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο

ότι η λογαριθμοκανονική υπόθεση παρουσιάζει μεγαλύτερη απόκλιση για υψηλότερες τιμές απόσβεσης.

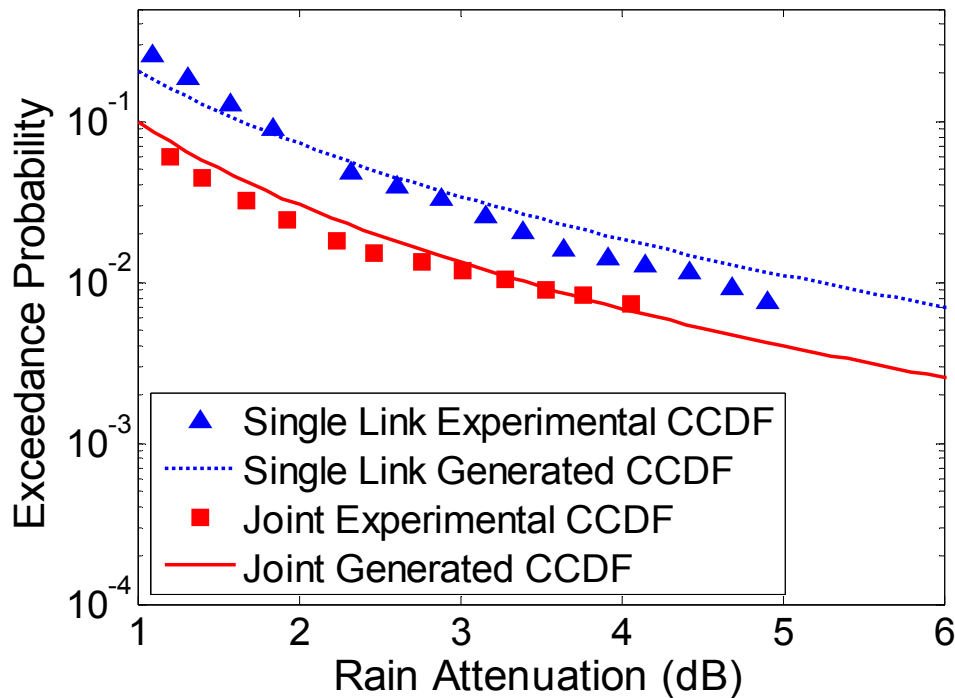


Εικ. 23 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Chibolton

Η περίπτωση C είναι ένα τροχιακό διαφορικό σύστημα με δύο ζεύξεις στην Ιαπωνία (JP). Τα συστήματα αυτά όπως είναι γνωστό χρησιμοποιούν δύο ή περισσότερους δορυφόρους γωνιακά διαχωρισμένους μεταξύ τους ως προς τον ίδιο επίγειο σταθμό και αποτελούν μια εναλλακτική μέθοδο διαφορικής προστασίας με συγκεκριμένα πλεονεκτήματα [Panagoroulos-Kanelloroulos, 2002]. Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το Hokkaido (JP) [Hatsuda et al., 1997]. Συγκεκριμένα η συχνότητα είναι 12 GHz, η γωνία ύψωσης 45° και η γωνιακή διαφορά των δορυφόρων 22° . Τα στάσιμα στατιστικά χαρακτηριστικά υπολογίστηκαν με προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής στα πειραματικά δεδομένα. Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε όπως στο [Panagoroulos-Kanelloroulos, 2002]. Οι τιμές περιλαμβάνονται στον πίνακα 2. Οι υπολογιζόμενες από την προσομοίωση και οι πειραματικές καμπύλες απεικονίζονται στην Εικ. 24,

επαληθεύοντας την εγκυρότητα του μοντέλου και στην περίπτωση των τροχιακά διαφορικών συστημάτων.

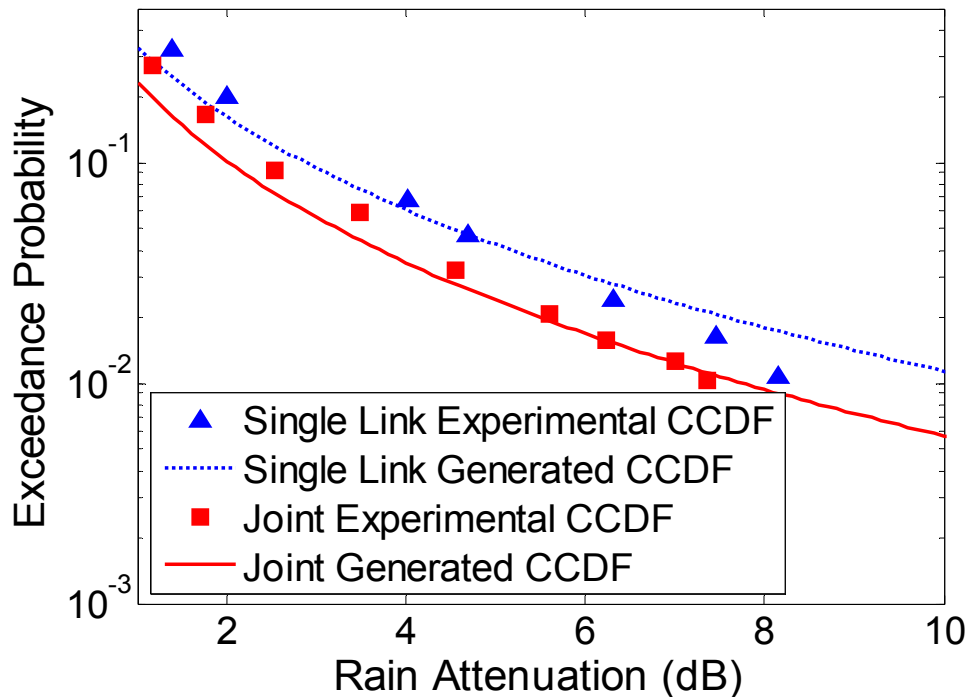
Hokkaido Dual Orbital Experimental vs Generated CCDFs



Εικ. 24 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Hokkaido

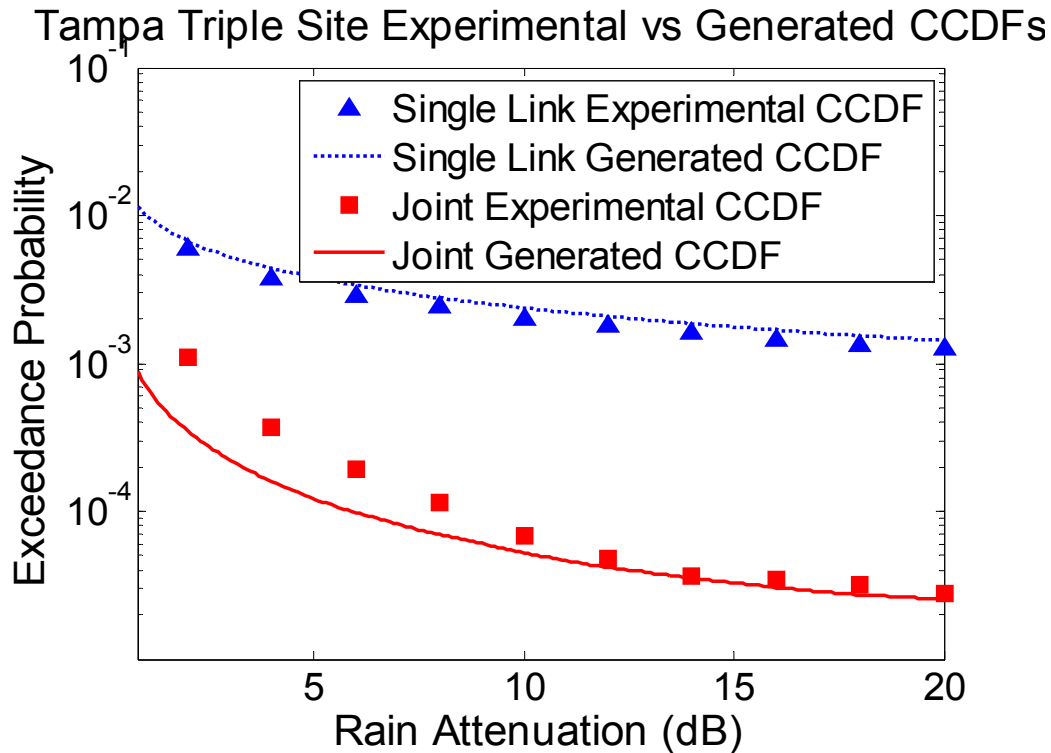
Η περίπτωση D είναι επίσης ένα τροχιακό διαφορικό σύστημα. Ο επίγειος σταθμός βρίσκεται στο Fucino (IT), ενώ οι δορυφόροι που απαρτίζουν το διαφορικό σχήμα είναι οι δορυφόροι SIRIO και OTS [Capsoni et al., 1990]. Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το [Capsoni et al., 1990], όπου και περιλαμβάνονται περαιτέρω πληροφορίες για το πείραμα. Η συχνότητα είναι 12 GHz και η γωνιακή απόσταση των δορυφόρων 27.8°. Οι δορυφόροι βρίσκονται σε διαφορετικές γωνίες ύψωσης από τον επίγειο σταθμό και συγκεκριμένα 33.5° και 41.5°. Οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι υπολογίστηκαν με προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα. Ο συντελεστής συσχέτισης υπολογίστηκε όπως στο [Panagoroulos-Kanelloroulos, 2002]. Οι τιμές περιλαμβάνονται στον πίνακα 2. Οι αντίστοιχες καμπύλες φαίνονται στην Εικ. 25, όπου η συμφωνία μεταξύ παραγόμενων και πειραματικών δεδομένων είναι εμφανής. Αυτό οφείλεται στη συμφωνία των πειραματικών δεδομένων με τη λογαριθμοκανονική κατανομή, κάτι που σχολιάζεται επίσης και στο [Capsoni et al., 1990]

Fucino Dual Orbital Experimental vs Generated CCDFs



Εικ. 25 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Fucino

Η περίπτωση E αναφέρεται σε ένα σύστημα επίγειας τριπλής διαφορικής προστασίας, ευρισκόμενου στη θέση Tampa (US) [ITU-R DBSG3, 2012], [Tang et al., 1982]. Οι τρεις επίγειοι σταθμοί είναι τοποθετημένοι σε διάταξη αστέρα με αποστάσεις 11 km, 16 km και 20 km [Tang et al., 1982]. Η συχνότητα είναι 19 GHz και η μέση γωνία ύψωσης 56° . Οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι περιλαμβάνονται στον πίνακα 2. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης των παραγόμενων με τα πειραματικά δεδομένα απεικονίζονται στην Εικ. 26, απ' όπου προκύπτει η εγκυρότητα του μοντέλου και στην περίπτωση διαφορικών συστημάτων με τρεις ζεύξεις.



Εικ. 26 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Tampa

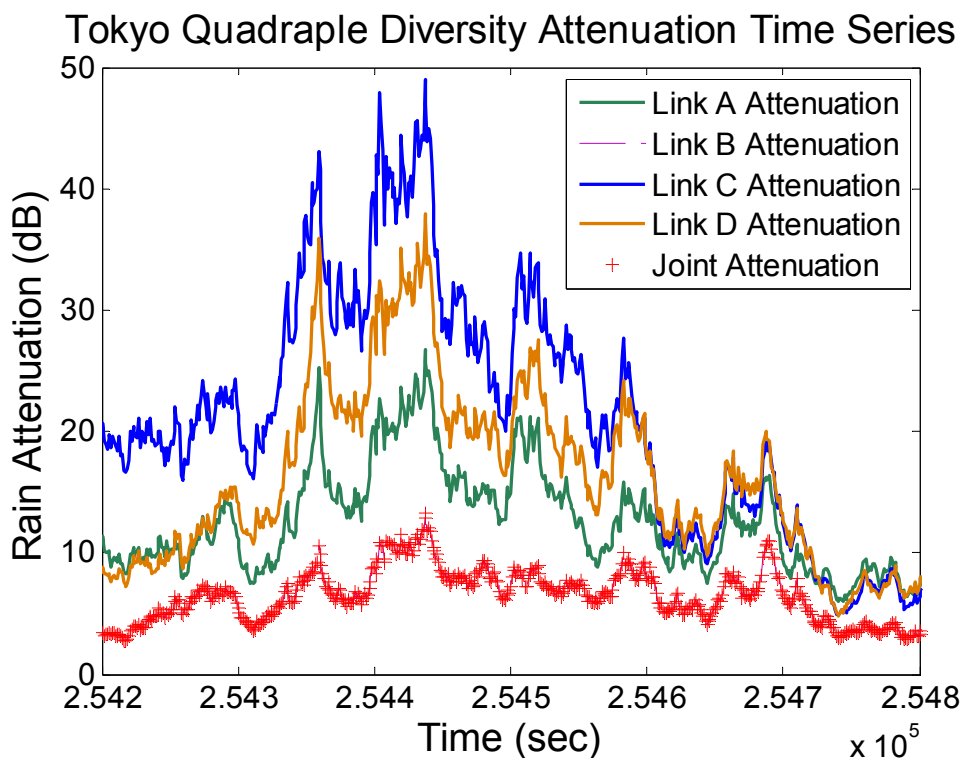
Τέλος προκειμένου να ελεγχθεί εκτενέστερα η ακρίβεια του μοντέλου σε ότι αφορά τα στάσιμα στατιστικά χαρακτηριστικά, αυτά υπολογίστηκαν από την παραγωγή προσομοιωμένων χρονοσειρών απόσβεσης για όλα τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα στη βάση δεδομένων ITU-R SG3 [ITU-R DBSG3, 2012]. Οι τιμές σφάλματος που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη σύσταση της ITU-R P.311-13 [ITU-R Rec. P. 311-13, 2009] φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5 Υπολογισθείσες τιμές σφάλματος από την εφαρμογή του μοντέλου στα πειραματικά δεδομένα της ITU-R SG3

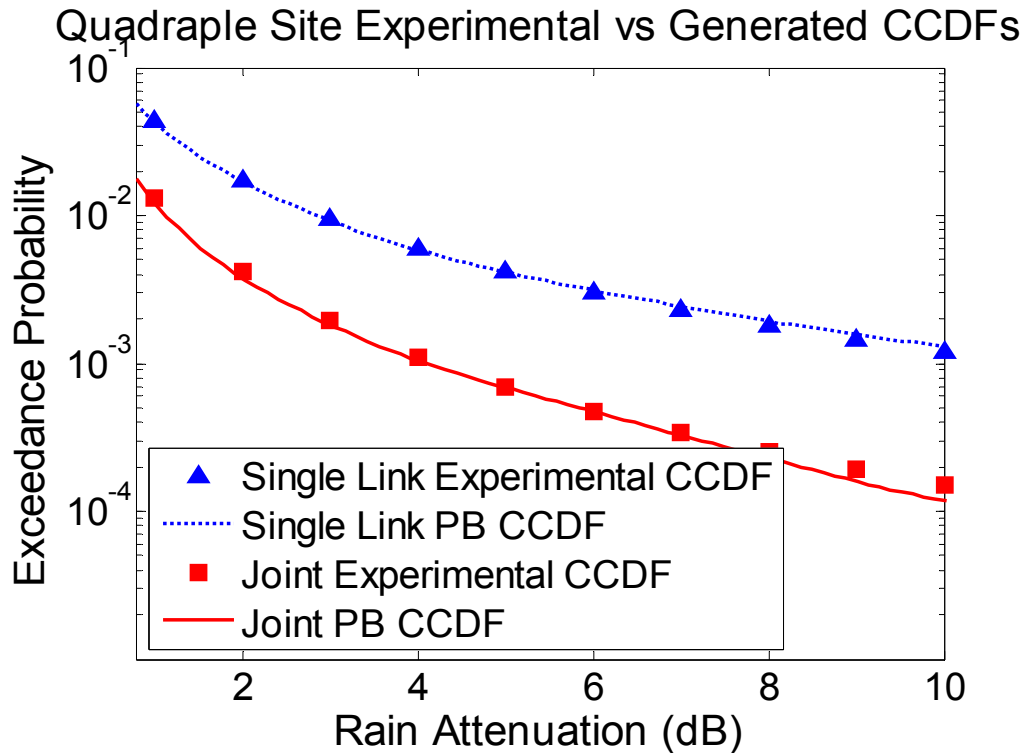
CALCULATED ERROR	
Παράμετρος	Τιμή
Mean	-16.65%
STD	26.05%
RMS	30.91%

Ένα υποθετικό τετραπλό διαφορικό σύστημα εξετάζεται στην περίπτωση F. Το σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται στο Τόκυο (JP) και ότι οι επίγειοι σταθμοί σχηματίζουν ένα τετράγωνο πλευράς 15 km. Η συχνότητα υπό εξέταση έχει θεωρηθεί

$f = 21$ GHz και οι γωνίες ανύψωσης $\varphi = 38^\circ$ κοινές για όλες τις ζεύξεις. Οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι συμπεριλαμβανομένου των συντελεστών συσχέτισης υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο της ITU-R [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009]. Ένα χρονικό διάστημα των παραγόμενων χρονοσειρών απεικονίζεται στην Εικ. 27. Το μοντέλο αναπαραγάγει τα στάσιμα στατιστικά χαρακτηριστικά με πολύ μεγάλη ακρίβεια, όπως μπορεί να φανεί από την Εικ. 28.



Εικ. 27 Προσομοιωμένες χρονοσειρές απόσβεσης βροχής στο Tokyo, JP



Εικ. 28 Πειραματικές και παραγόμενες καμπύλες CCDF για Tokyo

Πρόσφατα δημοσιεύτηκε μια μέθοδος υπολογισμού των από κοινού πιθανοτήτων υπέρβασης από στοιχεία μετεωρολογικών ραντάρ και λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου [Luini et al., 2011]. Σημειώνεται ότι το μοντέλο που προτάθηκε εδώ είναι ικανό να ενσωματώσει την επίδραση των στοιχείων του ανέμου χρησιμοποιώντας μη ισοτροπικό χωρικό συντελεστή συσχέτισης με τροποποίηση των κατάλληλων παραμέτρων.

Τέλος το παρόν πολυδιάστατο μοντέλο δεν έχει δοκιμαστεί σε επίγεια διαφορικά συστήματα σε αποστάσεις μικρότερες των 1.7 km (micro-scale site diversity), καθόσον δεν βρέθηκαν αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Ο γνωστός τύπος του Hodges άλλωστε είναι έγκυρος για αποστάσεις μεγαλύτερες των 1.7 km, καθόσον έχει προέλθει από τα πειραματικά δεδομένα της ITU-R. Ο Matricciani με χρήση της τεχνικής της συνθετικής καταιγίδας έδειξε [Matricciani, 2003] ότι το διαφορικό κέρδος για μικρές αποστάσεις της τάξης των 0.5 km και 0.75 km είναι περίπου το ίδιο με αυτό για απόσταση 2 km. Κατά συνέπεια το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο δεν έχει δοκιμαστεί σε αποστάσεις μικρότερες των 1.7 km καθόσον δεν έχει δημοσιευτεί ένας έγκυρος συντελεστής συσχέτισης για τόσο μικρές αποστάσεις.

Κεφάλαιο 5.

Δυναμικό Μοντέλο Απόσβεσης λόγω Βροχής με Κλιμάκωση στη Συχνότητα και Εφαρμογή στον Έλεγχο Ισχύος της άνω ζεύξης σε Δορυφορικά Συστήματα.

5.1. Πρόλογος

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα νέο στοχαστικό δυναμικό μοντέλο για την κλιμάκωση στη συχνότητα της απόσβεσης λόγω βροχής. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του στιγμιαίου συντελεστή κλιμάκωσης της απόσβεσης στη συχνότητα και παρέχει τη μέθοδο για τη προσομοίωση χρονοσειρών απόσβεσης σε διαφορετικές συχνότητες, καθώς και αναλυτικούς υπολογισμούς. Επιπλέον παρέχεται το θεωρητικό πλαίσιο για την πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής σε μια συχνότητα με βάση τη μετρηθείσα απόσβεση σε μια άλλη συχνότητα. Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη απόδοση ενός σχήματος ανοικτού βρόγχου ελέγχου της ισχύος της άνω ζεύξης σε ένα δορυφορικό σύστημα σε συχνότητα μεγαλύτερη των 10 GHz. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε προσομοιούμενες χρονοσειρές απόσβεσης που αναπαράχθηκαν με χρήση της τεχνικής συνθετικής καταιγίδας σε πειραματικά δεδομένα ρυθμού βροχόπτωσης. Τέλος παρουσιάζεται η βελτίωση στην απόδοση σε ότι αφορά τη διαθεσιμότητα του συστήματος με χρήση του μοντέλου για ένα σχήμα ελέγχου της ισχύος της άνω ζεύξης.

5.2. Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ανάγκη για επίτευξη υψηλών ρυθμών μετάδοσης στα σύγχρονα ευρυζωνικά δορυφορικά συστήματα έχει οδηγήσει στη χρησιμοποίηση υψηλότερων συχνοτήτων, από τη μπάντα Ka και άνωθεν. Το υψηλό εύρος ζώνης που είναι διαθέσιμο σε αυτές τις περιοχές συχνοτήτων ωστόσο δεν παρέχεται χωρίς κόστος, αφού σε αυτή την περιοχή η διάδοση επιβαρύνεται σημαντικά από την επίδραση της ατμόσφαιρας [Crane, 1996], [Panagopoulos et al., 2004], [Ippolito, 2008], [Castanet, 2008]. Η απόσβεση λόγω βροχής είναι ο κυρίαρχος παράγοντας διαλείψεων που υποβαθμίζει την απόδοση των δορυφορικών επικοινωνιακών συστημάτων. Για το λόγο αυτό απαιτούνται τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων, προκειμένου να

εξασφαλισθεί η διαθεσιμότητα και η αξιοπιστία των ζεύξεων [Panagopoulos et al., 2004], [Ippolito, 2008]. Επιπλέον στα σύγχρονα ευρυζωνικά δορυφορικά συστήματα η δυνατότητα υποστήριξης πολυμέσων και νέες απαιτητικές εφαρμογές θέτουν υψηλές απαιτήσεις στην εξασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσιών (QoS, Quality of Service). Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές άμβλυνσης των διαλείψεων (FMT, Fade Mitigation Techniques) λόγω βροχής σε συστήματα που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10 GHz, συμπεριλαμβανομένου των τεχνικών διαφορικής λήψης (θέσεως, γωνιακή, χρονική και στη συχνότητα), προσαρμοσμένης κωδικοποίησης και διαμόρφωσης (ACM, Adaptive Coding and Modulation), του περιορισμού στο ρυθμό μετάδοσης (DRR, Data Rate Reduction) και ελέγχου ισχύος (PC, Power Control) τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. Η αποτελεσματική ωστόσο χρήση των τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων απαιτεί τη γνώση της κατάστασης του διαύλου (CSI, Channel State Information), προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η χρησιμοποιούμενη τεχνική στην αντιστάθμιση της επικρατούσας κατάστασης. Υπό αυτό το πρίσμα η πρόβλεψη της δυναμικής συμπεριφοράς της απόσβεσης λόγω βροχής είναι μια κρίσιμη παράμετρος στη σχεδίαση αποδοτικών τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων [Panagopoulos et al., 2004], [Ippolito, 2008], [Castanet, 2008].

Η ιδέα της τεχνικής ελέγχου της ισχύος είναι να προσαρμόσει την εκπεμπόμενη ισχύ σε τέτοια επίπεδα, ώστε να αντισταθμίσει τις απώλειες κατά τη διάρκεια των διαλείψεων και να εξασφαλίσει την επιθυμητή στάθμη του σήματος στο δέκτη. Οι δυναμικές παράμετροι της απόσβεσης λόγω βροχής θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τη βέλτιστη σχεδίαση σχημάτων ελέγχου της ισχύος σε δορυφορικά συστήματα [Maseng-Bakken, 1981], [Sweeney-Bostian, 1992]. Μια ενδιαφέρουσα τεχνική ελέγχου της ισχύος σε δορυφορικά συστήματα είναι η μέθοδος ελέγχου της ισχύος της άνω ζεύξης (ULPC, Uplink Power Control) που έχει προταθεί για την περίπτωση δορυφορικών συστημάτων σε συχνότητες άνω των 10 GHz με μικρούς επίγειους σταθμούς με χαμηλό περιθώριο διαλείψεων [Sweeney-Bostian, 1999], [Dissanayake, 1997]. Ο έλεγχος της ισχύος της άνω ζεύξης με ανοιχτό βρόγχο (open loop) είναι συνηθέστερος καθώς είναι απλούστερος από τη μέθοδο κλειστού βρόγχου [Dissanayake, 1997]. Στην περίπτωση αυτή το ρόλο του σήματος αναφοράς (ανάδραση) που είναι απαραίτητο ώστε ο επίγειος σταθμός να ρυθμίσει την ισχύ της εκπομπής στην άνω ζεύξη παίζει το σήμα της κάτω ζεύξης. Ωστόσο θα πρέπει να χρησιμοποιούν τεχνικές κλιμάκωσης της απόσβεσης στην επιθυμητή συχνότητα,

ώστε να μεταφραστεί η μετρηθείσα απόσβεση της κάτω ζεύξης στην αναμενόμενη απόσβεση στην άνω ζεύξη.

Στις μέρες μας παρουσιάζεται αυξημένο το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστημάτων στις μπάντες Q, V. Τα συστήματα αυτά θα έχουν θεμελιώδη ρόλο στην παροχή ευρυζωνικών δορυφορικών ζεύξεων με πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, οδηγώντας σε αυτό που χαρακτηρίζεται ως δορυφορικά δίκτυα Terabit [Evans et al., 2011], [Cianca et al., 2011]. Οι μπάντες Q, V μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε σε ζεύξεις τροφοδότησης (feeder links), είτε σε εφαρμογές παροχής υπηρεσιών απευθείας στο χρήστη, σταθερό ή κινούμενο, ενώ θα αποτελούν βασικό μέρος της επικοινωνιακής υποδομής.

Στην διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία υφίστανται αρκετά εμπειρικά μοντέλα που έχουν εξαχθεί από μετρήσεις και αφορούν τη διαδικασία κλιμάκωσης της απόσβεσης στη συχνότητα. Γενικά οι μέθοδοι κλιμάκωσης της απόσβεσης στη συχνότητα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, στις στάσιμες (long term) και στις δυναμικές (short term). Ένα στάσιμο μοντέλο κλιμάκωσης της απόσβεσης στη συχνότητα υπολογίζει την πιθανότητα υπέρβασης μιας τιμής απόσβεσης για ένα συγκεκριμένο ραδιοβήμα, από την πιθανότητα υπέρβασης της απόσβεσης για το ίδιο ραδιοβήμα σε άλλη συχνότητα [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009], [Drufuca, 1974], [Hodge, 1977]. Οι δυναμικές μέθοδοι κλιμάκωσης της απόσβεσης στη συχνότητα αναφέρονται στο στιγμιαίο λόγο των αποσβέσεων λόγω βροχής στις δύο διαφορετικές συχνότητες [COST 255, 2002], [Bertorelli-Paraboni, 2007], [Grémont-Filip, 1998]. Λόγω της φυσικής μεταβλητότητας των εμπλεκόμενων τροποσφαιρικών φαινομένων (πχ κατανομή μεγέθους σταγόνας, διακυμάνσεις στο χώρο και το χρόνο του ρυθμού βροχόπτωσης), είναι προτιμότερη για την πρόβλεψη της κατάστασης του καναλιού η χρήση των μοντέλων που βασίζονται στη δυναμική κλιμάκωση της απόσβεσης στη συχνότητα σε σχέση με τα στάσιμα μοντέλα [COST 255, 2002]. Το μοντέλο Maseng-Bakken (M-B) [Maseng-Bakken, 1981] είναι ένα ευρέως γνωστό στοχαστικό δυναμικό μοντέλο που αφορά μια δορυφορική ζεύξη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σχεδίαση και την εκτίμηση δορυφορικών συστημάτων με δυνατότητα προσαρμογής στην κατάσταση του διαύλου [Castanet et al., 2003], καθώς λαμβάνει υπόψη του τη χρονική μεταβολή της απόσβεσης λόγω βροχής. Εδώ προτείνουμε μια επέκταση του μοντέλου M-B και παρουσιάζουμε ένα δυναμικό μοντέλο βασισμένο σε ένα σύστημα στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ) για τη δυναμική μοντελοποίηση της στιγμιαίας κλιμάκωσης της απόσβεσης στη

συχνότητα. Η προτεινόμενη προσέγγιση βασίζεται στην υπόθεση ότι η απόσβεση λόγω βροχής σε ένα ραδιοβήμα και σε δύο διαφορετικές συχνότητες ακολουθεί τη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή. Η υπόθεση αυτή έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά με δεδομένα από το δορυφόρο Italsat στο [Bertorelli-Paraboni, 2007]. Το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο μπορεί να εφαρμοσθεί σε ένα σχήμα ανοιχτού βρόχου ελέγχου της ισχύος της άνω ζεύξης. Το μοντέλο προβλέπει την αναμενόμενη απόσβεση σε μια άλλη συχνότητα λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική μεταβλητότητα της απόσβεσης για διάφορες χρονικές καθυστερήσεις, αλλά και τις διακυμάνσεις του στιγμιαίου συντελεστή κλιμάκωσης της απόσβεσης στη συχνότητα [Sweeney-Bostian, 1999]. Το μοντέλο αποτελεί επίσης ένα χρήσιμο εργαλείο για τη παραγωγή συσχετισμένων χρονοσειρών απόσβεσης σε διαφορετικές συχνότητες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν αφενός για δοκιμή σχημάτων ελέγχου της ισχύος και αφετέρου για την επιλογή των κατάλληλων αλγόριθμων. Επισημαίνεται ότι η ανάπτυξη δυναμικών μοντέλων διάδοσης υψηλότερης τάξης (όπως της δυναμικής κλιμάκωσης στη συχνότητα) αποτελούν ειδικό αντικείμενο ενδιαφέροντος της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Επιτροπής (ESA, European Space Agency), όπως καταδεικνύει η εκτόξευση του δορυφόρου Alphasat το 2012 και τα σχετικά πειράματα που αφορούν τη διάδοση στις συχνότητες Q/V [Codispori et al., 2012], [Ruggieri et al., 2012].

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται το δυναμικό μοντέλο και αναλύεται το πρόβλημα της πρόβλεψης, ενώ στη συνέχεια περιγράφονται οι μέθοδοι υπολογισμού των απαιτούμενων παραμέτρων. Τέλος παρέχονται αριθμητικά αποτελέσματα με σε δεδομένα που προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνικής της συνθετικής καταιγίδας (SST, Synthetic Storm Technique) σε πειραματικά δεδομένα ρυθμού βροχόπτωσης από την Αθήνα [S. A. Kanellopoulos et al., 2006]. Το μοντέλο εφαρμόζεται επίσης σε προσομοιωμένα δεδομένα από τις πειραματικές τιμές του Spino d'Adda στην Ιταλία.

5.3. Στοχαστικό Μοντέλο Απόσβεσης με Κλιμάκωση στη Συχνότητα

5.3.1. Το στοχαστικό δυναμικό μοντέλο

Έστω οι στοχαστικές ανεξίτητες της απόσβεσης λόγω βροχής $a^d(t), a^u(t)$ ¹, (dB) που προκαλούνται στην κάτω ζεύξη (DL) και στην άνω ζεύξη (UL), στις συχνότητες f_d, f_u αντίστοιχα. Οι εκθέτες και δείκτες d και u υποδηλώνουν την

¹ Οι συμβολισμοί $a(t)$ και a_i χρησιμοποιούνται αμοιβαία για να υποδηλώσουν τη χρονική εξάρτηση.

κάτω και την άνω ζεύξη αντίστοιχα. Η βασική υπόθεση του μοντέλου η οποία έρχεται σε συμφωνία με πειραματικά δεδομένα [Dissanayake, 1997], είναι ότι η απόσβεση λόγω βροχής στις δύο διαφορετικές συχνότητες ακολουθεί την διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή, ισοδύναμα ότι οι τ.μ. $\ln a^d(t), \ln a^u(t)$ ακολουθούν την από κοινού (joint) κανονική κατανομή. Οι στάσιμες (long-term) στατιστικές παράμετροι της απόσβεσης λόγω βροχής στις δύο αυτές συχνότητες είναι οι $\sigma_a^d, \ln a_m^d, \sigma_a^u, \ln a_m^u$, που αναπαριστούν την τυπική απόκλιση και τη μέση τιμή των αντίστοιχων κανονικών τ.μ. του φυσικού λογαρίθμου της απόσβεσης [Papoulis-Pillai, 2002]. Θεωρούμε το δυναμικό στοχαστικό μοντέλο για τις ανελιξίες της απόσβεσης λόγω βροχής στην άνω και την κάτω ζεύξη του δορυφορικού ραδιοβήματος, ως το εξής σύστημα στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ):

$$\begin{cases} da_t^d = a_t^d \left[\frac{s_{11}^2 + s_{12}^2}{2} - \beta_d \ln \left(\frac{a_t^d}{a_m^d} \right) \right] dt + a_t^d s_{11} dW_t^1 + a_t^d s_{12} dW_t^2 \\ da_t^u = a_t^u \left[\frac{s_{21}^2 + s_{22}^2}{2} - \beta_u \ln \left(\frac{a_t^u}{a_m^u} \right) \right] dt + a_t^u s_{21} dW_t^1 + a_t^u s_{22} dW_t^2 \end{cases} \quad (5.1)$$

όπου W_t^1, W_t^2 είναι ανεξάρτητες διαδικασίες Wiener, γνωστές ως κινήσεις Brown [Karlin-Taylor, 1975].

Εφαρμόζοντας τους μη γραμμικούς μετασχηματισμούς:

$$X_t^u = \ln(a_t^u/a_m^u) \text{ και } X_t^d = \ln(a_t^d/a_m^d) \quad (5.2)$$

στη σχέση (5.1), τότε το σύστημα μετασχηματίζεται στο γραμμικό σύστημα ΣΔΕ του τύπου Ornstein-Uhlenbeck [Karatzas-Shreve, 1991]

$$\begin{cases} dX_t^d = -\beta_d X_t^d dt + s_{11} dW_t^1 + s_{12} dW_t^2 \\ dX_t^u = -\beta_u X_t^u dt + s_{21} dW_t^1 + s_{22} dW_t^2 \end{cases} \quad (5.3)$$

Στις σχέσεις (5.1) και (5.3) β_u, β_d είναι οι δυναμικές παράμετροι της απόσβεσης λόγω βροχής στην άνω και στην κάτω ζεύξη αντίστοιχα, οι οποίες είναι κατά βάση διαφορετικές σε τιμή, αφού αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες [ITU-R Rec. P. 837-6, 2012], [S. A. Kanellopoulos et al., 2007]. Επιπλέον οι παράμετροι $s_{ij}, 1 \leq i, j \leq 2$ (ως στοιχεία του πίνακα **S**) είναι οι παράμετροι που συνδυάζουν τις ανεξάρτητες ανελιξίες Wiener για τη δημιουργία του συσχετισμένου θορύβου στις δύο ζεύξεις. Οι παράμετροι αυτοί μπορούν να προκύψουν θεωρώντας

γνωστές τις δυναμικές παραμέτρους β_u, β_d από τις στάσιμες τιμές διακύμανσης και συνδιακύμανσης των λύσεων X_t^d, X_t^u του συστήματος (5.3). Αφού η (5.3) είναι σύστημα ΣΔΕ αν συμβολίσουμε τη λύση ως τη διανυσματική ανέλιξη $\mathbf{X}_t = [X_t^d, X_t^u]^T$, τότε αυτή δίνεται από [Karlin-Taylor, 1975], [Karatzas-Shreve, 1991]:

$$\mathbf{X}_t = e^{t\mathbf{B}} \cdot \mathbf{X}_0 + e^{t\mathbf{B}} \cdot \int_0^t e^{-s\mathbf{B}} \cdot \mathbf{S} \cdot d\mathbf{W}_s, \quad (5.4)$$

όπου $e^{t\mathbf{B}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} \mathbf{B}^n$ και $\mathbf{W}_t = [W_t^1, W_t^2]^T$ η δισδιάστατη ανέλιξη Wiener.

Έχουμε επίσης χρησιμοποιήσει συμβολισμό πινάκων με τους πίνακες

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\beta_d & 0 \\ 0 & -\beta_u \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

και $\mathbf{S} = [s_{ij}]_{1 \leq i, j \leq 2}$.

Η λύση είναι μια ανέλιξη Gauss αν η αρχική συνθήκη \mathbf{X}_0 θεωρηθεί ότι ακολουθεί τη δισδιάστατη κανονική κατανομή. Η υπόθεση αυτή συμπεριλαμβάνει τη δεσμευμένη περίπτωση στην οποία η \mathbf{X}_0 είναι ντετερμινιστική. Κατά συνέπεια αρκεί να προσδιοριστεί το μέσο διάνυσμα και ο πίνακας συνδιακύμανσης. Το μέσο διάνυσμα της κανονικής στοχαστικής ανέλιξης \mathbf{X}_t συμβολίζεται με $\mathbf{M}_X(t)$ και δίνεται από:

$$\mathbf{M}_X(t) = e^{t\mathbf{B}} \cdot \mathbf{M}_X(0). \quad (5.6)$$

Ο πίνακας συνδιακύμανσης $\mathbf{C}_X(t)$ της διανυσματικής ανέλιξης \mathbf{X}_t σε κάθε χρονική στιγμή t δίνεται από [Karlin-Taylor, 1975], [Karatzas-Shreve, 1991]:

$$\mathbf{C}_X(t) = e^{t\mathbf{B}} \left[\mathbf{C}_X(0) + \int_0^t e^{-s\mathbf{B}} \mathbf{S} \mathbf{S}^T e^{-s\mathbf{B}^T} ds \right] e^{t\mathbf{B}^T}. \quad (5.7)$$

Από τη σχέση (5.7) φαίνεται εύκολα ότι συγκλίνει σε ένα στάσιμο πίνακα συνδιακύμανσης \mathbf{C}_X , ο οποίος ικανοποιεί την εξίσωση:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{C}_X + \mathbf{C}_X \cdot \mathbf{B}^T = -\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T. \quad (5.8)$$

Ο στάσιμος πίνακας συνδιακύμανσης εκφραζόμενος συναρτήσει των στάσιμων στατιστικών παραμέτρων της απόσβεσης δίνεται από:

$$\mathbf{C}_X = \begin{bmatrix} (\sigma_a^d)^2 & \rho_{n_{du}} \sigma_a^u \sigma_a^d \\ \rho_{n_{du}} \sigma_a^u \sigma_a^d & (\sigma_a^u)^2 \end{bmatrix}. \quad (5.9)$$

Με αυτό τον τρόπο οι παράμετροι του μοντέλου που δίνεται από το σύστημα ΣΔΕ μπορούν να εξαχθούν υπολογίζοντας τον πίνακα

$$\mathbf{G} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T, \quad (5.10)$$

ο οποίος σύμφωνα με τη σχέση (5.8) δίνεται από τη σχέση

$$[G]_{ij} = (\beta_i + \beta_j)[C_X]_{ij}, \quad 1 \leq i, j \leq 2. \quad (5.11)$$

όπου $\beta_1 = \beta_d$ και $\beta_2 = \beta_u$. Η ανάλυση του πίνακα \mathbf{G} ως γινόμενο $\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^T$ είναι άμεση και υλοποιείται μέσω της ανάλυσης Cholesky.

Τέλος ο συντελεστής συσχέτισης $\rho_{n_{du}}$ στη σχέση (5.9) είναι ο συντελεστής συσχέτισης των από κοινού κανονικών τ.μ. $\ln a^d(t)$, $\ln a^u(t)$. Ο συντελεστής αυτός σχετίζεται με το συντελεστή συσχέτισης ρ_{du} των αποσβέσεων λόγω βροχής στις δύο διαφορετικές συχνότητες f_d, f_u σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho_{n_{du}} = \frac{\ln \left[1 + \rho_{du} \cdot \sqrt{\left(e^{(\sigma_a^u)^2} - 1 \right) \left(e^{(\sigma_a^d)^2} - 1 \right)} \right]}{\sigma_a^u \sigma_a^d} \quad (5.12)$$

Ο συντελεστής $\rho_{n_{du}}$ μπορεί να εξαχθεί από πειραματικά δεδομένα [15].

5.3.2. Πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής στην άνω ζεύξη δοθείσας της τιμής απόσβεσης λόγω βροχής στην κάτω ζεύξη

Το πρόβλημα της δυναμικής πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής με κλιμάκωση στη συχνότητα αποσκοπεί στην εκτίμηση της αναμενόμενης απόσβεσης στην άνω ζεύξη $a_{s+\Delta t}^u$ σε μελλοντικό χρόνο $s + \Delta t$, δεδομένης της μετρηθείσας απόσβεσης στην κάτω ζεύξη a_s^d τη χρονική στιγμή s , με Δt τη χρονική διαφορά της πρόβλεψης από τη μέτρηση. Χωρίς απώλεια της γενικότητας και λόγω χρονικής ομογένειας του προβλήματος αρκεί να θεωρήσουμε $s = 0$ και $\Delta t = t$, μεταφέροντας δηλαδή το πρόβλημα της πρόβλεψης στις χρονικές στιγμές $s = 0$ και $s + \Delta t = t$ αντίστοιχα. Κατά συνέπεια αναζητούμε τη δεσμευμένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (pdf, probability density function) $p(a_t^u | a_0^d)$. Με χρήση των μη γραμμικών μετασχηματισμών (5.2) το πρόβλημα μπορεί να αναχθεί στις αντίστοιχες

ιδιότητες της ανέλιξης \mathbf{X}_t . Έστω ότι $\mathbf{X}_t = [x_t^d, x_t^u]^T$ και $\mathbf{X}_0 = [x_0^d, x_0^u]^T$ είναι οι τιμές της στοχαστικής ανέλιξης \mathbf{X}_t τις χρονικές στιγμές t και 0 αντίστοιχα. Καθώς οι x_t^u και x_0^d σχετίζονται με τις a_t^u και a_0^d από τη (5.2), στην ουσία αναζητούμε τη συνάρτηση $p(x_t^u | x_0^d)$. Η ανέλιξη \mathbf{X}_t όπως μπορεί να φανεί από τις σχέσεις (5.6) και (5.7) τελικά τείνει σε μια στάσιμη κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $p_{st}(x_1, x_2)$, η οποία είναι η δισδιάστατη κανονική κατανομή $N(\mathbf{0}, \mathbf{C}_X)$ [Papoulis-Pillai, 2002]. Η δέσμευση ως προς την x_0^d λαμβάνεται υπόψη εξαναγκάζοντας την αρχική τιμή της ΣΔΕ σε ντετερμινιστική τιμή ως προς την παράμετρο x_0^d . Έτσι η αρχική κατανομή της \mathbf{X}_0 δεδομένης της στάσιμης δισδιάστατης κανονικής κατανομής των x_0^d, x_0^u με πυκνότητα πιθανότητας $p_{st}(x_0^d, x_0^u)$ επιλέγεται ως $p_{st}(x_0^u | x_0^d)$. Αυτή είναι επίσης μια κανονική κατανομή με μέση τιμή $\rho_{n_{du}} \frac{\sigma_a^u}{\sigma_a^d} x_0^d$ και διακύμανση $(\sigma_a^u)^2 \cdot (1 - \rho_{n_{du}}^2)$. Θεωρώντας τώρα την αρχική κατανομή ως τετριμμένη δισδιάστατη (αφού είναι ντετερμινιστική ως προς τη μία παράμετρο) το αρχικό μέσο διάνυσμα και ο αρχικός πίνακας συνδιακύμανσης εκφράζονται ως:

$$\mathbf{M}_X(0) = \begin{bmatrix} x_0^d \\ \rho_{n_{du}} \frac{\sigma_a^u}{\sigma_a^d} x_0^d \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

και

$$\mathbf{C}_X(0) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_a^u)^2 (1 - \rho_{n_{du}}^2) \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Εισάγοντας τώρα τις σχέσεις (5.13) και (5.14) στις (5.6) και (5.7) αντίστοιχα, μπορούμε να υπολογίσουμε το μέσο διάνυσμα $\mathbf{M}_X(t)$ και τον πίνακα συνδιακύμανσης $\mathbf{C}_X(t)$ σε κάθε χρονική στιγμή t και κατά συνέπεια τη δισδιάστατη δεσμευμένη πυκνότητα πιθανότητας $p(x_t^d, x_t^u | x_0^d)$. Στην πραγματικότητα καθώς ενδιαφερόμαστε μόνο για την $p(x_t^u | x_0^d)$ επιλέγοντας τα αντίστοιχα στοιχεία από το διάνυσμα $\mathbf{M}_X(t)$ και τον πίνακα $\mathbf{C}_X(t)$ συμπεραίνουμε ότι η ζητούμενη πυκνότητα πιθανότητας $p(x_t^u | x_0^d)$ δίνεται από τη σχέση:

$$p(x_t^u | x_0^d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\rho_{n_{du}}^2 e^{-2\beta_u t})}\sigma_a^u} e^{-\frac{(x_t^u - \rho_{n_{du}} \frac{\sigma_a^u}{\sigma_a^d} x_0^d e^{-\beta_u t})^2}{2(\sigma_a^u)^2 (1-\rho_{n_{du}}^2 e^{-2\beta_u t})}} \quad (5.15)$$

Τώρα η αναμενόμενη απόσβεση λόγω βροχής στην άνω ζεύξη a_t^u τη χρονική στιγμή t με δεδομένη την απόσβεση λόγω βροχής στην κάτω ζεύξη a_0^d είναι η εξής:

$$E[a_t^u | a_0^d] = a_m^u \cdot \exp\left(\rho_{n_{du}} \frac{\sigma_a^u}{\sigma_a^d} \left[\ln\left(\frac{a_0^d}{a_m^d}\right)\right] \cdot e^{-\beta_u t} + \frac{1}{2}(\sigma_a^u)^2 \cdot (1-\rho_{n_{du}}^2 e^{-2\beta_u t})\right) \quad (5.16)$$

Το σφάλμα της πρόβλεψης e ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής της απόσβεσης στην άνω ζεύξη και της προβλεφθείσας, με δεδομένη πάντα την αρχική τιμή απόσβεσης στην κάτω ζεύξη:

$$e = a_t^u - E[a_t^u | a_0^d] \quad (5.17)$$

Αυτή η τιμή είναι στην πραγματικότητα μια τ.μ. με μέση τιμή μηδέν αφού η δεσμευμένη μέση τιμή είναι μια αμερόληπτος (unbiased) εκτιμήτρια. Η διακύμανση της εκφράζεται ως:

$$E[e^2] = (a_m^u)^2 e^{(\sigma_a^u)^2} \left(e^{(\sigma_a^u)^2} - e^{(\sigma_a^u)^2 \rho_{n_{du}}^2 e^{-\beta_u t}} \right). \quad (5.18)$$

Ωστόσο σε ρεαλιστικές εφαρμογές ελέγχου της ισχύος η εκτίμηση της απόσβεσης βάσει της δεσμευμένης μέσης τιμής δεν επαρκεί για να εξασφαλίσει τη επιθυμητή διαθεσιμότητα P_{avail} % για την επίτευξη της ζητούμενης ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Η εκτιμώμενη απόσβεση στην άνω ζεύξη που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε ένα σχήμα ελέγχου της ισχύος θα πρέπει να βασίζεται στην πιθανότητα υπέρβασης που σχετίζεται άμεσα με την επιθυμητή διαθεσιμότητα. Από τη σχέση (15) η τιμή της απόσβεσης που δεν υπερβαίνεται για το επιθυμητό ποσοστό χρόνου διαθεσιμότητας δίνεται από:

$$a_p^u = \exp\left[\sigma_p \sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}\left(2 \frac{P_{avail}}{100} - 1\right) + \mu_p\right] \quad (5.19)$$

όπου $\text{erf}^{-1}(\cdot)$ είναι η αντίστροφη συνάρτηση σφάλματος και μ_p, σ_p είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της κανονικής κατανομής της σχέσης (15) που δίνονται από:

$$\left. \begin{aligned} \mu_p &= \ln a_m^u + \rho_{n_{du}} \frac{\sigma_a^u}{\sigma_a^d} (\ln a_0^d - \ln a_m^u) e^{-\beta_u t} \\ \sigma_p &= \sigma_a^u \sqrt{1 - \rho_{n_{du}}^2} e^{-2\beta_u t} \end{aligned} \right\} \quad (5.20)$$

Η διαθεσιμότητα P_{avail} % που εμφανίζεται στη σχέση (5.19) αναφέρεται στη διαθεσιμότητα της ζεύξης μόνο κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης. Η τιμή αυτή μπορεί εύκολα να μετασχηματιστεί στο συνολικό χρόνο διαθεσιμότητας της ζεύξης, συμπεριλαμβανομένων των χρόνων που δεν βρέχει σύμφωνα με τη σχέση

$$P_{av}^{total} = 1 - (1 - P_{avail}/100) \cdot P_o \quad (5.21)$$

όπου P_o είναι η πιθανότητα βροχής στο ραδιοβήμα $P(A > 0)$ η οποία μπορεί να υπολογιστεί από τη σύσταση ITU-R P.837-6 [ITU-R Rec. P. 837-6, 2012].

5.4. Διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων

Το νέο δυναμικό μοντέλο της απόσβεσης λόγω βροχής με κλιμάκωση στη συχνότητα αποτελείται από το σύστημα ΣΔΕ της σχέσης (5.3) με τις αντίστοιχες παραμέτρους των πινάκων \mathbf{B}, \mathbf{S} υπολογισμένες όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Επιπλέον θεωρούμε ότι οι στατιστικές ιδιότητες της ανέλιξης της απόσβεσης \mathbf{a}_t έχουν μεταφραστεί στις αντίστοιχες ιδιότητες της μετασχηματισμένης ανέλιξης \mathbf{X}_t με χρήση των μη γραμμικών μετασχηματισμών της σχέσης (5.2).

Είσοδοι του μοντέλου αποτελούν:

i) Οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι των φυσικών λογαρίθμων των αποσβέσεων λόγω βροχής στις δύο συχνότητες, που είναι οι παράμετροι κανονικών τ.μ. και συγκεκριμένα οι μέσες τιμές $\ln a_m^d, \ln a_m^u$, οι τυπικές αποκλίσεις σ_a^d, σ_a^u και ο συντελεστής συσχέτισης $\rho_{n_{du}}$.

ii) Οι δυναμικές παράμετροι β_u, β_d (sec^{-1}), που περιγράφουν τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ανέλιξης της απόσβεσης στην άνω και στην κάτω ζεύξη αντίστοιχα.

Οι ανωτέρω παράμετροι μπορούν να υπολογισθούν με εφαρμογή τεχνικών παλινδρόμησης για προσαρμογή στατιστικών δεδομένων (regression fitting) σε διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα απόσβεσης λόγω βροχής. Ειδικά για τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης από πειραματικά δεδομένα θα πρέπει να

χρησιμοποιηθούν καταγεγραμμένες χρονοσειρές απόσβεσης που ελήφθησαν ταυτόχρονα. Ωστόσο, τέτοιες μετρήσεις δεν είναι ευρύτερα διαθέσιμες ενώ αν είναι αναφέρονται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και πειράματα. Έτσι εστιάζουμε στην συχνή περίπτωση στην οποία υφίστανται διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για μια χαμηλότερη συχνότητα τα οποία θα πρέπει να μεταφραστούν σε μια υψηλότερη περιοχή συχνότητας ή στην χειρότερη περίπτωση στην οποία δεν υφίστανται καθόλου πειραματικά δεδομένα. Στις περιπτώσεις αυτές θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαθέσιμα στάσιμα μοντέλα για την εξαγωγή των απαιτούμενων παραμέτρων.

Προτείνεται λοιπόν η εξής διαδικασία:

i) Υπολογισμός των στάσιμων στατιστικών παραμέτρων a_m^d, σ_a^d της κάτω ζεύξης με προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής σε διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα εφόσον υφίστανται, διαφορετικά στο μοντέλο της στάσιμης κατανομής της απόσβεσης της ITU-R [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009].

ii) Εφόσον υφίστανται πειραματικά δεδομένα για την κάτω ζεύξη μετάφραση της διάμεσου τιμής (median) της απόσβεσης της κάτω ζεύξης a_m^d στην αντίστοιχη διάμεσο τιμή της απόσβεσης της άνω ζεύξης a_m^u με χρήση κάποιας στάσιμης μεθόδου κλιμάκωσης στη συχνότητα (frequency scaling), όπως στις παραπομπές [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009] ή [Hodge, 1977]. Διαφορετικά εξαγωγή της διάμεσου τιμής a_m^u με προσαρμογή στο μοντέλο της ITU-R [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009] για τη συχνότητα f_u .

iii) Εξαγωγή της τυπικής απόκλισης σ_a^u με προσαρμογή της λογαριθμοκανονικής κατανομής σε κατανομή υπολογισμένη από μοντέλο στάσιμης κλιμάκωσης στη συχνότητα (frequency scaling), όπως στην παραπομπή [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009]. Αν δεν υφίστανται πειραματικά δεδομένα για την κάτω ζεύξη εξαγωγή σ_a^u με προσαρμογή στην κατανομή της ITU-R [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009] για τη συχνότητα f_u .

iv) Υπολογισμός του συντελεστή συσχέτισης $\rho_{n_{du}}$ με χρήση της εμπειρικής σχέσης

$$\sqrt{1 - \rho_{n_{du}}^2} = 0.3548 \left(\frac{f_u}{f_d} - 1 \right)^{0.1676}, \quad (5.22)$$

που προτάθηκε στο [Bertorelli-Paraboni, 2007] από πειραματικά δεδομένα με το δορυφόρο Italsat, διαφορετικά με τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια. Στο [COST 255, 2002] ο στιγμιαίος συντελεστής R κλιμάκωσης της απόσβεσης στη συχνότητα (IFSF, Instantaneous Frequency Scaling Factor) ορίζεται ως

$$R = \frac{a_t^u}{a_t^d} \quad (5.23)$$

και ο στάσιμος συντελεστής κλιμάκωσης της απόσβεσης στη συχνότητα (FSF, Frequency Scaling Factor) ορίζεται ως ο λόγος των τιμών της απόσβεσης λόγω βροχής που υπερβαίνουν για δεδομένο ποσοστό του χρόνου $p\%$:

$$R(p\%) = \frac{a_u(p\%)}{a_d(p\%)}. \quad (5.24)$$

Ο λόγος αυτός είναι σε συμφωνία με τη διάμεσο τιμή του στιγμιαίου συντελεστή IFSF R [COST 255, 2002]. Έτσι μπορούμε να υπολογίσουμε τη διάμεσο R_m με χρήση της σχέσης:

$$R_m = \frac{a_m^u}{a_m^d} \quad (5.25)$$

Ο λόγος στη (5.25) μπορεί επίσης να υπολογιστεί με χρήση του στάσιμου μοντέλου κλιμάκωσης στη συχνότητα της ITU-R [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009]. Τότε σύμφωνα με το χρησιμοποιηθέν μοντέλο της στάσιμης κλιμάκωσης υφίσταται εξάρτηση της διάμεσου τιμής R_m ως προς την τιμή της απόσβεσης της κάτω ζεύξης a_d . Από τη βασική υπόθεση ότι οι αποσβέσεις στις δύο συχνότητες ακολουθούν τη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή, η δεσμευμένη τ.μ. $R|a_d$ προκύπτει επίσης λογαριθμοκανονική και η διάμεσος τιμή της υπολογίζεται εύκολα ότι δίνεται από τη σχέση:

$$R_m(a_d) = e^{\left(\rho_{n_{du}} \frac{\sigma_a^u}{\sigma_a^d} - 1\right) \ln(a_d) + \ln(a_m^u) - \rho_{n_{du}} \frac{\sigma_a^u}{\sigma_a^d} \ln(a_m^d)} \quad (5.26)$$

Εφαρμόζοντας τώρα προσαρμογή της σχέσης αυτής στην καμπύλη της στάσιμης κλιμάκωσης της ITU-R όσον αφορά το γινόμενο $\rho_{n_{du}} \sigma_a^u$ που εμφανίζεται στην (5.26) μπορεί εύκολα να προκύψει η τιμή του συντελεστή $\rho_{n_{du}}$.

ν) Τέλος για τον υπολογισμό των δυναμικών παραμέτρων από πειραματικά δεδομένα έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, ωστόσο η μέθοδος που βασίζεται στις

ροπές δεύτερης τάξης της απόσβεσης στο [Maseng-Bakken, 1981] είναι ο πιο άμεσος. Στο [S. A. Kanellouopoulos et al., 2007] προτείνεται μια μέθοδος βασισμένη στο βέλτιστο υπολογισμό της δυναμικής παραμέτρου αναφορικά με τους χρόνους διακοπής.

5.5. Αριθμητικές Εφαρμογές του Μοντέλου

Στην ενότητα αυτή εφαρμόζουμε το προτεινόμενο μοντέλο σε δύο περιπτώσεις που αναφέρονται σε περιοχές με διαφορετικές κλιματικά συνθήκες. Η πρώτη περίπτωση αφορά μια υποθετική δορυφορική ζεύξη στην Αθήνα με το δορυφόρο Hellas Sat 2, με χρήση της τεχνικής της συνθετικής καταιγίδας (SST, Synthetic Storm Technique) [S. A. Kanellouopoulos et al., 2006] και η δεύτερη αφορά δορυφορική ζεύξη στο Spino d'Adda της Ιταλίας με χρήση δημοσιευμένων πειραματικών δεδομένων [Bertorelli-Paraboni, 2007]. Ο σκοπός της παρούσας ενότητας είναι να καταδείξει την εφαρμοσιμότητα του μοντέλου, την ικανότητά του να αναπαραγάγει με ακρίβεια τα στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτης τάξης της απόσβεσης και την αποτελεσματικότητά του στην αποδοτική σχεδίαση προσαρμοστικών μεθόδων άμβλυνσης των διαλείψεων λόγω βροχής λόγω της εγγενούς του ιδιότητας να λαμβάνει υπόψη τις διακυμάνσεις του στιγμιαίου συντελεστή κλιμάκωσης στη συχνότητα IFSF.

Προκειμένου να υπάρξει μέτρο σύγκρισης θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου παράλληλα με το μοντέλο που προτάθηκε από τους [Bertorelli-Paraboni, 2007], το οποίο στη συνέχεια θα ονομάζεται μοντέλο BP. Το μοντέλο αυτό δέχεται ως είσοδο την τιμή της απόσβεσης στην κάτω ζεύξη. Για το λόγο αυτό έχουν αναπαραχθεί χρονοσειρές απόσβεσης της κάτω ζεύξης. Επιπλέον συγκρίνουμε το προτεινόμενο μοντέλο με το κλασσικό στάσιμο μοντέλο κλιμάκωσης στη συχνότητα της ITU-R [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009], το οποίο εφαρμόζεται στις αναπαραχθείσες χρονοσειρές απόσβεσης της κάτω ζεύξης για την εκτίμηση της απόσβεσης της άνω ζεύξης. Επισημαίνεται ότι παρόλο που το μοντέλο αυτό ανήκει στην κατηγορία των στάσιμων μοντέλων καθόσον με δεδομένη την καμπύλη της μιας στάσιμης κατανομής υπολογίζει την στάσιμη κατανομή της υψηλότερης συχνότητας, ωστόσο η εφαρμογή του στις στιγμιαίες τιμές αποτελεί μια προσέγγιση συμβατή με τα στάσιμα στατιστικά δεδομένα. Τέλος τροποποιούμε μερικές θεμελιώδεις παραμέτρους του προτεινόμενου μοντέλου για να

φανεί η επίδρασή τους στην εκτίμηση της απόσβεσης και κατ' επέκταση στην απόδοση σχημάτων ελέγχου της ισχύος.

Για την υποθετική δορυφορική ζεύξη στην Αθήνα αναπαράχθηκαν προσομοιωμένες χρονοσειρές απόσβεσης με εφαρμογή της μεθόδου της συνθετικής καταγιγίδας (SST) [S. A. Kanellopoulos et al., 2006]. Η κάτω ζεύξη λειτουργεί στη συχνότητα $f_d = 20 \text{ GHz}$ και η άνω ζεύξη στη συχνότητα $f_u = 40 \text{ GHz}$. Η θεωρούμενη γωνία ύψωσης είναι 43.46° , ενώ έχει θεωρηθεί κατακόρυφη πόλωση σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του γεωστατικού δορυφόρου Hellas Sat 2 (39° E). Οι στάσιμες στατιστικές παράμετροι και οι δυναμικές της κάτω και άνω ζεύξης φαίνονται στον Πίνακας 6. Οι παράμετροι έχουν υπολογιστεί από τα προσομοιωμένα δεδομένα. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της απόσβεσης λόγω βροχής στις δύο συχνότητες έχει υπολογισθεί από την εμπειρική σχέση (5.22) που προτάθηκε στο [Bertorelli-Paraboni, 2007]. Τέλος οι δυναμικές παράμετροι της κάτω και της άνω ζεύξης υπολογίστηκαν με τη μέθοδο του [Panagopoulos-Kanellopoulos, 2003].

Για τη δορυφορική ζεύξη στις συχνότητες 18.7/49.5 GHz στο Spino d'Adda στην Ιταλία οι τιμές των παραμέτρων έχουν ληφθεί από τα πειραματικά δεδομένα που δημοσιεύτηκαν στο [Bertorelli-Paraboni, 2007] και παρουσιάζονται στον Πίνακας 7. Οι δυναμικές παράμετροι τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ζεύξη έχουν ληφθεί ίσες με $2 \cdot 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ [ITU-R Rec. P. 1853-1, 2012].

Πίνακας 6 Στάσιμες και Δυναμικές Στατιστικές Παράμετροι της Δορυφορικής Ζεύξης, Αθήνα

Frequency	$f_d : 20 \text{ GHz}$	$f_u : 40 \text{ GHz}$
Median a_m	0.3524	1.4302
Std Dev σ_a	1.1401	0.9952
Dyn. Param. β	$3.53 \times 10^{-4} \text{ sec}$	$2.3 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$
Corr. Coeff ρ_n	0.935	

Πίνακας 7 Στάσιμες και Δυναμικές Στατιστικές Παράμετροι της Δορυφορικής Ζεύξης, Spino

Frequency	$f_d : 18.7 \text{ GHz}$	$f_u : 49.5 \text{ GHz}$
Median a_m	0.52	2.5
Std Dev σ_a	1.32	1.02
Dyn. Param. β	$2 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$	$2 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$
Corr. Coeff ρ_n	0.905	

Με χρήση του προτεινόμενου στοχαστικού δυναμικού μοντέλου αναπαράχθηκαν συσχετισμένες χρονοσειρές απόσβεσης για την κάτω και την άνω ζεύξη και για τις δύο τοποθεσίες ανά 1 sec. Έχουν θεωρηθεί διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις στην πρόβλεψη, ωστόσο διαφορά ενός δευτερολέπτου αποτελεί μια τυπική ελάχιστη τιμή ενός σχήματος ελέγχου της ισχύος [Sweeney-Bostian, 1999].

Στην Εικ. 29 παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο των αναπαραχθέντων συσχετισμένων χρονοσειρών απόσβεσης στην κάτω και στην άνω ζεύξη με εφαρμογή των δεδομένων της συνθετικής καταιγίδας για τη δορυφορική ζεύξη της Αθήνας. Απεικονίζεται επίσης η δεσμευμένη μέση τιμή της απόσβεσης της άνω ζεύξης όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση (5.16) για χρονική καθυστέρηση 1 sec. Είναι φανερό ότι η εκτιμώμενη τιμή της απόσβεσης στην άνω ζεύξη ακολουθεί το σχήμα της καμπύλης της απόσβεσης της κάτω ζεύξης ανηγμένη στην υψηλότερη συχνότητα και μετατοπισμένη κατά το αντίστοιχο χρονικό διάστημα της καθυστέρησης. Αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται στην υψηλή τιμή του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των τιμών της απόσβεσης στην κάτω και στην άνω ζεύξη. Ωστόσο, η εκτιμήτρια (5.16) αν και αμερόληπτη δεν είναι επαρκής για χρήση σε ρεαλιστικές εφαρμογές ελέγχου της ισχύος της άνω ζεύξης, καθώς η απαίτηση επίτευξης της απαραίτητης διαθεσιμότητας υπαγορεύει τη χρήση της σχέσης (5.19).

Στη συνέχεια εξετάζουμε την ικανότητα του νέου δυναμικού μοντέλου να αναπαραγάγει με ακρίβεια τα στατιστικά δεδομένα πρώτης τάξης, δηλαδή τις στάσιμες κατανομές της απόσβεσης. Η συμφωνία αυτή αποτελεί μιας μορφής επικύρωση του μοντέλου ότι είναι κατ' αρχάς συμβατό με τις στάσιμες κατανομές υπέρβασης της απόσβεσης, οι οποίες υπολογίζονται από τα στάσιμα μοντέλα κλιμάκωσης στη συχνότητα. Στην Εικ. 30 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της δορυφορικής ζεύξης 20/40GHz της Αθήνας. Φαίνεται ότι η παραγόμενη στάσιμη κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης της άνω ζεύξης, όπως προκύπτει από την εφαρμογή του δυναμικού μοντέλου είναι απόλυτα ταυτόσημη με αυτή που προκύπτει με χρήση των δεδομένων της συνθετικής καταιγίδας. Στην Εικ. 31 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη δορυφορική ζεύξη του Spino d' Adda στην Ιταλία [Bertorelli-Paraboni, 2007]. Η παραγόμενη στάσιμη κατανομή της απόσβεσης με χρήση του δυναμικού μοντέλου είναι και σε αυτή την περίπτωση απόλυτα σύμφωνη με την κατανομή της άνω ζεύξης από τα πειραματικά δεδομένα.

Επιπλέον προκειμένου να ελεγχθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης της απόσβεσης στην άνω ζεύξη για διάφορες τιμές χρονικής καθυστέρησης και προκειμένου να

ελεγχθούν αριθμητικά τα θεωρητικά αποτελέσματα των σχέσεων (5.17) και (5.18), υπολογίζουμε με βάση τις παραγόμενες χρονοσειρές απόσβεσης τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση του σφάλματος της πρόβλεψης e , όπως ορίστηκε με τη σχέση (5.17). Στις Εικ. 32 και Εικ. 33 απεικονίζεται η μέση τιμή του σφάλματος της πρόβλεψης για τις δύο τοποθεσίες και στις Εικ. 34 και Εικ. 35 η τυπική του απόκλιση. Για λόγους σύγκρισης έχουν συμπεριληφθεί οι αντίστοιχες καμπύλες μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης για το σφάλμα που προκύπτει με εφαρμογή του μοντέλου BP και του στάσιμου μοντέλου της ITU-R [ITU-R Rec. P. 618-10, 2009] στη χρονοσειρά απόσβεσης της κάτω ζεύξης. Όπως αναμένεται και με βάση τα θεωρητικά αποτελέσματα η μέση τιμή του σφάλματος για το προτεινόμενο μοντέλο είναι σχεδόν μηδέν και για τις δύο τοποθεσίες, ανεξάρτητα της χρονικής καθυστέρησης της πρόβλεψης. Το μέσο σφάλμα είναι επίσης ανεξάρτητο της χρονικής καθυστέρησης και στην περίπτωση των άλλων δύο μοντέλων. Το μοντέλο BP εμφανίζει μεγαλύτερη τυπική απόκλιση σφάλματος συγκριτικά με το μοντέλο της ITU-R και για τις δύο τοποθεσίες. Δίνει μια ελαφρώς καλύτερη τιμή μέσου σφάλματος από το μοντέλο της ITU-R για την περίπτωση της Αθήνας. Το προτεινόμενο μοντέλο υπερέχει ωστόσο και των δύο και για τις δύο τοποθεσίες δίνοντας μηδενικό μέσο σφάλμα και την χαμηλότερη τυπική απόκλιση σφάλματος. Επιπλέον η τυπική του απόκλιση αναπαράγεται με ακρίβεια τη θεωρητική τιμή της σχέσης (5.18). Προκύπτει επίσης το συμπέρασμα ότι η επίπτωση της χρονικής καθυστέρησης στην τυπική απόκλιση του σφάλματος της πρόβλεψης είναι περίπου 0.1dB/min, τιμή η οποία όμως εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης [S. A. Kanellopoulos et al., 2007].

Επιπλέον εφαρμόζουμε το προτεινόμενο μοντέλο σε ένα πιθανό σχήμα ελέγχου της ισχύος της άνω ζεύξης και ελέγχουμε την απόδοση του όσον αφορά την ικανότητά να διασφαλίσει την απαιτούμενη διαθεσιμότητα της δορυφορικής ζεύξης [Laster-Stutzman, 1995]. Η άνω ζεύξη θεωρείται ότι βρίσκεται σε φάση διακοπής (μη διαθεσιμότητας) όταν η ισχύς εκπομπής στην άνω ζεύξη δεν είναι ικανή να ξεπεράσει την απόσβεση λόγω της βροχής, με αποτέλεσμα η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη να είναι χαμηλότερα μια ελάχιστης στάθμης. Για κάθε χρονική στιγμή υπολογίζουμε την απαραίτητη ισχύ εκπομπής όπως προκύπτει από τη σχέση (5.19), με βάση την παραγόμενη απόσβεση στην κάτω ζεύξη η οποία θεωρείται γνωστή στον επίγειο σταθμό. Στη συνέχεια συγκρίνουμε την τιμή αυτή σε σχέση με την παραγόμενη απόσβεση της άνω ζεύξης. Τέλος υπολογίζουμε το χρόνο διαθεσιμότητας σε σχέση

με την επιθυμητή διαθεσιμότητα P_{avail} %, που χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος στη σχέση (5.19). Η επιτευχθείσα διαθεσιμότητα καθώς επίσης και η επιθυμητή αναφέρονται στο χρόνο διαθεσιμότητας κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης, ωστόσο μπορούν εύκολα να αναχθούν στο συνολικό χρόνο διαθεσιμότητας συμπεριλαμβανομένων των περιόδων χωρίς βροχή με χρήση της σχέσης (5.21). Για το λόγο αυτό απαιτείται η πιθανότητα βροχής P_0 η οποία από τη σύσταση [ITU-R Rec. P. 837-6, 2012] έχει υπολογιστεί 3.491% για την Αθήνα και 4.90948% για το Spino. Οι ίδιοι υπολογισμοί εφαρμόζονται επίσης για το μοντέλο BP στις δύο τοποθεσίες. Εδώ συγκρίνουμε την απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου σε σχέση μόνο με το μοντέλο BP καθώς είναι επίσης ένα δυναμικό μοντέλο και όχι στάσιμο όπως αυτό της ITU. Το περιθώριο διάλειψης της ζεύξης έχει θεωρηθεί και για τις δύο τοποθεσίες ως 18.4dB. Στις Εικ. 36 και Εικ. 37 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα για την Αθήνα και το Spino d' Adda, αντίστοιχα. Με το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο επιτυγχάνεται η απαιτούμενη διαθεσιμότητα σε αντίθεση με το μοντέλο BP, το οποίο επιδεικνύει χειρότερη απόδοση για την περίπτωση της Αθήνας και αρκετά βελτιωμένη στην περίπτωση του Spino d' Adda. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο BP έχει προκύψει από τα πειραματικά δεδομένα του Italsat [Bertorelli-Paraboni, 2007].

Γενικά οι διαφορές στη συμπεριφορά των δύο μοντέλων στις δύο τοποθεσίες οφείλονται στις διαφορετικές κλιματικές συνθήκες των δύο περιοχών, στις διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας, αλλά επίσης και στις διαφορετικές εγγενείς υποθέσεις των μοντέλων. Συνοψίζοντας το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο επιτυγχάνει ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αποτελέσματα και στις δύο τοποθεσίες, ωστόσο απαιτούνται περαιτέρω πειραματικά αποτελέσματα με χρήση πραγματικών χρονοσειρών απόσβεσης.

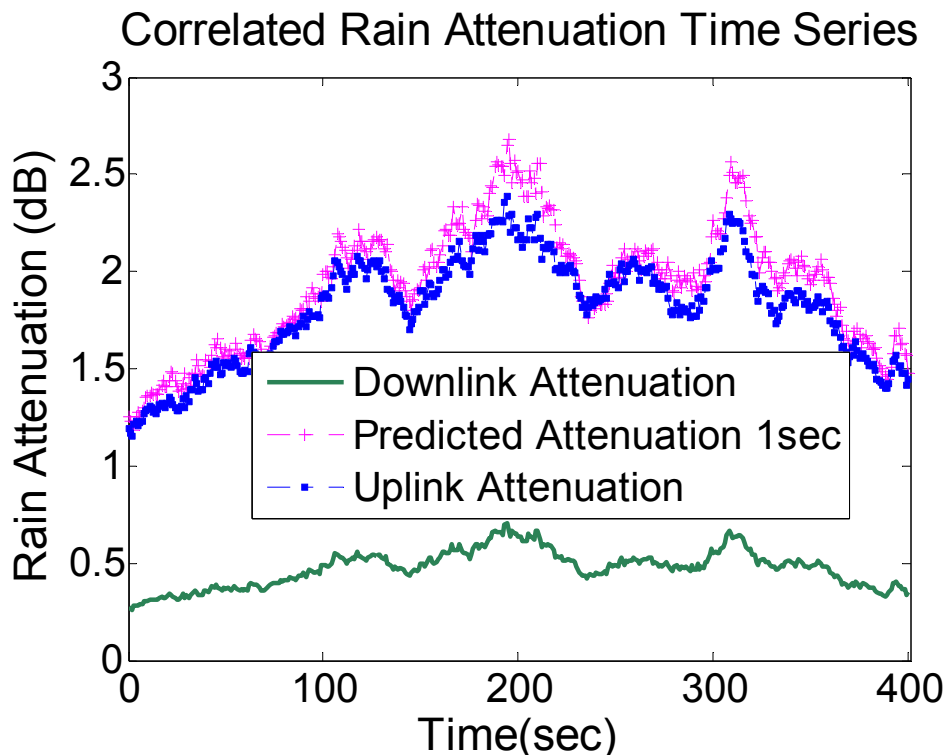
Τέλος προκειμένου να καταδειχθεί η επίδραση της χρονικής καθυστέρησης στην πρόβλεψη της απόσβεσης συγκρίνουμε το νέο δυναμικό μοντέλο για διάφορες χρονικές καθυστερήσεις και για απαιτούμενη διαθεσιμότητα 99% (κατά τη διάρκεια βροχής), σε σχέση με το μοντέλο BP. Η τιμή αυτή της διαθεσιμότητας με χρήση της (5.21) αντιστοιχεί σε συνολική διαθεσιμότητα 99.97% για την Αθήνα και 99.95% για το Spino d' Adda. Στις Εικ. 38 και Εικ. 39 έχει συμπεριληφθεί επίσης η επιτευχθείσα διαθεσιμότητα του προτεινόμενου μοντέλου τροποποιημένου με τιμή μηδενικής χρονικής καθυστέρησης, το οποίο αποκαλούμε “τροποποιημένο μοντέλο μηδενικής

καθυστερήσης”. Ο λόγος είναι για να φανεί η επίδραση της χρονικής καθυστέρησης στην πρόβλεψη της απόσβεσης. Το μοντέλο BP δεν λαμβάνει ούτε αυτό υπόψη του τις χρονικές καθυστερήσεις, ενώ το “τροποποιημένο μοντέλο μηδενικής καθυστέρησης” είναι στην ουσία ισοδύναμο με ένα απλό μοντέλο δισδιάστατης λογαριθμοκανονικής κατανομής. Οι καμπύλες στις Εικ. 38 και Εικ. 39 φανερώνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο είναι ικανό να αντιμετωπίσει με επιτυχία την αβεβαιότητα που εισάγουν οι χρονικές καθυστερήσεις στην πρόβλεψη της απόσβεσης λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική συμπεριφορά της απόσβεσης, σε αντίθεση με τα άλλα δύο μοντέλα. Για το λόγο αυτό η επιτευχθείσα διαθεσιμότητα με χρήση του προτεινόμενου μοντέλου είναι σχεδόν σταθερή ανεξάρτητα της καθυστέρησης και ίση με 98.5% περίπου για την Αθήνα και 96.6% περίπου για το Spino d' Adda, κατά τη διάρκεια βροχής. Οι διαθεσιμότητες αυτές αντιστοιχούν με χρήση της (5.21) σε συνολική διαθεσιμότητα 99.9% για Αθήνα και 99.8% για το Spino d' Adda. Η απόδοση του μοντέλου BP καθώς και του “τροποποιημένου μοντέλου” γίνονται χειρότερες με αύξηση του χρόνου καθυστέρησης στη πρόβλεψη, αποτέλεσμα αναμενόμενο καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη την πρόσθετη αβεβαιότητα που εισάγεται. Ωστόσο το σφάλμα παραμένει μικρό για τυπικές τιμές της καθυστέρησης στην πρόβλεψη, η τιμή του όμως εξαρτάται από τη συγκεκριμένη τιμή της δυναμικής παραμέτρου που αναπαριστά τα δυναμικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης [24, 25].

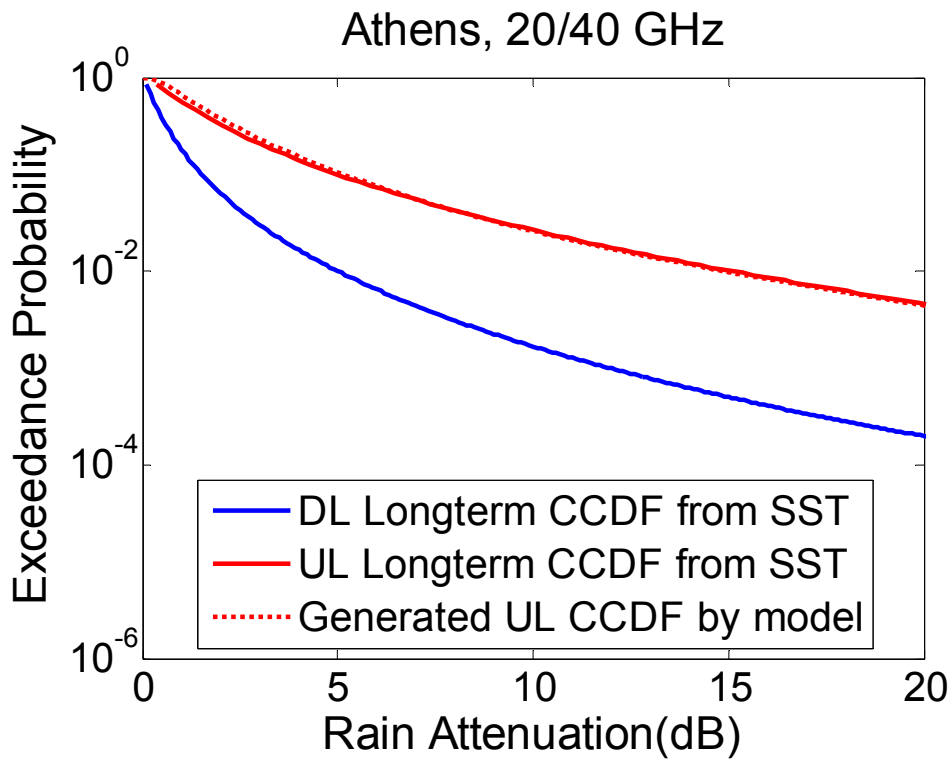
5.6. Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκε ένα νέο δυναμικό μοντέλο απόσβεσης λόγω βροχής με κλιμάκωσης στη συχνότητα ικανό να λαμβάνει υπόψη με στατιστικό τρόπο τις διακυμάνσεις της απόσβεσης λόγω βροχής στις δύο ζεύξεις και επίσης την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη που εισάγουν οι χρονικές καθυστερήσεις. Η βασική υπόθεση του μοντέλου όπως δικαιολογείται από πειραματικά αποτελέσματα είναι ότι η απόσβεση λόγω βροχής σε δύο διαφορετικές συχνότητες για το ίδιο δορυφορικό ραδιοβήμα ακολουθεί τη δισδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτελεσματική σχεδίαση σχημάτων ελέγχου της ισχύος στην άνω ζεύξη παρέχοντας συσχετισμένες χρονοσειρές απόσβεσης για δοκιμή, καθώς και στην εύρεση των βέλτιστων αλγόριθμων. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για την περίπτωση δύο δορυφορικών ζεύξεων στην Αθήνα και στο

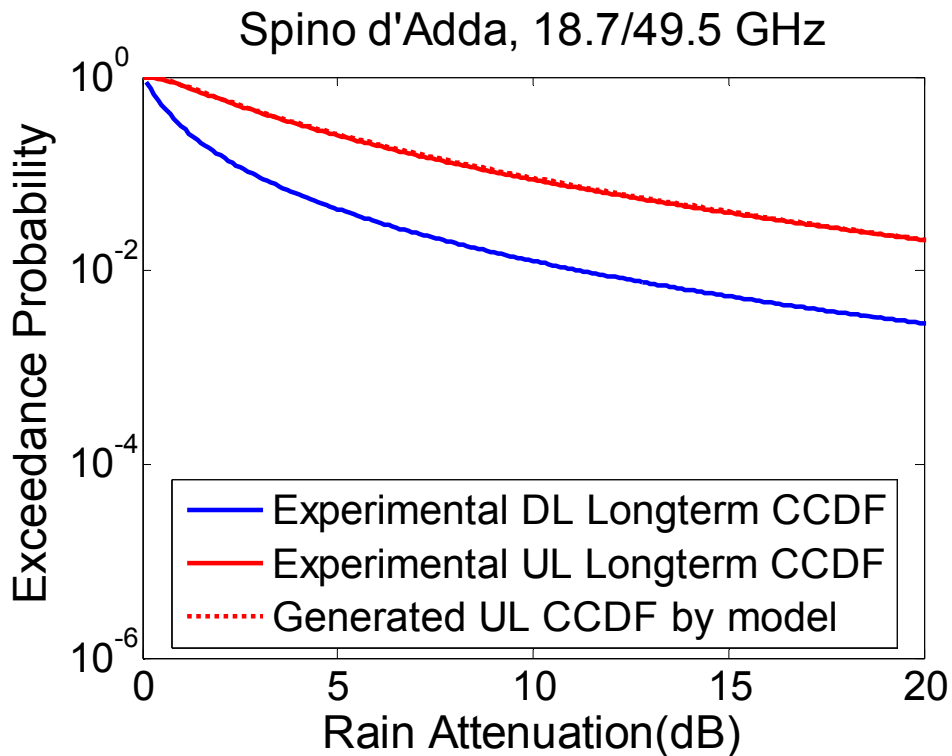
Spino d'Adda και διαφάνηκε η εγκυρότητά του σε ότι αφορά αφενός την αναπαραγωγή συμβατών στατιστικών χαρακτηριστικών πρώτης τάξης της απόσβεσης, και αφετέρου στην ικανότητα πρόβλεψης της απόσβεσης με μικρά σφάλματα και στην ικανότητα διασφάλισης της απαιτούμενης ποιότητας υπηρεσίας QoS, ανεξάρτητα των διακυμάνσεων του στιγμιαίου συντελεστή IFSF. Επιπλέον φάνηκε ότι αγνοώντας την επίδραση των διακυμάνσεων του συντελεστή της κλιμάκωσης στη συχνότητα οι αρνητικές επιπτώσεις είναι ιδιαίτερα σοβαρές. Επιπλέον το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο κλιμάκωσης στη συχνότητα βασισμένο στο σύστημα ΣΔΕ παρέχει μια νέα προοπτική στη μοντελοποίηση με στέρεο μαθηματικό υπόβαθρο ικανή να οδηγήσει σε αρκετά θεωρητικά αποτελέσματα για σημαντικές παραμέτρους, όπως η διάρκεια των διαλείψεων σε σχήματα διαφορικής λήψης στη συχνότητα. Ωστόσο απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για την εγκυρότητα του μοντέλου σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης με χρήση πραγματικών χρονοσειρών απόσβεσης.



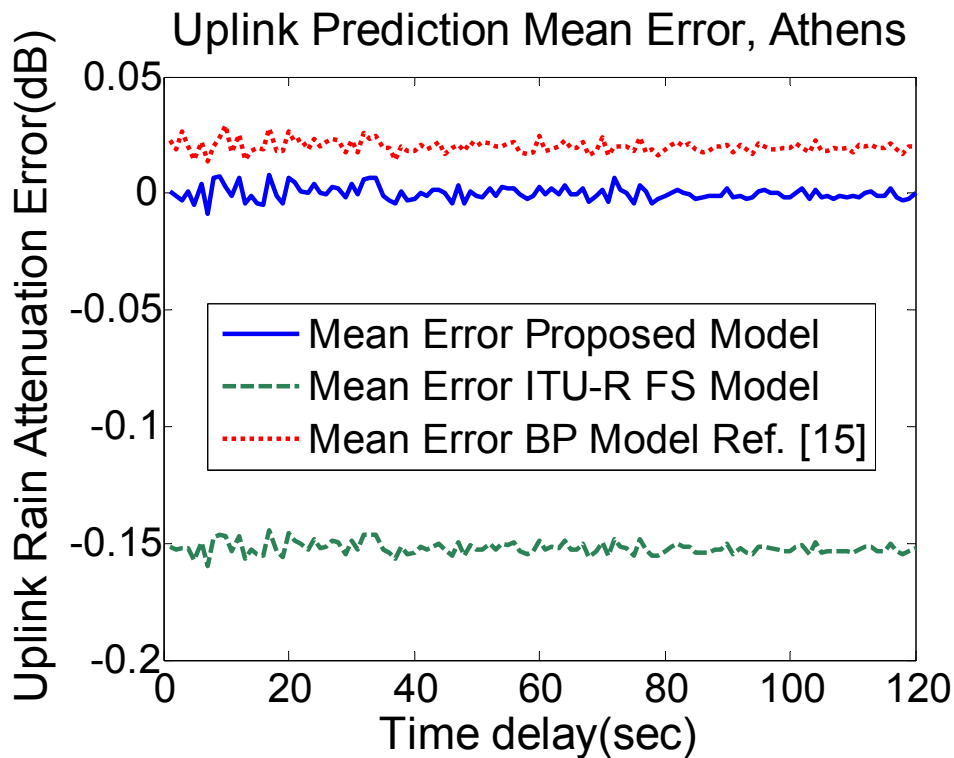
Εικ. 29 Συσχετισμένες χρονοσειρές απόσβεσης και εκτιμηθείσα τιμή για τη ζεύξη στην Αθήνα



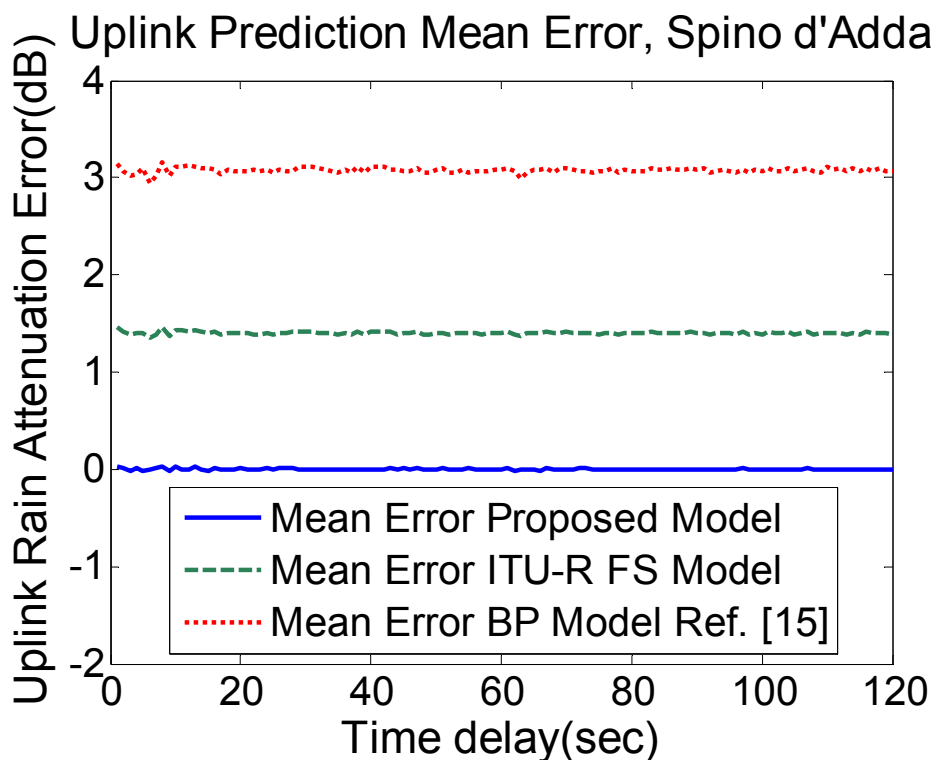
Εικ. 30 Κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης στην κάτω και άνω ζεύξη με χρήση Συνθετικής Καταγίδας και παραγόμενη στάσιμη κατανομή για την άνω ζεύξη με εφαρμογή του μοντέλου για τη ζεύξη της Αθήνας.



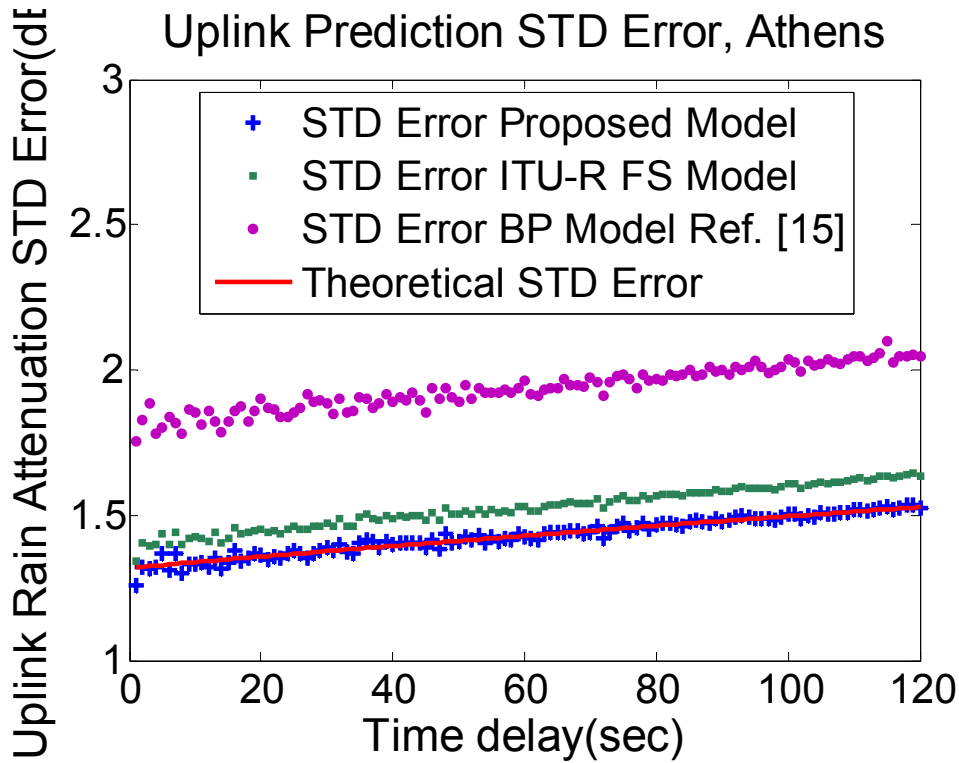
Εικ. 31 Κατανομή υπέρβασης της απόσβεσης στην κάτω και άνω ζεύξη με χρήση πειραματικών δεδομένων και παραγόμενη στάσιμη κατανομή για την άνω ζεύξη με εφαρμογή του μοντέλου για τη ζεύξη του Spino d' Adda.



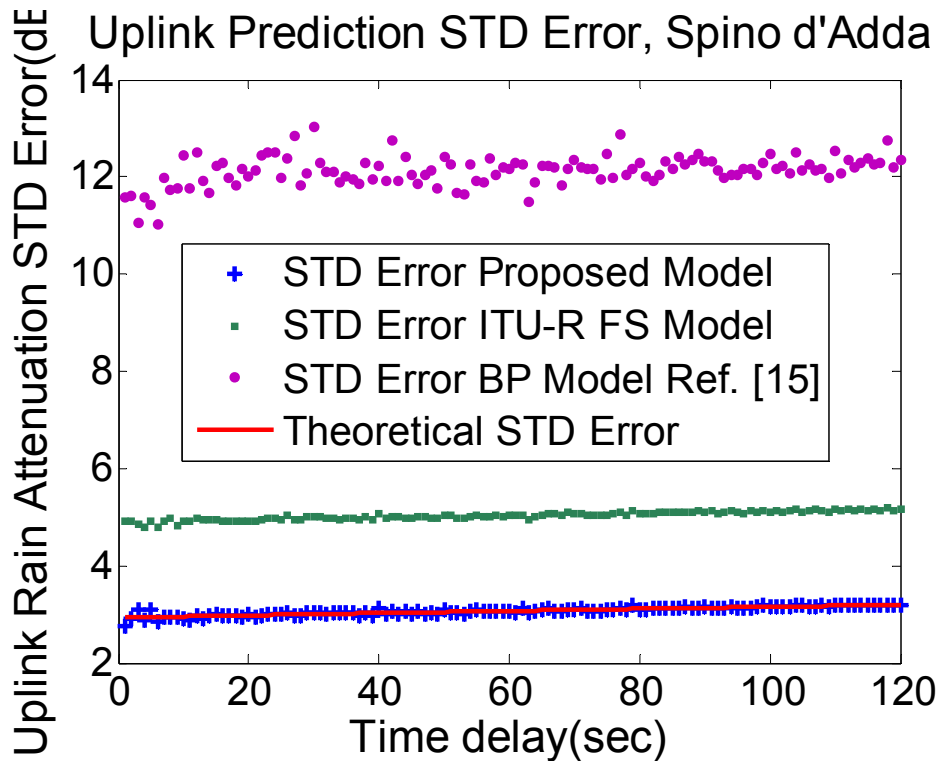
Εικ. 32 Μέσο σφάλμα πρόβλεψης της απόσβεσης της άνω ζεύξης στην Αθήνα ως προς διαφορετικούς χρόνους πρόβλεψης για τις μεθόδους της ITU, PB και προτεινόμενου μοντέλου.



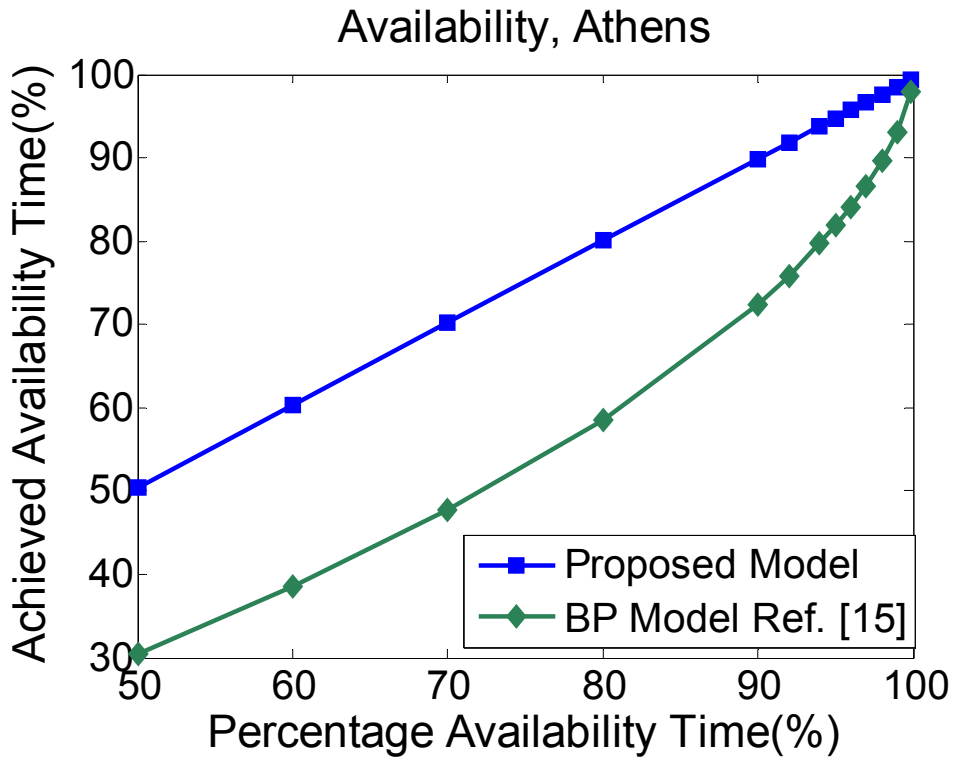
Εικ. 33 Μέσο σφάλμα πρόβλεψης της απόσβεσης της άνω ζεύξης στο Spino d' Adda ως προς διαφορετικούς χρόνους πρόβλεψης για τις μεθόδους της ITU, PB και προτεινόμενου μοντέλου.



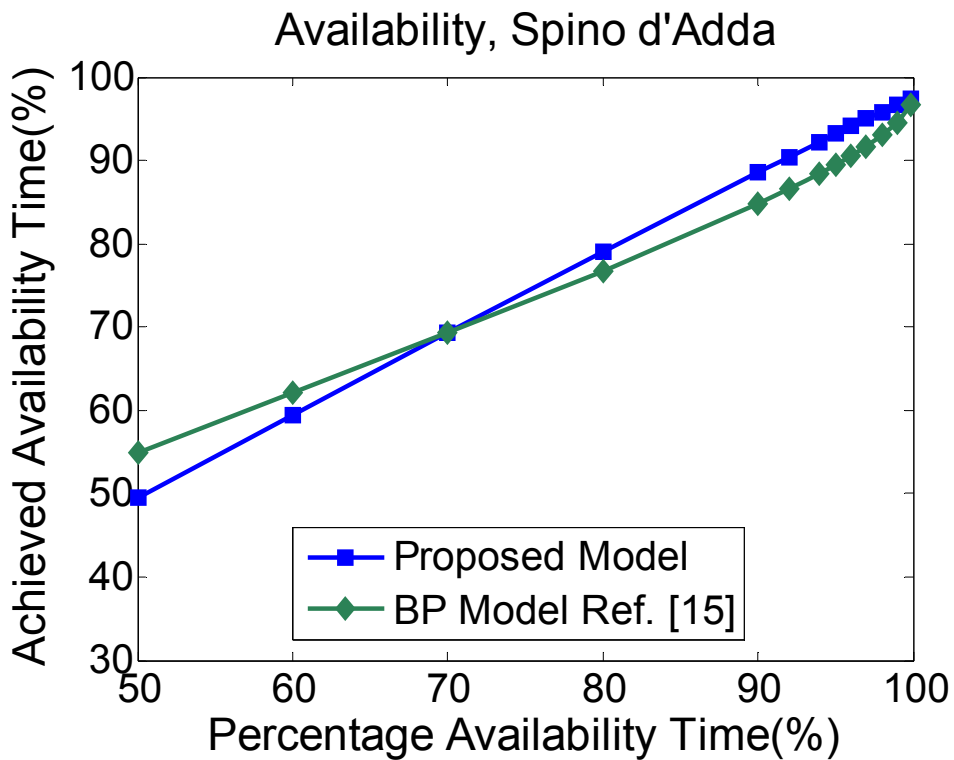
Εικ. 34 Τυπική απόκλιση σφάλματος πρόβλεψης της απόσβεσης της άνω ζεύξης στην Αθήνα ως προς διαφορετικούς χρόνου πρόβλεψης για τις μεθόδους της ITU, PB και προτεινόμενου μοντέλου καθώς και θεωρητική καμπύλη.



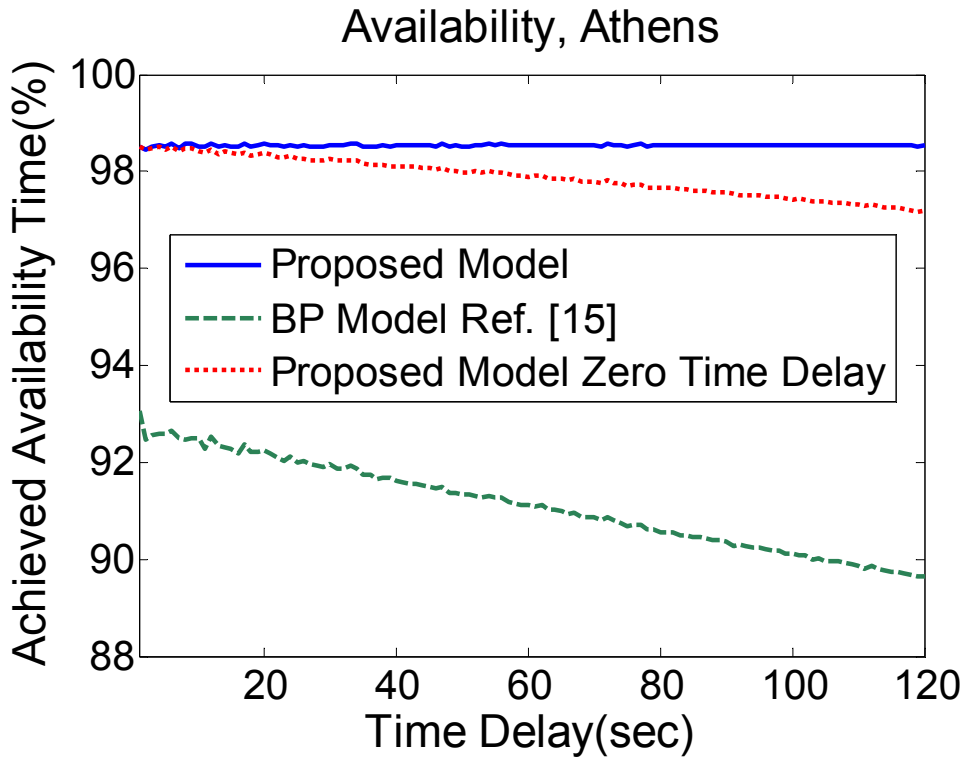
Εικ. 35 Τυπική απόκλιση σφάλματος πρόβλεψης της απόσβεσης της άνω ζεύξης στο Spino d' Adda ως προς διαφορετικούς χρόνου πρόβλεψης για τις μεθόδους της ITU, PB και προτεινόμενου μοντέλου καθώς και θεωρητική καμπύλη



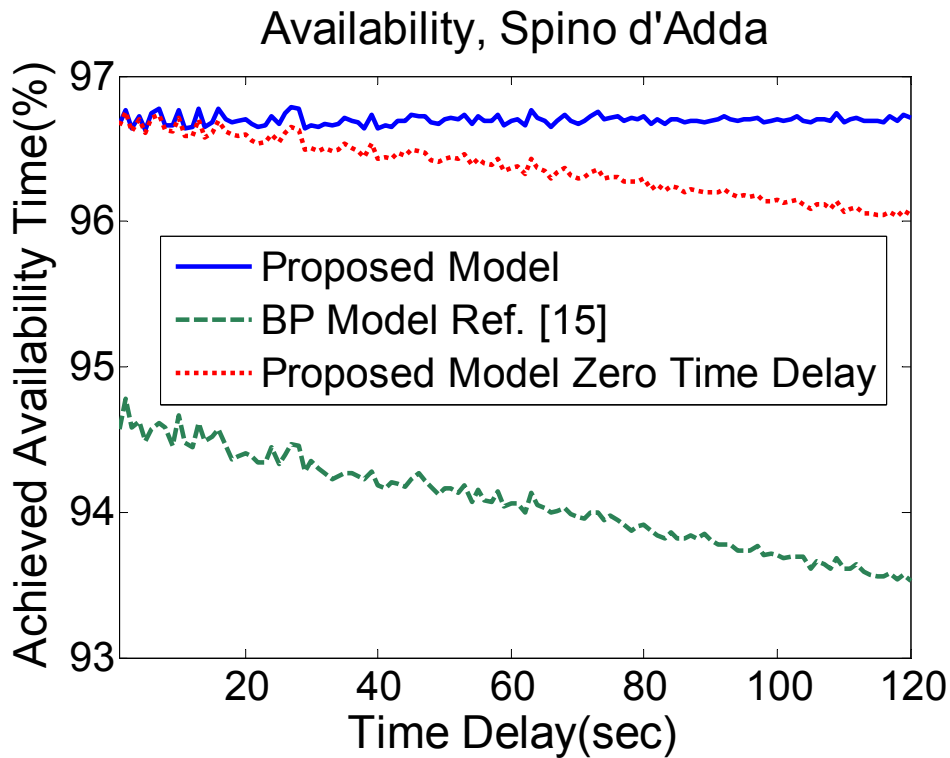
Εικ. 36 Επιτευχθείσα διαθεσιμότητα ζεύξης στην Αθήνα σε σχέση με την επιθυμητή τιμή με χρήση του προτεινόμενου μοντέλου και του μοντέλου PB.



Εικ. 37 Επιτευχθείσα διαθεσιμότητα ζεύξης στο Spino d' Adda σε σχέση με την επιθυμητή τιμή με χρήση του προτεινόμενου μοντέλου και του μοντέλου PB.



Εικ. 38 Επιτευχθείσα διαθεσιμότητα ζεύξης στην Αθήνα ως προς διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις στην πρόβλεψη για στόχο διαθεσιμότητας 99% με εφαρμογή προτεινόμενου μοντέλου, μοντέλου PB και προτεινόμενου μοντέλου χωρίς υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης.



Εικ. 39 Επιτευχθείσα διαθεσιμότητα ζεύξης στο Spino d' Adda ως προς διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις στην πρόβλεψη για στόχο διαθεσιμότητας 99% με εφαρμογή προτεινόμενου μοντέλου, μοντέλου PB και προτεινόμενου μοντέλου χωρίς υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης.

Κεφάλαιο 6.

Δυναμικό πολυδιάστατο μοντέλο λογαριθμοκανονικής σκίασης

6.1. Πρόλογος

Μέθοδοι προσομοίωσης βασισμένες σε στατιστικά μοντέλα αποτελούν ένα πολύτιμο εργαλείο για την αρχική εκτίμηση της απόδοσης των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων λόγω της τυχαιότητας των εμπλεκόμενων παραμέτρων χαρακτηρισμού της επίδρασης του ραδιοδιαύλου. Καθώς η πολυπλοκότητα των ασύρματων δικτύων αυξάνεται και η ανάγκη αξιόπιστης ασύρματης δικτύωσης γίνεται επιτακτική σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, ακόμα και σε δύσκολα περιβάλλοντα διάδοσης, η ανάπτυξη ρεαλιστικότερων μεθόδων μοντελοποίησης του καναλιού αποτελεί ενεργό αντικείμενο έρευνας.

Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading) γνωστές επίσης και ως σκίαση (shadowing) αναφέρονται στις διακυμάνσεις της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος σε σχέση με τα μοντέλα απωλειών διάδοσης, οι οποίες οφείλονται σε εμπόδια και επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ποιότητα της ζεύξης. Παρόλο που η μεταβλητότητα του φαινομένου της σκίασης για ένα δεδομένο περιβάλλον διάδοσης είναι καθαρά χωρική, τυχόν κινούμενα εμπόδια ειδικά σε πυκνές από αντικείμενα περιοχές εισάγουν επιπλέον χρονική μεταβολή στο παρατηρούμενο σήμα, λόγω σκίασης ακόμη και για ακίνητους δέκτες. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται για την περίπτωση της λογαριθμοκανονικής σκίασης ένα νέο στοχαστικό μοντέλο βασισμένο σε στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις (ΣΔΕ) το οποίο λαμβάνει υπόψη του τόσο τη χωρική συσχέτιση του φαινομένου της σκίασης, όσο και τη χρονική του μεταβολή. Επιπλέον με χρήση του προτεινόμενου χωρο-χρονικού μοντέλου του τυχαίου πεδίου της σκίασης παρουσιάζονται νέα αναλυτικά αποτελέσματα για το μέσο χρόνο διακοπής και το ρυθμό τμήσης στάθμης καθώς και αριθμητικές εφαρμογές.

6.2. Εισαγωγή

Τα στατιστικά μοντέλα του ασύρματου διαύλου αποτελούν μια πολύτιμη μέθοδο για την αποδοτική σχεδίαση και δοκιμή των σύγχρονων ασύρματων συστημάτων. Η ολοένα αυξανόμενη ανάγκη για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης απαιτεί πιο προηγμένες τεχνικές για την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που

επιτρέπει ο ραδιοδιάυλος, απαίτηση που δημιουργεί επιπλέον ανάγκες στην ανάπτυξη και εφαρμογή πιο προηγμένων μεθόδων μοντελοποίησης του καναλιού. Στην ενότητα αυτή εστιάζομαστε στις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας ή σκίαση.

Το είδος αυτό των διαλείψεων που οφείλεται κυρίως στην ύπαρξη εμποδίων κατά μήκος και περίξ του ραδιοβήματος είναι κοινά αποδεκτό ότι αναπαριστάται ικανοποιητικά με τη λογαριθμοκανονική κατανομή, τόσο για διάδοση σε εξωτερικούς χώρους [Rappaport, 2001], όσο και σε εσωτερικούς [Liberti-Rappaport, 1992]. Παρόλο που η σκίαση είναι ένα καθαρά χωρικό φαινόμενο για ένα δεδομένο περιβάλλον διάδοσης, ωστόσο χρονική μεταβλητότητα προκαλείται από την κίνηση των χρηστών και των εμποδίων. Η επίδραση στη μεταβολή της σκίασης που προκαλείται από κινούμενα εμπόδια ακόμη και για σταθερούς δέκτες ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα σοβαρή στην αξιοπιστία του συστήματος ιδιαίτερα σε πυκνοκατοικημένους χώρους. Υπό αυτή την οπτική το φαινόμενο της σκίασης αποτελεί μια χωρο-χρονική διαδικασία, δηλαδή ένα τυχαίο πεδίο που εξελίσσεται στο χρόνο. Επιπλέον η επίδραση της συσχέτισης του φαινομένου της σκίασης θεωρείται μια καθοριστική παράμετρος που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τη αποδοτικότερη μοντελοποίηση του διαύλου. Η συσχέτιση στη μοντελοποίηση του πεδίου της σκίασης οδηγεί σε ρεαλιστικότερα αποτελέσματα, καθώς επηρεάζει σημαντικά κρίσιμες παραμέτρους των σύγχρονων συστημάτων, όπως τη διαδικασία των μεταπομπών (handover), την ισχύ των παρεμβολών, την απόδοση της διαφορικής λήψης [Szyszkowicz et al., 2010].

Στη διεθνή βιβλιογραφία υφίστανται διάφορα μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους τη χωρική δομή της σκίασης, χωρίς ωστόσο να λαμβάνουν υπόψη τη χρονική εξέλιξη [Catrein-Mathar, 2008],[Cai-Giannakis, 2003],[Fraile et al., 2008],[Patwari-Agrawal, 2008], ενώ άλλα που λαμβάνουν υπόψη τη χρονική μεταβολή την αντιμετωπίζουν μόνο ως αποτέλεσμα της κινητικότητα του δέκτη, μετασχηματίζοντας τη χωρική συσχέτιση σε χρονική, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τη χρονική εξέλιξη του πεδίου που οφείλεται σε κίνηση εμποδίων στην περιοχή του δέκτη [Forkel et al., 2004][Seetharam et al., 2012],[Mukherjee-Avidor, 2001]. Κάτι τέτοιο όμως είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιβάλλον διάδοσης εσωτερικών χώρων [Hashemi, 1993], όπου το απευθείας κύμα (LOS) διαταράσσεται σύμφωνα με αρκετές μελέτες, όπως [Kashiwagi et al., 2010],[Zhang-Cai, 2007] και στις αναφορές τους. Παρόμοια αποτελέσματα με ίσως μικρότερη ένταση αναμένονται για κατανομημένα δίκτυα εξωτερικών/εσωτερικών χώρων και αστικές περιοχές πυκνά κατοικημένες

[Kashiwagi et al., 2010]. Επίσης στα μοντέλα αυτά δεν λαμβάνεται υπόψη η αυτοσυσχέτιση και η ετεροσυσχέτιση της σκίασης για διαφορετικά σημεία και διαφορετικούς σταθμούς βάσης αντίστοιχα.

Ενώ η αυτοσυσχέτιση της σκίασης αναφέρεται στην περίπτωση ενός σταθμού βάσης, η ετεροσυσχέτιση αφορά τη συσχέτιση του φαινομένου της σκίασης στην περίπτωση των σημάτων που λαμβάνονται από διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Η στατιστική μελέτη των σημάτων διαφορετικής προέλευσης αποκτά ιδιαίτερη σημασία στη σχεδίαση κυψελωτών δικτύων, στη μελέτη των παρεμβολών και στους αλγόριθμους μεταπομπής. Παρατηρείται τόσο σε εξωτερικούς χώρους [Klingenbrunn-Mogensen, 1999], όσο και σε εσωτερικούς [Butterworth et al., 2000],[Jalden et al., 2007],[Patwari et al., 2002]. Επιπλέον ακόμη και ζεύξεις χωρίς κοινό κόμβο, αν βρίσκονται κοντά παρουσιάζουν συσχέτιση στο φαινόμενο της σκίασης [Patwari et al., 2002],[Agrawal-Patwari, 2009]. Στο [Charalambous-Menemenlis, 2002] παρουσιάζεται ένα στοχαστικό δυναμικό μοντέλο της σκίασης με χρήση στοχαστικής διαφορικής εξίσωσης (ΣΔΕ), ικανό να αναπαραγάγει τις τυχαίες διακυμάνσεις της απόσβεσης στο χρόνο, χωρίς όμως να λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της ετεροσυσχέτισης.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε ένα νέο στοχαστικό δυναμικό μοντέλο ικανό να αναπαραγάγει τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου της σκίασης αλλά και να λάβει υπόψη τη χωρική δομή του φαινομένου, θεωρώντας κάθε μορφής συσχέτιση ανάμεσα σε διαφορετικές ζεύξεις συμπεριλαμβανομένου της αυτοσυσχέτισης και της ετεροσυσχέτισης. Το μοντέλο υποθέτει ότι η λογαριθμοκανονική κατανομή προσομοιώνει το φαινόμενο της σκίασης και περικλείει όλες τις σημαντικές στατιστικές παραμέτρους όπως προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα. Το μοντέλο είναι συνεπές ως προς τη διεθνή βιβλιογραφία και τις δημοσιευμένες εργασίες που αφορούν το φαινόμενο της σκίασης και επιπλέον περικλείει κάθε σημαντική παράμετρο σε ένα ενιαίο θεωρητικό πλαίσιο. Βασίζεται σε ένα σύστημα στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (SDEs), που παρέχει ένα στέρεο μαθηματικό υπόβαθρο χρήσιμο για τον υπολογισμό σημαντικών παραμέτρων, ενώ διατηρεί την πολυπλοκότητα και τον υπολογιστικό φόρτο σε αποδεκτά επίπεδα. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σχεδίαση και στη δοκιμή σταθερών και κινητών ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζουμε επίσης νέα αναλυτικά αποτελέσματα που αφορούν το μέσο χρόνο διακοπής (AOD), το ρυθμό τμήσης στάθμης (LCR) και τις

μεταπομπές, που βασίζονται στο προτεινόμενο πιθανοθεωρητικό πλαίσιο της σκίασης και στην μέθοδο των διανυσματικών τμήσεων στάθμης.

6.3. Δυναμικό μοντέλο λογαριθμοκανονικής σκίασης

6.3.1. Τυχαίο Πεδίο της Σκίασης

Το φαινόμενο της σκίασης αναφέρεται στις τυχαίες διακυμάνσεις της λαμβανόμενης ισχύος γύρω από μια μέση τιμή που αντιστοιχεί σε δεδομένη απόσταση του δέκτη από τον πομπό. Η διακύμανση αυτή οφείλεται κυρίως στην παρουσία αντικειμένων που βρίσκονται στο ραδιοβήμα και δεν λαμβάνονται υπόψη από τα μοντέλα υπολογισμού της απώλειας διάδοσης, τα οποία εξαρτώνται μόνο από την απόσταση. Έτσι οι διακυμάνσεις αυτές λαμβάνονται υπόψη με στατιστικό τρόπο και ο λαμβανόμενος σηματοθορυβικός λόγος SNR_R για μια συγκεκριμένη τοποθεσία εκφράζεται σε λογαριθμική κλίμακα ως

$$SNR_R = SNR_T - \overline{PL}(d) + X \quad (dB) \quad (6.1)$$

όπου SNR_T είναι ο εκπεμπόμενος σηματοθορυβικός λόγος και $\overline{PL}(d)$ είναι η μέση απώλεια διάδοσης, όπως υπολογίζεται από ένα κατάλληλο μοντέλο απωλειών διάδοσης βάση της απόστασης d μεταξύ του σταθμού βάσης και του δέκτη. Ο όρος X στην (6.1) είναι ο όρος της σκίασης, μια τυχαία μεταβλητή (τ.μ.) ορισμένη στο χώρο, που κατά κοινή αποδοχή θεωρείται ως κανονική μηδενικής μέσης τιμής [Rappaport, 2001].

Συμβολίζοντας με γ_R το λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο σε γραμμική κλίμακα, τότε από την (6.1) προκύπτει ότι είναι μια λογαριθμοκανονική τ.μ. με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, που δίνεται από τη σχέση

$$p(\gamma) = \frac{\xi}{\gamma\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(10\log\gamma-\mu)}{2\sigma^2}} \quad (6.2)$$

όπου $\xi = 10/\ln 10$ είναι μια σταθερά, ενώ μ (dB) και σ (dB) είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της τ.μ. $10\log\gamma_R$ αντίστοιχα. Η τυπική απόκλιση σ της τ.μ. $10\log\gamma_R$ είναι όμοια με της X , ενώ η μέση τιμή μ εκφρασμένη ως προς τη διάμεσο (median) τιμή γ_m της γ_R και τις απώλειες διάδοσης δίνεται από

$$\mu = \ln(\gamma_m) = \ln\gamma_T - \frac{1}{\xi}\overline{PL} \quad (6.3)$$

όπου γ_T είναι ο εκπεμπόμενος σηματοθορυβικός λόγος σε γραμμική κλίμακα.

Στην (6.1) θεωρούμε ότι η επίδραση της πολυδιαδρομικής διάδοσης έχει εξαλειφθεί με χρήση κατάλληλης μεθόδου άμβλυνσης του συγκεκριμένου φαινομένου διαλείψεων, πχ με το να λαμβάνει ο δέκτης μια μέση τιμή, και συνεπώς εστιάζουμε στο φαινόμενο της σκίασης μέσω της τ.μ. X . Στην ουσία για μια δεδομένη θέση του σταθμού βάσης πρόκειται για ένα τυχαίο πεδίο $X(\mathbf{x})$ με συσχετισμένες τιμές σε διαφορετικές θέσεις, συσχέτιση που περιγράφεται με τον όρο αυτοσυσχέτιση της σκίασης. Παρόλο που η σκίαση μοντελοποιείται με τον τρόπο αυτό ως μια χρονικά αμετάβλητη χωρική διαδικασία, στην πραγματικότητα είναι μια χωρο-χρονική διαδικασία $S(\mathbf{x}, t)$. Η χρονική εξέλιξη οφείλεται στη μεταβολή στο χρόνο του περιβάλλοντος διάδοσης εξαιτίας της κίνησης εμποδίων που παρεμβάλλονται στο ραδιοβήμα. Καθώς η ανάγκη για αξιόπιστη ασύρματη δικτύωση εξελίσσεται σε μια βασική απαίτηση ακόμη και σε πολύπλοκα και μη ευνοϊκά περιβάλλοντα διάδοσης, αντίστοιχα εξελίσσονται τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα της στατιστικής περιγραφής του ραδιοδιαύλου. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα νέο δυναμικό μοντέλο της σκίασης με την ικανότητα αναπαράστασης της χρονικής εξέλιξης του φαινομένου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το προτεινόμενο μοντέλο περισσότερο διαισθητικά μέσω της χωρο-χρονικής δομής της συσχέτισης με σκοπό να εξηγηθεί η βασική ιδέα του και οι παραδοχές του, καθώς και να διαφανεί η συμφωνία του με υπάρχοντα αποδεκτά μοντέλα της βιβλιογραφίας. Μάλιστα η περιγραφή μέσω της συνάρτησης συνδιακύμανσης (covariance function) περιλαμβάνει όχι μόνο τη στατιστική περιγραφή δεύτερης τάξης του τυχαίου πεδίου της σκίασης, αλλά την πλήρη πιθανοθεωρητική του περιγραφή καθώς πρόκειται για κανονικό τυχαίο πεδίο.

Ένα κοινά αποδεκτό μοντέλο αυτοσυσχέτισης της σκίασης είναι αυτό που εκφράζει τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ως εκθετικά απομειούμενη εξαρτώμενη από τη σταθερά απόστασης r_c [Gudmundson, 1991].

$$\rho(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = e^{-\frac{|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1|}{r_c}} \quad (6.4)$$

Η διακύμανση της σκίασης αναφέρεται και ως τοπική μεταβλητότητα (location variability) σ και εξαρτάται από τη συχνότητα και το περιβάλλον διάδοσης (αστικό, προάστια, εσωτερικοί χώροι κλπ). Θεωρείται συνήθως κοινή για όλες τις τοποθεσίες που ανήκουν στην ίδια γενική κατηγορία περιβάλλοντος διάδοσης. Έτσι η χωρική συνάρτηση συνδιακύμανσης της σκίασης περιγράφεται ως

$$C(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = e^{-\frac{|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1|}{r_c}} \sigma^2 \quad (6.5)$$

Στην περίπτωση κινητού δέκτη αποτελεί κοινή πρακτική η μετάφραση της χωρικής μεταβλητότητας σε χρονική ανάλογα με την ταχύτητα μετακίνησης. Αυτό αποτελεί και τη συνήθη διαδικασία που ακολουθείται για τη μέτρηση της τοπικής μεταβλητότητας, ωστόσο θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται μέριμνα για απόρριψη της επίδρασης της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Στην περίπτωση αυτή η σχέση (6.5) μετασχηματίζεται σε

$$C(t_1, t_2) = e^{-\frac{|\mathbf{v}| |t_2 - t_1|}{r_c}} \sigma^2 = e^{-a|t_2 - t_1|} \sigma^2 \quad (6.6)$$

όπου $a = -\frac{|\mathbf{v}|}{r_c}$, εισάγοντας έτσι την έννοια της χρονικής αυτοσυσχέτισης που εκφράζεται ως

$$\rho(t_1, t_2) = e^{-a|t_2 - t_1|}. \quad (6.7)$$

Ωστόσο η κίνηση είναι ένα σχετικό φαινόμενο και η επίδραση των μετακινούμενων εμποδίων στη σκίαση σταθερών χρηστών μπορεί επίσης να ληφθεί υπόψη με αντίστοιχο τρόπο. Μπορούμε λοιπόν να προσδώσουμε κίνηση σε εμπόδια και να θεωρήσουμε ένα σταθερό χρήστη. Θεωρούμε για ένα σταθερό σημείο \mathbf{x} τη χρονική αυτοσυσχέτιση της (6.7), οπότε θεωρώντας επιπλέον στάσιμες χωρικά εξαρτώμενες τιμές για τη διακύμανση $\sigma(\mathbf{x})$ και τη δυναμική παράμετρο $a(\mathbf{x})$ καταλήγουμε στην εξής έκφραση της συνάρτησης χρονικής συνδιακύμανσης

$$C_{\mathbf{x}}(t_1, t_2) = e^{-a(\mathbf{x})|t_2 - t_1|} \sigma(\mathbf{x})^2 \quad (6.8)$$

Προκειμένου να εκφραστεί η χρονική συσχέτιση σε δύο χρονικές στιγμές t_1, t_2 παράλληλα με τη χωρική για δύο θέσεις $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ παρατηρούμε ότι η επιλογή της εκθετικής χρονικής αυτοσυσχέτισης για κάθε τοποθεσία συνεπάγεται ότι η σκίαση αναπαριστάται ως μια κανονική (Gauss) και μαρκοβιανή διαδικασία. Έτσι, χωρίς απώλεια της γενικότητας αν υποθέσουμε ότι $t_1 < t_2$, μπορούμε να εκφράσουμε την τ.μ. της σκίασης $S(\mathbf{x}_2, t_2)$ σε συνάρτηση της τ.μ. $S(\mathbf{x}_2, t_1)$ ως

$$S(\mathbf{x}_2, t_2) = e^{-a(\mathbf{x}_2)|t_2 - t_1|} S(\mathbf{x}_2, t_1) + \sigma(\mathbf{x}_2) \sqrt{1 - e^{-2a(\mathbf{x}_2)|t_2 - t_1|}} N \quad (6.9)$$

όπου N είναι μια τυποποιημένη κανονική τ.μ. ανεξάρτητη της $S(\mathbf{x}_2, t_1)$. Με χρήση της (6.9) καταλήγουμε ότι η συνάρτηση συνδιακύμανσης του τυχαίου πεδίου της σκίασης $S(\mathbf{x}, t)$ εκφράζεται ως

$$C(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_2) = e^{-a(\mathbf{x}_2)^{l_2-t_1}} \rho(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_1) \sigma(\mathbf{x}_1) \sigma(\mathbf{x}_2) \quad (6.10)$$

όπου έχουμε υποθέσει στασιμότητα. Ο συντελεστής συσχέτισης μπορεί να επιλεγεί σύμφωνα με τη (6.4) ως

$$\rho(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_1) = e^{-\frac{|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1|}{t_c}} \quad (6.11)$$

οπότε η (6.10) περιγράφει τη χρονική εξέλιξη της σκίασης για σταθερούς χρήστες λαμβάνοντας υπόψη τη χωρική αυτοσυσχέτιση. Μια παρόμοια προσέγγιση έχει δημοσιευτεί στο [Graziosi-Santucci, 2002] για την περίπτωση της ετεροσυσχέτισης της σκίασης που επηρεάζει έναν κινητό χρήστη. Με την επιλογή ωστόσο του κατάλληλου συντελεστή συσχέτισης, η συνάρτηση συνδιακύμανσης (6.10) μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί ώστε να συμπεριλάβει την ετεροσυσχέτιση, καθώς και κάθε μορφής συσχέτιση, που εμφανίζεται σε ζεύξεις σε κοντινές αποστάσεις.

Θεωρούμε στη συνέχεια m σταθμούς βάσης και το διανυσματικό τυχαίο πεδίο της σκίασης $\mathbf{S}(\mathbf{x}, t) = [S_1(\mathbf{x}, t), \dots, S_m(\mathbf{x}, t)]$, όπου $S_i(\mathbf{x}, t), i = 1, \dots, m$ είναι η διαδικασία της σκίασης που επιδρά σε ένα δέκτη στη θέση \mathbf{x} στο σήμα που λαμβάνεται από στο σταθμό βάσης $i, i = 1, \dots, m$. Το διανυσματικό τυχαίο πεδίο αναπαριστάται πλήρως από τις συναρτήσεις συνδιακύμανσης

$$C_{ij}(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_2) = \rho_{ij}(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_2) \sigma_i(\mathbf{x}_1) \sigma_j(\mathbf{x}_2) \quad (6.12)$$

όπου $\rho_{ij}(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_2)$ είναι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της σκίασης στα σημεία $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ για τις χρονικές στιγμές t_1, t_2 αντίστοιχα και για τα σήματα που λαμβάνονται από τους σταθμούς βάσης i, j . Ο συντελεστής μπορεί να επιλεγεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να περικλείει την αυτοσυσχέτιση, την ετεροσυσχέτιση καθώς και τη συσχέτιση της σκίασης μεταξύ ζευξέων χωρίς κοινό σημείο.

Το προτεινόμενο μοντέλο υποθέτει την εκθετική χρονική συσχέτιση

$$\rho_{ij}(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_2) = e^{-a(\mathbf{x}_2)^{l_2-t_1}} \rho_{ij}(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_1) \quad (6.13)$$

Επίσης εδώ υποθέτουμε επίσης στασιμότητα θεωρώντας την τιμή $\rho_{ij}(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_1)$ ανεξάρτητη του χρόνου. Εκτός από αυτές τις προϋποθέσεις οποιοδήποτε συνεπές μοντέλο συσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Μια επιλογή που αναπαριστά τις κοινά αποδεκτές παραμέτρους που διαμορφώνουν τη συσχέτιση της σκίασης δίνεται στο [Avidor-Mukherjee, 2001] με την έκφραση

$$\rho_{ij}(\mathbf{x}_1, t_1, \mathbf{x}_2, t_1) = e^{-\frac{|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1|}{r_c}} g(\theta_{x_1}^i - \theta_{x_2}^j) h(d_{x_1}^i - d_{x_2}^j) \quad (6.14)$$

όπου $\theta_{x_i}^j$ είναι η κατεύθυνση του σημείου \mathbf{x}_i από το σταθμό βάσης j σχετικά με μια κατεύθυνση αναφοράς και $d_{x_i}^j$ είναι η απόσταση του σημείου \mathbf{x}_i από το σταθμό βάσης j . Οι συναρτήσεις g, h θα πρέπει να επιλεγούν με τρόπο ώστε να ικανοποιούν την απαίτηση θετικού ορισμού (positive definiteness) σύμφωνα με το [Avidor-Mukherjee, 2001]. Μια λεπτομερής ανάλυση των θεμάτων που άπτονται της απαίτησης αυτής για διάφορα μοντέλα συσχέτισης μπορεί να βρεθεί στο [Szyszkowicz et al., 2010]. Στο [Agrawal-Patwari, 2009] παρουσιάζεται ένα μοντέλο που βασίζεται σε ένα τυχαίο πεδίο χωρικών απωλειών και στον υπολογισμό ολοκληρωμάτων κατά μήκος των ζεύξεων για τον υπολογισμό της σκίασης και της συσχέτισης. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τον υπολογισμό της συσχέτισης ακόμη και για ζεύξεις χωρίς κοινό σημείο. Σε κάθε συνεπή επιλογή χωρικής συσχέτισης το προτεινόμενο μοντέλο εισάγει επιπλέον την εκθετική χρονική συσχέτιση, σύμφωνα με την (6.13). Με δεδομένο ότι η σκίαση θεωρείται ένα κανονικό τυχαίο πεδίο [Avidor-Mukherjee, 2001] μια κατάλληλη επιλογή μοντέλου συσχέτισης οδηγεί πάντοτε σε ένα θετικά ορισμένο πίνακα συνδιακύμανσης για κάθε επιλογή σημείων στο χώρο ή/και στο χρόνο.

Σημειώνεται ότι οι χωρικές μεταβλητότητες που εμφανίζονται στις σχέσεις (6.5)-(6.12) αντιπροσωπεύουν το γεγονός ότι η σκίαση αντιμετωπίζεται με στατιστικό τρόπο, καθώς τα μοντέλα διάδοσης δεν λαμβάνουν υπόψη επακριβώς τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διάδοσης. Αυτό το είδος μοντελοποίησης χαρακτηρίζεται ως μη καθορισμένου χώρου (non-site specific). Η χωρική μεταβλητότητα αντιπροσωπεύει τη στατιστική διασπορά της τιμής της τ.μ. της σκίασης όταν αυτή υπολογίζεται για το σύνολο των σημείων του χωρο-χρόνου. Στην περίπτωση που υφίστανται λεπτομερείς μελέτες για ένα δεδομένο χώρο με χρήση άλλων τεχνικών, όπως ray tracing, τότε απομένει η επίδραση των κινούμενων εμποδίων να αναπαρασταθεί στατιστικά υπολογίζοντας τη διασπορά πλέον μόνο στο χρόνο για κάθε σημείο ξεχωριστά. Αναφερόμαστε στις περιπτώσεις αυτές ως μοντέλα συγκεκριμένου χώρου (site-specific). Καθώς η τιμή σ περιγράφει τότε την τυπική απόκλιση που τα κινούμενα αντικείμενα προκαλούν στη λαμβανόμενη ισχύ σε κάθε τοποθεσία, τότε αναμένεται γενικά να κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα από ότι όταν συνυπολογίζεται και η μεταβλητότητα στο χώρο στην περίπτωση των μοντέλων

μη καθορισμένου χώρου. Ακόμη και στην περίπτωση που δεν έχουν εκτελεσθεί λεπτομερείς μελέτες ή μετρήσεις αλλά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν συγκεκριμένες επιδράσεις της χωροταξίας στη διάδοση, τότε η προσέγγιση αυτή αντικατοπτρίζεται με αντίστοιχη επιλογή των τιμών της χωρικής μεταβλητότητας, όπως στο [Patwari et al., 2002] με τη χρήση κατάλληλης τιμής διόρθωσης (bias).

Στη συνέχεια με βάση το εκθετικό στο χρόνο μοντέλο συσχέτισης και την συνεπαγόμενη μαρκοβιανή υπόθεση παρουσιάζουμε την αυστηρή διατύπωση του προτεινόμενου μοντέλου ως σύστημα στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ). Η επιλογή των ΣΔΕ επιτρέπει τη φαινομενολογική περιγραφή του τυχαίου πεδίου της σκίασης σε ένα στέρεο μαθηματικό υπόβαθρο χρήσιμο στους αναλυτικούς υπολογισμούς βασικών παραμέτρων καθώς και εύχρηστου στην προσομοίωση.

6.3.2. Δυναμικό Μοντέλο

Θεωρούμε το λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο SNR από m σταθμούς βάσης σε k σημεία ενδιαφέροντος. Συμβολίζουμε με $\gamma_i(t)$, $i = 1, \dots, n = mk^2$, το λαμβανόμενο σηματοθορυβικό λόγο σε γραμμική κλίμακα, δηλαδή κάθε δείκτης αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη θέση για το σήμα από ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης. Σύμφωνα με την (6.1) ο σηματοθορυβικός λόγος γ_i σε γραμμική κλίμακα είναι μια λογαριθμοκανονική τ.μ. για κάθε χρονική στιγμή με στάσιμες παραμέτρους σ_i και $\ln(\gamma_{m_i})$.

Θεωρούμε τη διανυσματική ανέλιξη $\mathbf{X}(t) = [X_1(t), \dots, X_n(t)]$ που προκύπτει με το μη γραμμικό μετασχηματισμό

$$X_i(t) = \xi \ln(\gamma_i(t)/\gamma_{m_i}), \quad 1 \leq i \leq n \quad (6.15)$$

σε κάθε συνιστώσα ανέλιξη $\gamma_i(t)$, ότι είναι η λύση στη n -διάστατη ΣΔΕ της μορφής Ornstein-Uhlenbeck [Karatzas-Shreve, 1991], που εκφράζεται ως

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}_t dt + \mathbf{B} \cdot d\mathbf{W}_t, \quad \mathbf{X}_0 = \mathbf{x}_0, \quad (6.16)$$

όπου \mathbf{A} είναι ο διαγώνιος πίνακας $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{1 \leq i, j \leq n}$ με στοιχεία:

$$a_{ij} = -a_i \cdot \delta_{ij}, \quad (6.17)$$

² Ο συμβολισμός $\gamma(t)$ ή γ_i χρησιμοποιείται εκ περιτροπής για τη χρονική εξάρτηση.

όπου δ_{ij} η συνάρτηση δέλτα του Kronecker και $a_i, 1 \leq i \leq n$ είναι οι δυναμικές παράμετροι της σκίασης, θεωρούμενες διαφορετικές για κάθε ζεύξη και $\mathbf{X}(0) = \mathbf{x}_0$ είναι η αρχική συνθήκη της ΣΔΕ. Η λύση της n -διάστατης ΣΔΕ (6.16) υπολογίζεται εύκολα και δίνεται από [Karatzas-Shreve, 1991]:

$$\mathbf{X}_t = e^{t\mathbf{A}} \cdot \mathbf{X}_0 + e^{t\mathbf{A}} \cdot \int_0^t e^{-s\mathbf{A}} \cdot \mathbf{B} \cdot d\mathbf{W}_s, \quad (6.18)$$

όπου

$$e^{t\mathbf{A}} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!} \mathbf{A}^n. \quad (6.19)$$

Εξαιτίας του ότι ο πίνακας \mathbf{A} είναι διαγώνιος (βλ. (6.17)) μπορεί εύκολα να επαληθευθεί ότι

$$\left[e^{t\mathbf{A}} \right]_{ij} = e^{-a_i t} \delta_{ij}. \quad (6.20)$$

Η στοχαστική ανέλιξη της λύσης \mathbf{X}_t όπως εκφράζεται στην (6.18) είναι μια κανονική ανέλιξη (Gaussian) αν η αρχική τιμή \mathbf{X}_0 ακολουθεί τη n -διάστατη κανονική κατανομή, συμπεριλαμβανομένου της εκφυλισμένης περίπτωσης που είναι ντετερμινιστική. Το διάνυσμα μέσης τιμής της \mathbf{X}_t , συμβολίζεται με $\mathbf{M}_X(t)$ και δίνεται από

$$\mathbf{M}_X(t) = e^{t\mathbf{A}} \cdot \mathbf{M}_X(0). \quad (6.21)$$

Ο πίνακας συνδιακύμανσης $\mathbf{C}_X(t)$ της διανυσματικής ανέλιξης \mathbf{X}_t σε κάθε χρονική στιγμή t δίνεται από [Karatzas-Shreve, 1991]:

$$\mathbf{C}_X(t) = e^{t\mathbf{A}} \left[\mathbf{C}_X(0) + \int_0^t e^{-s\mathbf{A}} \mathbf{B} \mathbf{B}^T e^{-s\mathbf{A}^T} ds \right] e^{t\mathbf{A}^T}, \quad (6.22)$$

που είναι λύση της εξής γραμμικής διαφορικής εξίσωσης

$$\dot{\mathbf{C}}_X(t) = \mathbf{A} \mathbf{C}_X(t) + \mathbf{C}_X(t) \mathbf{A}^T + \mathbf{B} \mathbf{B}^T. \quad (6.23)$$

Ο πίνακας \mathbf{A} έχει εξ' ορισμού όλες τις ιδιοτιμές του πραγματικούς αρνητικούς αριθμούς (ίσες με $-a_i$), οπότε εξασφαλίζεται η σύγκλιση του ολοκληρώματος

$$\mathbf{C}_X = \int_0^{\infty} e^{s\mathbf{A}} \mathbf{B} \mathbf{B}^T e^{s\mathbf{A}^T} ds. \quad (6.24)$$

Εύκολα επαληθεύεται ότι αν $\mathbf{C}_X(0) = \mathbf{C}_X$ τότε η $\mathbf{C}_X(t) = \mathbf{C}_X$ είναι λύση της (6.23). Αυτό σημαίνει ότι υφίσταται στάσιμη λύση στην (6.16), που στην περίπτωση αυτή η (6.23) οδηγεί στην αλγεβρική εξίσωση:

$$\mathbf{A}\mathbf{C}_X + \mathbf{C}_X\mathbf{A}^T = -\mathbf{B}\mathbf{B}^T. \quad (6.25)$$

Η εξίσωση αυτή αποτελεί τη βάση της μοντελοποίησης όσον αφορά τη σύνδεση του μοντέλου με την πραγματικότητα. Ο στάσιμος πίνακας συνδιακύμανσης \mathbf{C}_X της \mathbf{X}_t είναι ίσος με τον πίνακα συνδιακύμανσης της διαδικασίας της σκίασης $\mathbf{S}(t)$. Έτσι η χρήση υφιστάμενων μοντέλων για τη διαδικασία της σκίασης $\mathbf{S}(t)$ επιτρέπει τον υπολογισμό του πίνακα συνδιακύμανσης \mathbf{C}_X της \mathbf{X}_t . Η εξίσωση (6.25) μπορεί τότε να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του πίνακα \mathbf{B} , που απαιτείται για τη δυναμική μοντελοποίηση της \mathbf{X}_t στην (6.16), δοθέντος του πίνακα \mathbf{A} και του στάσιμου πίνακα συνδιακύμανσης \mathbf{C}_X .

Αν συμβολίζουμε

$$\mathbf{G} = \mathbf{B}\mathbf{B}^T, \quad (6.26)$$

τότε από την (6.25) βρίσκουμε ότι ο πίνακας \mathbf{G} δίνεται από

$$[G]_{ij} = (a_i + a_j)[C_X]_{ij}. \quad (6.27)$$

Ο πίνακας \mathbf{C}_X ως πίνακας συνδιακύμανσης είναι πραγματικός και συμμετρικός και από την (6.27) το ίδιο προκύπτει και για τον πίνακα \mathbf{G} . Η ανάλυση του \mathbf{G} ως γινόμενο $\mathbf{B}\mathbf{B}^T$ επιτυγχάνεται εύκολα μέσω της ανάλυσης Cholesky.

Με χρήση της έκφρασης της λύσης (6.18) και συνυπολογίζοντας τις ιδιότητες του στοχαστικού ολοκληρώματος προκύπτει ότι η ετερο-συνδιακύμανση (cross-covariance) της ανέλιξης της λύσης για δύο χρονικές στιγμές $t_1 < t_2$ δίνεται από

$$\mathbf{C}_X(t_1, t_2) = \mathbf{C}_X e^{(t_2 - t_1)\mathbf{A}^T} \quad (6.28)$$

η οποία είναι σε άμεση συμφωνία με την (6.13).

Το δυναμικό μοντέλο όπως παρουσιάστηκε αντιστοιχεί σε ένα σταθερό ασύρματο δίκτυο και μοντελοποιεί τη χωρική συσχέτιση της σκίασης παράλληλα με τη χρονική εξέλιξη της σκίασης εξαιτίας της κίνησης εμποδίων. Σημαντικό ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει η περίπτωση των κινητών ασύρματων δικτύων, στα οποία οι χρήστες μετακινούνται. Θεωρούμε λοιπόν την περίπτωση m σταθμών βάσης και l κινούμενων χρηστών που μετακινούνται κατά μήκος των διαδρομών

$\mathbf{r}_j(t) = (x_j(t), y_j(t))$, $j = 1..l$. Με διακριτοποίηση της κάθε τροχιάς σε k_l σημεία, με μήκος σε κάθε σκέλος ανάλογο της χωρικής κλίμακας του φαινομένου της σκίασης, καταλήγουμε σε $n = m \sum_l k_l$ ζεύξεις. Το μοντέλο μπορεί τώρα να χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση της σκίασης σε όλα τα διακριτά σημεία που οι χρήστες βρίσκονται κατά μήκος της τροχιάς τους σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ο στάσιμος πίνακας συνδιακύμανσης περιλαμβάνει τη συνδιακύμανση για κάθε συνδυασμό σημείων και σταθμών βάσης. Στην ουσία με την επιλογή διαφορετικών σημείων για την προσομοίωση της σκίασης στον κινητό δέκτη κατά τη διάρκεια της τροχιάς του μετατρέπουμε το στάσιμο μοντέλο της σκίασης σε μη στάσιμο όπως επιβάλλει η κίνηση του χρήστη. Ωστόσο η μέθοδος αυτή απαιτεί την προσομοίωση όλων των σημείων της τροχιάς για κάθε χρονική στιγμή, ενώ ο χρήστης διέρχεται από αυτά σε καθορισμένους χρόνους. Απαιτεί δηλαδή κατά κάποιο τρόπο τον υπολογισμό περισσότερων στοιχείων από αυτά που πραγματικά χρειάζονται, αφού σε κάθε χρονική στιγμή προκύπτουν από τη μοντελοποίηση $n = m \sum_l k_l$ τιμές, ενώ στην πραγματικότητα απαιτούνται ml .

Αν η απαίτηση για μη στασιμότητα μπορεί να παρακαμφθεί θεωρώντας μετακινήσεις στις οποίες μπορούμε να θεωρήσουμε τη σκίαση στάσιμη τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη προσέγγιση. Με χρήση των (6.12)-(6.14) και το γεγονός ότι $\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_1 + \mathbf{v}(t_2 - t_1)$, όπου \mathbf{v} είναι το διάνυσμα της ταχύτητας του κινητού σταθμού βλέπουμε ότι για μετατόπιση τέτοια ώστε να μπορεί να θεωρηθεί η σκίαση τοπικά στάσιμη, η συνδιακύμανση της σκίασης που υφίσταται ο κινητός χρήστης δίνεται από

$$C_{ij}(t_1, t_2) = e^{-a'(\mathbf{x})|t_2 - t_1|} g(\Delta\theta) h(\Delta d) \sigma_i(\mathbf{x}) \sigma_j(\mathbf{x}) \quad (6.29)$$

όπου $a'(\mathbf{x}) = a(\mathbf{x}) + |\mathbf{v}|/r_c$. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί έγκυρη όσο οι μετακινήσεις δεν είναι αρκούντως μεγάλες και ένας στάσιμος πίνακας συνδιακύμανσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή των συσχετίσεων, ανεξάρτητα της κίνησης των χρηστών [Graziosi-Santucci, 2002]. Στην περίπτωση αυτή οι αυτοσυσχετίσεις και οι ετεροσυσχετίσεις θα πρέπει να υπολογιστούν για μια αντιπροσωπευτική γωνία διαχωρισμού και απόσταση, ενώ οι δυναμικές παράμετροι συνεκτιμούν και την κίνηση του χρήστη.

6.3.3. Πιθανότητες Μετάβασης

Η διαδικασία \mathbf{X}_t ως λύση της (6.18) είναι μια κανονική (Gaussian) και μαρκοβιανή διαδικασία. Η πυκνότητα πιθανότητας μετάβασης $p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s)$ ορίζονται ως:

$$P[\mathbf{x} < \mathbf{X}(t) \leq \mathbf{x} + d\mathbf{x} | \mathbf{X}(s) = \mathbf{y}] = p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s) d\mathbf{x} \quad (6.30)$$

Οι πυκνότητες πιθανότητας μετάβασης μπορούν να υπολογισθούν με χρήση της λύσης της ΣΔΕ και τις ιδιότητες του στοχαστικού ολοκληρώματος ή με επίλυση της αντίστοιχης εξίσωσης Fokker Planck (FPE):

$$\partial_t p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s) = \sum_i \partial_{x_i} [\beta_i x_i p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s)] + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \partial_{x_i} \partial_{x_j} [G_{ij} p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s)]. \quad (6.31)$$

Με την υπόθεση της στασιμότητας:

$$p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s) = p(\mathbf{x}, t - s | \mathbf{y}, 0) \quad (6.32)$$

Η έκφραση της $p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s)$ δίνεται από

$$p(\mathbf{x}, t | \mathbf{y}, s) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n \Delta}} \exp(K) \quad (6.33)$$

$$K = -\frac{1}{2} (\mathbf{x} - e^{(t-s)\mathbf{B}} \cdot \mathbf{y}) \mathbf{C}_X^{-1}(t) (\mathbf{x} - e^{(t-s)\mathbf{B}} \cdot \mathbf{y})^T$$

όπου Δ η ορίζουσα του πίνακα συνδιακύμανσης $\mathbf{C}_X(t)$ και $\mathbf{C}_X^{-1}(t)$ ο αντίστροφος πίνακας όταν υπάρχει.

6.3.4. Διάρκεια Διαλείψεων και Ρυθμός Τμήσης Στάθμης

Σπουδαία σημασία σε διάφορες παραμέτρους των ασύρματων επικοινωνιών έχουν οι τιμές της μέσης διάρκειας διακοπής (ΜΔΔ) της ζεύξης (AOD, Average Outage Duration). Η AOD είναι μια στατιστική παράμετρος δεύτερης τάξης που επηρεάζει σημαντικά το μήκος των πακέτων, τα σχήματα κωδικοποίησης, το μήκος του διαμπλοκέα (interleaver) κλπ. Το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό της AOD σε πολυδιάστατη βάση θεωρώντας συσχετισμένη σκίαση και χωρίς την υπόθεση ασυμπτωτικών αποτελεσμάτων της θεωρίας τμήσης στάθμης, όπως στα [Graziosi-Santucci, 1999],[Graziosi, 1999].

Η διαδικασία της σκίασης (6.18) είναι μια διανυσματική ανέλιξη Ornstein-Uhlenbeck, δηλαδή είναι μια κανονική και μαρκοβιανή διαδικασία. Είναι ήδη γνωστό από τη μονοδιάστατη περίπτωση ότι η ισχύς των υψηλών συχνοτήτων της φασματικής πυκνότητας ισχύος μιας τέτοιας διαδικασίας είναι τέτοια που ο μέσος ρυθμός τμήσης στάθμης (LCR, Level Crossing Rate) είναι μη πεπερασμένος και η AOD μηδέν [Rice, 1958]. Ωστόσο οι αυτεπαγωγές και οι χωρητικότητες που είναι πάντοτε παρούσες στα τηλεπικοινωνιακά κυκλώματα επιδρούν στην εξομάλυνση της διαδικασίας [Stratonovich-Silverman, 1967], ώστε η ανάλυση της διάρκειας των διαλείψεων μπορεί να γίνει με τη θεώρηση της εφαρμογής του κατάλληλου φίλτρου στη διαδικασία (6.18). Παρόμοιες προσεγγίσεις μπορούν να βρεθούν στο [Rice, 1958] για μια γενική μαρκοβιανή διαδικασία, και στα [Giancristofaro, 1996], [Mukherjee-Avidor, 2001],[Agrawal-Patwari, 2009] για την ανέλιξη της σκίασης συγκεκριμένα.

Η προσέγγιση της χρήσης φίλτρου έχει επιπλέον και ισχυρή υπόσταση σε επιχειρηματολογία αναφορικά με τη χρονική κλίμακα της σκίασης. Καθώς η σκίαση αναφέρεται στη μέση τιμή της λαμβανόμενης ισχύος τοπικά, αυτή υπολογίζεται μετρώντας και λαμβάνοντας τη μέση τιμή της ισχύος σε μια περιοχή της τάξης των 20-30 μήκων κύματος προκειμένου να εξαλειφθεί η επίδραση της πολυδιαδρομικής διάδοσης [Stüber, 2001]. Η σκίαση επιδεικνύει επίσης διακυμάνσεις σε αποστάσεις της τάξης των δεκάδων μήκων κύματος λόγω της παρουσίας εμποδίων εξαρτώμενες από το σχετικό μέγεθος των εμποδίων. Μεταφράζοντας σε χρονική κλίμακα υπολογίζοντας την επίδραση της κίνησης αυτό οδηγεί σε μια αργή σχετικά χρονική μεταβολή και άρα σε ένα άνω όριο στη συχνότητα της διαδικασίας της σκίασης. Ωστόσο τα όρια δεν είναι σαφώς καθορισμένα, ειδικά σε πυκνά περιβάλλοντα όπως αυτά σε εσωτερικούς χώρους, όπου τα φαινόμενα μικρής και μεγάλης κλίμακας τείνουν να αναμειγνύονται. Έτσι η λήψη μέσων τιμών για την εύρεση του τοπικού μέσου της ισχύος με την απόρριψη της επίδρασης της πολυδιαδρομικής διάδοσης παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι η φιλτραρισμένη διαδικασία της σκίασης δεν είναι ικανή να αναπαραστήσει διακυμάνσεις της σκίασης εντός του παραθύρου εξομάλυνσης [Jeon et al., 2010]. Ωστόσο εδώ η προσομοίωση της σκίασης εκτελείται με τη διακριτοποίηση της (6.18), ενώ χρησιμοποιούμε τη φιλτραρισμένη διαδικασία μόνο για τον υπολογισμό των AOD. Στη συνέχεια θεωρούμε ότι η επίδραση της πολυδιαδρομικής διάδοσης έχει απορριφθεί, μια υπόθεση κοινή στη διεθνή βιβλιογραφία σε εργασίες που άπτονται του φαινομένου της σκίασης. Επίσης δεν περιοριζόμαστε στην επιλογή ενός συγκεκριμένου φίλτρου όπως στα [Mukherjee-

Avidor, 2001],[Agrawal-Patwari, 2009], όπου έχουν θεωρηθεί φίλτρα μετακινούμενου μέσου (moving averages) τοπικά ή χρονικά. Αντίθετα θεωρούμε τη γενική περίπτωση ενός οποιοδήποτε κατάλληλου γραμμικού φίλτρου. Ωστόσο η εφαρμογή του φίλτρου επιδρά σημαντικά στα στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης και η επιλογή των χαρακτηριστικών του φίλτρου θα πρέπει να ανταποκρίνεται στο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Καθώς η εφαρμογή του φίλτρου είναι μια γραμμική διαδικασία και η σκίαση είναι μια κανονική διαδικασία, το ίδιο ισχύει και για τη φιλτραρισμένη διαδικασία, επιτρέποντας έτσι τη χρήση γνωστών αποτελεσμάτων για τις παραμέτρους LCR και AOD των κανονικών διαδικασιών. Με χρήση της γενικευμένης μεθόδου του Rice για διανυσματικές στοχαστικές ανελίξεις [Belyaev, 1968] [Lindgren, 2013], μπορούμε να υπολογίσουμε το ρυθμό εξόδου από μια περιοχή D του χώρου τιμών της φιλτραρισμένης διανυσματικής ανελίξης \mathbf{Z}_t , μέσω του ρυθμού τμήσης ν^+ προς το εξωτερικό (out-crossing rate) του συνόρου της περιοχής D , που αναπαριστάται από μια επιφάνεια ∂S

$$\nu^+ = \int_{\partial S} \left\{ \int_0^{\infty} \mathbf{z}_n^T f_{\mathbf{Z}_n}(\mathbf{z}, \mathbf{z}_n) d\mathbf{z}_n \right\} dz \quad (6.34)$$

όπου $\mathbf{z}_n^T = \mathbf{n}^T(\mathbf{z}) \cdot \mathbf{z}$ είναι η κάθετος ταχύτητα της διανυσματικής ανελίξης \mathbf{Z}_t στην επιφάνεια ∂S και $f_{\mathbf{Z}_n}(\mathbf{z}, \mathbf{z}_n)$ είναι η από κοινού πυκνότητα πιθανότητας. Καθώς η \mathbf{Z}_t είναι μια διανυσματική κανονική ανελίξη, οι παράγωγοί της είναι ανεξάρτητοι της διαδικασίας [Adler-Taylor, 2007], με αποτέλεσμα την απλοποίηση της έκφρασης της πυκνότητας πιθανότητας.

Σε διάφορες πρακτικές εφαρμογές ενδιαφέροντος στα ασύρματα δίκτυα όπως σε σχήματα διαφορικής προστασίας, δίκτυα με ζεύξεις πολλαπλών τμημάτων (multi-hop) κλπ, μπορεί να αναγνωρισθεί μια περιοχή τιμών εντός της οποίας οι τιμές της διανυσματικής ανελίξης επιτρέπουν την αξιόπιστη επικοινωνία, ενώ εκτός της οποίας η λειτουργία διακόπτεται. Η μετάβαση από το εσωτερικό στο εξωτερικό της περιοχής αυτής αντιστοιχεί σε μετάβαση σε περίοδο διακοπής της ζεύξης. Έτσι για παράδειγμα σε ένα σχήμα διπλής διαφορικής προστασίας με μέθοδο SC (Selection Combining) η γραμμοσκιασμένη περιοχή της Εικ. 40 αντιστοιχεί σε διακοπή λειτουργίας, ενώ η περιοχή D αντιστοιχεί σε αξιόπιστη λειτουργία. Οι τιμές X_{th1}, X_{th2} αντιστοιχούν σε στάθμες σήματος χαμηλότερα των οποίων ο δέκτης δεν μπορεί να επιτύχει τον

επιθυμητό ρυθμό σφαλμάτων. Στην Εικ. 41 απεικονίζονται οι αντίστοιχες περιοχές λειτουργίας και διακοπής για την περίπτωση μιας ζεύξης δύο τμημάτων με αναγέννηση του σήματος στον αναμεταδότη. Αναλυτικά ο τρόπος υπολογισμού του ρυθμού τμήσης στάθμης για τις περιπτώσεις διαφορικής προστασίας με τη μέθοδο SC και ζεύξεων πολλαπλών βημάτων (multi-hop) με αναγεννητικούς αναμεταδότες περιλαμβάνεται στο Παράρτημα Η.

Η μέση διάρκεια διακοπής AOD εκφράζεται συναρτήσει του ρυθμού τμήσης (out-crossing) ως

$$d = \frac{P(\mathbf{Z}_t \in D^c)}{\nu^+} \quad (6.35)$$

όπου D^c είναι η συμπληρωματική περιοχή της D .

Η μελέτη του LCR μέσω μιας κατάλληλα φιλτραρισμένης διαδικασίας φανερώνει επίσης μια διασύνδεση του προτεινόμενου μοντέλου σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις στη διεθνή βιβλιογραφία του φαινομένου της σκίασης από κίνηση ανθρώπων σε εσωτερικούς χώρους (human shadowing). Στα [Kashiwagi et al., 2010] και [Zhang-Cai, 2007] η επίδραση της σκίασης μοντελοποιείται από μια πεπερασμένη αλυσίδα Μαρκόφ, για την οποία εξάγονται οι πιθανότητες μετάβασης. Η διάρκεια της κατάστασης υπό σκίαση μοντελοποιείται με την εκθετική κατανομή και η εμφάνιση των εμποδίων με την κατανομή Poisson. Το μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο κατά μια έννοια με αυτή την προσέγγιση καθώς είναι γνωστό ότι η τμήση μια υψηλής στάθμης μιας κανονικής διαδικασίας προσεγγίζεται με την κατανομή Poisson.

Μια ακόμη εφαρμογή του τρόπου υπολογισμού του LCR της σκίασης που παρουσιάστηκε, αφορά τον υπολογισμό του μέσου αριθμού μεταπομπών ανά διανυθείσα απόσταση που ένας κινητός χρήστης υφίσταται, εναλλάσσοντας σταθμούς βάσεις, ώστε να εξυπηρετείται κάθε φορά από το σταθμό βάσης με τις χαμηλότερες απώλειες. Όπως αναφέρεται στο [Mukherjee-Avidor, 2001] το μέτρο αυτό αποτελεί τη βάση οποιουδήποτε καλού αλγόριθμου ελέγχου μεταπομπών, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια στάθμη αναφοράς για τη σύγκριση και αξιολόγηση πρακτικών αλγόριθμων. Η ουσιαστική διαφορά εδώ με το [Mukherjee-Avidor, 2001] είναι η νέα ιδέα της εφαρμογής των πολυδιάστατων τμήσεων στάθμης και η ικανότητα της θεώρησης οποιουδήποτε κατάλληλου φίλτρου για την εξομάλυνση της αρχικής μαρκοβιανής διαδικασίας.

6.4. Αριθμητικά Αποτελέσματα της Μεθόδου

Στην ενότητα αυτή εφαρμόζουμε το προτεινόμενο δυναμικό μοντέλο της σκίασης σε δύο πρακτικές εφαρμογές ασύρματων συστημάτων. Η πρώτη εφαρμογή αφορά ένα σταθερό ασύρματο σύστημα με ζεύξη διπλού βήματος (dual-hop) και η δεύτερη την περίπτωση ενός κινητού σταθμού που κινείται ανάμεσα σε δύο σταθμούς βάσης ενός κυψελωτού συστήματος.

Το σύστημα θεωρείται ότι λειτουργεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις όταν ο λαμβανόμενος σηματορουβικός λόγος SNR_R υπερβαίνει την τιμή κατωφλίου SNR_{TH} , δηλαδή όταν $SNR_R \geq SNR_{TH}$, ή σε γραμμική κλίμακα όταν $\gamma_R \geq \gamma_{TH}$. Η τιμή του κατωφλίου εξαρτάται από τον τύπο της διαμόρφωσης και την υποστηριζόμενη εφαρμογή. Η απαίτηση αυτή μπορεί να μεταφραστεί σε αντίστοιχη απαίτηση για τη μετασχηματισμένη διαδικασία X της (6.15), ως

$$X \geq SNR_{TH} - (SNR_T - \overline{PL}) \quad (6.36)$$

Αν ορίσουμε το περιθώριο διάλειψης FM ως

$$FM = SNR_T - \overline{PL}, \quad (6.37)$$

και υποθέσουμε για απλότητα ότι $SNR_{TH} = 0$ dB, (πχ συνυπολογίζοντας την πραγματική τιμή κατωφλίου στις απώλειες διάδοσης), τότε η απαίτηση για ικανό σήμα στο δέκτη μετατρέπεται στην

$$X \geq -FM \quad (6.38)$$

Προκειμένου να μην αναφερόμαστε σε συγκεκριμένα χαρακτηριστικά εξοπλισμού παρουσιάζουμε τα αριθμητικά αποτελέσματα σε σχέση με το περιθώριο διάλειψης. Στην περίπτωση που ο δέκτης κινείται, υποθέτουμε τοπικά στασιμότητα για μια περιοχή ανάλογη με τη χωρική κλίμακα της σκίασης και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα ως συνάρτηση της διανυθείσας απόστασης για μια δεδομένη τροχιά με την υπόθεση μιας αρχικής τιμής του περιθωρίου διάλειψης. Στη συνέχεια και καθώς ο δέκτης κινείται το περιθώριο διάλειψης μεταβάλλεται ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο μοντέλο απωλειών διάδοσης.

6.4.1. Εφαρμογή σε Dual-Hop WLAN

Η πρώτη εφαρμογή αναφέρεται σε μια ζεύξη διπλού τμήματος (dual-hop) με αναγεννητικό αναμεταδότη ως μέρος ενός δικτύου πλέγματος (WMN, wireless mesh network) στα πρότυπα IEEE 802.11. Οι κόμβοι χαρακτηρίζονται ως A, B και C και

είναι τοποθετημένοι σε απόσταση d ανά δύο. Το σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται σε πυκνό εσωτερικό χώρο, όπως σε εμπορικό κέντρο ή αεροδρόμιο. Η μέση ταχύτητα των μετακινούμενων αντικειμένων έχει θεωρηθεί αυτή των πεζών, δηλαδή 1.5 m/s, ενώ η σταθερά απόσταση συσχέτισης της σκίασης έχει επιλεγεί 3 m, μια τυπική τιμή για εσωτερικούς χώρους. Οι ζεύξεις θεωρούνται εξισορροπημένες (balanced), δηλαδή έχουν το ίδιο περιθώριο διάλειψης. Προκειμένου να διαφανεί η εξάρτηση σε σχέση με το συντελεστή συσχέτισης της σκίασης έχουν υπολογισθεί οι τιμές για συγκεκριμένες τιμές του συντελεστή συσχέτισης, ωστόσο οποιοδήποτε συμβατό μοντέλο συσχέτισης της σκίασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δεδομένη γεωμετρία των ζεύξεων. Η μεταβολή του AOD σε σχέση με το περιθώριο διάλειψης φαίνεται για τους τρεις συντελεστές συσχέτισης φαίνεται στην Εικ. 44. Από τα αποτελέσματα διαφαίνεται μικρή επίδραση του συντελεστή συσχέτισης στη μέση διάρκεια διαλείψεων. Στην Εικ. 42 φαίνεται η σύγκριση της θεωρητικής τιμής της πιθανότητας διακοπής της ζεύξης για την περίπτωση δύο βημάτων (dualhop) σε σχέση με την παραγόμενη πιθανότητα διακοπής με χρήση του μοντέλου. Από την Εικ. 42 φαίνεται ότι το μοντέλο αναπαραγάγει τα στάσιμα χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης με ακρίβεια. Η απόδοση του μοντέλου στα στάσιμα χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης και συγκεκριμένα στη μέση διάρκεια διαλείψεων της ζεύξης δύο τμημάτων φαίνεται στην Εικ. 43. Η απόδοση είναι ιδιαίτερη ακριβής με μικρές αποκλίσεις να αρχίζουν να εμφανίζονται σε υψηλές τιμές περιθωρίων διάλειψης, λόγω μη σύγκλισης των αναπαραγόμενων στατιστικών παραμέτρων του δυναμικού μοντέλου, χωρίς ωστόσο να υποβαθμίζουν την ακρίβεια της προσομοίωσης.

6.4.2. Mobile WiMAX

Η δεύτερη αριθμητική εφαρμογή του μοντέλου αναφέρεται σε ένα κινητό δίκτυο WiMAX σε μια αστική περιοχή. Το σενάριο υποθέτει ένα κινητό σταθμό MS που κινείται από ένα σημείο A στο B διερχόμενο από το μέσον των δύο σταθμών βάσης BS1 και BS2. Η απόσταση μεταξύ των σταθμών βάσης είναι 4 km. Οι σταθμοί βάσης θεωρούνται ότι εκπέμπουν με ίδια χαρακτηριστικά. Το μοντέλο απωλειών διάδοσης που χρησιμοποιείται για τη μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος ανάλογα της απόστασης είναι το COST231-HATA. Η τοπική μεταβλητότητα έχει επιλεγεί 6 dB και η σταθερά απόστασης της συσχέτισης 10m. Η συχνότητα του συστήματος

είναι 3.5 GHz, ενώ ο χρήστης θεωρείται ότι κινείται με την τυπική τιμή ταχύτητας σε αστικές περιοχές των 4m/s.

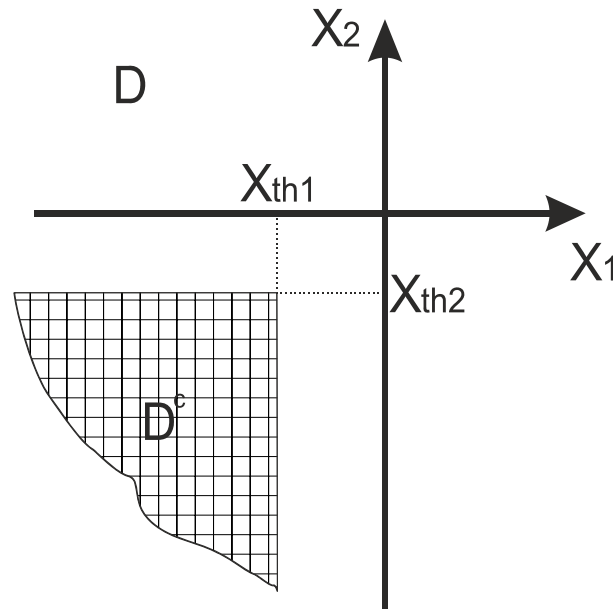
Στην Εικ. 47 απεικονίζεται η μεταβολή της θεωρητικής και της παραγόμενης με χρήση του μοντέλου πιθανότητας διακοπής στην περίπτωση διπλής διαφορικής λήψης από τους δύο σταθμούς βάσης σε σχέση με τη διανυθείσα απόσταση. Το δυναμικό μοντέλο αναπαραγάγει με ακρίβεια την πιθανότητα διακοπής στη διπλή διαφορική ζεύξη με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται όπως αναμενόταν στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο σταθμών βάσης. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τη μελέτη της θεωρητικής και παραγόμενης τιμής AOD που απεικονίζεται στην Εικ. 46. Το μοντέλο αναπαραγάγει τα θεωρητικά αποτελέσματα της μέσης διάρκειας διάλειψης με ιδιαίτερη ακρίβεια. Τέλος στην Εικ. 47 απεικονίζεται ο μέσος ρυθμός μεταπομπών του συστήματος. Ο ρυθμός μεταπομπών έχει υπολογιστεί με την υπόθεση ότι σε κάθε χρονική στιγμή ο δέκτης επιλέγει το ισχυρότερο σήμα. Έτσι το πρόβλημα ανάγεται σε ρυθμό τμήσης της διαγωνίου στο επίπεδο (X_1, X_2) όπου X_1, X_2 οι τιμές της σκίασης των δύο ζεύξεων, όταν όμως τα δύο σήματα έχουν την ίδια μέση τιμή. Διαφορετικά ο ρυθμός μεταπομπών υπολογίζεται ως ρυθμός τμήσης στάθμης μιας ευθείας παράλληλης στη διαγώνιο, που διέρχεται από τους άξονες στα σημεία $P1(\mu_2 - \mu_1, 0)$ και $P2(0, \mu_1 - \mu_2)$, όπου μ_1, μ_2 οι μέσες τιμές των σημάτων των δύο ζεύξεων, ίσες με το περιθώριο διάλειψης της (6.37). Ο ρυθμός μεταπομπών λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όπως αναμένεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ των δύο σταθμών βάσης.

6.5. Συμπεράσματα

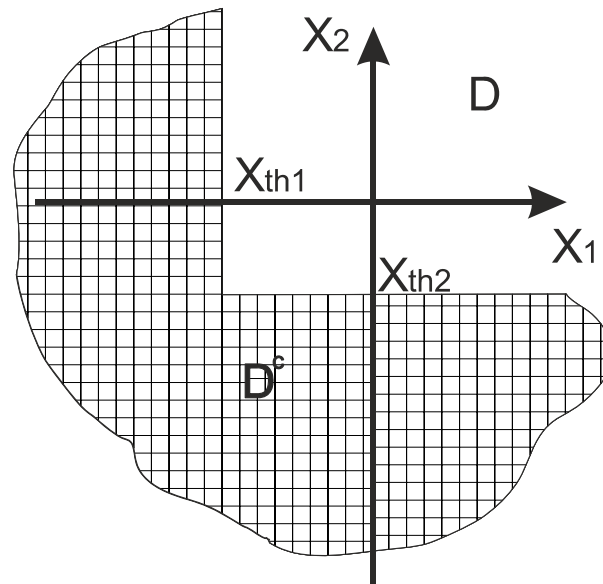
Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκε ένα νέο δυναμικό μοντέλο ικανό να αναπαραγάγει τόσο τη χωρική δομή της σκίασης, όσο και τη χρονική της εξέλιξη. Η κύρια υπόθεση του μοντέλου όπως έχει επιβεβαιωθεί από πειραματικά αποτελέσματα είναι η λογαριθμοκανονική κατανομή και η εκθετική συσχέτιση στο χρόνο. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτελεσματική σχεδίαση ασύρματων δικτύων παρέχοντας συσχετισμένες χρονοσειρές σκίασης καθώς και για τη βελτιστοποίηση και δοκιμή αλγόριθμων στο επίπεδο διαχείρισης του δικτύου.

Εφαρμογές του μοντέλου αποτελούν τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα, όπως κυψελωτά συστήματα, συστήματα MIMO, συστήματα διαφορικής προστασίας,

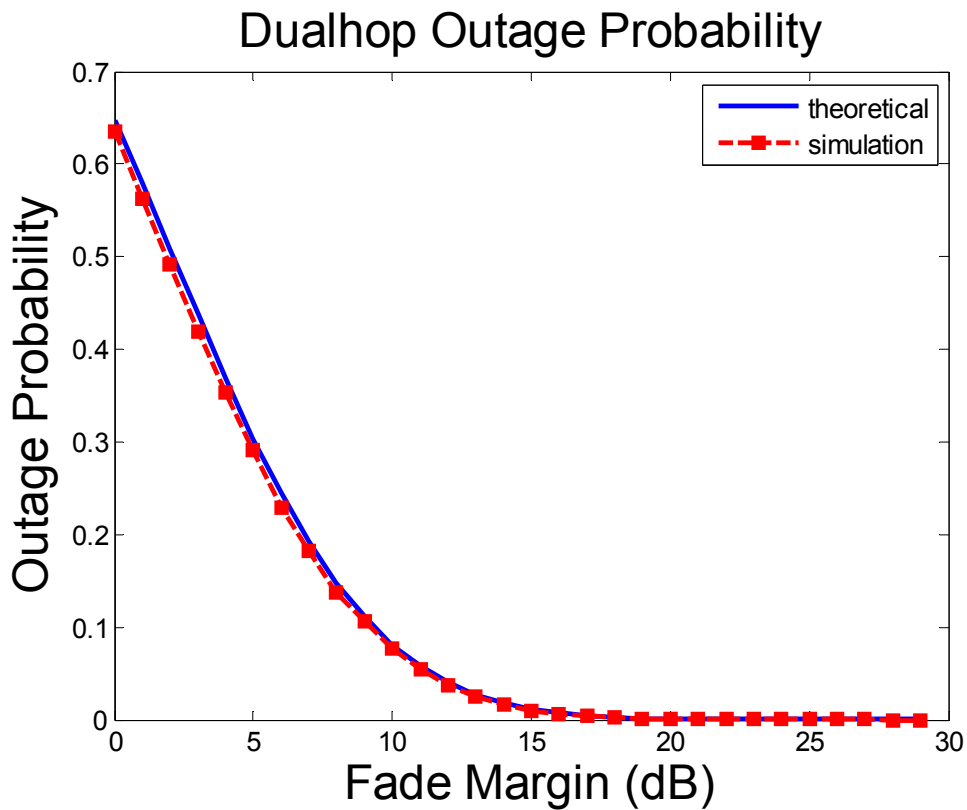
αυτοκαθοριζόμενα δίκτυα (ad-hoc), ζεύξεις πολλαπλών τμημάτων (multi-hop), collaborative cognitive radios, δίκτυα σώματος (body area) και κάθε άλλο πεδίο ασύρματης δικτύωσης όπου η συσχέτιση της σκίασης και η χρονική εξέλιξη επιφέρουν σημαντική επίδραση στην απόδοση του συστήματος.



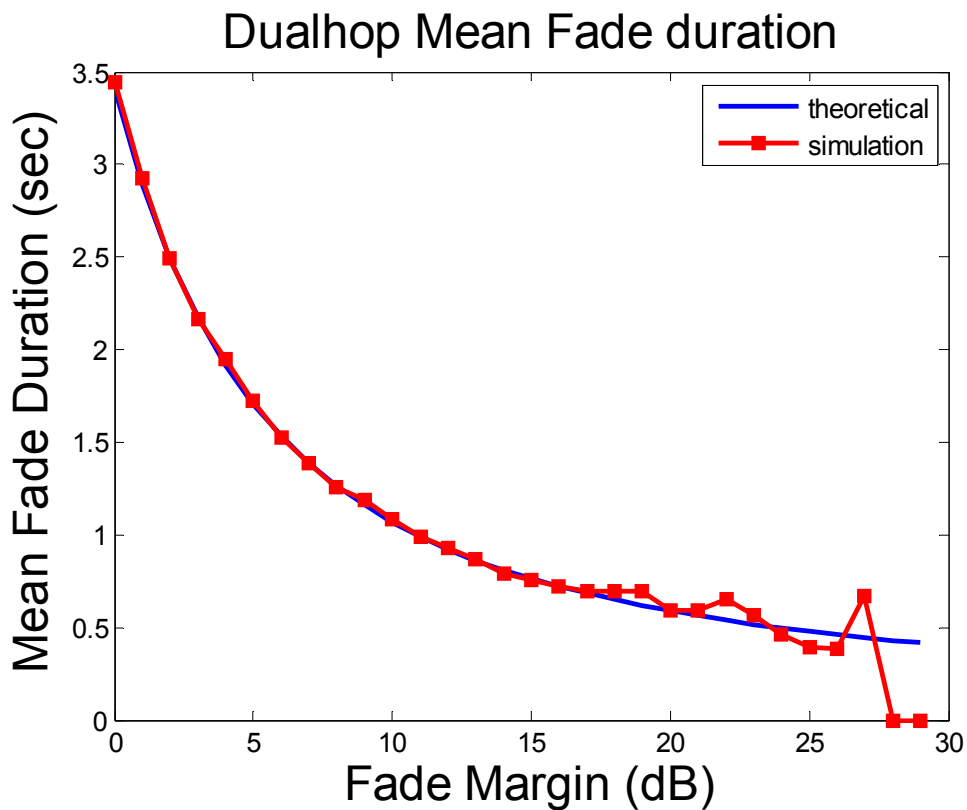
Εικ. 40 Γραμμοσκιασμένη περιοχή διακοπής λειτουργίας σε σύστημα διπλής διαφορικής προστασίας με τη μέθοδο SC.



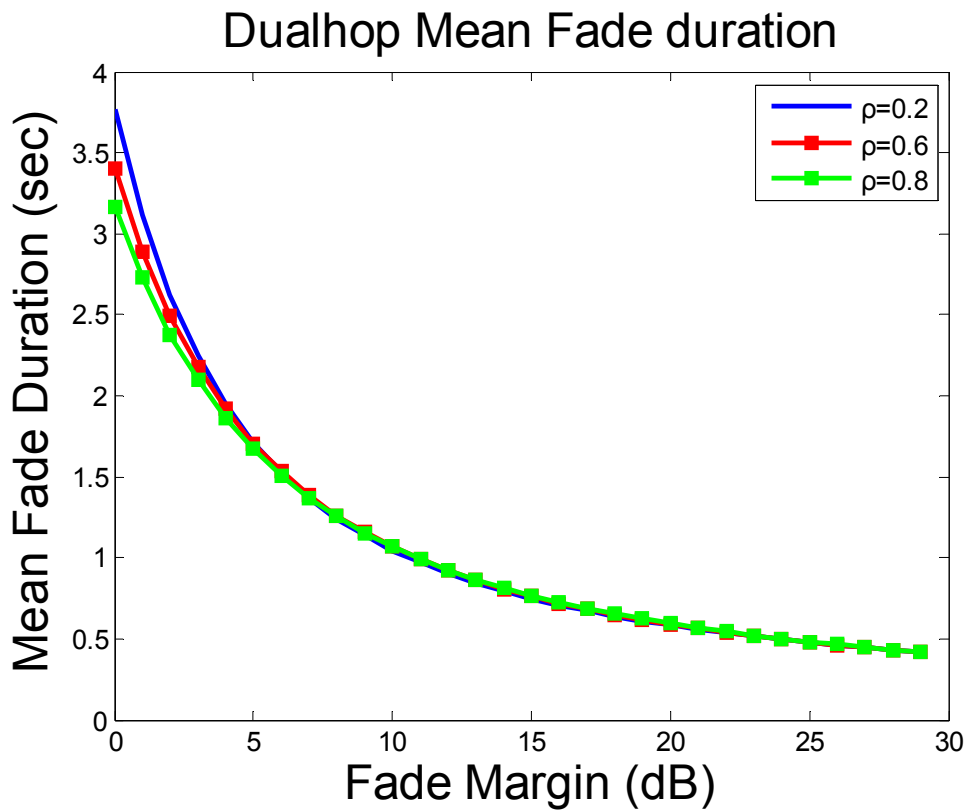
Εικ. 41 Γραμμοσκιασμένη περιοχή διακοπής λειτουργίας σε αναγεννητικό σύστημα αναμετάδοσης δύο βημάτων



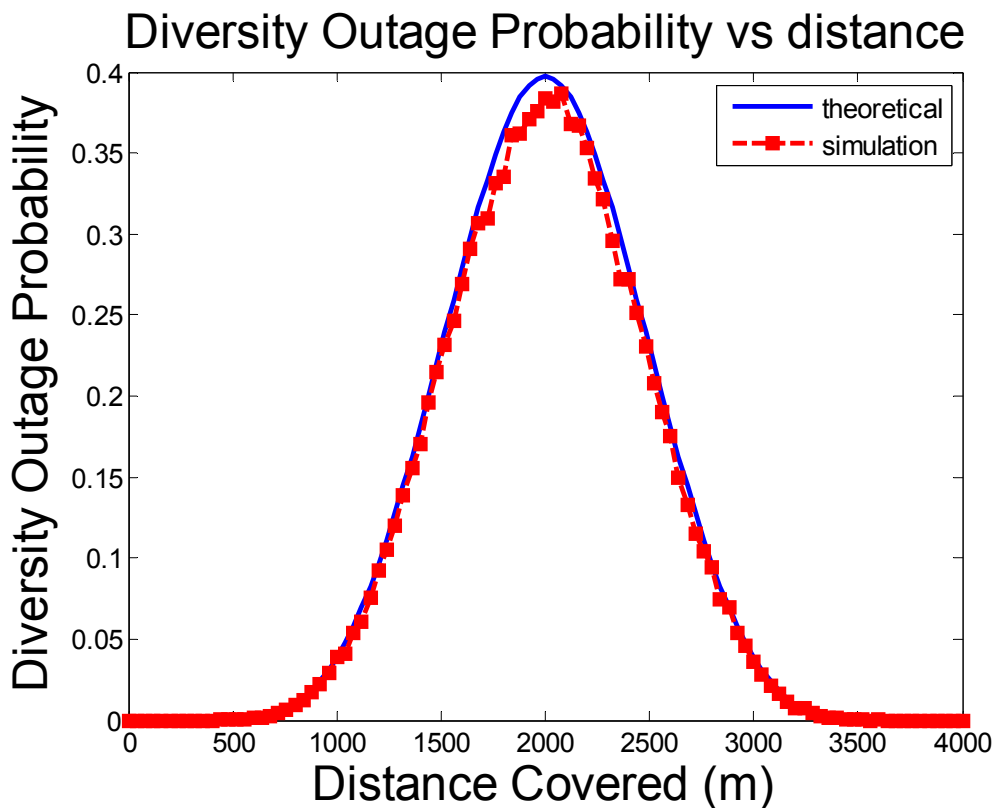
Εικ. 42 Θεωρητική και αναπαραγόμενη πιθανότητα διακοπής για ζεύξη δύο τμημάτων (dualhop)



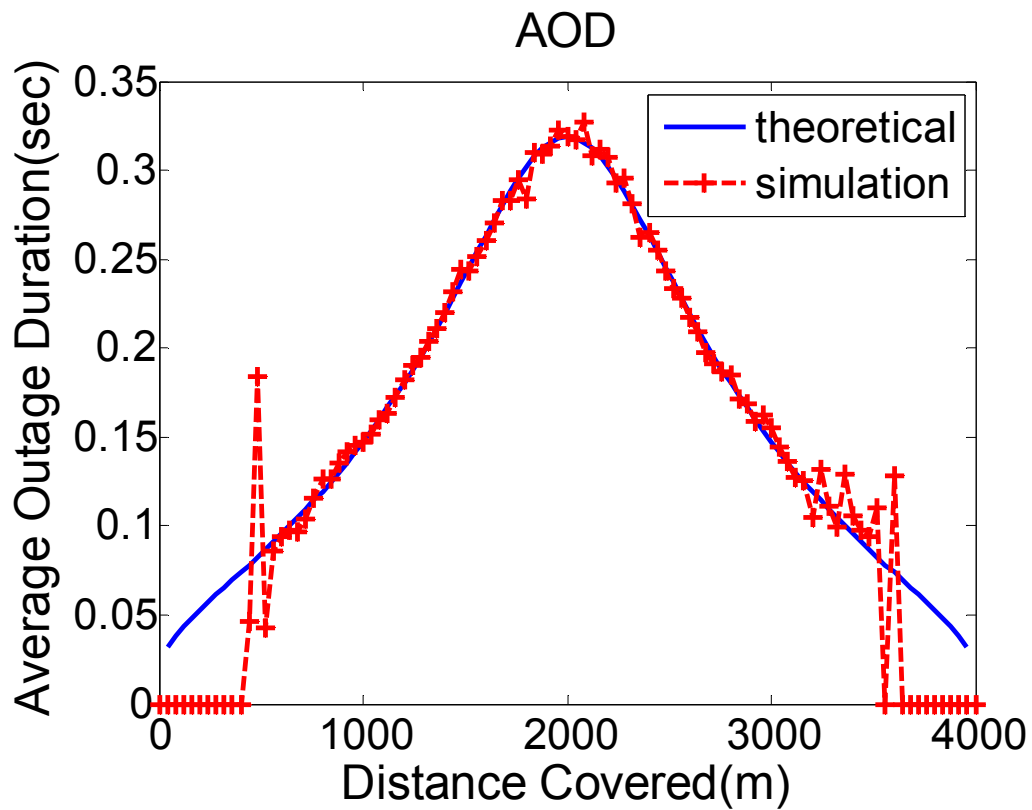
Εικ. 43 Θεωρητική και αναπαραγόμενη τιμή μέσης διάρκειας διάλειψης για ζεύξη δύο τμημάτων (dualhop)



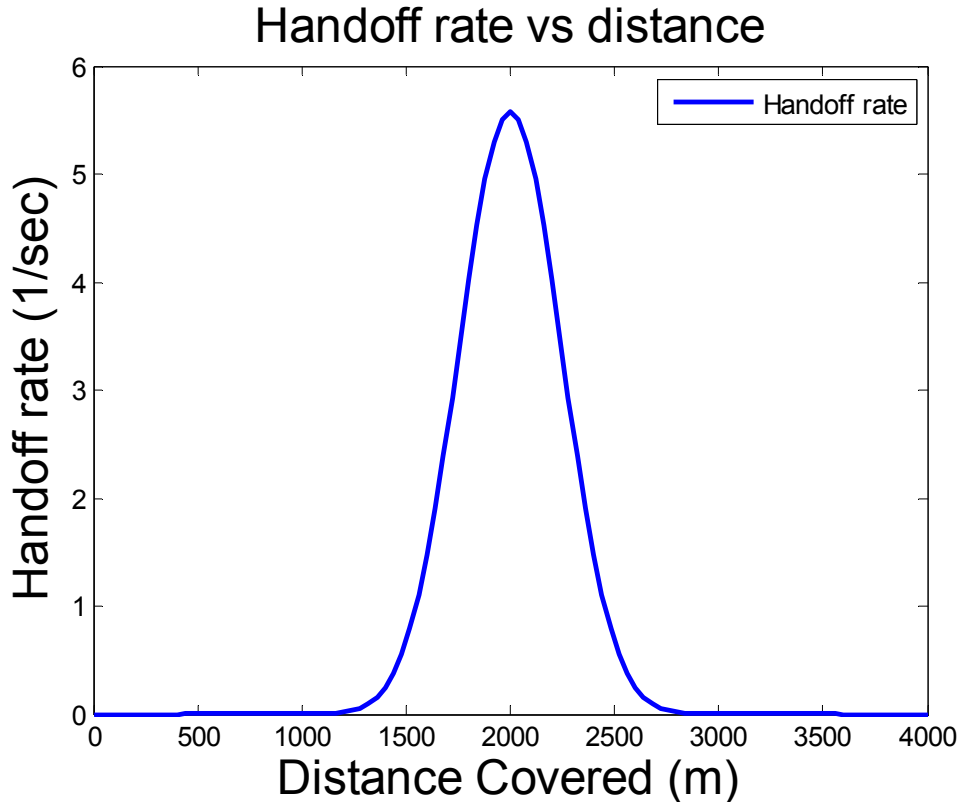
Εικ. 44 Εξάρτηση της μέσης διάρκειας διάλειψης για ζεύξη δύο τμημάτων (dualhop) για τρεις τιμές συσχέτισης της σκίασης.



Εικ. 45 Θεωρητική και παραγόμενη πιθανότητα διακοπής σε συνάρτηση της καλυφθείσας απόστασης



Εικ. 46 Θεωρητική και παραγόμενη τιμή της μέσης διάρκειας διάλειψης σε σχέση με την καλυφθείσα απόσταση.



Εικ. 47 Μέσος ρυθμός μεταπομπής για το σύστημα WiMAX

Κεφάλαιο 7.

Συμπεράσματα και Περαιτέρω Έρευνα

7.1. Συμπεράσματα

Τα στοχαστικά δυναμικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής καλύπτουν την ανάγκη της χωροχρονικής μοντελοποίησης του ασύρματου διαύλου σε ότι αφορά την απόσβεση λόγω βροχής και τη σκίαση. Μια τέτοια μοντελοποίηση στο χώρο και στο χρόνο καθίσταται πολύτιμη για την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων που παρέχει ο διάυλος με σκοπό την επίτευξη αξιόπιστων ζεύξεων υψηλής χωρητικότητας. Το μαθηματικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι οι στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις (ΣΔΕ), ένας σχετικά σύγχρονος κλάδος των μαθηματικών με πλούσιο θεωρητικό υπόβαθρο και σημαντικές εφαρμογές. Με τη χρήση των αναλυτικών μεθόδων που παρέχει η χρήση των ΣΔΕ υπολογίστηκαν διάφορες πολύτιμες παράμετροι.

Συγκεκριμένα στο Κεφ. 4 παρουσιάστηκε το πολυδιάστατο δυναμικό μοντέλο απόσβεσης λόγω βροχής σε πολλαπλές ζεύξεις. Περιγράφηκε η μέθοδος διακριτοποίησης του μοντέλου, ενώ παρουσιάστηκαν τα θεωρητικά αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης της πυκνότητας πιθανότητας της απόσβεσης. Τέλος παρουσιάστηκαν τα αριθμητικά αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου σε πραγματικά δεδομένα της βάσης δεδομένων της ITU για την περίπτωση διαφορικής λήψης 2, 3 και 4 κλάδων, καθώς και για την περίπτωση τροχιακής διαφορικής λήψης. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν πολύ καλή συμφωνία του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα σε ότι αφορά τα χαρακτηριστικά πρώτης τάξης.

Στο Κεφ. 5 παρουσιάστηκε ένα νέο δυναμικό μοντέλο της απόσβεσης λόγω βροχής με κλιμάκωση στη συχνότητα, προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι χρονικές διακυμάνσεις της απόσβεσης σε δύο διαφορετικές συχνότητες. Το μοντέλο καλύπτει ένα κενό στη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία καθώς δεν υφίσταται δυναμικό μοντέλο απόσβεσης με κλιμάκωση στη συχνότητα. Πρακτικές εφαρμογές του μοντέλου είναι ο έλεγχος της ισχύος της άνω ζεύξης σε δορυφορικά συστήματα με ανοιχτό βρόγχο ελέγχου. Παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις που πηγάζουν από τη μέθοδο και δίνονται αριθμητικά αποτελέσματα στα οποία διαφαίνεται η βελτίωση της απόδοσης του έλεγχου ισχύος.

Στο Κεφ. 6 παρουσιάστηκε ένα νέο δυναμικό μοντέλο για τη μοντελοποίηση του φαινομένου της σκίασης ικανό να αναπαραγάγει τόσο τη χρονική μεταβολή του φαινομένου, όσο και τη χωρική του συσχέτιση. Παρουσιάστηκαν επίσης με βάση το θεωρητικό πλαίσιο του μοντέλου νέα αναλυτικά αποτελέσματα που αφορούν το μέσο χρόνο διαλείψεων (AOD, Average Outage Duration) και το ρυθμό τμήσης στάθμης (LCR, Level Crossing Rate) με χρήση μεθόδων τμήσης στάθμης διανυσματικών ανελίξεων. Παρέχονται τέλος αριθμητικά αποτελέσματα που περιλαμβάνουν υπολογισμό της μέσης διάρκειας διαλείψεων αλλά και του ρυθμού μεταπομπής (hand-off), βασικές παραμέτρους σχεδίασης σύγχρονων κυψελωτών συστημάτων. Από τα αποτελέσματα της αριθμητικής εφαρμογής προέκυψε η ικανότητα του μοντέλου για αναπαραγωγή των στατιστικών χαρακτηριστικών δεύτερης τάξης και συγκεκριμένα της διάρκειας διαλείψεων και του μέσου ρυθμού τμήσης στάθμης. Επίσης διαφάνηκε η μικρή επίδραση του συντελεστή συσχέτισης της σκίασης στη μέση διάρκεια διαλείψεων.

7.2. Περαιτέρω Έρευνα

Η μεθόδευση που ακολουθήθηκε με τη μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής και της σκίασης με χρήση πολυδιάστατων ΣΔΕ άνοιξε το δρόμο για την έρευνα της χρήσης ΣΔΕ για τη μοντελοποίηση και άλλων κατηγοριών διαλείψεων, όπως είναι η πολυδιαδρομική διάδοση και οι σπινθηρισμοί. Ο συνδυασμός διαφορετικών διαλείψεων και η ενιαία μοντελοποίηση τους αποτελεί ένα ενδιαφέρον πεδίο πιθανής μελλοντικής έρευνας, καθώς υφίστανται κανάλια που ο συνδυασμός πολυδιαδρομικής διάδοσης, σκίασης και απόσβεσης λόγω βροχής καθορίζουν την απόδοσή τους, όπως τα κανάλια των κινητών δορυφορικών επικοινωνιών. Το θεωρητικό ανάλογο του προβλήματος αυτού αφορά τη μοντελοποίηση τυχαίων πεδίων με την επιθυμητή κατανομή και συσχέτιση μέσω συστήματος ΣΔΕ.

Ένας άλλος βασικός άξονας μελλοντικής έρευνας αφορά τη σύγκριση των μοντέλων με πειραματικά δεδομένα. Ενώ τα παρουσιασθέντα μοντέλα περικλείουν γνωστά στατιστικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη φαινομένων, όπως έχουν επιβεβαιωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία και έχουν επιπλέον ελεγχθεί πειραματικά συγκριτικά με τα στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτης τάξης, ωστόσο η επικύρωσή τους σε σχέση με τα στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης είναι αυτή που θα καταστήσει τα μοντέλα πλήρως αξιόπιστα. Έτσι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν χρήζουν περαιτέρω πειραματικής επιβεβαίωσης σε ότι αφορά τα στατιστικά

χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης, όπως η συσχέτιση, η φασματική πυκνότητα ισχύος και η διάρκεια των διαλείψεων.

Η θεωρητική επέκταση των αναπτυχθέντων μοντέλων σε χώρους άπειρης διάστασης αποτελεί ακόμη ένα ενδιαφέρον αντικείμενο έρευνας καθώς στην παρούσα μορφή τους αποτελούν συνεχή στο χρόνο μοντέλα με διακριτοποίηση στο χώρο. Η διακριτοποίηση στο χώρο πέραν της πρακτικής αξίας στους υπολογισμούς προσφέρει και την απαραίτητη απλότητα για την εξαγωγή πρακτικών αποτελεσμάτων. Ωστόσο τα αντίστοιχα συνεχή μοντέλα στο χωρο-χρόνο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πλήρη θεωρητική περιγραφή των τυχαίων πεδίων, αλλά και να βρουν χρήσιμες εφαρμογές στην περίπτωση των κινητών επικοινωνιών, όπου ο χρήστης κινείται διαρκώς στο χώρο. Η περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται με τα αναπτυχθέντα μοντέλα μέσω της ημι-στάσιμης κατάστασης, όπου θεωρούμε ότι για κάποιο χρονικό διάστημα ο χρήστης παραμένει σε περιοχή με σταθερά στατιστικά χαρακτηριστικά (βλ. Κεφ. 6 για τη σκίαση). Ωστόσο η επιλογή της βέλτιστης προσέγγισης μπορεί να γίνει μόνο μέσω της θεωρητικής μελέτης των εξισώσεων σε χώρους άπειρης διάστασης. Μια τέτοια προσέγγιση έχει επίσης σημασία σε ότι αφορά τα στατιστικά χαρακτηριστικά πρώτης τάξης που χρησιμοποιούνται για ένα κινητό χρήστη, δηλαδή κατά πόσο τροποποιούνται λόγω της κίνησής του, αλλά και στα στατιστικά χαρακτηριστικά δεύτερης τάξης, όπως η διάρκεια διαλείψεων. Επιπλέον μπορεί μέσω της απειροδιάστατης ανάλυσης να απαντηθεί το ερώτημα αν μπορεί ο ασύρματος διάυλος ενός κινητού χρήστη να προσεγγιστεί με μια μονοδιάστατη ΣΔΕ. Τέλος η χρήση απειροδιάστατων μοντέλων έρχεται σε αντιστοιχία με αντίστοιχα μοντέλα χρησιμοποιούμενα πχ στην υδρολογία για την ένταση της βροχόπτωσης. Ενδιαφέρον τότε παρουσιάζει η συσχέτιση των μοντέλων με βάση τις υποθέσεις για τα αναπαραγόμενα πεδία. Για παράδειγμα η υπόθεση Taylor που χρησιμοποιείται συχνά στην υδρολογία αλλά και σε μοντέλα πρόβλεψης της απόσβεσης αποτελεί μια προσέγγιση που δεν χρησιμοποιήθηκε στην μεθόδευση που ακολουθήθηκε.

Μια ακόμη κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα αποτελεί η βέλτιστη εξαγωγή των παραμέτρων των χρησιμοποιούμενων ΣΔΕ. Στα μοντέλα που παρουσιάστηκαν οι παράμετροι υπολογίστηκαν με κριτήριο την αναπαραγωγή των στάσιμων στατιστικών χαρακτηριστικών. Ωστόσο ένα δυναμικό φαινόμενο όπως η βροχόπτωση ακόμα και αν μακροπρόθεσμα τείνει σε μια στάσιμη κατανομή, εξελίσσεται σε διάφορες φάσεις, που μπορεί να αφορούν επεισόδια βροχόπτωσης μεγάλης έντασης, μικρής, περιόδους χωρίς βροχή κλπ. Η αντιμετώπιση των περιόδων αυτών με βάση τη

στάσιμη κατανομή αν και συμβάλλει στη μαθηματική πληρότητα, ενδέχεται να εξομαλύνει την ένταση ισχυρών φαινομένων και να ενισχύει αυτή των ασθενών, ανάλογα με τις θεωρούμενες τιμές σε βάθος χρόνου. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον λοιπόν παρουσιάζει η μελέτη του προσδιορισμού των παραμέτρων των ΣΔΕ με βάση την πρόσφατη ιστορία του φαινομένου. Μια τέτοια μεθόδευση θα έχει σημαντικές εφαρμογές στη σχεδίαση προσαρμοσμένων τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων. Η μαθηματική θεωρία της εκτίμησης των παραμέτρων των ΣΔΕ είναι πλούσια και περιλαμβάνει διάφορες πτυχές του προβλήματος, όπως μέσω διακριτών δειγμάτων ή με ελλείποντα δείγματα κλπ.

Οι ΣΔΕ περιγράφουν το υπό μελέτη φαινόμενο φαινομενολογικά [Primak et al., 2004], αγνοώντας τη φυσική του φαινομένου. Η προσέγγιση αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα χρήσιμη για τη στατιστική περιγραφή και την αναπαραγωγή του φαινομένου, απαλλαγμένη από την ανάγκη φυσικής προσέγγισης για μια διαδικασία με πιθανώς άγνωστους ή μη πλήρως γνωστούς μηχανισμούς. Ωστόσο γεννάει κάποια ερωτήματα σε ότι αφορά το βαθμό αναπαράστασης της πραγματικότητας και επιδέχεται περαιτέρω ανάλυση σε σχέση με τα πραγματικά φαινόμενα. Πρώτη έρχεται στο προσκήνιο η εγκυρότητα της Μαρκοβιανής υπόθεσης, η οποία εισάγεται εκ των πραγμάτων με τη χρήση των ΣΔΕ. Διάφορες εργασίες επιβεβαιώνουν μια τέτοια υπόθεση για το ρυθμό βροχόπτωσης, την απόσβεση λόγω βροχής και τη σκίαση, ωστόσο ο βαθμός προσέγγισης της πραγματικότητας τίθεται υπό εξέταση. Η εκθετική συσχέτιση των κανονικών Μαρκοβιανών ανεξίτητων που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνει μεγάλη ενέργεια στις υψηλές συχνότητες με αποτέλεσμα ο αναμενόμενος χρόνος μέχρι μια οποιαδήποτε τιμή με αφετηρία τη μετρηθείσα τιμή να είναι μηδενικός. Ωστόσο εμείς παρατηρούμε το φαινόμενο μέσω συσκευών με συγκεκριμένη απόκριση που δρουν ως φίλτρα και επιπλέον το αναπαραγάγουμε στους υπολογιστές μέσω διακριτής μοντελοποίησης, οπότε χρησιμοποιούμε μια εξ' ορισμού φιλτραρισμένη εκδοχή του. Είναι όμως το πραγματικό φαινόμενο ισοδύναμο με την αρχική υπόθεση Μαρκοβίαν ή στην ουσία πρόκειται για μια εκ των πραγμάτων φιλτραρισμένη διαδικασία ανεξάρτητα του τρόπου παρατήρησής της. Το ερώτημα γίνεται πιο ξεκάθαρο στην περίπτωση της σκίασης, όπου η μεταβολή της χαρακτηρίζεται από μια χωρική κλίμακα (ισοδύναμη χρονική για κινούμενο χρήστη) της τάξης των αρκετών δεκάδων μήκους κύματος. Όσο όμως περιορίζουμε το διάστημα διακριτοποίησης στη μοντελοποίηση θα παίρνουμε εκδοχές με διακυμάνσεις μεταξύ των δειγμάτων. Ενδιαφέρον λοιπόν παρουσιάζει η μελέτη των

φαινομένων ως διαδικασιών που προκύπτουν από φιλτράρισμα Μαρκοβιανών διαδικασιών. Αντίστοιχη προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί για την εξομάλυνση του φαινομένου με χρήση Μαρκοβιανής διαδικασίας δεύτερης τάξης από τον Manning [Manning, 1990] για την απόσβεση λόγω βροχής. Επίσης η χρήση του πεδίου της ειδικής απόσβεσης και ο υπολογισμός της απόσβεσης μέσω ολοκλήρωσης στο ραδιοβήμα αποτελεί μια τέτοια εξομάλυνση. Μάλιστα η μελέτη της απόσβεσης με αναπαράσταση του πεδίου της ειδικής απόσβεσης με τη μεθοδολογία της παρούσας διατριβής μπορεί να αποτελέσει και μια μέθοδο ελέγχου της προσέγγισης του Manning με χρήση δεύτερης τάξης Markov διαδικασίας. Η ίδια μεθόδευση της ολοκλήρωσης κατά μήκος του ραδιοβήματος ενός πεδίου έχει προταθεί και για το φαινόμενο της σκίασης. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η φιλτραρισμένη διαδικασία για τον υπολογισμό της διάρκειας των διαλείψεων.

Η διάρκεια των διαλείψεων αποτελεί μια κρίσιμη παράμετρο στη σχεδίαση των σύγχρονων συστημάτων. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος για τον υπολογισμό της διάρκειας των διαλείψεων με χρήση της μεθόδου τμήσης στάθμης διανυσματικής ανέλιξης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια φιλτραρισμένη διαδικασία. Η χρήση του φίλτρου επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα και η επιρροή αυτή έχει μελετηθεί σε ότι αφορά τη βροχόπτωση στο [Matricciani, 1982]. Αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον η επιλογή του κατάλληλου φίλτρου και η εύρεση των παραμέτρων του με σκοπό την ταύτιση των παραγόμενων αποτελεσμάτων των χρόνων διαλείψεων με πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον οι Μαρκοβιανές διαδικασίες χαρακτηρίζονται από τον χρόνο διακοπής. Ο χρόνος διακοπής ορίζεται ως η τυχαία μεταβλητή του χρονικού διαστήματος που θα χρειαστεί η ανέλιξη να τμήσει μια στάθμη με δεδομένη τη μετρηθείσα τιμή της. Παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η συσχέτιση του μέσου χρόνου διακοπής με τη μέση διάρκεια διαλείψεων. Η φιλτραρισμένη διαδικασία δεν είναι πλέον Markov, οπότε ο χρόνος διακοπής δεν μπορεί να υπολογιστεί με τον αναλυτικό τρόπο που υπολογίζεται για τις Μαρκοβιανές διαδικασίες. Ωστόσο μπορεί να προκύψει σε σχέση με την υπολογισθείσα παράμετρο της διάρκειας διάλειψης. Σε κάθε περίπτωση, είτε της αρχικής Μαρκοβιανής διαδικασίας, είτε της φιλτραρισμένης αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον η πρακτική χρήση του χρόνου διακοπής στη σχεδίαση προσαρμοσμένων τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων. Επιπλέον αντικείμενο μελέτης αφορά ο υπολογισμός του χρόνου διαλείψεων για κινούμενο χρήστη με χρήση προσέγγισης με μη στάσιμο μοντέλο, είτε με θεώρηση της κίνησής του στο

αναπαραγόμενο τυχαίο πεδίο με χρήση απειροδιάστατου μοντέλου. Στη διατριβή το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με χρήση της ημι-στάσιμης κατάστασης (βλ. Κεφ. 6)

Τέλος στο καθαρά τηλεπικοινωνιακό κομμάτι τα αναπτυχθέντα μοντέλα βρίσκουν ένα πλήθος εφαρμογών στον υπολογισμό χρήσιμων παραμέτρων για τη σχεδίαση σύγχρονων συστημάτων. Πιθανά πεδία εφαρμογής για τη μελέτη επιμέρους ζητημάτων σχεδίασης αποτελούν ο υπολογισμός του χρόνου διαλείψεων λόγω βροχής σε συστήματα διαφορικής λήψης, ο υπολογισμός του χρόνου διαλείψεων σε συστήματα με επεξεργασία και δρομολόγηση στο δορυφόρο, οπότε η δορυφορική ζεύξη αντιμετωπίζεται ως ζεύξη δύο τμημάτων. Ακόμη η μελέτη του κέρδους συνεργατικών δικτύων (cooperative) πολλαπλών τμημάτων (multihop) σε ότι αφορά την πιθανότητα διακοπής και τη διάρκεια διαλείψεων. Η σχεδίαση αλγόριθμου κατανομής πόρων σε δορυφορικά και κυψελωτά δίκτυα με βάση τα αναπτυχθέντα δυναμικά μοντέλα. Επίσης η δυναμική μελέτη της προσαρμογής της ζεύξης σε ένα δίκτυο DVB-RCS2 με βάση τη χωρο-χρονική εξέλιξη της απόσβεσης λόγω βροχής.

Στις επόμενες παραγράφους με τις οποίες ολοκληρώνεται η διατριβή παρατίθενται κάποια επιπλέον στοιχεία αναφορικά με τις κατευθύνσεις για περαιτέρω έρευνα που παρουσιάστηκαν.

7.3. Μοντέλα Άπειρης Διάστασης

Το σύστημα (4.12) μπορεί με παρόμοιο τρόπο να χρησιμοποιηθεί ως η βάση για την περιγραφή της χρονικής εξέλιξη του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης, είτε της ειδικής απόσβεσης σε n σημεία. Οι Maseng και Bakken στο [Maseng-Bakken, 1981] ανέφεραν ότι σε αντιστοιχία με το δυναμικό μοντέλο της απόσβεσης που παρουσίασαν μπορεί να περιγραφεί η σημειακή ένταση βροχόπτωσης, ενώ επισήμαναν το γεγονός ότι η σταθερά β που περιγράφει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του μοντέλου θα είναι υψηλότερη στην περίπτωση της προσομοίωσης της έντασης βροχόπτωσης σε σχέση με την τιμή της για την περίπτωση της απόσβεσης. Κάτι τέτοιο δικαιολογείται λογικά, λόγω της ολοκλήρωσης της ειδικής απόσβεσης κατά μήκος του ραδιοβήματος για τον υπολογισμό της απόσβεσης, κάτι που επιφέρει μια ομαλοποίηση στον τρόπο χρονικής μεταβολής της απόσβεσης σε σχέση με αυτόν της βροχόπτωσης.

Η ιδέα χρησιμοποιήθηκε από τον Manning στο [Manning, 1990] όπου πλέον αφετηρία του δυναμικού μοντέλου που παρουσιάστηκε ήταν η αναπαράσταση του ρυθμού βροχόπτωσης ως μια πρώτης τάξης στοχαστική διαδικασία Markov, που ικανοποιεί τη στοχαστική διαφορική εξίσωση

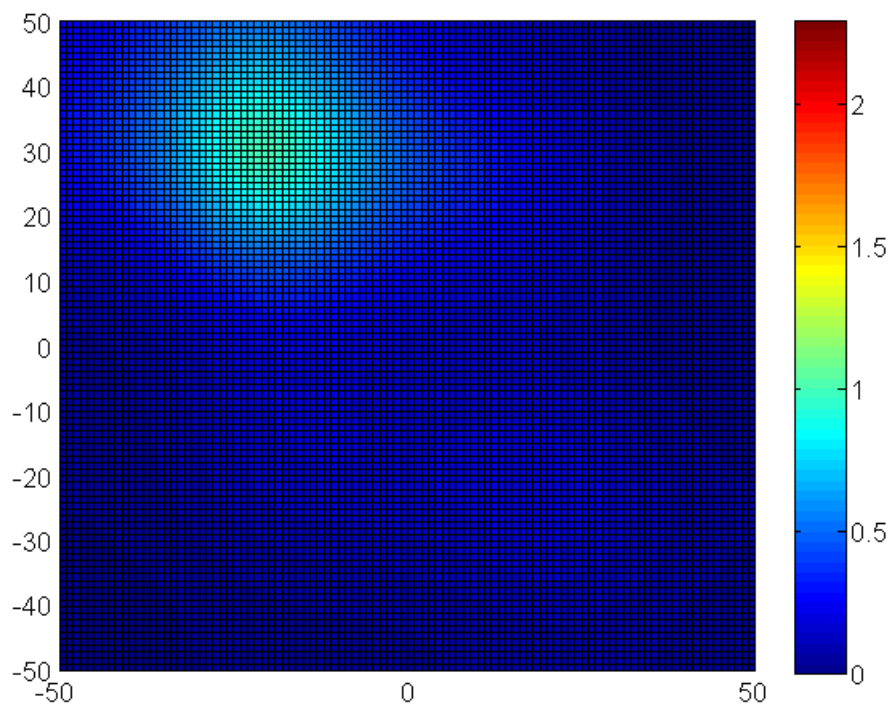
$$dR(t) = f(R, t) + g(R, t)dB_t \quad (7.1)$$

όπου dB_t η κίνηση Brown.

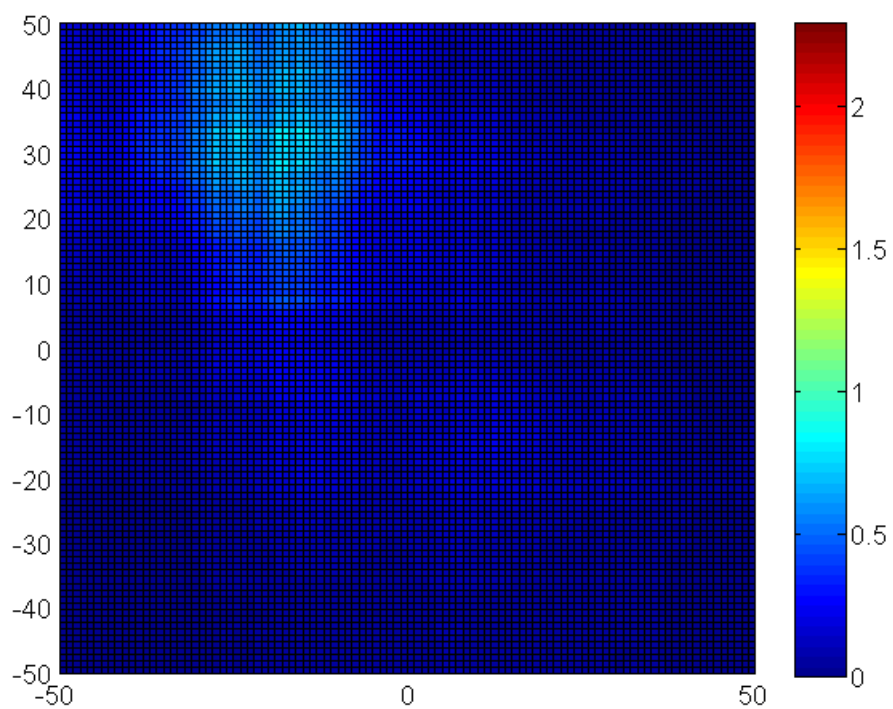
Στην περίπτωση του ρυθμού βροχόπτωσης R σε ένα σημείο αφού η τ.μ. $\ln R$ είναι στάσιμη κανονική με παραμέτρους $\ln R_m$ και $\sigma_{\ln R}$ τότε η τ.μ. $\ln(R(t)/R_m)/\sigma_{\ln R}$ είναι τυποποιημένη κανονική $N(0,1)$. Σε αντιστοιχία με το μοντέλο M-B επιλέγεται η $\ln(R(t)/R_m)\sigma_{\ln R}$ να μοντελοποιείται με την $dx = -\gamma xdt + \sqrt{2\gamma}dB_t$, όπου πλέον γ είναι η παράμετρος, που περιγράφει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του μοντέλου της βροχόπτωσης. Ο λογισμός Ito με δεδομένη την επιλογή $g^2(R, t) = 2\gamma R^2 \sigma_{\ln R}^2$ οδηγεί στην επιλογή $f(R, t) = R\gamma[\sigma_{\ln R}^2 - \ln(R/R_m)]$.

Η επέκταση του μοντέλου (7.1) σε n διαστάσεις είναι ακριβώς ανάλογη με αυτή που παρουσιάστηκε στο Κεφ. 4. Έτσι στο [Kourogiorgas et al., 2013] υπολογίστηκε η απόσβεση λόγω βροχής σε δορυφορικές ζεύξεις μέσω της προσομοίωσης του τυχαίου πεδίου της βροχόπτωσης με τη μέθοδο του Κεφ. 4 και εν συνεχεία την ολοκλήρωση επί του ραδιοβήματος της ειδικής απόσβεσης. Διάφορα στιγμιότυπα από το παραγόμενο τυχαίο πεδίο της βροχόπτωσης σε διαφορετικές στιγμές απεικονίζονται στις Εικ. 48, Εικ. 49.

Η μέθοδος αυτή της δυναμικής μοντελοποίησης του τυχαίου πεδίου της βροχόπτωσης στο χώρο φέρνει την προτεινόμενη μέθοδο του Κεφ. 4 σε άμεση αντιστοιχία με υφιστάμενα μοντέλα προσομοίωσης της βροχόπτωσης και γενικότερα τυχαίων πεδίων και δημιουργεί ερωτήματα που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Λόγω του ότι ο ρυθμός βροχόπτωσης αντιστοιχεί μονοσήμαντα σε μια τιμή ειδικής απόσβεσης και επιπλέον αν θεωρηθεί ότι ο ρυθμός βροχόπτωσης ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή, το ίδιο ισχύει και για την ειδική απόσβεση, στη συνέχεια αναφερόμαστε στο τυχαίο πεδίο της ειδικής απόσβεσης.



Εικ. 48 Απεικόνιση πεδίου βροχόπτωσης για $t=1\text{sec}$



Εικ. 49 Απεικόνιση πεδίου βροχόπτωσης για $t=1\text{min}$

Χρησιμοποιώντας για απλότητα το σύμβολο Γ για την ειδική απόσβεση η στοχαστική διαφορική εξίσωση σε ένα σημείο έχει την μορφή

$$dx_{\Gamma} = -\gamma x_{\Gamma} dt + \sqrt{2\gamma} dB_t, \text{ όπου } x_{\Gamma} = \ln(\Gamma(t) / \Gamma_m) / \sigma_{\ln\Gamma} \quad (7.2)$$

σε πλήρη αντιστοιχία με το μοντέλο M-B.

Με τη χρήση της n-διάστατης διαδικασίας Ornstein-Uhlenbeck όπως παρουσιάστηκε και με τη χρήση των κατάλληλων γραμμικών μετασχηματισμών μπορεί να επιλεγεί η ανέλιξη της ειδικής απόσβεσης $\mathbf{\Gamma}_t = [\Gamma_t^1, \dots, \Gamma_t^n]^T$ σε n σημεία να μοντελοποιηθεί με το σύστημα

$$d\mathbf{X}_t = \mathbf{B}\mathbf{X}_t dt + \mathbf{S}d\mathbf{W}_t \quad (7.3)$$

όπου $\mathbf{X}_t = [X_t^1, X_t^2, \dots, X_t^n]$ η n-διάστατη στοχαστική ανέλιξη, που προκύπτει από το μη γραμμικό μετασχηματισμό $X_t^i = \ln(\Gamma_t^i / \Gamma_{m_i})$ και \mathbf{S} ένας πίνακας συσχέτισης των ανεξάρτητων κινήσεων Brown $dW_t^i, i=1, \dots, n$ με $-\mathbf{S}\mathbf{S}^T = \mathbf{B}\mathbf{C} + \mathbf{C}\mathbf{B}^T$, όπου \mathbf{C} ο πίνακας συνδιακύμανσης των από κοινού κανονικών $X^i = \ln(\Gamma_i / \Gamma_{m_i})$.

Μάλιστα ο πίνακας \mathbf{S} μπορεί να επιλεγεί ως $\mathbf{S} = \mathbf{E}\mathbf{\Lambda}^{1/2}$, όπου \mathbf{E} ο ορθογώνιος πίνακας ιδιοδιανυσμάτων του πραγματικού, συμμετρικού πίνακα $\mathbf{G} = -(\mathbf{B}\mathbf{C} + \mathbf{C}\mathbf{B}^T)$ και $\mathbf{\Lambda} = \mathbf{E}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{E}$ ο διαγώνιος πίνακας με στοιχεία τις ιδιοτιμές του \mathbf{G} , είτε με ανάλυση Cholesky.

Η λύση του συστήματος σε σχέση και με την (4.20) δίνεται από την

$$\mathbf{X}_t = e^{t\mathbf{B}} \cdot \mathbf{X}_0 + e^{t\mathbf{B}} \cdot \int_0^t e^{-s\mathbf{B}} \cdot \mathbf{S} \cdot d\mathbf{W}_s \quad (7.4)$$

Στην περίπτωση αυτή όμως της αναπαράστασης του τυχαίου πεδίου της ειδικής απόσβεσης η διάσταση n του συστήματος είναι τα n σημεία του χώρου και όχι οι n ζεύξεις. Πρόκειται δηλαδή για τη χωρική διακριτοποίηση του τυχαίου πεδίου. Στο [Kourogiorgas et al., 2013] η ολοκλήρωση της ειδικής απόσβεσης έγινε με αριθμητική ολοκλήρωση των τιμών της ειδικής απόσβεσης στα σημεία που βρίσκονταν κατά μήκος του ραδιοβήματος. Το συνεχές ωστόσο μοντέλο στο χώρο αποκτά ιδιαίτερο θεωρητικό ενδιαφέρον στην περίπτωση κινούμενων χρηστών, αλλά και σε σχέση με άλλα χωρο-χρονικά μοντέλα αναπαράστασης της ειδικής απόσβεσης ή της βροχόπτωσης. Το σημαντικότερο πρόβλημα που προκύπτει είναι πλέον η άπειρη διάσταση του μοντέλου. Ωστόσο η γενίκευση του διακριτού μοντέλου των n σημείων της (7.3) ως προς τη χωρική μεταβλητή στην περίπτωση του συνεχούς στο

χώρο τυχαίου πεδίου της ειδικής απόσβεσης, μπορεί να προκύψει με την συλλογιστική που αναπτύσσεται στη συνέχεια, όπου παραμερίζουμε προς το παρόν την ανάγκη μαθηματικής αυστηρότητας προς όφελος της κατανόησης των εννοιών.

Για την κίνηση Brown ή διαδικασία Wiener σε μια διάσταση εύκολα αποδεικνύεται ότι ισχύει $Cov(W_s, W_t) = \min\{s, t\}$, ενώ ο μαθηματικός ορισμός της προβλέπει ότι η τυχαία μεταβλητή $W_t - W_s$ ακολουθεί κανονική κατανομή $N(0, t-s)$ για κάθε $0 \leq s < t$. Ενώ ο λευκός θόρυβος $\xi(t)$ δεν μπορεί να οριστεί μαθηματικά παρά ως γενικευμένη στοχαστική ανέλιξη, εντούτοις φορμαλιστικά μπορεί να θεωρηθεί ως η παράγωγος της κίνησης Brown, οπότε αυτή δίνεται από $dB_t = \xi(t)dt$. Η $\xi(t)$ είναι για κάθε t κανονική τυχαία μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και άπειρη διακύμανση.

Η n -διάστατη κίνηση Brown ορίζεται αντίστοιχα και ισχύει ότι για $0 \leq s < t$ η διανυσματική τυχαία μεταβλητή $\mathbf{W}_t - \mathbf{W}_s$ ακολουθεί κανονική κατανομή $N(\mathbf{0}, (t-s)\mathbf{I}_n)$, απ' όπου φαίνεται ότι οι συνιστώσες της αποτελούν ανεξάρτητες μονοδιάστατες κινήσεις Brown. Μπορεί δηλαδή να παρασταθεί ως $\mathbf{W}_t = [W_t^1, \dots, W_t^n]^T$ με τις W_t^i μονοδιάστατες κινήσεις Brown. Κατά παρόμοιο τρόπο μπορεί η διανυσματική ανέλιξη $\xi(t) = [\xi_t^1, \dots, \xi_t^n]^T$ να θεωρηθεί ως ο n -διάστατος λευκός θόρυβος και ισχύει πάλι ότι $d\mathbf{W}_t = \xi(t)dt$ ή κατά συνιστώσα $dW_t^i = \xi_t^i dt$. Μάλιστα συμβολίζοντας $\xi_t^i = \xi(i, t)$, ο θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ως μια στοχαστική διαδικασία δύο παραμέτρων, του χρόνου t και του δείκτη i που λαμβάνει τιμές από ένα πεπερασμένο σύνολο $I = \{1, 2, \dots, n\}$. Λαμβάνοντας υπόψη και τη χρονική ανεξαρτησία η συνάρτηση συνδιακύμανσης της ξ είναι $C(i, t, j, t') = \delta_{ij} \delta(t-t')$, όπου δ_{ij} η συνάρτηση δέλτα του Kronecker και $\delta(t)$ η συνάρτηση δέλτα του Dirac.

Προκειμένου να εξαχθεί το συνεχές μοντέλο, δηλαδή αυτό που σε κάθε $x \in D$, όπου D ένας τόπος του R^n αντιστοιχεί μια κίνηση Brown γράφουμε αρχικά το σύστημα (7.3) ως ένα σύστημα n εξισώσεων

$$dX_t^i = -\gamma X_t^i dt + \sum_{j=1}^n S_{ij} dW_t^j \quad (7.5)$$

Θεωρώντας τώρα την εξίσωση αυτή σε κάθε σημείο του χώρου x προκειμένου να καταλήξουμε στο συνεχές ως προς το χώρο στοχαστικό μοντέλο,

αντικαθιστούμε το δείκτη i με το άνωσμα θέσης \mathbf{x} , δηλαδή θέτουμε $X_i^i = X_i(\mathbf{x}) = X(t, \mathbf{x})$. Προκύπτει ότι το τυχαίο διάνυσμα $d\mathbf{W}_i$ μετατρέπεται από μια τυχαία μεταβλητή με τιμές στο R^n σε μια τυχαία μεταβλητή με τιμές σε έναν απειροδιάστατο χώρο, όπου σε κάθε \mathbf{x} αντιστοιχεί μια συνιστώσα τυχαία μεταβλητή. Αντίστοιχα το $\xi(\mathbf{x}, t)$ αντιστοιχεί σε κάθε χρονική στιγμή στο τυχαίο πεδίο του λευκού θορύβου. Έτσι ο γραμμικός μετασχηματισμός \mathbf{S} θα είναι πλέον ένας γραμμικός τελεστής S σε έναν κατάλληλο χώρο τυχαίων πεδίων. Στην απλή περίπτωση που μας ενδιαφέρει διαισθητικά από τη μορφή του αθροίσματος προκύπτει ότι ο γραμμικός μετασχηματισμός S μπορεί να είναι ένας ολοκληρωτικός μετασχηματισμός $(S\varphi)(x) = \int_D s(x, y)\varphi(y)dy$ με το ολοκλήρωμα να νοείται με τη μέση τετραγωνική έννοια. Έτσι το σύστημα (7.5) θα έχει τη μορφή

$$dX(t, \mathbf{x}) = -\gamma(\mathbf{x})X(t, \mathbf{x})dt + (S\xi_t)(\mathbf{x})dt \quad (7.6)$$

Ωστόσο το μετασχηματισμένο τυχαίο πεδίο θα πρέπει να έχει την επιθυμητή χωρική συσχέτιση. Η συσχέτιση αυτή θα πρέπει να συσχετιστεί με τη στάσιμη χωρική συσχέτιση του πεδίου που προσομοιώνουμε. Επιθυμητή λοιπόν είναι η αναζήτηση του κατάλληλου ολοκληρωτικού μετασχηματισμού που θα δώσει τη ζητούμενη χωρική συσχέτιση, δηλαδή τη δεδομένη συνάρτηση συνδιακύμανσης, όταν εφαρμοστεί σε κάθε στιγμιότυπο του τυχαίου πεδίου.

Αν $X(\mathbf{x})$ είναι ένα τυχαίο πεδίο με συνάρτηση συνδιακύμανσης $C_{in}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, τότε η συνάρτηση συνδιακύμανσής $G(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ (εξ' ορισμού συμμετρική, δηλαδή $G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = G(\mathbf{y}, \mathbf{x})$) του τυχαίου πεδίου $(SX)(\mathbf{x}) = \int_D s(\mathbf{x}, \mathbf{y})X(\mathbf{y})d\mathbf{y}$ (μέση τετραγωνική έννοια) δίνεται ως γνωστό από την

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \int_D \int_D s(\mathbf{z}, \mathbf{x})s(\mathbf{w}, \mathbf{y})C_{in}(\mathbf{z}, \mathbf{w})d\mathbf{z}d\mathbf{w} \quad (7.7)$$

Θεωρώντας φεραλιστικά ότι ο μετασχηματισμός εφαρμόζεται στο τυχαίο πεδίο του λευκού θορύβου έχουμε ότι $C_{in}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{y})$. Τότε το δεξιό μέλος της (7.7) γίνεται

$$\begin{aligned} \int_D \int_D s(\mathbf{z}, \mathbf{x})s(\mathbf{w}, \mathbf{y})\delta(\mathbf{z} - \mathbf{w})d\mathbf{z}d\mathbf{w} &= \int_D s(\mathbf{z}, \mathbf{x}) \left[\int_D s(\mathbf{w}, \mathbf{y})\delta(\mathbf{z} - \mathbf{w})d\mathbf{w} \right] d\mathbf{z} \\ &= \int_D s(\mathbf{z}, \mathbf{x})s(\mathbf{z}, \mathbf{y})d\mathbf{z} \end{aligned} \quad (7.8)$$

οπότε αναζητούμε τον ολοκληρωτικό μετασχηματισμό S με πυρήνα της συνάρτησης $s(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ώστε

$$\int_D s(\mathbf{x}, \mathbf{z})s(\mathbf{z}, \mathbf{y})d\mathbf{z} = G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (7.9)$$

Ως γνωστό αν $k(x, \xi)$ είναι ο πυρήνας ενός ολοκληρωτικού μετασχηματισμού K , τότε ο K^2 είναι επίσης ολοκληρωτικός μετασχηματισμός με πυρήνα $k_2(x, \xi) = \int_D k(x, \xi_1)k(\xi_1, \xi)d\xi_1$. Επομένως με την παρατήρηση αυτή ζητείται ο ολοκληρωτικός μετασχηματισμός, που το τετράγωνό του δίνει το μετασχηματισμό με πυρήνα τη συνάρτηση συνδιακύμανσης $G(\mathbf{x}, \mathbf{y})$.

Παρατηρούμε ότι αν επιλύσουμε την ολοκληρωτική εξίσωση

$$\int_D s(\mathbf{x}, \mathbf{y})f_k(\mathbf{y})d\mathbf{y} = \lambda_k f_k(\mathbf{x}) \quad (7.10)$$

που αποτελεί ένα πρόβλημα ιδιοτιμών για τον ολοκληρωτικό τελεστή S με πυρήνα τη συνάρτηση $s(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, προκύπτει ένα σύνολο ιδιοσυναρτήσεων $f_k(\mathbf{x})$, μια για κάθε ιδιοτιμή λ_k , οι οποίες επιπλέον αποτελούν ένα ορθοκανονικό σύνολο, αφού ο πυρήνας $s(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ως συνάρτηση συνδιακύμανσης είναι φραγμένος, συμμετρικός και θετικά ορισμένος. Επιπλέον η $G(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ θα εκφράζεται ως

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k f_k(\mathbf{x})f_k(\mathbf{y}) \quad (7.11)$$

Με τη βοήθεια της έκφρασης (7.11) βλέπουμε ότι αν επιλεγεί ο ολοκληρωτικός μετασχηματισμός S με πυρήνα $s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(\mathbf{x})f_i(\mathbf{y})$ τότε επαληθεύεται η (7.9).

Η αντιστοιχία με τη n - διάστατη περίπτωση είναι προφανής αφού εκεί ο ζητούμενος μετασχηματισμός ήταν ο πίνακας $\mathbf{S} = \mathbf{E}\mathbf{\Lambda}^{1/2}$, όπου \mathbf{E} ο ορθογώνιος πίνακας ιδιοδιανυσμάτων του πραγματικού, συμμετρικού πίνακα $\mathbf{G} = -(\mathbf{B}\mathbf{C} + \mathbf{C}\mathbf{B}^T)$ και $\mathbf{\Lambda} = \mathbf{E}^{-1}\mathbf{C}\mathbf{E}$ ο διαγώνιος πίνακας με στοιχεία τις ιδιοτιμές του \mathbf{G} .

Σε αντιστοιχία με τη σχέση $dW_t = \xi_t dt$, μπορεί να οριστεί το τυχαίο πεδίο $W^G(t, \mathbf{x})$, δηλαδή η στοχαστική διαδικασία με τιμές στον απειροδιάστατο χώρο των συναρτήσεων της χωρικής παραμέτρου \mathbf{x} , ως $dW_t^G = (S\xi_t)dt = S(dW_t)$. Η

διαδικασία W_t^G ονομάζεται επίσης διαδικασία Wiener, αλλά χαρακτηρίζεται από την επιθυμητή χωρική συσχέτιση με πυρήνα $G(\mathbf{x}, \mathbf{y})$.

Προχωρώντας ευριστικά ένα βήμα παραπέρα, αν εφαρμόσουμε τη σχέση του ολοκληρωτικού μετασχηματισμού S προκύπτει ότι

$$\begin{aligned} dW_t^G &= (SdW_t)(\mathbf{x}) = \int_D s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dW_t(\mathbf{y}) dy = dt \int_D s(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \xi_t(\mathbf{y}) dy \\ &= dt \int_D \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(\mathbf{x}) f_i(\mathbf{y}) \xi_t(\mathbf{y}) dy = dt \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(\mathbf{x}) \int_D f_i(\mathbf{y}) \xi_t(\mathbf{y}) dy \\ &= dt \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(\mathbf{x}) \xi_t^i = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(\mathbf{x}) dW_t^i \end{aligned} \quad (7.12)$$

Καταλήξαμε δηλαδή ευριστικά στη σχέση

$$W^G(\mathbf{x}, t, \omega) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{\lambda_i} f_i(\mathbf{x}) W_i(t, \omega) \quad (7.13)$$

που δεν είναι άλλη από την ανάπτυξη Karhunen-Loeve της διαδικασίας Wiener στο χώρο και στο χρόνο, η οποία έχει χωρική συσχέτιση $G(\mathbf{x}, \mathbf{y})$.

Η προηγούμενη ευριστική ανάλυση για την ανέλιξη G-Wiener θεμελιώνεται μαθηματικά [Chow, 2007]. Ωστόσο θα πρέπει να βρεθεί η σχέση μεταξύ της στάσιμης συσχέτισης $C(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ του αναπαραγόμενου τυχαίου πεδίου με τη συσχέτιση $G(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ της διαδικασίας G-Wiener. Η εξίσωση (7.6) που αναπαριστά το πεδίο, αν θεωρήσουμε τον τελεστή B με $(Bf)(\mathbf{x}) = -\gamma(\mathbf{x})f(\mathbf{x})$, παίρνει τη μορφή

$$dX_t(\mathbf{x}) = (B X_t)(\mathbf{x}) dt + (SdW_t)(\mathbf{x}) \quad (7.14)$$

Η εξίσωση (7.14) αποτελεί μια στοχαστική εξελικτική (evolutionary) διαδικασία. Θεωρώντας ένα χώρο πιθανότητας και το χώρο Hilbert H των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων συναρτήσεων σε κάποιο χωρίο του R^2 (που περικλείει την περιοχή ενδιαφέροντος) τότε η X_t είναι μια στοχαστική ανέλιξη σε απειροδιάστατο χώρο, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή t η τιμή της είναι μια τυχαία μεταβλητή με τιμές στο χώρο. Επίσης οι B, S είναι τελεστές στο χώρο H . Η θεωρία των εξισώσεων της μορφής μπορεί να βρεθεί στα [Da Prato-Zabczyk, 1992], [Da Prato, 2006], [Chow, 2007]. Αποδεικνύεται ότι η λύση της εξίσωσης δίνεται από τη σχέση

$$X_t = e^{tB} X_0 + \int_0^t e^{(t-s)B} \cdot SdW_s \quad (7.15)$$

με την κατάλληλη ερμηνεία των εμφανιζόμενων τελεστών. Επίσης ότι υπάρχει στάσιμη κανονική κατανομή της λύσης στο χώρο H με τελεστή συνδιακύμανσης, έστω Q_∞ , ο οποίος ικανοποιεί την εξίσωση Lyapunov $-G = Q_\infty B^* + B Q_\infty$ σε πλήρη αντιστοιχία με τη n -διάστατη περίπτωση.

Επανερχόμενοι τώρα στο αρχικό πρόβλημα της αναπαράστασης του τυχαίου πεδίου της ειδικής απόσβεσης $\Gamma(\mathbf{x}, t, \omega)$, βλέπουμε με βάση τα προηγούμενα ότι η ειδική απόσβεση μπορεί να παρασταθεί ως η ανέλιξη, που προκύπτει από το μη γραμμικό μετασχηματισμό $\Gamma_i(\mathbf{x}) = \Gamma_m e^{X_i(\mathbf{x})}$, όπου $X_i(\mathbf{x})$ η ανέλιξη που προκύπτει ως η λύση (7.15) της απειροδιάστατης στοχαστικής διαφορικής εξίσωσης (7.14). Με παρόμοιο τρόπο αναπαράγεται το τυχαίο πεδίο της βροχόπτωσης στην περίπτωση που ζητούμενη είναι η αναπαράσταση της βροχόπτωσης.

Από τα ανωτέρω το πρώτο και σημαντικό ερώτημα που προκύπτει είναι μαθηματικής φύσεως και αφορά την αυστηρή μαθηματική διατύπωση των όσων ευριστικά αναφέρθηκαν, καθώς και τον έλεγχο των προϋποθέσεων που απαιτούνται για τη φύση των τελεστών και των χώρων συναρτήσεων. Η απάντηση στα ερωτήματα αυτά μπορεί να προκύψει με προσεκτική μελέτη της σχετικής θεωρίας σε σχέση πάντα με το υπό μελέτη πρόβλημα. Επίσης η συγκεκριμένη επιλογή του τελεστή B ως γινόμενο με το χωρικά εξαρτώμενο συντελεστή $-\gamma(\mathbf{x})$ (ή $-b(\mathbf{x})$ στην περίπτωση της βροχόπτωσης) θέτει ερωτήματα ως προς τη φύση της δυναμικής αυτής παραμέτρου σε σχέση με το συνολικά αναπαριστώμενο πεδίο. Ενώ στη n -διάστατη περίπτωση η επιλογή αυτή διευκολύνει την ανάλυση, στην περίπτωση του απειροδιάστατου μοντέλου τα ερωτηματικά που προκύπτουν είναι που οφείλεται η μεταβολή αυτή και αν είναι φυσικά υλοποιήσιμη. Για παράδειγμα στη μοντελοποίηση της έντασης βροχόπτωσης η μεταβολή που επάγεται από τον τελεστή B οφείλεται σε χρονική διακύμανση του ίδιου του φαινομένου της βροχής ή σε κίνηση μετώπου ή και στα δύο; Σημαντικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση είναι οι έννοιες του συστήματος Euler και του συστήματος Lagrange. Το σύστημα Euler είναι ένα σύστημα αναφοράς σταθερό ως προς το έδαφος. Έτσι η χρονική μεταβολή του μεγέθους $X_i(\mathbf{x})$ της (7.15) ως λύση της (7.14) αναφέρεται στο σταθερό σημείο \mathbf{x} στο έδαφος. Το σύστημα Lagrange αναφέρεται σε ένα σύστημα αναφοράς σταθερό ως προς κάποιο σύστημα το οποίο όμως κινείται ως προς το έδαφος. Τα συστήματα αυτά έχουν προκύψει από τη ρευστοδυναμική όπου η περιγραφή μπορεί να αναφέρεται σε σημείο ή σε σωματίδιο του ρευστού. Αν υποθέσουμε ότι η ΣΔΕ (7.14)

αναφέρεται στη μεταβολή του συστήματος της βροχής και μόνο χωρίς να συμπεριλάβουμε υπόψη οποιαδήποτε κίνηση τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι αντιστοιχεί σε ένα σύστημα Lagrange. Ονομάζουμε για την περίπτωση αυτή τον τελεστή B ως B' . Θεωρώντας τώρα ότι το μέτωπο κινείται με μια ταχύτητα \mathbf{V} και εξετάσουμε τη χρονική μεταβολή $D()/Dt$ ως προς ένα σημείο στο σύστημα Euler τότε αυτή θα σχετίζεται με τη χρονική μεταβολή $D()/Dt = \partial()/\partial t$ ως προς ένα σημείο του συστήματος Lagrange με τη σχέση

$$\frac{D()}{Dt} = \frac{\partial()}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla() \quad (7.16)$$

Επομένως η ΣΔΕ (7.14) παίρνει τη μορφή

$$dX_i(\mathbf{x}) = ((B' - \mathbf{V}\nabla) X_i)(\mathbf{x})dt + (SdW_i)(\mathbf{x}) \quad (7.17)$$

Η παρουσία του θορύβου στις (7.14) και (7.17) θα πρέπει να ερμηνευθεί ανάλογα. Στην ουσία θεωρώντας ότι τόσο η (7.14) όσο και η (7.17) αναφέρονται στο σύστημα Euler, τότε προκύπτει η σχέση των τελεστών

$$B = B' - \mathbf{V}\nabla \quad (7.18)$$

Η σχέση αυτή προκύπτει με τη θεώρηση ή όχι της κίνησης του συστήματος. Η υπόθεση Taylor αφορά ακριβώς τη μετατροπή της χωρικής κλίμακας του φαινομένου σε χωρική και αντίστροφα [Gupta-Waymire, 1987]. Η υπόθεση Taylor αποτελεί μια συχνά χρησιμοποιούμενη υπόθεση τόσο σε υδρολογικά μοντέλα, όσο και σε μοντέλα πρόβλεψης της απόσβεσης λόγω βροχής, όπως η συνθετική καταιγίδα. Η σχέση (7.18) φανερώνει τη σύνδεση μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου και αυτών με την υπόθεση Taylor. Καθώς η ταχύτητα του συστήματος \mathbf{V} έχει για απλότητα θεωρηθεί ντετερμινιστική απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για την περίπτωση στοχαστικής ταχύτητας καθώς και για τους περιορισμούς στην επιλογή του τελεστή B . Μια από τις επιπλέον υποθέσεις που μπορούν να εξετασθούν είναι η υπόθεση της εργοδικότητας και το κατά πόσο είναι συμβατή με την επιλογή του τελεστή B . Επίσης υποθέσεις που αφορούν τη διακύμανση του πεδίου, όπως η στασιμότητα ή η χωρική ομογένεια θα πρέπει να εξετασθούν ως προς την επιλογή του τελεστή B .

Παραπέρα η δυνατότητα μοντελοποίησης του τυχαίου πεδίου στο χωρο-χρόνο με τη χρήση των μοντέλων άπειρης διάστασης προσφέρει τη δυνατότητα αναλυτικής μελέτης μεγεθών που αφορούν κινούμενους χρήστες. Έτσι αν υποτεθεί ότι ένας χρήστης κινείται με ταχύτητα \mathbf{v} αυτή ισοδυναμεί με ανάλογη κίνηση $-\mathbf{v}$ του συστήματος. Ωστόσο στην περίπτωση αυτή ο θόρυβος θα πρέπει να ερμηνευθεί

διαφορετικά, καθώς τα στατιστικά δεδομένα αναφέρονται στο πεδίο το οποίο είναι στην ουσία ακίνητο. Ενδιαφέρον λοιπόν παρουσιάζει η έκφραση της (7.14) για κινητό χρήστη και το κατά πόσο μπορεί να προσεγγισθεί με μονοδιάστατη ΣΔΕ.

Άλλη σημαντική εφαρμογή της αναπαράστασης των πεδίων στο χωρο-χρόνο συνολικά αποτελεί η δυνατότητα υπολογισμού παραμέτρων που προκύπτουν ως συναρτησοειδή του τυχαίου πεδίου, πχ ολοκλήρωμα. Έτσι αν το πεδίο είναι η ειδική απόσβεση, τότε η απόσβεση λόγω βροχής προκύπτει με την ολοκλήρωση της απόσβεσης στο ραδιοβήμα. Αν θεωρηθεί η υπόθεση Taylor τότε η χωρική κλίμακα μετατρέπεται σε χρονική και άρα η ολοκλήρωση στο ραδιοβήμα συνεπάγεται κάποια χρονική εξομάλυνση. Ακόμη και χωρίς την υπόθεση Taylor με τη συγκεκριμένη μορφή της κάποιας μορφής εξομάλυνσης αναμένεται με την ολοκλήρωση.

Στο [Manning, 1990] προκειμένου να ληφθεί υπόψη στο δυναμικό μοντέλο της απόσβεσης η επίδραση της ολοκλήρωσης κατά μήκος του ραδιοβήματος με τη συνεπακόλουθη εξομάλυνση στη μεταβολή της απόσβεσης χρησιμοποιήθηκε η έννοια της δισδιάστατης διαδικασίας Markov. Σύμφωνα με το [Manning, 1990] λοιπόν, αντί να επιλεγεί και η απόσβεση να μοντελοποιείται με μια ΣΔΕ αντίστοιχη της (7.2) όπως από τους M-B, θεωρήθηκε πως κάτι τέτοιο αποτελεί απλοποίηση που παραμένει έγκυρη, μόνο στην περίπτωση μικρού μήκους ραδιοβήματος. Στην περίπτωση που το μήκος του ραδιοβήματος αυξάνεται η απόσβεση μπορεί να δίνεται από μια εξίσωση της μορφής

$$dx_A = -\gamma x_A dt + \sqrt{2\gamma} dS_t, \text{ όπου } x_A = \ln(A(t) / A_m) / \sigma_{\ln A} \quad (7.19)$$

αλλά η διαδικασία S_t θα δίνεται επίσης από μια ΣΔΕ της μορφής

$$dS_t = -\gamma_S S_t dt + \gamma_S dB_t \quad (7.20)$$

Αποτελεί άμεση εφαρμογή της μοντελοποίησης στο χωρο-χρόνο ο έλεγχος της υπόθεσης του Manning.

Βιβλιογραφία

[Adler-Taylor, 2007] Adler, R. J. and Taylor, J. *Random Fields and Geometry*. Dordrecht: Springer, 2007.

[Agarwal-Holtzman, 1997] Agarwal, S. and Holtzman, J. M. Modelling and analysis of handoff algorithms in multi-cellular systems. In *Vehicular Technology Conference, 1997, IEEE 47th* (Vol. 1, pp. 300–304 vol.1). 1997.

[Agrawal-Patwari, 2009] Agrawal, P. and Patwari, N. Correlated link shadow fading in multi-hop wireless networks. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 8(8), 4024–4036. 2009.

[Alamouti, 2006] Alamouti, S. M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE J.Sel. A. Commun.*, 16(8), 1451–1458. 2006.

[Alouini-Simon, 2002] Alouini, M. S. and Simon, M. K. Dual diversity over correlated log-normal fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 50(12), 1946–1959. 2002.

[Anastasopoulos et al., 2009] Anastasopoulos, M. P., Panagopoulos, A. D. and Cottis, P. G. A feedback suppression algorithm for reliable satellite multicast based on spatial-temporal prediction of the satellite channel. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 27(2), 117–139. 2009.

[Anderson, 2003] Anderson, H. *Fixed broadband wireless system design*. Chichester, West Sussex, England ;;Hoboken, NJ :: John Wiley & Sons., 2003.

[Arapoglou et al., 2011] Arapoglou, P., Liolis, K., Bertinelli, M., Panagopoulos, A. D., Cottis, P. G. and De Gaudenzi, R. MIMO over Satellite: A Review. *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, 13(1), 27–51. 2011.

[Arnold et al., 1980] Arnold, H. W., Cox, D. C., Hoffman, H. and Leck, R. Ice depolarization statistics for 19-GHz satellite-to-earth propagation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 28(4), 546–550. 1980.

[Avidor-Mukherjee, 2001] Avidor, D. and Mukherjee, S. Hidden issues in the simulation of fixed wireless systems. *Wirel. Netw.*, 7(2), 187–200. 2001.

[Beard-Pruppacher, 1969] Beard, K. V and Pruppacher, H. R. A Determination of the Terminal Velocity and Drag of Small Water Drops by Means of a Wind Tunnel. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(5), 1066–1072. 1969. Retrieved from 2

[Bello, 1963] Bello, P. Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels. *Communications Systems, IEEE Transactions on*, 11(4), 360–393. 1963.

[Belyaev, 1968] Belyaev, Y. On the Number of Exits Across the Boundary of a Region by a Vector Stochastic Process. *Theory of Probability & Its Applications*, 13(2), 320–324. 1968.

[Bertorelli-Paraboni, 2005] Bertorelli, S. and Paraboni, A. Simulation of joint statistics of rain attenuation in multiple sites across wide areas using ITALSAT data. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 53(8 II), 2611–2622. 2005.

[Bertorelli-Paraboni, 2007] Bertorelli, S. and Paraboni, A. Modelling of short-term frequency scaling for rain attenuation using ITALSAT data. *Int.J.Satellite Communications Networking*, 251–262. 2007.

[Bondyopadhyay, 1995] Bondyopadhyay, P. K. Guglielmo Marconi - The father of long distance radio communication - An engineer's tribute. In *Microwave Conference, 1995. 25th European* (Vol. 2, pp. 879–885). 1995.

[Bostian-Allnutt, 1979] Bostian, C. W. and Allnutt, J. E. Ice-crystal depolarization on satellite microwave radio paths. *Proc. IEE*, 126, 951–960. 1979.

[Bousquet et al., 2004] Bousquet, M., Radzik, J., Pech, P., Féral, L., Castanet, L. and Lemorton, J. Application of a model of space-correlated time-series into a simulation platform of adaptive resource management for ka-band OBP satellite systems. In *A Collection of the 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit Technical Papers* (Vol. 2, pp. 783–795). 2004.

[Boyce-DiPrima, 1992] Boyce, W. E. and DiPrima, R. C. *Elementary differential equations and boundary value problems*. New York: Wiley, 1992.

[Butterworth et al., 2000] Butterworth, K. S., Sowerby, K. W. and Williamson, A. G. Base station placement for in-building mobile communication systems to yield high capacity and efficiency. *Communications, IEEE Transactions on*, 48(4), 658–669. 2000.

[Cai-Giannakis, 2003] Cai, X. and Giannakis, G. B. A two-dimensional channel simulation model for shadowing processes. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 52(6), 1558–1567. 2003.

[Capsoni et al., 1987] Capsoni, C., Fedi, F., Magistroni, C., Paraboni, A. and Pawlina, A. Data and theory for a new model of the horizontal structure of rain cells for propagation applications. *Radio Science*, 22(3), 395–404. 1987.

[Capsoni et al., 1990] Capsoni, Carlo, Matricciani, E. and Mauri, M. SIRIO-OTS 12 GHz orbital diversity experiment at Fucino. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 38(6), 777–782. 1990.

[Carrie et al., 2008] Carrie, G., Castanet, L. and Lacoste, F. Validation of rain attenuation time series synthesizers for temperate area - On the enhanced Maseng-Bakken model. In *2008 International Workshop on Satellite and Space Communications, IWSSC'08, Conference Proceedings* (pp. 40–44). 2008.

- [Carrie et al., 2011]** Carrie, G., Lacoste, F. and Castanet, L. A new “event-on-demand” synthesizer of rain attenuation time series at Ku-, Ka- and Q/V-bands. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 29(1), 47–60. 2011.
- [Castanet, 2008]** Castanet, L. *Influence of the variability of the propagation channel on Mobile, Fixed, Multimedia and Optical Satellite Communications*. (S. Verlag, Ed.). Aachen, 2008.
- [Castanet et al., 2003]** Castanet, L., Bolea-Alamanac, A. and Bousquet, M. Interference and fade mitigation techniques for Ka and Q/V band satellite communication systems. In *International Workshop of COST Actions 272 and 280*. Noordwijk, The Netherlands, 2003.
- [Catrein-Mathar, 2008]** Catrein, D. and Mathar, R. Gaussian Random Fields as a Model for Spatially Correlated Log-Normal Fading. In *Telecommunication Networks and Applications Conference, 2008. ATNAC 2008. Australasian* (pp. 153–157). 2008.
- [Charalambous-Menemenlis, 2002]** Charalambous, C. D. and Menemenlis, N. Dynamical Spatial Log-Normal Shadowing Models for Mobile Communications. In *The XXVIIth Triennial General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI), Maastricht, The Netherlands, August 17-24, 2002 (Invited Presentation)* (pp. 1–4). 2002.
- [Cheffena et al., 2009]** Cheffena, M., Braten, L. E. and Ekman, T. On the space-time variations of rain attenuation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57(6), 1771–1782. 2009.
- [Chow, 2007]** Chow, P. L. *Stochastic partial differential equations*. Boca Raton,: Chapman & Hall/CRC, 2007.
- [Cianca et al., 2011]** Cianca, E., Rossi, T., Yahalom, A., Pinhasi, Y., Farserotu, J. and Sacchi, C. EHF for Satellite Communications: The New Broadband Frontier. *Proceedings of the IEEE*, 99(11), 1858–1881. 2011.
- [Codispoti et al., 2012]** Codispoti, G., Riva, C., Ruggieri, M., Rossi, T., Martellucci, A., Rivera-Castro, J., Koudelka, O. and Schoenuber, M. The propagation and telecom experiments of the Alphasat Aldo payload (TDP5 Q/V band experiment). In *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on* (p. 116). 2012.
- [COST 255, 2002]** COST 255. Radiowave Propagation Modelling for new SATCOM Services at Ku-Band and above. *Final Report*. 2002.
- [Costa-Haykin, 2010]** Costa, N. and Haykin, S. *Multiple-input multiple-output channel models : theory and practice*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2010.
- [Cox, 2012]** Cox, C. *An introduction to LTE : LTE, LTE-advanced, SAE, and 4G mobile communications*. Hoboken, NJ: Wiley, 2012.

[Cramer-Leadbetter, 1967] Cramer, H. and Leadbetter, M. R. *Stationary and related stochastic processes; sample function properties and their applications*. New York: Wiley, 1967.

[Crane, 1980] Crane, R. K. Prediction of Attenuation by Rain. *Communications, IEEE Transactions on*, 28(9), 1717–1733. 1980.

[Crane, 1996] Crane, R. K. *Electromagnetic wave propagation through rain. Wiley series in remote sensing*. New York ; Chichester: Wiley, 1996.

[Da Prato, 2006] Da Prato, G. An introduction to infinite-dimensional analysis. Berlin: Springer, 2006.

[Da Prato-Zabczyk, 1992] Da Prato, G. and Zabczyk, J. *Stochastic equations in infinite dimensions*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1992.

[Dahlman et al., 2011] Dahlman, E., Parkvall, S. and Skold, J. 4G LTE LTE-Advanced for mobile broadband. Oxford ;Burlington, MA: Academic Press,, 2011.

[Dissanayake, 1997] Dissanayake, A. W. Application of open-loop uplink power control in Ka-band satellite links. *Proceedings of the IEEE*, 85(6), 959–969. 1997.

[Dissanayake et al., 1997] Dissanayake, A. W., Allnutt, J. and Haidara, F. A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along Earth-satellite paths. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 45(10), 1546–1558. 1997.

[Drufuca, 1974] Drufuca, G. Rain attenuation statistics for frequencies above 10 GHz from rain-gauge observations. *J. Rech. Atmos.*, 399–411. 1974.

[Du-Swamy, 2010] Du, K.-L. and Swamy, M. N. S. Wireless communication systems from RF subsystems to 4G enabling technologies. Cambridge, UK; New York; New York: Cambridge University Press, 2010.

[Durgin, 2003] Durgin, G. D. *Space-time wireless channels*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2003.

[DVB, 2012] DVB. Fact Sheet: Return Channel Satellite. 2012.

[DVB, 2013] DVB. Document A155-1. 2013.

[Elbert, 2004] Elbert, B. R. The satellite communication applications handbook. Norwood, MA: Artech House, 2004.

[ETSI, 2009] 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). 2009.

[ETSI, 2009b] ETSI EN 301 790. Digital Video Broadcasting; Interaction channel for Satellite Distribution Systems. 2009.

[ETSI, 2012a] ETSI. ETSI website. 2012a. Retrieved March 24, 2012, from <http://www.etsi.org/>

[ETSI, 2012b] ETSI. TS 101 545-1 Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation DVB Interactive Satellite System (DVB-RCS2); Part 1: Overview and System Level specification. 2012b.

[Evans et al., 2011] Evans, B., Thompson, P., Castanet, L., Bousquet, M. and Mathiopoulos, T. "Concepts and Technologies for a Terabit/s Satellite". *SPACOMM-2011, Budapest, Hungary*. 2011.

[Féral et al., 2003] Féral, L., Sauvageot, H., Castanet, L. and Lemorton, J. HYCELL - A new hybrid model of the rain horizontal distribution for propagation studies: 1. Modeling of the rain cell. *Radio Science*, 38(3), 22/1–22/30. 2003.

[Forkel et al., 2004] Forkel, I., Schinnenburg, M. and Ang, M. Generation of Two-Dimensional Correlated Shadowing for Mobile Radio Network Simulation. In *Proceedings of The 7th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications, WPMC 2004*. Abano Terme (Padova), Italy, 2004.

[Foschini, 1996] Foschini, G. J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*, 1(2), 41–59. 1996.

[Fraile et al., 2008] Fraile, R., Monserrat, J. F., Gozávez, J. and Cardona, N. Mobile radio bi-dimensional large-scale fading modelling with site-to-site cross-correlation. *European Transactions on Telecommunications*, 19(1), 101–106. 2008. doi:10.1002/ett.1179

[Gardiner, 1990] Gardiner, C. W. *Handbook of stochastic methods for physics, chemistry, and the natural sciences. Springer series in synergetics* (Vol. 13, p. 442). Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1990.

[Giancristofaro, 1996] Giancristofaro, D. Correlation model for shadow fading in mobile radio channels. *Electronics Letters*, 32(11), 958–959. 1996.

[Goldsmith, 2005] Goldsmith, A. *Wireless communications*. Cambridge ;New York: Cambridge University Press, 2005.

[Graziosi, 1999] Graziosi, F. Analysis of outage duration for mobile radio networks with correlated shadowings. In *Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th* (Vol. 2, pp. 948–952 vol.2). 1999.

[Graziosi-Santucci, 1999] Graziosi, F. and Santucci, F. Distribution of outage intervals in macrodiversity cellular systems. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 17(11), 2011–2021. 1999.

[Graziosi-Santucci, 2002] Graziosi, F. and Santucci, F. A general correlation model for shadow fading in mobile radio systems. *IEEE Communications Letters*, 6(3), 102–104. 2002.

[Grémont-Filip, 1998] Grémont, B. C. and Filip, M. Modelling and Applications of the Instantaneous Frequency Scaling of Rain Attenuation. In *First International Workshop on Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ka band and Above*. Noordwijk, The Netherlands, 1998.

[Grémont-Filip, 2004] Grémont, B. C. and Filip, M. Spatio-temporal rain attenuation model for application to fade mitigation techniques. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(5), 1245–1256. 2004.

[Gudmundson, 1991] Gudmundson, M. Correlation model for shadow fading in mobile radio systems. *Electronics Letters*, 27(23), 2145–2146. 1991.

[Gupta-Waymire, 1987] Gupta, V. K. and Waymire, E. On Taylor's hypothesis and dissipation in rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92(D8), 9657–9660. 1987.

[Hashemi, 1993] Hashemi, H. The indoor radio propagation channel. *Proceedings of the IEEE*, 81(7), 943–968. 1993.

[Hatsuda et al., 1997] Hatsuda, T., Okuno, N., Inoue, K., Itoh, K. and Mitsunashi, R. Comparison of multiple satellites diversity characteristics between rain and snow attenuations for 14/12 GHz band. In *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest) (Vol. 4, pp. 2556–2559)*. 1997.

[Haykin-Moher, 2010] Haykin, S. S. and Moher, M. *Communication systems*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

[Hiertz et al., 2010] Hiertz, G. R., Denteneer, D., Stibor, L., Zang, Y., Costa, X. P. and Walke, B. The IEEE 802.11 universe. *Communications Magazine, IEEE*, 48(1), 62–70. 2010.

[Hodge, 1977] Hodge, D. B. Frequency scaling of rain attenuation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 25(3), 446–447. 1977.

[Hodge, 1982] Hodge, D. B. An improved model for diversity gain on earth-space propagation paths. *Radio Science*, 17(6), 1393–1399. 1982.

[Huurdean, 2003] Huurdean, A. *The worldwide history of telecommunications*. New York: J. Wiley, 2003.

[Ippolito, 2008] Ippolito, L. J. *Satellite communications systems engineering: atmospheric effects, satellite link design, and system performance*. *Wiley series on wireless communications and mobile computing* (p. 376). Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2008.

[ITU, 2012a] ITU. Radio Regulations, ed. 2012. 2012a.

[ITU, 2012b] ITU. World Telecommunication/ICT Indicators Database 2012 (16th Edition). 2012b. Retrieved from <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>

[ITU, 2012c] ITU. *Regulation of global broadband satellite communications*. 2012c.

[ITU Web, 2013] ITU Web. ITU Website. 2013. Retrieved March 21, 2013, from <http://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>

[ITU-R DBSG3, 2012] ITU-R DBSG3. database. 2012.

[ITU-R Rec. BO.1516-1, 2012] ITU-R Rec. BO.1516-1. *Digital multiprogramme television systems for use by satellites operating in the 11/12 GHz frequency range*. 2012.

[ITU-R Rec. BO.1784, 2007] ITU-R Rec. BO.1784. *Digital satellite broadcasting system with flexible configuration (television, sound and data)*. 2007.

[ITU-R Rec. M.1457-10, 2011] ITU-R Rec. M.1457-10. *Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)*. 2011.

[ITU-R Rec. M.2012, 2012] ITU-R Rec. M.2012. Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced). 2012.

[ITU-R Rec. M.687-2, 1997] ITU-R Rec. M.687-2. *International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)*. 1997.

[ITU-R Rec. M.817, 1992] ITU-R Rec. M.817. *International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) Network architectures*. 1992.

[ITU-R Rec. P. 1853-1, 2012] ITU-R Rec. P. 1853-1. *Tropospheric Attenuation Time Series Synthesis*. 2012.

[ITU-R Rec. P. 311-13, 2009] ITU-R Rec. P. 311-13. *Acquisition, presentation and analysis of data in studies of tropospheric propagation*. 2009.

[ITU-R Rec. P. 530-14, 2012] ITU-R Rec. P. 530-14. *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems*. 2012.

[ITU-R Rec. P. 531-11, 2012] ITU-R Rec. P. 531-11. *Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems*. 2012.

[ITU-R Rec. P. 618-10, 2009] ITU-R Rec. P. 618-10. *Propagation Data and Prediction Methods required for the Design of Earth-Space Telecommunication Systems*. 2009.

[ITU-R Rec. P. 837-6, 2012] ITU-R Rec. P. 837-6. *Characteristics of precipitation for propagation modelling*. 2012.

[ITU-T Rec. X.200, 1994] ITU-T Rec. X.200. Data Networks and Open System Communications. Open Systems Interconnection - Model and Notation. 1994.

[Jalden et al., 2007] Jalden, N., Zetterberg, P., Ottersten, B., Hong, A. and Thoma, R. Correlation Properties of Large Scale Fading Based on Indoor Measurements. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE* (pp. 1894–1899). 2007.

[Jeannin et al., 2008] Jeannin, N., Feral, L., Sauvageot, H., Castanet, L. and Lacoste, F. A Space-time Channel Model for Simulations on Continental Satellite Coverages: Overview of the Modeling and Potentiality for Adaptive Resource Management Optimization. *Radiowave Propag. Workshop*. 2008.

[Jeon et al, 2010] Jeon, N.-R., Kim, K.-H., Choi, J.-H. and Kim, S. A Spatial Correlation Model for Shadow Fading in Indoor Multipath Propagation. In *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd* (pp. 1–6). 2010.

[J. D. Kanellopoulos-Koukoulas, 1987] Kanellopoulos, J. D. and Koukoulas, S. G. “A Model for the Prediction of the Advantage of Triple Site Diversity Applied to Earth-Space-Paths”. In *Microwave Conference, 1987. 17th European* (pp. 535–540). 1987.

[J. D. Kanellopoulos et al., 1990] Kanellopoulos, J. D., Koukoulas, S. G., Koliopoulos, N. J., Capsalis, C. N. and Ventouras, S. G. Rain attenuation problems affecting the performance of microwave communication systems. *Annales des Télécommunications*, 45(7-8), 437–451. 1990.

[J. D. Kanellopoulos et al., 2000] Kanellopoulos, J. D., Panagopoulos, A. D. and Livieratos, S. N. Comparison of copolar and cochannel satellite interference prediction models with experimental results at 11.6 and 20 GHz. *International Journal of Satellite Communications*, 18(2), 107–120. 2000.

[J. D. Kanellopoulos-Ventouras, 1990] Kanellopoulos, J. D. and Ventouras, S. A modification of the predictive analysis for the multiple site diversity performance taking into account the stratified rain. *European Transactions on Telecommunications*, 1(1), 49–57. 1990. doi:10.1002/ett.4460010110

[S. A. Kanellopoulos et al., 2007] Kanellopoulos, S. A., Panagopoulos, A. D. and Kanellopoulos, J. D. Calculation of the dynamic input parameter for a stochastic model simulating rain attenuation: A novel mathematical approach. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55(11 II), 3257–3264. 2007.

[S. A. Kanellopoulos et al., 2006] Kanellopoulos, S. A., Panagopoulos, A. D., Matriccioni, E. and Kanellopoulos, J. D. Annual and diurnal slant path rain attenuation statistics in Athens obtained with the synthetic storm technique. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 54(8), 2357–2364. 2006.

[Karagiannis et al., 2012] Karagiannis, G. A., Panagopoulos, A. D., Kanellopoulos, J. D. and Filippou, M. C. Outage performance of double stratospheric platforms

diversity systems. In *Antennas and Propagation (EUCAP), 2012 6th European Conference on* (pp. 1132–1136). 2012.

[Karatzas-Shreve, 1991] Karatzas, I. and Shreve, S. E. *Brownian motion and stochastic calculus. Graduate texts in mathematics* (Vol. 113, p. 470). New York: Springer-Verlag, 1991.

[Karlin-Taylor, 1975] Karlin, S. and Taylor, H. M. *A first course in stochastic processes* (Vol. 2d, p. 557). New York: Academic Press, 1975.

[Kashiwagi et al, 2010] Kashiwagi, I., Taga, T. and Imai, T. Time-Varying Path-Shadowing Model for Indoor Populated Environments. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 59(1), 16–28. 2010.

[Klingenbrunn-Mogensen, 1999] Klingenbrunn, T. and Mogensen, P. Modelling cross-correlated shadowing in network simulations. In *Vehicular Technology Conference, 1999. VTC 1999 - Fall. IEEE VTS 50th* (Vol. 3, pp. 1407–1411 vol.3). 1999.

[Kourogiorgas et al., 2013] Kourogiorgas, C., Karagiannis, G. A. and Panagopoulos, A. D. Space-Time Rain Rate Field Generator for Multi-Antenna Satellite Communication Applications. In *EuCAP*. Gothenburg, 2013.

[Lacoste et al., 2005] Lacoste, F., Bousquet, M., Castanet, L., Cornet, F. and Lemorton, J. Improvement of the ONERA-CNES rain attenuation time series synthesizer and validation of the dynamic characteristics of the generated Fade events. *Space Communications*, 20(1-2), 45–59. 2005.

[Laster-Stutzman, 1995] Laster, J. D. and Stutzman, W. L. Frequency Scaling of Rain Attenuation for Satellite Communication Links. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 43(11), 1207. 1995.

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

[Liberti-Rappaport, 1992] Liberti, J. C. and Rappaport, T. S. Statistics of shadowing in indoor radio channels at 900 and 1900 MHz. In *Military Communications Conference, 1992. MILCOM '92, Conference Record. Communications - Fusing Command, Control and Intelligence., IEEE* (pp. 1066–1070 vol.3). 1992.

[Lin, 1975] Lin, S. H. A method for calculating rain attenuation distributions on microwave paths. *AT T Technical Journal*, 54, 1051–1086. 1975.

[Lin et al., 1980] Lin, S. H., Bergmann, H. J. and Pursley, M. V. Rain attenuation on earth-satellite paths-summary of 10-year experiments and studies. *Bell System Tech. J.*, 59, 183–228. 1980.

[Lindgren, 2013] Lindgren, G. *Stationary stochastic processes. Theory and applications*. CRC Texts in Statistical Science Series. CRC Press, 2013.

[Luglio et al., 2002] Luglio, M., Mancini, R., Riva, C., Paraboni, A. and Barbaliscia, F. Large-scale site diversity for satellite communication networks. *International Journal of Satellite Communications*, 20(4), 251–260. 2002.

[Luini-Capsoni, 2011] Luini, L. and Capsoni, C. MultiEXCELL: A new rain field model for propagation applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(11), 4286–4300. 2011.

[Luini et al., 2011] Luini, L., Jeannin, N., Capsoni, C., Paraboni, A., Riva, C., Castanet, L. and Lemorton, J. Weather radar data for site diversity predictions and evaluation of the impact of rain field advection. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 29(1), 79–96. 2011.

[Maini-Agrawal, 2011] Maini, A. K. and Agrawal, V. Satellite technology principles and applications. Chichester, West Sussex, U.K.; Hoboken, N.J.: Wiley, 2011.

[Manning, 1990] Manning, R. M. Unified statistical rain-attenuation model for communication link fade predictions and optimal stochastic fade control design using a location-dependent rain-statistics database. *International Journal of Satellite Communications*, 8(1), 11–30. 1990.

[Maral et al., 2009] Maral, G., Bousquet, M. and Sun, Z. Satellite communications systems systems, techniques and technology. Chichester, West Sussex, U.K. :: John Wiley,, 2009.

[Marshall-Palmer, 1948] Marshall, J. S. and Palmer, W. M. K. THE DISTRIBUTION OF RAINDROPS WITH SIZE. *Journal of Meteorology*, 5(4), 165–166. 1948.

[Maseng-Bakken, 1981] Maseng, T. and Bakken, P. A Stochastic Dynamic Model of Rain Attenuation. *IEEE Transactions on Communications*, 29(5), 660–669. 1981.

[Matricciani, 1982] Matricciani, E. Effects of filtering on statistics of rain-induced fade durations. *Electronics Letters*, 18(6), 253–255. 1982.

[Matricciani, 1997] Matricciani, E. Prediction of orbital diversity performance in satellite communication systems affected by rain attenuation. *International Journal of Satellite Communications*, 15(2), 45–50. 1997.

[Matricciani, 2003] Matricciani, E. Micro scale site diversity in satellite and tropospheric communication systems affected by rain attenuation. *Space Comms.*, 19(2), 83–90. 2003.

[Mauludiyanto et al., 2010] Mauludiyanto, A., Hendranto, G., Purnomo, M. H., Ramadhany, T. and Matsushima, A. ARIMA Modeling of Tropical Rain Attenuation on a Short 28-GHz Terrestrial Link. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 9, 223–227. 2010.

[Molisch, 2011] Molisch, A. F. *Wireless communications*. Weinheim: Wiley, 2011.

[Morello-Mignone, 2006] Morello, A. and Mignone, V. DVB-S2: The Second Generation Standard for Satellite Broad-Band Services. *Proceedings of the IEEE*, 94(1), 210–227. 2006.

[Mukherjee-Avidor, 2001] Mukherjee, S. and Avidor, D. Dynamics of path losses between a mobile terminal and multiple base stations in a cellular environment. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 50(6), 1590–1603. 2001.

[Nicopolitidis et al., 2003] Nicopolitidis, P., Obaidat, M. S., Papadimitriou, G. and Pomportsis, A. *Wireless Networks*. Chichester :: John Wiley & Sons, 2003.

[Nyquist, 1924] Nyquist, H. Certain Factors Affecting Telegraph Speed. *American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the*, XLIII, 412–422. 1924.

[Oksendal, 1998] Oksendal, B. K. *Stochastic differential equations : an introduction with applications*. Berlin; New York: Springer, 1998.

[Olsen et al., 1978] Olsen, R., Rogers, D. V and Hodge, D. B. The aRb relation in the calculation of rain attenuation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 26(2), 318–329. 1978.

[Panagopoulos et al., 2002] Panagopoulos, A. D., Livieratos, S. N. and Kanellopoulos, J. D. Interference analysis applied to a double site diversity Earth-space system: Rain height effects and simple regression-derived formulas. *Radio Science*, 37(6), 151–159. 2002.

[Panagopoulos et al., 2004] Panagopoulos, A. D., Arapoglou, P.-D. M. and Cottis, P. G. Satellite communications at KU, KA, and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 6(3), 2–14. 2004.

[Panagopoulos et al., 2005] Panagopoulos, A. D., Arapoglou, P.-D. M., Kanellopoulos, J. D. and Cottis, P. G. Long-term rain attenuation probability and site diversity gain prediction formulas. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 53(7), 2307–2313. 2005.

[Panagopoulos et al., 2007] Panagopoulos, A. D., Georgiadou, E. M. and Kanellopoulos, J. D. Selection Combining Site Diversity Performance in High Altitude Platform Networks. *Communications Letters, IEEE*, 11(10), 787–789. 2007.

[Panagopoulos-Kanellopoulos, 2002] Panagopoulos, A. D. and Kanellopoulos, J. D. Prediction of triple-orbital diversity performance in Earth-space communication. *International Journal of Satellite Communications*, 20(3), 187–200. 2002.

[Panagopoulos-Kanellopoulos, 2003] Panagopoulos, A. D. and Kanellopoulos, J. D. On the rain attenuation dynamics: Spatial-temporal analysis of rainfall rate and fade duration statistics. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 21(6), 595–611. 2003.

[Papatsoris, 1997] Papatsoris, A. D. Effect of ice clouds on millimetre-wave aeronautical and satellite communications. *Electronics Letters*, 33(21), 1766–1768. 1997.

[Papoulis-Pillai, 2002] Papoulis, A. and Pillai, S. U. *Probability, random variables, and stochastic processes* (Vol. 4th, p. 852). Boston: McGraw-Hill, 2002.

[Patwari-Agrawal, 2008] Patwari, N. and Agrawal, P. NeSh: A joint shadowing model for links in a multi-hop network. In *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. ICASSP 2008. IEEE International Conference on* (pp. 2873–2876). 2008.

[Patwari et al., 2002] Patwari, N., Wang, Y. and O’Dea, R. J. The importance of the multipoint-to-multipoint indoor radio channel in ad hoc networks. In *Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE* (Vol. 2, pp. 608–612 vol.2). 2002.

[Petraki et al., 2008] Petraki, D. K., Anastasopoulos, M. P. and Cottis, P. G. Dynamic resource allocation for DVB-RCS networks. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 26(3), 189–210. 2008.

[Poazar, 2005] Poazar, D. M. *Microwave engineering*. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2005.

[Primak et al., 2004] Primak, S., Kontorovich, V. and Lyandres, V. Stochastic methods and their applications to communications stochastic differential equations approach. Chichester; Hoboken, NJ: Wiley, 2004.

[Proakis-Salehi, 2002] Proakis, J. G. and Salehi, M. *Communication systems engineering*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2002.

[Pruppacher-Pitter, 1971] Pruppacher, H. R. and Pitter, R. L. A Semi-Empirical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(1), 86–94. 1971. Retrieved from 2

[Rappaport, 1991] Rappaport, T. S. The wireless revolution. (W. A. H. Thissen & P. M. Herder, Eds.), 29 IEEE Communications Magazine A59–A62 (1991). NELSON PUBLISHING, 1991.

[Rappaport, 2001] Rappaport, T. S. *Wireless communications* (Vol. 2nd). Upper Saddle River, N.J. ; London: Prentice Hall PTR, 2001.

[Rice, 1958] Rice, S. O. Distribution of the Duration of Fades in Radio Transmission: Gaussian Noise Model. *Bell System Technical Journal*, 37(3), 581–635. 1958.

[Richharia-Westbrook, 2010] Richharia, M. and Westbrook, L. D. Satellite systems for personal applications concepts and technology. Chichester, West Sussex, U.K.; Hoboken, NJ: Wiley, 2010.

[Ruggieri et al., 2012] Ruggieri, M., Riva, C., De Sanctis, M. and Rossi, T. Alphasat TDP#5 mission: Towards future EHF satellite communications. In *Satellite*

Telecommunications (ESTEL), 2012 IEEE First AESS European Conference on (pp. 1–6). 2012.

[Sakarellos et al., 2010] Sakarellos, V. K., Skraparlis, D., Panagopoulos, A. D. and Kanellopoulos, J. D. Outage Performance Analysis of a Dual-Hop Radio Relay System Operating at Frequencies above 10GHz. *Communications, IEEE Transactions on*, 58(11), 3104–3109. 2010.

[Salazar-Palma et al., 2011] Salazar-Palma, M., Garcia-Lamperez, A., Sarkar, T. K. and Sengupta, D. L. The Father of Radio: A Brief Chronology of the Origin and Development of Wireless Communications. *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, 53(6), 83–114. 2011. doi:10.1109/MAP.2011.6157716

[Sarkar et al., 2006] Sarkar, T. K., Mailloux, R., Oliner, A. A., Salazar-Palma, M. and Sengupta, D. L. *History of Wireless*. Wiley-IEEE Press, 2006.

[Sarkka, 2012] Sarkka, S. *Applied Stochastic Differential Equations*. 2012. Retrieved from http://www.lce.hut.fi/~ssarkka/course_s2012/

[Saunders, 2007] Saunders, S. R. *Antennas and propagation for wireless communications systems* (Vol. 2nd). Chichester: John Wiley, 2007.

[Seel, 2012] Seel, P. B. *Digital universe : the global telecommunication revolution*. Malden, MA: Wiley-Blackwell, 2012.

[Seetharam et al., 2012] Seetharam, A., Kurose, J., Goeckel, D. and Bhanage, G. A Markov chain model for coarse timescale channel variation in an 802.16e wireless network. In *INFOCOM, 2012 Proceedings IEEE* (pp. 1800–1807). 2012.

[Shannon, 1948] Shannon, C. E. A mathematical theory of communication. *Bell system technical journal*, 27. 1948.

[SIA, 2012] SIA. *State of the Satellite Industry Report*. 2012. Retrieved from <http://www.sia.org/state-of-the-satellite-industry-report/>

[Simon-Alouini, 2005] Simon, M. K. and Alouini, M.-S. *Digital communication over fading channels*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2005.

[Skraparlis et al., 2009] Skraparlis, D., Sakarellos, V. K., Panagopoulos, A. D. and Kanellopoulos, J. D. Outage Performance Analysis of Cooperative Diversity with MRC and SC in Correlated Lognormal Channels. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009(1), 707839. 2009.

[Stratonovich-Silverman, 1967] Stratonovich, R. L. and Silverman, R. A. *Topics in the theory of random noise* (Vol. Revis Eng). New York: Gordon and Breach, 1967.

[Stüber, 2001] Stüber, G. L. *Principles of mobile communication* (Vol. 2, p. 752). Boston: Kluwer Academic, 2001.

- [Swan, 2003] Swan, P. *Global mobile satellite systems : a systems overview*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [Sweeney-Bostian, 1992] Sweeney, D. G. and Bostian, C. W. The dynamics of rain-induced fades. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 40(3), 275–278. 1992.
- [Sweeney-Bostian, 1999] Sweeney, D. G. and Bostian, C. W. Implementing adaptive power control as a 30/20-GHz fade countermeasure. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 47(1), 40–46. 1999.
- [Szyszkowicz et al., 2010] Szyszkowicz, S. S., Yanikomeroglu, H. and Thompson, J. S. On the Feasibility of Wireless Shadowing Correlation Models. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(9), 4222–4236. 2010.
- [Tanenbaum-Wetherall, 2011] Tanenbaum, A. S. and Wetherall, D. *Computer networks*. Boston: Prentice Hall, 2011.
- [Tang et al., 1982] Tang, D. D., Davidson, D. and Bloch, S. C. Diversity reception of comstar satellite 19/29-GHz Beacons with the Tampa Triad, 1978-1981. *Radio Science*, 17(6), 1477–1488. 1982.
- [Tsolakis-Stutzman, 1983] Tsolakis, A. and Stutzman, W. L. Calculation of ice depolarization on satellite radio paths. *Radio Science*, 18(6), 1287–1293. 1983.
- [UCS, 2012] UCS. UCS Satellite Database. 2012. Retrieved from http://www.ucsusa.org/assets/documents/nwgs/UCS_Satellite_Database_12-1-12.xls
- [Ulbrich, 1983] Ulbrich, C. W. Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(10), 1764–1775. 1983. Retrieved from 2
- [Waldvogel, 1974] Waldvogel, A. The N0 Jump of Raindrop Spectra. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31(4), 1067–1078. 1974. Retrieved from 2
- [Walrand, 1991] Walrand, J. *Communication networks : a first course*. Homewood, IL: Aksen Associates : Irwin, 1991.
- [Zhang-Cai, 2007] Zhang, R. and Cai, L. A Markov model for indoor ultra-wideband channel with people shadowing. *Mob. Netw. Appl.*, 12(5), 438–449. 2007.
- [Κανάτας et al., 2008] Κανάτας, Αθανάσιος, Κωνσταντίνου, Φίλιππος and Πάντος, Γεώργιος. *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών*. Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2008.
- [Κανελλόπουλος, 1999] Κανελλόπουλος, Ι. Δ. *Σχεδίαση Μικροκυματικών Ζεύξεων*. (ΕΠΙΣΕΥ). Αθήνα, 1999.
- [Κωττής-Καψάλης, 2006] Κωττής, Π. and Καψάλης, Χ. *Δορυφορικές Επικοινωνίες*. Τζιόλα, 2006.

Παράρτημα Α

Μοντέλο ITU-R P. 618-10 για εξαγωγή της Πιθανότητας Υπέρβασης Απόσβεσης λόγω Βροχής

Το μοντέλο υπολογισμού της απόσβεσης λόγω βροχής της ITU-R P. 618-10 αναπαραγάγει τα στατιστικά χαρακτηριστικά της απόσβεσης λόγω βροχής σε ετήσια βάση για ένα δεδομένο τόπο σε συχνότητες μέχρι 55 GHz. Ως είσοδοι του μοντέλου χρησιμοποιούνται οι εξής παράμετροι:

$R_{0.01}$: η σημειακή ένταση βροχόπτωσης για το 0.01% του χρόνου (mm/h)

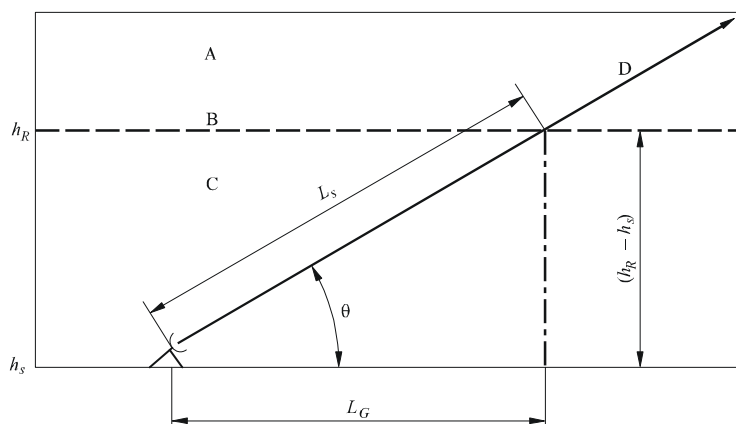
h_s : το ύψος του επίγειου σταθμού άνωθεν της μέσης στάθμης θάλασσας (km)

θ : η γωνία ύψωσης

φ : το γεωγραφικό πλάτος του επίγειου σταθμού

f : η συχνότητα (GHz)

R_e : ισοδύναμη ακτίνα της γης (8500 km)



Εικ. 50 Γεωμετρία κεκλιμένου ραδιοβήματος δορυφορικής ζεύξης

Αν στοιχεία για το υψόμετρο του επίγειου σταθμού δεν είναι διαθέσιμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια εκτιμώμενη τιμή από τοπογραφικούς χάρτες υψόμετρου που περιλαμβάνονται στη σύσταση ITU-R P. 1511.

Τα βήματα υπολογισμού έχουν ως εξής:

Βήμα 1: Προσδιορισμός του ύψους βροχής h_R σύμφωνα με τη σύσταση ITU-R P. 839 και συγκεκριμένα με τη σχέση

$$h_R = h_0 + 0.36 \text{ (km)} \quad (\text{A1})$$

όπου h_0 το μέσο ετήσιο υψόμετρο θερμοκρασίας 0°C . Η τιμή αυτή αν δεν είναι διαθέσιμη από πειραματικά δεδομένα μπορεί να προκύψει από τη σύσταση P. 839 είτε μέσω γραμμικής παρεμβολής σε διαθέσιμη βάση δεδομένων μεταξύ 4 γειτονικών σημείων, είτε με ανάγνωση των τιμών σε χάρτη για ευκολία.

Βήμα 2: Για γωνίες ύψωσης $\theta \geq 5^\circ$ υπολογισμός του μήκους του κεκλιμένου ραδιοβήματος L_s (km) εντός του ύψους βροχής με τη σχέση:

$$L_s = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \quad (\text{A2})$$

Βήμα 3: Υπολογισμός της οριζόντιας προβολής L_G (km) του μήκους του ραδιοβήματος ως:

$$L_G = L_s \cos \theta \quad (\text{A3})$$

Βήμα 4: Υπολογισμός της τιμής $R_{0.01}$ της σημειακής έντασης βροχόπτωσης που υπερβαίνεται σε ποσοστό 0.01% του μέσου χρόνου (με χρόνο ολοκλήρωσης 1 λεπτό). Αν η στατιστική αυτή παράμετρος δεν μπορεί να προκύψει από βάση δεδομένων μετρήσεων για το συγκεκριμένο τόπο, μπορεί να εκτιμηθεί με χρήση των χαρτών βροχής που περιλαμβάνονται στη σύσταση ITU-R P. 837. Αν η προκύπτουσα τιμή είναι 0, τότε δεν απαιτείται η εκτέλεση των επόμενων βημάτων.

Βήμα 5: Υπολογισμός της ειδικής απόσβεσης γ_R (dB/km) με χρήση των εξαρτώμενων από τη συχνότητα συντελεστών που προκύπτουν από τη σύσταση ITU-R P. 838 και της τιμής $R_{0.01}$ που υπολογίστηκε προηγουμένως με χρήση της σχέσης:

$$\gamma_R = k(R_{0.01})^a \quad (\text{A4})$$

Βήμα 6: Υπολογισμός του οριζόντιου συντελεστή απομείωσης $r_{0.01}$ για το 0.01% του χρόνου ως:

$$r_{0.01} = \frac{1}{1 + 0.78 \sqrt{\frac{L_G \gamma_R}{f}} - 0.38(1 - e^{-2L_G})} \quad (\text{A5})$$

Βήμα 7: Υπολογισμός του κατακόρυφου συντελεστή διόρθωσης $v_{0.01}$ για ποσοστό 0.01% του χρόνου ως εξής:

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G r_{0.01}} \right) \text{ σε μοίρες}$$

$$\text{για } \zeta > \theta \quad L_R = \frac{L_G r_{0.01}}{\cos \theta} \text{ σε km}$$

αλλιώς $L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta}$ σε km

Αν $|\varphi| < 36^\circ$ $\chi = 36 - |\varphi|$ σε μοίρες

αλλιώς $\chi = 0$ μοίρες

και τελικά

$$v_{0.01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-(\theta/(1+\chi))} \right) \frac{\sqrt{L_R \gamma_R}}{f^2} - 0.45 \right)} \quad (\text{A6})$$

Βήμα 8: Το αποτελεσματικό μήκος L_E (km) είναι

$$L_E = L_R v_{0.01} \quad (\text{A7})$$

Βήμα 9: Η εκτιμώμενη τιμή απόσβεσης $A_{0.01}$ (dB) που υπερβαίνεται για ποσοστό χρόνου 0.01% του μέσου έτους δίνεται από τη σχέση:

$$A_{0.01} = \gamma_R L_E \quad (\text{A8})$$

Βήμα 10: Η εκτιμώμενη τιμή απόσβεσης που υπερβαίνεται για άλλα ποσοστά χρόνου στην περιοχή 0.001% έως 5% προσδιορίζεται από την τιμή $A_{0.01}$ ως εξής:

Αν $p \geq 1\%$ ή $|\varphi| \geq 36^\circ$: $\beta = 0$

Αν $p < 1\%$ και $|\varphi| < 36^\circ$ και $\theta \geq 25^\circ$: $\beta = -0.005(|\varphi| - 36)$

αλλιώς $\beta = -0.005(|\varphi| - 36) + 1.8 - 4.25 \sin \theta$

και

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-(0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p) \sin \theta)} \quad \text{σε dB} \quad (\text{A9})$$

Παράρτημα Β

Χάρτες Βροχής (Μοντέλο ITU-R P.837-6)

Η προτεινόμενη μέθοδος υπολογισμού χρησιμοποιείται για την εξαγωγή του ρυθμού βροχόπτωσης R_p που υπερβαίνεται για ένα δεδομένο ποσοστό του χρόνου p ενός μέσου έτους και για μια δεδομένη τοποθεσία με χρόνο ολοκλήρωσης 1 λεπτό. Ο χρόνος ολοκλήρωσης του 1 λεπτού θεωρείται ο κατάλληλος χρόνος ολοκλήρωσης του στιγμιαίου ρυθμού βροχόπτωσης. Σε αυτόν θα πρέπει να ανάγονται και τυχόν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, που αν υπάρχουν η χρήση τους συνιστάται. Διαδικασία για τη μετατροπή μεγαλύτερων χρόνων ολοκλήρωσης περιέχεται επίσης στη σύσταση, ενώ θα πρέπει η συλλογή των πειραματικών δεδομένων να εκτείνεται σε μια μεγάλη χρονική περίοδο, τυπικά μεγαλύτερη των 3 ετών.

Για τον υπολογισμό χρησιμοποιούνται τα στοιχεία της βάσης δεδομένων ERA-40 του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μετεωρολογίας (ECMWF), που περιλαμβάνονται στα ψηφιακά αρχεία ESARAIN_PR6_v5.TXT, ESARAIN_MT_v5.TXT, ESARAIN_BETA_v5.TXT, ESARAINLAT_v5.TXT και ESARAINLON_v5.TXT, που είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα της ITU.

Βήμα 1: Εξαγωγή των παραμέτρων P_{r6} , M_T και β για τα τέσσερα πλησιέστερα σημεία στο γεωγραφικό πλάτος και μήκος της επιθυμητής θέσης.

Βήμα 2: Από τις τιμές των παραμέτρων P_{r6} , M_T και β για τα τέσσερα πλησιέστερα σημεία υπολογισμός των τιμών P_{r6} , M_T και β για τη συγκεκριμένη τοποθεσία με μέθοδο διγραμμικής παρεμβολής (όπως περιγράφεται στη σύσταση P. 1144)

Βήμα 3: Μετατροπή των τιμών M_T και β σε M_c και M_s ως ακολούθως:

$$M_c = \beta M_T \quad (\text{B1})$$

$$M_s = (1 - \beta) M_T \quad (\text{B2})$$

Βήμα 4: Υπολογισμός της πιθανότητας βροχής P_0 με τη σχέση:

$$P_0 = P_{r6} \left(1 - e^{-0.0079 \frac{M_s}{P_{r6}}} \right) \quad (\text{B3})$$

Αν η τιμή P_{r6} είναι μηδέν η πιθανότητα βροχής είναι μηδενική και δεν απαιτείται η εκτέλεση των επόμενων βημάτων.

Βήμα 5: Υπολογισμός του ρυθμού βροχόπτωσης R_p (mm/h) που υπερβαίνεται σε ποσοστό χρόνου $p\%$ του μέσου έτους με $p \leq P_0$ ως εξής:

$$R_p = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (\text{B4})$$

όπου

$$A = ab \quad (\text{B5})$$

$$B = a + c \ln\left(\frac{p}{P_0}\right) \quad (\text{B6})$$

$$C = \ln\left(\frac{p}{P_0}\right) \quad (\text{B7})$$

$$a = 1.09 \quad (\text{B8})$$

$$b = \frac{M_c + M_s}{21797P_0} \quad (\text{B9})$$

$$c = 26.02b \quad (\text{B10})$$

Παράρτημα Γ

Μακροπρόθεσμη Κλιμάκωση Συχνότητας (Μοντέλο ITU-R P.618-10)

Η μέθοδος υπολογισμού των στατιστικών χαρακτηριστικών της απόσβεσης λόγω βροχής της σύστασης P.618-10, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα Α αποτελεί μια γενική μέθοδο που λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση των αποτελεσμάτων στα χαρακτηριστικά της ζεύξης και συγκεκριμένα στη γωνία ανύψωσης, στην πόλωση και στη συχνότητα. Κατά αυτή την έννοια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση της εξάρτησης ως προς τις παραμέτρους αυτές. Ωστόσο αν υφίστανται αξιόπιστα πειραματικά δεδομένα για την απόσβεση λόγω βροχής σε μια δεδομένη συχνότητα συνιστάται η χρήση των πειραματικών δεδομένων με τη μέθοδο κλιμάκωσης στην επιθυμητή συχνότητα. Προτείνεται λοιπόν στη σύσταση P. 618-10 η χρήση της εξής εμπειρικής σχέσης που συσχετίζει το λόγο των τιμών της απόσβεσης με τη συχνότητα και την απόσβεση για την περιοχή συχνοτήτων 7-55 GHz:

$$A_2 = A_1 \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right)^{1-H(\varphi_1, \varphi_2, A_1)} \quad (\Gamma 1)$$

όπου

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

και

$$H(\varphi_1, \varphi_2, A_1) = 1.12 \times 10^{-3} \left(\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \right)^{0.5} (\varphi_1 A_1)^{0.55} \quad (\Gamma 3)$$

Οι τιμές A_1, A_2 είναι οι ισοπίθανες τιμές απόσβεσης στις συχνότητες f_1, f_2 αντίστοιχα.

Παράρτημα Δ

Στατική μελέτη της απόσβεσης λόγω βροχής με το μοντέλο συνεκτικών βροχοπυρήνων και της προσέγγισης με λογαριθμοκανονική κατανομή.

Εδώ θα περιγραφεί με συντομία η μέθοδος στατικής μελέτης της απόσβεσης λόγω βροχής. Αναφέρονται συνοπτικά ο τρόπος υπολογισμού των στατιστικών χαρακτηριστικών πρώτης τάξης της απόσβεσης λόγω βροχής καθώς και η χωρική συσχέτιση μεταξύ δύο διαφορετικών τοποθεσιών.

Η ένταση βροχόπτωσης είναι μια χωροχρονική στοχαστική διαδικασία. Έστω $R(x,t)$ η σημειακή ένταση βροχόπτωσης και έστω $a(x,t)$ η απόσβεση λόγω βροχής σε λογαριθμική κλίμακα (dB) στο σημείο x , όπου με x συμβολίζεται η χωρική μεταβλητή. Για την περίπτωση μελέτης της απόσβεσης σε καθορισμένα σημεία του χώρου χρησιμοποιούμε δείκτες πχ $a_i(t)$. Επίσης έστω $A_0(x,t)$ η ειδική απόσβεση, δηλαδή η απόσβεση που προκαλεί η βροχή ανά μήκος ζεύξης στο σημείο x τη χρονική στιγμή t .

Θεωρούμε ότι η R είναι στάσιμη χρονικά και χωρικά για μια ευρεία γεωγραφική περιοχή. Επίσης από τα στατιστικά στοιχεία μακρού χρονικού διαστήματος (long term) της βροχόπτωσης, θεωρούμε ότι ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή με παραμέτρους $\ln R_m = \mu_{\ln R}$ και $S_r = \sigma_{\ln R}$ (η μέση τιμή και τυπική απόκλιση της κανονικής $\ln R$).

Η ειδική απόσβεση A_0 συνδέεται με τη σημειακή ένταση βροχόπτωσης με τη γνωστή σχέση $A_0 = aR^b$, όπου οι συντελεστές a, b εξαρτώνται από τη συχνότητα, την πόλωση και τις παραμέτρους, που αφορούν τη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής. Επίσης θεωρούμε ότι και η απόσβεση ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή και προκειμένου για διαφορική λήψη την από κοινού λογαριθμοκανονική κατανομή.

Με δεδομένες τις στατιστικές παραμέτρους $\ln R_m$ και S_r της κανονικής τ.μ. $\ln R$ υπολογίζονται οι στατιστικές παράμετροι $\sigma_{a_1}, \mu_{a_1}, \sigma_{a_2}, \mu_{a_2}$ των λογαριθμοκανονικών τ.μ. a_1 και a_2 και μέσω αυτών οι παράμετροι $\ln a_{m_1}, S_{a_1} = \sigma_{\ln a_1}, \ln a_{m_2}, S_{a_2} = \sigma_{\ln a_2}$ των κανονικών τ.μ. $\ln a_1$ και $\ln a_2$.

Ο υπολογισμός αυτός ακολουθεί τα εξής γνωστά βήματα:

Βήμα 1. Από τα στατιστικά δεδομένα $\ln R_m$ και $S_r = \sigma_{\ln R}$ της σημειακής έντασης βροχόπτωσης R για τη δεδομένη γεωγραφική περιοχή και την υπόθεση της λογαριθμοκανονικής κατανομής υπολογίζονται οι ροπές $m_b = E\{R^b\}$ και $m_{2b} = E\{R^{2b}\}$. Αφού $m_b = E\{R^b\} = E\{e^{b \ln R}\}$, από τη ροπογεννήτρια της κανονικής τ.μ. $\ln R$ είναι

$$\Phi(s) = E\{e^{s \ln R}\} = \exp\left\{s \ln R_m + \frac{1}{2} S_r^2 s^2\right\} \quad (\Delta 1)$$

Άρα

$$m_b = E\{e^{b \ln R}\} = \Phi(b) = \exp\left\{b \ln R_m + \frac{1}{2} S_r^2 b^2\right\} = R_m^b \exp\left\{\frac{S_r^2 b^2}{2}\right\} \quad (\Delta 2)$$

και

$$m_{2b} = \Phi(2b) = R_m^{2b} \exp\{2S_r^2 b^2\} \quad (\Delta 3)$$

Βήμα 2. Υπολογίζονται η μέση τιμή και η διακύμανση της λογαριθμοκανονικής τ.μ. της ειδικής απόσβεσης A_0 με βάση τους τύπους

$$\mu_0 = E\{aR^b\} = am_b \quad (\Delta 4)$$

και

$$\sigma_0^2 = E\{A_0^2\} - \mu_0^2 = a^2 m_{2b} - \mu_0^2 = a^2 (m_{2b} - m_b^2) \quad (\Delta 5)$$

Βήμα 3. Για την κατανομή της απόσβεσης στη ζεύξη i , με δεδομένο ότι θεωρείται λογαριθμοκανονική, υπολογίζονται η μέση τιμή $\mu_{a_i} = E\{a_i\}$ και η διακύμανση της $\sigma_{a_i}^2 = E\{a_i^2\} - \mu_{a_i}^2$ με ολοκλήρωση της ειδικής απόσβεσης κατά μήκος του ραδιοβήματος. Έτσι προκύπτει

$$E\{a_i\} = \int_0^{L_{d_i}} E\{A_0\} dl = \mu_0 L_{d_i} \quad (\Delta 6)$$

και

$$E\{a_i^2\} = E\left\{\left(\int_0^{L_{d_i}} A_0 dl\right)^2\right\} = E\left\{\int_0^{L_{d_i}} \int_0^{L_{d_i}} A_0 A_0' dl dl'\right\} = \int_0^{L_{d_i}} \int_0^{L_{d_i}} E\{A_0 A_0'\} dl dl' \quad (\Delta 7)$$

Από τη σχέση όμως $\rho_{12} = \frac{E\{A_0 A_0'\} - \mu_0^2}{\sigma_0^2}$ του συντελεστή συσχέτισης των

ειδικών αποσβέσεων σε δύο σημεία, προκύπτει ότι

$$E\{a_i^2\} = \mu_0^2 L_{d_i}^2 + \sigma_0^2 H_i \quad (\Delta 8)$$

όπου H_i το ολοκλήρωμα του συντελεστή συσχέτισης των A_0, A'_0 κατά μήκος του ραδιοβήματος i , με την ολοκλήρωση για την περίπτωση δορυφορικής ζεύξης να γίνεται στην προβολή του ενεργού μήκους της ζεύξης σύμφωνα με την παραδοχή Crane. Η παραδοχή του Crane [Crane, 1980] θεωρεί ότι υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της βροχής στο κατακόρυφο και έτσι η απόσβεση λόγω βροχής κατά μήκος του κεκλιμένου ραδιοβήματος ανάγεται στην αντίστοιχη μιας υποθετικής επίγειας ζεύξης.

Ο υπολογισμός του ολοκληρώματος εξαρτάται από τη μοντελοποίηση του συντελεστή συσχέτισης ρ_{12} της ειδικής απόσβεσης. Σύμφωνα με την ημιεμπειρική σχέση του Lin ο συντελεστής περιγράφεται ως

$$\rho_{12} = \frac{G}{\sqrt{G^2 + d^2}} \quad (\Delta 9)$$

για δυο σημεία που απέχουν απόσταση d . Με τη σχέση αυτή το ολοκλήρωμα H_i υπολογίζεται ως

$$H_i(L) = 2LG \sinh^{-1} \left(\frac{L}{G} \right) + 2G^2 \left[1 - \sqrt{\left(\frac{L}{G} \right)^2 + 1} \right] \quad (\Delta 10)$$

όπου H_i το ολοκλήρωμα του συντελεστή συσχέτισης των A_0, A'_0 κατά μήκος του ραδιοβήματος i με την ολοκλήρωση να γίνεται στην περίπτωση δορυφορικής ζεύξης κατά μήκος της προβολής του ενεργού μήκους.

Βήμα 4. Υπολογίζονται τα ενεργά μήκη των ζεύξεων

Βήμα 5. Υπολογίζονται τα ολοκληρώματα H_i και προκύπτουν οι τιμές μ_{a_i} και σ_{a_i} .

Βήμα 6. Υπολογίζονται οι παράμετροι $\ln a_{m_i}$ και S_{a_i} των κανονικών τ.μ. $\ln a_i$ αφού οι παράμετροι $\mu_{a_i}, \sigma_{a_i}^2$ της λογαριθμοκανονικής a_i εκφράζονται συναρτήσει των $\ln a_{m_i}, S_{a_i}$ με χρήση της ροπογεννήτριας της κανονικής και συγκεκριμένα

$$\mu_{a_i} = E\{a_i\} = E\{e^{\ln a_i}\} = \Phi(1) = \exp\{\ln a_{m_i} + \frac{1}{2} S_{a_i}^2\} = a_{m_i} \exp\{\frac{1}{2} S_{a_i}^2\} \quad (\Delta 11)$$

και

$$\sigma_{a_i}^2 = E\{a_i^2\} - \mu_{a_i}^2 = \Phi(2) - \mu_{a_i}^2 = a_{m_i}^2 \exp\{S_{a_i}^2\} (\exp\{S_{a_i}^2\} - 1) \quad (\Delta 12)$$

Η λύση του συστήματος δίνει

$$S_{a_i}^2 = \ln \left(\frac{\sigma_{a_i}^2}{\mu_{a_i}^2} + 1 \right) \quad (\Delta 13)$$

και

$$a_{m_i} = \mu_{a_i} \exp \left\{ -\frac{1}{2} S_{a_i}^2 \right\} \quad (\Delta 14)$$

Βήμα 7. Για την περίπτωση της διαφορικής λήψης αφού έχουν υπολογιστεί οι παράμετροι $\ln a_{m_1}, S_{a_1}, \ln a_{m_2}, S_{a_2}$ των κανονικών τ.μ. $\ln a_1$ και $\ln a_2$ απαιτείται και ο συντελεστής συσχέτισης ρ_n μεταξύ τους, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ο τύπος της από κοινού λογαριθμοκανονικής κατανομής. Ο συντελεστής συσχέτισης ρ_n συνδέεται με το συντελεστή συσχέτισης ρ των λογαριθμοκανονικών τ.μ. A_1, A_2 μέσω της σχέσης

$$\rho_n = \frac{\ln \left(1 + \rho \sqrt{(\exp \{S_{a_1}^2\} - 1)(\exp \{S_{a_2}^2\} - 1)} \right)}{S_{a_1} S_{a_2}} \quad (\Delta 15)$$

η οποία προκύπτει από την ροπογεννήτρια της από κοινού κανονικής κατανομής. Ο συντελεστής συσχέτισης ρ των λογαριθμοκανονικών τ.μ. a_1, a_2 υπολογίζεται από τη γνωστή σχέση

$$\rho = \frac{E \{a_1 a_2\} - \mu_{a_1} \mu_{a_2}}{\sigma_{a_1} \sigma_{a_2}} \quad (\Delta 16)$$

Η τιμή $E \{a_1 a_2\}$ δίνεται από

$$\begin{aligned} E \{a_1 a_2\} &= E \left\{ \int_0^{L_{d_1}} A_0 dl \int_0^{L_{d_2}} A_0' dl' \right\} = E \left\{ \int_0^{L_{d_1}} \int_0^{L_{d_2}} A_0 A_0' dl dl' \right\} = \\ &= \int_0^{L_{d_1}} \int_0^{L_{d_2}} E \{A_0 A_0'\} dl dl' = \mu_0^2 L_{d_1} L_{d_2} + \sigma_0^2 H_{12} \end{aligned} \quad (\Delta 17)$$

οπότε τελικά προκύπτει ο τύπος

$$\rho = \frac{H_{12}}{\sqrt{H_1 H_2}} \quad (\Delta 18)$$

Το ολοκλήρωμα H_{12} είναι το διπλό ολοκλήρωμα του συντελεστή συσχέτισης της ειδικής απόσβεσης κατά μήκος δύο ραδιοβημάτων τα οποία ανάλογα με την περίπτωση επίγειας ή δορυφορικής ζεύξης και το πρόβλημα (πχ διαφορική λήψη ή μελέτη παρεμβολών) εμφανίζουν διαφορετική γεωμετρία. Μια αναλυτική περιγραφή

των διαφορετικών περιπτώσεων και ο υπολογισμός των αντίστοιχων ολοκληρωμάτων μπορεί να βρεθεί στο [Κανελλόπουλος, 1999].

Παράρτημα Ε

Κανονική και Λογαριθμοκανονική κατανομή.

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται μερικά γνωστά και χρήσιμα αποτελέσματα που αφορούν την κανονική και τη λογαριθμοκανονική κατανομή. Τα περισσότερα από αυτά μπορούν να βρεθούν στο [Papoulis-Pillai, 2002].

Για μια τ.μ. Y συμβολίζουμε ως m_Y , μ_Y και σ_Y τη διάμεσο, τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση αντίστοιχα. Επίσης συμβολίζουμε ως $p_Y(y)$ ή $p(y)$ όταν είναι προφανές τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Για δύο τ.μ. X, Y συμβολίζουμε με ως $Y|X$ τη δεσμευμένη κατανομή $Y|X=x$.

Μονοδιάστατη

Έστω κανονική τ.μ. $X : N(\mu, \sigma^2)$ και τ.μ. $Z = e^X$. Η Z είναι λογαριθμοκανονική και ισχύουν

$$\begin{aligned}m_Z &= e^\mu \\ \mu_Z &= e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \\ \sigma_Z^2 &= e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)\end{aligned}\tag{E1}$$

Οι αντίστοιχες πυκνότητες πιθανότητας δίνονται από

$$\begin{aligned}p(x) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \\ p(z) &= \frac{1}{z} p(\ln z) = \frac{1}{z\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln z - \mu)^2}{2\sigma^2}}\end{aligned}\tag{E2}$$

Δισδιάστατη

Έστω X, Y από κοινού κανονικές τ.μ. με παραμέτρους $\mu_X, \mu_Y, \sigma_X, \sigma_Y, r$, όπου r ο συντελεστής συσχέτισης. Η από κοινού πυκνότητα πιθανότητας $p_{XY}(x, y)$ δίνεται από τη σχέση

$$p_{XY}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_X\sigma_Y\sqrt{1-r^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-r^2)}\left(\frac{(x-\mu_X)^2}{\sigma_X^2} - 2r\frac{(x-\mu_X)(y-\mu_Y)}{\sigma_X\sigma_Y} + \frac{(y-\mu_Y)^2}{\sigma_Y^2}\right)\right\}\tag{E3}$$

Οι περιθώριες κατανομές $p_X(x)$ και $p_Y(y)$ είναι κανονικές και δίνονται από τις σχέσεις

$$p_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_X} e^{-\frac{(x-\mu_X)^2}{2\sigma_X^2}} \quad (E4)$$

$$p_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Y} e^{-\frac{(y-\mu_Y)^2}{2\sigma_Y^2}}$$

Η δεσμευμένη κατανομή $Y|X=x$ είναι κανονική και η πυκνότητα πιθανότητας είναι

$$p_{Y|X}(y|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{Y|X}} e^{-\frac{(y-\mu_{Y|X})^2}{2\sigma_{Y|X}^2}} \quad (E5)$$

όπου

$$\mu_{Y|X} = \mu_Y + r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (x - \mu_X) \quad (E6)$$

$$\sigma_{Y|X} = \sigma_Y \sqrt{1 - r^2}$$

Θεωρούμε τώρα τις τ.μ. $A_1 = e^X$ και $A_2 = e^Y$. Οι A_1, A_2 είναι από κοινού λογαριθμοκανονικές και ισχύουν τα ακόλουθα:

Η από κοινού κατανομή τους δίνεται από την πυκνότητα πιθανότητας

$$p_{A_1, A_2}(a_1, a_2) = \frac{1}{a_1 a_2} p_{XY}(\ln a_1, \ln a_2) \quad (E7)$$

όπου $p_{XY}(x, y)$ η πυκνότητα πιθανότητας των από κοινού κανονικών X, Y της (E3).

Αντίστοιχα οι περιθώριες κατανομές είναι λογαριθμοκανονικές και δίνονται σε αντιστοιχία με τις (E2), (E4) από τις σχέσεις

$$p_{A_1}(a_1) = \frac{1}{a_1} p_X(\ln a_1) \quad (E8)$$

$$p_{A_2}(a_2) = \frac{1}{a_2} p_Y(\ln a_2)$$

Η στατιστικές τους παράμετροι συνδέονται με αυτές των κανονικών X, Y με τη σχέση (E1) αντίστοιχα.

Η δεσμευμένη κατανομή $A_2|A_1=a_1$ είναι επίσης λογαριθμοκανονική και συνδέεται με την πυκνότητα πιθανότητας της $Y|X=x$ της (E5) με τη σχέση

$$p_{A_2|A_1}(a_2 | a_1) = \frac{1}{a_2} p_{Y|X}(\ln a_2 | \ln a_1) \quad (\text{E9})$$

Με βάση τις σχέσεις (E1) και (E6) οι στατιστικές της παράμετροι δίνονται από τις σχέσεις

$$\begin{aligned} m_{A_2|A_1} &= e^{\frac{\mu_Y + r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (\ln a_1 - \mu_X)}{\sigma_X}} \\ \mu_{A_2|A_1} &= e^{\frac{\mu_Y + r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (\ln a_1 - \mu_X) + \frac{1}{2} \sigma_Y^2 (1-r^2)}{\sigma_X}} \\ \sigma_{A_2|A_1}^2 &= e^{\frac{2\mu_Y + 2r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} (\ln a_1 - \mu_X) + \sigma_Y^2 (1-r^2)}{\sigma_X}} (e^{\sigma_Y^2 (1-r^2)} - 1) \end{aligned} \quad (\text{E10})$$

Πολυδιάστατη

Έστω n τ.μ. X_1, \dots, X_n . Συμβολίζουμε με $\mathbf{X} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]$ το τυχαίο διάνυσμα με συνιστώσες τις τ.μ.. Οι τ.μ. είναι από κοινού κανονικές όταν οποιοσδήποτε γραμμικός συνδυασμός τους είναι κανονική τ.μ. Συμβολίζουμε με $\boldsymbol{\mu}$ το μέσο διάνυσμα και με $\boldsymbol{\Sigma}$ τον πίνακα συνδιακύμανσης, δηλαδή

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\mu} &= E[\mathbf{X}] \\ \boldsymbol{\Sigma} &= E[(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu})^T] \end{aligned} \quad (\text{E11})$$

Όταν η ορίζουσα του πίνακα συνδιακύμανσης είναι θετική η κατανομή της \mathbf{X} είναι μη ιδιόμορφη και έχει πυκνότητα πιθανότητας που δίνεται από τη σχέση

$$p_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \sqrt{\det \boldsymbol{\Sigma}}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})} \quad (\text{E12})$$

Η πολυδιάστατη κανονική κατανομή χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα ότι η δεσμευμένη κατανομή δεδομένου οποιουδήποτε υποσυνόλου των από κοινού κανονικών τ.μ. είναι επίσης κανονική. Θεωρούμε λοιπόν τα τυχαία διανύσματα $\mathbf{X} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n]$ και $\mathbf{Y} = [Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_m]$ και θεωρούμε ότι είναι από κοινού κανονικά, δηλαδή το διάνυσμα $\mathbf{Z} = [X_1 \ X_2 \ \dots \ X_n \ Y_1 \ Y_2 \ \dots \ Y_m]$ είναι κανονικό.

Χρησιμοποιούμε τους εξής συμβολισμούς

$$\begin{aligned} m_{\mathbf{X}} &= E[\mathbf{X}] \\ m_{\mathbf{Y}} &= E[\mathbf{Y}] \\ \mathbf{m} &= E[\mathbf{Z}] = (m_{\mathbf{X}} \ m_{\mathbf{Y}})' \end{aligned} \quad (\text{E13})$$

για τις μέσες τιμές και τους εξής για τους πίνακες συνδιακύμανσης

$$\begin{aligned}
\Sigma_{XX} &= E[(\mathbf{X} - \mathbf{m}_X)(\mathbf{X} - \mathbf{m}_X)^T] \\
\Sigma_{YY} &= E[(\mathbf{Y} - \mathbf{m}_Y)(\mathbf{Y} - \mathbf{m}_Y)^T] \\
\Sigma_{XY} &= E[(\mathbf{X} - \mathbf{m}_X)(\mathbf{Y} - \mathbf{m}_Y)^T] \\
\Sigma_{YX} &= E[(\mathbf{Y} - \mathbf{m}_Y)(\mathbf{X} - \mathbf{m}_X)^T] \\
\Sigma &= E[(\mathbf{Z} - \mathbf{m}_Z)(\mathbf{Z} - \mathbf{m}_Z)^T] = \begin{bmatrix} \Sigma_{XX} & \Sigma_{XY} \\ \Sigma_{YX} & \Sigma_{YY} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{E14}$$

Επίσης είναι προφανές ότι ισχύει $\Sigma_{XY} = \Sigma_{YX}^T$.

Αν η ορίζουσα του πίνακα Σ είναι θετική, τότε η πυκνότητα πιθανότητας της \mathbf{Z} δίνεται σε αντιστοιχία με την (E12) ως

$$p_Z(\mathbf{z}) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m+n}{2}} \sqrt{\det \Sigma}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{z}-\mathbf{m})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{z}-\mathbf{m})} \tag{E15}$$

Αφού το διάνυσμα \mathbf{Z} είναι κανονικό, τότε και οποιοδήποτε διάνυσμα με συνιστώσες υποσύνολο των συνιστωσών του \mathbf{Z} είναι επίσης κανονικό. Έτσι τα \mathbf{X}, \mathbf{Y} είναι κανονικά με αντίστοιχες πυκνότητες πιθανότητας

$$\begin{aligned}
p_X(\mathbf{x}) &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{n}{2}} \sqrt{\det \Sigma_{XX}}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x}-\mathbf{m}_X)^T \Sigma_{XX}^{-1}(\mathbf{x}-\mathbf{m}_X)} \\
p_Y(\mathbf{y}) &= \frac{1}{(2\pi)^{\frac{m}{2}} \sqrt{\det \Sigma_{YY}}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{y}-\mathbf{m}_Y)^T \Sigma_{YY}^{-1}(\mathbf{y}-\mathbf{m}_Y)}
\end{aligned} \tag{E16}$$

Η δεσμευμένη κατανομή της \mathbf{X} για μια δοθείσα τιμή $\mathbf{Y} = \mathbf{y}$ είναι επίσης κανονική με μέση τιμή

$$S \tag{E17}$$

και με πίνακα συνδιακύμανσης

$$\Sigma_{X|Y} = \Sigma_{XX} - \Sigma_{XY} \Sigma_{YY}^{-1} \Sigma_{YX} \tag{E18}$$

Κατανομή διαφοράς δύο κανονικών τ.μ. και αντίστοιχης λογαριθμοκανονικής

Θεωρούμε τις κανονικές τ.μ. X, Y με γνωστή την από κοινού κατανομή τους με παραμέτρους $\mu_X, \mu_Y, \sigma_X, \sigma_Y, r$. Θεωρούμε τις τ.μ.

$$Z = Y - X \tag{E19}$$

και

$$R = e^Z, \quad A_1 = e^X, \quad A_2 = e^Y \tag{E20}$$

Προφανώς ισχύει $Z = \ln R$ και $R = \frac{A_2}{A_1}$.

Η Z ως διαφορά δύο κανονικών τ.μ. είναι κανονική και η πυκνότητα πιθανότητάς της δίνεται ως

$$p_Z(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_{XY}(x, z+x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} e^{-\frac{(z-\mu_z)^2}{2\sigma_z^2}} \quad (\text{E21})$$

όπου

$$\begin{aligned} \mu_Z &= \mu_Y - \mu_X \\ \sigma_Z^2 &= \sigma_X^2 + \sigma_Y^2 - 2r\sigma_X\sigma_Y \end{aligned} \quad (\text{E22})$$

Η από κοινού κατανομή των Z, X είναι από κοινού κανονική και έχει πυκνότητα πιθανότητας

$$p_{ZX}(z, x) = p_{XY}(x, z+x) \quad (\text{E23})$$

Η τ.μ. $R = e^Z$ είναι λογαριθμοκανονική και σε αντιστοιχία με τις (E2) και (E1) και (E21) η πυκνότητα πιθανότητας δίνεται από

$$p_R(r) = \frac{1}{r} p_Z(\ln r) \quad (\text{E24})$$

και οι στατιστικές της παράμετροι από

$$\begin{aligned} m_R &= e^{\mu_Y - \mu_X} \\ \mu_R &= e^{\mu_Y - \mu_X + \frac{1}{2}(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 - 2r\sigma_X\sigma_Y)} \\ \sigma_R^2 &= e^{2(\mu_Y - \mu_X) + (\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 - 2r\sigma_X\sigma_Y)} (e^{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 - 2r\sigma_X\sigma_Y} - 1) \end{aligned} \quad (\text{E25})$$

Η δεσμευμένη κατανομή $Z | X = x$ είναι κανονική και η πυκνότητα πιθανότητας δίνεται από

$$p_{Z|X}(z | x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{Z|X}}} e^{-\frac{(z-\mu_{Z|X})^2}{2\sigma_{Z|X}^2}} \quad (\text{E26})$$

όπου

$$\begin{aligned} \mu_{Z|X} &= \left(r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} - 1\right)x + \mu_Y - r \frac{\sigma_Y}{\sigma_X} \mu_X = \mu_{Y|X} - x \\ \sigma_{Z|X}^2 &= \sigma_Y^2(1 - r^2) = \sigma_{Y|X}^2 \end{aligned} \quad (\text{E27})$$

Αντίστοιχα η δεσμευμένη κατανομή $R | A_1 = a_1$ είναι λογαριθμοκανονική με πυκνότητα πιθανότητας

$$p_{R|A_1}(r | a_1) = \frac{1}{r} p_{Z|X}(\ln r | \ln a_1) \quad (\text{E28})$$

με στατιστικές παραμέτρους

$$\begin{aligned} m_{R|A_1} &= e^{\frac{r \sigma_Y (\ln a_1 - \mu_X) + \mu_Y - \ln a_1}{\sigma_X}} \\ \mu_{R|A_1} &= e^{\frac{r \sigma_Y (\ln a_1 - \mu_X) + \mu_Y - \ln a_1 + \frac{1}{2} \sigma_Y^2 (1-r^2)}{\sigma_X}} \\ \sigma_{R|A_1}^2 &= e^{\frac{2r \sigma_Y (\ln a_1 - \mu_X) + 2\mu_Y - 2\ln a_1 + \sigma_Y^2 (1-r^2)}{\sigma_X}} (e^{\sigma_Y^2 (1-r^2)} - 1) \end{aligned} \quad (\text{E29})$$

Παράρτημα Στ

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές έννοιες της θεωρίας τμήσης στάθμης των στοχαστικών ανελίξεων με βάση την κλασσική πλέον αναφορά στο θέμα των [Cramer-Leadbetter, 1967]

Τμήση στάθμης (Level Crossing) και διάρκεια διαλείψεων

Στάσιμες ροές ενδεχομένων

Πριν παρουσιασθούν τα βασικά αποτελέσματα της στατιστικής μελέτης των σημείων τομής μιας στάθμης από μια στοχαστική ανέλιξη, θα αναφερθούν συνοπτικά μερικές βασικές έννοιες που αφορούν τις ροές ενδεχομένων.

Μια ροή ενδεχομένων είναι μια σημειακή στοχαστική ανέλιξη. Οι σημειακές στοχαστικές ανελίξεις είναι ανελίξεις οι οποίες αναπαριστούν την διαδοχική εμφάνιση κάποιων ενδεχομένων στο χρόνο. Μαθηματικά θεμελιώνονται μέσω των τυχαίων μέτρων απαρίθμησης. Έτσι πχ η ανέλιξη $\xi(t)$ ορίζεται ως ο αριθμός εμφάνισης των ενδεχομένων στο διάστημα $(0, t]$, δηλαδή $\xi(t) = N(0, t]$. Ωστόσο εδώ δεν θα χρησιμοποιηθεί η θεωρία αυτή, αλλά θα παρουσιαστούν μερικές βασικές έννοιες μιας τέτοιας ανελίξης, που θα την ονομάζουμε ροή ενδεχομένων.

Θεωρούμε λοιπόν ότι τυχαία ενδεχόμενα συμβαίνουν στον χρόνο και γράφουμε $N(s, t)$ για τον αριθμό των ενδεχομένων στο διάστημα $(s, t]$.

Η ροή των ενδεχομένων λέγεται στάσιμη αν για κάθε πεπερασμένο σύνολο διαστημάτων $(s_1, t_1], \dots, (s_k, t_k]$ και οποιουδήποτε ακέραιους r_1, \dots, r_k και για κάθε $\tau > 0$ ισχύει

$$P\{N(s_i + \tau, t_i + \tau) = r_i, i = 1, \dots, k\} = P\{N(s_i, t_i) = r_i, i = 1, \dots, k\} \quad (\Sigma\tau 1)$$

Η μέση πυκνότητα σημείων μιας στάσιμης ροής ενδεχομένων ορίζεται ως

$$m = E(N(0, 1]) \quad (\Sigma\tau 2)$$

Μάλιστα ορίζοντας τη συνάρτηση

$$m(t) = E(N(0, t]) \quad (\Sigma\tau 3)$$

εύκολα μπορεί να δειχθεί ότι

$$m(t) = mt \quad (\Sigma\tau 4)$$

Ένας άλλος τρόπος περιγραφής του ρυθμού εμφάνισης των ενδεχομένων μιας στάσιμης ροής ενδεχομένων είναι μέσω της έντασης της σημειακής ανέλιξης που ορίζεται ως εξής:

Για μια στάσιμη ροή ενδεχομένων το όριο

$$\lambda = \lim_{h \downarrow 0} \frac{\Pr\{N(0, h] > 0\}}{h} \quad (\Sigma\tau 5)$$

υπάρχει, έστω και αν είναι άπειρο. Το όριο αυτό ονομάζεται ένταση της ροής.

Με βάση τον προηγούμενο ορισμό και την ιδιότητα της ύπαρξης του ορίου μπορούμε να γράψουμε στην περίπτωση που το λ είναι πεπερασμένο

$$\begin{aligned} \Pr\{N(x, x+h] > 0\} &= \Pr\{\text{υπάρχει τουλάχιστον ένα σημείο στο } (x, x+h]\} \\ &= \lambda h + o(h) \quad (h \downarrow 0) \end{aligned} \quad (\Sigma\tau 6)$$

Τα δύο αυτά μέτρα εμφάνισης των σημείων, δηλαδή η μέση πυκνότητα και η ένταση συμπίπτουν όταν η ροή δεδομένων πληρεί κάποιες προϋποθέσεις.

Για την διερεύνηση της μεταξύ τους σχέσης εισάγουμε επιπλέον δύο έννοιες, αυτές της απλής σημειακής ανέλιξης και της διατάξιμης σημειακής ανέλιξης.

Μια σημειακή ανέλιξη λέγεται απλή όταν

$$\Pr\{N(\{t\}) = 0 \text{ ή } 1 \text{ για κάθε } t\} = 1 \quad (\Sigma\tau 7)$$

Δηλαδή μια απλή σημειακή ανέλιξη αποκλείεται να έχει δύο σημεία στο ίδιο σημείο του χρονικού άξονα, ή διαφορετική η πιθανότητα ότι δύο ή περισσότερα ενδεχόμενα συμβαίνουν ταυτόχρονα είναι μηδενική.

Μια στάσιμη στοχαστική ανέλιξη λέγεται κανονική (regular) ή διατάξιμη (orderly) αν

$$\Pr\{N(0, h] > 1\} = o(h) \quad (h \downarrow 0) \quad (\Sigma\tau 8)$$

Η σχέση αυτή γράφεται και ως $\lim_{h \downarrow 0} \frac{\Pr\{N(0, h] > 1\}}{h} = 0$

Τώρα οι ανωτέρω έννοιες, δηλαδή της μέσης πυκνότητας, της έντασης, της απλότητας και της κανονικότητας συνδέονται μεταξύ τους ως εξής:

Αν μια στάσιμη ροή ενδεχομένων είναι κανονική, τότε είναι απλή.

Λήμμα Dobrushin. Μια στάσιμη και απλή ροή ενδεχομένων πεπερασμένης έντασης είναι κανονική.

Θεώρημα Korolyuk. Για μια στάσιμη απλή και κανονική ροή ενδεχομένων ισχύει $\lambda = m$, πεπερασμένα ή άπειρα.

Τμήση στάθμης

Η στατιστική περιγραφή των σημείων που μια στοχαστική ανέλιξη διέρχεται από μια στάθμη u βρίσκει σημαντικές εφαρμογές. Το κύριο αποτέλεσμα αφορά τον υπολογισμό της μέσης τιμής των σημείων τομής σε ένα διάστημα $(0, T]$ για μια στάσιμη και κανονική στοχαστική ανέλιξη με μηδενική μέση τιμή και είναι το εξής:

$$E\{N(0, T]\} = \frac{T}{\pi} \sqrt{\frac{-R''(0)}{R(0)}} e^{-\frac{u^2}{2R(0)}} \quad (\Sigma\tau 9)$$

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις $R_0^{(2i)} = \frac{(-1)^i}{2\pi} S_{2i}$, $R_0^{(m)} = r_0^{(m)}$, $S_m = 2\pi\lambda_m$, $r_0^{(2i)} = (-1)^i \lambda_{2i}$, $\sigma_x^2 = R(0)$ και $\sigma_x'^2 = -R''(0)$ η (Στ9) μπορεί να γραφεί με τις εξής ισοδύναμες μορφές

$$E\{N(0, T]\} = \frac{T}{\pi} \sqrt{\frac{-r''(0)}{r(0)}} e^{-\frac{u^2}{2r(0)}} = \frac{T}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} e^{-\frac{u^2}{2\lambda_0}} = \frac{T}{\pi} \sqrt{\frac{S_2}{S_0}} e^{-\frac{\pi u^2}{S_0}} = \frac{T}{\pi} \frac{\sigma_x'}{\sigma_x} e^{-\frac{u^2}{2\sigma_x^2}} \quad (\Sigma\tau 10)$$

Στην ανωτέρω σχέση προϋπόθεση είναι η ανέλιξη να έχει πεπερασμένη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης στο 0, δηλαδή $r''(0) < \infty$ ή ισοδύναμα πεπερασμένη δεύτερη φασματική ροπή, δηλαδή $\lambda_2 < \infty$. Αν αυτό δεν συμβαίνει η μέση τιμή των σημείων τομής είναι άπειρη.

Επίσης λόγω της στασιμότητας από την (Στ4) έχουμε ότι

$$E\{N(0, T]\} = TE\{N(0, 1]\} \quad (\Sigma\tau 11)$$

Τα σημεία στα οποία η ανέλιξη διέρχεται από τη στάθμη u μπορούν περαιτέρω να διακριθούν σε διελεύσεις προς τα άνω (upcrossings) και διελεύσεις προς τα κάτω (downcrossings). Συμβολίζοντας με $E\{U(0, T]\}$ και $E\{D(0, T]\}$ τις μέσες τιμές των σημείων αυτών στο διάστημα $(0, T]$ μπορεί να αποδειχθεί με την προϋπόθεση πάντα ότι $\lambda_2 < \infty$ ότι

$$E\{U(0,T]\} = E\{D(0,T]\} = \frac{1}{2} E\{N(0,T]\} \quad (\Sigma\tau 12)$$

Διάρκεια Διαλείψεων

Ενδιαφέρον παρουσιάζει στις εφαρμογές η στατιστική περιγραφή των διαστημάτων στα οποία η ανέλιξη έχει συνεχώς τιμές υπεράνω μιας στάθμης u ή χαμηλότερα της u . Αυτά τα διαστήματα είναι διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών διελεύσεων της ανέλιξης από την εν λόγω στάθμη u .

Τα διαστήματα αυτά μελετώνται στατιστικά μέσω της δεσμευμένης πιθανότητας να μην υπάρχει σημείο τμήσης της στάθμης στο διάστημα $(0,T]$ δεδομένου ότι υπάρχει διέλευση στο σημείο $t=0$. Ωστόσο με δεδομένο ότι η πιθανότητα διέλευσης στο σημείο $t=0$ είναι ένα ενδεχόμενο μηδενικής πιθανότητας, η δεσμευμένη αυτή πιθανότητα αναφέρεται ως προς ένα ενδεχόμενο με μηδενική πιθανότητα και άρα σπουδαίο ρόλο παίζει ο τρόπος ορισμού της.

Αν A, B είναι δύο ενδεχόμενα με το A να είναι ενδεχόμενο μηδενικής πιθανότητας, τότε ένας συνήθης τρόπος ορισμού της δεσμευμένης πιθανότητας είναι ως το όριο $P(B|A) = \lim_{n \rightarrow \infty} P(B|A_n)$ εφόσον υπάρχει της ακολουθίας ενδεχομένων A_n μη μηδενικής πιθανότητας, τα οποία συγκλίνουν στο A . Ωστόσο το αποτέλεσμα εξαρτάται από τον τρόπο ορισμού της ακολουθίας A_n .

Ειδικά για τα ενδεχόμενα $\xi(\tau) \in S$ δεσμευμένα ως προς την τμήση κάποιας στάθμης u από τη στοχαστική ανέλιξη ξ για $t=0$ αυτά έχουν τη δεσμευμένη πιθανότητα $P(\xi(\tau) \in S | \xi(0) = u)$. Θεωρούμε την ακολουθία ενδεχομένων $u - \delta < \xi(0) \leq u$. Αν υποθέσουμε ότι η $\xi(0)$ έχει πυκνότητα πιθανότητας $f(x)$ και οι $\xi(0), \xi(\tau)$ την από κοινού πυκνότητα πιθανότητας $f(x, y)$ τότε υπολογίζεται η πιθανότητα $P(\xi(\tau) \in S | \xi(0) \in (u - \delta, u])$ σύμφωνα με τον κλασικό τύπο της δεσμευμένης πιθανότητας ως

$$P(\xi(\tau) \in S | \xi(0) = u) = \frac{\int_{S} \int_{u-\delta}^u f(x, y) dx dy}{\int_{u-\delta}^u f(x) dx} \quad (\Sigma\tau 13)$$

Παίρνοντας το όριο καθώς $\delta \rightarrow 0$ τότε ένας τρόπος ορισμού της ζητούμενης δεσμευμένης πιθανότητας θα ήταν με την ολοκλήρωση της δεσμευμένης πυκνότητας $f(u, y) / f(u)$ στο σύνολο S , δηλαδή

$$P_1(S | u) = P(\xi(\tau) \in S | \xi(0) = u) = \int_S \frac{f(u, y)}{f(u)} dy \quad (\Sigma\tau 14)$$

Ωστόσο ο τρόπος αυτός ορισμού γνωστός και ως δέσμευση ως προς το κατακόρυφο δεν ικανοποιεί καθώς η δεσμευμένη πυκνότητα που ορίζεται με βάση τη σχέση

$$P(\xi(\tau) \in S, \xi(0) = R) = \int_R P_1(S | u) f(u) du \quad (\Sigma\tau 15)$$

δηλαδή για κάθε τιμή της u χωρίς να έχουν σημασία οι μεμονωμένες τιμές, ενώ εδώ ενδιαφέρει μια συγκεκριμένη τιμή. Έτσι χρησιμοποιείται η λεγόμενη δέσμευση ως προς το οριζόντιο. Σύμφωνα με αυτήν θεωρούμε τα ενδεχόμενα $\xi(t) = u$ για κάποιο t στο διάστημα $[-\delta, 0]$ και ορίζουμε τη ζητούμενη δεσμευμένη πιθανότητα ως

$$P_2(S | u) = \lim_{\delta \rightarrow 0} P(\xi(\tau) \in S | \xi(t) = 0 \text{ για κάποιο } t \in [-\delta, 0]) \quad (\Sigma\tau 16)$$

Η δέσμευση ως προς το οριζόντιο αποδεικνύεται ότι πληρεί επιπλέον και εργοδικές ιδιότητες, δηλαδή η εμπειρική δεσμευμένη κατανομή τείνει σε αυτήν, ενώ είναι σε άμεση σχέση με τις στάσιμες ροές ενδεχομένων. Για την ακρίβεια τα προβλήματα μελέτης των τμήσεων μιας στάθμης μιας στοχαστικής ανέλιξης ισοδυναμούν με προβλήματα εμφάνισης ενδεχομένων, που περιγράφονται με τις στάσιμες ροές ενδεχομένων, δηλαδή τις σημειακές στοχαστικές ανελίξεις.

Θεωρούμε τώρα μια στάσιμη ανέλιξη $\xi(t)$ και ενδιαφερόμαστε για το διάστημα μεταξύ διαδοχικών τμήσεων προς τα πάνω (upcrossings) μιας στάθμης u και για το μήκος των αποδράσεων (excursion) υπεράνω της στάθμης u . Το πρόβλημα της διάρκειας διαλείψεων είναι ισοδύναμο με το μήκος των αποδράσεων χαμηλότερα μιας στάθμης κατωφλίου.

Οι τμήσεις προς τα άνω της στάθμης u αποτελούν μια στάσιμη ροή ενδεχομένων. Σύμφωνα με το θεώρημα Korolyuk η πιθανότητα τουλάχιστον μιας διέλευσης προς τα άνω στο χρόνο t δίνεται από τη σχέση

$$\omega(t) = \mu t + o(t) \quad (\Sigma\tau 17)$$

όπου μ ο μέσος ρυθμός τμήσης της στάθμης u προς τα άνω.

Συμβολίζουμε με $U(s, t)$, $D(s, t)$ και $C(s, t)$ τον αριθμό των διελεύσεων προς τα άνω, τα κάτω και γενικά της ανέλιξης $\xi(t)$ από τη στάθμη u στο διάστημα $[s, t]$. Ορίζοντας τώρα για κάποιο $\tau > 0$ και για κάθε ακέραιο $k \geq 0$ την ποσότητα

$$H_k(\tau, t) = P(U(-\tau, 0) \geq 1, C(0, t) \leq k) \quad (\Sigma\tau 18)$$

αποδεικνύεται ότι ο λόγος $H_k(\tau, t) / \omega(\tau)$ τείνει σε ένα όριο καθώς $\tau \rightarrow 0$. Το όριο αυτό $\Phi_k(t)$ αποτελεί τη δεσμευμένη πιθανότητα ότι δεν συμβαίνουν περισσότερες από k τμήσεις της στάθμης u στο διάστημα $(0, t)$ δοθείσας μιας διέλευσης προς τα άνω στον χρόνο $t = 0$. Ορίζοντας τις ποσότητες

$$F_k(t) = 1 - \Phi_{k-1}(t) \quad (\Sigma\tau 19)$$

βλέπουμε ότι η $F_1(t)$ αποτελεί την πιθανότητα ότι θα συμβεί τουλάχιστον μια τμήση στο διάστημα $(0, t)$ δοθείσας της διέλευσης προς τα άνω για $t = 0$. Άρα είναι η πιθανότητα ότι το μήκος της απόδρασης προς τα άνω της στάθμης u δεν υπερβαίνει το χρόνο t . Επίσης η $F_2(t)$ αποτελεί την πιθανότητα ότι θα συμβεί τουλάχιστον δύο τμήσεις στο διάστημα $(0, t)$ δοθείσας της διέλευσης προς τα άνω για $t = 0$. Άρα είναι η πιθανότητα ότι το μήκος μεταξύ διαδοχικών προς τα άνω τμήσεων της στάθμης u δεν υπερβαίνει το χρόνο t .

Οι $F_1(t)$ και $F_2(t)$ αποδεικνύεται ότι αποτελούν κατανομές πιθανότητας. Προκειμένου να βρεθεί η έκφρασή τους ορίζονται οι ακόλουθες ποσότητες που σχετίζονται άμεσα με τη ροή των ενδεχομένων τμήσεως της στάθμης u

$$\begin{aligned} u_k(t) &= P(U(0, t) = k) \\ \nu_k(t) &= P(\xi(0) > u, C(0, t) = k) \end{aligned} \quad (\Sigma\tau 20)$$

Για $\tau > 0$ ισχύει

$$\begin{aligned} u_0(t) - u_0(t + \tau) &= P(U(0, t) = 0) - P(U(-\tau, t) = 0) \\ &= P(U(-\tau, 0) \geq 1, U(0, t) = 0) = H_1(\tau, t) + o(\tau) \end{aligned} \quad (\Sigma\tau 21)$$

αφού η πιθανότητα περισσότερων της μιας τμήσεως στο $(-\tau, 0)$ είναι $o(\tau)$, ενώ αν υπάρχει μόνο μια διέλευση προς τα άνω στο $(-\tau, 0)$, τότε $U(0, t) = 0$ αν και μόνο αν $C(0, t) \leq 1$. Τελικά προκύπτει με χρήση των σχέσεων για τα $\omega(t)$ και $\Phi_k(t)$ ότι

$$\lim_{\tau \downarrow 0} \frac{u_0(t + \tau) - u_0(t)}{\tau} = -\mu\Phi_1(t) \quad (\Sigma\tau 22)$$

οπότε χρησιμοποιώντας το συμβολισμό $D^+u_0(t)$ για τη δεξιά παράγωγο της $u_0(t)$ εφόσον υπάρχει προκύπτει η σχέση

$$F_2(t) = 1 + \mu^{-1}D^+u_0(t) \quad (\Sigma\tau 23)$$

Αντίστοιχα για $\tau > 0$ ισχύει

$$\begin{aligned} v_0(t) - v_0(t+\tau) &= P(\xi(0) > u, C(0, t) = 0) - P(\xi(-\tau) > u, C(-\tau, t) = 0) \\ &= P(\xi(-\tau) < u < \xi(0), C(0, t) = 0) \end{aligned} \quad (\Sigma\tau 24)$$

Η τελευταία ποσότητα διαφέρει από την $P(U(-\tau, 0) \geq 1, C(0, t) = 0)$ κατά $o(t)$ και άρα προκύπτει ότι

$$v_0(t) - v_0(t+\tau) = H_0(\tau, t) + o(t) \quad (\Sigma\tau 25)$$

οπότε σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα καταλήγουμε στην

$$F_1(t) = 1 + \mu^{-1}D^+v_0(t) \quad (\Sigma\tau 26)$$

Οι $u_0(t)$ και $v_0(t)$ είναι αύξουσες και μη αρνητικές, επομένως υπάρχουν τα όρια

$$u_0(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} u_0(t) \quad \text{και} \quad v_0(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} v_0(t) \quad (\Sigma\tau 27)$$

Λογικά η ποσότητα $u_0(\infty)$ αναμένεται να είναι μηδέν για τις περισσότερες περιπτώσεις. Αυτό αποδεικνύεται ότι ισχύει στην περίπτωση εργοδικών ανελιξέων, αφού τότε αποδεικνύεται ότι $\frac{U(0, T)}{T} \rightarrow \mu$, καθώς $T \rightarrow \infty$ (αντίστοιχα για τμήσεις προς τα κάτω ή γενικά τμήσεις της στάθμης). Παρόμοια αποτελέσματα ισχύουν για την $v_0(\infty)$.

Για τη μέση τιμή τώρα της κατανομής F_1 που αντιστοιχεί στη μέση διάρκεια των διαλείψεων προκύπτει ότι

$$\int_0^{\infty} t dF_1(t) = \int_0^{\infty} (1 - F_1(t)) dt = \frac{P(\xi(0) > 0) - v_0(\infty)}{\mu} \quad (\Sigma\tau 28)$$

Παράρτημα Z

Βασική Θεωρία Στοχαστικών Διαφορικών Εξισώσεων (ΣΔΕ).

Γενικά

Οι στοχαστικές διαφορικές εξισώσεις (ΣΔΕ) αποτελούν ένα σύγχρονο κλάδο των μαθηματικών με πλούσιο θεωρητικό υπόβαθρο και μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Ωστόσο η δυσκολία στην εφαρμογή των μεθόδων των ΣΔΕ σε πρακτικές εφαρμογές έγκειται στις τεχνικές λεπτομέρειες μαθηματικής φύσεως που θα πρέπει αρχικά να κατανοηθούν. Για το λόγο αυτό στο παράρτημα αυτό δίνεται μια συνοπτική περιγραφή της βασικής θεωρίας των ΣΔΕ με προσανατολισμό στις εφαρμογές, σύμφωνα με την προσέγγιση του [Sarkka, 2012]. Για τη μελέτη της σχετικής θεωρίας με τη δέουσα μαθηματική αυστηρότητα ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα [Karatzas-Shreve, 1991], [Oksendal, 1998].

Συνήθεις Διαφορικές Εξισώσεις

Εδώ θα παρουσιαστεί με συντομία το απαραίτητο υπόβαθρο από τη θεωρία των συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Μια συνήθης ΔΕ είναι μια εξίσωση στην οποία ο άγνωστος είναι μια συνάρτηση μιας μεταβλητής και στην οποία εμφανίζονται η συνάρτηση καθώς και παράγωγοι αυτής. Η εξίσωση ισχύει για κάθε τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής στο πεδίο ορισμού της συνάρτησης. Τάξη της ΔΕ ονομάζεται η τάξη της ανωτέρας παραγώγου που εμφανίζεται στην εξίσωση. Γενικότερα η εξίσωση

$$F[t, x(t), x'(t), \dots, x^{(n)}(t)] = 0 \quad (Z1)$$

είναι μια συνήθης ΔΕ n -ιστής τάξης.

Υποθέτουμε ότι είναι πάντοτε δυνατή η επίλυση μιας ΔΕ ως προς την ανώτερη παράγωγό της, οπότε η ΔΕ (Z1) γράφεται ως

$$x^{(n)} = f(t, x, x', \dots, x^{(n-1)}) \quad (Z2)$$

Συνήθως μελετάμε εξισώσεις της μορφής (Z2) και αυτό γίνεται κυρίως ώστε να αποφευχθεί η ασάφεια που μπορεί να ανακύψει από το γεγονός ότι μια εξίσωση της μορφής (Z1) μπορεί να αντιστοιχεί σε διάφορες εξισώσεις της μορφής (Z2).

Λύση της ΔΕ (Z2) στο διάστημα $a < t < b$ είναι μια συνάρτηση x , τέτοια ώστε οι $x, x', \dots, x^{(n)}$ υπάρχουν και ικανοποιούν την

$$x^{(n)}(t) = f(t, x(t), x'(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) \quad (Z3)$$

για κάθε t στο $a < t < b$.

Εκτός και αν αναφέρεται διαφορετικά υποθέτουμε ότι η συνάρτηση $x(t)$ της (Z3) είναι μια πραγματική συνάρτηση και ενδιαφερόμαστε για την εύρεση των πραγματικών λύσεων. Τα θεμελιώδη ερωτήματα που μας απασχολούν είναι της ύπαρξης και μοναδικότητας της λύσης.

Η ΔΕ $F(t, x, x', \dots, x^{(n)}) = 0$ ονομάζεται γραμμική αν η F είναι μια γραμμική συνάρτηση των μεταβλητών $x, x', \dots, x^{(n)}$. Έτσι η γενική γραμμική ΔΕ n τάξης είναι η

$$a_0(t)x^{(n)} + a_1(t)x^{(n-1)} + \dots + a_n(t)x = g(t) \quad (Z4)$$

Μια εξίσωση που δεν είναι της μορφής (Z4) είναι μια μη γραμμική εξίσωση.

Η μαθηματική θεωρία και οι μέθοδοι επίλυσης γραμμικών εξισώσεων είναι πολύ ανεπτυγμένες. Αντίθετα για τις μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις η θεωρία είναι πιο περίπλοκη και οι μέθοδοι επίλυσης λιγότερο ικανοποιητικές. Αν ο όρος $g(t)$ της (Z4) είναι μηδενικός η ΔΕ λέγεται ομογενής, διαφορετικά μη ομογενής.

Συστήματα συνήθων ΔΕ προκύπτουν συνήθως σε προβλήματα που εμπλέκονται διάφορες εξαρτημένες μεταβλητές, κάθε μια εκ των οποίων είναι συνάρτηση μιας ανεξάρτητης μεταβλητής. Τότε το σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ως μια ΔΕ μιας διανυσματικής συνάρτησης μιας μεταβλητής. Θα συμβολίζουμε την ανεξάρτητη μεταβλητή με t και έστω x_1, x_2, x_2, \dots οι εξαρτημένες μεταβλητές που είναι συναρτήσεις του t . Ισοδύναμα μπορούμε να μιλάμε για την άγνωστη διανυσματική συνάρτηση $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), x_2(t), \dots]$.

Τα συστήματα ΔΕ πρώτης τάξης αποκτούν ιδιαίτερη σημασία καθώς μια ΔΕ οποιασδήποτε τάξης μπορεί να μετασχηματιστεί σε ένα ισοδύναμο σύστημα ΔΕ πρώτης τάξης. Έτσι μια αυθαίρετη εξίσωση n -ιοστής τάξης $y^{(n)} = F(t, y, y', \dots, y^{(n-1)})$ μπορεί μάλιστα να μετασχηματιστεί σε ένα σύστημα n εξισώσεων α' τάξης εισάγοντας τις μεταβλητές x_1, x_2, \dots, x_n που ορίζονται ως $x_1 = y, x_2 = y', \dots, x_n = y^{(n-1)}$, οπότε προκύπτει το σύστημα

$$\begin{aligned} x'_1 &= x_2 \\ x'_2 &= x_3 \\ &\vdots \\ x'_n &= F(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (Z5)$$

Η γενική μορφή ενός συστήματος n εξισώσεων α' τάξης είναι:

$$\begin{aligned}x'_1 &= F_1(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\x'_2 &= F_2(t, x_1, x_2, \dots, x_n) \\&\vdots \\x'_n &= F_n(t, x_1, x_2, \dots, x_n)\end{aligned}\tag{Z6}$$

Το σύστημα έχει λύση στο διάστημα $I: a < t < b$ αν υπάρχει ένα σύνολο n συναρτήσεων $x_1 = x_1(t), x_2 = x_2(t), \dots, x_n = x_n(t)$ διαφορίσιμων σε όλα τα σημεία του διαστήματος, οι οποίες ικανοποιούν το σύστημα σε όλα τα σημεία του διαστήματος.

Επιπρόσθετα το σύστημα μπορεί να συνοδεύεται από αρχικές συνθήκες της μορφής $x_1(t_0) = x_1^0, x_2(t_0) = x_2^0, \dots, x_n(t_0) = x_n^0$, όπου t_0 μια καθορισμένη τιμή του t στο I και $x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0$ δοθέντες αριθμοί. Οι διαφορικές εξισώσεις του συστήματος με τις αρχικές συνθήκες συγκροτούν ένα πρόβλημα αρχικών τιμών.

Αν οι συναρτήσεις F_1, \dots, F_n του συστήματος (Z6) είναι γραμμικές συναρτήσεις των x_1, \dots, x_n τότε το σύστημα είναι γραμμικό. Επίσης αν η n -ιστής τάξης ΔΕ $y^{(n)} = F(t, y, y', \dots, y^{(n-1)})$ που μετασχηματίζεται στο σύστημα (Z5) είναι γραμμική, τότε το σύστημα (Z5) είναι προφανώς γραμμικό. Ένα γραμμικό σύστημα 1ης τάξης έχει τη μορφή

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{B}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{C}(t)\tag{Z7}$$

όπου $\mathbf{B}(t)$ ο πίνακας των συντελεστών και $\mathbf{C}(t)$ το διάνυσμα των μη ομογενών όρων. Όταν οι συντελεστές σε μια ΔΕ είναι αμετάβλητοι ως την ανεξάρτητη μεταβλητή, τότε μιλάμε για ΔΕ σταθερών συντελεστών.

Θεωρούμε τώρα την εξής γραμμική ομογενή ΔΕ 1ης τάξης

$$\frac{dx}{dt} = fx, \quad x(0) = x_0\tag{Z8}$$

όπου f κάποια σταθερά. Η λύση της (Z8) υπολογίζεται εύκολα και δίνεται από τη σχέση

$$x(t) = e^{ft} x(0)\tag{Z9}$$

Αν ωστόσο ολοκληρώσουμε την (Z8) από 0 έως t προκύπτει η σχέση

$$x(t) = x(0) + \int_0^t fx(\tau) d\tau\tag{Z10}$$

Χρησιμοποιώντας την (Z10) διαδοχικά σε κάθε εμφάνιση της $x(t)$ στο ολοκλήρωμα προκύπτει η σχέση

$$x(t) = \left(1 + ft + \frac{f^2 t^2}{2!} + \frac{f^3 t^3}{3!} + L \right) x(0) \quad (Z11)$$

με τον πρώτο όρο στην παρένθεση να είναι η ανάπτυξη σε σειρά Taylor της e^{ft} .

Το αντίστοιχο ομογενές σύστημα 1ης τάξης περιγράφεται από την εξίσωση

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{F}\mathbf{x}, \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (Z12)$$

όπου \mathbf{F} ένας πίνακας σταθερών συντελεστών. Η μεθόδευση που ακολουθήθηκε για την (Z11) οδηγεί στην έκφραση της λύσης ως

$$\mathbf{x}(t) = \left(\mathbf{I} + \mathbf{F}t + \frac{\mathbf{F}^2 t^2}{2!} + \frac{\mathbf{F}^3 t^3}{3!} + L \right) \mathbf{x}(0) \quad (Z13)$$

όπου η σειρά στον πρώτο όρο συγκλίνει και ορίζεται ως η γενίκευση της εκθετικής συνάρτησης με τη σχέση

$$e^{\mathbf{F}t} = \mathbf{I} + \mathbf{F}t + \frac{\mathbf{F}^2 t^2}{2!} + \frac{\mathbf{F}^3 t^3}{3!} + L \quad (Z14)$$

οπότε η λύση εκφράζεται ως

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{F}t} \mathbf{x}(0) \quad (Z15)$$

Στην περίπτωση της γραμμικής ΔΕ με μη ομογενή όρο αυτή έχει έστω τη μορφή

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{L}\mathbf{w}(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (Z16)$$

όπου \mathbf{F}, \mathbf{L} πίνακες σταθερών συντελεστών. Με χρήση της μεθόδου του ολοκληρώνοντα παράγοντα προκύπτει η λύση της (Z16) ως εξής:

$$\begin{aligned} e^{-\mathbf{F}t} \frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} - e^{-\mathbf{F}t} \mathbf{F}\mathbf{x}(t) &= e^{-\mathbf{F}t} \mathbf{L}\mathbf{w}(t) \\ \frac{d}{dt} [e^{-\mathbf{F}t} \mathbf{x}(t)] &= e^{-\mathbf{F}t} \mathbf{L}\mathbf{w}(t) \\ \mathbf{x}(t) &= e^{\mathbf{F}t} \mathbf{x}(0) + \int_0^t e^{\mathbf{F}(t-s)} \mathbf{L}\mathbf{w}(s) ds \end{aligned}$$

Στην περίπτωση που οι συντελεστές δεν είναι σταθεροί η προηγούμενη μέθοδος δεν εφαρμόζεται, ωστόσο η λύση μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του θεμελιώδους πίνακα $\Psi(t)$ ως

$$\mathbf{x}(t) = \Psi(t)\mathbf{x}(0) + \Psi(t) \int_0^t \Psi^{-1}(s)\mathbf{L}(s)\mathbf{w}(s) ds \quad (Z17)$$

Η μέθοδος του θεμελιώδη πίνακα είναι γενικότερη και περιλαμβάνει και την περίπτωση των σταθερών συντελεστών. Ο θεμελιώδης πίνακας έχει ως στήλες τις γραμμικά ανεξάρτητες λύσης της ΔΕ και άρα η γενική λύση εκφράζεται ως $\mathbf{x}(t) = \Psi(t)\mathbf{c}$, όπου \mathbf{c} ένα διάνυσμα, που προσδιορίζεται από την αρχική συνθήκη ως $\mathbf{c} = \Psi^{-1}(t_0)\mathbf{x}_0$. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στο [Boyce-DiPrima, 1992]

Εισαγωγή στις Στοχαστικές Διαφορικές Εξισώσεις

Πολλά φαινόμενα περιγράφονται μέσω μιας ΔΕ της μορφής

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{L}(\mathbf{x}, t)\mathbf{w}(t) \quad (Z18)$$

όπου $\mathbf{w}(t)$ ένα διάνυσμα συναρτήσεων διέγερσης. Μια μορφή στοχαστικής διαφορικής εξίσωσης είναι μια ΔΕ όπως η (Z18) στην οποία η διέγερση είναι στοχαστική. Στην περίπτωση αυτή η λύση είναι επίσης μια στοχαστική ανέλιξη. Σε κάθε πραγματοποίηση της διεγέρτριας ανέλιξης προκύπτει μια πραγματοποίηση της λύσης. Για το λόγο αυτό και καθώς η διέγερση είναι τυχαία συνήθως δεν ενδιαφερόμαστε για τις μεμονωμένες πραγματοποιήσεις, αλλά για τη στατιστική περιγραφή της λύσης στο σύνολο των πραγματοποιήσεων. Στην ορολογία των ΣΔΕ ο όρος $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$ λέγεται όρος μετακίνησης (drift) και περιγράφει τη δυναμική του συστήματος, ενώ ο όρος $\mathbf{L}(\mathbf{x}, t)$ λέγεται όρος διάχυσης (diffusion) και περιγράφει το ποσό του θορύβου που εισάγεται στο σύστημα.

Η στοχαστική διέγερση $\mathbf{w}(t)$ συνήθως επιλέγεται ως λευκός θόρυβος $\xi(t)$. Ο λευκός θόρυβος είναι μια κανονική στοχαστική ανέλιξη και χαρακτηρίζεται έτσι λόγω της σταθερής τιμή φασματικής πυκνότητας ισχύος σε όλο το φάσμα. Ο λευκός θόρυβος χαρακτηρίζεται πλήρως από τις εξής ιδιότητες:

- α. Οι $\xi(t_1)$ και $\xi(t_2)$ είναι ανεξάρτητες για $t_1 \neq t_2$
- β. $\mathbf{M}_\xi(t) = E[\xi(t)] = \mathbf{0}$

$$\gamma. \mathbf{C}_\xi(t,s) = E[\xi(t)\xi^T(t)] = \delta(t-s)\mathbf{Q}$$

Η ανέλιξη του λευκού θορύβου ωστόσο δεν μπορεί να οριστεί αυστηρά μαθηματικά με αυτόν τον τρόπο, καθώς είναι κανονική με άπειρη διακύμανση. Είναι στην ουσία μια γενικευμένη στοχαστική ανέλιξη, αν και η αντιμετώπισή της ως μια συνήθη ανέλιξη με τις ανωτέρω ιδιότητες οδηγεί διαισθητικά σε σωστά αποτελέσματα.

Με τα ανωτέρω υπόψη θεωρούμε την παρακάτω γραμμική ΣΔΕ με σταθερούς συντελεστές:

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{F}\mathbf{x}(t) + \mathbf{L}\xi(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (\text{Z19})$$

Η αρχική συνθήκη θεωρείται στη γενική περίπτωση ως μια τ.μ., συμπεριλαμβανομένου της τετριμμένης περίπτωσης που είναι ντετερμινιστική. Αντιμετωπίζοντας φορμαλιστικά τη ΔΕ σαν να ήταν συνήθης και το λευκό θόρυβο σαν μια απλή συνάρτηση, γράφουμε τη λύση με τη μορφή

$$\mathbf{x}(t) = e^{\mathbf{F}t}\mathbf{x}(0) + \int_0^t e^{\mathbf{F}(t-s)}\mathbf{L}\xi(s) ds \quad (\text{Z20})$$

Αποδεικνύεται ότι μια τέτοια επιλογή είναι στην πραγματικότητα ορθή και αυτό οφείλεται στο ότι η ΣΔΕ είναι γραμμική. Θεωρώντας την (Z20) ως τη λύση της (Z19) υπολογίζουμε τη μέση τιμή και τη διακύμανση της λύσης. Παίρνοντας τη μέση τιμή στην (Z20) προκύπτει ότι

$$\mathbf{M}(t) = E[\mathbf{x}(t)] = e^{\mathbf{F}t}\mathbf{M}_0 \quad (\text{Z21})$$

όπου \mathbf{M}_0 η μέση τιμή της αρχικής συνθήκης. Ο πίνακας διακύμανσης της λύσης προκύπτει χρησιμοποιώντας την έκφραση της λύσης (Z20) στον ορισμό της διακύμανσης $\mathbf{C}(t) = E[(\mathbf{x}(t) - \mathbf{M}(t))(\mathbf{x}(t) - \mathbf{M}(t))^T]$, οπότε με χρήση της δέλτα συσχέτισης του λευκού θορύβου οδηγούμαστε στη σχέση

$$\mathbf{C}(t) = e^{\mathbf{F}t}\mathbf{C}(0)(e^{\mathbf{F}t})^T + \int_0^t e^{\mathbf{F}(t-s)}\mathbf{L}\mathbf{Q}\mathbf{L}^T(e^{\mathbf{F}(t-s)})^T ds \quad (\text{Z22})$$

όπου $\mathbf{C}(0)$ η διακύμανση της αρχικής συνθήκης.

Παραγωγίζοντας τώρα τις (Z21) και (Z22) προκύπτει ότι η χρονικά μεταβαλλόμενη μέση τιμή και διακύμανση ικανοποιούν τις Δ.Ε

$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{M}(t)}{dt} &= \mathbf{F}\mathbf{M}(t) \\ \frac{d\mathbf{C}(t)}{dt} &= \mathbf{F}\mathbf{C}(t) + \mathbf{C}(t)\mathbf{F}^T + \mathbf{L}\mathbf{Q}\mathbf{L}^T\end{aligned}\quad (\text{Z23})$$

Η Δ.Ε. της μέσης τιμή μπορεί να προκύψει επίσης παίρνοντας τη μέση τιμή και στα δύο μέλη της ΣΔΕ (Z20) και εναλλάσσοντας τη σειρά του τελεστή της μέσης τιμής και της διαφορίσης λόγω της γραμμικότητας.

Ωστόσο για τη ΔΕ της συνδιακύμανσης αν κάποιος εφαρμόσει τον κανόνα της παραγώγισης στον ορισμό της $\mathbf{C}(t) = \mathbb{E}[(\mathbf{x}(t) - \mathbf{M}(t))(\mathbf{x}(t) - \mathbf{M}(t))^T]$ θα καταλήξει σε λάθος καθώς δεν λαμβάνει υπόψη του τις ιδιότητες του στοχαστικού ολοκληρώματος, κάτι που καταδειχνει τις ιδιαιτερότητες του στοχαστικού διαφορικού λογισμού σε σχέση με το συνήθη.

Λογισμός Ito και ΣΔΕ

Οι δυσκολίες στον αυστηρό μαθηματικό ορισμό της ΣΔΕ

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{L}(\mathbf{x}, t)\xi(t) \quad (\text{Z24})$$

που ευριστικά αναλύθηκε προηγουμένως οφείλονται στην ιδιαιτερότητα του λευκού θορύβου, που είναι μια μη συνεχής ανέλιξη και μάλιστα μη καλά ορισμένη.

Οι δυσκολίες αυτές ξεπερνιούνται με τη θεώρηση του στοχαστικού ολοκληρώματος.

Αν φορμαλιστικά ολοκληρώσουμε την (Z24) στο διάστημα (t_0, t) προκύπτει η ολοκληρωτική εξίσωση

$$\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_0) = \int_{t_0}^t \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) dt + \int_{t_0}^t \mathbf{L}(\mathbf{x}(t), t)\xi(t) dt \quad (\text{Z25})$$

Το πρώτο ολοκλήρωμα είναι ένα ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο που μπορεί να οριστεί σύμφωνα με τον επιθυμητό τρόπο σύγκλισης των τ.μ. ως το όριο πεπερασμένων αθροισμάτων για κάποια διαμέριση του διαστήματος ολοκλήρωσης. Το δεύτερο ολοκλήρωμα ωστόσο λόγω του ότι ο λευκός θόρυβος είναι μη φραγμένος δεν μπορεί να οριστεί με τέτοιο τρόπο. Ο αντίστοιχη μέθοδος ολοκλήρωσης με το ολοκλήρωμα Stieltjes ωστόσο, μπορεί με κατάλληλη τροποποίηση να δώσει την επιθυμητή λύση. Γράφουμε λοιπόν το ολοκλήρωμα ως

$$\int_{t_0}^t \mathbf{L}(\mathbf{x}(t), t) \xi(t) dt = \int_{t_0}^t \mathbf{L}(\mathbf{x}(t), t) d\mathbf{W}(t) \quad (\text{Z26})$$

όπου $\mathbf{W}(t)$ η κίνηση Brown ή Wiener. Η κίνηση Brown είναι η ανέλιξη που ορίζεται ως ανέλιξη με ανεξάρτητες προσαυξήσεις και επιπλέον κάθε προσαύξηση $\Delta \mathbf{W}_k = \mathbf{W}(t_{k+1}) - \mathbf{W}(t_k)$ είναι κανονική μηδενικής μέσης τιμής και με πίνακα συνδιακύμανσης $\mathbf{Q} \Delta t_k$ με $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$. Η κίνηση Brown είναι συνεχής μη παραγωγίσιμη, ενώ φορμαλιστικά ο λευκός θόρυβος μπορεί να θεωρηθεί ως η παράγωγος της.

Ωστόσο το νέο πρόβλημα που ανακύπτει στον ορισμό του ολοκληρώματος ως ένα όριο αθροισμάτων της μορφής

$$\int_{t_0}^t \mathbf{L}(\mathbf{x}(t), t) d\mathbf{W}(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_k \mathbf{L}(\mathbf{x}(t_k^*), t_k^*) [\mathbf{W}(t_{k+1}) - \mathbf{W}(t_k)] \quad (\text{Z27})$$

για $t_0 < t_1 < \dots < t_n$ και $t_k^* \in [t_k, t_{k+1}]$ είναι ότι λόγω της ιδιαιτερότητας της κίνησης Brown το όριο εξαρτάται από τον τρόπο επιλογής των τιμών $t_k^* \in [t_k, t_{k+1}]$.

Το ολοκλήρωμα Ito παρέχει τη λύση καθώς με τη δέσμευση ότι $t_k^* = t_k$ αποδεικνύεται ότι το όριο είναι μοναδικό. Έτσι το ολοκλήρωμα Ito ορίζεται ως

$$\int_{t_0}^t \mathbf{L}(\mathbf{x}(t), t) d\mathbf{W}(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_k \mathbf{L}(\mathbf{x}(t_k), t_k) [\mathbf{W}(t_{k+1}) - \mathbf{W}(t_k)] \quad (\text{Z28})$$

ενώ η ΣΔΕ (Z25) ορίζεται ως η ΣΔΕ κατά Ito

$$\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}(t_0) = \int_{t_0}^t \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), t) dt + \int_{t_0}^t \mathbf{L}(\mathbf{x}(t), t) d\mathbf{W}(t) \quad (\text{Z29})$$

με το ολοκλήρωμα στην (Z29) να είναι το ολοκλήρωμα Ito. Η λύση $\mathbf{x}(t)$ ονομάζεται ανέλιξη Ito.

Η ΣΔΕ γράφεται σε διαφορική μορφή ως

$$d\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t) dt + \mathbf{L}(\mathbf{x}, t) d\mathbf{W}(t) \quad (\text{Z30})$$

Ο λογισμός των στοχαστικών διαφορικών με χρήση του λογισμού του Ito μπορεί να συνοψιστεί στη φόρμουλα του Ito που εκφράζεται ως εξής:

Φόρμουλα του Ito

Έστω $\mathbf{x}(t)$ μια ανέλιξη Ito και έστω μια συνάρτηση $\varphi(\mathbf{x}(t), t)$. Το στοχαστικό διαφορικό κατά Ito της φ , δηλαδή η ΣΔΕ που ικανοποιεί η φ δίνεται από τη σχέση

$$d\varphi = \frac{\partial\varphi}{\partial t}dt + \sum_i \frac{\partial\varphi}{\partial x_i}dx_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} \left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x_i \partial x_j} \right) dx_i dx_j \quad (\text{Z31})$$

με την προϋπόθεση ότι οι μερικές παράγωγοι υπάρχουν και ότι τα διαφορικά υπολογίζονται με τους κανόνες

$$\begin{aligned} dxdt &= 0 \\ dt d\mathbf{W} &= 0 \\ d\mathbf{W}d\mathbf{W}^T &= \mathbf{Q}dt \end{aligned} \quad (\text{Z32})$$

Η φόρμουλα του Ito μπορεί να προκύψει με ανάπτυξη Taylor λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του στοχαστικού ολοκληρώματος, ισοδύναμα της κίνησης Brown.

Παράρτημα Η

Υπολογισμός του ρυθμού τμήσης στάθμης και μέσου χρόνου διακοπής.

Εδώ παρουσιάζονται για την περίπτωση κανονικών διανυσματικών στοχαστικών ανεξίτητων τα αποτελέσματα του υπολογισμού του ρυθμού τμήσης στάθμης (LCR, Level Crossing Rate) της συνοριακής καμπύλης ∂D ενός χωρίου D . Σε αντιστοιχία με τις πρακτικές εφαρμογές του Κεφ. 6 η ανέλιξη θεωρείται ότι αναπαριστά το λογάριθμο του λαμβανόμενου σήματος σε N ζεύξεις (το σήμα θεωρείται ότι ακολουθεί τη λογαριθμοκανονική κατανομή). Το χωρίο D αντιστοιχεί στην περιοχή επίτευξης αξιόπιστης επικοινωνίας στην περίπτωση συστήματος διαφορικής λήψης N τμημάτων με τη μέθοδο επιλογής του ισχυρότερου σήματος (Selection Combining) και στην περίπτωση αναγεννητικού συστήματος αναμετάδοσης (regenerative) με ζεύξη πολλαπλών τμημάτων (multihop). Ο ρυθμός τμήσης υπολογίζεται για τμήσεις εξόδου της περιοχής D (outcrossings), οπότε το σύστημα μεταπίπτει σε κατάσταση διακοπής (outage), που είναι ισοδύναμος με το ρυθμό εισόδου (incrossings) στην περιοχή διακοπής του χωρίου D^c . Ο υπολογιζόμενος ρυθμός αντιστοιχεί σε ρυθμό μετάπτωσης σε διακοπή (OR, Outage Rate). Από το ρυθμό αυτό και την πιθανότητα εύρεσης του συστήματος στην περιοχή D^c προκύπτει ο μέσος χρόνος διακοπής (AOD, Average Outage Duration). Επίσης με την ίδια μέθοδο υπολογίζεται ο ρυθμός εκτέλεσης μεταπομπών (HOR, Handoff Rate) για την περίπτωση κυψελωτού συστήματος με διαθέσιμους δύο σταθμούς βάσης, στο οποίο κάθε φορά ο χρήστης θεωρείται ότι εξυπηρετείται από το σταθμό βάσης με το υψηλότερο σήμα.

Ρυθμός Μετάπτωσης σε Διακοπή για σύστημα N-πλής διαφορικής λήψης.

Το σύστημα μεταπίπτει σε διακοπή όταν τα λαμβανόμενα σήματα και από τους N σταθμούς βάσης είναι ασθενέστερα των απαιτούμενων τιμών κατωφλίου, δηλαδή όταν $\gamma_i \leq \gamma_{th_i}, i=1, \dots, N$. Σε λογαριθμική κλίμακα η συνθήκη αυτή είναι ισοδύναμη με την $SNR_i \leq SNR_{th_i}$, ή $X_i \leq -FM_i$, όπου $FM_i = [SNR_i] - SNR_{th_i}$ το αντίστοιχο περιθώριο διάλειψης της ζεύξης i με $[SNR_i]$ τη μέση στάθμη του λαμβανόμενου σήματος και X_i τη σκίαση.

Ο ρυθμός εξόδου από την περιοχή λειτουργίας, που οριοθετείται από το χωρίο D με σύνορο ∂D δίνεται από τη σχέση

$$\mu^+ = \int_{\partial D} E \left[(\mathbf{n}^T \mathbf{X}_t')^+ \mid \mathbf{X}_t = \mathbf{b} \right] p(\mathbf{b}) dl(\mathbf{b}) \quad (\text{H1})$$

Λόγω του ότι η ανέλιξη είναι κανονική τότε οι τιμές της παραγώγου είναι ανεξάρτητες των τιμών της ανέλιξης, οπότε η (H1) γίνεται

$$\mu^+ = \int_{\partial D} E \left[(\mathbf{n}^T \mathbf{X}_t')^+ \right] p(\mathbf{b}) dl(\mathbf{b}) \quad (\text{H2})$$

Έστω ότι $g(\omega) = \mathbf{n}^T \mathbf{X}_t' = f(\mathcal{X}_1(\omega), \dots, \mathcal{X}_N(\omega))$ και θεωρούμε το σύνολο $A = \{\omega \in \Omega : g(\omega) \in [0, +\infty)\}$. Τότε ισχύει

$$\begin{aligned} E \left[(\mathbf{n}^T \mathbf{X}_t')^+ \right] &= E(g(\omega) \mathbf{1}_A(\omega)) = \int_A g(\omega) dP(\omega) \\ &= \int_A f(\mathcal{X}_1(\omega), \dots, \mathcal{X}_N(\omega)) dP(\omega) = \int_{f^{-1}([0, +\infty))} f(\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_N) dP_{\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_N} \\ &= \int_{f^{-1}([0, +\infty))} f(\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_N) p(\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_N) d\mathcal{X}_1 \dots d\mathcal{X}_N \end{aligned} \quad (\text{H3})$$

Στην περίπτωση του συστήματος N -πλής διαφορικής λήψης με μέθοδο SC η υπερεπιφάνεια ∂D αποτελείται από N υπερεπίπεδα και άρα ο ρυθμός τμήσης της υπερεπιφάνειας ισούται με το άθροισμα των επιμέρους ρυθμών τμήσης των υπερεπιπέδων. Για το υπερεπίπεδο 1 που αντιστοιχεί στη ζεύξη 1 ισχύει $\mathbf{n}_1 = (-1, 0, \dots, 0)$ και άρα $f(\mathcal{X}_1, \dots, \mathcal{X}_N) = -\mathcal{X}_1$. Επομένως

$$\mu_1^+ = \int_{-\infty}^0 (-\mathcal{X}_1) p(\mathcal{X}_1) d\mathcal{X}_1 \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(-FM_1, x_2, \dots, x_N) dx_2 \dots dx_N \quad (\text{H4})$$

Ομοίως για το υπερεπίπεδο k που αντιστοιχεί στη ζεύξη k προκύπτει ότι

$$\begin{aligned} \mu_k^+ &= \int_{-\infty}^0 (-\mathcal{X}_k) p(\mathcal{X}_k) d\mathcal{X}_k \cdot I_k \\ I_k &= \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} p(x_1, \dots, x_{k-1}, -FM_k, x_{k+1}, \dots, x_N) dx_1 \dots dx_{k-1} dx_{k+1} \dots dx_N \end{aligned} \quad (\text{H5})$$

Τελικά ο ρυθμός τμήσης εξόδου ισούται με

$$\mu^+ = \sum_k \mu_k^+ \quad (\text{H6})$$

Η σχέση (H5) μπορεί περαιτέρω να απλοποιηθεί παρατηρώντας ότι

$$\int_{-\infty}^0 (-x_k) p(x_k) dx_k = \frac{\sigma_{x_k}}{\sqrt{2\pi}} \quad (H7)$$

Για μια κανονική τ.μ. μηδενικής μέσης τιμής. Επιπλέον χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της δεσμευμένης κατανομής για πολυδιάστατες κανονικές κατανομές το ολοκλήρωμα I_k μπορεί να υπολογισθεί ως

$$I_k = p_{x_k}(-FM_k) Q(-FM_1, K, -FM_{k-1}, -FM_{k+1}, K, -FM_N) \quad (H8)$$

Όπου $Q(x_1, K, x_{k-1}, x_{k+1}, K, x_N)$ η αθροιστική συνάρτηση κατανομής της $N-1$ -διάστατης δεσμευμένης κατανομής $p(x_1, K, x_{k-1}, x_{k+1}, K, x_N | x_k)$ η οποία μπορεί να υπολογισθεί με τεχνικές αριθμητικής ολοκλήρωσης ή με χρήση διαθέσιμων συναρτήσεων σε πακέτα υπολογισμού.

Ρυθμός Μετάπτωσης σε Διακοπή για ζεύξη N τμημάτων (N-hop).

Η μέθοδος υπολογισμού του ρυθμού μετάπτωσης της ζεύξης σε διακοπή είναι αντίστοιχος με την προηγούμενη περίπτωση. Η διαφορά εδώ έγκειται στο διαφορετικό χωρίο D και τη συνοριακή επιφάνεια ∂D . Με τον ίδιο τρόπο καταλήγουμε στη (H5), μόνο που το ολοκλήρωμα I_k υπολογίζεται για την αντίστοιχη υπερεπιφάνεια ∂D ως

$$I_k = \int_{-FM_k}^{+\infty} L \int_{-FM_{k-1}}^{+\infty} \int_{-FM_{k+1}}^{+\infty} L \int_{-FM_N}^{+\infty} p(x_1, K, x_{k-1}, -FM_k, x_{k+1}, \dots, x_N) dx_1 L dx_{k-1} dx_{k+1} L dx_N \quad (H9)$$

Περίληψη

Αντικείμενο της διατριβής είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων στην μοντελοποίηση του φυσικού στρώματος σε ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα μέσω της χρήσης πολυδιάστατων στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ). Ειδικότερα αντικείμενα της διατριβής αποτελούν η δυναμική στατιστική μελέτη και πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής σε δορυφορικά συστήματα σε συχνότητες άνω των 10GHz, η δυναμική στατιστική μελέτη και η εκτίμηση της απόσβεσης με κλιμάκωση συχνότητας (frequency scaling) με εφαρμογές σε συστήματα ελέγχου ισχύος στην άνω ζεύξη και η δυναμική στατιστική μελέτη και η πρόβλεψη του φαινομένου της σκίασης (shadowing) σε ασύρματα δίκτυα.

Στο πρώτο μέρος της διατριβής που αποτελείται από τα πρώτα τρία κεφάλαια παρέχεται μια εισαγωγική περιγραφή των σύγχρονων ασύρματων δικτύων, της επίδρασης του ραδιοδιαύλου και των σύγχρονων τεχνικών άμβλυνσης των διαλείψεων. Τα κυρίως αποτελέσματα της έρευνας της διατριβής παρουσιάζονται στο δεύτερο μέρος.

Στο κεφ. 4 παρουσιάζεται νέο πολυδιάστατο δυναμικό στοχαστικό μοντέλο για την μοντελοποίηση της απόσβεσης λόγω βροχής σε πολλαπλές δορυφορικές ζεύξεις. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τη χωρική και χρονική διακύμανση της απόσβεσης. Είναι ένα συνεχές στοχαστικό δυναμικό μοντέλο, που μπορεί να θεωρηθεί ως η γενίκευση του γνωστού μοντέλου Maseng-Bakken σε διάσταση n και βασίζεται σε ένα σύστημα στοχαστικών διαφορικών εξισώσεων (ΣΔΕ). Αποτελεί εκτός από ένα χρήσιμο εργαλείο αναπαραγωγής συσχετισμένων χρονοσειρών απόσβεσης λόγω βροχής σε n ζεύξεις, ένα γενικότερο θεωρητικό πλαίσιο για τον αναλυτικό υπολογισμό διάφορων χρήσιμων στατιστικών χαρακτηριστικών (πιθανότητες μετάβασης, διάρκεια διαλείψεων, φασματική περιγραφή).

Στο κεφ. 5 παρουσιάζεται ένα νέο δυναμικό μοντέλο για την πρόβλεψη της απόσβεσης σε μια υψηλότερη συχνότητα, δεδομένης της απόσβεσης λόγω βροχής σε χαμηλότερη συχνότητα. Το νέο αυτό δυναμικό μοντέλο επιτρέπει τη δυναμική μοντελοποίηση της μεθόδου κλιμάκωσης συχνότητας (frequency scaling), καλύπτοντας ένα κενό στη βιβλιογραφία. Η μοντελοποίηση γίνεται με χρήση ΣΔΕ και άμεση εφαρμογή του μοντέλου αποτελεί ένα σχήμα ελέγχου της ισχύος της άνω ζεύξης (Uplink Power Control) σε ένα δορυφορικό σύστημα. Στο κεφ. 6

παρουσιάζεται ένα νέο δυναμικό μοντέλο για μελέτη και η πρόβλεψη του φαινομένου της σκίασης σε ασύρματα δίκτυα με χρήση ΣΔΕ. Το μοντέλο είναι σε θέση να αναπαραγάγει τη χρονική μεταβολή του φαινομένου της σκίασης σε πολλούς χρήστες λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα στάσιμα στατιστικά χαρακτηριστικά της σκίασης όσο και τη χωρο-χρονική συσχέτιση του φαινομένου. Πρόσθετα στην περίπτωση του n -διάστατου δυναμικού μοντέλου της σκίασης παρουσιάζεται μια νέα μέθοδος μελέτης της διάρκειας των διαλείψεων με χρήση μεθόδων τμήσης στάθμης διανυσματικών ανελίξεων. Η διατριβή ολοκληρώνεται με προτάσεις για την περαιτέρω συνέχιση της έρευνας.

Abstract

The main research area of the phd thesis is the physical layer modelling by use of multi-dimensional stochastic differential equations. Subjects considered in the thesis are the spatio-temporal stochastic modelling of rain attenuation for satellite systems operating at frequencies above 10GHz, the dynamic stochastic modelling of instantaneous frequency scaling with applications in uplink power control schemes and the multidimensional stochastic modelling of correlated shadowing in wireless communication systems.

The phd thesis consists of two parts. Chapters 1-3 that consist the first part of the thesis give a short introduction to modern satellite and wireless communication systems, their techniques and describe the impact of the radio channel. The main research results of the thesis are presented in the second part.

In chapter 4 a stochastic dynamic model for the induced rain attenuation on multiple radio links is presented. The model is considered as a generalization of the well-known and well-accepted Maseng–Bakken model in n -dimensions. It incorporates the spatial and time behavior of the rain attenuation phenomena and provides an analytical expression for the transition probability distribution. It consists of a system of stochastic differential equations (SDEs), which except for the solid mathematical formulation of the correlated rain attenuation stochastic processes, constitutes the general framework for the calculation of other statistical quantities useful for the radio system designers. The long-term statistics and the dynamic properties of rain attenuation are used for the parameterization of the model, without the constraint of any built-in assumptions of the rain field. Finally, the proposed model is used for the generation of correlated rain attenuation time series on multiple satellite communication slant paths and especially to diversity schemes, including site and orbital (angle) diversity. The derived results from the model are tested with respect to experimental long-term statistics for various geometries with very encouraging results.

In chapter 5 a novel stochastic dynamic model for the short-term frequency scaling of rain attenuation is presented. The model captures the dynamic characteristics of the instantaneous frequency scaling factor and provides the means to incorporate them in simultaneous rain attenuation time series generation, as well as in

analytical calculations. Moreover, an analytical framework is proposed for rain attenuation prediction at a given frequency based on the rain attenuation measured at another frequency. The proposed model can be used for the timely activation of an open-loop up-link power control scheme in broadband satellite communication networks operating at frequencies above 10GHz. It is applied to simulated rain attenuation data that have been obtained using the Synthetic Storm Technique on rain rate experimental data. Finally, it is shown how the new model improves the performance of an up-link power control scheme in terms of system availability.

In chapter 6 for the case of lognormal shadowing a novel engineering model is presented based on stochastic differential equations, that models not only the spatial correlation structure of shadowing but also its temporal dynamics. Large scale or slow fading, known also as shadowing, refers to the variations of the received signal mainly caused by obstructions, that significantly affect the available signal power at receiver's position. Although the variability of shadowing is considered mostly spatial for a given propagation environment, moving obstructions may significantly impact the received signal's strength, especially in dense environments, inducing thus a temporal variability even for the fixed users. Based on the proposed spatio-temporal shadowing field we present a computationally efficient model for the dynamics of shadowing experienced by stationary or mobile users. We also present new analytical results for the average outage duration and hand-offs based on multi-dimensional level crossings. Numerical applications are also presented.

The phd thesis concludes with an insight to further research on the topics considered.