



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

**Υπολογισμός Πιθανότητας Αποκοπής
N-διάστατου Πολυβηματικού Δικτύου με Χρήση
Συσχετισμένων Διαλείψεων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Σ. Χοχλιδάκης

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Απρίλιος 2013



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

**Υπολογισμός Πιθανότητας Αποκοπής
N-διάστατου Πολυβηματικού Δικτύου με Χρήση
Συσχετισμένων Διαλείψεων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Σ. Χοχλιδάκης

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 26^η Απριλίου 2013.

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

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

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

Αθήνα, Απρίλιος 2013

.....
Γεώργιος Σ. Χοχλιδάκης

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

Copyright © Γεώργιος Σ. Χοχλιδάκης, 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 τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Τα πολυβηματικά δίκτυα (*multi-hop networks*), απασχολούν έντονα τα τελευταία χρόνια την επιστημονική κοινότητα των Ασυρμάτων Επικοινωνιών, τόσο λόγω της μεγάλης ποικιλίας των εφαρμογών τους, όσο και για τα πολλά νέα τεχνολογικά ενδιαφέροντα προβλήματα που θέτουν.

Ένα από τα πιο σημαντικά μετρικά των Ασυρμάτων Δικτύων αποτελεί η εκτίμηση της διαθεσιμότητας και κατ' επέκταση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών που προσφέρουν αυτά τα δίκτυα. Για τον λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα θεωρητικού υπολογισμού καθώς επίσης έχουν δημιουργηθεί και αλγόριθμοι αριθμητικών υπολογισμών της πιθανότητας αποκοπής (*outage probability*) σε τέτοια δίκτυα. Συγκεκριμένα, καθώς τα περισσότερα ασύρματα δίκτυα, όπου βρίσκει εφαρμογή η χρήση επαναληπτών, υποφέρουν, κυρίως, από διαλείψεις λόγω σκίασης, γίνεται φανερό ότι για τον σωστό σχεδιασμό και λειτουργία τους πρέπει να έχει προηγηθεί ο υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής του δέκτη, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του περιβάλλοντος διάδοσης.

Το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι ο θεωρητικός και αριθμητικός υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυα με πολλαπλούς επαναλήπτες με χρήση συσχετισμένων διαλείψεων. Σε πρώτο στάδιο, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που διέπουν τα ασύρματα δίκτυα και του επαναλήπτες και έπειτα τα κυριότερα μοντέλα ανάλυσής τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο θεωρητικός υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυα με πολλαπλούς αναγεννητικούς (*regenerative*) και παθητικούς (*non-regenerative*) επαναλήπτες σε περιβάλλον σκίασης με συσχετισμένες διαλείψεις. Επιπλέον, υλοποιείται σε περιβάλλον *MATLAB* αλγόριθμος αριθμητικού υπολογισμού της πιθανότητας αποκοπής για N -διάστατο πολυβηματικό δίκτυο με βάση τις αναλυτικές εξισώσεις. Τέλος, δημιουργείται κώδικας προσομοίωσης με χρήση λογαριθμοκανονικών κατανομών με σκοπό την έλεγχο και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Το νέο μοντέλο υπολογισμού της πιθανότητας αποκοπής εφαρμόζεται σε διάφορα Ασύρματα Δίκτυα με πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Λέξεις Κλειδιά

Πιθανότητα αποκοπής, διαθεσιμότητα, πολυβηματικό δίκτυο, αναγεννητικοί επαναλήπτες, παθητικοί επαναλήπτες, συσχετισμένες διαλείψεις, σκίαση

Abstract

Multi-hop networks are an important issue for the Wireless Communications' scientific community over the last years, not only for their wide application, but also for the various new interesting technological problems that they pose.

One of the most important metric of Wireless Networks is the estimation of the availability and the quality of the provided services. Hence, several theoretical calculation models and some numerical algorithms, that evaluate the outage probability in such networks, have been proposed. Specifically, in most of the wireless networks where relays are used, they suffer mainly from fading due to shadowing. It has become evident that for the proper design and operation the calculation of the outage probability of the receiver must be considered, taking into account the parameters of the propagation environment.

The subject of this diploma thesis is the theoretical and numerical calculation of the outage probability in networks with multiple relays under correlated fading. Firstly, the basic principles of the wireless networks and the relays are presented, followed by the analysis of the most accepted models. In addition, the theoretical calculation of the outage probability, in networks with multiple regenerative and non-regenerative relays in shadowing environment with correlated fading, is presented. Moreover, the numerical algorithm for the calculation of the outage probability in N-dimensional multi-hop networks, based on the analytical equations, has been implemented using *MATLAB*. To conclude, a simulation framework has been derived using lognormal distributions in order to check and compare the results. The new model of outage probability calculation can be applied in various Wireless Networks with very interesting results.

Key Words

Outage probability, availability, multi-hop network, regenerative relays, non-regenerative relays, correlated fading, shadowing

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π. στα πλαίσια της δραστηριότητας του Εργαστηρίου Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο της διπλωματικής αυτής εργασίας Επίκουρο Καθηγητή κ. Αθανάσιο Δ. Παναγόπουλο, τόσο για την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνησή της, όσο και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα κ. Βασίλη Σακαρέλλο και τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Χάρη Κουρόγιωργα για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ | 10 |
| 1.1 Εισαγωγή | 10 |
| 1.2 Σύγχρονη ασύρματη μετάδοση σημάτων | 11 |
| 1.2.1 Ιστορική επισκόπηση | 11 |
| 1.2.2 Η χρήση των σύγχρονων ασυρμάτων δικτύων | 13 |
| 1.2.3 Η ιστορία της κινητής τηλεφωνίας..... | 15 |
| 1.2.4 Αναλογικά Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα..... | 16 |
| 1.2.5 Ψηφιακά Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα | 17 |
| 1.2.5.1 Global System for Mobile Communications (GSM)..... | 19 |
| 1.2.5.2 HSCSD και GPRS..... | 19 |
| 1.2.5.3 D-AMPS..... | 20 |
| 1.2.5.4 IS-95 | 21 |
| 1.2.6 Ασύρματα Συστήματα Μεταφοράς Δεδομένων | 21 |
| 1.2.6.1 Συστήματα Δικτύων Ευρείας Περιοχής..... | 22 |
| 1.2.6.2 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα | 23 |
| 1.2.6.3 Ασύρματα Δίκτυα Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς | 25 |
| 1.2.6.4 Ασύρματα Δίκτυα Μικρής Εμβέλειας | 26 |
| 1.2.7 Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση | 26 |
| 1.2.8 Δορυφορικά Συστήματα Επικοινωνιών | 28 |
| 1.2.9 Συστήματα Επικοινωνιών Τρίτης και Τέταρτης Γενιάς | 29 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1 | 31 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Ο ΡΑΔΙΟΔΙΑΓΥΛΟΣ ΚΑΙ Η ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ | 33 |
| 2.1 Εισαγωγή | 33 |
| 2.2 Μοντέλα ανάλυσης..... | 35 |
| 2.2.1 Μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου (Free Space Loss)..... | 36 |
| 2.2.2 Μοντέλο Επίπεδης Γης..... | 37 |
| 2.2.3 Εκθετικό Μοντέλο Διάδοσης (Μοντέλο Απλής Κλίσης)..... | 39 |
| Απώλειες Διαδρομής για Διάδοση Μη-οπτικής Επαφής (NLOS)..... | 39 |
| 2.2.4 Μοντέλο Okumura-Hata..... | 41 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 2.3 | Διαλείψεις | 43 |
| 2.3.1 | Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας και Σκίαση | 43 |
| | BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2 | 47 |
| | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΟΙ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΠΟΛΥΒΗΜΑΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ | 48 |
| 3.1 | Εισαγωγή | 48 |
| 3.2 | Αναγεννητικοί επαναλήπτες | 49 |
| 3.2.1 | Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη | 49 |
| 3.2.2 | Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με N αναγεννητικούς επαναλήπτες | 52 |
| 3.3 | Παθητικοί επαναλήπτες | 53 |
| 3.3.1 | Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με έναν παθητικό επαναλήπτη..... | 53 |
| 3.3.2 | Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με N παθητικούς επαναλήπτες..... | 56 |
| | BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3 | 59 |
| | ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ MATLAB..... | 60 |
| 4.1 | Εισαγωγή | 60 |
| 4.2 | Αριθμητικός υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής P_{out} | 60 |
| 4.2.1 | Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης (διαφορετικοί περιβάλλοντες χώροι) | 61 |
| 4.2.2 | Σύγκριση πιθανοτήτων αποκοπής για αναγεννητικούς και παθητικούς επαναλήπτες σε ίδιες συνθήκες διάδοσης | 65 |
| 4.2.3 | Εξάρτηση πιθανότητας αποκοπής, συντελεστή συσχέτισης και τυπικής απόκλισης | 67 |
| 4.3 | Απώλειες διαδρομής | 68 |
| 4.4 | Προσομοίωση μοντέλου με χρήση λογαριθμοκανονικής κατανομής | 71 |
| 4.5 | Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα | 79 |
| | BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4 | 80 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 82 |
| | ΚΩΔΙΚΕΣ | 82 |
| P1. | Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής για έναν αναγεννητικό επαναλήπτη | 82 |
| P2. | Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με N παθητικούς επαναλήπτες... | 82 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

1.1 Εισαγωγή

Με τον γενικό όρο *τηλεπικοινωνίες*, (*telecommunications*), χαρακτηρίζεται η κάθε μορφής ακουστική, οπτική, ηλεκτρομαγνητική, ηλεκτρική, ενσύρματη ή ασύρματη επικοινωνία που πραγματοποιείται ανεξαρτήτως απόστασης μεταξύ ενός πομπού και ενός δέκτη.

Η ανάγκη του ανθρώπου για επικοινωνία σε μακρινές αποστάσεις είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την απαρχή της ιστορίας του. Οι βασικοί λόγοι που οδήγησαν στην χρήση και την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών ήταν η ανάγκη για όσο το δυνατόν ταχύτερη μεταφορά μηνυμάτων κυρίως για στρατιωτικούς αλλά και εμπορικούς σκοπούς.

Τα πρώτα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν από διάφορους πολιτισμούς κατά την αρχαιότητα, πέρα από την φυσική μεταφορά του μηνύματος με χρήση αγγελιαφόρων ή ακόμη και περιστεριών, ήταν ακουστικά συστήματα με χρήση μεγάλων κρουστών και πνευστών οργάνων, όπως τύμπανα και σάλπιγγες, μεταφέροντας έτσι, σε σχετικά μικρή ακτίνα, το επιθυμητό μήνυμα.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν ποικίλα οπτικά συστήματα, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την απόσταση της επικοινωνίας και καθιστώντας την εφικτή σε δύσβατες περιοχές, όπως μεταξύ απομακρυσμένων ορεινών όγκων. Κάποια από αυτά ήταν τα σήματα καπνού, το δίκτυο των φρυκτωριών, ο υδραυλικός τηλεγράφος, οι φάροι και αργότερα ο ηλιογράφος, ο ναυτικός κώδικας σημαιών.

Με την πάροδο των χρόνων, ο άνθρωπος εφεύρισκε όλο και πιο πολύπλοκους και αποτελεσματικούς τρόπους επικοινωνίας. Παρόλα αυτά κοινό γνώρισμα όλων των μεθόδων ήταν ότι μπορούσαν να μεταφέρουν μηνύματα με αρκετά περιορισμένο κώδικα ο οποίος μάλιστα έπρεπε να είναι προσυμφωνημένος. Έμελλε να συμβεί μία σπουδαία ανακάλυψη, μόλις τον 19^ο αιώνα η οποία θα άλλαζε την μορφή των τηλεπικοινωνιών μια για πάντα.

1.2 Σύγχρονη ασύρματη μετάδοση σημάτων

1.2.1 Ιστορική επισκόπηση

Η ανάπτυξη των ασυρμάτων επικοινωνιών με χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχει τις ρίζες της στις εργασίες των Oersted, Farady, Maxwell και Hertz. Το 1820 ο Oersted έδειξε ότι ένα ηλεκτρικό ρεύμα παράγει ένα μαγνητικό πεδίο. Έντεκα χρόνια αργότερα ο Michael Farady έδειξε ότι κινώντας έναν μαγνήτη κοντά σε έναν αγωγό παράγεται ένα επαγόμενο ρεύμα. Έτσι απέδειξε ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο προκαλεί ένα ηλεκτρικό πεδίο. Η θεωρητική θεμελίωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας έγινε το 1864 από τον J. Maxwell, ο οποίος ενοποίησε τη θεωρία του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού μέσω των ομώνυμων κλασικών εξισώσεων προβλέποντας την ηλεκτρομαγνητική φύση του φωτός καθώς και το ότι το φως και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με κυματικές διαταραχές της ίδιας ταχύτητας. Η θεωρία του Maxwell επαληθεύτηκε πειραματικά από τον Hertz το 1887.

Το 1894, μια ευαίσθητη διάταξη ονομαζόμενη coherer, η οποία μπορούσε να συλλαμβάνει ραδιοσήματα, χρησιμοποιήθηκε από τον εφευρέτη της, τον Oliver Lodge, για να επιδειχθεί ασύρματη επικοινωνία σε απόσταση περίπου 140m στην Οξφόρδη της Αγγλίας. Ο G. Marconi υλοποίησε για πρώτη φορά το 1897 ένα σύστημα ασύρματης μετάδοσης (ασύρματος τηλέγραφος) βασιζόμενος στη θεωρία που είχε διατυπώσει αρκετά χρόνια πριν ο Maxwell. Οι πρώτες μεταδόσεις τηλεγραφικών μηνυμάτων σε μεγάλες αποστάσεις πραγματοποιήθηκαν από τον Marconi στις αρχές του εικοστού αιώνα, ενώ η ασύρματη μετάδοση φωνής σε μεγάλες αποστάσεις συνδυάστηκε με την εφεύρεση των ενισχυτικών λυχνιών και των ταλαντωτών κατά τη δεκαετία 1905-1915.

Από την εποχή του Marconi μέχρι το 1940 η τεχνολογία των κεραιών επικεντρώθηκε στην κατηγορία των κεραιών σύρματος και σε συχνότητες μέχρι UHF. Από το 1940 άρχισε η χρησιμοποίηση και άλλων τύπων κεραιών, όπως ανοικτών κυματοδηγών, χοανοκεραιών, κεραιών με ανακλαστήρα κλπ. Η αλματώδης ανάπτυξη της ηλεκτρονικής και της πληροφορικής σε συνδυασμό με την αντίστοιχη αύξηση του όγκου της πληροφορίας που διακινείται παγκοσμίως έχουν επιφέρει και αναμένεται να δώσουν ακόμη μεγαλύτερη ώθηση στο αντικείμενο των ασυρμάτων ζεύξεων και ειδικότερα στην εξέλιξη των κεραιών και κατά συνέπεια των ενδιάμεσων επαναληπτών.

Η μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων γίνεται κατά δύο τρόπους είτε με χρήση ενσύρματων μέσων είτε με ασύρματη μετάδοση. Η χρήση ενσύρματων μέσων, όπως γραμμών μεταφοράς, κυματοδηγών ή οπτικών ινών, προτιμάται κυρίως για την τηλεπικοινωνιακή διασύνδεση σημείων που είναι σταθερά και εντοπισμένα σε μικρή γεωγραφική έκταση. Τα βασικά μειονεκτήματα της ενσύρματης μετάδοσης είναι η εκθετική απόσβεση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος καθώς αυξάνεται η απόσταση από την πηγή και το μεγάλο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας ενός ενσύρματου δικτύου επικοινωνιών, ιδιαίτερα όταν το περιβάλλον δεν είναι ευνοϊκό.

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

Το βασικό μοντέλο ασύρματης ζεύξης περιλαμβάνει τον πομπό ο οποίος εκπέμπει στον χώρο ηλεκτρομαγνητικό κύμα συγκεκριμένου εύρους συχνότητας μέσω της κεραιάς που φέρει, το περιβάλλον διάδοσης του κύματος και τον δέκτη ο οποίος λαμβάνει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα με την κεραιά του. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που χρησιμοποιούνται στις ασύρματες επικοινωνίες χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την συχνότητα του φέροντος κύματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται στις τηλεπικοινωνίες καθώς επίσης και οι συνήθεις εφαρμογές και υπηρεσίες που εξυπηρετούνται στις ζώνες αυτές:

([1], [2], [3], [4])

| Συχνότητα | Ονομασία Φασματικής Ζώνης | Εφαρμογές |
|------------------|--|--|
| < 3 KHz | Extreme Low Frequency (EFL) | Επικοινωνίες υποβρυχίων |
| 3 KHz – 30 KHz | Very Low Frequency (VLF) | Θαλάσσιες επικοινωνίες |
| 20 KHz – 300 KHz | Low Frequency (LF) ή Long Wave (LW) | AM Ραδιοφωνία |
| 300 KHz – 3 MHz | Medium Frequency (MF) ή Medium Wave (MW) | AM Ραδιοφωνία |
| 3 MHz – 30 MHz | High Frequency (HF) ή Short Wave (SW) | AM Ραδιοφωνία |
| 30 MHz -300 MHz | Very High Frequency (VHF) | FM Ραδιοφωνία, τηλεόραση |
| 300 MHz – 3 GHz | Ultra High Frequency (UHF) | Τηλεόραση, κυψελωτά συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών |
| 3 GHz – 30 GHz | Super High Frequency (SHF) | Δορυφορικές επικοινωνίες |
| 30 GHz – 300GHz | Extra High Frequency (EHF) | Δορυφορικές επικοινωνίες |

1.2.2 Η χρήση των σύγχρονων ασυρμάτων δικτύων

Το σύγχρονο τηλεπικοινωνιακό περιβάλλον έχει κατά κύριο λόγο διαμορφωθεί υπό την επίδραση δύο σημαντικών παραγόντων. Ο πρώτος σχετίζεται με την ευρεία χρήση της ασύρματης τεχνολογίας για παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (*Wireless Communication Services*) και ο δεύτερος με την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών (*Broadband Services*) υψηλής ποιότητας υπηρεσίας (*Quality of Service, QoS*). Η τεχνολογία της ασύρματης μετάδοσης (*Wireless Transmission*) αναπτύσσεται για περισσότερο από έναν αιώνα, εντούτοις, η εκτεταμένη χρήση της για παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών διαδόθηκε μόλις τα τελευταία 15 με 20 χρόνια, δημιουργώντας ένα νέο τομέα για έρευνα και ανάπτυξη, τον τομέα των ασύρματων επικοινωνιών (*Wireless Communications*). Σήμερα, ο κλάδος αυτός αποτελεί το πλέον ταχέως αναπτυσσόμενο τμήμα της βιομηχανίας των επικοινωνιών.

Τα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών (*Wireless Communication Systems*), όπως για παράδειγμα τα κυψελοειδή ή κυψελωτά δίκτυα (*cellular networks*), η ασύρματη (*cordless*) και η δορυφορική (*satellite*) τηλεφωνία καθώς και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (*Wireless Local Area Networks, WLANs*) αποτελούν ένα αναπόσπαστο τμήμα της ανθρώπινης δραστηριότητας. Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της αναπτυξιακής τάσης που χαρακτηρίζει την αγορά των ασύρματων επικοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο αξίζει να αναφερθεί ότι εντός των επόμενων ετών οι χρήστες ασύρματων υπηρεσιών παγκοσμίως αναμένεται να υπερβούν σε πλήθος τους αντίστοιχους χρήστες ενσύρματων υπηρεσιών. Αυτή η τάση αποδίδεται κυρίως στα πλεονεκτήματα που διαθέτουν τα ασύρματα δίκτυα σε σχέση με τα ενσύρματα, καθιστώντας τα πρώτα περισσότερο προσιτά και εύχρηστα. Τα πλεονεκτήματα αυτά εντοπίζονται κυρίως στη δυνατότητα υποστήριξης της κινητικότητας (*mobility*) των χρηστών, στην ταχεία και εύκολη εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου καθώς και στο μειωμένο κόστος υποδομής που απαιτείται.

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών (*Mobile Communication Networks*) είναι εξ ορισμού ασύρματα δίκτυα. Σε ένα ασύρματο δίκτυο απαιτείται η ικανοποιητική ποιότητα της σύνδεσης μεταξύ του χρήστη με το σταθμό βάσης. Στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, λόγω της ανάγκης για υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών, αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό η πολυπλοκότητα που απαιτείται για την ικανοποίηση της απαίτησης αυτής. Είναι όμως εύκολα αντιληπτό ότι η πρόσθετη αυτή δυνατότητα δίνει σαφές πλεονέκτημα στους χρήστες των δικτύων κινητών επικοινωνιών, διότι τους επιτρέπει να μετακινούνται καθώς χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του δικτύου. Το κινητό τερματικό δεν έχει αποκλειστική ζεύξη επικοινωνίας με συγκεκριμένο σταθμό βάσης (*Base Station, BS*), αλλά του εκχωρείται εκάστοτε ένα προσωρινό κύκλωμα επικοινωνίας με το σταθμό βάσης που καλύπτει την περιοχή όπου βρίσκεται. Συνεπώς, ο αριθμός καταλόγου με τον οποίο καλείται το κινητό τερματικό (*Mobile Terminal, MT*) δεν προσδιορίζει συγκεκριμένο σταθμό βάσης, όπως συμβαίνει στις σταθερές ασύρματες επικοινωνίες,

αλλά το σταθμό βάσης με τον οποίο είναι εκάστοτε συνδεδεμένο το κινητό τερματικό σε αντιστοιχία με τη φυσική θέση του χρήστη. Στην περίπτωση εισερχόμενης κλήσης χρειάζεται πρώτα να εντοπιστεί ο σταθμός βάσης από τον οποίο εξυπηρετείται το κινητό τερματικό και, στη συνέχεια, να προωθηθεί η κλήση μέσω του σταθμού βάσης προς τη συσκευή. Στα δίκτυα προσωπικών επικοινωνιών (*Personal Communication Networks*) δεν υφίσταται μονοσήμαντη σχέση του κινητού τερματικού με το χρήστη, γεγονός που τα διαφοροποιεί σε σχέση με τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Κάθε χρήστης είναι εφοδιασμένος με προσωπικό (ατομικό) αριθμό κλήσης (*Personal Telecommunication Number, PTN*), τον οποίο μπορεί να εισάγει σε κάθε κινητό ή σταθερό τερματικό και, στη συνέχεια, το σύστημα επικοινωνιών αναλαμβάνει να αντιστοιχίσει τον *PTN* με τον αποκλειστικό αριθμό του τερματικού. Βάσει αυτής της αντιστοιχίας, το δίκτυο προσωπικών επικοινωνιών προωθεί της εισερχόμενες κλήσεις του χρήστη στο τερματικό με το οποίο είναι εκάστοτε συνδεδεμένος, προσφέροντας μεγαλύτερο βαθμό ελευθερίας στους χρήστες σε σχέση με τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Επιπλέον, οι χρήστες ενός δικτύου *PCN* έχουν τη δυνατότητα να επικοινωνήσουν με οποιονδήποτε άλλο χρήστη ανεξάρτητα από τη φυσική του θέση και το τερματικό που χρησιμοποιεί.

Τα ασύρματα δίκτυα διευκολύνουν την επικοινωνία προσφέροντας αυξημένη λειτουργικότητα. Αυτή αποδίδεται κυρίως στη μεγάλη μείωση του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας καθώς και στην ταχεία εγκατάσταση, αφού δεν απαιτείται σχεδόν καθόλου καλωδίωση. Τα θετικά χαρακτηριστικά που διαθέτουν τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών προσφέρουν τις ακόλουθες δυνατότητες:

- Ανάπτυξη δικτύων επικοινωνιών σε εκτεταμένες γεωγραφικά περιοχές με δυσμενή μορφολογικά χαρακτηριστικά ή/και με μικρή πυκνότητα πληθυσμού. Περιοχές με δυσμενή από τηλεπικοινωνιακή άποψη μορφολογικό ανάγλυφο αποτελούν τα ποτάμια, οι ορεινοί όγκοι ακόμα και οι ανοιχτές θάλασσες. Τα σχετικά προβλήματα αντιμετωπίζονται με την ανάπτυξη κατάλληλων ασύρματων δικτύων στις περιοχές αυτές. Επιπλέον, λόγω του χαμηλού κόστους εγκατάστασής τους, τα ασύρματα δίκτυα, μπορούν με οικονομικό τρόπο να εξυπηρετήσουν περιοχές με αραιή πυκνότητα πληθυσμού και κατ' επέκταση περιοχών όπου το κόστος εγκατάστασης ενσύρματων δικτύων κρίνεται απαγορευτικό.
- Αποφυγή εκτεταμένης καλωδίωσης. Πολλές φορές δεν υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης καλωδίων συνεπώς η χρήση ασύρματου δικτύου είναι η μόνη λύση. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελούν τα ιστορικά και διατηρητέα κτίρια στο εσωτερικό των οποίων η εγκατάσταση καλωδίων είναι αδύνατη.
- Ανάπτυξη προσωρινών δικτύων επικοινωνιών. Είναι συχνό φαινόμενο να εγκαθίστανται προσωρινά ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών που καλύπτουν τις

ανάγκες μιας ομάδας χρηστών για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα γραφεία τύπου σε μεγάλες αθλητικές διοργανώσεις.

Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως γίνεται σαφές ότι η εγκατάσταση ασύρματων δικτύων επικοινωνιών, όπως π.χ. τα ασύρματα τοπικά δίκτυα, αποτελεί μια οικονομικά συμφέρουσα επιλογή προσφέροντας αυξημένη ευελιξία στον πάροχο τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών και την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών στο χρήστη. Ταυτόχρονα, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου είναι πολύ μικρότερο συγκριτικά με αυτό για ένα ενσύρματο.

1.2.3 Η ιστορία της κινητής τηλεφωνίας

Το 1946 παρουσιάστηκε σε 25 πόλεις των Ηνωμένων Πολιτειών το πρώτο σύστημα κινητών επικοινωνιών, γνωστό ως *Mobile Telephone System* (MTS). Λόγω των τεχνολογικών περιορισμών της εποχής οι πομποδέκτες του MTS ήταν ογκώδεις και μπορούσαν να μεταφερθούν μόνο επί οχημάτων. Για το λόγο αυτό η μοναδική πρακτική χρησιμότητα τους περιορίστηκε στην επικοινωνία μεταξύ κινητών οχημάτων και του σταθμού βάσης. Το MTS υπήρξε ένα αναλογικό σύστημα που υποστήριζε διπλής κατεύθυνσης μετάδοση μέσω κοινού καναλιού και για τις δύο κατευθύνσεις (*half-duplex*)· αυτό σήμαινε ότι ο χρήστης μπορεί κάθε στιγμή να βρίσκεται σε μια από τις δύο καταστάσεις: α) λήψης ή β) εκπομπής σήματος. Για την εναλλαγή μεταξύ των δύο καταστάσεων, ο χρήστης έπρεπε να πιέσει ένα διακόπτη στο κινητό τερματικό, χαρακτηριστικό για το οποίο ο συγκεκριμένος τρόπος επικοινωνίας πολλές φορές αναφέρεται με την ορολογία *Push To Talk* (PTT). Σε κάθε περιοχή που κάλυπτε το σύστημα MTS εγκαθίστατο ένας σταθμός βάσης ο οποίος περιείχε έναν πομποδέκτη υψηλής ισχύος για να εξυπηρετεί κινητά τερματικά που βρίσκονταν σε μεγάλες αποστάσεις. Στις περιπτώσεις όπου κάποια περιοχή δε μπορούσε να εξυπηρετηθεί μόνο από ένα σταθμό βάσης έπρεπε να εγκατασταθεί και δεύτερος σταθμός σε πολύ μεγάλη απόσταση από τον πρώτο για να αποφευχθούν αλληλοπαρεμβολές, αφού η ζώνη συχνοτήτων που χρησιμοποιούσε το σύστημα ήταν κοινή για όλους τους σταθμούς βάσης.

Λόγω της μεγάλης απόστασης, η απευθείας ζεύξη του τερματικού με το σταθμό βάσης ήταν αδύνατη. Για το λόγο αυτό υπήρχαν πολλαπλά σημεία λήψης του σήματος εντός της περιοχής κάλυψης που αναμετέδιδαν το σήμα προς το σταθμό βάσης. Η μεταγωγή των κλήσεων προς τους χρήστες ήταν χειροκίνητη από το διαχειριστή του συστήματος που ήταν επιφορτισμένος με την προώθηση των εισερχόμενων κλήσεων προς τους χρήστες. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, τα μειονεκτήματα του MTS ήταν πολλαπλά σημαντικότερα των οποίων ήταν το μεγάλο μέγεθος των κινητών τερματικών,

η χειροκίνητη μεταγωγή των κλήσεων, ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων καναλιών (συνήθως τρία διαθέσιμα κανάλια ανά σταθμό βάσης) κ.α. Το 1960 παρουσιάστηκε η βελτιωμένη έκδοση του *MTS (Improved Mobile Telephone System, IMTS)*, που χρησιμοποιούσε 23 κανάλια ανά σταθμό βάσης και αυτόματο σύστημα μεταγωγής κλήσεων υποστηρίζοντας ταυτόχρονη επικοινωνία και κατά τις δύο κατευθύνσεις (*full-duplex*).

1.2.4 Αναλογικά Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Η αναποτελεσματική χρήση του φάσματος και η μειωμένη χωρητικότητα του συστήματος *IMTS* σε συνδυασμό με την υψηλή απαιτούμενη ισχύ εκπομπής που προκαλούσε παρεμβολές σε γειτονικά συστήματα οδήγησαν στην αντικατάστασή του από ένα νέο σύστημα κινητών επικοινωνιών. Αυτό αναπτύχθηκε μεταξύ του 1950 και 1960 στα εργαστήρια της *AT&T Bell Laboratories* και υποστήριζε τη δόμηση του δικτύου με βάση το κυψελωτό πρότυπο, δίνοντας το έναυσμα για επανάσταση στο χώρο των κινητών επικοινωνιών. Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της ανάπτυξης που ακολούθησε αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι ούτε οι επιστήμονες της εποχής δεν μπόρεσαν να προβλέψουν την επερχόμενη ραγδαία εξέλιξη καθώς οι αρχικές εκτιμήσεις τους έκαναν λόγο για 1 εκατομμύριο χρήστες δικτύων κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως στο τέλος του 20ου αιώνα, ενώ το 2000 οι εγγεγραμμένοι χρήστες μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες υπερέβαιναν τα 100 εκατομμύρια.

Η αυθεντικότητα της ιδέας ανάπτυξης ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών με βάση το κυψελωτό πρότυπο αποδίδεται στον D. H. Ring (1947) [5]. Το πρότυπο αυτό υποστηρίζει την αντικατάσταση των σταθμών βάσης ευρείας κάλυψης από έναν αριθμό σταθμών βάσης με μικρότερη εμβέλεια. Η περιοχή κάλυψης κάθε νέου σταθμού βάσης ονομάστηκε κυψέλη (*cell*), από όπου προέκυψε και η ονομασία του προτύπου (*cellular*). Για την εξυπηρέτηση μιας περιοχής απαιτούνται πολλές κυψέλες, τοποθετημένες γειτονικά χωρίς όμως να επικαλύπτονται. Το διαθέσιμο φάσμα χωρίζεται σε κανάλια και κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί διαφορετικό υποσύνολο καναλιών σε σχέση με τη γειτονική της. Το ίδιο υποσύνολο καναλιών χρησιμοποιείται από απομακρυσμένες μεταξύ τους κυψέλες εξασφαλίζοντας την ελαχιστοποίηση των αντίστοιχων αλληλοπαρεμβολών. Η τεχνική αυτή είναι γνωστή ως αναχρησιμοποίηση συχνότητας (*frequency reuse*) και επιτρέπει την πολλαπλή χρησιμοποίηση του ίδιου καναλιού εντός του δικτύου, αυξάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο το βαθμό αξιοποίησης του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Κάθε σταθμός βάσης συνδέεται κατά προτίμηση ενσύρματα με το κέντρο μεταγωγής κινητού τερματικού (*Mobile Switching Center, MSC*) που είναι συνδεδεμένο απευθείας με αντίστοιχα *MSC* ή με *MSC* δευτέρου βαθμού. Η κλιμάκωση μεταξύ των *MSC* – που εκτός των άλλων είναι υπεύθυνα για την κατανομή των καναλιών στους

σταθμούς βάσης που ελέγχουν – μπορεί να συνεχιστεί ανάλογα με τον τρόπο οργάνωσης και το μέγεθος του δικτύου.

Η μικρή γεωγραφική κάλυψη που υποστηρίζει κάθε σταθμός βάσης δημιουργεί την ανάγκη για υποστήριξη κινητικότητας μεταξύ των χρηστών χωρίς να υποβαθμιστεί η ποιότητα υπηρεσιών των κλήσεων που βρίσκονται σε εξέλιξη. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται μέσω της διαδικασίας διαπομπής (*handover*) που ήταν αδύνατο να επιτευχθεί την εποχή όπου προτάθηκε για πρώτη φορά η ιδέα του κυψελωτού συστήματος. Στα χρόνια που ακολούθησαν, η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της μικροηλεκτρονικής, της τηλεπικοινωνιακής ηλεκτρονικής ραδιοσυχνότητας και των κέντρων μεταγωγής έκανε εφικτή την υποστήριξη διαπομπής με τρόπο αδιαφανή προς το χρήστη.

Η πρώτη γενιά των κυψελωτών συστημάτων (*First Generation Cellular Systems, 1G*) [6] σχεδιάστηκε στα τέλη του 60, αλλά η υλοποίησή τους έγινε πολύ αργότερα, στις αρχές του 80, λόγω των ρυθμιστικών προβλημάτων που ανέκυψαν. Τα κυψελωτά συστήματα 1G μπορούν να θεωρηθούν απόγονοι των *MTS/IMTS* καθώς και αυτά υπήρξαν αναλογικά συστήματα. Η πρώτη δοκιμαστική εγκατάσταση ενός πλήρως λειτουργικού συστήματος *1G* έγινε στο Σικάγο των Ηνωμένων Πολιτειών το 1978, ενώ το πρώτο σύστημα για εμπορική εκμετάλλευση, γνωστό ως *Advanced Mobile Phone System (AMPS)*, λειτούργησε στην ίδια χώρα το 1982 υποστηρίζοντας υπηρεσίες φωνής. Παρόμοια συστήματα χρησιμοποιήθηκαν και σε άλλες χώρες, καίτοι το AMPS είναι το μόνο που χρησιμοποιείται ευρέως ακόμα και σήμερα. Όλα αυτά τα συστήματα είναι αναλογικά, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση συχνότητας (*Frequency Modulation, FM*) για τη μετάδοση της φωνής και υποστηρίζουν διαπομπή με κριτήριο την ισχύ του σήματος λήψης στο σταθμό βάσης. Κάθε σταθμός βάσης διαχειρίζεται ένα σύνολο καναλιών που του έχουν απονεμηθεί από τον αντίστοιχο *MSC*, αποδίδοντας ένα κανάλι σε κάθε εισερχόμενη κλήση. Η επικοινωνία εντός του ενσύρματου τμήματος του δικτύου καθώς και μεταξύ του δικτύου με το Δημόσιο Δίκτυο (*Public Switched Telephone Network, PSTN*) χρησιμοποιεί την τεχνολογία της μεταγωγής πακέτου.

1.2.5 Ψηφιακά Κυψελωτά Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα

Τα αναλογικά κυψελωτά συστήματα αποτέλεσαν το πρώτο βήμα για τη βιομηχανία της κινητής τηλεφωνίας. Παρά τη μεγάλη επιτυχία που σημείωσαν, είχαν ένα πλήθος από μειονεκτήματα τα οποία περιορίζαν την επίδοσή τους. Τα μειονεκτήματα αυτά λύθηκαν με την έλευση της δεύτερης γενιάς των κυψελωτών συστημάτων (*Second Generation Cellular Systems, 2G*) [6], που υποστηρίζουν ψηφιακή αναπαράσταση του σήματος. Η ψηφιοποίηση του σήματος πραγματοποιείται με χρήση μετατροπέα (*Analog to Digital converter, A/D converter*), που δέχεται το αναλογικό σήμα και το μετατρέπει

σε ακολουθία συμβόλων που διαμορφώνει το φέρον σήμα. Η έξοδος του *A/D* μετατροπέα είναι το ψηφιακά διαμορφωμένο σήμα. Στο δέκτη επιτελείται η αντίστροφη διαδικασία προς μετατροπή του ψηφιακού σήματος λήψης σε αναλογικό. Τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών συστημάτων έναντι των αναλογικών συνοψίζονται ως εξής:

- Τα αναλογικά συστήματα αντιμετωπίζουν σημαντικά προβλήματα από παρεμβολές των αναλογικών σημάτων μεταξύ τους, με συνέπεια τη μεγάλη διακύμανση στην ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών φωνής. Αντιθέτως, τα ψηφιακά συστήματα υποστηρίζουν τεχνικές ανίχνευσης (*error detection*) και διόρθωσης λαθών (*error correction*) με αποτέλεσμα τη σημαντική βελτίωση της ποιότητας του σήματος λήψης ([7],[8]). Επιπλέον, εφόσον εφαρμόζονται τεχνικές συμπίεσης των ψηφιακών δεδομένων, αυξάνεται σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό η αποδοτική χρήση του διαθέσιμου φάσματος.

- Στα αναλογικά συστήματα αποδίδεται ένα φέρον ανά χρήστη, ανεξάρτητα από το αν ο χρήστης μεταδίδει πληροφορία μέσω του φέροντος αυτού ή όχι. Αντιθέτως, στα ψηφιακά συστήματα, κάθε φέρον εξυπηρετεί πολλούς χρήστες καθώς αυτοί είτε εκπέμπουν σε διαφορετικές χρονοθυρίδες (*time slots*) είτε χρησιμοποιούν διαφορετικό κώδικα [9]. Επιπλέον, οι χρονοθυρίδες ή οι κώδικες διατίθενται στους χρήστες μόνο όταν πρόκειται να μεταδώσουν δεδομένα, διαφορετικά, δε δεσμεύονται πόροι του δικτύου.

- Η ψηφιοποιημένη κίνηση μπορεί εύκολα να κρυπτογραφηθεί ώστε να παρέχει αυξημένα επίπεδα ασφάλειας αποτρέποντας την υποκλοπή πληροφορίας από μη αδειοδοτημένα τερματικά ([10],[11]). Η δυνατότητα κρυπτογράφησης στα αναλογικά συστήματα είναι αδύνατη με συνέπεια τα αναλογικά σήματα να μεταδίδονται χωρίς προστασία. Απόρροια αυτού είναι η δυνατότητα εύκολης υποκλοπής των συνομιλιών αλλά και των σημάτων ελέγχου του δικτύου. Στην πράξη, αυτό αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα των συστημάτων *1G* καθώς σε πολλές περιπτώσεις υποκλέπτονται συνομιλίες. Ένα πλήθος από διαφορετικά συστήματα *2G* έχουν αναπτυχθεί παγκοσμίως, τα οποία εκτός από υπηρεσίες φωνής υποστηρίζουν και ένα σύνολο νέων υπηρεσιών, όπως οι υπηρεσίες σύντομων μηνυμάτων (*Short Message Service, SMS*), εμφάνιση του αριθμού κλήσης, μεταφοράς δεδομένων κ.α. Τα συστήματα *2G* αναβαθμίστηκαν με την πάροδο των χρόνων και την πρόοδο της τεχνολογίας σχηματίζοντας τα συστήματα *2.5G* που υποστηρίζουν ταχύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων[12].

1.2.5.1 Global System for Mobile Communications (GSM)

Για την υποστήριξη συστημάτων 2G στην Ευρώπη απονεμήθηκε αρχικά φάσμα στην περιοχή των 900MHz και στη συνέχεια στην περιοχή των 1800MHz. Οι πρώτες ενέργειες στην Ευρώπη ξεκίνησαν το 1982, οπότε και ιδρύθηκε η ομάδα εργασίας με το όνομα *Groupe Speciale Mobile (GSM)* που αργότερα μετονομάστηκε σε *Global System for Mobile Communications*, αποσκοπώντας να καθορίσει ένα κοινό πρότυπο για όλη την Ευρώπη. Το αποτέλεσμα ήταν το ομώνυμο με την ομάδα πρότυπο *GSM* που αποτελεί το πλέον δημοφιλές πρότυπο συστημάτων 2G αφού από το 1999 οι εγγεγραμμένοι χρήστες σε *GSM* δίκτυα αυξάνονται παγκοσμίως με ρυθμό μεγαλύτερο του ενός εκατομμυρίου ανά εβδομάδα [13]. Η μεγάλη διείσδυση στην αγορά που γνωρίζει το σύστημα *GSM* οφείλεται αφενός στην αυξημένη επίδοση που επιτυγχάνει και αφετέρου στο ότι αποτελεί το αποκλειστικό πρότυπο συστημάτων 2G για ολόκληρη την Ευρώπη. Το γεγονός αυτό απλοποιεί την υποστήριξη υπηρεσιών περιαγωγής (*roaming*) μεταξύ διαφορετικών χωρών και παρόχων υπηρεσιών.

Το πρώτο εμπορικό σύστημα *GSM* λειτούργησε το 1982 στη φασματική περιοχή των 900MHz. Ασφαλώς, υπάρχουν και συστήματα *GSM* τα οποία λειτουργούν στη ζώνη των 1800MHz, με την ονομασία *DCS 1800*, αλλά και στη ζώνη των 1900MHz, με τα τελευταία να είναι κυρίως διαδεδομένα στην Αμερική. Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος *GSM* περιλαμβάνει το διαχωρισμό του διατιθέμενου φάσματος σε κανάλια συχνοτήτων (*frequency channels*), που οργανώνονται σε πλαίσια (*frames*). Κάθε πλαίσιο είναι εκ νέου οργανωμένο σε χρονοθυρίδες που χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν τα κανάλια τα οποία εξυπηρετούν την εισερχόμενη κίνηση από τους χρήστες και τις λειτουργίες ελέγχου του δικτύου. Η εισερχόμενη κίνηση που υποστηρίζει ένα σύστημα *GSM* προέρχεται είτε από υπηρεσίες φωνής ή χαμηλού ρυθμού δεδομένων (περίπου 14.4kbps).

1.2.5.2 HSCSD και GPRS

Πρόσθετο πλεονέκτημα των συστημάτων *GSM* αποτελεί η δυνατότητα που παρέχουν για υποστήριξη μεταγενέστερων τεχνολογιών για υπηρεσίες που απαιτούν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, όπως χαρακτηριστικά είναι οι υπηρεσίες *High Speed Circuit Switched Data (HSCSD)* και *General Packet Radio Service (GPRS)*[14]. Η τεχνολογία *HSCSD* αποτελεί μικρή αναβάθμιση του *GSM*, αποδίδοντας περισσότερες από μια χρονοσχισμές σε κάθε τερματικό. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να διατεθούν 2, 3 ή 4 χρονοσχισμές για την εξυπηρέτηση των χρηστών επιτυγχάνοντας ρυθμούς μετάδοσης των 28.8, 43.2 και 57.6kbps αντίστοιχα. Επιπλέον, υποστηρίζει ασύμμετρους ρυθμούς μετάδοσης για τις ζεύξεις downlink και uplink επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό την αποδοτικότερη εκμετάλλευση της χωρητικότητας του δικτύου.

Μειονέκτημα του συστήματος *HSCSD* αποτελεί η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας καθώς η ταυτόχρονη μετάδοση και λήψη σε πολλαπλές χρονοσχισμές απαιτεί περισσότερη ενέργεια σε σχέση με τα συστήματα *GSM* όπου γίνεται χρήση μιας μόνο χρονοσχισμής ανά κινητό τερματικό. Εξετάζοντας αυτή τη δυνατότητα από την άλλη όψη, καθώς η λήψη πληροφορίας έχει μικρότερες απαιτήσεις για κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με την εκπομπή προκύπτει ότι τα συστήματα *HSCSD* είναι αποδοτικά για ασύμμετρες υπηρεσίες, όπως είναι η περιήγηση του παγκόσμιου ιστού, όπου η κίνηση της ζεύξης *downlink* είναι σαφώς μεγαλύτερη συγκριτικά με τη ζεύξη *uplink*.

Το σύστημα *GPRS* έχει τον ίδιο τρόπο λειτουργίας με το *HSCSD*, αποδίδοντας στους χρήστες περισσότερες χρονοσχισμές ανά πλαίσιο. Η διαφορά μεταξύ των δύο τεχνολογιών έγκειται στο ότι τα συστήματα *GSM* και *HSCSD* βασίζονται στη μεταγωγή κυκλώματος, ενώ τα συστήματα *GPRS* στη μεταγωγή πακέτου. Επομένως, ένα *GSM* ή *HSCSD* κινητό τερματικό που κάνει χρήση υπηρεσιών περιήγησης του παγκόσμιου ιστού με ρυθμό μετάδοσης 14.4kbps δεσμεύει ένα πλήρες κύκλωμα 14.4kbps από τη διαθέσιμη χωρητικότητα του συστήματος *GSM/HSCSD* για όλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Λαμβάνοντας υπόψη ότι κατά τη διάρκεια της σύνδεσης χρησιμοποιείται η ζεύξη *downlink* για τη λήψη πληροφορίας της ιστοσελίδας και λιγότερο η ζεύξη *uplink* για μετάδοση πληροφορίας από το τερματικό στο σταθμό βάσης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου χρησιμοποιείται αναποτελεσματικά. Στα συστήματα *GPRS*, ένας διάυλος χωρητικότητας 14.4kbps διατίθεται σε περισσότερους από ένα χρήστες, δεδομένου ότι δε θα απαιτήσουν οι χρήστες ταυτόχρονα τη μέγιστη διαθέσιμη ταχύτητα. Κάθε χρήστης είναι συνδεδεμένος με πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης στο δίκτυο, ο οποίος αυξάνεται στην περίπτωση όπου υπάρξει αίτημα από το χρήστη για προβολή μιας ιστοσελίδας. Τα *GPRS* κινητά τερματικά υποστηρίζουν συμμετρική ή ασύμμετρη κίνηση διαφορετικών ρυθμών μετάδοσης από τα 14.4 έως τα 115.2kbps.

1.2.5.3 D-AMPS

Σε αντίθεση με την Ευρώπη όπου υιοθετήθηκε το κοινό πρότυπο συστήματος *GSM*, στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιήθηκαν περισσότερα από ένα πρότυπα. Τα πρότυπα *IS-54* και *IS-136*, της οικογένειας προτύπων *Digital AMPS (D-AMPS)*, χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά το 1993 και το 1996 αντίστοιχα, με το δεύτερο να αποτελεί επέκταση του πρώτου υποστηρίζοντας πρόσθετες λειτουργίες και χαρακτηριστικά. Το πρότυπο *D-AMPS* επιτυγχάνει τριπλάσια χωρητικότητα σε σχέση με το *AMPS* και υποστηρίζει χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 3 kbps. Η εξέλιξη της τεχνολογίας και η απαίτηση για υποστήριξη κίνησης πακέτων δεδομένων οδήγησε στην πλέον εξελιγμένη έκδοση του *D-AMPS*, το *D-AMPS+*, το οποίο προσφέρει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 9.6 έως 19.2kbps, αρκετά χαμηλότερους από τους

αντίστοιχους των *GPRS/HSCSD*. Επιπλέον, μια ακόμα επέκταση των συστημάτων *D-AMPS* αποτελεί το πρότυπο *Cellular Digital Packet Data (CDPD)*, το οποίο μπορεί να λειτουργήσει επί των προτύπων *D-AMPS* και *AMPS* προσφέροντας τους ίδιους ρυθμούς δεδομένων με το *D-AMPS+*. Βασικά πλεονεκτήματά του είναι το μειωμένο κόστος συγκριτικά με το *D-AMPS+* και το γεγονός ότι το *CDPD* αποτελεί το μοναδικό τρόπο για τη μετάδοση δεδομένων μέσω των αναλογικών δικτύων τεχνολογίας *AMPS*.

1.2.5.4 IS-95

Το 1993 προτυποποιήθηκε ένα ακόμα σύστημα 2G γνωστό ως *IS-95*, ή αλλιώς *cdmaOne*, το οποίο εγκαταστάθηκε το 1995 κυρίως στη Νότια Κορέα και το Χονγκ-Κονγκ. Αργότερα, το 1996, εγκαταστάθηκε και στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το σύστημα *IS-95* βασίζεται στη μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (*Code Division Multiple Access, CDMA*), η οποία υποστηρίζει τη χρήση του ίδιου καναλιού από περισσότερα του ενός κινητά τερματικά υπό την προϋπόθεση ότι κάθε κινητό τερματικό από αυτά που μοιράζονται το ίδιο κανάλι κάνει χρήση διαφορετικού κώδικα. Με τον τρόπο αυτό στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών τεχνολογίας *CDMA* είναι δυνατό γειτονικές κυψέλες να χρησιμοποιούν τα ίδια κανάλια, καθιστώντας με τον τρόπο αυτό το *IS-95* το πρώτο σύστημα που διαθέτει αυτή τη δυνατότητα. Ο τρόπος σχεδίασης του *IS-95*, καθώς και το γεγονός ότι λειτουργεί στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων με το *AMPS*, επιτρέπουν στο *IS-95* να υποστηρίζει κινητά τερματικά που λειτουργούν και με τα δύο συστήματα. Οι ρυθμοί δεδομένων που υποστηρίζει το *IS-95* είναι από 4.8 έως 14.4kbps, ενώ η επέκτασή του γνωστή με το όνομα *IS-95b* ή αλλιώς *cdmaTwo* υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων έως και 115.2kbps, επιτρέποντας στα κινητά τερματικά να χρησιμοποιούν μέχρι και 8 διαφορετικούς κώδικες ταυτόχρονα.

1.2.6 Ασύρματα Συστήματα Μεταφοράς Δεδομένων

Τα κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών αρχικά ήταν προσανατολισμένα για μετάδοση υπηρεσιών φωνής και για το λόγο αυτό στην αρχική τους γενιά ήταν αναλογικά. Σε αντίθεση με τα κυψελωτά δίκτυα, τα ασύρματα δίκτυα μεταφοράς δεδομένων (*Wireless Data Systems*) βασίζονται στον ψηφιακό τρόπο μετάδοσης του σήματος. Χαρακτηριστικό των υπηρεσιών δεδομένων είναι η εκρηκτικότητα της κίνησης, δηλαδή σε περίπτωση όπου δεν υπάρχουν δεδομένα προς μετάδοση τα κινητά τερματικά βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής, ενώ όταν υπάρξουν τότε το κινητό τερματικό που επιθυμεί να μεταδώσει τα δεδομένα μπορεί να απαιτήσει μεγαλύτερο από το συμφωνημένο ρυθμό μετάδοσης. Το πρώτο ασύρματο δίκτυο μεταφοράς δεδομένων

αναπτύχθηκε το 1971 στο πανεπιστήμιο της Χαβάης στα πλαίσια του προγράμματος με την ονομασία *ALOHANET*. Η βασική ιδέα προέβλεπε τη δημιουργία ενός ασύρματου δικτύου διπλής κατεύθυνσης για τη μεταφορά δεδομένων χωρίς να χρησιμοποιούνται τηλεφωνικά καλώδια, που θα εξυπηρετούσε τέσσερα διαφορετικά νησιά, με τον κεντρικό σταθμό στο νησί *Oahu*. Συνεπώς, υλοποιήθηκε μια αρχιτεκτονική αστέρα, με τον κεντρικό υπολογιστή να έχει το ρόλο του κεντρικού σταθμού (*hub*). Οποιαδήποτε επικοινωνία μεταξύ δύο υπολογιστών του δικτύου πραγματοποιείται μέσω του κεντρικού σταθμού, έχοντας ως μειονέκτημα τη μειωμένη αποδοτικότητα ως προς τη συνολική καθυστέρηση μετάδοσης της πληροφορίας από άκρο σε άκρο (*end-to-end delay*) που επιτυγχάνεται η οποία αντισταθμίζεται μερικώς από την απλή δομή του δικτύου. Στο *ALOHANET* δεν υπάρχει πρόβλεψη για υποστήριξη κινητικότητας, σε αντίθεση με τα σύγχρονα ασύρματα δίκτυα δεδομένων όπου η κινητικότητα του χρήστη είναι μια από τις σημαντικότερες προδιαγραφές που πρέπει να πληρούνται.

1.2.6.1 Συστήματα Δικτύων Ευρείας Περιοχής

Τα ασύρματα συστήματα δεδομένων ευρείας περιοχής (*Wide Area Data Systems*) υποστηρίζουν χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, μέσω της οποίας παρέχονται υπηρεσίες μηνυμάτων, ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και τηλεειδοποίησης (*paging*)[15]. Μερικά από τα σημαντικότερα ασύρματα συστήματα δεδομένων ευρείας περιοχής είναι τα ακόλουθα:

- Συστήματα τηλεειδοποίησης. Πρόκειται για κυψελωτά συστήματα απλής κατεύθυνσης επικοινωνίας τα οποία υποστηρίζουν πολύ χαμηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Τα πρώτα συστήματα τηλεειδοποίησης μετέδιδαν μόνο ένα *bit* πληροφορίας με σκοπό την ενημέρωση του χρήστη για το γεγονός ότι κάποιος θέλει να επικοινωνήσει μαζί του. Οι επόμενες γενιές των συστημάτων αυτών υποστηρίζουν πλέον εξελιγμένες υπηρεσίες, όπως τη μεταφορά απλών μηνυμάτων στον τελικό χρήστη ή και ενός αριθμού επικοινωνίας με τον καλούντα. Ο τρόπος λειτουργίας τους βασίζεται στην ευρυεκπομπή (*broadcasting*) του μηνύματος τηλεειδοποίησης από τους σταθμούς βάσης, οπότε δεν προκύπτει ανάγκη για γνώση της θέσης του χρήστη ούτε για εξελιγμένα πρωτόκολλα δρομολόγησης της κίνησης. Τα υψηλά επίπεδα ισχύος εκπομπής έχουν ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα για απλούστευση του υλικού και του λογισμικού των τερματικών συσκευών, οι οποίες είναι πολύ μικρές σε μέγεθος. Στις Ηνωμένες Πολιτείες εμφανίστηκαν συστήματα τηλεειδοποίησης διπλής κατεύθυνσης επικοινωνίας, με τις ανάλογες συσκευές να είναι αρκετά μεγαλύτερες, βαρύτερες, ακριβότερες και περισσότερο απαιτητικές από πλευράς κατανάλωσης ενέργειας σε σχέση με τις αντίστοιχες της απλής κατεύθυνσης

επικοινωνίας. Η ελκυστικότητα των συστημάτων αυτών μειώνεται διαρκώς καθώς είναι ανταγωνιστικά με τα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών τα οποία προσφέρουν σαφώς περισσότερες ολοκληρωμένες υπηρεσίες.

•*Mobitex*. Πρόκειται για ένα σύστημα μεταγωγής πακέτου το οποίο αναπτύχθηκε από την *Ericsson* για υπηρεσίες τηλεμετρίας, το οποίο υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 8kbps. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα να καλύπτει ευρείες περιοχές μέσω σταθμών βάσης που πρέπει να εγκαθίστανται σε σημεία με μεγάλο υψόμετρο σχετικά με την περιοχή που εξυπηρετούν. Η πρόσβαση στο μέσο γίνεται βάσει πρωτοκόλλου παρόμοιου με το *ALOHA*. Το 1998 εγκαταστάθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες μερικά συστήματα *Mobitex* παρέχοντας υπηρεσίες Internet χαμηλού ρυθμού μετάδοσης.

•*Ardis*. Πρόκειται για ένα σύστημα μεταγωγής πακέτου παρόμοιο με το *Mobitex*. Το *Ardis*, γνωστό και ως *DataTAC*, αναπτύχθηκε από τις εταιρίες *IBM* και *Motorola* και εμφανίστηκε σε δύο εκδόσεις: α) την *MDC4800 (Mobile Data communications 4800)* με ρυθμό δεδομένων 4.8kbps και β) την *RD-LAP (Radio Data Link Access Protocol)* με ρυθμό δεδομένων 192kbps, που είναι συμβατή με την *MDC4800*. Η τεχνική κάλυψης των περιοχών είναι παρόμοια με αυτή του *Mobitex*, χρησιμοποιώντας λίγους σταθμούς βάσης, τοποθετημένων σε σχετικά μεγάλο ύψος. Επίσης, το πρωτόκολλο του *Ardis* για την πρόσβαση στο μέσο είναι παρόμοιο με το *ALOHA*.

1.2.6.2 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (*WLANs*) χρησιμοποιούνται για να παρέχουν γρήγορη μεταφορά δεδομένων σε εντοπισμένες χωρικά περιοχές, όπως για παράδειγμα ένα κτίριο ή ένα εκπαιδευτικό ίδρυμα ([6],[16],[17]). Η ανάπτυξη των ασύρματων τοπικών δικτύων ξεκίνησε στα μέσα του '80, όταν η εθνική επιτροπή τηλεπικοινωνιών των Ηνωμένων Πολιτειών (*US Federal Communications Commission, FCC*) αποφάσισε να αποδεσμεύσει ένα μέρος του φάσματος για βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική χρήση. Αυτή η φασματική περιοχή είναι γνωστή με την ονομασία *ISM (Industrial, Scientific and Medical band)*. Στα πρώτα χρόνια που ακολούθησαν την απελευθέρωση της ζώνης *ISM* εμφανίστηκαν στην αγορά πολλά προϊόντα τα οποία ήταν ασύμβατα μεταξύ τους διαχωρίζοντας την αγορά των προϊόντων αυτών σε πολλά επιμέρους τμήματα. Η έλλειψη ενός κοινού προτύπου ήταν εμφανής. Για το λόγο αυτό στα τέλη του '80 συγκροτήθηκε από την *IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)* η ομάδα εργασίας με την ονομασία *802.4* για την ανάπτυξη μιας μεθόδου πρόσβασης δίαυλου με σκυτάλη (*token-passing bus access*). Η ομάδα εργασίας κατέληξε ότι η

μέθοδος αυτή είναι ακατάλληλη για τον έλεγχο του ασύρματου μέσου και πρότεινε τη δημιουργία ενός εναλλακτικού προτύπου. Στη συνέχεια, η εκτελεστική επιτροπή του προγράμματος *IEEE 802* αποφάσισε τη συγκρότηση της ομάδας εργασίας με την ονομασία *IEEE 802.11*, η οποία υπήρξε υπεύθυνη για τον καθορισμό των προτύπων του φυσικού υποστρώματος και του ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (*Medium Access Control, MAC*) των ασύρματων τοπικών δικτύων. Το πρώτο πρότυπο που προέκυψε από αυτή την ομάδα εργασίας υποστήριζε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μέχρι 2Mbps χρησιμοποιώντας είτε την τεχνική της φασματικής εξάπλωσης (*spread spectrum technique*) είτε μετάδοση με υπέρυθη ακτινοβολία. Το Σεπτέμβριο του 1999 εγκρίθηκαν από το τμήμα προτύπων της IEEE δύο ακόμα πρότυπα συμπληρωματικά προς τα αρχικά. Το πρώτο είναι γνωστό ως *802.11b* και επεκτείνει τις δυνατότητες του υπάρχοντος προτύπου, λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 2.4GHz και επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης μέχρι και 11Mbps. Το δεύτερο πρότυπο, γνωστό και ως *IEEE 802.11a*, λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων των 5GHz της περιοχής του *ISM* φάσματος και επιτυγχάνει ρυθμό μετάδοσης από 20 έως 54Mbps. Όλα αυτά τα πρότυπα χρησιμοποιούν το ίδιο MAC πρωτόκολλο γνωστό ως DFWMAC (*Distributed Foundation Wireless MAC*), το οποίο ανήκει στην κατηγορία των πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης με επαίσθηση φέρουσας (*Carrier Sense Multiple Access, CSMA*) και είναι κατάλληλα προσαρμοσμένο για ασύρματα μέσα. Το πρωτόκολλο *IEEE 802.11* αναφέρεται πολλές φορές και ως ασύρματο *Ethernet* και μπορεί να λειτουργεί σε δύο διαφορετικές καταστάσεις: α) την κεντροποιημένη διάρθρωση και β) την τοπική διασύνδεση χρηστών μεταξύ τους προς σχηματισμό κατά περίπτωση δικτύων (*ad-hoc networks*). Τα *ad-hoc* ασύρματα δίκτυα υποστηρίζουν ομότιμη επικοινωνία (*peer-to-peer*) μεταξύ των χρηστών και δημιουργούνται για την ικανοποίηση εκτάκτων αναγκών για επικοινωνία. Στην περίπτωση αυτή δεν απαιτείται ύπαρξη υποδομής και οι λειτουργίες ελέγχου του δικτύου είναι κατανεμημένες σε όλη την έκτασή του. Στην κεντροποιημένη διάρθρωση, η κεντρική υποδομή του ασύρματου δικτύου χρησιμοποιεί ασύρματο ή ενσύρματο τρόπο μετάδοσης μεγάλης χωρητικότητας για τη διασύνδεσή τους με το κεντρικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή το κινητό τερματικό έχει πρόσβαση στο ασύρματο μέσο ύστερα από συνεννόηση με το σταθμό βάσης, ο οποίος στη συνέχεια μπορεί να μεταβιβάσει την πληροφορία στο δίκτυο κορμού.

Εκτός από το πρότυπο *IEEE 802.11*, ένα ακόμα πρότυπο αναπτύχθηκε στην Ευρώπη από τον οργανισμό *ETSI* (*European Telecommunications Standard Institute*) από την ομάδα εργασίας RES10. Το πρότυπο αυτό ονομάστηκε *HIPERLAN* (*High Performance European Radio LAN*) και αναφέρεται στα δύο χαμηλότερα στρώματα, φυσικό και *MAC*, προσφέροντας ταχύτητες μετάδοσης μεταξύ των 2 και 25Mbps. Η πρώτη έκδοση του πρωτοκόλλου, το *HIPERLAN 1*, λειτουργεί στη ζώνη των 5.2GHz χρησιμοποιώντας διαμόρφωση στενού εύρους ζώνης (*narrowband radio modulation*). Το πρωτόκολλο για την πρόσβαση στο μέσο ανήκει και στην περίπτωση του *HIPERLAN 1* στην κατηγορία των *CSMA* πρωτοκόλλων. Αν και προσφέρει μεγαλύτερο ρυθμό

μετάδοσης δεδομένων από το IEEE 802.11, το *HIPERLAN 1* είναι λιγότερο ελκυστικό από αυτό λόγω κυρίως των μεγαλύτερων σταθμών βάσης που απαιτεί. Η χρήση του είναι παρόμοια με αυτή του *IEEE 802.11* καθώς μπορεί να λειτουργεί είτε σε δίκτυα με κεντροποιημένη διάρθρωση είτε σε *ad-hoc* δίκτυα. Η δεύτερη έκδοση του πρωτοκόλλου, *HIPERLAN 2*, λειτουργεί στη ζώνη των 5GHz και επιτυγχάνει ρυθμούς δεδομένων μέχρι 54Mbps [18]. Το πρωτόκολλο για την πρόσβαση στο μέσο είναι διαφορετικό από αυτό της πρώτης έκδοσης του πρωτοκόλλου καθώς βασίζεται στην τεχνική της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (*Time Division Multiple Access, TDMA*) [19]. Το *HIPERLAN 2* χρησιμοποιείται συνήθως ως δίκτυο κορμού στα ψηφιακά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών.

1.2.6.3 Ασύρματα Δίκτυα Ασύγχρονου Τρόπου Μεταφοράς

Το 1991 συγκροτήθηκε ένα φόρουμ (*ATM Forum*) για τη μελέτη και πρόταση τρόπων ενσωμάτωσης της τεχνολογίας του ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς (*Asynchronous Transfer Mode, ATM*) στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Μια ομάδα εργασίας του φόρουμ, που δημιουργήθηκε το 1996, ξεκίνησε να ασχολείται με την τεχνολογία του ασύρματου ATM (*Wireless ATM, WATM*), το οποίο συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της κινητικότητας που υποστηρίζουν τα ασύρματα δίκτυα με τους ευέλικτους τρόπους κατανομής των πόρων και την ποιότητα υπηρεσίας των κλασικών δικτύων *ATM*. Οι ιδιότητες των δικτύων *ATM*, οι οποίες είναι απαραίτητες για την ασύρματη παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών, δεν είναι διαθέσιμες από τα κλασικά τοπικά δίκτυα καθώς τα τελευταία δεν έχουν τη δυνατότητα για ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς δεδομένων.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας προτάθηκαν διάφορα πρότυπα δικτύων *WATM*. Η σημαντικότερη προσπάθεια για τη δημιουργία ενός προτύπου τοπικού δικτύου που συνδυάζει τις δυνατότητες των *WATM* δικτύων είναι το *HIPERLAN 2*. Πρόκειται για ένα πρότυπο συμβατό με την τεχνολογία *ATM* και χρησιμοποιεί πακέτα δεδομένων σταθερού μήκους. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, το *HIPERLAN 2* επιτυγχάνει ταχύτητες μέχρι 54Mbps στο φυσικό στρώμα και είναι δυνατό να υποστηρίξει την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσιών προς το χρήστη λόγω της συνδεδεισμένης (*connection-oriented*) φύσης του.

1.2.6.4 Ασύρματα Δίκτυα Μικρής Εμβέλειας

Τα ασύρματα δίκτυα μικρής εμβέλειας, γνωστά και ως προσωπικά δίκτυα υπολογιστών (*Personal Area Networks, PANs*), έχουν μικρότερη εμβέλεια από τα τοπικά ασύρματα δίκτυα προσφέροντας υπηρεσίες όπου απαιτείται πολύ μικρή απόσταση επικοινωνίας (της τάξης μερικών μέτρων). Η πρώτη προσπάθεια για τη δημιουργία ενός προτύπου για δίκτυα *PAN* έγινε από την *Ericsson* το 1994. Το πρότυπο αυτό ονομάστηκε *Bluetooth1* και σκοπός του ήταν η επίτευξη επικοινωνίας μεταξύ του κινητού τηλεφώνου και των διαφόρων περιφερειακών βοηθητικών συσκευών που το συνοδεύουν [20]. Το *Bluetooth* είναι πλέον ένα ανοικτό πρωτόκολλο διαθέσιμο σε κάθε εταιρεία που θέλει να το χρησιμοποιήσει. Πλέον, έχει υιοθετηθεί σχεδόν από όλες τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών παγκοσμίως και πολλά προϊόντα της αγοράς το υποστηρίζουν. Λειτουργεί στη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ των 2.4 και 2.485GHz, η οποία ανήκει στη μη αδειοδοτημένη φασματική περιοχή *ISM*, κάνοντας χρήση της τεχνικής διαμόρφωσης φασματικής εξάπλωσης (*spread spectrum technique modulation*) με αναπήδηση συχνότητας (*frequency hopping*) ονομαστικού ρυθμού 1600hops/sec [21]. Υποστηρίζει κανάλια φωνής χωρητικότητας 64kbps διπλής κατεύθυνσης επικοινωνίας και κανάλια δεδομένων ασύγχρονου τρόπου μεταφοράς σε ρυθμούς που φθάνουν μέχρι και τα 721 kbps. Η εμβέλεια επικοινωνίας του πρωτοκόλλου είναι από 10 έως 100 m ανάλογα με την κλάση στην οποία ανήκει το κινητό τερματικό.

Ένα ακόμα πρότυπο για δίκτυα *PAN* είναι το *HomeRF*, για το οποίο συγκροτήθηκε ομάδα εργασίας το 1998 από μεγάλες εταιρείες τηλεπικοινωνιών (*Motorola, Siemens, Philips*). Το *HomeRF* λειτουργεί στη ζώνη των 2.4 GHz, έχει εμβέλεια 50 m και επιτυγχάνει ταχύτητες μέχρι 10 Mbps [22]. Το 2003 η ομάδα εργασίας διαλύθηκε καθώς το *Bluetooth*, το οποίο είναι ανταγωνιστικό προς το *HomeRF*, είχε σαφώς υπερισχύσει στην αγορά των επικοινωνιών.

Το 1999 ο οργανισμός *IEEE* αποφάσισε τη σύσταση ομάδας εργασίας με την ονομασία *802.15* για την ανάπτυξη ενός προτύπου για δίκτυα *PAN* [23]. Αρχικά, ο στόχος της ήταν η επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ των προτύπων *Bluetooth* και *HomeRF*. Μετά την υπερίσχυση του προτύπου *Bluetooth*, πολλές από τις συστάσεις των αρχικών εκδόσεων του υιοθετήθηκαν από την ομάδα εργασίας *802.15*. Οι υπάρχουσες εκδόσεις του πρωτοκόλλου *IEEE 802.15* υποστηρίζουν ταχύτητες δεδομένων από 11 μέχρι 55Mbps.

1.2.7 Σταθερή Ασύρματη Πρόσβαση

Σε αντίθεση με τα συστήματα κινητών επικοινωνιών, τα συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης (*Fixed Wireless Access, FWA*) δε διαθέτουν τη δυνατότητα υποστήριξης της κινητικότητας των χρηστών. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται

κατά κύριο λόγο για την παροχή σύνδεσης υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε επίπεδο τοπικού βρόχου (*local loop*), γνωστού και ως πρόσβαση τελευταίου μιλίου (*last mile access*). Οι κύριοι ανταγωνιστές των δικτύων αυτών είναι οι τεχνολογίες των οπτικών ινών (*fiber optics*) και των ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών (*Digital Subscriber Line, DSL*).

Τα συστήματα σταθερής ασύρματης πρόσβασης υποστηρίζουν είτε δισημειακή (*point-to-point*) είτε σημειο-πολυσημειακή (*point-to-multipoint*) σύνδεση. Στην πρώτη περίπτωση ο πάροχος υπηρεσιών χρησιμοποιεί πομποδέκτη με ξεχωριστή κεραία ανά χρήστη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ένας πομποδέκτης με μια κεραία χρησιμοποιείται για πολλούς χρήστες. Η δεύτερη περίπτωση είναι η πλέον ελκυστική από τους παρόχους υπηρεσιών σταθερής ασύρματης πρόσβασης καθώς εξυπηρετούνται ταυτόχρονα πολλοί χρήστες με μια κεραία. Οι κεραίες αυτές είναι κατάλληλα τοποθετημένες έτσι ώστε να προσφέρουν κάλυψη σε μια περιοχή σχηματίζοντας κυψελωτή αρχιτεκτονική. Οι διαφορές τους από τα κλασικά κυψελωτά συστήματα είναι ότι δεν υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των κυψελών, υπάρχει αναχρησιμοποίηση όλου του διαθέσιμου φάσματος σε κάθε κυψέλη και δεν υποστηρίζεται κινητικότητα των χρηστών καθώς οι χρήστες θεωρούνται ακίνητοι. Η τεχνολογία της σταθερής ασύρματης πρόσβασης χρησιμοποιείται κυρίως για την παροχή υπηρεσιών διαδικτύου (*Internet*) στους χρήστες. Τα κυριότερα συστήματα αυτής της κατηγορίας των δικτύων είναι τα ακόλουθα:

- Συστήματα που λειτουργούν στη φασματική περιοχή *ISM (ISM-band systems)*. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν στη συχνότητα των 2.4GHz της ζώνης *ISM* και για τη διαμόρφωση του σήματος χρησιμοποιείται η τεχνική της φασματικής εξάπλωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το πρότυπο *IEEE 802.11b*, συστήματα του οποίου λειτουργούν σε κυψελωτή δομή παρέχοντας χωρητικότητα 11Mbps ανά κυψέλη. Όταν το σύστημα λειτουργεί με σημειο-πολυσημειακή διάρθρωση, η χωρητικότητα της κυψέλης μοιράζεται μεταξύ των χρηστών που βρίσκονται εντός της ίδιας κυψέλης. Η ακτίνα των κυψελών είναι περίπου 8 km.

- Συστήματα πολυσημειακής και πολυκαναλικής κατανομής (*Multipoint Multichannel Distribution System, MMDS*). Τα συστήματα *MMDS* χρησιμοποιούν τη φασματική ζώνη μεταξύ των συχνοτήτων 2.1 και 2.7GHz, η οποία χρησιμοποιείται διεθνώς για μετάδοση αναλογικού τηλεοπτικού σήματος. Η δομή τους είναι κυψελωτή και η ακτίνα κάθε κυψέλης φτάνει τα 45 km. Η μεγάλη τιμή της ακτίνας της κυψέλης είναι εφικτή αν ληφθεί υπόψη ότι: α) η εκπομπή γίνεται σε αδειοδοτημένη περιοχή του φάσματος, με συνέπεια να μην προκαλούνται παρεμβολές και β) είναι επιτρεπτή η εκπομπή σήματος σε υψηλά επίπεδα ισχύος. Η μέγιστη χωρητικότητα της κυψέλης του συστήματος *MMDS* είναι 36Mbps. Επιπλέον, το σύστημα υποστηρίζει ασύμμετρη χωρητικότητα για

τις ζεύξεις *uplink* και *downlink* με τις μέγιστες τιμές να είναι 256kbps και 5Mbps, αντίστοιχα.

- Τοπικό πολυσημειακό σύστημα διανομής (*Local Multipoint Distribution System, LMDS*). Τα συστήματα *LMDS* λειτουργούν σε υψηλές συχνότητες (στην περιοχή των 30GHz) με αποτέλεσμα οι κυψέλες των συστημάτων αυτών να είναι μικρότερης εμβέλειας. Η ακτίνα των κυψελών των συστημάτων *LMDS* κυμαίνεται από 1 μέχρι 2 km ενώ η μέγιστη χωρητικότητά τους είναι 155Mbps.

1.2.8 Δορυφορικά Συστήματα Επικοινωνιών

Η εποχή των δορυφορικών επικοινωνιών ξεκίνησε το 1957 με την εκτόξευση του δορυφόρου *Sputnik* από τη Σοβιετική Ένωση, οι τηλεπικοινωνιακές δυνατότητες του οποίου ήταν πολύ περιορισμένες. Ο πρώτος αμιγώς τηλεπικοινωνιακός δορυφόρος εκτοξεύτηκε το 1962 από τη *NASA* με την ονομασία *AT&T Telestar 1*. Το 1963 ακολούθησε μια εξελιγμένη έκδοσή του ο δορυφόρος *Telestar 2*. Από εκείνη την εποχή μέχρι σήμερα η τεχνολογία των δορυφορικών επικοινωνιών γνωρίζει μεγάλη πρόοδο. Τα αντίστοιχα δορυφορικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί σε τέτοιο βαθμό ώστε να είναι εφικτή η παροχή πληθώρας υπηρεσιών όπως, για παράδειγμα, υπηρεσίες δεδομένων, φωνής, ευρυεκπομπής τηλεοπτικού σήματος, παροχής υπηρεσιών διαδικτύου και υπηρεσιών σε κινητά τερματικά [24].

Οι τροχιές των δορυφόρων ταξινομούνται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, οι οποίες κατά αύξουσα σειρά υψόμετρου είναι οι ακόλουθες: α) χαμηλής τροχιάς (*Low Earth Orbit, LEO*) β) μέσης τροχιάς (*Medium Earth Orbit, MEO*) γ) γεωσύγχρονης τροχιάς (*Geosynchronous Earth Orbit, GEO*). Επίσης, υπάρχει και μια ειδική κατηγορία δορυφόρων οι οποίοι κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές γύρω από τη Γη και συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της μικρής καθυστέρησης που επιτυγχάνουν τα δορυφορικά συστήματα των *LEO* τροχιών με τη σταθερότητα των δορυφορικών συστημάτων *GEO*. Τα τελευταία χρόνια έχουν επικρατήσει τα δορυφορικά συστήματα που λειτουργούν στη *LEO* τροχιά. Αυτό οφείλεται στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν συγκριτικά με τις υπόλοιπες κατηγορίες, δηλαδή: α) τη μικρή καθυστέρηση μετάδοσης και β) τα μικρά σε μέγεθος κινητά τερματικά που απαιτούνται γεγονός που τα καθιστά ανταγωνιστικά προς τα αντίστοιχα τερματικά των κυψελωτών συστημάτων επικοινωνιών. Διάφορα εμπορικά δορυφορικά συστήματα *LEO* έχουν εμφανιστεί μεταξύ των οποίων τα *Globalstar* και *Iridium* να είναι τα πλέον διαδεδομένα. Μέσω των δικτύων τους, τα οποία σχηματίζουν ένα πυκνό δίκτυο τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων στην *LEO* τροχιά, προσφέρονται υπηρεσίες φωνής και δεδομένων επιτυγχάνοντας ρυθμούς που προσεγγίζουν τα 10kbps.

1.2.9 Συστήματα Επικοινωνιών Τρίτης και Τέταρτης Γενιάς

Η μεγάλη επιτυχία που γνώρισαν τα συστήματα 2G και η μεγάλη αποδοχή που έχουν από την αγορά οφείλεται κυρίως στις υπηρεσίες φωνής που προσφέρουν. Οι υπηρεσίες αυτές απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης τους οποίους τα συστήματα 2G μπορούν να υποστηρίξουν. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια οι άνθρωποι χρησιμοποιούν τα κινητά τηλέφωνα τους και για άλλες υπηρεσίες. Μερικές από τις λιγότερο απαιτητικές σε πόρους του δικτύου είναι οι υπηρεσίες φωνής, περιήγησης ιστού (*web browsing*) και ανάγνωσης ηλεκτρονικής αλληλογραφίας, ενώ οι περισσότερο απαιτητικές είναι οι υπηρεσίες τηλεδιάσκεψης (*video conferencing*), πραγματικού χρόνου (*real time*) και εκρηκτικής κίνησης (*bursty traffic*). Ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνουν τα συστήματα 2G δεν επαρκεί για την παροχή των υπηρεσιών αυτών.

Το 1992 ξεκίνησε από τη Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (*International Telecommunications Union, ITU*) μια ερευνητική προσπάθεια για την ανάπτυξη ενός νέου προτύπου συστημάτων κινητών επικοινωνιών, γνωστού με την ονομασία πρότυπο Διεθνών Κινητών Επικοινωνιών 2000 (*International Mobile Telecommunications 2000, IMT*). Το νέο πρότυπο είναι ικανό να υποστηρίξει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης με αποτέλεσμα να καθιστά εφικτή την παροχή νέων υπηρεσιών. Στο πλαίσιο του προτύπου *IMT 2000* έχουν αναπτυχθεί πολλά συστήματα κινητών επικοινωνιών τρίτης γενιάς (*Third Generation, 3G*) ([25],[26],[27]) όπως τα ακόλουθα:

- EDGE*: Ο τρόπος πρόσβασης στο μέσο των συστημάτων *EDGE* βασίζεται στην πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που προσφέρουν είναι 473kbps και είναι συμβατά με τα συστήματα *GSM* και IS-136.
- cdma2000*: Το σύστημα αυτό είναι πλήρως συμβατό με το IS-95 προσφέροντας ρυθμούς μετάδοσης μέχρι και 2Mbps.
- UMTS*: Το παγκόσμιο σύστημα κινητών επικοινωνιών (*Universal Mobile Telecommunication System, UMTS*) είναι το πλέον διαδεδομένο σύστημα 3G. Για την προτυποποίηση του συστήματος *UMTS* συγκροτήθηκε η ομάδα εργασίας *3GPP* (*3rd Generation Partnership Project*) η οποία βασίστηκε στις εξελιγμένες προδιαγραφές του συστήματος *GSM*. Το έργο της ομάδας εργασίας *3GPP* περιλαμβάνει την προτυποποίηση των προδιαγραφών του *UMTS* για την ασύρματη διεπαφή, το δίκτυο κορμού και τη δομή των υπηρεσιών. Η πλέον διαδεδομένη έκδοση του *UMTS* βασίζεται στο πρότυπο *WCDMA* για την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Το *WCDMA* χρησιμοποιεί την πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα και ευρέα κανάλια εύρους 5MHz, επιτυγχάνοντας ρυθμούς μέχρι 2Mbps. Σε αντίθεση με τα συστήματα *EDGE* και *cdma2000*, το *UMTS* απαιτεί νέους σταθμούς βάσης σε σχέση με τα παλαιότερα συστήματα

όπως το *GSM* και απονομή νέας ζώνης συχνοτήτων. Ωστόσο, οι βασικές ιδέες ανάπτυξης και δομής του δικτύου παραμένουν ίδιες με αυτές των δικτύων *GSM*. Επίσης, τα κινητά τερματικά του *UMTS* είναι συμβατά με τα συστήματα *GSM* επιτρέποντας τη διπλή λειτουργία μεταξύ των δύο υποστηριζόμενων τεχνολογιών.

Το μέλλον των ασύρματων δικτύων ανήκει στις ενοποιημένες αρχιτεκτονικές, όπου όλα τα συστήματα λειτουργούν με βάση τη μετάδοση πακέτων δεδομένων χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο IP (*Internet Protocol*). Με τον τρόπο αυτό οι διαφορετικές ασύρματες τεχνολογίες θα δημιουργήσουν μια κοινή δομή, ο τρόπος λειτουργίας της οποίας θα είναι αδιαφανής προς το χρήστη ανεξάρτητα από την ασύρματη τεχνολογία πρόσβασης που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Ο στόχος αυτός αποτελεί την πρόκληση για τη νέα γενιά κυψελωτών συστημάτων, γνωστών και ως συστήματα τέταρτης γενιάς (*Fourth Generation, 4G*), τα οποία θα εμφανιστούν στην αγορά των επικοινωνιών μετά το 2010 [28,29] και θα παρέχουν στους χρήστες υπηρεσίες φωνής, μεταφοράς δεδομένων, βίντεο και άλλες υπηρεσίες πολυμεσικού περιεχομένου [30]. Αναμφίβολα, μέχρι την εμφάνιση των συστημάτων *4G* στην αγορά τηλεπικοινωνιών και τη διάθεσή τους προς χρήση, πολλά από τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους είναι πιθανό να αλλάξουν ανάλογα με την εξέλιξη της ίδιας της αγοράς και των αναγκών των ανθρώπων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 1

- [1] Συστήματα Τηλεπικοινωνιών, John G. Proakis, Masoud Salehi, ΕΚΠΑ, Αθήνα 2002.
- [2] Συστήματα Επικοινωνίας, Simon Haykin, Παπασωτηρίου, Αθήνα 1995.
- [3] Κεραίες Ασύρματες Ζεύξεις, Χ. Καυάλης, Π. Κωττής, Τζιόλα, Αθήνα 2008.
- [4] Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων, Κατανομή Πόρων και Διαχείριση Κινητικότητας σε Ασύρματα Δίκτυα, Γ. Τσιρόπουλος, Αθήνα 2010.
- [5] The Cellular Concept. McDonald, H. V. I, January 1979, Bell Systems Technical Journal.
- [6] Overview of Wireless Personal Communications. Padgett, Jay E., Günther, Christoph G. and Hattori, Takeshi. 1, January 1995, IEEE Communications Magazine.
- [7] Forward error correction strategies for media streaming over wireless networks. Nafaa, A., Taleb, T. and Murphy, L. 1, January 2008, IEEE Communications Magazine.
- [8] Forward error correction schemes for digital communications. Bhargava, V. 1, January 1983, IEEE Communications Magazine.
- [9] Time slot assignment techniques for TDMA digital cellular systems. Sourour, E. 1, February 1994.
- [10] Securing the wireless internet. Gupta, V. and Gupta, S. 12, December 2001, IEEE Communications Magazine.
- [11] Securing ad hoc networks. Zhou, L. and Haas, Z. L. 6, November-December 1999.
- [12] Halonen, T., Romero, J. and Melero, J. GSM, GPRS and EDGE Performance: Evolution Towards 3G/UMTS. Chichester, England : Wiley, October, 2003.
- [13] Overview of the GSM System and Protocol Architecture. Rahnema, Moe. 4, 1993, IEEE Communications Magazine.
- [14] Heine, G. GPRS, EDGE, HSCSD, and the Path to 3G. s.l. : Artech House Publishers, October, 2000.
- [15] A survey of mobile data networks. Salkintzis, K. A. 3, Third Quarter 1999, IEEE Communications Surveys & Tutorials
- [16] Wireless LAN design alternatives. Bantz, D. F. and Bauchot, F. J. 2, March-April 1994, IEEE Network.
- [17] Design Alternatives for Wireless Local Area Networks. Nicopolitidis, P., Papadimitriou, G. I. and Pomportsis, A. S. 1, s.l. : Wiley, January 2001, International Journal of Communication Systems.
- [18] Johnsson, M. HIPERLAN/2: The Broadband Radio Transmission Technology Operating in the 5 GHz Frequency Band. s.l. : HiperLAN/2 Global Forum, 1999.
- [19] Overview and Performance of HIPERLAN Type 2-A Standard for Broadband Wireless Communications. Jush, J. K., et al. Tokyo : Ericsson Review, May 2000. Vehicular Technology Conference 2000.

- [20] Bluetooth: technology for short-range wireless apps. Bhagwat, P. 3, May-June 2001, IEEE Internet Computing.
- [21] The Bluetooth radio system. Haartsen, J. C. 1, February 2000 , IEEE Personal Communications.
- [22] The Design and Implementation of HomeRF: A Radio Frequency Wireless Networking Standard for the Connected Home. Lansford, J. and Bahl, P. 10, October 2000, Proceedings of the IEEE.
- [23] Home Networking with IEEE 802.15.4: A Developing Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. Callaway, E., et al. 8, August 2002, IEEE Communications Magazine.
- [24] Satellite Communication-A Continuing Revolution. Anonymous. 10, October 2000, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine.
- [25] An Overview of Third-Generation Wireless Personal Communications: A European Perspective. Ojanpera, T. and Prasad, D. 6, December 1998 , IEEE Personal Communications.
- [26] Packet Mode in Wireless Networks: Overview of Transition to Third Generation. Sarikaya, B. 9, September 2000, IEEE Communications Magazine.
- [27] Nilsson, M. Third-Generation Radio Access Standards. s.l. : Ericsson Review, 1999.
- [28] Issues in Emerging 4G Wireless Networks. Varshney, U. and Jain, R. 6, June 2001, IEEE Computer.
- [29] Development of Mobile Communications Systems Beyond Third Generation. Mohr, W. 2-3, s.l.: Kluwer Academic Publishers, June 2001, Wireless Personal Communications: An International Journal.
- [30] Admission Control for QoS support in Heterogeneous 4G Wireless Networks. Tragos, E., et al. 3, 2008, IEEE Network Magazine.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ο ΡΑΔΙΟΔΙΑΥΛΟΣ ΚΑΙ Η ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Ο ραδιοδιάυλος αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση για επιτυχή και αξιόπιστη επικοινωνία υψηλού ρυθμού μετάδοσης. Τα κυρίαρχα προβλήματα στην ασύρματη διάδοση είναι ο θόρυβος, οι παρεμβολές, η παρεμπόδιση από ανθρώπινες και φυσικές κατασκευές και οι πολυδιαδρομική διάδοση. Η κατάσταση επιδεινώνεται καθώς τα παραπάνω φαινόμενα μεταβάλλονται χρονικά με απρόβλεπτο τρόπο κυρίως με την κίνηση των τερματικών σταθμών. Τα χαρακτηριστικά αυτά θέτουν τα βασικά όρια στην έκταση της κάλυψης, το ρυθμό μετάδοσης και την αξιοπιστία της επικοινωνίας στο ραδιοδιάυλο. Τα όρια καθορίζονται από πολλούς παράγοντες με κυριότερους το περιβάλλον διάδοσης και την κινητικότητα των χρηστών

Με τον όρο *διάδοση ραδιοκυμάτων* χαρακτηρίζεται η όδευση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και η μεταφορά της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από μια κεραία πομπού σε μια κεραία δέκτη σε περιβάλλον όπου συμμετέχουν τόσο το έδαφος και η τροπόσφαιρα ή η ιονόσφαιρα όσο και διάφορες φυσικές ή τεχνητές κατασκευές. Η διάδοση των σημάτων εξαρτάται καταρχήν από τη χρησιμοποιούμενη συχνότητα, τα διαγράμματα ακτινοβολίας και τα κέρδη των κεραιών, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του εδάφους και των διαφόρων σκεδαστών της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, καθώς και από τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και τη σχετική θέση κεραιών και σκεδαστών στον χώρο. Η επίδραση όλων αυτών των παραγόντων στο εκπεμπόμενο σήμα γίνεται αντιληπτή ως μεταβολή και πιθανώς παραμόρφωση του λαμβανόμενου από τον δέκτη σήματος. Η λεπτομερής περιγραφή του λαμβανόμενου σήματος και η δυνατότητα πρόβλεψης των μεταβολών και των παραμορφώσεων που υπόκειται το εκπεμπόμενο σήμα είναι εξαιρετικά μεγάλης σημασίας για τους σχεδιαστές των ασυρμάτων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

Οι μηχανισμοί που διέπουν την ραδιοδιάδοση είναι περίπλοκοι και ποικίλοι και μπορούν να συνοψιστούν, εκτός της απευθείας συνιστώσας, σε τρεις βασικούς: την *ανάκλαση (reflection)*, την *περίθλαση (diffraction)* και την *σκέδαση (scattering)*.

Ανάκλαση εμφανίζεται όταν ένα διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε εμπόδιο με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το μήκος κύματός του. Κατά συνέπεια, παράγονται ανακλώμενα κύματα ύστερα από την πρόσπτωση των

διαδιδόμενων κυμάτων στην επιφάνεια του εδάφους και σε κτίρια που μπορεί να συμβάλλουν με τα αρχικά κύματα στον δέκτη, εποικοδομητικά ή όχι.

Περίθλαση εμφανίζεται όταν παρεμβάλλεται αδιαπέραστο σώμα στη διαδρομή του ραδιοκύματος από τον πομπό προς τον δέκτη. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens, παράγονται δευτερογενή κύματα από το εμπόδιο, τα οποία φτάνουν στον δέκτη ακόμη και όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ αυτού και του πομπού. Η περίθλαση εξηγεί το πώς μπορεί να διαδίδεται η ενέργεια των ραδιοκυμάτων σε αστικές και ημιαστικές περιοχές χωρίς να υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη.

Τέλος, σκέδαση εμφανίζεται στην περίπτωση όπου στη διαδρομή του ραδιοκύματος υπάρχουν αντικείμενα με διαστάσεις ίσες ή μικρότερες από το μήκος κύματος. Η σκέδαση ακολουθεί τους ίδιους φυσικούς νόμους με τη διάχυση και έχει ως αποτέλεσμα την επανεκπομπή της ενέργειας του πομπού προς πολλές διαφορετικές κατευθύνσεις. Έχει αποδειχτεί ότι η σκέδαση είναι ο μηχανισμός διάδοσης που είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί στα ασύρματα συστήματα και ειδικότερα στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Για παράδειγμα, στα μικροκυβελωτά συστήματα που λειτουργούν στις αστικές περιοχές, οι θέσεις των λαμπτήρων και των σημάτων οδικής κυκλοφορίας σκεδιάζουν ενέργεια προς πολλές κατευθύνσεις και παρέχουν συνεπώς ραδιοκάλυψη σε περιοχές που μπορεί να μην λαμβάνουν ενέργεια μέσω ανάκλασης ή περίθλασης.

Οι τρεις αυτοί μηχανισμοί είναι υπεύθυνοι για την ύπαρξη των πολλαπλών αντιτύπων του εκπεμπόμενου σήματος στην κεραία του δέκτη. Οι πολυδιαδρομικές συνιστώσες καταφθάνουν στον δέκτη με χαρακτηριστικά (πλάτος, φάση και χρόνο άφιξης) ολισθημένα ως προς τα χαρακτηριστικά του σήματος της απευθείας συνιστώσας. Εκτός, όμως, από το ωφέλιμο σήμα στην κεραία του δέκτη, θα πρέπει να συμπεριλάβουμε τόσο την επίδραση του- συνήθως λευκού- προσθετικού θορύβου Gauss (*Additive White Gaussian Noise- AWGN*) όσο και την παρουσία παρεμβολών.

Η επίδραση του ραδιοδιαύλου στο εκπεμπόμενο σήμα είναι πολλαπλή και γίνεται αισθητή κυρίως από τρία βασικά φαινόμενα που είναι γνωστά ως *απώλειες διαδρομής (path loss)*, *σκίαση (shadowing)* και *διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading)*. Οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών περιγράφονται από τις διαλείψεις περιβάλλουσας (κατανομή πλάτους μη επιλεκτική ως προς τη συχνότητα), την *εξάπλωση Doppler* (χρονικά μεταβαλλόμενος θόρυβος τυχαίας φάσης) και την *εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης* (μεταβλητή απόσταση διάδοσης των ανακλωμένων σημάτων προκαλεί χρονικές μεταβολές στα ανακλώμενα σήματα). Κάθε ένα από αυτά τα φαινόμενα έχει διαφορετική φυσική προέλευση και πρέπει να μελετώνται όλα κατά τη σχεδίαση και την αξιολόγηση της επίδοσης ενός συστήματος.

Οι απώλειες διάδοσης στις οποίες έχει αποδοθεί ο όρος *εξασθένηση (attenuation)* καθορίζουν την εξάρτηση της μείωσης της μέσης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος από την απόσταση πομπού δέκτη. Το λαμβανόμενο όμως σήμα δεν μπορεί να περιγραφεί αποκλειστικά και ντετερμινιστικά μόνο από την απόσταση πομπού δέκτη. Η *σκίαση* από

φυσικά ή τεχνητά εμπόδια και η χωρικά μεταβαλλόμενη πολυδιαδρομική διάδοση είναι οι κύριες αιτίες για την εμφάνιση του φαινομένου των *διαλείψεων μικρής και μεγάλης κλίμακας (small and large scale fading)*, δηλαδή τις μεταβολής του πλάτους ή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με τη μικρή ή και μεγάλη μετατόπιση του δέκτη. Ανάλογα δε με την ένταση των φαινομένων μπορούμε να παρατηρήσουμε απλά τυχαίες μεταβολές στο πλάτος του λαμβανόμενου σήματος, δηλαδή *επίπεδες διαλείψεις (flat fading)* ή ακόμα και *διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference)* ή *διαλείψεις επιλεκτικές ως προς την συχνότητα (frequency selective fading)*. Τέλος, οι παρεμβολές από χρήστες του ίδιου ή άλλου συστήματος που λειτουργεί στην ίδια ζώνη συχνοτήτων αποτελούν ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα κατά τη διάδοση στο ραδιοδιάλυο. ([1], [2],[3], [4])

2.2 Μοντέλα ανάλυσης

Η ανάγκη για την μελέτη και την ανάλυση της επίδρασης του ραδιοδιαλύου στα ασύρματα δίκτυα έχει οδηγήσει στην δημιουργία μοντέλων τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών που αποσκοπούν όχι μόνο στη γενικότερη κατανόηση του φαινομένου της διάδοσης στο ραδιοδιάλυο αλλά και στην εξαγωγή κανόνων που δίνουν την εξάρτηση των μεταβολών του σήματος από ένα πλήθος παραμέτρων, όπως η συχνότητα, το περιβάλλον, ο τύπος των κεραιών, η κίνηση και η ταχύτητα των δεκτών, ή το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος. Έτσι, διακρίνονται τρεις γενικές κατηγορίες μοντέλων: τα εμπειρικά, τα στατιστικά και τα αναλυτικά.

Τα εμπειρικά μοντέλα αποτελούν προσαρμογές σε δεδομένα μετρήσεων και συνήθως περιγράφουν τις στατιστικές κατανομές των διαλείψεων με βάση κάποιες παραμέτρους των πειραματικών μετρήσεων, καθώς επίσης δίνουν την εξασθένηση του σήματος σε συνάρτηση με την απόσταση σε διάφορους τύπους περιβάλλοντος. Τα στατιστικά μοντέλα βασίζονται σε συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας που συνήθως χρησιμοποιούνται στη διάδοση ραδιοκυμάτων, όπως ή *Rayleigh* ή *Rician* και η *Lognormal*. Τέλος, τα αναλυτικά μοντέλα χρησιμοποιούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις θεωρίες ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης όπως τη *Γεωμετρική Οπτική (Geometrical Optics)*, την *Ομοιόμορφη Θεωρία της Περίθλασης (Uniform Theory of Diffraction)* και τη *Φυσική Οπτική (Physical Optics)* για τον υπολογισμό και τη μελέτη των επιπτώσεων στο λαμβανόμενο σήμα από την παρουσία σκεδαστών στην περιοχή του δέκτη. Η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου εξαρτάται άμεσα από την εκάστοτε εφαρμογή. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι ενώ τα εμπειρικά μοντέλα δίνουν την εξάρτηση από σημαντικές παραμέτρους, συνήθως δεν παρέχουν καμμία ένδειξη για τους φυσικούς μηχανισμούς της διάδοσης. Τα στατιστικά μοντέλα στηρίζονται σε παραδοχές που απλοποιούν τις συνθήκες διάδοσης ενώ τα αναλυτικά παρέχουν μια ντετερμινιστική εκτίμηση κάτω από συγκεκριμένες γεωμετρικές συνθήκες.

Συνήθως, τα εμπειρικά μοντέλα διακρίνονται για την ευκολία χρήσης τους, ενώ τα αναλυτικά για το εύρος των εφαρμογών, δηλαδή, ανάλογα με την υλοποίηση, μπορούν να εφαρμοστούν για την πρόβλεψη μεγεθών μεγάλης και μικρής κλίμακας αλλά και για εφαρμογές στενής ή ευρείας ζώνης. Υπάρχουν και μοντέλα τα οποία θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε υβριδικά και τα οποία παρέχουν αναλυτικούς τύπους υπολογισμών αλλά με παραμέτρους που έχουν εξαχθεί από προσαρμογές σε μετρήσεις, δηλαδή εμπειρικές. ([4],[5])

2.2.1 Μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου (Free Space Loss)

Το μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου περιγράφει το φαινόμενο της ζεύξης μεταξύ πομπού και δέκτη σε χώρο ελεύθερο από άλλα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια. Αυτό σημαίνει ότι οι κεραιές βρίσκονται πολύ μακριά τόσο από το έδαφος όσο και από οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο που θα μπορούσε να προκαλέσει ανακλάσεις, περιθλάσεις, σκεδάσεις ή να εξασθενήσει το σήμα. Παρούσα, λοιπόν, θεωρείται μόνο η απευθείας συνιστώσα και το μέσο θεωρείται ιστροπικό, ομογενές και χωρίς απώλειες. Αν P_t είναι η ισχύς εκπομπής και G_t το κέρδος μιας πραγματικής κατευθυντικής κεραιάς, το μέγεθος

$$\Phi(d) = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \text{ (Watt/m}^2\text{)} \quad (2-1)$$

καλείται πυκνότητα ροής ισχύος και ισούται με το μέτρο της χρονικής μέσης τιμής του διανύσματος *Poynting* σε απόσταση d από την κεραιά-πομπό. Για μια κεραιά-δέκτη που βρίσκεται στην ίδια απόσταση από τον πομπό και η οποία έχει ενεργό επιφάνεια A_{er} , και κέρδος G_r , η λαμβανόμενη ισχύς θα ισούται με:

$$\Phi(d) = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (2-2)$$

Συχνά όμως μας ενδιαφέρει να αποσυσχετίσουμε την έκφραση από τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης και να εκφράσουμε απλώς το λόγο της εκπεμπόμενης προς την λαμβανόμενη ισχύ για δύο κεραιές ιστροπικές ($G_t = G_r = 1$), χωρίς επιπλέον απώλειες ($L = 1$)

$$L_{fs}(d) = \frac{P_t}{P_r(d)} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (2-3)$$

ο λόγος αυτός είναι οι *απώλειες ελευθέρου χώρου (free space loss)*. Σε λογαριθμικές μονάδες γράφεται ως:

$$PL(dB) = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r(d)} \right) = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = 22 - 20 \log(\lambda) + 20 \log(d) \quad (2-4)$$

Από την σχέση αυτή είναι φανερό ότι, για κάθε δεκαπλασιασμό της απόστασης d , οι απώλειες αυξάνονται κατά $20dB$, δηλαδή ο κανόνας που προκύπτει είναι απώλειες $20dB/decade$. Πρέπει να τονιστεί ότι η θεώρηση προϋποθέτει επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην απόσταση d , δηλαδή έχει ισχύ στη μακρινή περιοχή της κεραίας, άρα για

$$d > 2 \frac{D^2}{\lambda} \quad (2-5)$$

όπου D η μέγιστη γραμμική διάσταση της κεραίας. ([3],[5])

2.2.2 Μοντέλο Επίπεδης Γης

Το μοντέλο επίπεδης γης, ή όπως πολλές φορές αποκαλείται μοντέλο δύο ακτινών, στηρίζεται στη θεωρία της γεωμετρικής οπτικής και λαμβάνει υπόψη την απευθείας συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου E_{LOS} αλλά και την ανακλώμενη από το έδαφος E_g . Το συνολικό λαμβανόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο παραπάνω συνιστωσών

$$\vec{E}_{total} = \vec{E}_{LOS} + \vec{E}_g \quad (2-6)$$

Αν h_t το ύψος του πομπού από την γη, h_r το αντίστοιχο ύψος του δέκτη και d η μεταξύ τους απόσταση, τότε, κάνοντας την παραδοχή

$$\begin{aligned} h_t + h_r &\ll d \\ h_t - h_r &\ll d \end{aligned} \quad (2-7)$$

με βάση τη γεωμετρία του συστήματος προκύπτει για την ενεργό τιμή του πεδίου:

$$|E_{total,eff}(d, \Omega_t)| = 2|E_{LOS,eff}(d, \Omega_t)| \left| \sin\left(\frac{k\Delta}{2}\right) \right| \quad (2-8)$$

με

$$k\Delta = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \quad (2-9)$$

που εκφράζει την διαφορά φάσης (Δ είναι η διαφορά των δύο δρόμων)

Αν ισχύει

$$\sin\left(\frac{k\Delta}{2}\right) \approx \frac{k\Delta}{2} \quad (2-10)$$

τότε η παραπάνω εξίσωση για την ενεργό τιμή του πεδίου απλοποιείται:

$$|E_{total,eff}(d, \Omega_t)| = 2|E_{LOS,eff}(d, \Omega_t)| \frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d} = \frac{\sqrt{30P_t G_t(\theta_t, \varphi_t)}}{d} \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d} \quad (2-11)$$

όπου Ω_t η κατεύθυνση από τον πομπό προς τον δέκτη

Επομένως, η λαμβανόμενη ισχύς θα ισούται με:

$$P_r(d) = P_t G_t(\theta_t, \varphi_t) G_r(\theta_r, \varphi_r) \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (2-12)$$

που σημαίνει ότι η λαμβανόμενη ισχύς είναι αντιστρόφως ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απόστασης. Ο λόγος της εκπεμπόμενης προς τη λαμβανόμενη ισχύ γράφεται λογαριθμικά

$$PL(dB) = 40 \log(d) - 10 \log G_t(\theta_t, \varphi_t) - 10 \log G_r(\theta_r, \varphi_r) - 20 \log h_t - 20 \log h_r \quad (2-13)$$

οπότε προκύπτει ότι για κάθε δεκαπλασιασμό της απόστασης οι απώλειες αυξάνονται κατά $40dB$. Αν δεν ίσχυε η προσέγγιση τότε η λαμβανόμενη ισχύς θα είναι ([3],[4],[5]):

$$P_r(d) = 4P_t G_t(\theta_t, \varphi_t) G_r(\theta_r, \varphi_r) \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \sin^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right) \quad (2-14)$$

2.2.3 Εκθετικό Μοντέλο Διάδοσης (Μοντέλο Απλής Κλίσης)

Απώλειες Διαδρομής για Διάδοση Μη-οπτικής Επαφής (NLOS)

Ένα πολύ απλό εμπειρικό μοντέλο διάδοσης είναι ένα εκθετικό μοντέλο για τις απώλειες διάδοσης που υπολογίζει τη λαμβανόμενη ισχύ σε λογαριθμικές μονάδες ως εξής:

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2-15)$$

όπου d_0 είναι μια απόσταση αναφοράς μέχρι την οποία έχουμε συνθήκες διάδοσης οπτικής επαφής (LOS) και n είναι ο συντελεστής απωλειών διάδοσης (path loss factor) ή συντελεστής εξασθένησης. Στην περίπτωση του ελεύθερου χώρου (FSL) ισχύει $n = 2$, ενώ ανάλογα με το περιβάλλον και τις διαστάσεις κυμαίνεται. Ο συντελεστής n για κάποιο χώρο διάδοσης προκύπτει εμπειρικά από μετρήσεις.

2.2.3.1 Μέγιστη Απόσταση ραδιοκάλυψης

Ως μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης ορίζουμε τη μέγιστη απόσταση όπου μπορεί να βρεθεί ένας δέκτης από έναν πομπό ώστε η λαμβανόμενη ισχύς να μην βρεθεί κάτω από μια τιμή κατωφλίου P_{min} .

Για συστήματα οπτικής επαφής (LOS) βάσει του τύπου:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \quad (2-16)$$

υποθέτοντας ότι είναι $P_r = P_{min}$, προκύπτει ότι είναι:

$$d_{max} = \left(\frac{P_t G_t G_r}{P_{min}} \right)^{1/2} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \quad (m) \quad (2-17)$$

Στην περίπτωση όπου έχουμε οπτική επαφή μέχρι μια απόσταση αναφοράς d_0 από τον πομπό και έπειτα συνθήκες μη-οπτικής επαφής (NLOS) τότε η λαμβανόμενη ισχύς στον δέκτη θα είναι:

$$P_r = P_t G_t G_r L_{TOT} \quad (2-18)$$

$$\text{όπου } L_{TOT} = L_{LOS} L_{NLOS} \quad (2-19)$$

Αν υποθέσουμε ότι $d-d_0 \approx d$ δηλαδή ότι η απόσταση αναφοράς είναι πολύ μικρή σε σχέση με την απόσταση πομπού-δέκτη, τότε οι απώλειες L_{TOT} σε σχέση με την απόσταση θα είναι:

$$L_{TOT}(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (2-20)$$

άρα από τον τύπο για τον λόγο των ισχύων η μέγιστη απόσταση θα είναι:

$$d_{max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2}{P_{min}} \right]^{1/n} d_0 (m) \quad (2-21)$$

2.2.4 Μοντέλο Okumura-Hata

Το μοντέλο *Okumura-Hata* είναι ένα καθαρά εμπειρικό μοντέλο του οποίου οι παράμετροι έχουν υπολογιστεί με τη μέθοδο της προσαρμογής σε εκτεταμένες μετρήσεις. Ο Okumura ανέπτυξε μια εμπειρική προγνωστική μέθοδο καταλήγοντας σε μια σειρά από χρήσιμες γραφικές καμπύλες, για κάθε παράμετρο, όπως τη συχνότητα και το ύψος της κεραίας του πομπού. Το μοντέλο υπολογίζει την ένταση πεδίου και την περιοχή κάλυψης για δεδομένο περιβάλλον. Βασίστηκε σε μετρήσεις που διεξήγαγε στο Τόκιο, σε συχνότητες 150MHz, 450MHz και 900MHz. Το μοντέλο του όμως δεν είναι εύκολα αξιοποιήσιμο από ένα εργαλείο σχεδίασης. Στη συνέχεια ο Hata, στηριζόμενος στα αποτελέσματα του Okumura και στην προσπάθειά του να απλοποιήσει τη συγκεκριμένη μέθοδο, καθιέρωσε μια σειρά από εμπειρικές παραμετρικές εξισώσεις οι οποίες λαμβάνουν κάποιο καθορισμένο εύρος τιμών και διαφέρουν ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης. Αν και στο εγχείρημά του αυτό έκανε κάποιες απλοποιήσεις, το μοντέλο που ανέπτυξε έτυχε πολύ μεγάλης αναγνώρισης και χρησιμοποιείται ευρέως, καθώς δίνει πολύ καλές προσεγγίσεις με μικρό σφάλμα. Το εύρος τιμών για το οποίο έχει νόημα εφαρμογής το μοντέλο είναι:

| | |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Συχνότητα | $150 \leq f_c \leq 1500 \text{ MHz}$ |
| Ύψος σταθμού βάσης | $40 \leq h_{BS} \leq 200 \text{ m}$ |
| Ύψος κινητού δέκτη | $11 \leq h_{MS} \leq 10 \text{ m}$ |
| Απόσταση πομπού-δέκτη | $1 \leq d \leq 20 \text{ km}$ |

Το μοντέλο δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για μακροκυψελωτά συστήματα και κατοικημένες περιοχές. Οι απώλειες διάδοσης διακρίνονται ανάλογα με τον τύπο της περιοχής σε αστικό, προαστιακό και αγροτικό.

Για αστικό περιβάλλον το μοντέλο προβλέπει τη μεσαία τιμή για τις απώλειες διάδοσης, δηλαδή για το 50% των περιπτώσεων ως εξής:

$$L_{50}(dB) = 69.5 + 26.6 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_{BS} - \alpha(h_{MS}) + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_{BS}) \log_{10} d \quad (2-22)$$

όπου $\alpha(h_{MS})$ ο διορθωτικός παράγοντας αναφορικά με το ύψος της κεραίας του κινητού δέκτη. Για μικρές ή μεσαίου μεγέθους πόλεις είναι:

$$\alpha(h_{MS}) = (1.1 \log_{10} f_c - 0.7) h_{MS} - (1.56 \log_{10} f_c - 0.8) \quad (2-23)$$

ενώ για μεγάλες πόλεις

$$\alpha(h_{MS}) = \begin{cases} 8.29(\log_{10} 1.54 h_{MS})^2 - 1.1 & f_c \leq 200 \text{MHz} \\ 3.2(\log_{10} 11.75 h_{MS})^2 - 4.97 & f_c \geq 400 \text{MHz} \end{cases} \quad (2-24)$$

Πρέπει να τονιστεί ότι το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή μόνο σε μακροκυψέλες, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η κεραία του σταθμού βάσης είναι πάνω από τις στέγες των σπιτιών και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μικροκυψέλες.

Για προαστιακό περιβάλλον οι απώλειες δίνονται από τον τύπο:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(Urban) - 2 \left[\log_{10} \frac{f_c}{28} \right]^2 - 5.4 \quad (2-25)$$

με $L(Urban)$ οι απώλειες διάδοσης για τις αντίστοιχες παραμέτρους εάν βρισκόμασταν σε αστικό περιβάλλον.

Τέλος, σε αγροτικό περιβάλλον οι απώλειες είναι:

$$L_{50}(dB) = L_{50}(Urban) - 4.78(\log_{10}f_c)^2 + 18.33\log_{10}f_c - 40.94 \quad (2-26)$$

([2],[3],[4],[5],[6])

2.3 Διαλείψεις

Σε ό, τι αφορά στις διαλείψεις από τις οποίες υποφέρει ένας ραδιοδιάυλος, μπορούμε να διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες: τις *διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading)* και τις *διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading)*. Οι διαλείψεις μεγάλης κλίμακας εμπεριέχουν δύο από τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά της ραδιομετάδοσης: τις απώλειες διάδοσης, δηλαδή τη μεταβολή της εξασθένισης με την απόσταση, και τη σκίαση, που είναι η τυχαία μεταβολή της εξασθένισης για δεδομένη απόσταση. Το είδος αυτό των διαλείψεων εκφράζει τη μέση εξασθένιση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας της κίνησης σε μεγάλες περιοχές. Η στατιστική ανάλυση των αργών διαλείψεων δίνει ένα μέτρο των απωλειών διάδοσης συναρτήσει της απόστασης. Από την άλλη μεριά, οι διαλείψεις μικρής κλίμακας περιγράφουν τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος (πλάτους και φάσης) για μετατοπίσεις του κινητού σταθμού της τάξης του $\lambda/2$ και οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης και στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετατόπισης του δέκτη, αλλά και των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση.

2.3.1 Διαλείψεις Μεγάλης Κλίμακας και Σκίαση

Τα απλά μοντέλα απωλειών διάδοσης αναφέρονται σε μέσες τιμές και δεν λαμβάνουν υπόψη το γεγονός ότι το περιβάλλον μπορεί να είναι εντελώς διαφορετικό σε δύο περιπτώσεις όπου πομπός και δέκτης απέχουν την ίδια απόσταση. Τα ραδιοκύματα

σκιάζονται από τα κτήρια και άλλες κατασκευές. Η σκίαση δεν είναι βέβαια ούτε απόλυτη ούτε απότομη, είναι συνήθως βαθμιαία, λόγω της ύπαρξης του φαινομένου της περίθλασης. Η λαμβανόμενη ισχύς είναι στην πραγματικότητα μια τυχαία μεταβλητή που εξαρτάται από τον αριθμό και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση. Οι τυχαίες μεταβολές του λαμβανομένου σήματος, λόγω της παρουσίας των αντικειμένων στο χώρο διάδοσης, καλούνται συχνά και διαλείψεις σκίασης. Άρα οι τιμές της λαμβανόμενης ισχύος μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικές από τη μέση τιμή που προβλέπουν τα μοντέλα απωλειών διάδοσης.

Οι μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί σε ραδιοδιαύλους έχουν δείξει ότι η λαμβανόμενη ισχύς, εκφρασμένη σε λογαριθμική κλίμακα ακολουθεί κανονική (Gaussian) κατανομή, με τη μέση τιμή να καθορίζεται από το συντελεστή απωλειών διάδοσης και τυπική απόκλιση που εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης. Ισχύει λοιπόν:

$$P_r(d) = \overline{P_r(d)} + \varepsilon_\sigma \quad (2-27)$$

όπου $\overline{P_r(d)}$ είναι η μέση λαμβανόμενη ισχύς σε απόσταση d και ε_σ είναι μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί κανονική κατανομή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ (dB). Εάν χρησιμοποιήσουμε το εκθετικό μοντέλο ή το μοντέλο απλής κλίσης τότε ισχύει:

$$P_r(d) = \overline{P_r(d)} - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \varepsilon_\sigma \quad (dBm) \quad (2-28)$$

Όμοια λοιπόν:

$$PL(d) = \overline{PL(d_0)} - 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + \varepsilon_\sigma \quad (dB) \quad (2-29)$$

με $\overline{PL(d_0)}$ τη μέση τιμή των απωλειών διάδοσης στην απόσταση αναφοράς d_0 . Όταν η κατανομή της λαμβανόμενης ισχύος, εκφρασμένης σε λογαριθμική κλίμακα, είναι κανονική, τότε αποκαλείται *λογαριθμοκανονική (lognormal)*. Η μεταβλητή ε_σ αναπαριστά την απόκλιση της πραγματικής από τη μέση τιμή των απωλειών διάδοσης. Όσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο απωλειών διάδοσης, τόσο μικρότερη είναι η τιμή της τυπικής απόκλισης. Συνήθεις τιμές είναι από 4dB έως 12dB με πιο τυπική εκείνη των 8dB. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι η τυπική απόκλιση σ είναι ανεξάρτητη της απόστασης d .

Μια φυσική εξήγηση της λογαριθμοκανονικής συμπεριφοράς δίνεται εάν θεωρηθεί ότι το συνολικό μονοπάτι διάδοσης μπορεί να χωριστεί σε W επιμέρους τμήματα, που το καθένα έχει ανεξάρτητο συντελεστή εξασθένησης. Το πολλαπλασιαστικό φαινόμενο μετατρέπεται σε αθροιστικό όταν λογαριθμωθεί και, αν ο αριθμός των σκεδαστών W είναι μεγάλος, τότε, λόγω του *Κεντρικού Οριακού Θεωρήματος*, το λαμβανόμενο σήμα θα ακολουθεί κανονική κατανομή.

Άρα η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της λαμβανόμενης ισχύος προκύπτει:

$$P_{P_r}(x) = \frac{1}{\sigma_{P_r}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_{P_r})^2}{2\sigma_{P_r}^2}\right] \quad (2-30)$$

όπου η μέση λαμβανόμενη ισχύς μ_{P_r} μπορεί να υπολογισθεί με οποιοδήποτε μοντέλο απωλειών διάδοσης. Αν χρησιμοποιηθεί το μοντέλο απλής κλίσης τότε ισχύει:

$$\mu_{P_r}(dBm) = \overline{P_r(d)} = \overline{P_r(d_0)} - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2-31)$$

και

$$\mu_{P_L(dB)}(x) = \frac{1}{\sigma_{P_L}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_{P_L})^2}{2\sigma_{P_L}^2}\right] \quad (2-32)$$

$$\mu_{P_L}(dBm) = \overline{P_L(d)} = \overline{P_L(d_0)} - 10n \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (2-33)$$

Έστω $\sigma_{P_r}(dB) = \sigma_{P_L}(dB)$. Για την αθροιστική συνάρτηση κατανομής της λογαριθμοκανονικής ισχύει:

$$Pr[x < x_0] = \int_{-\infty}^{x_0} p_{P_r}(x) dx \quad (2-34)$$

το παραπάνω ολοκλήρωμα μπορεί να γραφτεί με χρήση της συνάρτησης *erf* ως εξής:

$$Pr[x < x_0] = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x_0 - \mu_{P_L}}{\sigma_{P_r}\sqrt{2}}\right) \right] \quad (2-35)$$

Όμως

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx = 1 - 2Q(z\sqrt{2}) \quad (2-36)$$

όπου η Q είναι η συνάρτηση *Gaussian-Q* για την οποία ισχύει:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (2-37)$$

και

$$Q(-z) = 1 - Q(z) \quad (2-38)$$

Με βάση αυτές τις σχέσεις ισχύει:

$$\Pr[x < x_0] = 1 - Q\left(\frac{x_0 - \mu_{P_L}}{\sigma_{P_r}}\right) = Q\left(\frac{\mu_{P_L} - x_0}{\sigma_{P_r}}\right) \quad (2-39)$$

και η πιθανότητα να βρεθεί η λαμβανόμενη ισχύς κάτω από μια τιμή κατωφλίου γ ή αλλιώς η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως εξής:

$$\Pr[P_r > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - \mu_{P_L}}{\sigma_{P_r}}\right) \quad (2-40)$$

([2],[3],[5],[6],[7])

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2

- [1] Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες, Φ. Κωνσταντίνου, Χρ. Καψάλης, Π. Κωττής, Παπασωτηρίου, Αθήνα 1995.
- [2] Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών, Α. Κανάτας, Φ. Κωνσταντίνου, Γ. Πάντος, Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008.
- [3] Δίκτυα Κινητών & Προσωπικών Επικοινωνιών, Μ. Θεολόγου, Τζιόλα, Αθήνα 2007.
- [4] Συστήματα Τηλεπικοινωνιών, John G. Proakis, Masoud Salehi, ΕΚΠΑ, Αθήνα 2002.
- [5] Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα, Β. Κ. Σακαρέλλος, Αθήνα Ιούλιος 2010.
- [6] Wireless Communications, Andrea Goldsmith, Cambridge University Press, 2005
- [7] Papoulis and S. U. Pillai, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, 4th ed., McGraw-Hill Science/ Engineering/ Math, 2002.
- [8] K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, “Cooperative Diversity Performance in Correlated Lognormal Channels”, COST 2100 TD(10)10083, Athens, Greece, 2010/Febr/3-5.
- [9] H. Hashemi, “The indoor radio propagation channel,” Proc. of the IEEE, vol. 81, 1993.
- [10] Cooperation within the Small Cell: The indoor, correlated shadowing case, Vasileios K. Sakarellos, Dimitrios Skraparlis, Athanasios D. Panagopoulos.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΟΙ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΕΣ ΚΑΙ ΤΑ ΠΟΛΥΒΗΜΑΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

3.1 Εισαγωγή

Οι επαναλήπτες τους οποίους πραγματεύεται η παρούσα εργασία είναι δύο τύπων: οι *αναγεννητικοί επαναλήπτες* (*regenerative relays*) και οι *παθητικοί επαναλήπτες* (*non-regenerative relays*). Με τον όρο αναγεννητικοί εννοούνται οι επαναλήπτες οι οποίοι λαμβάνουν ένα κωδικοποιημένο σήμα, το αποκωδικοποιούν και στη συνέχεια, αφού το κωδικοποιήσουν ξανά, το ενισχύουν και το στέλνουν στον επόμενο κόμβο. Αντίστοιχα, οι παθητικοί επαναλήπτες λαμβάνουν απλώς ένα σήμα, το ενισχύουν και στη συνέχεια το στέλνουν στον επόμενο κόμβο ενισχύοντας ταυτόχρονα και τον θόρυβο. Εκτελώντας διαφορετικές λειτουργίες, οι δύο αυτοί τύποι επαναληπτών επηρεάζουν και διαφορετικά τις επιδόσεις του δικτύου όπως τον τελικό σηματοθορυβικό λόγο του δέκτη (SNR_r), την λαμβανόμενη ισχύ και κατά συνέπεια την πιθανότητα αποκοπής.

Συγκεκριμένα, σε ένα δίκτυο με N αναγεννητικούς επαναλήπτες, κάθε ένας λαμβάνει το κωδικοποιημένο σήμα έχοντας κάποιο σηματοθορυβικό λόγο, στη συνέχεια το αποκωδικοποιεί και τέλος το κωδικοποιεί, το ενισχύει και το στέλνει στον επόμενο επαναλήπτη. Ο επόμενος επαναλήπτης λαμβάνει το σήμα με ένα διαφορετικό τώρα σηματοθορυβικό λόγο, ανεξάρτητο από αυτόν του προηγούμενου και έπειτα εκτελεί την ίδια διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι με την διαδικασία κωδικοποίησης-αποκωδικοποίησης-κωδικοποίησης οι αναμεταδότες δεν ενισχύουν τον θόρυβο μαζί με το σήμα. Έτσι, ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη ισούται με τον ελάχιστο σηματοθορυβικό λόγο κάποιου από τους κόμβους στην αλυσίδα. Συνεπώς η πιθανότητα αποκοπής ισούται με την πιθανότητα να βρεθεί ο ελάχιστος σηματοθορυβικός λόγος κάτω από την δεδομένη στάθμη.

Από την άλλη μεριά, σε δίκτυο με N παθητικούς αναμεταδότες, κάθε ένας λαμβάνει το σήμα μαζί με τον θόρυβο και στη συνέχεια ενισχύει και τα δύο και τα προωθεί. Αυτό σημαίνει ότι ο σηματοθορυβικός λόγος του κάθε κόμβου εξαρτάται από όλους τους προηγούμενους. Επομένως, η πιθανότητα αποκοπής θα ισούται με την πιθανότητα ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος στον δέκτη να πέσει κάτω από την δεδομένη στάθμη g_{th} .

3.2 Αναγεννητικοί επαναλήπτες

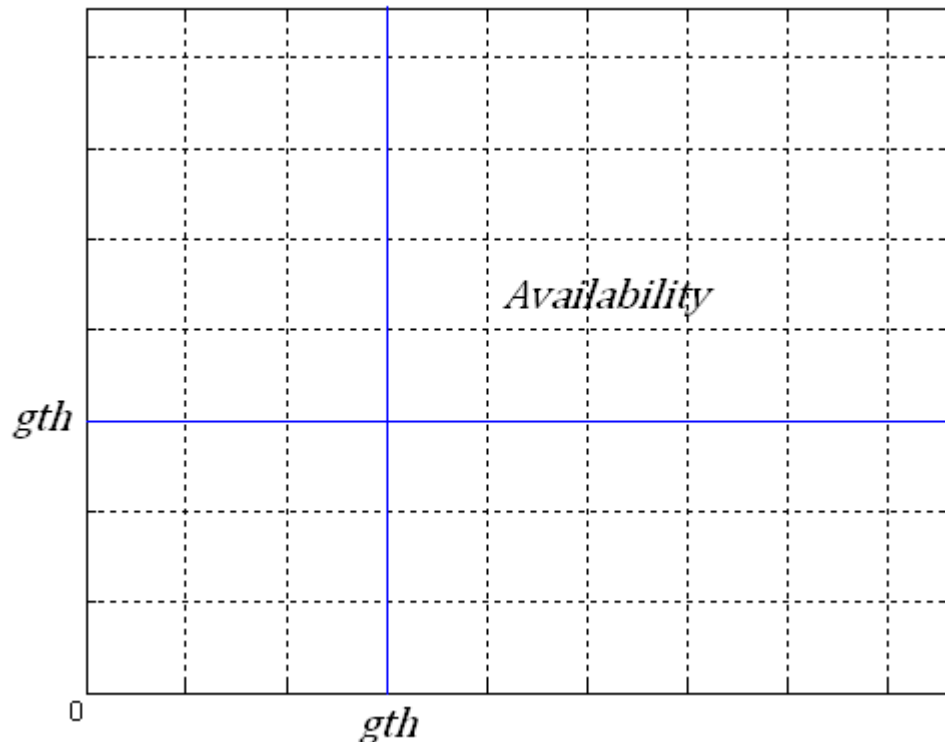
3.2.1 Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη

Αρχικά θα υπολογισθεί η πιθανότητα αποκοπής P_{out} για δίκτυο με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη σε περιβάλλον σκίασης με συσχετισμένες διαλείψεις.

Η ζητούμενη πιθανότητα θα ισούται με την πιθανότητα ο ελάχιστος σηματοθορυβικός κόμβος σε μία από τις δύο ζεύξεις να βρεθεί κάτω μια τιμή κατωφλίου, έστω γ_{th} [1].

$$P_{out} = P(\min \gamma_i < \gamma_{th}) \quad (3-1)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα των σηματοθορυβικών λόγων γ_1 και γ_2 , η *διαθεσιμότητα* (*availability*) P_{av} θα εκφράζεται από το χωρίο, όπως αναγράφεται, και αντίστοιχα η πιθανότητα αποκοπής από το υπόλοιπο χωρίο.



Επομένως, η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα για το εν λόγω χωρίο[2]:

$$P_{out} = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 + \int_0^{\gamma_{th}} d\gamma_1 \int_{\gamma_{th}}^{\infty} d\gamma_2 f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1\gamma_2) \quad (3-2)$$

Θέτοντας, λοιπόν [3],

$$u_j = \frac{\ln \gamma_j - \mu_j}{\sigma_j} \quad (3-3)$$

και

$$u_{j,0} = \frac{\ln \gamma_{th} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (3-4)$$

η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$P_{out} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln \gamma_{th} - \mu_1}{\sqrt{2}\sigma_1} \right) + \int_{-\infty}^{u_{1,0}} f_{u_1}(u_1) du_1 \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{\ln \gamma_{th} - \mu_2}{\sigma_2} - \mu_{2/1}}{\sqrt{2}\sigma_{2/1}} \right) \quad (3-5)$$

Η πιθανότητα αποκοπής P_{out} μπορεί να εκφραστεί και ως [4]:

$$P_{out} = P((\gamma_1 < \gamma_{th}) \cup (\gamma_2 < \gamma_{th})) \quad (3-6)$$

αν

$$P_{out} = 1 - P_{av} \quad (3-7)$$

Άρα, θέτοντας πάλι

$$u_j = \frac{\ln \gamma_j - \mu_j}{\sigma_j} \quad (3-8)$$

και

$$u_{j,0} = \frac{\ln \gamma_{th} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (3-9)$$

προκύπτει

$$P_{out} = 1 - \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 \quad (3-10)$$

$$P_{out} = 1 - \int_{u_{1,0}}^{\infty} f_{u_1}(u_1) \int_{u_{2,0}}^{\infty} f_{u_1}(u_2|u_1) du_2 du_1 \quad (3-11)$$

$$P_{out} = 1 - \int_{u_{1,0}}^{\infty} f_{u_1}(u_1) \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{\ln \gamma_{th} - \mu_2 - p_n u_1}{\sigma_2}}{\sqrt{2(1-p_n^2)}} \right) du_1 \quad (3-12)$$

όπου

$$f_{u_1}(u_1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u_1-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-13)$$

3.2.2 Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με N αναγεννητικούς επαναλήπτες

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται θεωρητικά και η πιθανότητα αποκοπής σε δίκτυο με N αναγεννητικούς επαναλήπτες.

Η ζητούμενη πιθανότητα, λοιπόν, θα είναι ισούται με το ολοκλήρωμα[5]:

$$P_{out} = 1 - \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \dots \int_{\gamma_{th}}^{\infty} f(\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_N) d\gamma_1 d\gamma_2 \dots d\gamma_N \quad (3-14)$$

$$P_{out} = 1 - \int_{u_{1,0}}^{\infty} \int_{u_{2,0}}^{\infty} \dots \int_{u_{N-1,0}}^{\infty} f_{u_1, u_2 \dots u_{N-1}}(u_1, u_2 \dots u_{N-1}) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{u_{N,0} - \mu_{N|1,2 \dots N-1}}{\sigma_{N|1,2 \dots N-1} \sqrt{2}} \right) \right] du_{N-1} du_{N-2} \dots du_1 \quad (3-15)$$

όπου

$$f_{u_1 u_2 \dots u_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N D_{1,2, \dots, N}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N] C_{1,2, \dots, N}^{-1} [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N]^T \right\} \quad (3-16)$$

$$\mu_{N|1,2 \dots N-1} = \left\{ C_{1,2 \dots N-1}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix} \right\}^T \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

$$\sigma^2_{N|1,2 \dots N-1} = 1 - \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix}^T C_{1,2 \dots N-1}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

και

$$C_{1,2,\dots,N} \begin{bmatrix} 1 & \rho_{1,2} & \dots & \rho_{1,N} \\ \rho_{2,1} & 1 & \dots & \rho_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{N,1} & \rho_{N,2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

([6],[7])

3.3 Παθητικοί επαναλήπτες

3.3.1 Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με έναν παθητικό επαναλήπτη

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται η πιθανότητα αποκοπής, αρχικά για έναν και έπειτα για N παθητικούς επαναλήπτες. Η διαφορά στην περίπτωση αυτή είναι ότι στον N-οστό κόμβο ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος θα ισούται με γ_{eq} ο οποίος μπορεί να βρεθεί ως εξής[8]:

$$Q_n^2 = \frac{1}{a_n^2 + N_{0,n}} \quad (3-20)$$

$$\gamma_{eq} = \left[\prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{1}{\gamma_n} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3-21)$$

Η πιθανότητα αποκοπής λοιπόν θα ισούται με την πιθανότητα ο παραπάνω σηματοθορυβικός λόγος να βρεθεί κάτω από μια στάθμη γ_{th} :

$$P_{out} = P(\gamma_{eq} < \gamma_{th}) \quad (3-22)$$

$$P_{out} = Q\left(\frac{\mu_{eq} - \gamma_{th}}{\sigma_{eq}}\right) \quad (3-23)$$

$$P_{out} = P \left[\left[\prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{1}{\gamma_n} \right) \right]^{-1} < \gamma_{th} \right] \quad (3-24)$$

$$P_{out} = P \left[\left[\prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{1}{\gamma_n} \right) \right] > \frac{1}{\gamma_{th}} + 1 \right] \quad (3-25)$$

Συγκεκριμένα, για έναν επαναλήπτη, ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος θα είναι[9]:

$$\gamma_{eq} = \left[\left(1 + \frac{1}{\gamma_1} \right) \left(1 + \frac{1}{\gamma_2} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3-26)$$

$$\gamma_{eq} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + 1} \quad (3-27)$$

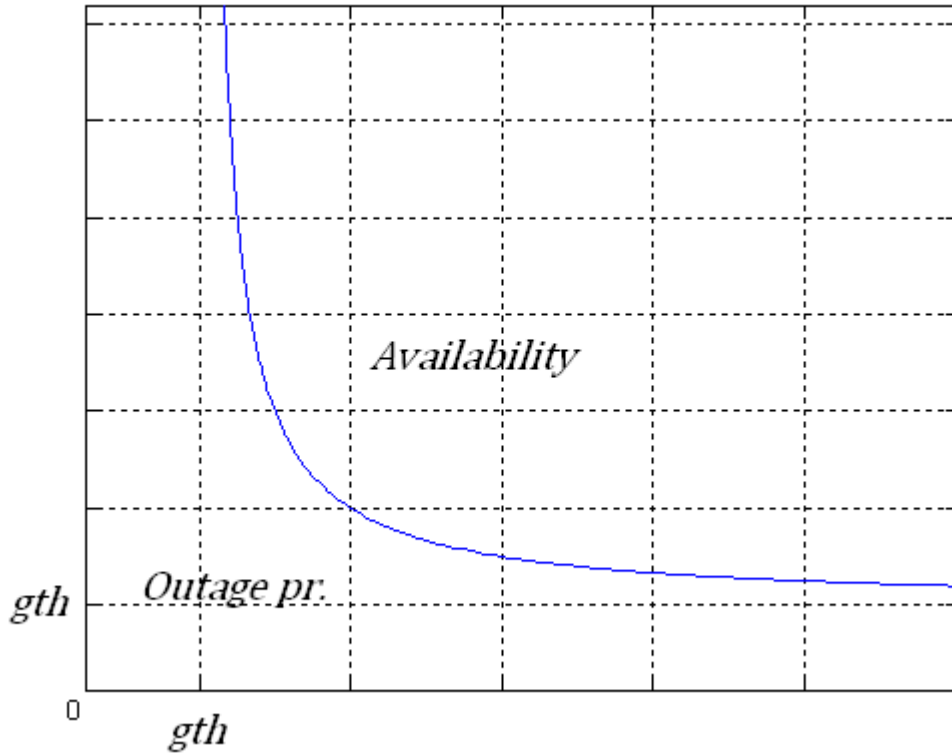
Η ζητούμενη πιθανότητα, λοιπόν, θα είναι:

$$P_{out} = P(\gamma_{eq} < \gamma_{th}) \quad (3-28)$$

Σχεδιάζοντας τους δύο σηματοθορυβικούς λόγους, η καμπύλη που θα προκύψει λαμβάνοντας υπόψη την σχέση για το γ_{eq} θα εκφράζεται από τη σχέση:

$$\gamma_2 < \frac{\gamma_{th}(\gamma_1 + 1)}{\gamma_1 - \gamma_{th}} \quad (3-29)$$

Αντίστοιχα με την περίπτωση του αναγεννητικού επαναλήπτη, η επιφάνεια πάνω από την καμπύλη εκφράζει την διαθεσιμότητα, ενώ η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη εκφράζει την πιθανότητα αποκοπής:



Επομένως η ζητούμενη πιθανότητα μπορεί να εκφραστεί ως το παρακάτω ολοκλήρωμα για το αντίστοιχο χωρίο:

$$P_{out} = 1 - \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_{\gamma_2(\gamma_1)}^{\infty} f(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 \quad (3-30)$$

Θέτοντας πάλι

$$u_j = \frac{\ln \gamma_j - \mu_j}{\sigma_j} \quad (3-31)$$

προκύπτει:

$$P_{out} = 1 - \int_{\gamma_1(\infty)}^{\infty} d\gamma_1 \int_{\gamma_2(\gamma_1)}^{\infty} f(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_2 \quad (3-32)$$

$$P_{out} = 1 - \int_{u_{1,0}}^{\infty} f_{u_1}(u_1) \int_{\frac{\ln\left(\frac{\gamma_{th}(\gamma_1+1)}{\gamma_1-\gamma_{th}}\right) - \mu_2}{\sigma_2}}^{\infty} f_{u_1}(u_2|u_1) du_2 du_1 \quad (3-33)$$

$$P_{out} = 1 - \int_{u_{1,0}}^{\infty} f_{u_1}(u_1) \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\frac{\ln\left(\frac{\gamma_{th}(\gamma_1+1)}{\gamma_1-\gamma_{th}}\right) - \mu_2}{\sigma_2} - p_n u_1}{\sqrt{2(1-p_n^2)}} \right) du_1 \quad (3-34)$$

όπου

$$f_{u_1}(u_1) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u_1-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-35)$$

3.3.2 Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με N παθητικούς επαναλήπτες

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η πιθανότητα αποκοπής σε δίκτυο με N παθητικούς επαναλήπτες. Αρχικά, ο ισοδύναμος σηματοθορυβικός λόγος στον N-οστό κόμβο θα είναι:

$$\gamma_{eq} = \left[\prod_{n=1}^N \left(1 + \frac{1}{\gamma_n} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (3-36)$$

Έτσι η πιθανότητα αποκοπής P_{out} θα είναι:

$$P_{out} = 1 - P_{av} \quad (3-37)$$

$$P_{out} = 1 - P(\gamma_{eq} > \gamma_{th}) \quad (3-38)$$

$$P_{out} = 1 - \int_{\gamma_{th}}^{\infty} \int_{\gamma_2(\gamma_1, \infty \dots \infty)}^{\infty} \int_{\gamma_3(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_4, \infty \dots \infty)}^{\infty} \dots \int_{\gamma_N(\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_{N-1})}^{\infty} f(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N) d\gamma_1 d\gamma_2 \dots d\gamma_N \quad (3-39)$$

όπου

$$\gamma_1(\infty, \infty \dots \infty) = \gamma_{th} \quad (3-40)$$

$$\gamma_2(\gamma_1, \infty \dots \infty) = \frac{\gamma_{th}(\gamma_1 + 1)}{\gamma_1 - \gamma_{th}} \quad (3-41)$$

$$\gamma_3(\gamma_1, \gamma_2, \infty \dots \infty) = \frac{\gamma_{th}(\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_1 \gamma_2 + 1)}{\gamma_1 \gamma_2 - \gamma_{th}(\gamma_1 + \gamma_2 + 1)} \quad (3-42)$$

...

$$P_{out} = 1 - \int_{u_{1,0}}^{\infty} \int_{u_{2,0}}^{\infty} \dots \int_{u_{N-1,0}}^{\infty} f_{u_1, u_2 \dots u_{N-1}}(u_1, u_2 \dots u_{N-1}) \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{u_{N,0} - \mu_{N|1,2 \dots N-1}}{\sigma_{N|1,2 \dots N-1} \sqrt{2}} \right) \right] du_{N-1} du_{N-2} \dots du_1 \quad (3-43)$$

με

$$f_{u_1 u_2 \dots u_n}(u_1, u_2, \dots, u_n) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N D_{1,2, \dots, N}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N] C_{1,2, \dots, N}^{-1} [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_N]^T \right\} \quad (3-44)$$

$$u_j = \frac{\ln \gamma_j - \mu_j}{\sigma_j} \quad (3-45)$$

$$u_{N,0} = \frac{\ln \left(\frac{\gamma_{th} \prod_{t=1}^{N-1} (\gamma_t + 1)}{\prod_{n=1}^{i-1} \gamma_n - \gamma_{th} \sum_{n=1}^{N-1} \prod_{t=n+1}^{N-1} \gamma_t \prod_{t=1}^{n-1} (\gamma_t + 1)} \right) - \mu_N}{\sigma_N} \quad (3-46)$$

$$\mu_{N|1,2..N-1} = \left\{ C^{-1}_{1,2..N-1} \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix} \right\}^T \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix} \quad (3-47)$$

$$\sigma^2_{N|1,2..N-1} = 1 - \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix}^T C^{-1}_{1,2..N-1} \begin{bmatrix} \rho_{n_{1N}} \\ \rho_{n_{2N}} \\ \vdots \\ \rho_{n_{N-1N}} \end{bmatrix} \quad (3-48)$$

$$C_{1,2,..N} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{1,2} & \dots & \rho_{1,N} \\ \rho_{2,1} & 1 & & \rho_{2,N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \rho_{N,1} & \rho_{N,2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3-49)$$

[10]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

- [1] Average Outage Duration of Multihop Communication Systems With Regenerative Relays, L. Yang, M. O. Hasna, M. Alouini, July 2005
- [2] Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα, Β. Κ. Σακαρέλλος, Αθήνα Ιούλιος 2010.
- [3] Papoulis and S. U. Pillai, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, 4th ed., McGraw-Hill Science/ Engineering/ Math, 2002.
- [4] Τεχνικές Πολλαπλών Κεραιών (MIMO) και συνεργατικής διαφορικότητας σε ασύρματες επικοινωνίες, Δημήτριος Σκραπαρλής, Αθήνα Ιούλιος 2009
- [5] MRC and SC in correlated lognormal channels, D. Skraparlis, V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, June 2009
- [6] End-to-End Outage Probability of Multihop Relayed Transmissions over Lognormal Shadowed Channels, M. O. Hasna, M. Alouini,
- [7] M. O. Hasna, M.-S. Alouini, “End-to-End Outage Probability of Multihop Transmission over Lognormal Shadowed Channels,” Arabian J. for Science and Eng., vol. 28, no. 2C, pp. 35-44, Dec. 2003.
- [8] D. Skraparlis, V. K. Sakarellos, A. D. Panagopoulos, and J. D. Kanellopoulos, “Outage Performance Analysis of Cooperative Diversity with MRC and SC in Correlated Lognormal Channels,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2009, Article ID 707839, 7 pages, 2009
- [9] D. Skraparlis, V. Sakarellos, A. Panagopoulos, J. Kanellopoulos, “Performance of N-branch receive diversity combining in correlated lognormal channels,” IEEE Comm. Lett., vol.13, no.7, pp.489-491, 2009.
- [10] V. K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos, Cooperative Transmission Techniques and Protocols in Wireless Sensor Networks

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΕ MATLAB

4.1 Εισαγωγή

Έπειτα από τους θεωρητικούς υπολογισμούς για την πιθανότητα αποκοπής σε δίκτυα με N αναγεννητικούς και παθητικούς επαναλήπτες, έγινε χρήση του προγράμματος *MathWorks-MatLab* με σκοπό τον αριθμητικό υπολογισμό των ολοκληρωμάτων με χρήση της συνάρτησης *quadl.m* καθώς και της *gauss_legendre.m*.

Αρχικά, υπολογίζεται η πιθανότητα αποκοπής ως προς το σηματοθορυβικό λόγο κατωφλίου g_{th} σε διαγράμματα λογαριθμικής κλίμακας. Ο σκοπός είναι να μελετηθεί η εξάρτηση της πιθανότητας αποκοπής από τον αριθμό των επαναληπτών, την τυπική απόκλιση των διαλείψεων (περιβάλλον διάδοσης) και τον συντελεστή συσχέτισης.

Έπειτα, θεωρείται ότι ο δίαυλος υποφέρει από διαλείψεις διαδρομής (*path loss*) Θεωρώντας δύο διαφορετικούς χώρους (ένα εργοστάσιο και ένα γραφείο) και θέτοντας τις κατάλληλες παραμέτρους για το καθένα, υπολογίζεται η πιθανότητα αποκοπής για $N=0,1,2$ επαναλήπτες, κρατώντας σταθερή την συνολική διαθέσιμη ισχύ εκπομπής.

Τέλος, μοντελοποιείται ένα πολυβηματικό δίκτυο δημιουργώντας τυχαία δείγματα που να ανήκουν σε μια λογαριθμοκανονική κατανομή με συγκεκριμένες παραμέτρους και εξετάζεται εάν τα αποτελέσματα συμπίπτουν με αυτά των αριθμητικών υπολογισμών.

4.2 Αριθμητικός υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής P_{out}

Η υλοποίηση τού κώδικα για τον αριθμητικό υπολογισμό N ολοκληρωμάτων έγινε με βάση την λογική της αναδρομής. Αρχικά, ολοκληρώθηκε ο κώδικας για την περίπτωση ενός επαναλήπτη, ο οποίος ανάγεται απλώς στον υπολογισμό ενός ολοκληρώματος. Έπειτα, για τους δύο επαναλήπτες, ο υπολογισμός έγινε με χρήση συνάρτησης ολοκλήρωσης η οποία καλεί τον εαυτό της, υλοποιώντας ουσιαστικά το διπλό ολοκλήρωμα. Με την ίδια μέθοδο επεκτάθηκε και στον κώδικα N ολοκληρωμάτων.

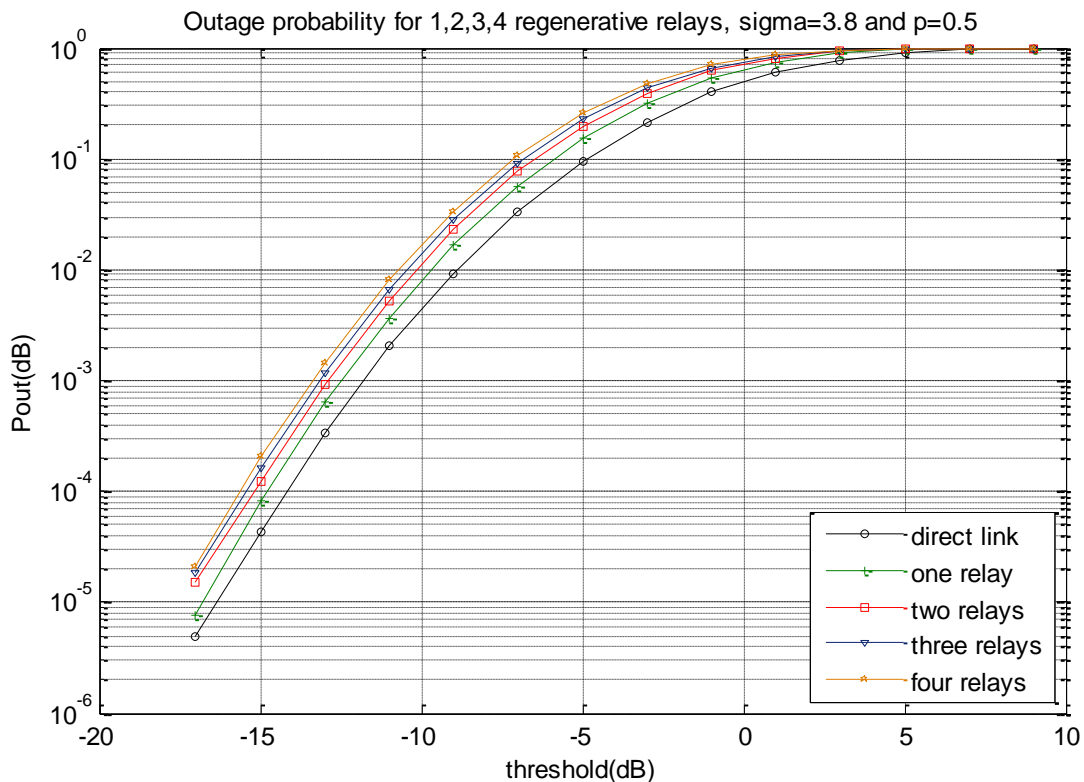
Σε ό, τι αφορά στον διαχωρισμό αναγεννητικών και παθητικών επαναληπτών, η διαφορά έγκειται στα άκρα ολοκλήρωσης. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση τα άκρα

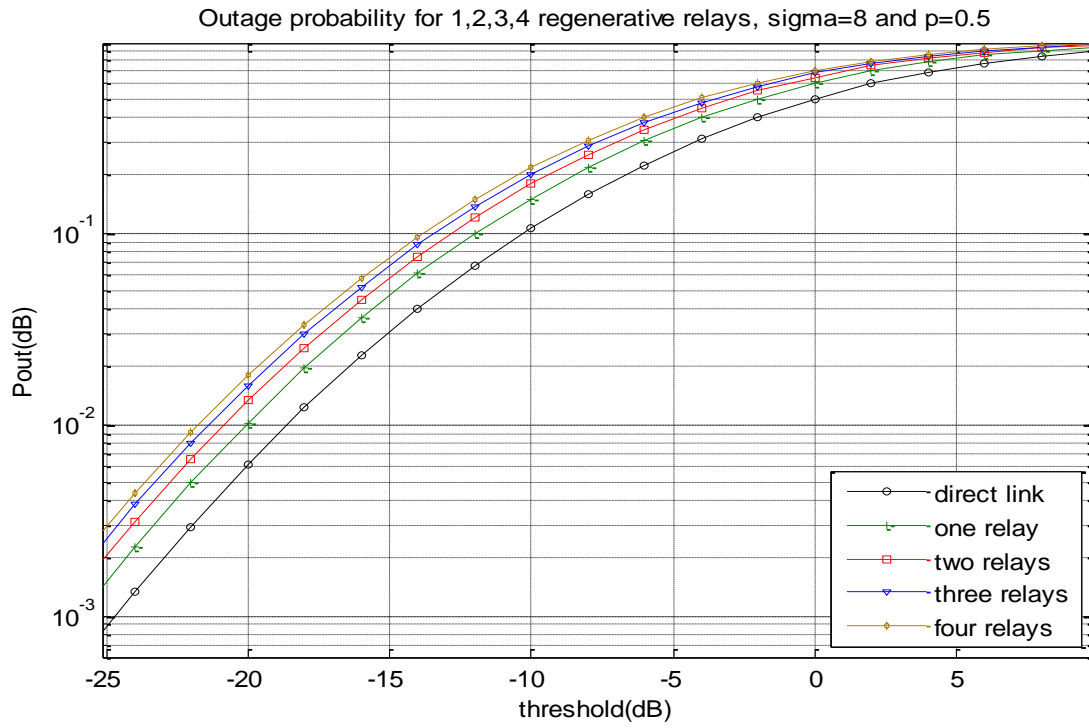
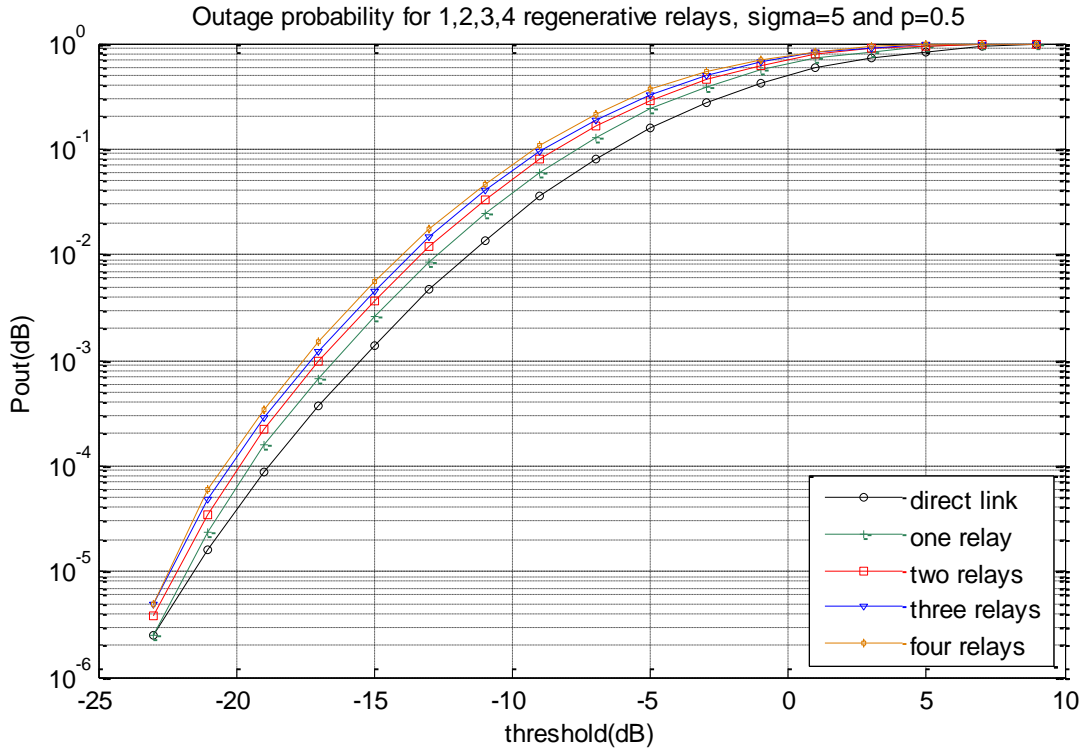
ολοκλήρωσης είναι σταθερά ενώ στην δεύτερη εμπεριέχουν τις μεταβλητές ολοκλήρωσης, όπως προκύπτει και από τις σχέσεις υπολογισμού που παρουσιάζονται στο 3^ο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, για τον τελικό κώδικα των N παθητικών επαναληπτών έπρεπε απλώς να βρεθεί ένας γενικός τύπος για τον υπολογισμό του γ_{eq} και στη συνέχεια να υλοποιηθεί με τον ίδιο τρόπο όπως για τους αναγεννητικούς επαναλήπτες. Ο αναδρομικός τύπος υπολογισμού του N-οστού σηματοθορυβικού λόγου σε δίκτυο με N παθητικούς επαναλήπτες είναι:

$$\gamma_{eq} = \frac{\gamma_{th} \prod_{t=1}^{N-1} (\gamma_t + 1)}{\prod_{n=1}^{i-1} \gamma_n - \gamma_{th} \sum_{n=1}^{N-1} \prod_{t=n+1}^{N-1} \gamma_t \prod_{t=1}^{n-1} (\gamma_t + 1)} \quad (4-1)$$

4.2.1 Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης (διαφορετικοί περιβάλλοντες χώροι)

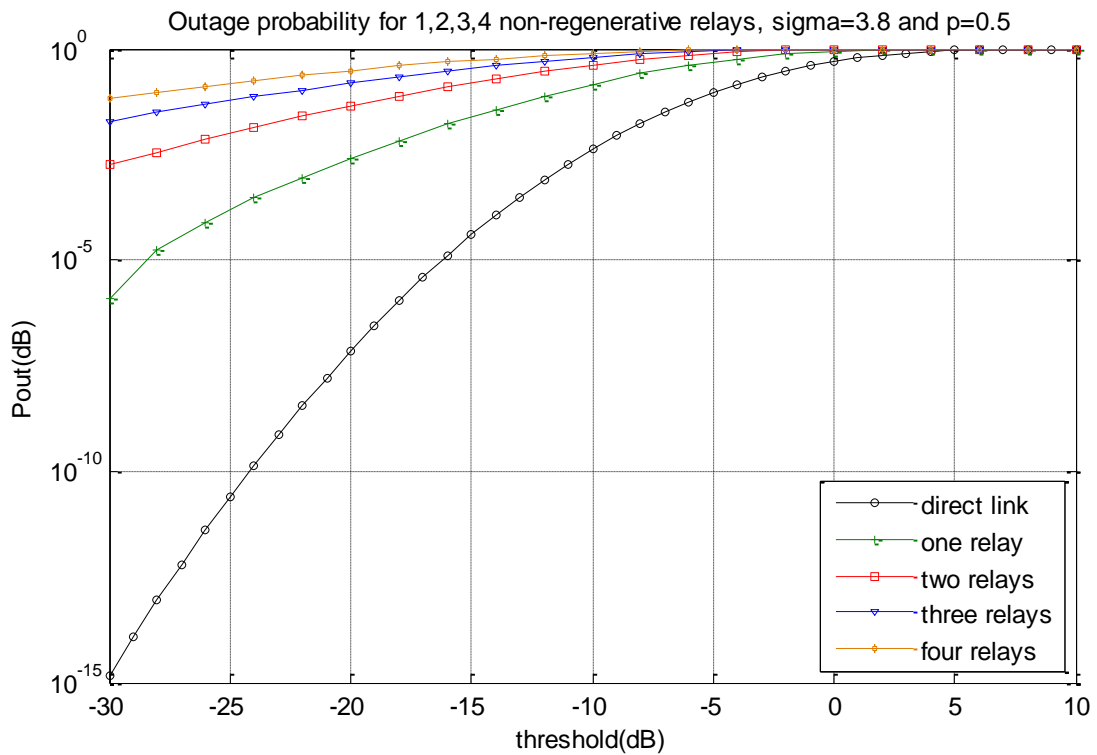
Παρακάτω παρουσιάζονται τρία διαγράμματα της πιθανότητας αποκοπής για $N=0,1,2,3,4$ αναγεννητικούς επαναλήπτες για τρεις διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης $\sigma = 3.8, 5dB$ και $8dB$.

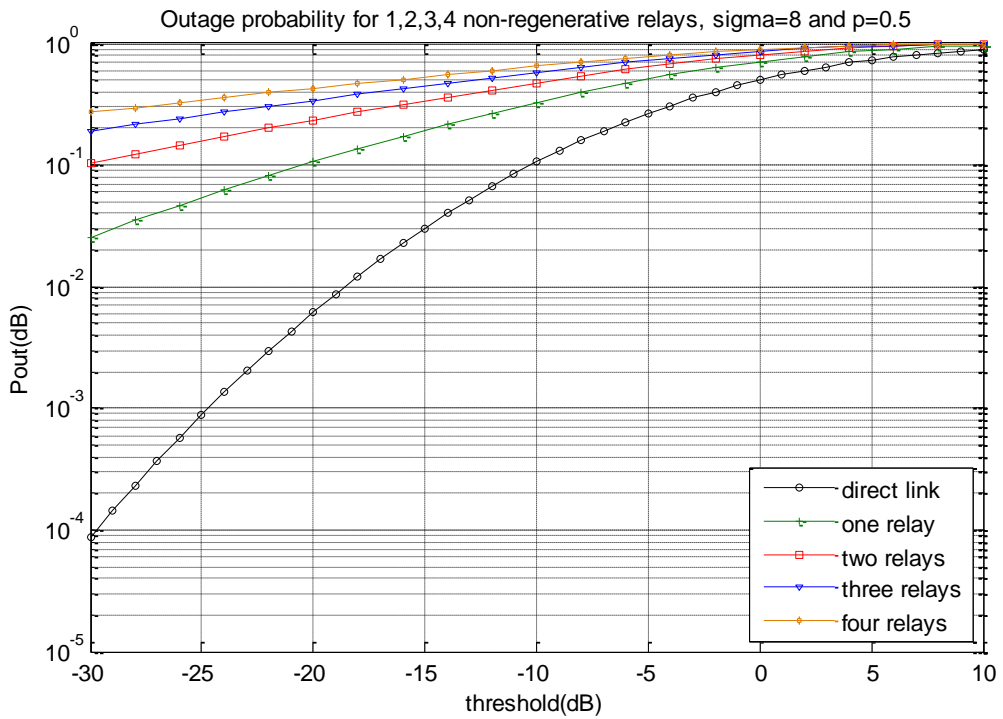
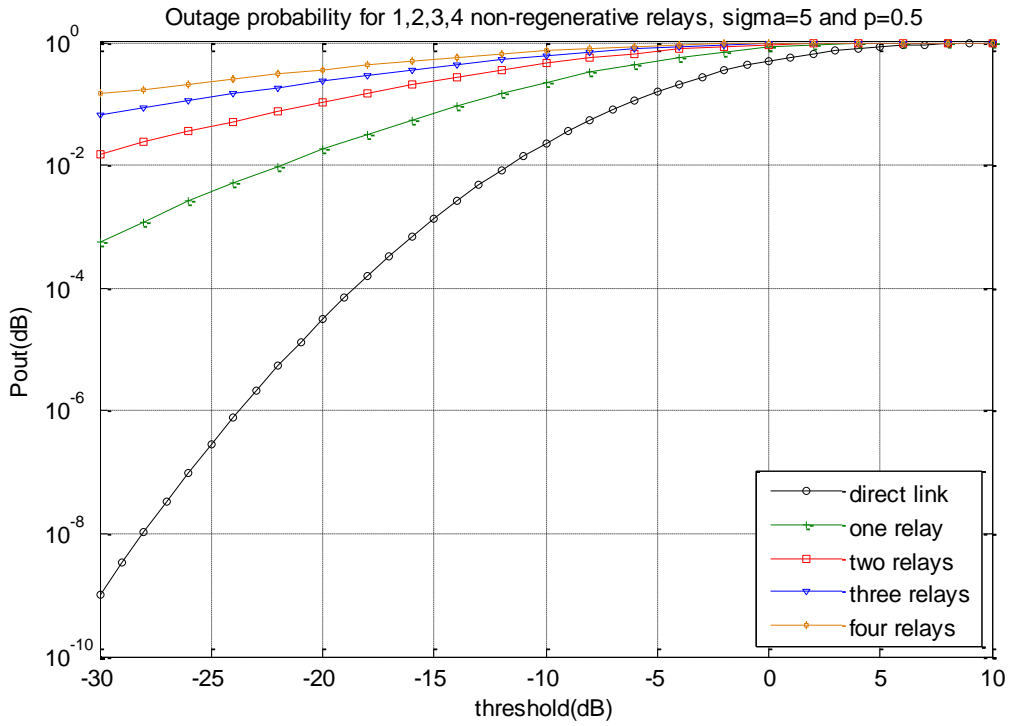




Είναι φανερό ότι όσο αυξάνεται ο αριθμός των αναγεννητικών επαναληπτών τόσο αυξάνεται η πιθανότητα αποκοπής (για συγκεκριμένη τιμή SNR κατωφλίου g_{th}). Επομένως η τοποθέτηση ενδιάμεσων αναγεννητικών επαναληπτών σε ένα δίκτυο χειροτερεύει την ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας μειώνοντας την διαθεσιμότητά της. Επίσης, όσο αυξάνεται η τιμή της τυπικής απόκλισης τόσο μεγαλώνει η πιθανότητα αποκοπής και κατά συνέπεια τόσο δυσχερέστερη η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη.

Ομοίως, για παθητικούς επαναλήπτες προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα:

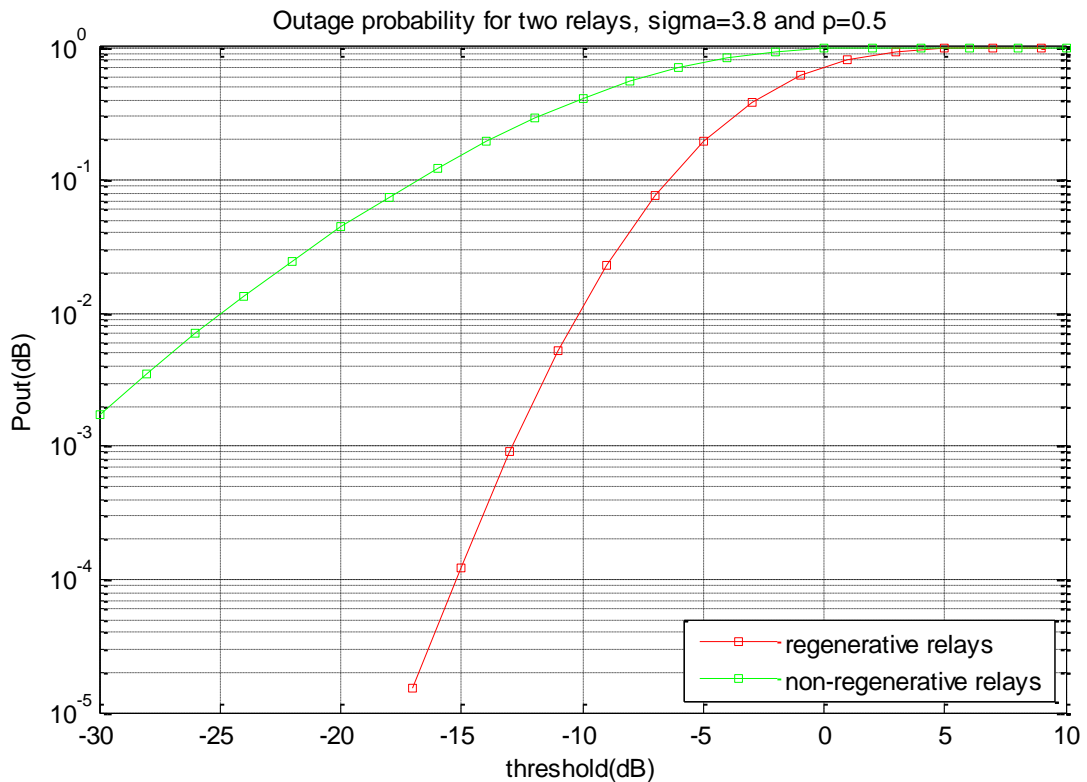


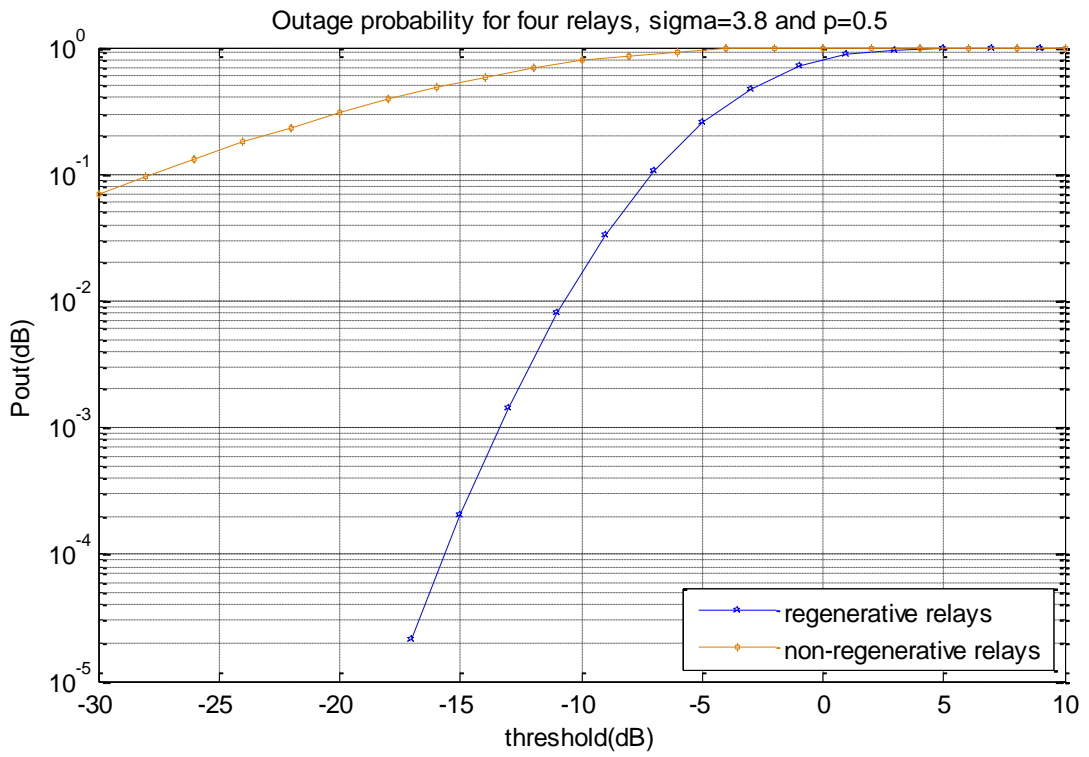
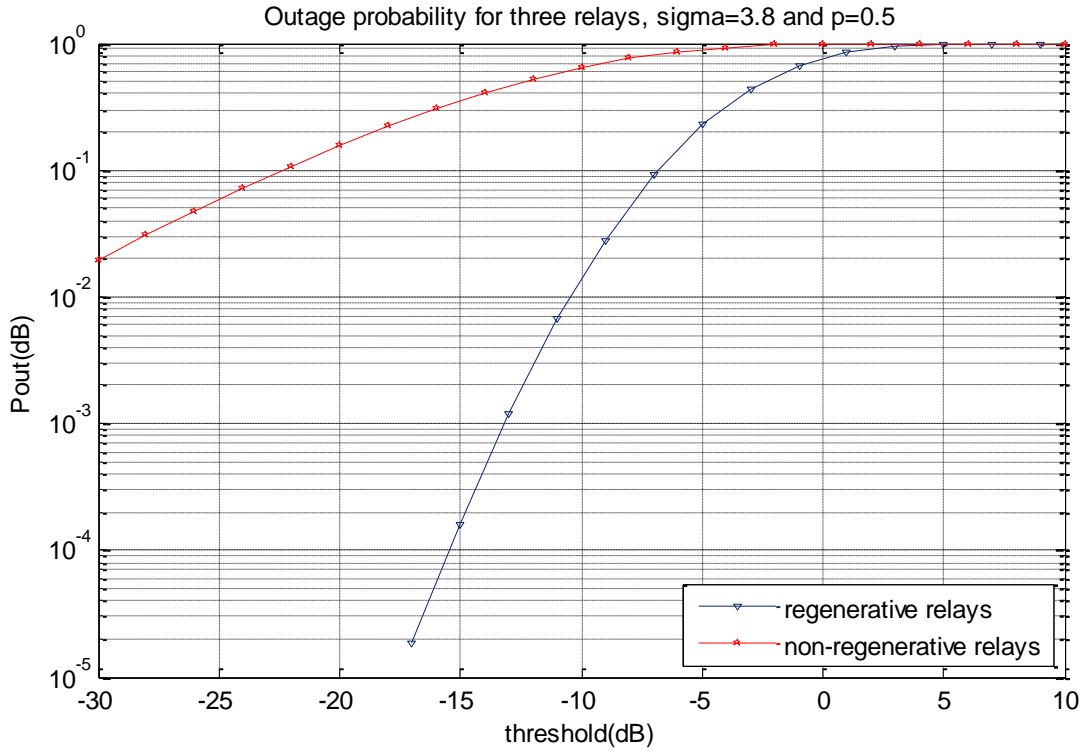


Στην περίπτωση των παθητικών επαναληπτών γίνεται εμφανές πως, αντίστοιχα με τους αναγεννητικούς, όσο περισσότεροι είναι οι επαναλήπτες τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα αποκοπής με την διαφορά ότι κάθε επαναλήπτης αυξάνει πολύ περισσότερο την πιθανότητα αποκοπής του δικτύου.

4.2.2 Σύγκριση πιθανοτήτων αποκοπής για αναγεννητικούς και παθητικούς επαναλήπτες σε ίδιες συνθήκες διάδοσης

Έπειτα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της πιθανότητας αποκοπής για αναγεννητικούς και παθητικούς επαναλήπτες μαζί για $\sigma=2,3,4dB$, $\rho=0.5$

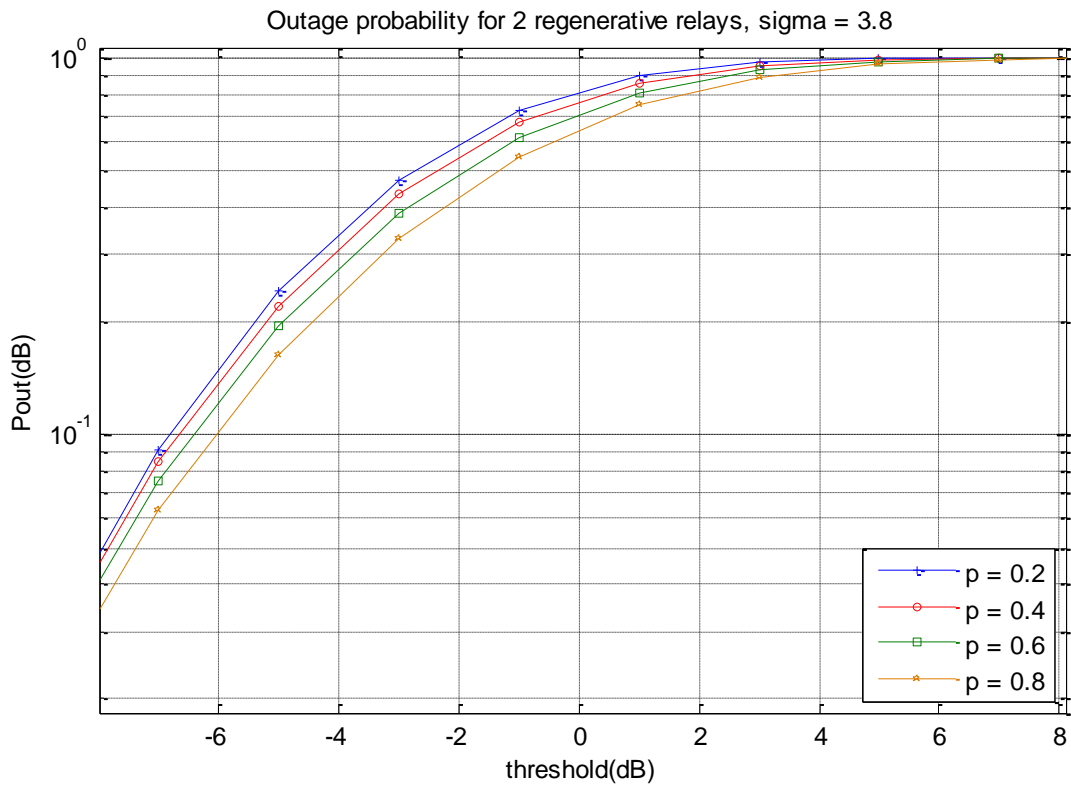


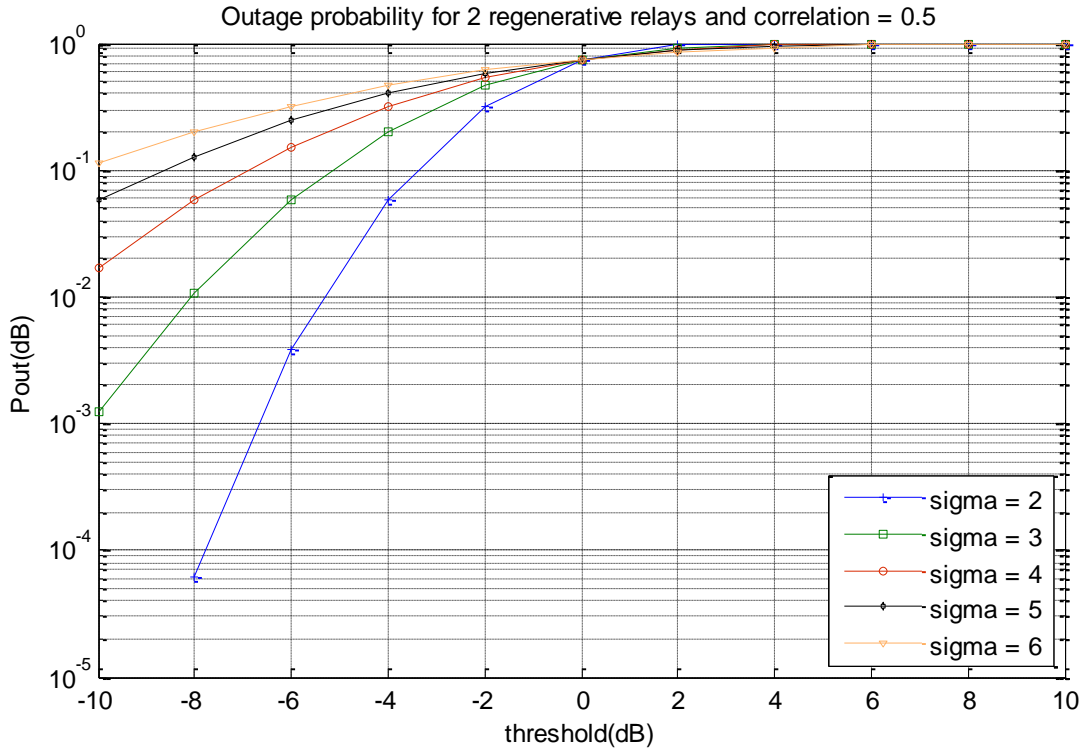


Από τα παραπάνω διαγράμματα αποδεικνύεται πως η χρήση αναγεννητικών έναντι παθητικών επαναληπτών δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε ό, τι αφορά την πιθανότητα αποκοπής.

4.2.3 Εξάρτηση πιθανότητας αποκοπής, συντελεστή συσχέτισης και τυπικής απόκλισης

Στη συνέχεια συγκρίνονται στο ίδιο διάγραμμα η μεταβολή της πιθανότητας αποκοπής για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης και έπειτα του συντελεστή συσχέτισης.





4.3 Απώλειες διαδρομής

Αρχικά είχε γίνει η παραδοχή ότι η μέση τιμή των τυχαίων μεταβλητών ισούται με μηδέν. Αυτό σήμαινε ότι δεν υπήρχαν καθόλου απώλειες διαδρομής (*path loss*) και πομπός και αναμεταδότες εξέπεμπαν με ίση ισχύ $0dBW$.

Στη φάση αυτή ο πομπός και ο τελικός δέκτης βρίσκονται σε μια σταθερή απόσταση. Επίσης, το δίκτυο έχει διαθέσιμη ισχύ εκπομπής $0dB$. Έτσι, όσο προστίθενται στο δίκτυο περισσότεροι ενδιάμεσοι επαναλήπτες, η διαθέσιμη ισχύς διαιρείται ισομερώς σε αυτούς. Έτσι, εάν στην απευθείας ζεύξη ο πομπός εκπέμπει με ισχύ εκπομπής P_t , τότε τοποθετώντας ενδιάμεσα έναν επαναλήπτη, πομπός και επαναλήπτης θα εκπέμπουν με $P_t/2$ ο καθένας. Κατά τον ίδιο τρόπο, τοποθετώντας δύο επαναλήπτες, θα εκπέμπουν ο καθένας με $P_t/3$ κοκ.

Έπειτα, αφού εκτός των διαλείψεων λόγω σκίασης υπάρχουν πλέον και απώλειες διαδρομής, αυτό σημαίνει ότι οι μέσες τιμές των τυχαίων μεταβλητών δεν θα είναι μηδενικές, αλλά θα υπολογίζονται από τον τύπο([1],[2]):

$$m = P_t - PL (dB)$$

όπου PL είναι το *Path Loss*, που υπολογίζεται ως εξής:

$$PL \text{ dBm} = P_t \text{ dBm} + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{4\pi d_0} - 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0}$$

Τέλος, οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης ρ_{ij} μπορούν να υπολογισθούν με χρήση του τύπου του Saunders (συνάρτηση *Saunders_Correlation.m*) ως εξής:

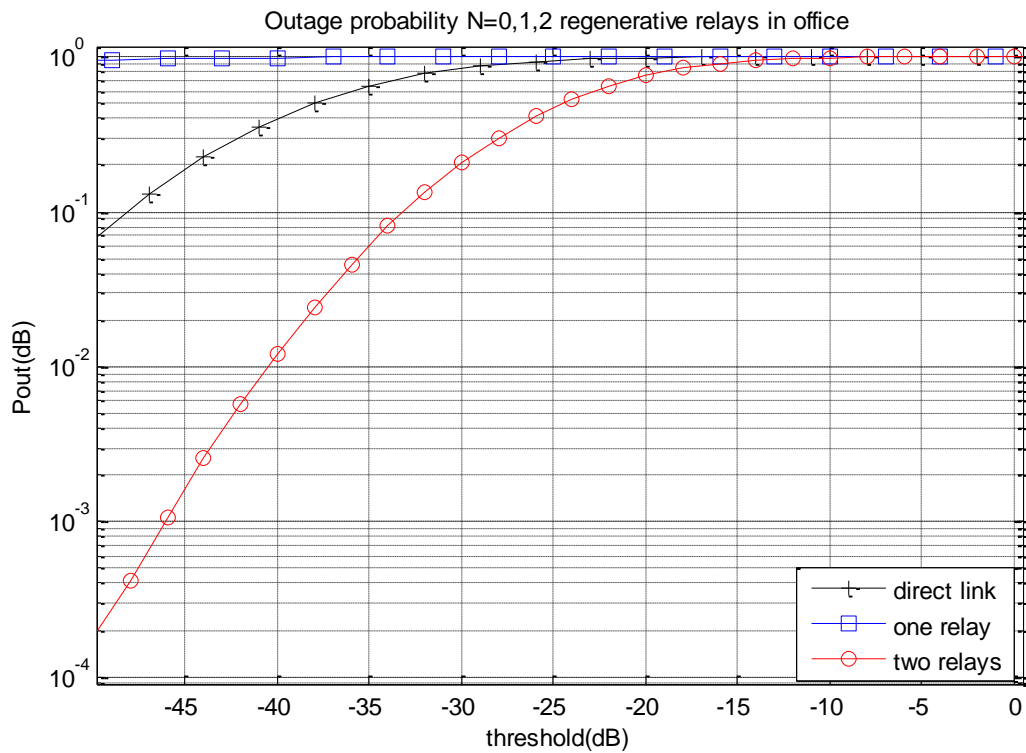
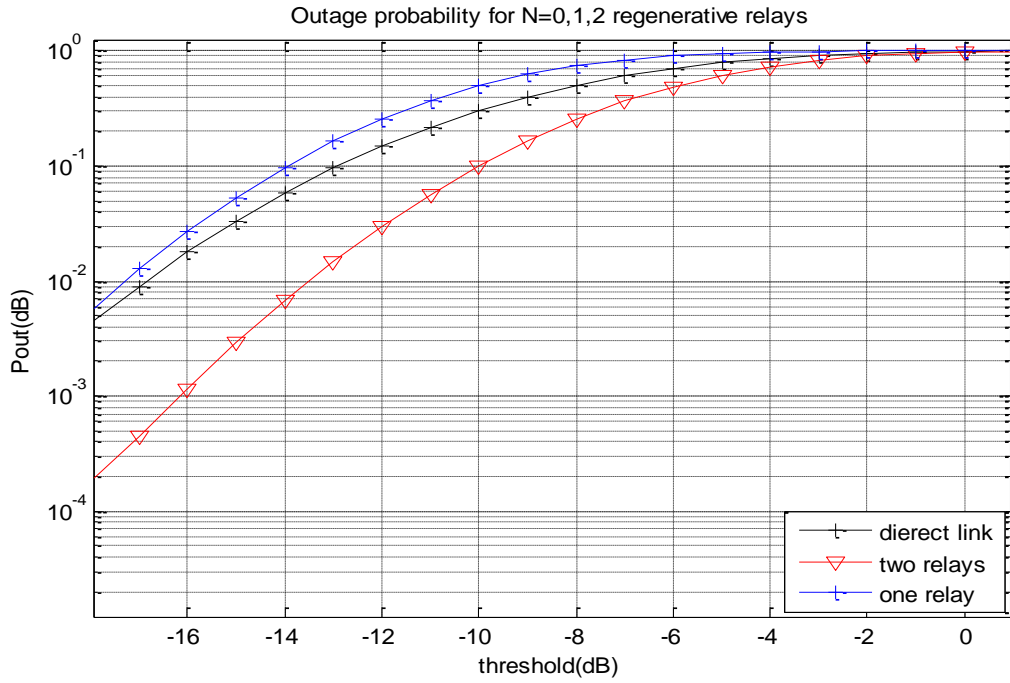
$$\rho_{ij} = \left(\frac{\Phi_T}{\Phi_{ij}} \right)^a \sqrt{\frac{L_i}{L_j}}$$

Οι τιμές των παραμέτρων για τους δύο διαφορετικούς χώρους που επιλέχθηκαν φαίνονται παρακάτω:

| Εργοστάσιο | |
|----------------------|---------------------------|
| Συχνότητα | f = 1.9GHz |
| Εκπεμπόμενη Ισχύς | $P_t = 0\text{dB}$ |
| Απόσταση | d = 10m |
| Απόσταση αναφοράς | $d_0 = 1\text{m}$ |
| Συντελεστής γ | $\gamma = 2$ |
| Τυπική Απόκλιση | $\sigma = 3.8 \text{ dB}$ |

| Γραφείο (σε διαφορετικούς ορόφους) | |
|---|-------------------------|
| Συχνότητα | f = 1.9GHz |
| Εκπεμπόμενη Ισχύς | $P_t = 0\text{dB}$ |
| Απόσταση | d = 10m |
| Απόσταση αναφοράς | $d_0 = 1\text{m}$ |
| Συντελεστής γ | $\gamma = 5$ |
| Τυπική Απόκλιση | $\sigma = 8 \text{ dB}$ |

Έτσι λοιπόν, προκύπτουν δύο διαφορετικά διαγράμματα όπου παρουσιάζεται η πιθανότητα αποκοπής ως προς την ισχύ κατωφλίου για $N = 0,1,2$ επαναλήπτες σε περιβάλλον εργοστασίου και σε περιβάλλον γραφείου:

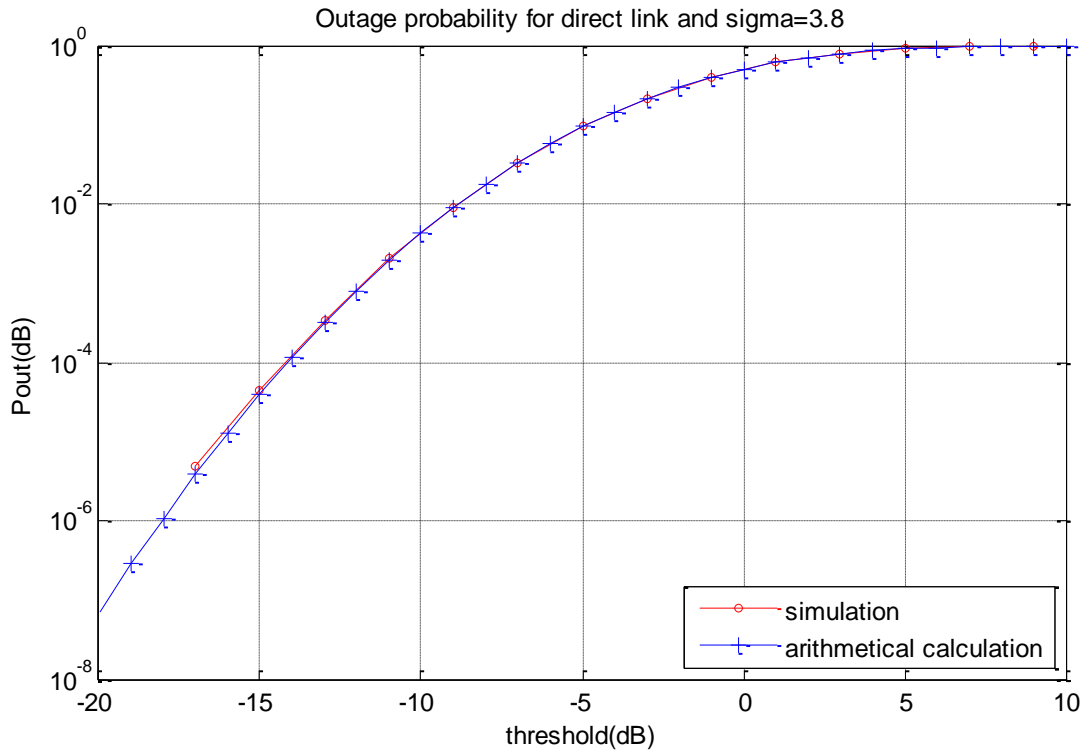


Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα, και στις δύο περιπτώσεις η βέλτιστη επιλογή ως προς την διαθεσιμότητα, για σταθερή διαθέσιμη συνολική ισχύ και κάτω από τις συγκεκριμένες συνθήκες διάδοσης, είναι η χρήση δύο επαναληπτών και έπειτα η απευθείας ζεύξη, ενώ η χρήση ενός μόνο επαναλήπτη αυξάνει αρκετά την πιθανότητα αποκοπής. Επιπλέον, οι συνθήκες διάδοσης στο περιβάλλον του εργοστασίου είναι πολύ καλύτερες ως προς την διαθεσιμότητα σε σχέση με αυτές στο γραφείο καθώς για ίδια τιμή SNR κατωφλίου η πιθανότητα αποκοπής για δίκτυο σε εργοστάσιο είναι μικρότερη από αυτή στο γραφείο.

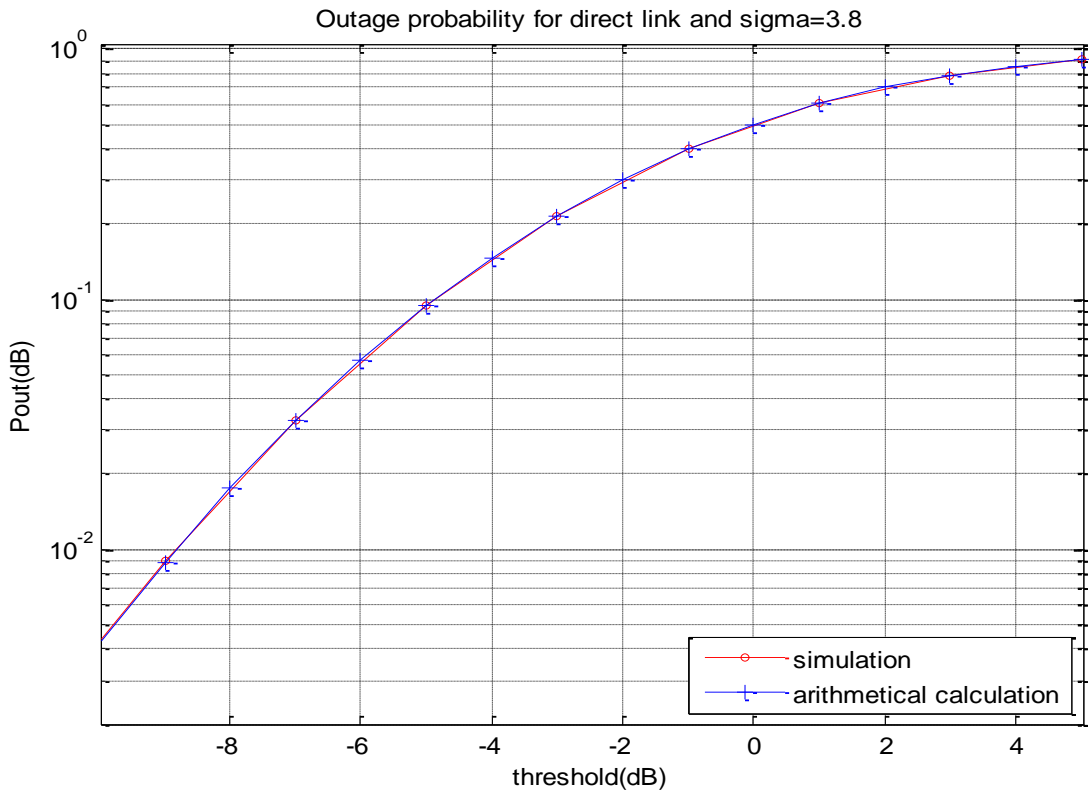
4.4 Προσομοίωση μοντέλου με χρήση λογαριθμοκανονικής κατανομής

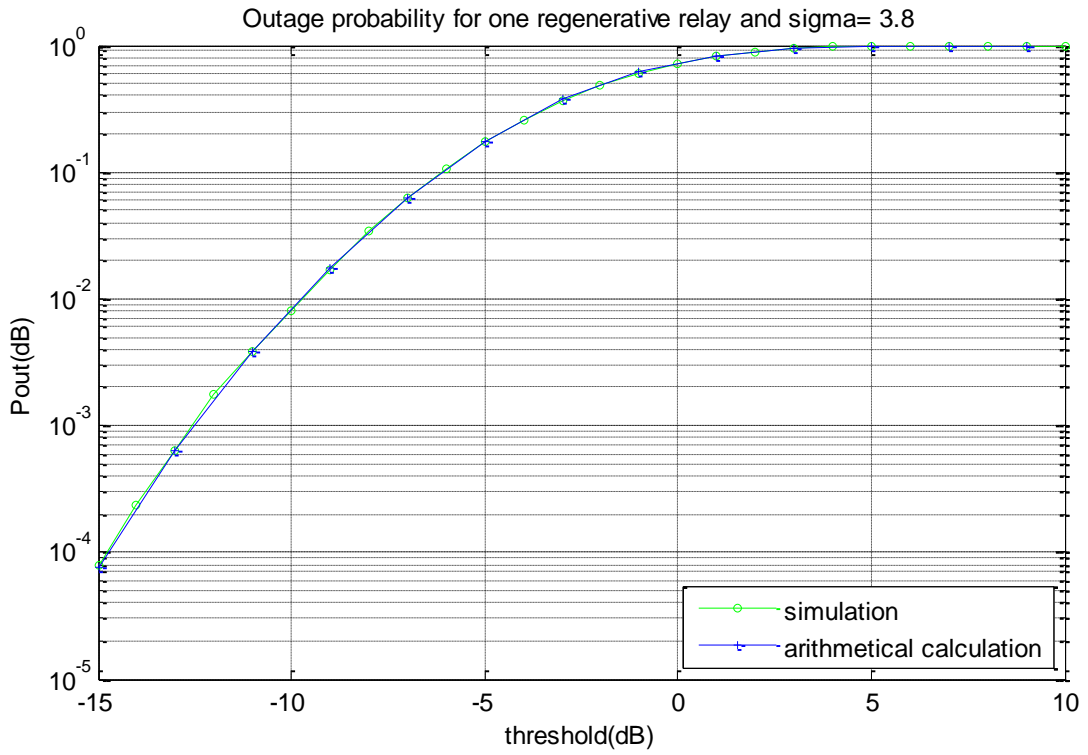
Στο τελικό στάδιο επαληθεύονται τα στοιχεία που προέκυψαν από τους αναλυτικούς υπολογισμούς με αυτά της προσομοίωσης. Συγκεκριμένα, δημιουργείται με τη βοήθεια της συνάρτησης *randn.m* του *MATLAB* ένας πολύ μεγάλο αριθμός τυχαίων δειγμάτων (10^7) που ανήκουν σε κανονική κατανομή και έπειτα μετατρέπεται η κατανομή σε λογαριθμοκανονική. Στη συνέχεια θέτονται οι ίδιες παράμετροι για τα τυχαία δείγματα με αυτά των παραμέτρων σκίασης των αριθμητικών υπολογισμών. Έτσι, η πιθανότητα αποκοπής προκύπτει ως το ποσοστό των ισοδύναμων σηματοθορυβικών λόγων που προκύπτουν από τα τυχαία δείγματα και που βρίσκονται κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου. Τέλος, εξετάζεται εάν συμπίπτουν τα διαγράμματα της πιθανότητας αποκοπής P_{out} που υπολογίστηκαν με την προσομοίωση σε σχέση με αυτά από τους αριθμητικούς υπολογισμούς, για ίδιο τύπο και αριθμό επαναληπτών, καθώς και για ίδιες παραμέτρους διαλείψεων.

Παρακάτω, λοιπόν, φαίνονται τα διαγράμματα των πιθανοτήτων αποκοπής για διαφορετικό αριθμό επαναληπτών που προκύπτουν από τους αναλυτικούς αλγορίθμους σε σύγκριση με αυτά που προκύπτουν από την προσομοίωση:

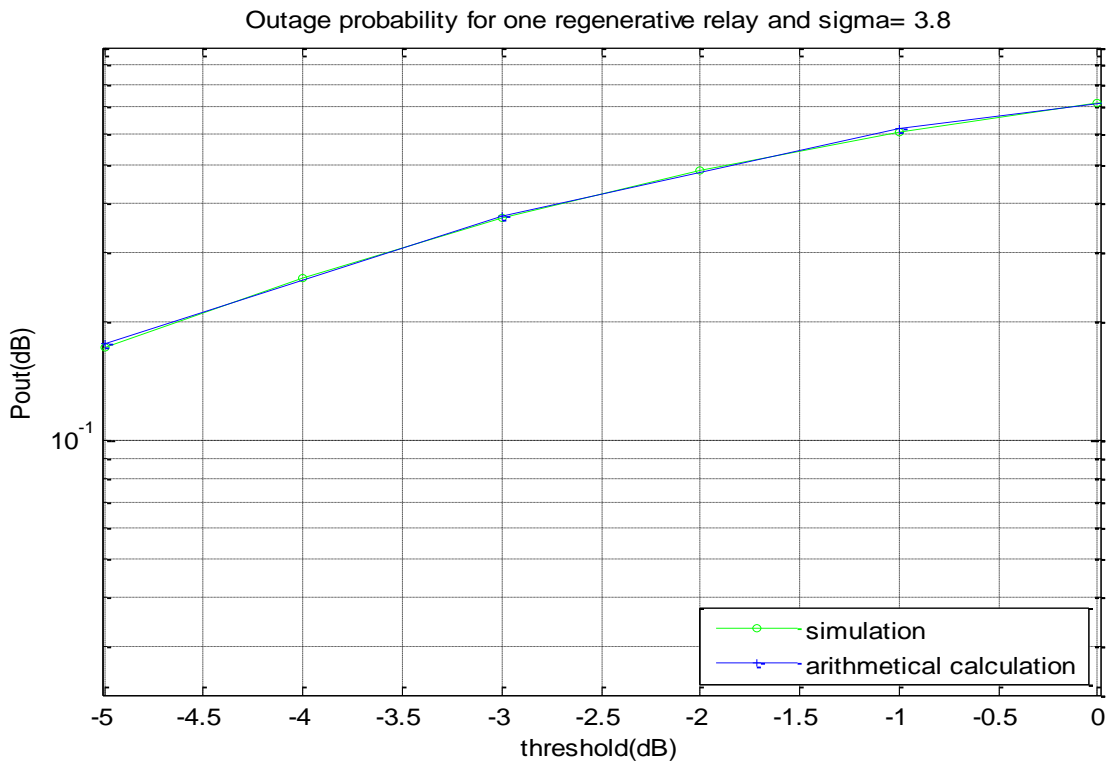


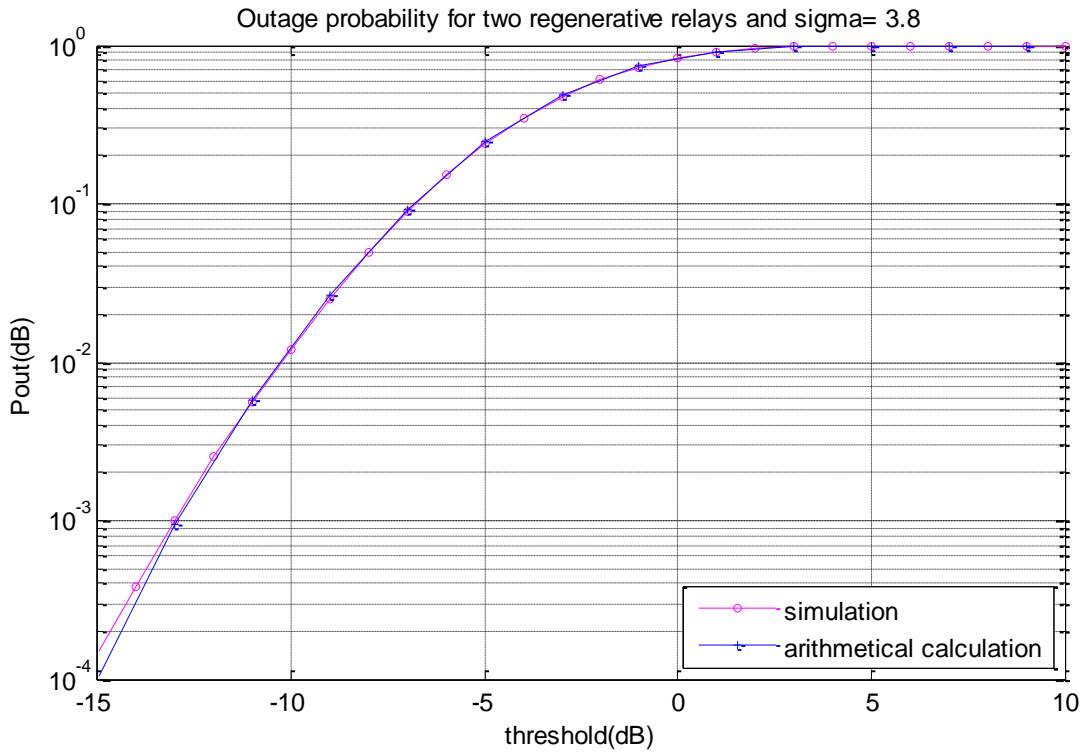
και με μεγαλύτερη ακρίβεια:



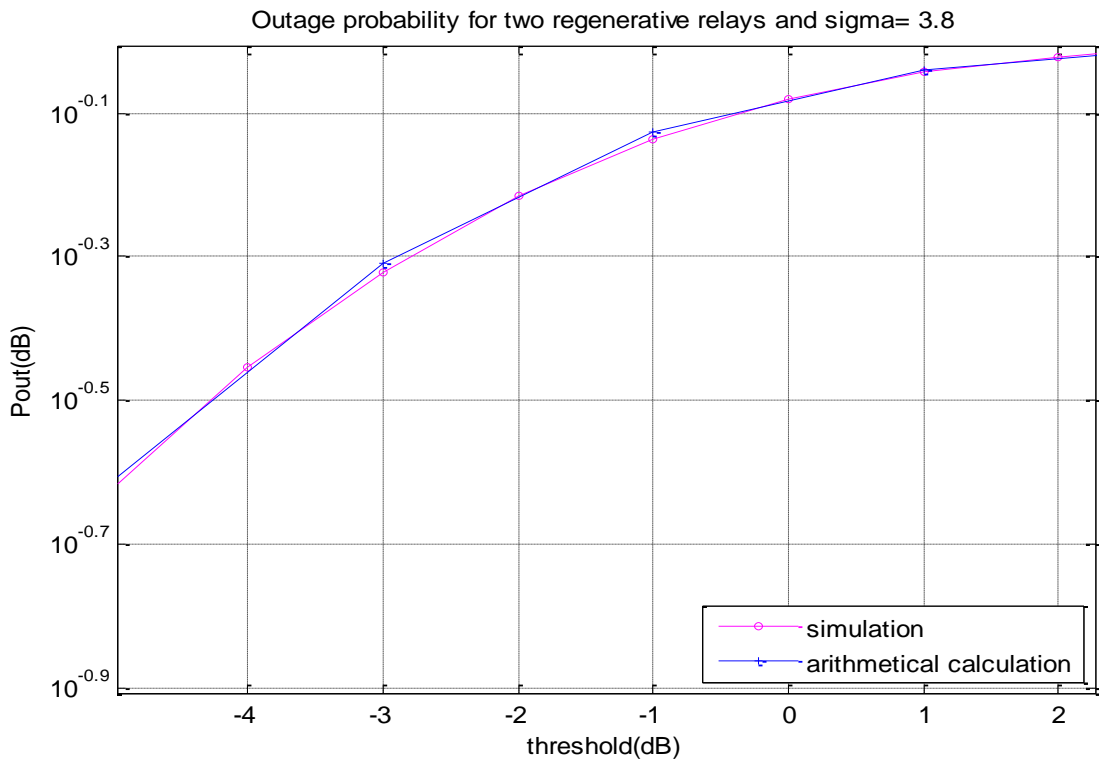


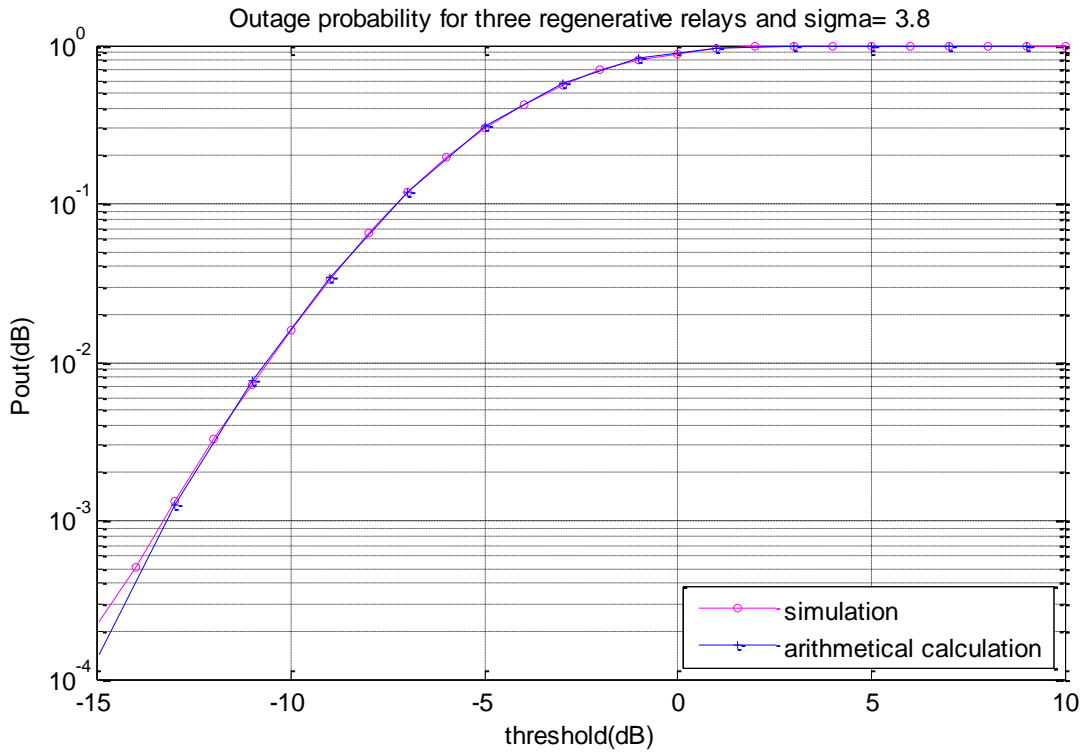
και με μεγαλύτερη ακρίβεια:



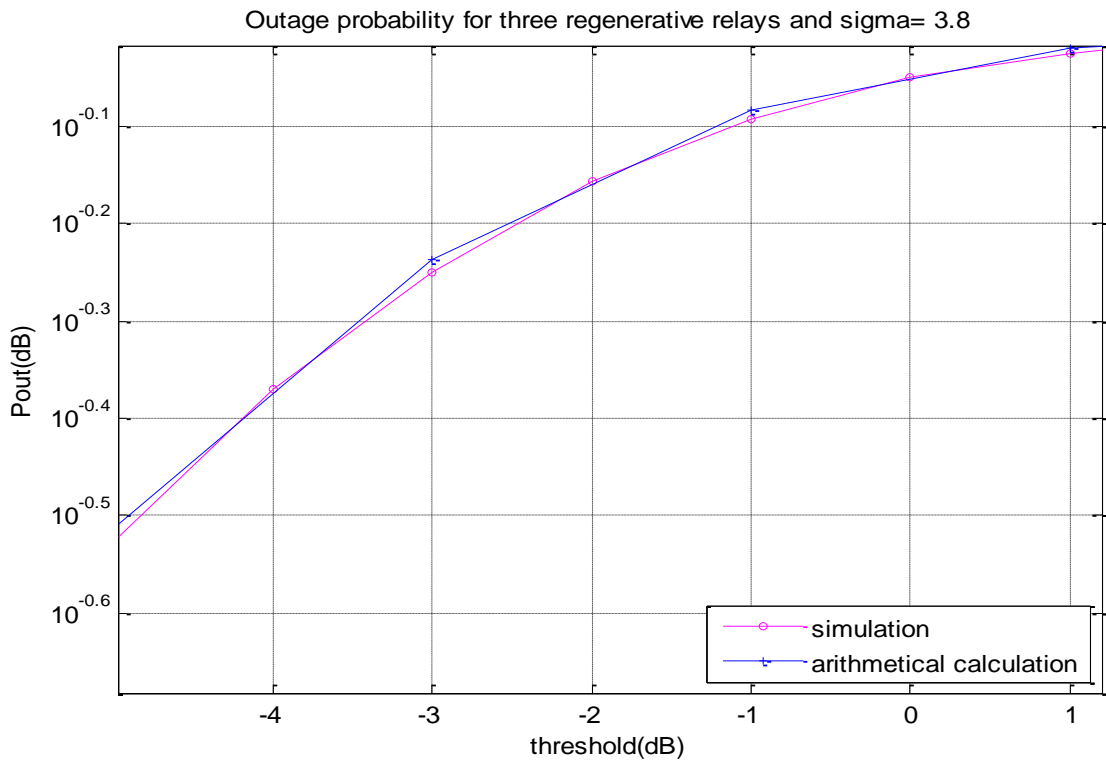


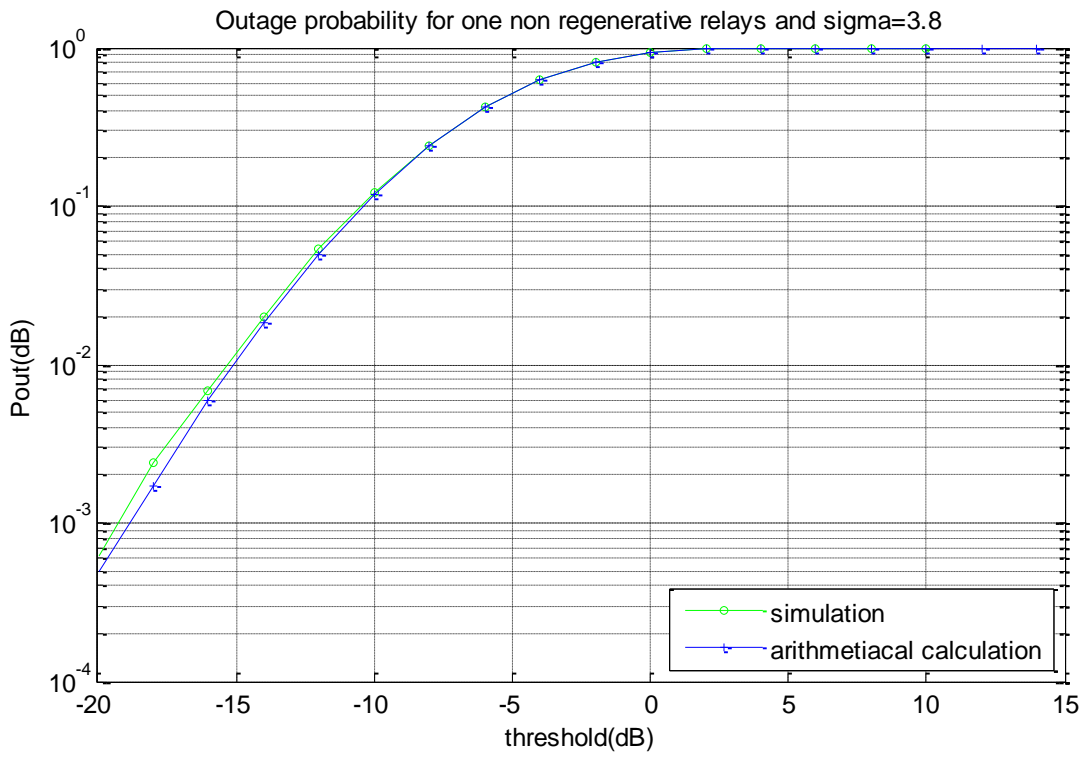
και με μεγαλύτερη ακρίβεια:



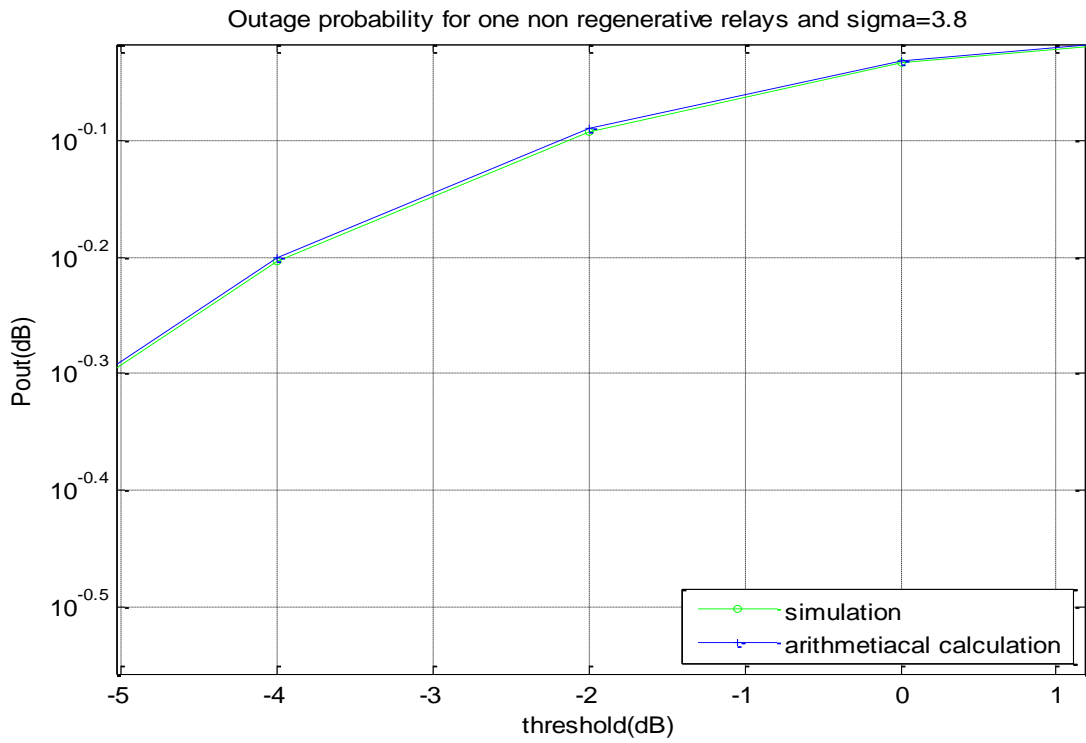


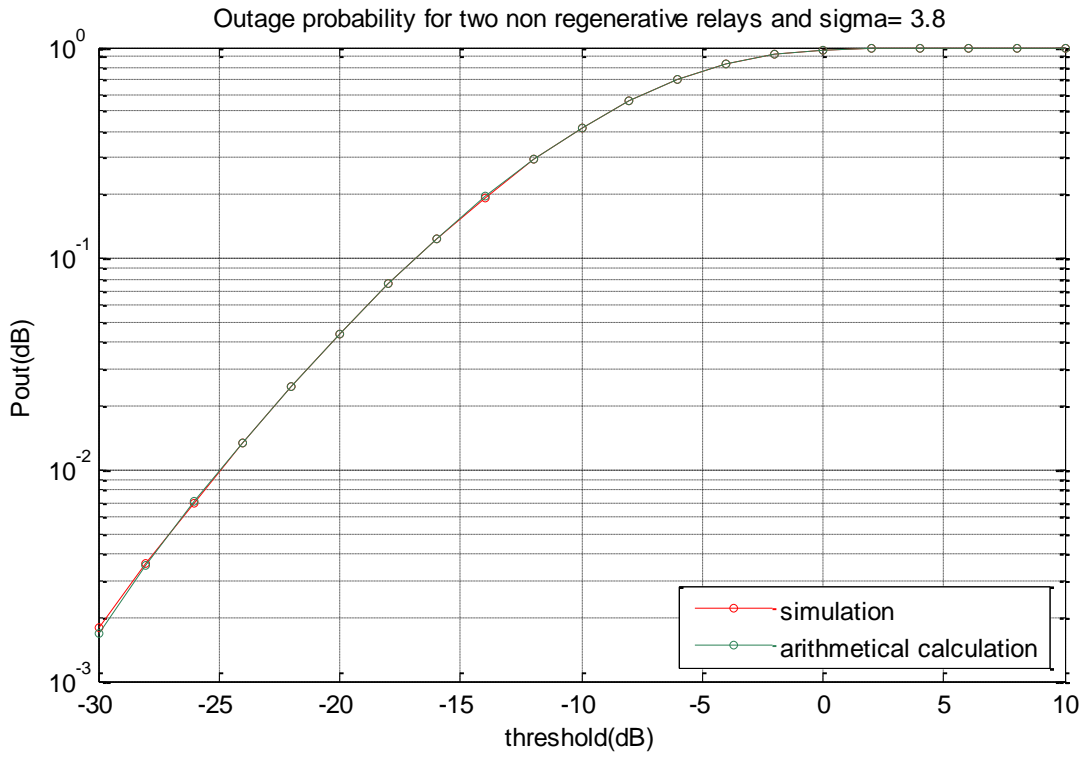
και με μεγαλύτερη ακρίβεια:



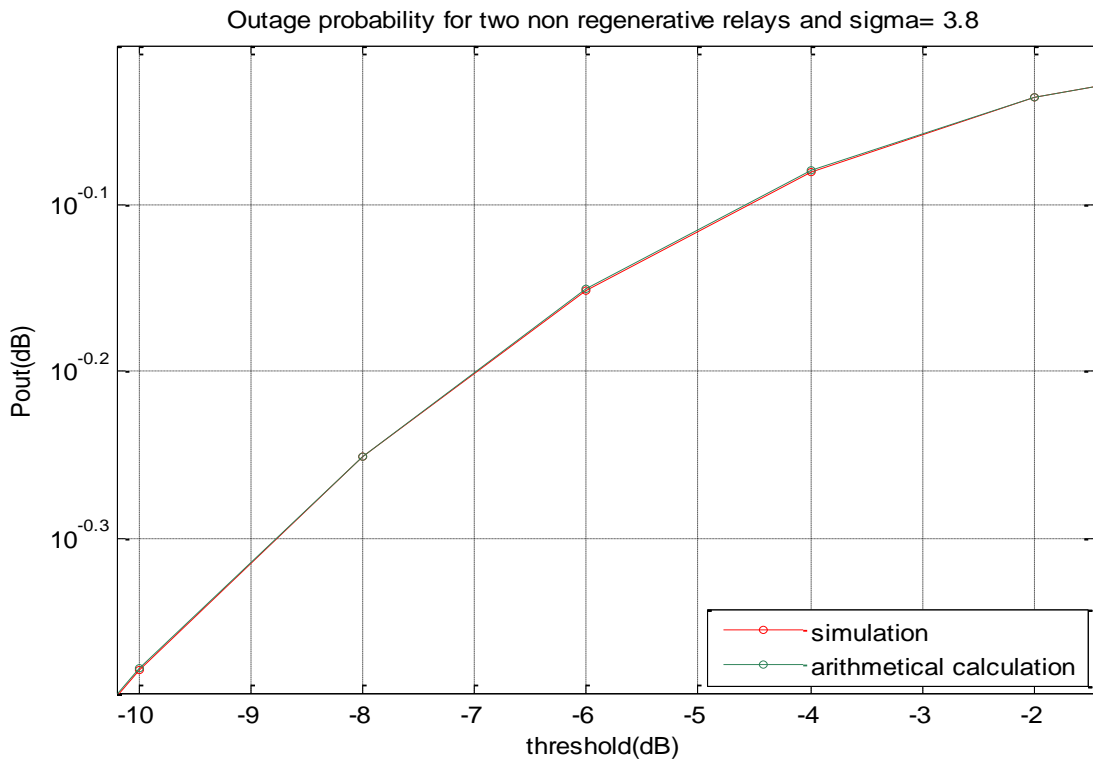


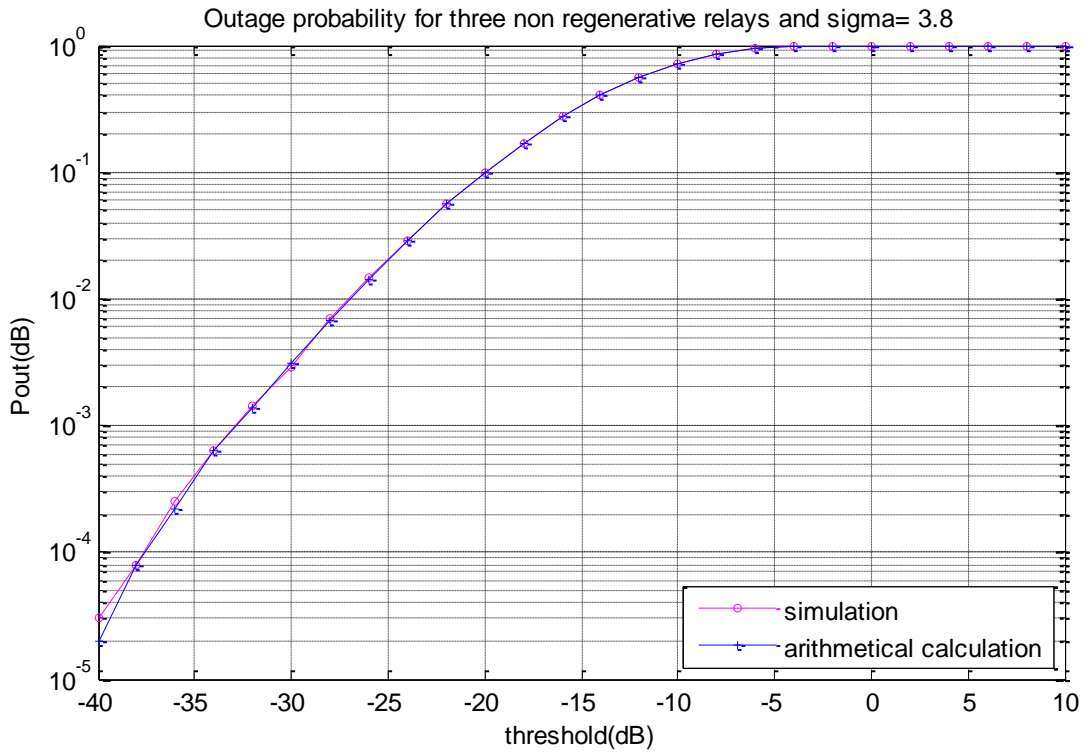
και με μεγαλύτερη ακρίβεια:



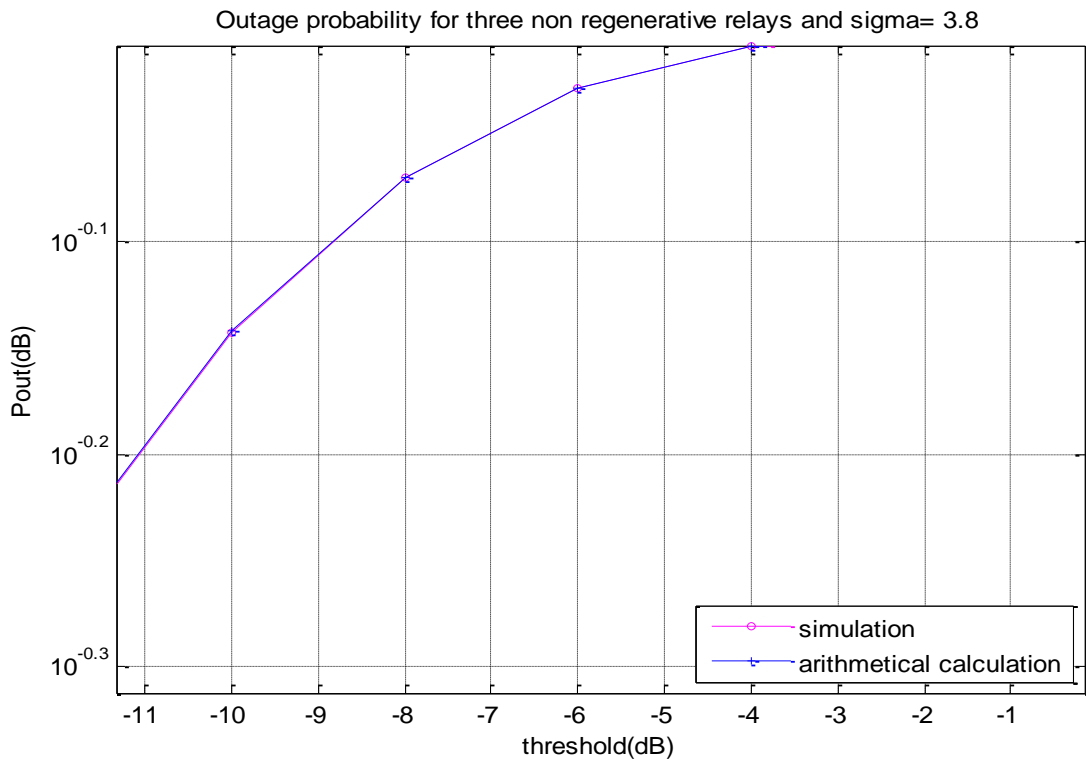


και με μεγαλύτερη ακρίβεια:





και με μεγαλύτερη ακρίβεια:



Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποτελούν τον καλύτερο τρόπο εκτίμησης της ζητούμενης πιθανότητας αποκοπής. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλυτικών υπολογισμών και αυτών της προσομοίωσης επαληθεύεται η ορθότητα των αριθμητικών αλγορίθμων, καθώς οι αποκλίσεις μεταξύ τους είναι αμελητέες.

4.5 Συμπεράσματα και περαιτέρω έρευνα

Η όλο και αυξανόμενη χρήση των πολυβηματικών δικτύων τα τελευταία χρόνια στον τομέα των Ασύρματων Δικτύων, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν, έχει κάνει επιτακτική την ανάγκη για εκτενέστερη και λεπτομερέστερη έρευνα πάνω στις αρχές οι οποίες τα διέπουν.

Στην διπλωματική αυτή εργασία, έγινε ο υπολογισμός της πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυα με πολλαπλούς, είτε αναγεννητικούς, είτε παθητικούς επαναλήπτες σε περιβάλλον σκίασης με συσχετισμένες διαλείψεις μεταξύ διαφορετικών κλάδων (*branches*) τους. Αρχικά, καταστρώθηκαν οι θεωρητικές εξισώσεις εύρεσης της πιθανότητας αποκοπής στα εν λόγω δίκτυα και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους αριθμητικούς υπολογισμούς σε περιβάλλον *MATLAB*. Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων αυτών υλοποιήθηκε κώδικας προσομοίωσης με χρήση λογαριθμοκανονικών κατανομών αποδεικνύοντας έτσι την ορθότητά τους. Τέλος, με χρήση κατάλληλου αλγορίθμου, έγινε ο υπολογισμός της πιθανότητας για πολυβηματικά δίκτυα, όπου εκτός από την σκίαση υπέφεραν και από απώλειες διαδρομής και που, επίσης, η διαθέσιμη ισχύς τους ήταν σταθερή, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η χρήση ενδιάμεσων κόμβων-επαναληπτών ανάμεσα στον πομπό και τον δέκτη μπορεί να αυξήσει ικανοποιητικά τη διαθεσιμότητα, κάτι το οποίο, για παράδειγμα, είναι πολύ σημαντικό για Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (*Wireless Sensor Networks- WSN*).

Τα πολυβηματικά δίκτυα προσφέρονται για πλήθος νέων ερευνητικών εργασιών όπως η εκτίμηση της πιθανότητας αποκοπής σε περιβάλλοντα διάδοσης όπου λειτουργούν συνδυαστικά διαφορετικοί μηχανισμοί διαλείψεων, καθώς επίσης και ο τομέας της κατανάλωσης ενέργειας, στα πλαίσια της προστασίας του περιβάλλοντος και της οικονομικότερης λειτουργίας των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

- [1] Wireless Communications, Andrea Goldsmith, Cambridge University Press, 2005.
- [2] Cooperation within the Small Cell: The indoor, correlated shadowing case, Vasileios K. Sakarellos, Dimitrios Skraparlis, Athanasios D. Panagopoulos

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΚΩΔΙΚΕΣ

Π1. Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής για έναν αναγεννητικό επαναλήπτη

```
for i = 1:length(gth_dB)
    gth= 10^(gth_dB(i)/10);
    u10=(reallog(gth) - m1 )/ s1;
    pout_dual_branch(i) = 1 - 0.5* integral_gauss_legendre (@(u1)
(1/(s1*sqrt(2*pi))) * exp(-((u1-m1).^2)/(2*s1^2))...
    .*erfc (((reallog(gth)-m2)/s2 -pn*u1)/ sqrt(2*(1-pn^2)))
    ...
    , u10 , upperlimit);
end;
```

Π2. Υπολογισμός πιθανότητας αποκοπής σε δίκτυο με N παθητικούς επαναλήπτες

```
%% Pout of correlated Lognormal non-regenerative relays N-branch
% inputs:
% gth           : threshold (linear)
% S_Np         : vector of variances in Np
% m_Np         : vector of means in Np
% C_1N         : correlation matrix
% N            : number of branches

function [poutage] = myNONREGbranches (gth, S_Np, m_Np, C_1N, N)

upperlimit = 10;
u_ltoil = 0;
count = 1;
lowerlimit = ((reallog(gth) - m_Np(1))/S_Np(1));
```

```

    poutage = 1 - integral_gauss_legendre(@(u_i) intfnc(u_i,
u_ltoil, gth, S_Np, m_Np, C_1N, N, count, lowerlimit), lowerlimit,
upperlimit);

    function [ans] = intfnc(u_i, u_ltoil, gth, S_Np, m_Np, C_1N, N,
count, lowerlimit)

        count = count + 1 ;

        for loopcounter = 1:length(u_i)

            u_ltoil (count-1) = u_i(loopcounter);
            if(count == N)
                % final integral
                C_1Nm1 = C_1N(1:(N-1), 1:(N-1));
                pN = C_1N(1:(N-1), N); %last row of C
                mN_prime = transpose( inv(C_1Nm1) * pN ) *
                    transpose(u_ltoil(1:N-1));
                sN_prime = sqrt (1- transpose(pN) * inv(C_1Nm1) * pN );
                temp1 = f_u1_uN(u_ltoil(1:(N-1)), C_1Nm1, N-1);
                uN_0 = ui_0 ( u_ltoil(1:N-1) , gth, S_Np, m_Np, N );
                %notice the u vector
                temp2 =0.5 * erfc((uN_0 - mN_prime) /
                    (sqrt(2)*sN_prime));
                ans(loopcounter) = temp1 .* temp2;
            else
                lwrlimit = ui_0 (u_ltoil , gth, S_Np, m_Np, count);
                ans(loopcounter) =
integral_gauss_legendre(@(u_i)intfnc(u_i, u_ltoil, gth, S_Np, m_Np,
C_1N, N, count, lwrlimit),lwrlimit,upperlimit);
            end
        end
    end
end

function [bnd] = ui_0(u, gth, S_Np, m_Np, i )

    pr(1:i-1) = exp ( u(1:i-1).* S_Np(1:i-1)+ m_Np(1:i-1) ) ;
    for k = 1: i -1
        p1 = exp (u(k+1:i-1).* S_Np(k+1:i-1+m_Np(k+1:i-1)) );
        p2 = exp (u(1:k-1).* S_Np(1:k-1)+ m_Np(1:k-1) )+1 ;
        SM(k) = prod(p1) * prod(p2);
    end
    if prod(pr) -gth * sum(SM) <= 0
        bnd = -10;
    else
        bnd = ( reallog((gth * prod(pr+1)) ./ ( prod(pr) -
gth* sum(SM))) - m_Np(i) ) ./ S_Np(i) ;
    end
end

function [fnct] = f_u1_uN(u, C_1N, N)

    fnct = ( 1 / sqrt( ( 2 * pi )^N * det(C_1N) ) ) * exp( -( u *
inv(C_1N) * transpose(u) ) / 2 );
end
end

```

