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

Μελέτη και Ανάλυση Επίδοσης Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων σε CDMA Ασύρματα Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σοφία Σ. Μητράκου

Μαρία Χ. Χορτάτου

Επιβλέπων : Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2008

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

Μελέτη και Ανάλυση Επίδοσης Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων σε CDMA Ασύρματα Συστήματα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σοφία Σ. Μητράκου

Μαρία Χ. Χορτάτου

Επιβλέπων : Ιωάννης Δ. Κανελλόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22η Οκτωβρίου 2008.

.....	.....	.....
Ι. Κανελλόπουλος	Φ. Κωνσταντίνου	Α. Παναγόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2008

.....

Σοφία Σ. Μητράκου

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

.....

Μαρία Χ. Χορτάτου

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

Copyright ©Σοφία Μητράκου, 2008
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Copyright © Μαρία Χορτάτου, 2008
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 τους συγγραφείς.

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

Περίληψη

Τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών εξελίσσονται ταχέως από δίκτυα που παρείχαν μόνο υπηρεσίες φωνής σε δίκτυα παροχής πολλαπλών υπηρεσιών. Σημαντική απαίτηση των δικτύων επόμενης γενιάς είναι η ικανότητα υποστήριξης πολλαπλών υπηρεσιών με ποικίλα χαρακτηριστικά κίνησης και διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service, QoS). Σε αρκετές μελέτες, μέχρι σήμερα, έχει γίνει ανάλυση βασιζόμενη στις fixed capacities, πράγμα εφαρμόσιμο στα FDMA και TDMA δίκτυα, καθώς πρόσφατα άρχισε η διεθνής βιβλιογραφία να ασχολείται με την επίδραση των soft capacity και soft handoff στην επίδοση του δικτύου.

Από τις σημαντικότερες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης για τα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς (2G-3G) ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα αποτελεί το CDMA, με ευρείες εφαρμογές σε πολλά τηλεπικοινωνιακά standards. Βασικό χαρακτηριστικό των CDMA συστημάτων είναι η χρήση των ηπίων διαπομπών μεταξύ των κυψελών. Το soft handoff, γενικά, αυξάνει τη χωρητικότητα ενός συστήματος, διότι αν η ποιότητα της ζεύξης μεταξύ του κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης δεν είναι ικανοποιητική, γίνεται εκμετάλλευση κάποιας άλλης ζεύξης του συστήματος από διαφορετικό σταθμό βάσης. Συνεπώς, ο κινητός χρήστης μπορεί εν τοιαύτη περιπτώσει να εκπέμπει με χαμηλότερη ισχύ υπό soft handoff κατάσταση.

Στην παρούσα ανάλυση, περιγράφεται λεπτομερώς η επίδραση του soft handoff και της κινητικότητας χρήστη στις παραμέτρους της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) στα DS-CDMA δίκτυα παροχής πολλαπλών υπηρεσιών (multi-service). Βασικό κίνητρο της παρούσας ανάλυσης είναι η προσομοίωση σε περιβάλλον Matlab υπάρχοντος αναλυτικού μοντέλου με υποστηριζόμενες υπηρεσίες φωνής και κίνησης πολυμέσων, λαμβάνοντας υπόψη τους όρους soft handoff και κινητικότητα χρήστη. Παράμετροι επίδοσης του δικτύου, όπως call blocking probability, call dropping probability, throughput και δικαιοσύνη (fairness) προσδιορίζονται με χρήση της ανάλυσης Αλυσίδων Markov.

Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματα δίκτυα, κυψελωτά δίκτυα, πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα ευθείας ακολουθίας (DS-CDMA), παρεμβολή, ήπια διαπομπή, ποιότητα υπηρεσίας (QoS), έλεγχος αποδοχής κλήσης (CAC), λόγος σήματος προς παρεμβολή (SIR), πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης, πιθανότητα απόρριψης κλήσης, throughput, δικαιοσύνη (fairness).

Abstract

Wireless communication networks are fast evolving from voice-only networks to multi-service networks. A key requirement for next generation networks is the ability to support a heterogeneous mix of services with varying traffic characteristics and several Quality of Service (QoS) requirements. Many papers assumed fixed capacities in their analysis which is applicable to FDMA and TDMA. Only recently have papers in the literature begun to analyze the effect of soft capacity and soft handoff on network performance.

Code Division Multiple Access (CDMA) has become one of the most important multiple access technologies in contemporary mobile cellular communication systems, as reflected by the fact that almost all 3G standards have been engineered based on CDMA technologies. A unique feature of CDMA systems is the use of soft handoff between cells. Soft handoff, in general, increases the system capacity because while the link between a mobile and one base station is poor, it might be better between the same mobile and some other base station. Hence, the user may transmit at a lower power in a soft handoff situation.

This thesis delineates the impact of soft handoff and user mobility on QoS parameters of multi-service DS-CDMA networks. The main incentive of this thesis is simulation of existing analytical model that includes soft handoff while supporting voice and multimedia traffic with user mobility taken into account. The simulation took place using Matlab software package. System performance parameters such as call blocking probability, call dropping probability, throughput and fairness are analytically determined using Markov Chain Analysis.

Keywords

Wireless networks, cellular networks, direct sequence code division multiple access (DS-CDMA), interference, soft handoff, quality of service (QoS), call admission control (CAC), signal-to-interference ratio (SIR), call blocking probability, call dropping probability throughput, fairness.

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον καθηγητή μας κ. Ιωάννη Κανελλόπουλο για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε για την ανάληψη της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τη συμπαράσταση και τη βοήθειά του.

Ακόμη, ευχαριστούμε ιδιαίτερα τους υποψήφιους Διδάκτορες κ. Δημήτρη Στρατογιάννη και κ. Γιώργο Τσιρόπουλο για την πολύ καλή συνεργασία και το χρόνο που αφιέρωσαν για το σχεδιασμό και την καθοδήγηση σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Σοφία Μητράκου
Μαρία Χορτάτου

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους ήταν κοντά μου, φίλους και συγγενείς, για τη στήριξή τους κατά την περίοδο συγγραφής της διπλωματικής εργασίας.

Σοφία Μητράκου

Ευχαριστώ την κόρη μου Μαρία-Μελίνα, που μπήκε στη ζωή μου ξαφνικά και τη μάγεψε, και τους γονείς μου, Χαράλαμπο και Άννα, που είναι δίπλα μου σε κάθε βήμα μου και με στηρίζουν. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την πολύ καλή μου φίλη Σοφία Μητράκου για την εξαίρετη συνεργασία και το ήθος της.

Μαρία Χορτάτου

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη *3*

Abstract *5*

Ευχαριστίες *7*

Πίνακας περιεχομένων *9*

Πίνακας σχημάτων *12*

Πίνακας πινάκων *14*

Εισαγωγή *15*

Κεφάλαιο 1: Κινητές Επικοινωνίες *17*

1.1 Ασύρματα Δίκτυα *17*

1.1.1 Bluetooth **17**

1.1.2 WiFi **18**

1.1.3 WiMax **23**

1.2 Κυψελωτά Δίκτυα Επικοινωνιών *25*

1.2.1 Βασικές αρχές των κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών **26**

1.2.1.1 Κυψελωτή δομή – Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων 26

1.2.1.2 Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα 27

1.2.1.3 Φασματική απόδοση 31

1.2.2 Αρχιτεκτονική κυψελωτών συστημάτων **31**

1.2.2.1 Ραδιοκάλυψη 32

1.2.2.2 Υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών 35

1.2.2.3 Λειτουργική αρχιτεκτονική 36

1.2.2.4 Φυσική αρχιτεκτονική 38

1.2.3 Κυψελωτά δίκτυα CDMA **39**

1.3 Πολλαπλή Πρόσβαση *41*

1.3.1 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA) **42**

1.3.2 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) **43**

1.3.3 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA) **44**

1.3.3.1 Βασικές αρχές του CDMA 44

1.3.3.1.1 Δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης 48

1.3.3.2 CDMA κώδικες και οι ιδιότητές τους 58

1.3.3.3 CDMA Ευθείας Ακολουθίας (DS-CDMA) 63

1.3.3.4 CDMA με μεταπήδηση συχνότητας (FH-CDMA) 87

1.3.3.5 CDMA με μεταπήδηση χρόνου (TH-CDMA) 88

1.3.3.6 Εξάπλωση φάσματος ή χρόνου; 88

1.3.3.6 Τεχνολογίες ασύρματης διεπαφής για τα συστήματα τρίτης γενιάς 89

Κεφάλαιο 2: Το Ασύρματο Περιβάλλον Στις Κινητές Τηλεπικοινωνίες 91

2.1 Γενικές αρχές για τη διάδοση 91

2.1.1 Απώλειες Διαδρομής 94

2.1.1.1 Διάδοση στον Ελεύθερο Χώρο 94

2.1.1.2 Διάδοση μη οπτικής επαφής 95

2.1.1.3 Σκίαση 97

2.1.1.4 Καθορισμός περιοχής κάλυψης 98

2.1.2 Διαλείψεις 99

2.1.2.1 Το φαινόμενο των πολλαπλών διοδεύσεων 100

2.1.3 Παρεμβολές σε περιβάλλον ασύρματων συστημάτων 101

2.2 Παρεμβολές στο ασύρματο περιβάλλον των συστημάτων κινητών επικοινωνιών 102

2.2.1 Περιβάλλον με θόρυβο και παρεμβολές 102

2.2.1.1 Ομοδιαυλική παρεμβολή 103

2.2.1.2 Παρεμβολή γειτονικών διαύλων 105

2.2.2 Μοντέλα κινητικότητας 106

2.2.2.1 Τυχαίο Μοντέλο 107

2.3 Μηχανισμός Διαπομπής 107

2.3.1 Η Διαδικασία διαπομπής 108

2.3.1.1 Παράμετροι επίδοσης της διαπομπής 109

2.3.1.2 Προετοιμασία διαπομπής 110

2.3.1.3 Κριτήρια έναρξης διαπομπής 110

2.4 Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) 111

2.4.1 QoS στα κυψελωτά συστήματα 111

2.4.2 Ανάλυση επίδοσης τελικού χρήστη 113

Κεφάλαιο 3: Διαχείριση Επικοινωνίας Ασύρματων Συστημάτων 115

3.1 Αρχιτεκτονική ασύρματων συστημάτων 115

3.1.1 Αρχές Διαστρωμάτωσης OSI 115

3.1.2 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα 115

3.1.2.1 Αρχιτεκτονική WLAN 115

3.1.2.2 Πρότυπο IEEE για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα 116

3.2 Έλεγχος Αποδοχής Κλήσης (Call Admission Control, CAC) 118

3.2.1 CAC στα ενσύρματα δίκτυα 118

3.2.2 CAC στα ασύρματα δίκτυα 119
3.2.2.1 Γενικά 119
3.2.2.2 Κύριοι λόγοι χρήσης των CAC schemes 121
3.2.2.3 Κατηγορίες CAC σχημάτων 123
3.2.3.3 Έλεγχος handoff failure probability 129
3.2.4 Προκύπτουσες τάσεις και μελλοντικά θέματα έρευνας 130
3.3 Ανάλυση της Επίδοσης του Συστήματος 131
3.3.1 Γενικά 131
3.3.2 Τοπολογία Κυψελών Δικτύου 132
3.3.3 Διαδικασία διαπομπής 134
3.3.4 Μοντέλο κίνησης (Traffic model , random movement) 134
3.3.5 Ανάλυση Παρεμβολών 136
3.3.5.1 Μοντέλο Διάδοσης 136
3.3.5.2 Μοντέλο Παρεμβολών 138
3.3.6 Ανάλυση σχήματος Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης 143
3.3.6.1 Πιθανότητα Αποκλεισμού Κλήσης (Call Blocking Probability) 147
3.3.6.2 Πιθανότητα Απόρριψης Κλήσης (Call Dropping Probability) 151

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα της Επίδοσης του Συστήματος 153
4.1 Complete Sharing (CS) 156
4.1.1 Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης για την υπηρεσία φωνής με CS 156
4.1.2 Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης για την υπηρεσία multimedia traffic load με CS 157
4.1.3 Πιθανότητα αποκλεισμού νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή με CS 158
4.2 Partial Sharing (PS) 159
4.2.1 Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης για την υπηρεσία φωνής με PS 159
4.2.2 Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης για την υπηρεσία multimedia traffic load με PS 160
4.2.3 Πιθανότητα αποκλεισμού νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή με PS 161
4.3 Σύγκριση Πολιτικών CS και PS 162
4.3.1 Δικαιοσύνη μεταξύ των κλάσεων υπηρεσιών (Fairness) 162
4.3.2 Throughput 163
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα 165
Βιβλιογραφία 167

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1.1. Διάγραμμα ρυθμού μετάβασης καταστάσεων για το μοντέλο Erlang B. **29**

Σχήμα 1.2. Διάγραμμα ρυθμού μετάβασης καταστάσεων για το μοντέλο Erlang C. **30**

Σχήμα 1.3. Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς συστήματος κινητών επικοινωνιών. **37**

Σχήμα 1.4. Φυσική αρχιτεκτονική δικτύου κινητών επικοινωνιών. **38**

Σχήμα 1.5. Φυσική αρχιτεκτονική δικτύου του UMTS. **39**

Σχήμα 1.6. Δέντρο CDMA τεχνολογιών. **46**

Σχήμα 1.7. Ένα DS-CDMA μοντέλο, που εξυπηρετεί K χρήστες και θεωρούνται μόνο τα κανάλια άνω ζεύξης. **48**

Σχήμα 1.8. RAKE δέκτης με L κλάδους. **53**

Σχήμα 1.9. Μοντέλο DS-CDMA συστήματος με K χρήστες. **54**

Σχήμα 1.10. Ένας CDMA δέκτης. **54**

Σχήμα 1.11. Κατηγορίες των συναρτήσεων συσχέτισης CDMA κωδίκων. **59**

Σχήμα 1.12. Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας τυχαίας δυαδικής ακολουθίας. **60**

Σχήμα 1.13. Block-διάγραμμα για γεννήτρια PN ακολουθιών. **61**

Σχήμα 1.14 . Απεικόνιση ενός ευθείας ακολουθίας σήματος εξάπλωσης. **65**

Σχήμα 1.15. BPSK DS-SS πομπός. **68**

Σχήμα 1.16. BPSK DS-SS δέκτης. **69**

Σχήμα 1.17. Απεικόνιση των κυματομορφών στο πεδίο του χρόνου ενός BPSK DS-SS πομπού και δέκτη. Οι κυματομορφές αντιστοιχούν στα σημεία παρατήρησης (1) και (3) του σχήματος 1.15 και (4) και (6) του Σχήματος 1.16. **70**

Σχήμα 1.18. Απεικόνιση της PSD για ένα BPSK DS-SS σήμα. Ο chip rate του συστήματος είναι 5Mcps και το εύρος ζώνης (από μηδενισμό σε μηδενισμό) 10MHz. **72**

Σχήμα 1.19. (α) PSD συναρτήσεις για την ακολουθία εξάπλωσης και το σήμα πληροφορίας, (β) PSD συναρτήσεις για το BPSK spreading modulated σήμα, (γ) PSD συνάρτηση για το φέρον σήμα μετά το de-spreading ($r_1(t)$ στον DS-SS δέκτη). **73**

Σχήμα 1.20. Ορθογωνιότητα των $\sin(\omega_c t)$ και $\cos(\omega_c t)$ φερόντων στους χώρους in-phase και quadrature στην QPSK ψηφιακή διαμόρφωση. **76**

Σχήμα 1.21. Ένας QPSK πομπός. **77**

Σχήμα 1.22. Ένας QPSK δέκτης. **77**

Σχήμα 1.23. Κυματομορφές σημάτων σε QPSK DS-SS δέκτη. **78**

Σχήμα 1.24. Διαχωρισμός της μιας ακολουθίας σε δύο ακολουθίες εξάπλωσης για τη χρήση τους σε ένα QPSK DS-SS σύστημα. **81**

Σχήμα 1.25. Μια εναλλακτική δομή ενός QPSK DS-SS πομπού με διπλάσιο ρυθμό μετάδοσης. **82**

Σχήμα 1.26. Μια εναλλακτική δομή ενός QPSK DS-SS δέκτη με διπλάσιο ρυθμό μετάδοσης. **82**

Σχήμα 1.27. (α) DS-CDMA δορυφορικό σύστημα, (β) DS-CDMA κινητό κυψελωτό σύστημα. **83**

Σχήμα 1.28. Σύγκριση των τεχνικών εξάπλωσης φάσματος/ χρόνου. **89**

Σχήμα 2.1. Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί διάδοσης, ανάκλαση (R), περίθλαση (D), σκέδαση (S). **92**

Σχήμα 2.2. Στάθμη λαμβανόμενου σήματος συναρτήσει της απόστασης πομπού-δέκτη. ... **93**

Σχήμα 2.3. Στάθμη λαμβανόμενου σήματος σε κινητό τερματικό που ταξιδεύει με ταχύτητα 50km/h **93**

Σχήμα 3.1. Μοντέλο Radio Resource Management. **120**

Σχήμα 3.2. Τοπολογία κυψέλης. **133**

Σχήμα 3.3. Διαδικασία διαπομπής. **134**

Σχήμα 3.4. Αφίξεις κλήσεων από διαπομπή α) από γειτονικές κυψέλες στην handoff region, και β) η regional transition που αποτελεί την περίπτωση όπου το κινητό τερματικό διασχίζει το σύνορο των δυο περιοχών. **136**

Σχήμα 3.5. Σύγκριση λογαριθμοκανονικής κατανομής με εμπειρικές μετρήσεις της λαμβανόμενης ισχύος σε σταθμό βάσης. **137**

Σχήμα 3.6. Κινητό τερματικό σε soft connection με δυο σταθμούς βάσης. **142**

Σχήμα 3.7. Αλυσίδες Markov. **145**

Σχήμα 4.1. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την υπηρεσία φωνής με CS **156**

Σχήμα 4.2. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την υπηρεσία πολυμέσων με CS **157**

Σχήμα 4.3. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων με CS **158**

Σχήμα 4.4. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την υπηρεσία φωνής με PS..... **159**

Σχήμα 4.5. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την υπηρεσία πολυμέσων με PS **160**

Σχήμα 4.6. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων με PS **161**

Σχήμα 4.7. Δικαιοσύνη μεταξύ CS και PS..... **162**

Σχήμα 4.8. Σύγκριση του Throughput (%calls/s) για CS και PS **163**

Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1.1. WLAN πρότυπα. ***19***

Πίνακας 1.2. Πρωταρχικά πολυώνυμα (mod2) τάξης 1 έως 5. .....***63***

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά και σύγκριση σημαντικότερων παραλλαγών του 802.11***. .. 118***

Πίνακας 3.2. Επιλογές σχεδιασμού των CAC σχημάτων. ***..... 124***

Πίνακας 3.3. Προσεγγίσεις CAC για έλεγχο ποιότητας σήματος. ***..... 125***

Πίνακας 3.4. Προσεγγίσεις CAC για έλεγχο της handoff failure probability***. 130***

Πίνακας 4.1. Παράμετροι συστήματος. ***..... 155***

Εισαγωγή

Η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (code division multiple access, CDMA) αποτελεί από τις πιο υποσχόμενες νέες τεχνολογίες για τα κυψελωτά δίκτυα τρίτης γενιάς (3G). Παρέχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά στο σύστημα, όπως soft capacity, soft handoff και μετριασμός των ταχέων διαλείψεων (fast fading) που προκαλούν οι πολλαπλές διαδόσεις του ίδιου σήματος. Λόγω της ιδιότητας επαναχρησιμοποίησης συχνότητας που παρέχουν τα CDMA συστήματα, παρέχεται και στα κινητά τερματικά η ιδιότητα των ηπίων διαπομπών μεταξύ των κυψελών. Οι ήπιες διαπομπές, ή αλλιώς soft handoff, αποτελούν μια τεχνική όπου τα κινητά τερματικά που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης μπορούν να εκπέμπουν και να λαμβάνουν ταυτόχρονα από δύο ή και παραπάνω σταθμούς βάσης. Σε παραδοσιακά σχήματα διαπομπών απαιτείται η εκ των προτέρων διακοπή της υπάρχουσας επικοινωνίας πριν την εγκατάσταση νέας σύνδεσης με το νέο σταθμό βάσης. Στην κάτω ζεύξη, το κινητό τερματικό συνδυάζει τα λαμβανόμενα σήματα από τους σταθμούς βάσης, πράγμα που οδηγεί σε βελτίωση της επίδοσης, διότι τα λαμβανόμενα σήματα συνδυάζονται στον δέκτη κατά τρόπο ώστε το τελικό σήμα να λαμβάνεται ενισχυμένο. Στην άνω ζεύξη, οι σταθμοί βάσης αποκωδικοποιούν ανεξάρτητα έκαστο λαμβανόμενο σήμα, έπειτα στέλνουν την ληφθείσα πληροφορία στο mobile switching center, το οποίο ευνοεί το σταθμό βάσης που λαμβάνει ισχυρότερα το σήμα. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η εφαρμογή σε περιβάλλον Matlab των αναλυτικών τύπων για την συνολική παρεμβολή σε μια κυψέλη ενός κυψελωτού δικτύου, που χρησιμοποιεί σχήμα πολλαπλής πρόσβασης Ευθείας Ακολουθίας Διαίρεσης Κώδικα (Direct Sequence Code Division Multiple Access, DS/CDMA), και ο σχολιασμός των εξαγόμενων συμπερασμάτων.

Η παρούσα μελέτη δομείται ως ακολούθως. Στο πρώτο κεφάλαιο, αναλύονται τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών με τις κυριότερες εφαρμογές αυτών, τα κυψελωτά συστήματα με έμφαση στα CDMA κυψελωτά δίκτυα, και η τάση που επικρατεί με την εξέλιξη της τεχνολογίας για ενοποίηση των ασύρματων δικτύων υπολογιστών με τις κινητές επικοινωνίες. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται το ασύρματο περιβάλλον στις κινητές επικοινωνίες υπό την έννοια του διαύλου και τις παραμέτρους επίδοσης αυτού. Έμφαση δίδεται στις παρεμβολές και το μηχανισμό διαπομπής που είναι μείζονος σημασίας για την εν λόγω ανάλυση. Στην τρίτη κατά σειρά ενότητα, συζητείται το μοντέλο διάδοσης και παρεμβολών του συστήματος, ο έλεγχος αποδοχής κλήσης με τη λογική του λόγου σήματος προς παρεμβολή και οι έννοιες των πιθανοτήτων αποκλεισμού και απόρριψης κλήσης. Δύο πολιτικές ελέγχου αποδοχής κλήσης προτείνονται, ο μερικός (Partial Sharing) και ο πλήρης (Complete Sharing) καταμερισμός του εύρους ζώνης. Στο τέταρτο και το πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της ανάλυσης και τα εξαγόμενα συμπεράσματα, αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 1: Κινητές Επικοινωνίες

1.1 Ασύρματα Δίκτυα

Ένα ασύρματο δίκτυο είναι ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, συνήθως τηλεφωνικό ή υπολογιστικό, το οποίο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα που εξαρτάται κάθε φορά από τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που απαιτείται να υποστηρίζει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία έχει ως μέσο μετάδοσης τη γήινη ατμόσφαιρα ή το διάστημα, σε αντίθεση με την ενσύρματη επικοινωνία όπου το μέσο μετάδοσης είναι κάποιος τύπος καλωδίου. Σε παλαιότερες εποχές τα τηλεφωνικά δίκτυα ήταν αναλογικά, αλλά σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα βασίζονται σε ψηφιακή τεχνολογία και επομένως, κατά μια έννοια, είναι ουσιαστικά δίκτυα υπολογιστών.

Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών τα τελευταία χρόνια έχει δείξει ότι είναι πολύ δύσκολο ένα σύστημα να μπορέσει να ικανοποιήσει όλες τις ανάγκες του χρήστη και να προσαρμοστεί στις ιδιαιτερότητες κάθε περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό, τα ασύρματα δίκτυα τις επόμενες γενιές θα αποτελούνται από την ενοποίηση ενός συνόλου τεχνολογιών, κάθε μια από τις οποίες θα εξειδικεύεται σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά οι τρεις τεχνολογίες οι οποίες πρωταγωνιστούν και αναμένεται να πρωταγωνιστήσουν και στο άμεσο μέλλον. Οι τεχνολογίες αυτές είναι το Bluetooth, το WiFi και το WiMax, οι οποίες απευθύνονται σε προσωπικά (διασύνδεση συστήματος), τοπικά (ασύρματα Local Area Networks, LANs) και μητροπολιτικά (ασύρματα Wide Area Networks, WANs) περιβάλλοντα αντίστοιχα, [2], [3], [6].

1.1.1 Bluetooth

Το Bluetooth αναπτύχθηκε αρχικά από την Ericsson ως αντικατάσταση των καλωδίων μεταξύ φορητών υπολογιστών και κινητών τηλεφωνικών συσκευών για την πρόσβαση στο διαδίκτυο. Η ειδική ομάδα ενδιαφέροντος Bluetooth (Bluetooth Special Interests Group) είναι μια βιομηχανική κοινοπραξία που συγκροτήθηκε στη συνέχεια από εταιρίες του χώρου για να εξελιχθεί το σύστημα σε διεθνές πρότυπο. Λειτουργεί στο «αδέσμευτο» φάσμα συχνοτήτων των 2,4 GHz (όπως και το Wi-Fi), ώστε οι συσκευές που το ενσωματώνουν να μπορούν να λειτουργήσουν ελεύθερα σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη, ενώ επιτυγχάνει ταχύτητες έως 1 Mbps σε απόσταση 10-15m, ανάλογα με την ισχύ του πομποδέκτη.

Οι συσκευές που διασυνδέονται μέσω του συστήματος διαμορφώνουν μικρά δίκτυα που αναφέρονται ως piconets. Κάθε σταθμός σε ένα piconet ορίζεται ως master (αρχηγός) και αναλαμβάνει το ρόλο του συντονιστή της μετάδοσης. Μεταδόσεις επιτρέπονται μόνο μεταξύ του master και ενός ή περισσοτέρων κόμβων του δικτύου, οι οποίοι με τη σειρά τους ονομάζονται slaves (σκλάβοι). Ένας slave μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τον master μετά από δική του άδεια. Ένα piconet μπορεί να περιέχει μέχρι οκτώ συσκευές (ένας master και μέχρι επτά slaves). Σε οποιοδήποτε σταθμό μπορεί να οριστεί ο ρόλος του master, και είναι συνήθως αυτός που αρχικοποιεί την επικοινωνία. Το Bluetooth χρησιμοποιεί μεταπήδηση συχνοτήτων (frequency hopping, FH) οι οποίες έχουν απόσταση 1MHz. Μέχρι 80 τέτοιες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μπάντα των 2,4 GHz

συνολικού εύρους ζώνης 80 MHz. Οι συσκευές σε ένα piconet αλλάζουν τη συχνότητα μετά από κάθε μετάδοση σύμφωνα με μία από κοινού συμφωνημένη ακολουθία ώστε να ελαχιστοποιήσουν τις παρεμβολές και τις υποκλοπές. Ο master ενός piconet παρέχει την ταυτότητα του piconet, την ακολουθία μεταπήδησης και το ρολόι του συστήματος που συντονίζει όλες τις μεταδόσεις στο piconet.

Αξιοσημείωτο γνώρισμα της τεχνολογίας Bluetooth είναι η δυνατότητα αναβάθμισης και επέκτασής της, ώστε να μπορεί να ενσωματωθεί σε νέα προϊόντα. Το Bluetooth SIG ονομάζει αυτές τις επεκτάσεις «Προφίλ» (profiles) και ήδη έχει παρουσιάσει αρκετά για διάφορες «αγορές» (εκτύπωσης, φωτογραφίας, αυτοκίνητο, δικτύωσης κ.α.).

Μέχρι σήμερα έχουν κάνει την εμφάνισή τους οι ακόλουθες εκδόσεις Bluetooth:

- Έκδοση 1.0: Η αρχική έκδοση η οποία είχε πολλά προβλήματα συμβατότητας καθώς απαιτούσε συγκεκριμένο εξοπλισμό.
- Έκδοση 1.1: Διορθώθηκαν πολλά προβλήματα της αρχικής έκδοσης και προστέθηκε δείκτης ισχύος σήματος.
- Έκδοση 1.2: Έγινε ταχύτερη η ανακάλυψη σταθμών και η εγκατάσταση σύνδεσης, ενώ η ταχύτητα μετάδοσης αυξήθηκε από 721Kbps σε 1Mbps.
- Έκδοση 2.0: Είναι συμβατή με την 1.1 ενώ παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες μετάδοσης (μέχρι 3Mbps) σε πολύ μικρότερη κατανάλωση.

1.1.2 WiFi

Η αρχιτεκτονική του συστήματος καλύπτει τόσο δομημένες τοπολογίες (κυψελωτές) όσο και αδόμητες (ad-hoc). Βασικό της στοιχείο είναι ο σταθμός (Station - STA), δηλαδή οποιαδήποτε συσκευή διαθέτει μια διεπαφή (interface) συμβατή με το πρότυπο IEEE 802.11 και επιθυμεί να συνδεθεί και να μεταδώσει στο σύστημα. Στις δομημένες τοπολογίες, η μετάδοση γίνεται μόνο από/προς το Σημείο Πρόσβασης (Access Point - AP), δηλαδή του σταθμού εκείνου που διαθέτει και διεπαφή με σταθερό δίκτυο (πχ. Ethernet), ενώ στις αδόμητες η μετάδοση γίνεται απευθείας σε οποιοδήποτε άλλο σταθμό στην περιοχή κάλυψης. Το σύνολο των σταθμών και σημείων πρόσβασης που αποτελούν ένα ασύρματο δίκτυο WiFi ονομάζεται Basic Service Set (BSS) στις δομημένες τοπολογίες και Independent Basic Service Set (IBSS) στις αδόμητες.

Η εξέλιξη του προτύπου ακολούθησε μια βήμα-προς-βήμα προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία, στην αρχή σχεδιάστηκε ένα απλό σύστημα περιορισμένης σχετικά λειτουργικότητα, και στη συνέχεια επεκτάθηκε, και συνεχίζει να επεκτείνεται με προσθήκες, οι οποίες στόχο έχουν να βελτιώσουν αρχικές αδυναμίες και παραλήψεις. Παρακάτω, αναφέρονται συνοπτικά οι βασικές εξελίξεις [18].

- 802.11: Η πρώτη έκδοση του προτύπου, η οποία υποστήριζε ταχύτητα 1 και 2Mbps στη μπάντα των 2,4GHz με χρήση τεχνικών frequency hopping (FH) και direct sequence (DS).
- 802.11a: Επέκταση φυσικού επιπέδου για ασύρματα τοπικά δίκτυα στην μπάντα των 5 GHz, το οποίο χρησιμοποιεί διαμόρφωση Orthogonal Frequency Division

Multiplexing (OFDM). Αποτελείται από οκτώ διαθέσιμα μη-επικαλυπτόμενα ασύρματα κανάλια, τα οποία έχουν ρυθμό μετάδοσης έως 54 Mbps το καθένα.

- 802.11b: Επέκταση φυσικού επιπέδου για ασύρματα τοπικά δίκτυα στην μπάντα των 2,4 GHz. Είναι υπεύθυνο για την αναβάθμιση του αρχικού φυσικού επιπέδου του 802.11 προσθέτοντας τους ρυθμούς 5.5 Mbps και 11 Mbps μέσω πυκνότερης διαμόρφωσης. Αποτελείται από τρία διαθέσιμα μη-επικαλυπτόμενα ασύρματα κανάλια, τα οποία έχουν ρυθμό μετάδοσης έως 11 Mbps το καθένα.
- 802.11e: Είναι ένα συμπληρωματικό πρωτόκολλο για το επίπεδο πολλαπλής πρόσβασης του 802.11 το οποίο παρέχει βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας. Στοχεύει σε μια από τις βασικές αδυναμίες του κλασσικού 802.11 πρωτοκόλλου, δηλαδή στην έλλειψη δυνατότητας παροχής διαφοροποιημένης μεταχείρισης σε διαφορετικές κατηγορίες κίνησης.
- 802.11g: Πρότυπο φυσικού επιπέδου για ασύρματα τοπικά δίκτυα στη μπάντα των 2,4 GHz. Αποτελείται από τρία διαθέσιμα μη-επικαλυπτόμενα ασύρματα κανάλια, τα οποία έχουν ρυθμό μετάδοσης έως 54 Mbps το καθένα με χρήση OFDM. Είναι το πιο διαδεδομένο πρότυπο φυσικού επιπέδου σήμερα.
- 802.11i: Είναι ένα συμπληρωματικό πρότυπο για βελτίωση της ασφάλειας του συστήματος. Παρέχει έναν εναλλακτικό μηχανισμό του κλασσικού Wired Equivalent Privacy - WEP με καινούριες μεθόδους κρυπτογράφησης και πιστοποίησης.
- 802.11y: Νέο πρότυπο, που λειτουργεί στην μπάντα των 3650-3700 MHz στις Η.Π.Α.
- 802.11n: Βελτιωμένο πρότυπο που παρέχει υπηρεσίες MIMO (Multiple Input Multiple Output) και άλλα χαρακτηριστικά στην μπάντα των 5 ή 2.4 GHz. Δεν προβλέπεται να ολοκληρωθεί πριν το Δεκέμβριο του 2009.

Πρωτόκολλο 802.11	Release	Συχνότητα (GHz)	Τυπικό throughput (Mbps)	Max net bitrate (Mbps)	Διαμόρφωση	r_{in} (m)	r_{out} (m)
-	1997	2.4	0.9	2		~20	~100
a	1999	5	23	54	OFDM	~35	~120
b	1999	2.4	4.3	11	DSSS	~38	~140
g	2003	2.4	19	54	OFDM	~38	~140
n	2008	2.4,5	74	248	OFDM	~70	~250
y	2008	3.7				~50	~5000

Πίνακας 1.1. WLAN πρότυπα.

Το βασικότερο συστατικό του προτύπου IEEE 802.11 είναι το πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Control -MAC), το οποίο ελέγχει τη μετάδοση πολλών σταθμών στην ίδια περιοχή. Το πρωτόκολλο περιέχει τους εξής δύο μηχανισμούς πρόσβασης: το Distributed Coordination Function (DCF) και το Point Coordination Function (PCF). Ο DCF είναι ο βασικός μηχανισμός πρόσβασης και υποχρεωτικός για όλα τα συστήματα που υλοποιούν το πρότυπο. Βασίζεται στην ανίχνευση φέροντος και στην αποφυγή σύγκρουσης (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA/CA). Αυτό σημαίνει ότι ένας σταθμός περιμένει μέχρι να περιέλθει το ασύρματο μέσο σε απραξία, προτού προχωρήσει σε μετάδοση πακέτου (carrier sense), ενώ διαθέτει μηχανισμούς για την αποφυγή των συγκρούσεων (collision avoidance). Το CSMA/CA είναι παρόμοιο με το CSMA/CD του Ethernet, μόνο που λόγω της φύσεως του ασύρματου μέσου, η ανίχνευση σύγκρουσης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεν είναι εφικτή. Ο μηχανισμός PCF είναι προαιρετικός και εφαρμόζεται μόνο στις δομημένες τοπολογίες. Βασίζεται στη σταθμοσκόπηση (polling) των

σταθμών από το Σημείο Πρόσβασης, δίνοντας κάθε φορά δυνατότητα μετάδοσης σε διαφορετικό σταθμό, χωρίς ανταγωνισμό. Οι μηχανισμοί DCF και PCF μπορούν να πολυπλέκονται στο χρόνο σε ένα υπερπλαίσιο (superframe), το οποίο αποτελείται από μια περίοδο PCF στην οποία δεν υπάρχει ανταγωνισμός (Contention-Free Period - CFP), ακολουθούμενη από μια περίοδο DCF στην οποία υπάρχει ανταγωνισμός (Contention Period - CP) για πρόσβαση στο μέσο, επαναλαμβανόμενα στο χρόνο.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στα πρωτόκολλα ανίχνευσης φέροντος, άρα και στο DCF, είναι το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού. Ένα ζευγάρι ασύρματων συσκευών θεωρείται κρυμμένο (η μια συσκευή είναι κρυμμένη από την άλλη) αν η μια συσκευή δεν μπορεί να ακούσει τη μετάδοση της άλλης. Το φαινόμενο αυτό καθιστά την ανίχνευση φέροντος μη αποδοτική, αφού είναι πιθανό να οδηγήσει σε συγκρούσεις. Για παράδειγμα, θεωρούμε ότι δύο ασύρματοι σταθμοί A και C είναι κρυμμένοι ο ένας από τον άλλο, αλλά και οι δυο επιθυμούν να μεταδώσουν σε ένα τρίτο σταθμό B. Όταν ο A μεταδίδει στον B, η διαδικασία ανίχνευσης φέροντος του C δεν αντιλαμβάνεται κάποια μετάδοση και έτσι ο C θεωρεί (λανθασμένα) ότι μπορεί να ξεκινήσει μια μετάδοση στον B άμεσα. Είναι φανερό ότι ο C θα δημιουργήσει παρεμβολή στην επικοινωνία του A με τον B με αποτέλεσμα να υπάρξει σύγκρουση και ο B να μη λάβει σωστά τα δεδομένα ούτε του A αλλά ούτε και του C.

Υπάρχει βέβαια και το αντίστροφο πρόβλημα, το πρόβλημα του εκτεθειμένου σταθμού. Για παράδειγμα, έστω ότι ο σταθμός B, ο οποίος είναι εντός της εμβέλειας του A, θέλει να στείλει στον C, και έτσι ανιχνεύει το κανάλι. Όταν ακούσει μια μετάδοση, συμπεραίνει εσφαλμένα ότι δεν πρέπει να στείλει στον C, αν και ο A μεταδίδει σε κάποιον άλλο σταθμό D. Επιπλέον, οι περισσότεροι πομποδέκτες είναι ημιαμφίδρομοι, γεγονός που σημαίνει ότι δεν μπορούν ταυτόχρονα να μεταδίδουν και να ανιχνεύουν ριπές θορύβου σε μία μόνο συχνότητα. Εξαιτίας αυτών των προβλημάτων, το 802.11 δε χρησιμοποιεί το CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), όπως το Ethernet.

Για να μειωθεί το πρόβλημα του κρυμμένου τερματικού που υπάρχει εκ φύσεως σε κάθε ασύρματο CSMA σύστημα, πριν από κάθε μετάδοση δεδομένων στο DCF προηγούνται τα μηνύματα Request-to-Send (RTS) και Clear-to-Send (CTS). Συγκεκριμένα, πριν μεταδώσει τα δεδομένα του ένας σταθμός (π.χ. A) μεταδίδει ένα μικρό RTS πακέτο, στο οποίο ο αποδέκτης (π.χ., B) απαντά με ένα CTS πακέτο. Τα RTS και CTS πακέτα περιέχουν πληροφορίες για το χρόνο που απαιτείται για τη μετάδοση των δεδομένων, ώστε ακόμα και αν κάποιος σταθμός (π.χ. C) δεν ακούσει το RTS, να ακούσει το CTS και να μην επιχειρήσει μετάδοση κατά τη χρονική αυτή περίοδο. Ο χρονοδιακόπτης που χρησιμοποιούν οι σταθμοί για την αδρανοποίησή τους από το μέσο λέγεται Network Allocation Vector (NAV). Επίσης, μετά από κάθε επιτυχή μετάδοση, ο παραλήπτης αποστέλλει επιβεβαίωση (acknowledgement - ACK) ώστε να ενημερώσει τον αποστολέα. Η μέθοδος επιβεβαίωσης μέσω μηνύματος (και όχι μέσω ανίχνευσης φέροντος κατά τη μετάδοση) επιβάλλεται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονη μετάδοση και ανίχνευση όπως στα ενσύρματα (π.χ. Ethernet).

Έτσι λοιπόν η μετάδοση μέσω DCF περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενους κύκλους μετάδοσης μηνυμάτων της μορφής RTS/CTS/Data/ACK. Οι σταθμοί επιχειρούν να μεταδώσουν επιτυχώς το RTS, ώστε να δεσμεύσουν το κανάλι και να μπορέσουν να μεταδώσουν χωρίς ανταγωνισμό τα δεδομένα τους. Άρα συγκρούσεις μπορούν να συμβούν μόνο σε ταυτόχρονες μεταδόσεις του RTS.

Ο PCF είναι ένας προαιρετικός μηχανισμός, ο οποίος υποστηρίζει μετάδοση πακέτων χωρίς ανταγωνισμό και στην υποστήριξη υπηρεσιών ευαίσθητων στο χρόνο, όπως κινούμενη εικόνα και φωνή, μειώνοντας τις συγκρούσεις. Χρησιμοποιείται ένας Point Coordinator (PC), ο οποίος βρίσκεται μέσα στο Σημείο Πρόσβασης και σταθμοσκοπεί (poll) όλους τους σταθμούς που έχει εγγεγραμμένους στη λίστα του. Ο PC έχει τη δυνατότητα να αφαιρέσει από τη λίστα ένα σταθμό για κάποιο χρονικό διάστημα, αν παρατηρήσει ότι ο συγκεκριμένος σταθμός δεν έχει καθόλου πακέτα να μεταδώσει για ένα συνεχόμενο αριθμό προσπαθειών. Επίσης, οι σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να ζητήσουν από τον PC να μην τους εγγράψει στη λίστα σταθμοσκόπησης, όταν βρίσκονται σε κατάσταση ελάχιστης κατανάλωσης ισχύος (power-save mode).

Η χρήση του PCF ξεκινά όποτε ο PC κρίνει ότι οι συγκρούσεις έχουν φτάσει σε ένα επικίνδυνα υψηλό ποσοστό.Η έναρξη της CFP γίνεται με ένα πακέτο συγχρονισμού (beacon), ακολουθούμενο από τα μηνύματα σταθμοσκόπησης (CF-Poll), δεδομένων (Data), επιβεβαιώσεων (CF-ACK) ή συνδυασμούς αυτών. Η δυνατότητα να συνδυάζονται πακέτα σταθμοσκόπησης (poll) με επιβεβαιώσεις, σχεδιάστηκε για να βελτιωθεί η απόδοση του πρωτοκόλλου, μειώνοντας τα απαιτούμενα μηνύματα. Αν κάποιος σταθμός δεν ανταποκριθεί στο CF-Poll που του έγινε, τότε ο PC συνεχίζει με τον επόμενο σταθμό της λίστας. Αν κάποιος σταθμός δεν έχει δεδομένα να στείλει, όταν του ζητηθεί από τον PC, τότε στέλνει ένα κενό (null) πακέτο. Η CFP τελειώνει με ένα ειδικό μήνυμα του PC (CF-End) οπότε και οι σταθμοί αλλάζουν τον τρόπο λειτουργίας τους σε DCF και ξαναρχίζουν τον ανταγωνισμό.

- **Υπηρεσίες**

Το πρότυπο 802.11 καθορίζει ότι κάθε ασύρματο LAN που συμμορφώνεται με το πρότυπο πρέπει να παρέχει εννιά υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες αυτές διαιρούνται σε δύο κατηγορίες: πέντε υπηρεσίες διανομής και τέσσερις υπηρεσίες σταθμών. Οι υπηρεσίες διανομής σχετίζονται με τη διαχείριση των μελών μιας κυψέλης και την αλληλεπίδραση με σταθμούς εκτός της κυψέλης. Αντιθέτως, οι υπηρεσίες σταθμών ασχολούνται με τις δραστηριότητες μέσα σε μία μόνο κυψέλη.

Οι πέντε υπηρεσίες διανομής παρέχονται από τους σταθμούς βάσης και ασχολούνται με τη δυνατότητα μετακίνησης των σταθμών καθώς αυτοί εισέρχονται και εγκαταλείπουν τις κυψέλες, συνδεόμενοι και αποσυνδεόμενοι από τους σταθμούς βάσης. Οι υπηρεσίες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Συσχέτιση (Association). Η υπηρεσία αυτή χρησιμοποιείται από τους κινητούς σταθμούς για να συνδεθούν με τους σταθμούς βάσης. Τυπικά χρησιμοποιείται αμέσως μόλις ένας σταθμός μετακινηθεί εντός της εμβέλειας του σταθμού βάσης. Με την άφιξή του, ο σταθμός ανακοινώνει την ταυτότητα και τις δυνατότητές του. Οι δυνατότητες περιλαμβάνουν τους υποστηριζόμενους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, την ανάγκη για υπηρεσίες PCF (δηλαδή με περιόδευση), και τις απαιτήσεις διαχείρισης ισχύος. Ο σταθμός βάσης μπορεί να αποδεχθεί ή να απορρίψει τον κινητό σταθμό. Αν ο κινητός σταθμός γίνει αποδεκτός, θα πρέπει στη συνέχεια να πιστοποιήσει την ταυτότητά του.
- Αποσυσχέτιση (Disassociation). Είτε ο σταθμός είτε ο σταθμός βάσης μπορούν να αποσυνδεθούν, τερματίζοντας έτσι τη συσχέτιση. Ο σταθμός θα πρέπει να χρησιμοποιεί την υπηρεσία αυτή πριν απενεργοποιηθεί ή πριν φύγει από την

κυψέλη, ενώ ο σταθμός βάσης μπορεί επίσης να τη χρησιμοποιήσει πριν απενεργοποιηθεί για λόγους συντήρησης.

- Επανασυσχέτιση (Reassociation). Με αυτήν την υπηρεσία ένας σταθμός μπορεί να αλλάξει τον προτιμώμενο σταθμό βάσης. Αυτή η βοηθητική λειτουργία είναι χρήσιμη για τους κινητούς σταθμούς που μετακινούνται από κυψέλη σε κυψέλη. Αν χρησιμοποιηθεί σωστά, δε θα χαθούν δεδομένα κατά τη μεταβίβαση. (Το 802.11 όμως, όπως και το Ethernet, παρέχει μόνο υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας.)
- Διανομή (Distribution). Η υπηρεσία αυτή προσδιορίζει πώς δρομολογούνται τα πλαίσια που στέλνονται στο σταθμό βάσης. Αν ο προορισμός είναι τοπικός στο σταθμό βάσης, τα πλαίσια μπορούν να σταλούν άμεσα στην κυψέλη. Διαφορετικά, θα πρέπει να προωθηθούν μέσω του ενσύρματου δικτύου.
- Ενοποίηση (Integration). Όταν ένα πλαίσιο πρέπει να σταλεί μέσω ενός δικτύου που δεν είναι της μορφής 802.11 και χρησιμοποιεί διαφορετική μέθοδο διευθυνσιοδότησης ή μορφή πλαισίων, η υπηρεσία αυτή διαχειρίζεται τη μετατροπή από τη μορφή του 802.11 στη μορφή που απαιτείται από το δίκτυο προορισμού

Οι υπόλοιπες τέσσερις υπηρεσίες είναι εσωτερικές στην κυψέλη (δηλαδή σχετίζονται με τις ενέργειες που γίνονται μέσα σε μία μόνο κυψέλη). Χρησιμοποιούνται αφού πραγματοποιηθεί η συσχέτιση (σύνδεση), και είναι οι ακόλουθες:

- Πιστοποίηση ταυτότητας (Authentication). Επειδή οι ασύρματες μεταδόσεις είναι εύκολο να σταλούν ή να ληφθούν από μη εξουσιοδοτημένους σταθμούς, ο σταθμός θα πρέπει να πιστοποιήσει την ταυτότητά του πριν του επιτραπεί να στείλει δεδομένα. Μόλις ένας κινητός σταθμός συνδεθεί με το σταθμό βάσης (δηλαδή όταν γίνει αποδεκτός στην κυψέλη του), ο σταθμός βάσης του στέλνει ένα ειδικό πλαίσιο 'πρόκλησης' για να δει αν ο κινητός σταθμός γνωρίζει το μυστικό κλειδί (συνθηματικό) που του έχει εκχωρηθεί. Ο σταθμός αποδεικνύει ότι γνωρίζει το μυστικό κλειδί κρυπτογραφώντας το πλαίσιο πρόκλησης και επιστρέφοντάς το στο σταθμό βάσης. Αν το αποτέλεσμα είναι ορθό, ο κινητός σταθμός εγγράφεται πλήρως στην κυψέλη. Στο αρχικό πρότυπο ο σταθμός βάσης δε χρειαζόταν να αποδείξει και αυτός την ταυτότητά του στον κινητό σταθμό, είναι όμως ήδη σε εξέλιξη δουλειά για να επιδιορθωθεί αυτό το ελάττωμα του προτύπου.
- Ακύρωση πιστοποίησης ταυτότητας (De-authentification). Όταν ένας σταθμός που έχει ήδη πιστοποιηθεί θέλει να εγκαταλείψει το δίκτυο, ακυρώνεται η πιστοποίησή του. Μετά την ακύρωση της πιστοποίησης, ο σταθμός δεν μπορεί πια να χρησιμοποιήσει το δίκτυο.
- Προστασία απορρήτου (Privacy). Για να διατηρούνται εμπιστευτικές οι πληροφορίες που στέλνονται μέσω ενός ασύρματου LAN, θα πρέπει να κρυπτογραφούνται. Η υπηρεσία αυτή διαχειρίζεται την κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση. Ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης που προσδιορίζεται είναι ο RC$, που εφευρέθηκε από τον Ronald Rivest του M.I.T.
- Παράδοση δεδομένων (Data delivery). Τέλος, αφού η μετάδοση δεδομένων είναι ο σκοπός του δικτύου, το 802.11 είναι φυσικό να παρέχει μια μέθοδο μετάδοσης και λήψης δεδομένων. Επειδή το 802.11 ακολουθεί το μοντέλο του Ethernet και η μετάδοση στο Ethernet δεν είναι εγγυημένα αξιόπιστη κατά 100%, ούτε η μετάδοση στο 802.11 είναι εγγυημένα αξιόπιστη. Τα ανώτερα επίπεδα θα πρέπει να ασχοληθούν με την ανίχνευση και την επιδιόρθωση των σφαλμάτων.

1.1.3 WiMax

Τα δίκτυα WiMax βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.16 που ορίζει τα χαρακτηριστικά για ένα μητροπολιτικό ασύρματο δίκτυο ευρυζωνικής πρόσβασης. Ουσιαστικά, αποτελεί μία εναλλακτική λύση σε σχέση με τα ενσύρματα δίκτυα τεχνολογίας DSL. Μπορεί να καλύψει μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, χωρίς το κόστος εγκατάστασης υποδομής όμοιας με αυτή που απαιτείται στα ενσύρματα δίκτυα. Το πρότυπο 802.16 παρέχει στους χρήστες ταχύτητες πρόσβασης ανάλογες του DSL ή και μεγαλύτερες και λειτουργεί σε μία ευρεία μπάντα συχνοτήτων 2 έως 66 GHz, υποστηρίζοντας ταχύτητες μετάδοσης που μπορούν να αγγίξουν τα 72 Mbps. Οι προδιαγραφές που έχουν θεσπιστεί από την IEEE για τη δημιουργία επιτυχούς ζεύξης αναφέρουν μία θεωρητική απόσταση της τάξης των 50 Km που όμως σε πειραματικές μετρήσεις περιορίζεται στα 10 Km.

Λόγω των μεγάλων αποστάσεων που καλύπτει και ταυτόχρονα τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που μπορεί να παρέχει, το πρότυπο WiMax βρίσκει πολλές εφαρμογές, λύνοντας σημαντικά προβλήματα. Τρεις είναι οι βασικότερες χρήσεις του:

- Δίκτυο κορμού στα κυψελωτά συστήματα κινητής τηλεφωνίας. Η εισαγωγή του προτύπου αυτού αναμένεται να μειώσει σημαντικά το κόστος εξάπλωσης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας μιας και αποτελεί μια οικονομικότερη πρόταση, αν συγκριθεί με την οπτική ίνα, για τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Εξασφαλίζει ταυτόχρονα αξιοπιστία και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που απαιτούν τα δίκτυα κορμού των κινητών δικτύων επικοινωνιών.
- Broadband on Demand. Παρέχει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης κάνοντας εφικτή τη χρήση της τεχνολογίας για εφαρμογές πραγματικού χρόνου κάτι που με το πρότυπο IEEE 802.11 σε μεγάλες αποστάσεις δεν ήταν εφικτό.
- Παρέχει κάλυψη σε περιοχές που είναι αδύνατο τα καλυφθούν με χρήση χαλκού ή οπτικής ίνας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν συμπλήρωμα δικτύων οπτικών ινών σε τμήματα του εδάφους στα οποία το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης δικτύων οπτικών ινών είναι απαγορευτικό.

Το αρχικό πρότυπο 802.16, όπως έχει καθοριστεί το 2001, υποστηρίζει συχνότητες από 10 έως 66 GHz. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος των παραπάνω συχνοτήτων ήταν παγκοσμίως διαθέσιμο κατά την αρχική φάση προδιαγραφής του πρωτοκόλλου. Όμως, τα μικρά μήκη κύματος των συχνοτήτων αυτών, δημιουργούσαν όπως είναι φυσικό πολλά προβλήματα στην υλοποίηση. Η λύση ήρθε από μια νέα μελέτη που ολοκληρώθηκε στο τέλος του 2002. Πρόκειται για το 802.16a, που υποστηρίζει συχνότητες στο εύρος 2-11 GHz, περιλαμβάνοντας αδειοδοτημένο και μη φάσμα. Συγκριτικά λοιπόν, με τις υψηλές συχνότητες, η ζώνη του 802.16a παρέχει τη δυνατότητα πρόσβασης σε πολύ περισσότερους συνδρομητές με ελαχιστοποίηση του κόστους, παρ' όλο που υπάρχει χαμηλότερος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Αυτό βέβαια προϋποθέτει υπηρεσίες που θα απευθύνονται κυρίως σε ιδιώτες και σε μικρού ή μεσαίου μεγέθους εταιρίες.

Το πρότυπο IEEE802.16 μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές υπηρεσίες με διαφορετικές απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας η καθεμία. Το πρότυπο ορίζει τους μηχανισμούς και τις λειτουργίες που ελέγχουν την επικοινωνία και την μετάδοση δεδομένων μεταξύ του Σταθμού Βάσης (Base Station - BS) και των σταθμών συνδρομητών (Subscriber Stations - SSs). Στην κατεύθυνση από τον σταθμό βάσης προς τον συνδρομητή (downlink) η μετάδοση είναι απλή καθώς δεν υπάρχει ανταγωνισμός (μόνο ο Σταθμός Βάσης μεταδίδει). Στην

αντίθετη κατεύθυνση (uplink), προβλέπεται ένα προηγμένο πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης το οποίο επιτρέπει τη δυναμική δέσμευση εύρους ζώνης. Κάθε συνδρομητής μπορεί να ζητήσει από τον Σταθμό Βάσης να του ανατεθούν χρονοθυρίδες ανά πλαίσιο ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του. Αυτό επιτυγχάνεται είτε μέσω αιτήσεων του συνδρομητή είτε μέσω σχετικών ερωτήσεων του Σταθμού Βάσης. Πρέπει να αναφερθεί ότι το πρότυπο 802.16 προβλέπει δύο δυνατούς τρόπου λειτουργίας: λειτουργία σημείου προς πολλαπλά σημεία (point-to-multipoint), όπου αφορά την κλασσική κυψελωτή τοπολογία, και λειτουργία πλέγματος (mesh mode) όπου κάθε συνδρομητής μπορεί να μιλήσει απευθείας με κάποιον άλλον.

Οι υπηρεσίες οι οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθούν από τους τελικούς χρήστες διαφέρουν στην φύση τους και στις απαιτήσεις τους. Έτσι μπορούν να υποστηριχθούν υπηρεσίες μεταφοράς δεδομένων, φωνής, ακόμα και βίντεο. Για την υποστήριξη όλων αυτών των διαφορετικών υπηρεσιών, το επίπεδο πολλαπλής πρόσβασης έχει τη δυνατότητα εξυπηρέτησης τόσο σταθερής, όσο και μεταβαλλόμενης (bursty) κίνησης. Κάθε υπηρεσία κατηγοριοποιείται και σε διαφορετική κλάση ανάλογα με την ποιότητα υπηρεσίας που απαιτεί. Το πρότυπο IEEE802.16 διαθέτει τέσσερις διαφορετικές κλάσεις υπηρεσιών: την “Unsolicited Grant Service” (UGS), η οποία υποστηρίζει υπηρεσίες σταθερού ρυθμού που γεννούν πακέτα σταθερού μήκους σε περιοδική βάση, την “Real-Time Polling Service (rtPS)” ,η οποία υποστηρίζει εφαρμογές πραγματικού χρόνου που παράγουν πακέτα μεταβλητού μήκους όπως VoIP, streaming video, streaming audio, την “non-Real Time Polling Service” (nrtPS), η οποία σχεδιάστηκε για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο εύρος ζώνης αλλά όμως ανέχονται μεγαλύτερες καθυστερήσεις, και τέλος την “Best Effort” (BE), η οποία αναφέρεται σε υπηρεσίες όπου δεν υπάρχει καμία εγγύηση για την καθυστέρηση ή το εύρος ζώνης που θα ανατεθεί για την μεταφορά των δεδομένων. Επιπλέον, κάθε υπηρεσία μπορεί να περιγράψει τις απαιτήσεις για ποιότητα υπηρεσίας μέσω αναλυτικών παραμέτρων που δηλώνονται προς το Σημείο Πρόσβασης κατά την αρχικοποίησή της. Αυτό δίνει τη δυνατότητα παροχής ιδιαίτερα εξειδικευμένης ποιότητας ανά υπηρεσία.

Σημαντική στην εξέλιξη του συστήματος είναι η επέκταση 802.16e η οποία επιτρέπει την ενσωμάτωση κινούμενων σταθμών συνδρομητή μέσω ανάλογων επεκτάσεων στο φυσικό επίπεδο. Η επέκταση έδωσε τη δυνατότητα υλοποίησης του συστήματος σε φορητούς υπολογιστές και υπολογιστές παλάμης, ώστε να θεωρείται πλέον συμπληρωματική ή ακόμα και ανταγωνιστική τεχνολογία του UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) σε αστικές περιοχές. Μερικά από τα χαρακτηριστικά που υιοθετεί το 802.16e είναι τα ακόλουθα:

- <u>Υψηλοί Ρυθμοί Δεδομένων:</u> Με τις νέες τεχνολογίες των «Έξυπνων» Κεραιών, τις προχωρημένες μεθόδους κωδικοποίησης και διαμόρφωσης, επιτυγχάνονται μέγιστοι ρυθμοί στην κάθοδο (downlink) ως 63Mbps και στην άνοδο (uplink) 28 Mbps ανά τομέα, σε κανάλι μεγέθους 10MHz.
- <u>Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS</u>): Επιτυγχάνεται με το βέλτιστο διαμοιρασμό του χώρου, των συχνοτήτων και των χρονοθυρίδων, με ελάχιστη σπατάλη πόρων.
- <u>Κλιμάκωση:</u> Η σύστημα μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορες ζώνες του φάσματος, με συχνότητες από 1,25 ως 20MHz ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Έτσι είναι δυνατή η παροχή αυξημένου εύρους ζώνης ανάλογα με την υπηρεσία σε αραιοκατοικημένες περιοχές, ενώ αντίθετα στα πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα είναι δυνατή η αύξηση της χωρητικότητας των συνδρομητών.

- Κινητικότητα: Βελτιστοποίηση των τεχνικών διαπομπής (handover ή handoff) με καθυστερήσεις μικρότερες από 50 msec, για την υποστήριξη υπηρεσιών πραγματικού χρόνου (π.χ. VoIP, Voice over IP) χωρίς υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας..

1.2 Κυψελωτά Δίκτυα Επικοινωνιών

Ένα ιδανικό κινητό σύστημα επικοινωνιών θα πρέπει να λειτουργεί σε μια περιορισμένη προκαθορισμένη ζώνη και να εξυπηρετεί σχεδόν απεριόριστο αριθμό χρηστών σε απεριόριστες, όσον αφορά την έκτασή τους, περιοχές. Τρεις προσεγγίσεις υπάρχουν για την επίτευξη του ιδανικού συστήματος [2]:

- Η προσέγγιση στενής ζώνης (Single Sideband Modulation, SSB), που διαιρεί τη διατιθέμενη ζώνη συχνοτήτων σε μέγιστο αριθμό διαύλων.
- Η προσέγγιση κυψελωτού συστήματος, όπου επαναχρησιμοποιείται η διατιθέμενη ζώνη συχνοτήτων σε διαφορετικές γεωγραφικές θέσεις.
- Η προσέγγιση απλωμένου φάσματος, που παράγει πολλούς κώδικες σε μια ευρεία ζώνη συχνοτήτων.

Η κυψελωτή προσέγγιση είναι το πιο αποδοτικό σύστημα, όσον αφορά το φάσμα.

Τα κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών έχουν ως στόχο την παροχή υπηρεσιών σε κινητά τερματικά, που εμφανίζουν μεγάλη διασπορά σε δρόμους και λεωφόρους αστικών, ημιαστικών και αγροτικών περιοχών. Η σπουδαιότερη απαίτηση σε αυτά τα συστήματα είναι η εξυπηρέτηση κινητών τερματικών μεγάλης ταχύτητας. Οι δυνατότητες περιαγωγής (roaming) επεκτείνουν την παροχή υπηρεσίας σε χρήστες που περιφέρονται σε περιοχές έξω από την «οικεία» περιοχή εξυπηρέτησης.

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που διακρίνει τα κυψελωτά συστήματα από τα προγενέστερα ραδιοσυστήματα κινητών επικοινωνιών, είναι η χρησιμοποίηση πολλών σταθμών βάσης με σχετικά μικρές ακτίνες κάλυψης (10km ή λιγότερο σε σχέση με τα 50-100km προγενέστερων συστημάτων). Κάθε συχνότητα χρησιμοποιείται ταυτόχρονα σε πολλές κυψέλες. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων επιτρέπει πολύ υψηλότερη πυκνότητα συνδρομητών ανά MHz φάσματος απ' ότι στα προηγούμενα συστήματα. Η χωρητικότητα του συστήματος μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω αν περιοριστεί το μέγεθος της κυψέλης σε ακτίνα της τάξης του 0,5km. Επιπλέον, η προσέγγιση αυτή καθιστά δυνατή τη χρήση μικρών, φορητών συσκευών με μπαταρία και με χαμηλότερη ισχύ εκπεμπόμενης ραδιοσυχνότητας, αντί για μεγάλες συσκευές τύπου αυτοκινήτου που χρησιμοποιούνται στα παλιότερα συστήματα. Στα κυψελωτά συστήματα η συνεχής κάλυψη επιτυγχάνεται με την πραγματοποίηση διαπομπής.

1.2.1 Βασικές αρχές των κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών

1.2.1.1 Κυψελωτή δομή – Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

Η έννοια της κυψελωτής δομής αποτέλεσε την κυριότερη διέξοδο για τη λύση του προβλήματος της συμφόρησης στο φάσμα συχνοτήτων και της χωρητικότητας χρηστών. Προσέφερε πολύ μεγάλη χωρητικότητα χρηστών σε περιορισμένο φάσμα, χωρίς πολύ μεγάλες τεχνολογικές αλλαγές. Η έννοια του κυψελωτού συστήματος έγκειται στην αντικατάσταση ενός πομπού μεγάλης ισχύος από πολλούς πομπούς μικρής ισχύος, ο καθένας από τους οποίους καλύπτει μικρό τμήμα της περιοχής εξυπηρέτησης του συστήματος κινητών επικοινωνιών, που αποκαλείται κυψέλη (cell). Σε κάθε σταθμό βάσης κατανέμεται ένα μέρος του συνόλου των ραδιοδιαύλων που διατίθενται για το σύστημα. Σε γειτονικούς σταθμούς βάσης κατανέμονται διαφορετικές ομάδες διαύλων, έτσι ώστε όλοι οι διαθέσιμοι δίαυλοι να κατανέμονται σε έναν σχετικά μικρό αριθμό γειτονικών σταθμών βάσης και να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές, τόσο μεταξύ των σταθμών βάσης όσο και μεταξύ των χρηστών που εξυπηρετούνται από τους σταθμούς βάσης. Με συστηματική χωρική κατανομή των σταθμών βάσης και των ομάδων συχνοτήτων στην περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος, οι διαθέσιμοι δίαυλοι μπορεί να επαναχρησιμοποιηθούν όσες φορές χρειάζεται, ενώ ταυτόχρονα οι στάθμες παρεμβολών μεταξύ σταθμών βάσης που χρησιμοποιούν τις ίδιες ομάδες συχνοτήτων διατηρούνται κάτω από αποδεκτά επίπεδα.

Όταν αυξάνει ο αριθμός των χρηστών, δηλαδή όταν χρειάζονται περισσότεροι ραδιοδίαυλοι για ένα σύστημα, πρέπει να αυξάνει και ο αριθμός των σταθμών βάσης (με ταυτόχρονη μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος τους για αποφυγή παρεμβολών), για να υπάρχει έτσι επιπρόσθετη χωρητικότητα χωρίς επιπλέον αύξηση του διατεθέντος φάσματος. Ακόμη, η έννοια της κυψελωτής διάταξης επιτρέπει στα κινητά τερματικά μιας χώρας, μιας ηπείρου, ή όλου του κόσμου, τα οποία είναι κατασκευασμένα να λειτουργούν σε μια ζώνη συχνοτήτων, να μπορεί να χρησιμοποιούνται και σε άλλες περιοχές, όπου υπάρχουν συστήματα που καλύπτουν την ίδια ζώνη συχνοτήτων.

Δύο είναι τα κύρια χαρακτηριστικά στοιχεία στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών: η ασύρματη διεπαφή, που επιτρέπει στα κινητά τερματικά να επικοινωνούν ενώ περιφέρονται, και η υποδομή ελέγχου, που δίνει τη δυνατότητα σε κάθε δίκτυο να γνωρίζει πού περιφέρεται κάποιο κινητό τερματικό και να το εντοπίζει, ανεξάρτητα από το αν αυτό πραγματοποιεί κλήση ή όχι, με την προϋπόθεση βέβαια ότι το κινητό τερματικό είναι ενεργοποιημένο.

Ο αριθμός των χρηστών (τερματικών), που μπορεί να υποστηριχθεί από ένα κυψελωτό δίκτυο κινητών επικοινωνιών, εξαρτάται βασικά από την κοινή ασύρματη διεπαφή, πάνω από την οποία επικοινωνούν οι χρήστες. Η χωρητικότητα εξαρτάται επίσης και από πολλούς άλλους παράγοντες, οι σημαντικότεροι από τους οποίους είναι το διατιθέμενο εύρος ζώνης, το μέγεθος της έκτασης που καλύπτει ασυρματικά ένας σταθμός βάσης (μέγεθος κυψέλης) και η στάθμη παρεμβολής που μπορεί να είναι ανεκτή σε μια

επιμέρους ραδιοζεύξη. Οι περιορισμοί που υπεισέρχονται από το διαθέσιμο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων, εμποδίζουν την εκχώρηση και χρησιμοποίηση μιας αποκλειστικής ζώνης συχνοτήτων σε κάθε σταθμό βάσης, ο οποίος παρέχει ραδιοκάλυψη σε χρήστες που βρίσκονται σε μια μικρή σχετικά περιοχή. Αντίθετα, οι διάφορες ζώνες συχνοτήτων πρέπει να επαναχρησιμοποιούνται σε σταθμούς βάσης που απέχουν επαρκώς μεταξύ τους, ώστε να μην παρεμβάλλει ο ένας στον άλλο. Η αμοιβαία παρεμβολή διαύλων ίδιας συχνότητας, οι οποίοι λειτουργούν σε διαφορετικές κυψέλες, ονομάζεται ομοδιαυλική παρεμβολή (co-channel interference). Ο καθορισμός της επαρκούς απόστασης D μεταξύ των ομοδιαυλικών κυψελών και την επιτρεπόμενης στάθμης παρεμβολής είναι έργο της σχεδίασης των κυψελωτών συστημάτων. Η στάθμη της παρεμβολής, που μπορεί να είναι ανεκτή στον ασύρματο δέκτη, εξαρτάται από το είδος της χρησιμοποιούμενης διαμόρφωσης, από την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, και, στα ψηφιακά συστήματα, από τον τύπο του μηχανισμού ελέγχου λαθών που εφαρμόζεται. Η μικρότερη απόσταση D μεταξύ των κέντρων δύο ομοδιαυλικών κυψελών, καθορίζεται από την επιλογή του μεγέθους της ομάδας κυψελών, που ονομάζεται και συντελεστής επαναχρησιμοποίησης (frequency reuse factor) και από τη διάταξη της ομάδας κυψελών. Η απόσταση D ονομάζεται απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse distance). Η ελάχιστη απόσταση στην οποία επιτρέπεται η επαναχρησιμοποίηση της ίδιας συχνότητας, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως λόγου χάριν από τον αριθμό των κυψελών που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα στην περιοχή της κεντρικής κυψέλης, από τη μορφή του περιγράμματος της γεωγραφικής περιοχής, από το ύψος της κεραίας και από την ισχύ εκπομπής σε κάθε κυψέλη.

Η περιοχή εξυπηρέτησης κάθε κυψελωτού συστήματος καλύπτεται από πολλούς σταθμούς βάσης κατά τόπο ώστε κάθε σταθμός βάσης να καλύπτει ένα μικρό μέρος της περιοχής εξυπηρέτησης, δηλαδή μια κυψέλη. Λόγω της ανομοιομορφίας στην ασύρματη διάδοση, υπάρχει αρκετή επικάλυψη μεταξύ των κυψελών, όπως επίσης υπάρχουν και περιοχές χωρίς ραδιοκάλυψη. Σε ένα σύστημα ιδανικής διάδοσης, οι περιοχές ραδιοκάλυψης των σταθμών βάσης είναι κυκλικές. Οι κυκλικές όμως μορφές κυψελών εμφανίζουν επικαλυπτόμενες περιοχές. Για καλύτερη προσέγγιση και μελέτη του συστήματος, χρησιμοποιούνται κυψέλες με σχήμα κανονικού πολυγώνου, τριγωνικές, τετραγωνικές ή εξαγωγικές. Συνήθως, θεωρείται ότι οι κυψέλες έχουν εξαγωγικό σχήμα, διότι το εξάγωνο προσεγγίζει καλύτερα τον κύκλο.

1.2.1.2 Τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα

Ως τηλεπικοινωνιακή κίνηση στα κυψελωτά συστήματα ή απλά κίνηση ορίζεται το σύνολο, όσο αφορά το πλήθος και τη διάρκεια, των κλήσεων από και προς τα κινητά τερματικά, οι οποίες πραγματοποιούνται μέσω ενός αριθμού διαύλων. Οι σημαντικότεροι παράγοντες για την εξυπηρέτηση της κίνησης είναι:

- Ο ρυθμός άφιξης κλήσεων
- Οι διάρκειες κατάληψης των διαύλων για τις επιτυχείς κλήσεις
- Ο συνολικός αριθμός των διαθέσιμων διαύλων

- Η πιθανότητα αποκλεισμού, και
- Ο τρόπος αντιμετώπισης των αποκλειομένων κλήσεων

Ο αριθμός των προσφερόμενων κλήσεων ανά μονάδα χρόνου, δηλαδή ο ρυθμός κλήσεων, σε ένα σταθμό βάσης ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή και την ώρα της ημέρας. Η άφιξη των κλήσεων ή η διαδικασία εισόδου είναι ένα τυχαίο φαινόμενο, μια στοχαστική ανέλιξη. Επίσης, η διάρκεια της επικοινωνίας ή της κατάληψης ενός διαύλου είναι πάλι τυχαίο φαινόμενο. Ακόμη, οι τερματισμοί των κλήσεων συμβαίνουν σε τυχαίες χρονικές στιγμές και επηρεάζονται πολύ από τη λειτουργία του συστήματος. Οδηγούν επομένως σε μια δεύτερη στοχαστική ανέλιξη, τη διαδικασία εξόδου.

Ένταση της κίνησης

Ο όγκος κίνησης είναι το άθροισμα όλων των χρόνων κατάληψης των διαύλων για τη θεωρούμενη χρονική περίοδο. Η μεταφερόμενη κίνηση (carried traffic) ή ένταση της κίνησης (traffic intensity) ορίζεται ως ο λόγος του όγκου κίνησης προς τη χρονική περίοδο κατά την οποία μετριέται ο όγκος κίνησης. Η μεταφερόμενη κίνηση είναι αδιάστατη ποσότητα και εκφράζεται σε erlang. Αντιπροσωπεύει το μέσο αριθμό των ταυτόχρονα κατειλημμένων διαύλων κατά τη διάρκεια μιας καθορισμένης χρονικής περιόδου (συνήθως 1h). 1 erlang αντιπροσωπεύει την κίνηση που μεταφέρεται από έναν δίαυλο, ο οποίος είναι πλήρως κατηλειμμένος. Η προσφερόμενη κίνηση (offered traffic) δημιουργείται από τις κλήσεις που φτάνουν στο σύστημα, άσχετα από τη μετέπειτα τύχη τους. Η ένταση της προσφερόμενης κίνησης ορίζεται ως αριθμός αφίξεων στο σύστημα κατά τη διάρκεια του μέσου χρόνου κατάληψης. Ισούται με το γινόμενο του ρυθμού άφιξης κλήσεων λ επί τη μέση διάρκεια κλήσεων Η (Προσφερόμενη κίνηση =λ·Η). Η αδιάστατη ποσότητα της προσφερόμενης κίνησης εκφράζεται επίσης σε erlang. Η κίνηση που χάνεται ή αποκλειόμενη κίνηση είναι προφανώς η διαφορά μεταξύ της προσφερόμενης και της μεταφερόμενης κίνησης και εξαρτάται από το βαθμό εξυπηρέτησης.

Συγκέντρωση- βαθμός εξυπηρέτησης

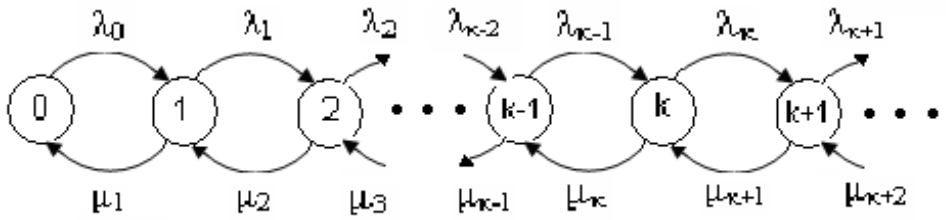
Αν όλες οι κλήσεις πρέπει να εξυπηρετούνται χωρίς καθυστέρηση ή απώλειες, είναι ανάγκη να υπάρχουν τόσοι αμφίδρομοι δίαυλοι όσοι και οι χρήστες. Ωστόσο, για οικονομικούς λόγους δεν είναι ρεαλιστικό να είναι οι δίαυλοι τόσοι πολλοί. Για να περιοριστεί λοιπόν ο αριθμός των διαύλων σε έναν λογικό αριθμό, εισάγεται στο σύστημα κάποιος βαθμός συγκέντρωσης. Η συγκέντρωση εκμεταλλεύεται τη στατιστική συμπεριφορά των χρηστών και τους επιτρέπει να χρησιμοποιούν από κοινού τον σχετικά μικρό αριθμό διαύλων σε κάθε κυψέλη. Το σύστημα εκχωρεί σε κάθε χρήστη, ύστερα από αίτησή του, έναν δίαυλο πρόσβασης από ένα σύνολο διαθέσιμων διαύλων όταν αυτός πραγματοποιεί κλήση, και μετά το πέρας της κλήσης ο δίαυλος επιστρέφει αμέσως στο σύνολο των διαθέσιμων διαύλων.

Ο βαθμός εξυπηρέτησης (grade of service, GOS) είναι ένα μέτρο της δυνατότητας που έχει κάποιος χρήστης να έχει πρόσβαση σε ένα σύστημα με συγκέντρωση, κατά την ώρα

αιχμής, και ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των ανεπιτυχών κλήσεων προς το συνολικό αριθμό κλήσεων την ώρα αιχμής. Είναι ένα δείκτης που καθορίζει την επίδοση ενός συστήματος και είναι συνήθως η πιθανότητα να αποκοπεί μια κλήση, ή η πιθανότητα μια κλήση να βρίσκεται σε ουρά αναμονής περισσότερο από κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων βασίζεται συνήθως σε GOS=0.02 ή καλύτερο. GOS=0.02 σημαίνει ότι, κατά μέσο όρο ένας χρήστης θα βρίσκει διαθέσιμο δίαυλο το 98% του χρόνου κατά τη διάρκεια της ώρας αιχμής στο σύστημα. Κατά τη διάρκεια του υπόλοιπου χρόνου, ο GOS θα βελτιώνεται και στην ουσία τα περισσότερα συστήματα θα εμφανίζονται χωρίς αποκλεισμό.

Μοντέλο Erlang B

Το μοντέλο Erlang B περιγράφει ένα σύστημα στο οποίο είναι διαθέσιμοι C δίαυλοι και οι κλήσεις φτάνουν κατά Poisson, με μέσο ρυθμό λ και βρίσκουν πάντα ένα διαθέσιμο δίαυλο, μέχρι ένας μέγιστος αριθμός διαύλων να είναι κατειλημμένος. Στο σημείο αυτό, όποιες κλήσεις φτάνουν, απορρίπτονται και γίνεται η υπόθεση ότι ο χρήστης δεν προσπαθεί ξανά. Στο μοντέλο προστίθεται και εκθετική κατανομή χρόνων εξυπηρέτησης με μέση διάρκεια H=1/μ, οπότε προκύπτει ένα σύστημα με πεπερασμένο αριθμό διαύλων χωρίς θέσεις αναμονής.



Σχήμα 1.1. Διάγραμμα ρυθμού μετάβασης καταστάσεων για το μοντέλο Erlang B.

Οι ρυθμοί άφιξης λ_k είναι ανεξάρτητοι της κατάστασης, και συνεπώς $\lambda_k=\lambda$ για όλες τις καταστάσεις k. Επίσης, όταν είναι κατειλημμένος ένας δίαυλος (k=1), ο ρυθμός αναχώρησης είναι ανάλογος προς τη μέση διάρκεια κατάληψης του διαύλου, δηλαδή $\mu_1=1/H=\mu$. Στην κατάσταση k, όπου k δίαυλοι είναι κατειλημμένοι, ο ρυθμός αναχώρησης είναι ανάλογος προς τον αριθμό των κατειλημμένων διαύλων, $\mu_k=k\mu$, $1\leq k\leq C$. Αποδεικνύεται ότι η πιθανότητα αποκλεισμού P_B είναι η πιθανότητα να είναι και οι C δίαυλοι κατειλημμένοι:

$$P_B = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^{C} \frac{A^k}{k!}} \quad \textbf{(1.1)}$$

όπου $A = \frac{\lambda}{\mu}$ (προσφερόμενη κίνηση).

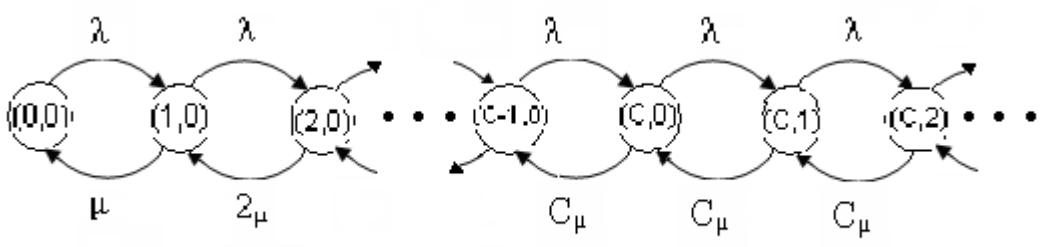
Ο μέσος ρυθμός κλήσεων στο σύστημα είναι $E(k) = A(1 - P_B)$. Όσο αυξάνεται η κίνηση A, η πιθανότητα απόρριψης E(k) τείνει στη μονάδα. Η δυνατότητα διεκπεραίωσης κλήσεων (throughput) ανά μονάδα χρόνου είναι

$$throughput = \lambda(1 - P_B) \quad \textbf{(1.2)}$$

Όσο αυξάνεται το A το throughput πλησιάζει τη μέγιστη τιμή του, $C \cdot \mu$. Το λ αναφέρεται στο τηλεπικοινωνιακό φορτίο, εκφρασμένο στις κλήσεις που γεννιούνται στη μονάδα του χρόνου. Υπάρχει πίνακας που απεικονίζει τιμές της κίνησης για διαφορετικό αριθμό διαύλων και τιμές της πιθανότητας απόρριψης.

Μοντέλο Erlang C

Το μοντέλο Erlang C χρησιμοποιείται για συστήματα με C διαθέσιμους διαύλους, αλλά όταν οι δίαυλοι είναι κατειλημμένοι, κάθε νέα κλήση που φτάνει δεν απορρίπτεται, αλλά παραμένει σε ουρά αναμονής με άπειρο μήκος μέχρι να βρεθεί διαθέσιμος δίαυλος. Η κατανομή άφιξης των κλήσεων είναι Poisson με ρυθμό λ και η κατανομή των χρόνων εξυπηρέτησης εκθετική με μέση διάρκεια H=1/μ.



Σχήμα 1.2. Διάγραμμα ρυθμού μετάβασης καταστάσεων για το μοντέλο Erlang C.

Αποδεικνύεται ότι η πιθανότητα να μην έχει μια κλήση άμεση πρόσβαση σε έναν δίαυλο και να καθυστερήσει, δηλαδή να είναι και οι C δίαυλοι κατειλημμένοι, είναι:

$$P(delay > 0) = \frac{A^C}{A^C + C!\left(1 - \frac{A}{C}\right)\sum_{k=0}^{C-1}\frac{A^k}{k!}} \quad \textbf{(1.3)}$$

Η πιθανότητα να αναγκαστεί η κλήση να περιμένει περισσότερο από χρονικό διάστημα t είναι:

$$\Pr(delay > t) = \Pr(delay > 0) \cdot e^{\frac{-(C-A)t}{H}} \quad \textbf{(1.4)}$$

Υπάρχει και πάλι πίνακας που απεικονίζει τιμές της κίνησης για διαφορετικό αριθμό διαύλων και τιμές της πιθανότητας αποκλεισμού.

1.2.1.3 Φασματική απόδοση

Η φασματική απόδοση n_s ενός κυψελωτού συστήματος ορίζεται ως το πηλίκο της μεταφερόμενης κίνησης A_C ανά κυψέλη (σε erlang) προς το γινόμενο του ολικού εύρους ζώνης του συστήματος B_S επί το εμβαδό της κυψέλης S_C.

$$n_S = \frac{A_C}{B_S \cdot S_C} \quad \textbf{(1.5)}$$

Ισχύει ότι $B_S = C_C \cdot K \cdot W$, όπου C_C είναι ο αριθμός των παράλληλων διαύλων ανά σταθμό βάσης, K ο αριθμός των κυψελών των ομάδων επαναχρησιμοποίησης και W το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει κάθε δίαυλος [2], [6].

1.2.2 Αρχιτεκτονική κυψελωτών συστημάτων

Από την εκπλήρωση των βασικών στόχων των κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών, προκύπτουν κάποιες απαιτήσεις, οι οποίες αφορούν τους εξής βασικούς τομείς του δικτύου:

- Τη ραδιοκάλυψη, δηλαδή την κατάλληλη τοποθέτηση σταθμών βάσης σε όλη την περιοχή κάλυψης του συστήματος.
- Την υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών (προσδιορισμό της παρούσας θέσης του καλούμενου και δρομολόγηση της κλήσης, σε περίπτωση εισερχόμενης κλήσης).

1.2.2.1 Ραδιοκάλυψη

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών παρέχουν κάλυψη σε περιοχές με διαφορετική συγκέντρωση χρηστών (κέντρο πόλης, προάστια, αγροτικές περιοχές, κτίρια ή αυτοκινητόδρομοι) και κατά συνέπεια με διαφορετικές απαιτήσεις, όσον αφορά την τηλεπικοινωνιακή κίνηση. Για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της κάθε περιοχής, τα δίκτυα χρησιμοποιούν κυψέλες διαφορετικών τύπων, το μέγεθος και το σχήμα των οποίων καθορίζεται από τις απαιτήσεις σε χωρητικότητα σε συνδυασμό με το συνολικό κόστος. Τα είδη κυψελών που χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις ανάγκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης στα διάφορα περιβάλλοντα είναι τα εξής:

- *Μακροκυψέλες:* Είναι κυψέλες με ακτίνα μεγαλύτερη από 1km και χρησιμοποιούνται για τη ραδιοκάλυψη ευρύτερων γεωγραφικών περιοχών με μέση ή χαμηλή πυκνότητα χρηστών (όπως αγροτικές περιοχές). Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, χρησιμοποιούνται ως κυψέλες- ομπρέλες (umbrella cell), που καλύπτουν μια περιοχή αποτελούμενη από πολλές μικρότερες κυψέλες, με σκοπό την κάλυψη των κενών που ενδεχομένως να υπάρχουν μεταξύ των μικρότερων κυψελών, την απορρόφηση μέρους της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, την ικανοποίηση διαπομπών, που προέρχονται μη διαθεσιμότητα πόρων της αντίστοιχης μικρότερης κυψέλης, και τη δέσμευση διαπομπών χρηστών, που κινούνται γρήγορα για μείωση του αριθμού των διαπομπών ανά κλήση. Το μέγιστο επιτρεπόμενο μέγεθος της μακροκυψέλης καθορίζεται από περιορισμούς που αφορούν τη μέγιστη ισχύ και την πολυπλοκότητα του τερματικού.

- *Μικροκυψέλες:* Αυξάνουν τη χωρητικότητα του συστήματος, αλλά η διαχείριση των ασυρμάτων πόρων του κυψελωτού συστήματος γίνεται πιο δύσκολη. Μπορούν να διακριθούν ως μονοδιάστατες, δύο ή τριών διαστάσεων, ανάλογα με το κατά πόσο καλύπτουν δρόμους, διασταυρώσεις δρόμων ή πολυώροφα κτίρια αντίστοιχα. Ο σταθμός βάσης μιας μικροκυψέλης εκπέμπει χαμηλή ισχύ και η κεραία του μπορεί να είναι τοποθετημένη σε στύλο φωτισμού, σε ύψος περίπου 5m από το έδαφος. Και το κινητό τερματικό επίσης εκπέμπει με χαμηλή ισχύ, γεγονός που συντελεί στη μεγαλύτερη διάρκεια της μπαταρίας του. Επειδή οι κεραίες των σταθμών βάσης βρίσκονται σε μικρό ύψος σε σχέση με τα τριγύρω κτίρια, τα ραδιοκύματα διαδίδονται κυρίως κατά μήκος των δρόμων. Οι κεραίες μπορεί να καλύπτουν αποστάσεις 100-200m προς κάθε κατεύθυνση του δρόμου, εξυπηρετώντας έτσι λίγα οικοδομικά τετράγωνα. Αυτό το περιβάλλον διάδοσης παρουσιάζει μικρή διασπορά καθυστέρησης, γεγονός που καθιστά δυνατή τη μετάδοση υψηλών ρυθμών δεδομένων. Στις μικροκυψέλες εμφανίζεται το φαινόμενο της γωνίας δρόμου, που χαρακτηρίζεται από απότομη πτώση (20-30dB για διανυόμενη απόσταση 10-20m) της στάθμης του σήματος, όταν το κινητό τερματικό στρίβει στη γωνία του δρόμου και χάνει την οπτική επαφή με το σταθμό βάσης. Το φαινόμενο αυτό απαιτεί γρηγορότερη διαπομπή, μπορεί να μεταβάλει την ποιότητα του σήματος πολύ γρήγορα και είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Στα μικροκυψελικά συστήματα διακρίνουμε δύο τύπους διαπομπής: διαπομπή οπτικής επαφής, από σταθμό βάσης με τον οποίο υπάρχει οπτική επαφή σε άλλον με τον οποίο υπάρχει επίσης οπτική επαφή, και διαπομπή μη-οπτικής επαφής, από σταθμό βάσης με τον οποίο υπάρχει οπτική επαφή σε άλλον με τον οποίο δεν υπάρχει οπτική επαφή. Οι

μικροκυψέλες μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες: σταυροειδείς μισού τετραγώνου, σταυροειδείς πλήρους τετραγώνου και ευθύγραμμες.

- *Πικοκυψέλες:* Είναι στοιχειώδεις κυψέλες, που εξασφαλίζουν ασύρματη κάλυψη εσωτερικών χώρων (όπως ένα δωμάτιο ή έναν διάδρομο). Η ακτίνα ραδιοκάλυψης μιας πικοκυψέλης είναι της τάξης των 10m.

1.2.2.1.1 Πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική κυψελών

Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική κυψελών (multi-layered cell architecture) συνίσταται στην ύπαρξη μεγάλων υπερκείμενων μακροκυψελών (κυψέλες ομπρέλες) και μικρών μικροκυψελών. Οι μκαροκυψέλες παρέχουν ραδιοκάλυψη στην ευρύτερη περιοχή πέραν των περιοχών ραδιοκάλυψης των μικροκυψελών, εξασφαλίζουν καλύτερη διαπομπή και εξυπηρετούν κινητά τερματικά με μεγάλες ταχύτητες. Οι μικροκυψέλες, από την άλλη, παρέχουν μεγάλη χωρητικότητα λόγω μεγαλύτερης επαναχρησιμοποίησης του φάσματος και καλύπτουν πολυσύχναστες περιοχές (busy spots). Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα ζητήματα είναι η βέλτιστη κατανομή των διαύλων στις μικροκυψέλες και μακροκυψέλες.

Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική παρέχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την απλή αρχιτεκτονική των μικροκυψελών:

- Σταθμοί βάσης απαιτούνται μόνο σε περιοχές με υψηλό φορτίο. Υπάρχει οικονομία στο κόστος υποδομής, επειδή δε χρειάζεται να καλυφθεί όλη η περιοχή εξυπηρέτησης με μικροκυψέλες.
- Ο αριθμός των διαπομπών σε ένα σύστημα με πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική είναι μικρότερος από εκείνον ενός συστήματος με μικροκυψέλες, διότι τα ταχέως κινούμενα τερματικά μπορεί να συνδέονται στις υπερκείμενες μακροκυψέλες.

Έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι χρησιμοποίησης μικροκυψελών με υπερκείμενες μακροκυψέλες. Μία μέθοδος, η οποία ονομάζεται επιμερισμός της επαναχρησιμοποίησης (reuse partitioning), διαχωρίζει τους διαύλους σε δύο ορθογώνιες ομάδες, μία για τις μικροκυψέλες και μία για τις μακροκυψέλες, και χρησιμοποιείται για την αύξηση της χωρητικότητας ενός κυψελωτού συστήματος. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, δημιουργείται μια μικροκυψέλη στο εσωτερικό κάθε κυψέλης.

1.2.2.1.2 Ευφυείς κεραίες

Με τη χρήση ευφυών κεραιών στα κυψελωτά συστήματα είναι δυνατόν να επιτευχθεί σημαντική βελτίωση στη φασματική απόδοση, στον περιορισμό των παρεμβολών και στη χωρητικότητα. Οι ευφυείς κεραίες δε βελτιώνουν μόνο την επίδοση των κυψελωτών συστημάτων TDMA, αλλά και των CDMA καθώς και των ασυρμάτων δικτύων εσωτερικών χώρων. Υπάρχουν τρεις βασικές προσεγγίσεις όσον αφορά τη

σχεδίαση συστήματος, που χρησιμοποιούν ευφυείς κεραίες, οι οποίες ονομαστικά είναι: η χρησιμοποίηση κεραιών προσαρμοζόμενου κώνου σιγής (adaptive null steering), στοιχειοκεραιών (phased array) και κεραιών μεταγωγής λοβού (switched beam).

1.2.2.1.3 Χωρισμός κυψελών σε τομείς

Είναι μια πολύ κοινή μέθοδος, που εφαρμόζεται στα μακροκυψελικά συστήματα για αύξηση της χωρητικότητας και βελτίωσης της επίδοσής τους όσον αφορά την ομοδιαυλική παρεμβολή. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, κάθε κυψέλη χωρίζεται ακτινικά σε τομείς, χρησιμοποιώντας κατευθυντικές κεραίες στους σταθμούς βάσης. Οι δίαυλοι που κατανέμονται σε κάθε κυψέλη χωρίζονται σε ξένα μεταξύ τους υποσύνολα και κάθε υποσύνολο εκχωρείται σε έναν τομέα. Τα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα χρησιμοποιούν τομείς 120° και 60°.

Στην πράξη, η μείωση της παρεμβολής, που επιτυγχάνεται με το χωρισμό των κυψελών σε τομείς, βοηθά τους σχεδιαστές του συστήματος να μειώσουν τον συντελεστή επαναχρησιμοποίησης και παρέχει έναν πρόσθετο βαθμό ελευθερίας στην κατανομή διαύλων. Το αντίτιμο για τη βελτίωση του λόγου σήματος-προς-παρεμβολή είναι ο αυξημένος αριθμός κεραιών σε κάθε σταθμό βάσης, και η μείωση της απόδοσης συγκέντρωσης λόγω του χωρισμού των διαύλων του σταθμού βάσης σε ομάδες. Επειδή ο χωρισμός σε τομείς περιορίζει την περιοχή κάλυψης μιας συγκεκριμένης ομάδας διαύλων, αυξάνει επίσης και ο αριθμός διαπομπών. Ευτυχώς, πολλοί σύγχρονοι σταθμοί βάσης υποστηρίζουν την τεχνική του χωρισμού σε τομείς και επιτρέπουν τις διαπομπές των κινητών τερματικών από τομέα σε τομέα της ίδιας κυψέλης χωρίς να απασχολείται το κέντρο μεταγωγής κινητών επικοινωνιών, οπότε και το πρόβλημα των διαπομπών αυτών δεν αποτελεί μεγάλη ενόχληση.

1.2.2.1.4 Διάσπαση κυψελών

Η διάσπαση κυψέλης αναφέρεται στη διαδικασία κατάτμησης μιας κυψέλης σε μικρότερες κυψέλες. Πραγματοποιείται με την εγκατάσταση νέων και μικρότερων κυψελών σε συγκεκριμένες θέσεις στο κυψελωτό σύστημα. Με επανειλημμένες διασπάσεις των κυψελών μπορεί ένα κυψελωτό σύστημα να προσαρμοστεί, ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις κίνησης. Μεγάλες κυψέλες μπορεί να χρησιμοποιούνται σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές, ενώ μικρότερες σε αστικές περιοχές με μεγάλο φορτίο κίνησης. Μετά τη εισαγωγή των κυψελών διάσπασης, απαιτούνται αλλαγές στην κατανομή των διαύλων, ώστε οι κυψέλες διάσπασης να μην καταστρατηγούν τους κανόνες επαναχρησιμοποίησης.

1.2.2.1.5 Μικροκυψελικά συστήματα

Ένα άλλος τρόπος να αυξηθεί η απόδοση επαναχρησιμοποίησης είναι η υλοποίηση μικροκυψελικού συστήματος, που χρησιμοποιεί πολλές ισοτροπικές κεραίες σε κάθε

κυψέλη. Οι κυψέλες χωρίζονται σε ζώνες και η κεραία κάθε ζώνης τοποθετείται είτε στο κέντρο είτε στο άκρο της ζώνης. Οι κεραίες των ζωνών συνδέονται με οπτικές ίνες ή μικροκυματικές ζεύξεις σε κοινό σταθμό βάσης. Και οι τρεις κεραίες λαμβάνουν το σήμα από το κινητό τερματικό στον δίαυλο ανόδου, αλλά μόνο η κεραία της ζώνης που λαμβάνει το μεγαλύτερο άθροισμα σήματος συν παρεμβολής θα εκπέμψει προς το κινητό τερματικό στο δίαυλο καθόδου. Καθώς το κινητό τερματικό κινείται μεταξύ των ζωνών μιας κυψέλης, επιλέγεται μια νέα κεραία ζώνης να το εξυπηρετήσει στο δίαυλο καθόδου, δηλαδή δεν πραγματοποιείται διαπομπή μέσα στην ίδια κυψέλη. Αλλαγή διαύλου απαιτείται, ωστόσο, όταν το κινητό τερματικό μετακινείται μεταξύ κυψελών.

1.2.2.2 Υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών

Το δίκτυο κινητών επικοινωνιών πρέπει να παρέχει υπηρεσίες στους χρήστες ανεξάρτητα από τη θέση στην οποία αυτοί βρίσκονται και την κινητική τους κατάσταση. Σε περίπτωση εισερχόμενης κλήσης, για να αποκαταστήσει το δίκτυο την επικοινωνία προς τον καλούμενο κινητό χρήστη, πρέπει να έχει την υποδομή που μεριμνά, τόσο για τον προσδιορισμό του κατάλληλου σταθμού βάσης για την εξυπηρέτηση του καλούμενου, όσο και για τη δρομολόγηση της κλήσης.

Τα είδη κινητικότητας, που έχουν οριστεί από την ITU-T, είναι:

- *Κινητικότητα τερματικού:* υποδηλώνει τη δυνατότητα πρόσβασης ενός τερματικού κατά τρόπο, ώστε να μπορεί αυτό να κάνει χρήση των υπηρεσιών που παρέχουν τα δίκτυα κινητών τηλεπικοινωνιών, από διαφορετικά σημεία πρόσβασης και ενώ βρίσκεται σε κίνηση, καθώς επίσης και την ικανότητα του δικτύου να αναγνωρίζει και να εντοπίζει το τερματικό αυτό.

- *Κινητικότητα χρήστη:* υποδηλώνει τη δυνατότητα πρόσβασης ενός χρήστη σε οποιοδήποτε τερματικό οποιουδήποτε τηλεπικοινωνιακού δικτύου μέσω ενός προσωπικού τηλεπικοινωνιακού αριθμού (Personal Telecommunication Number, PTN), καθώς και τη δυνατότητα του δικτύου να παρέχει υπηρεσίες στον συγκεκριμένο χρήστη με βάση το προφίλ εξυπηρέτησης του χρήστη (user service profile). Προϋποθέτει τη δυνατότητα του δικτύου, λόγων ύπαρξης κατάλληλης διευθυνσιοδότησης (addressing), να εντοπίζει τον αντίστοιχο χρήστη στο τρέχον σημείο πρόσβασής του, να δρομολογεί τις κλήσεις που απευθύνονται σε αυτόν και να τον χρεώνει στον προσωπικό του λογαριασμό.

- *Κινητικότητα με SIM:* υποδηλώνει τη δυνατότητα ενός χρήστη να έχει πρόσβαση σε υπηρεσίες που παρέχει το δίκτυο κινητών επικοινωνιών, μέσω διαφόρων τερματικών, με τη χρήση του SIM. Το SIM (Subscriber Identity Module) είναι μια μικρή κάρτα, που εισάγεται στο κινητό τερματικό και περιέχει τα στοιχεία του χρήστη και τις απαραίτητες παραμέτρους για το δίκτυο.

Οι λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες:

- *Λειτουργίες που δεν σχετίζονται με την κλήση*

Οι λειτουργίες αυτές αφορούν τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται ανεξάρτητα από αν υπάρχει κλήση σε εξέλιξη και οι οποίες είναι:

- ✓ Διαδικασία ενημέρωσης θέσης
- ✓ Διαδικασία ενεργοποίησης τερματικού
- ✓ Διαδικασία απενεργοποίησης τερματικού
- ✓ Διαδικασία εγγραφής χρήστη
- ✓ Διαδικασία διαγραφής χρήστη

Οι παραπάνω διαδικασίες έχουν σκοπό να κρατούν ενήμερο το δίκτυο σχετικά με τη θέση των τερματικών που βρίσκονται σε λειτουργία, την παρούσα κατάσταση των τερματικών και την κατάσταση εγγραφής των χρηστών.

- *Λειτουργίες που σχετίζονται με την κλήση*

Οι λειτουργίες αυτές αφορούν τις διαδικασίες, οι οποίες ενεργοποιούνται μόνο σε περίπτωση εισερχόμενης κλήσης προς κάποιο κινητό τερματικό/ χρήστη. Ο σκοπός των διαδικασιών αυτών είναι ο εντοπισμός του σταθμού βάσης, στην περιοχή κάλυψης του οποίου βρίσκεται το καλούμενο τερματικό (χρήστης). Περιλαμβάνουν:

- ✓ Τη διαδικασία εντοπισμού δεδομένων και
- ✓ Τη διαδικασία αναζήτησης του τερματικού.

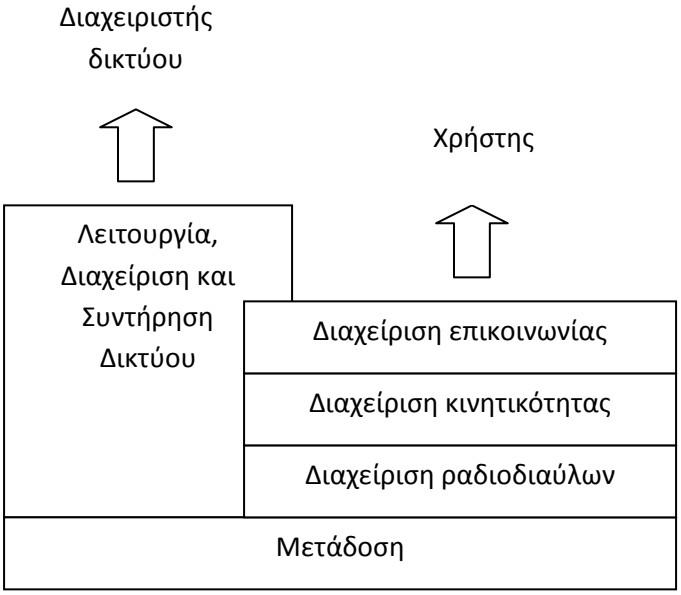
Μετά την εγκατάσταση μιας κλήσης με κινητό τερματικό, αναλαμβάνει η διαδικασία διαπομπής τη διατήρηση της επικοινωνίας μεταξύ του καλούμενου και του καλούντος.

1.2.2.3 Λειτουργική αρχιτεκτονική

Η λειτουργική αρχιτεκτονική προσδιορίζει τις λειτουργικές οντότητες του συστήματος, τα κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ αυτών των οντοτήτων και τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται μεταξύ τους. Οι υπηρεσίες που προσφέρονται από το δίκτυο κινητών επικοινωνιών προσδιορίζουν αυτήν ακριβώς την αρχιτεκτονική.

Ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος ομαδοποίησης των λειτουργιών ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου είναι η χρησιμοποίηση ενός μοντέλου αναφοράς. Οι λειτουργίες ομαδοποιούνται σε λειτουργικά στρώματα, που παριστάνονται το ένα τοποθετημένο πάνω στο άλλο. Το κατώτερο στρώμα αναφέρεται στη φυσική μετάδοση της

πληροφορίας μεταξύ απομακρυσμένων οντοτήτων και βασίζεται σε φυσικά μέσα, ενώ το ανώτερο στρώμα παριστάνει την άποψη των εξωτερικών χρηστών. Κάθε στρώμα παρέχει υπηρεσίες στο αμέσως ανώτερό του και οι υπηρεσίες αυτές είναι εκείνες που παρέχονται στο στρώμα από το αμέσως κατώτερό του αλλά βελτιωμένες.



Σχήμα 1.3. Λειτουργικό μοντέλο αναφοράς συστήματος κινητών επικοινωνιών.

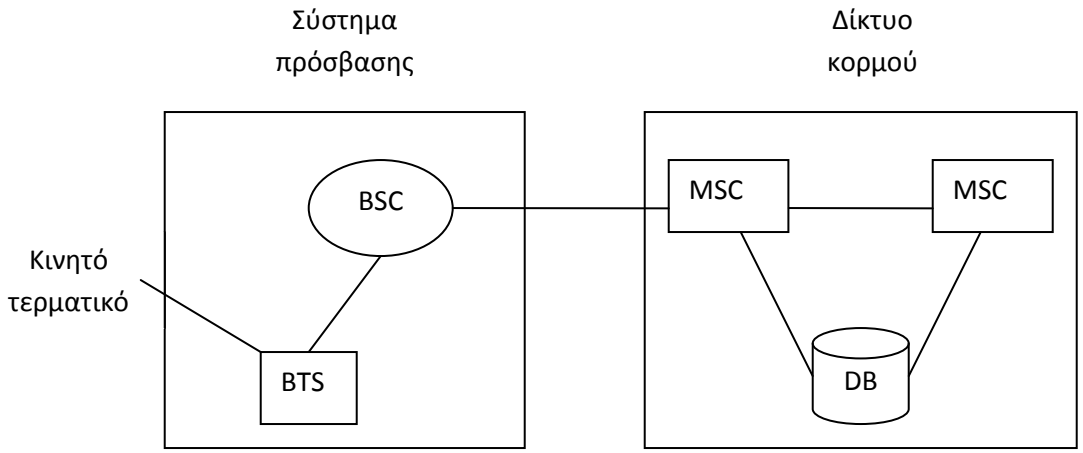
Ορίζονται πέντε κυρίως λειτουργικά στρώματα: το στρώμα μετάδοσης (Physical Layer, PL), το στρώμα διαχείρισης ραδιοδιαύλων (Radio Resource management layer, RR), το στρώμα διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management, MM), το στρώμα διαχείρισης επικοινωνίας (Communication Management, CM) και το στρώμα λειτουργίας, διαχείρισης και συντήρησης δικτύου (Operation, Administration and Maintenance layer, OAM).

Πέρα από αυτήν την ιεραρχική δομή, που βασίζεται στις υπηρεσίες οι οποίες παρέχονται από το ένα στρώμα στο άλλο, υπάρχει έμμεσα και χρονική ιεραρχία στο μοντέλο αναφοράς, υπό την έννοια ότι στα κατώτερα στρώματα αντιστοιχούν λειτουργίες μικρότερης χρονικής διάρκειας, ενώ τα ανώτερα στρώματα ομαδοποιούν λειτουργίες μεγαλύτερης διάρκειας. Σε κάθε στρώμα οι ομότιμες οντότητες συνεργάζονται για να παράσχουν την απαιτούμενη υπηρεσία, ανταλλάσσοντας μεταξύ τους πληροφορίες. Οι κανόνες για τις ανταλλαγές των πληροφοριών καθορίζονται στα σημεία αναφοράς. Οι κανόνες αυτοί είναι τα πρωτόκολλα σηματοδοσίας.

1.2.2.4 Φυσική αρχιτεκτονική

Η φυσική αρχιτεκτονική του δικτύου κινητών επικοινωνιών αφορά κυρίως την ομαδοποίηση των λειτουργιών του δικτύου σε φυσικές οντότητες. Το δίκτυο μπορεί να διαιρεθεί σε τρία μέρη:

- ✓ το κινητό τερματικό (mobile terminal, MT),
- ✓ το σύστημα πρόσβασης, το οποίο είναι ένα Σύστημα Σταθμών Βάσης (base station system, BSS) και περιλαμβάνει τον Ελεγκτή σταθμών βάσης (base station controller, BSC) και τους αντίστοιχους Σταθμούς βάσης (base transceiver stations, BTS)
- ✓ το δίκτυο κορμού, το οποίο περιλαμβάνει τα Κέντρα μεταγωγής κινητών επικοινωνιών (Mobile Switching Centre, MSC) και τη βάση δεδομένων (database, DB).



Σχήμα 1.4. Φυσική αρχιτεκτονική δικτύου κινητών επικοινωνιών.

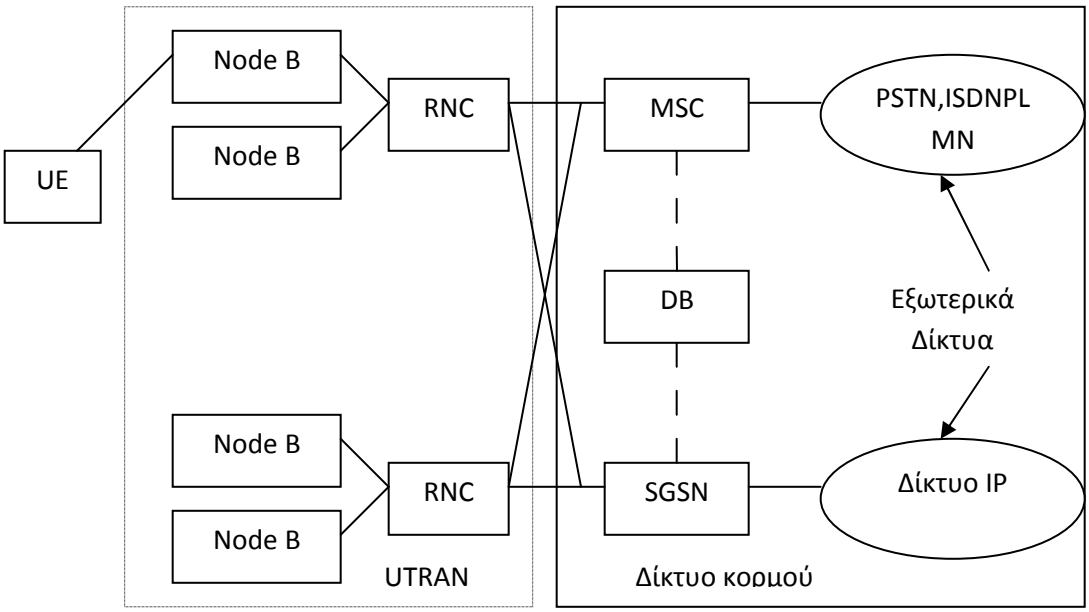
1.2.2.4.1 Φυσική αρχιτεκτονική συστημάτων 3G

Η διαφοροποίηση της φυσικής αρχιτεκτονικής ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς (πχ. UMTS) από εκείνη των δικτύων 2^{ης} γενιάς έγκειται στο γεγονός ότι τα συστήματα 3^{ης} γενιάς υποστηρίζουν και υπηρεσίες με μεταγωγή κυκλώματος και υπηρεσίες με μεταγωγή πακέτου. Το δίκτυο μπορεί να διαιρεθεί σε τρία μέρη:

- ✓ Τη συσκευή χρήστη (user equipment, UE)
- ✓ Το UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network), το οποίο αποτελείται από έναν ελεγκτή ασυρμάτου δικτύου (Radio Network Controller, RNC), ο οποίος συνδέεται σε κόμβους B (node B), που είναι αντίστοιχοι των

σταθμών βάσης της αρχιτεκτονικής δικτύων 2ης γενιάς. Κάθε κόμβος RNC ελέγχει μια ομάδα κυψελών. Οι RNC συνδέονται απευθείας, γεγονός που επιτρέπει την πλήρη διαχείριση της διαπομπής. Το Node B μετατρέπει τις ροές δεδομένων μεταξύ των UE και RNC. Συμμετέχει επίσης στη διαχείριση των ασυρμάτων πόρων. Ο RNC έχει τη δικαιοδοσία και τον έλεγχο των ασυρμάτων πόρων της περιοχής του και είναι το σημείο πρόσβασης υπηρεσίας για όλες τις υπηρεσίες που παρέχει το UTRAN στο δίκτυο κορμού.

- ✓ Το δίκτυο κορμού, το οποίο περιλαμβάνει βελτιωμένα στοιχεία των δικτύων 2ης γενιάς (GSM/GPRS). Συγκεκριμένα, το δίκτυο μεταγωγής στον κορμό αποτελείται από δύο μέρη: το ένα που προορίζεται για υπηρεσίες με μεταγωγή κυκλώματος και το άλλο που προορίζεται για υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Το στοιχείο MSC είναι το γνωστό κέντρο μεταγωγής των συστημάτων 2ης γενιάς (GSM). Η λειτουργία του SGSN είναι παρόμοια με εκείνη MSC, αλλά χρησιμοποιείται για υπηρεσίες μεταγωγής πακέτου. Η βάση δεδομένων (DB) είναι όπως και στα συστήματα 2ης γενιάς.



Σχήμα 1.5. Φυσική αρχιτεκτονική δικτύου του UMTS.

1.2.3 Κυψελωτά δίκτυα CDMA

Τα κυψελωτά δίκτυα CDMA χρησιμοποιούν την ίδια ζώνη συχνοτήτων σε όλες τις κυψέλες. Τούτο είναι βέβαια αντίθετο με ό,τι συμβαίνει στα δίκτυα που χρησιμοποιούν άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, στα οποία επαναχρησιμοποιούνται οι ίδιες συχνότητες σε κυψέλες που απέχουν επαρκώς μεταξύ τους προς αποφυγή της ομοδιαυλικής παρεμβολής. Για να είναι δυνατή η σύγκριση των δικτύων CDMA με τα άλλα

δίκτυα, η χωρητικότητά τους ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός χρηστών (τερματικών) σε ένα δίκτυο με πολλές κυψέλες, αντί του αριθμού των χρηστών ανά μονάδα εύρους ζώνης ή του αριθμού των χρηστών ανά μεμονωμένη κυψέλη.

Τα συστήματα CDMA περιορίζονται από τις παρεμβολές και η επίδοση της ασύρματης ζεύξης εξαρτάται από την ικανότητα του δέκτη να αποδιαμορφώσει ένα σήμα παρουσία παρεμβολής. Το κύριο σχεδιαστικό θέμα στα δίκτυα CDMA είναι η ελαχιστοποίηση της παρεμβολής πολλαπλής πρόσβασης και ο ρόλος του ελέγχου ισχύος για τον περιορισμό της παρεμβολής αυτής είναι καθοριστικός. Επίσης, επειδή σε όλες τις κυψέλες των συστημάτων CDMA χρησιμοποιείται το ίδιο φάσμα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η διακυψελική παρεμβολή, μειώνοντας έτσι τη χωρητικότητα στη ζεύξη ανόδου. Η επίδραση αυτή λαμβάνεται υπόψη με το συντελεστή ξ (ή ζ αναλόγως τη βιβλιογραφία). Η παρεμβολή από άλλες κυψέλες καθορίζει τον πραγματικό συντελεστή επαναχρησιμοποίησης σε ένα σύστημα CDMA. Ο συντελεστής ξ είναι δύσκολο να υπολογιστεί, διότι ο σταθμός βάσης κάθε κυψέλης μπορεί μεν να ελέγχει την ισχύ εκπομπής των δικών της τερματικών, αλλά δεν μπορεί να ελέγχει την ισχύ των τερματικών των γειτονικών κυψελών. Το ξ εξαρτάται από τη γεωμετρία της υπόψη κυψέλης και των γειτονικών κυψελών. Η τιμή του είναι μικρή, αν η ακτίνα της κυψέλης είναι μεγάλη και αν ο εκθέτης απωλειών διαδρομής έχει μεγάλη τιμή ή η τυπική απόκλιση των απωλειών διαδρομής είναι μικρή.

Το ενεργό μέγεθος μιας κυψέλης CDMA, εκφραζόμενο ως ακτίνα κύκλου, είναι η μέγιστη απόσταση στην οποία η ζεύξη ανόδου ή καθόδου μπορούν να λειτουργήσουν αξιόπιστα. Η μέγιστη απόσταση για δοθείσα ραδιοζεύξη είναι ισοδύναμη με κάποια μέγιστη τιμή απωλειών διαδρομής, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί κατά τρόπο, ώστε το λαμβανόμενο σήμα να έχει επαρκή ισχύ για να διακρίνεται από τις παρεμβολές και το θόρυβο. Σημειώνεται ότι η πραγματική ακτίνα της κυψέλης CDMA μπορεί να είναι διαφορετική στη ζεύξη ανόδου απ' ότι στη ζεύξη καθόδου και μπορεί να εξαρτάται και από την κατεύθυνση προς και από το σταθμό βάσης, λόγω του φαινομένου της σκίασης. Γενικά, υπάρχουν περισσότερες παρεμβολές στη ζεύξη ανόδου, οπότε το μέγεθος της κυψέλης στη ζεύξη καθόδου τείνει να είναι μεγαλύτερο από εκείνο της ζεύξης ανόδου, για την ίδια εκπεμπόμενη ισχύ. Συνεπώς καταβάλλεται προσπάθεια να ισοσταθμιστούν οι ζεύξεις ανόδου και καθόδου με κατάλληλες ρυθμίσεις της ισχύος και άλλων παραμέτρων, ώστε οι μέγιστες ανεκτές απώλειες διαδρομής να γίνουν περίπου ίσες και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των συστημάτων CDMA, που προσφέρουν επιπρόσθετη χωρητικότητα στη ζεύξη ανόδου, είναι η ήπια διαπομπή. Σύμφωνα με αυτή, ένα κινητό τερματικό μπορεί να εξυπηρετείται από πολλές κυψέλες ταυτόχρονα. Ωστόσο, η ήπια διαπομπή επιβαρύνει τη ζεύξη καθόδου, διότι απαιτούνται επιπρόσθετοι ασύρματοι πόροι στις ζεύξεις καθόδου των άλλων κυψελών για την εξυπηρέτηση του ίδιου τερματικού. Η επίδοση της ζεύξης καθόδου διαφέρει κατά πολύ από εκείνη της ζεύξης ανόδου για του εξής λόγους:

- ✓ Η πρόσβαση είναι ένας προς πολλά αντί πολλά προς ένα.

- ✓ Ο συγχρονισμός και η ομόδυνη φώραση διευκολύνονται από τη χρήση ενός κοινού πιλοτικού διαύλου.
- ✓ Η παρεμβολή προέρχεται από λίγες συγκεντρωμένες μεγάλες πηγές (σταθμούς βάσης άλλων κυψελών) παρά από πολλές κατανεμημένες μικρές πηγές (κινητά τερματικά)

Για να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα της ζεύξης καθόδου, είναι ουσιαστικής σημασίας να υπάρχει έλεγχος ισχύος στην κυψέλη, ώστε να εκχωρείται ισχύς στα τερματικά ανάλογα με τις ανάγκες τους. Τα τερματικά που δέχονται υψηλότερη παρεμβολή από τις γειτονικές κυψέλες θα λαμβάνουν και τη μεγαλύτερη ισχύ. Τα τερματικά στα όρια της κυψέλης μπορεί να βρίσκονται σε κατάσταση ήπιας διαπομπής και να εξυπηρετούνται από δύο ή περισσότερες κυψέλες. Ο έλεγχος ισχύος επιτυγχάνεται μετρώντας την ισχύ που λαμβάνεται στο κινητό τερματικό από το σταθμό βάσης της κυψέλης εξυπηρέτησης και τη συνολική λαμβανόμενη ισχύ και στέλνοντας τη σχετική πληροφορία στο σταθμό βάσης της κυψέλης εξυπηρέτησης.

Για τη ζεύξη καθόδου χρησιμοποιείται ένας δείκτης αξιολόγησης (figure of merit) για κάθε ένα είδος διαύλου μιας κυψέλης. Ο δείκτης αυτός ισούται με τη διαφορά της λαμβανόμενης τιμής $(E_b / I_t)_r$ στον πιλοτικό δίαυλο και της προδιαγραφόμενης τιμής $(E_b / I_t)_0$.

1.3 Πολλαπλή Πρόσβαση

Η πολλαπλή πρόσβαση παρέχει τα μέσα για την αποτελεσματική πρόσβαση στους ασύρματους πόρους που αντιστοιχούν σε κάθε κυψέλη. Μια καλή τεχνική πολλαπλής πρόσβασης μπορεί να βελτιώσει τη χωρητικότητα του συστήματος, να ελαττώσει το κόστος του συστήματος και να κάνει τις υπηρεσίες περισσότερο ελκυστικές προς τους χρήστες. Πρέπει να είναι ευέλικτη, με την έννοια της εξυπηρέτησης ολοκληρωμένων υπηρεσιών και της δυνατότητας αντιμετώπισης της περιαγωγής, να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ποιότητας εξυπηρέτησης των υπηρεσιών, και, τέλος, να μεγιστοποιεί τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται για το εύρος ζώνης συχνοτήτων που διατίθεται.

Στο ασύρματο περιβάλλον, τα μεταδιδόμενα σήματα υπόκεινται σε πολλές παρεμβολές, διαλείψεις ή σκιάσεις. Η επιθυμητή τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης θα πρέπει να είναι απαθής σε όλες αυτές τις διαταραχές. Επίσης, το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο, και γενικά πολύ μικρότερο από εκείνο του αντίστοιχου ενσύρματου συστήματος. Για αυτό και χρειάζεται ένα πολύ προσεγμένο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης.

Οι κύριες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης με σταθερή εκχώρηση διαύλου είναι η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA), η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) και η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA). Δευτερεύουσες τεχνικές είναι η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης πόλωσης (Polarisation Division Multiple Access, PDMA) και η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χώρου (Space

Division Multiple Access, SDMA). Με εξαίρεση την PDMA, όλες οι άλλες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης χρησιμοποιούνται και στις κινητές επικοινωνίες.

Ανάλογα με το μέγεθος του συντονισμού, που απαιτείται για την εκχώρηση των πόρων, τα σχήματα πολλαπλής πρόσβασης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τύπους, την τυχαία πρόσβαση, τη σταθερή εκχώρηση και την εκχώρηση ανάλογα με τη ζήτηση. Παρακάτω περιγράφονται τα βασικά σχήματα πολλαπλής πρόσβασης, με ιδιαίτερη έμφαση στην τεχνολογία CDMA.

1.3.1 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA)

Στην πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας (FDMA), εκχωρείται μια μοναδική συχνότητα- ραδιοδίαυλος σε κάθε χρήστη που θέλει να εξυπηρετηθεί. Κατά τη διάρκεια της κλήσης δεν μπορεί άλλος χρήστης να χρησιμοποιήσει την ίδια συχνότητα. Σε συστήματα με αμφιδρόμηση συχνότητας (Frequency Division Duplexing, FDD) εκχωρείται στους χρήστες ζεύγος συχνοτήτων, μια συχνότητα για κάθε κατεύθυνση. Με αυτήν τη σταθερή εκχώρηση, η λογική του ελέγχου είναι απλή, με αντάλλαγμα όμως τη χαμηλή απόδοση και τη χωρητικότητα του συστήματος [2], [6], [9].

Για να βελτιωθεί η χωρητικότητα, εισάγονται οι έννοιες της κυψελωτής/ μικροκυψελωτής δομής και της επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων. Ωστόσο τα καθοριστικά μειονεκτήματα της FDMA, όπως είναι η χαμηλή απόδοση φάσματος, η αδυναμία της σε βλάβες των καναλιών και η μη αποτελεσματικότητά της σε υπηρεσίες πολυμέσων/ πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης, την καθιστούν ακατάλληλη για συστήματα επικοινωνιών υψηλής χωρητικότητας. Το εύρος ζώνης των διαύλων FDMA είναι σχετικά μικρό (30kHz) και, κατά συνέπεια, το FDMA δεν χρησιμοποιείται σε συστήματα ευρείας ζώνης. Η διάρκεια μετάδοσης συμβόλου είναι μεγάλη συγκρινόμενη με τη μέση εξάπλωση καθυστέρησης, γεγονός που συνεπάγεται ότι η διασυμβολική παρεμβολή είναι μικρή, οπότε δεν απαιτείται ή απαιτείται ελάχιστη εξισορρόπηση στα συστήματα FDMA ευρείας ζώνης. Τα συστήματα FDMA έχουν ακριβότερους σταθμούς βάσης σε σύγκριση με τα TDMA, διότι έχουν ένα δίαυλο ανά φέρον, πολλοί δίαυλοι χρησιμοποιούν την ίδια κεραία στο σταθμό βάσης και είναι ανάγκη να χρησιμοποιούνται ακριβά ζωνοπερατά φίλτρα για να περιορίζεται η παρασιτική ακτινοβολία στον σταθμό βάσης. Επίσης, η μη γραμμικότητα των ενισχυτών προκαλεί εξάπλωση των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας και παράγει συχνότητες ενδοδιαμόρφωσης, οι οποίες μπορεί να παρεμβάλλουν σε άλλους διαύλους του συστήματος. Οι αρμονικές, που κείνται έξω από τη ζώνη συχνοτήτων του συστήματος, παρεμβάλλουν σε υπηρεσίες που χρησιμοποιούν το γειτονικό φάσμα, ενώ αυτές που βρίσκονται μέσα στη ζώνη προκαλούν παρεμβολή σε άλλους χρήστες του συστήματος. Το κινητό τερματικό FDMA χρησιμοποιεί σύστημα ελέγχου της ταυτόχρονης εκπομπής και λήψης στους διαύλους, γεγονός που συντελεί στην αύξηση του κόστους. Η πρόσβαση FDMA χρησιμοποιείται κυρίως στα κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς. Πρόσφατα, χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα TDMA ή CDMA σχήματα με σκοπό την περαιτέρω

βελτίωση της χωρητικότητας του συστήματος, εφαρμόζοντας επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων.

Ο αριθμός των διαύλων που μπορούν να εξυπηρετηθούν ταυτόχρονα από το σύστημα FDMA δίνεται από τη σχέση:

$$C_{o\lambda} = \frac{B_S - 2B_G}{W} \quad \textbf{(1.6)}$$

όπου B_S είναι το συνολικό φάσμα που διατίθεται στο σύστημα, B_G είναι το εύρος ζώνης ασφαλείας που υπάρχει εκατέρωθεν του διατιθέμενου φάσματος, και W είναι το εύρος ζώνης κάθε διαύλου.

1.3.2 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA)

Στα συστήματα που χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (TDMA), το διατιθέμενο φάσμα χωρίζεται σε χρονοσχισμές (timeslots) και σε κάθε χρονοσχισμή επιτρέπεται μόνο σε έναν χρήστη είτε να εκπέμψει είτε να λάβει. Στον χρήστη που θέλει να επικοινωνήσει εκχωρείται μια μοναδική χρονοσχισμή στο πλαίσιο TDMA, μέσω του διαύλου ελέγχου. Αυτή η σχισμή μπορεί να κρατηθεί από το χρήστη μέχρι το τέλος της επικοινωνίας του.

Σε αντίθεση με τα συστήματα FDMA, όπου χρησιμοποιείται αναλογική μετάδοση FM, στα συστήματα TDMA χρησιμοποιούνται ψηφιακά δεδομένα και ψηφιακή διαμόρφωση. Οι μεταδιδόμενες πληροφορίες από διάφορους χρήστες πολυπλέκονται σε ένα επαναλαμβανόμενο πλαίσιο TDMA. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από το προοίμιο (preamble), το οποίο περιέχει τη διεύθυνση και την πληροφορία συγχρονισμού (επιβάρυνση), το μήνυμα πληροφορίας και τον επίλογο (trail bits).

Ο αριθμός των χρονοσχισμών ανά πλαίσιο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η τεχνική διαμόρφωσης, το διαθέσιμο εύρος ζώνης και πολλούς άλλους.. Η μετάδοση δεν είναι συνεχής, αλλά εμφανίζεται με ριπές. Τούτο έχει ως συνέπεια τη μεγαλύτερη διάρκεια της μπαταρίας του κινητού τερματικού. Επίσης, λόγω της μη συνεχούς μετάδοσης, η διαδικασία της διαπομπής είναι πολύ ευκολότερη, καθότι το κινητό τερματικό μπορεί να ακούει άλλους σταθμούς βάσης κατά τη διάρκεια των αδρανών χρονοσχισμών. Η TDMA χρησιμοποιεί διαφορετικές χρονοσχισμές για εκπομπή και για λήψη, οπότε δε χρειάζεται περαιτέρω σύστημα για το διαχωρισμό των δύο ζεύξεων. Προσαρμοζόμενη εξισορρόπηση χρειάζεται συχνά σε συστήματα TDMA, διότι οι ρυθμοί μετάδοσης είναι γενικά πολύ υψηλοί σε σύγκριση με εκείνους των διαύλων FDMA.

Ο αριθμός των διαύλων, που μπορεί να παρέχει ένα σύστημα TDMA, βρίσκεται πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό m των σχισμών ανά ραδιοδίαυλο με τον αριθμό των διαθέσιμων ραδιοδιαύλων:

$$C_{o\lambda} = \frac{m(B_S - 2B_G)}{W} \quad \textbf{(1.7)}$$

όπου B_S είναι το συνολικό φάσμα που διατίθεται στο σύστημα, B_G είναι το εύρος ζώνης ασφαλείας που υπάρχει εκατέρωθεν του διατιθέμενου φάσματος, και W είναι το εύρος ζώνης κάθε διαύλου.

Πρωτόκολλα που βασίζονται στο TDMA χρησιμοποιούνται στα κυψελωτά συστήματα 2^{ης} γενιάς, όπως είναι το GSM στην Ευρώπη (με εναλλακτική λύση την αργή μεταπήδηση συχνότητας), το ADC στη Βόρεια Αμερική και το JDC στην Ιαπωνία. Το TDMA μπορεί εύκολα να υλοποιήσει ολοκληρωμένες υπηρεσίες, αν εφαρμοστεί η πολιτική της ευέλικτης εκχώρησης σχισμών. Ωστόσο, και το TDMA πάσχει από το ίδιο πρόβλημα μη αποτελεσματικότητας, όπως το FDMA. Για να επιτευχθεί υψηλή χωρητικότητα στο σύστημα, χρειάζονται σημαντικές τροποποιήσεις.

1.3.3 Πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα (Code Division Multiple Access, CDMA)

1.3.3.1 Βασικές αρχές του CDMA

Η τεχνολογία CDMA βασίζεται σε τεχνικές εξάπλωσης φάσματος (spread spectrum – SS techniques) και έχει εξελιχθεί πλέον σε μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης στα σύγχρονα κυψελωτά συστήματα τηλεπικοινωνιών, όπως αντικατοπτρίζεται και από το γεγονός ότι σχεδόν όλα τα 3G (3rd Generation) standards βασίζονται σε CDMA τεχνολογίες [2], [6], [9].

Οι τεχνικές εξάπλωσης φάσματος παρέχουν έναν τρόπο επέκτασης- εξάπλωσης του φάσματος των μεταδιδόμενων σημάτων, έτσι ώστε αυτά να αποκτήσουν κάποια πλεονεκτήματα, που είναι μάλλον αδύνατον να αποκτηθούν διατηρώντας το συγκεκριμένο αρχικό φάσμα των μεταδιδόμενων σημάτων. Εξάλλου, με την εξάπλωση φάσματος είναι δυνατόν να επιτευχθούν και άλλα σημαντικά οφέλη, όπως η δυνατότητα πολλών χρηστών να μοιράζονται το ίδιο τηλεπικοινωνιακό μέσο ταυτόχρονα, τόσο στο χρόνο όσο και στη συχνότητα, χωρίς να εισάγεται σημαντική παρεμβολή μεταξύ τους.

Τα κύρια χαρακτηριστικά της τεχνολογίας CDMA είναι τα ακόλουθα:

- Δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης.
- Προστασία από παρεμβολές λόγω πολλαπλών διαδρομών (multipath interference).
- Προστασία πληροφορίας (Privacy).
- Απόρριψη παρεμβολών.
- Προστασία έναντι κακόβουλων παρεμβολών (jamming).
- Μικρή πιθανότητα υποκλοπών (interception).
- Δυνατότητα συνύπαρξης με τα υπάρχοντα ραδιο-συστήματα.
- Μικρή εκπεμπόμενη ισχύς (σημαντικό για λόγους υγείας).

Είναι φανερό ότι, λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών του, το CDMA αποτελεί μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης για τα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς (2G-3G) ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, με ευρείες εφαρμογές σε πολλά τηλεπικοινωνιακά standards, όπως τα IS-95, cdma2000, UMTS-UTRA, WCDMA και TD-SCDMA, που προτάθηκαν από την TIA/EIA των ΗΠΑ (IS-95, cdma2000), την ETSI της Ευρώπης (UMTS-UTRA), την ARIB της Ιαπωνίας (WCDMA) και την CATT της Κίνας (TD-SCDMA) αντίστοιχα. Επίσης, έχει εισαχθεί ένας νέος τύπος τεχνολογίας CDMA και σε κάποιο άλλο standard, που ξεκίνησε από την Κίνα, το οποίο ονομάζεται TD-LAS. Είναι πιθανό το CDMA να εξακολουθήσει να αποτελεί βασική air-link αρχιτεκτονική και για B3G (Beyond 3rd Generation) συστήματα ασύρματων επικοινωνιών, παρόλο που κάποιες άλλες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης έχουν κερδίσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας, όπως το OFDMA και κάποιες ανανεωμένες εκδοχές του TDMA.

Όπως δηλώνει και ο όρος CDMA, σε αντίθεση με τις τεχνικές FDMA (frequency division multiple access- πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης συχνότητας) και TDMA (time division multiple access- πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου), το CDMA είναι μια τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, η οποία διαιρεί του χρήστες με βάση την ορθογωνιότητα (quadrature) ή την σχεδόν-ορθογωνιότητα (quasi-quadrature) των διάφορων κωδίκων.

Υπάρχουν τρεις βασικοί πρωταρχικοί τύποι της τεχνολογίας CDMA, που έχουν μελετηθεί διεξοδικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες:

- το CDMA ευθείας ακολουθίας (Direct Sequence-DS CDMA),
- το CDMA μεταπήδησης συχνότητας (Frequency hopping-FH CDMA) και
- το CDMA μεταπήδησης χρόνου (Time Hopping –TH CDMA).

Κάθε χρήστης στο DS-CDMA, που είναι και το πιο απλό και διαδεδομένο στη χρήση του, χρησιμοποιεί έναν κώδικα για να εξαπλωθεί η ροή πληροφορίας του άμεσα με πολλαπλασιασμό ή με modulo-2 πρόσθεση.

Το FH-CDMA χρησιμοποιεί έναν multi-tone ταλαντωτή για να παράγει πολλαπλές διακριτές φέρουσες συχνότητες. Κάθε χρήστης στο σύστημα επιλέγει ένα ξεχωριστό μοτίβο αναπήδησης συχνότητας ανάμεσα στα φέροντα σήματα, που υπακούουν σε μια συγκεκριμένη ακολουθία, η οποία θα πρέπει να είναι ορθογωνική ή περίπου- ορθογωνική προς τις υπόλοιπες. Ανάλογα με το ρυθμό μεταπήδησης σε σχέση με το ρυθμό δεδομένων, το FH-CDMA μπορεί να διαιρεθεί σε δύο υποκατηγορίες:

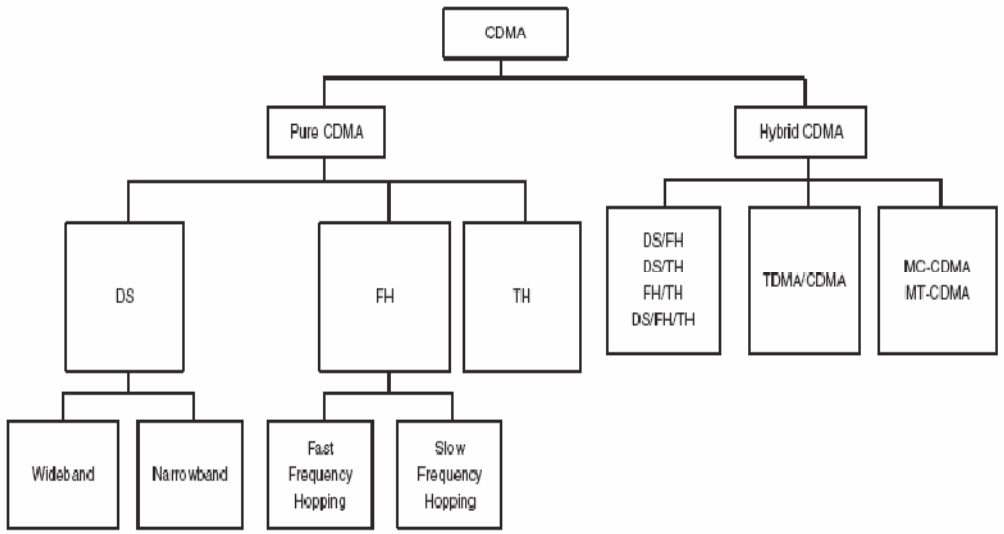
- FH-CDMA με αργές μεταπηδήσεις (slow hopping FH-CDMA)
- FH-CDMA με γρήγορες μεταπηδήσεις (fast hopping FH-CDMA)

Η πλειοψηφία των FH-CDMA συστημάτων χρησιμοποιεί το slow hopping σχήμα. Ένα τυπικό παράδειγμα εφαρμογής του slow hopping FH-CDMA είναι το GSM σύστημα, το οποίο είναι ψηφιακή τεχνολογία 2G βασισμένη στο TDMA.

Το TH-CDMA χρησιμοποιείται πολύ λιγότερο από τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, κυρίως εξαιτίας των δυσκολιών εφαρμογής του και το κόστος σε υλικό

(hardware) σε σχέση με τον εκπομπό, ο οποίος θα πρέπει να παρέχει εξαιρετικά μεγάλο και δυναμικό εύρος. Η τεχνολογία ultra-wideband (UWB) μπορεί να θεωρηθεί και ως ένας τύπος TH-CDMA συστήματος.

Επιπλέον, υπάρχουν και πολλά άλλα υβριδικά CDMA σχήματα, που μπορούν να προκύψουν από διάφορους συνδυασμούς των τεχνικών DS,FH και TH, μαζί με multi-carrier (MC) και multi-tone (MT) τεχνικές. Παρακάτω δίνεται το δέντρο διαφόρων μορφών CDMA τεχνολογιών:



Σχήμα 1.6. Δέντρο CDMA τεχνολογιών.

Η συγκεκριμένη εργασία, όσον αφορά στη διεξαγωγή των προσομοιώσεων, χρησιμοποιεί την τεχνική DS-CDMA. Φυσικά, τα εξαγόμενα συμπεράσματα μπορούν να επεκταθούν και σε άλλα CDMA σχήματα. Παρακάτω δίδονται περισσότερες λεπτομέρειες, όσον αφορά τους τρεις βασικούς τύπους της CDMA τεχνολογίας, με ιδιαίτερη έμφαση στην DS-CDMA τεχνική.

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του CDMA είναι ότι επιτρέπει σε όλους τους χρήστες να στέλνουν πληροφορία ταυτόχρονα στην ίδια ζώνη συχνοτήτων και την ίδια χρονική διάρκεια, χρησιμοποιώντας διαφορετικούς κώδικες. Για αυτό το λόγο, είναι προφανές ότι η ορθογωνιότητα ή η σχεδόν-ορθογωνιότητα μεταξύ των κωδίκων ή των ακολουθιών παίζουν σημαντικό ρόλο. Συγκεκριμένα, ο ρόλος των κωδίκων- ακολουθιών συνίσταται στα εξής:

- Δρουν ως κώδικες υπογραφής για να επιτευχθεί η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα.
- Εξαπλώνουν τα bits δεδομένων (εξάπλωση φάσματος) για να επιτευχθεί ένα δεδομένο κέρδος επεξεργασίας (processing gain)

Επισημαίνεται ότι οι δύο παραπάνω ρόλοι δεν αφορούν πάντα την ίδια ακολουθία. Για παράδειγμα, στα κανάλια άνω ζεύξης IS-95A/B, οι κώδικες υπογραφής είναι ακολουθίες μήκους m και οι κώδικες εξάπλωσης είναι 64-Walsh- Hadamard συναρτήσεις. Από την άλλη, στην κάτω ζεύξη του IS-95A/B standard, χρησιμοποιούνται 64-Walsh- Hadamard ακολουθίες, τόσο σαν κώδικες εξάπλωσης, όσο και σαν κώδικες υπογραφής, χάρη στις σύγχρονες εκπομπές στα κανάλια κάτω ζεύξης.

Έτσι, προκύπτει σαν ερώτημα γιατί το CDMA είναι η πιο δημοφιλής τεχνολογία για ασύρματα συστήματα 2G,3G,ίσως και για B3G. Οι κύριοι λόγοι συνοψίζονται παρακάτω:

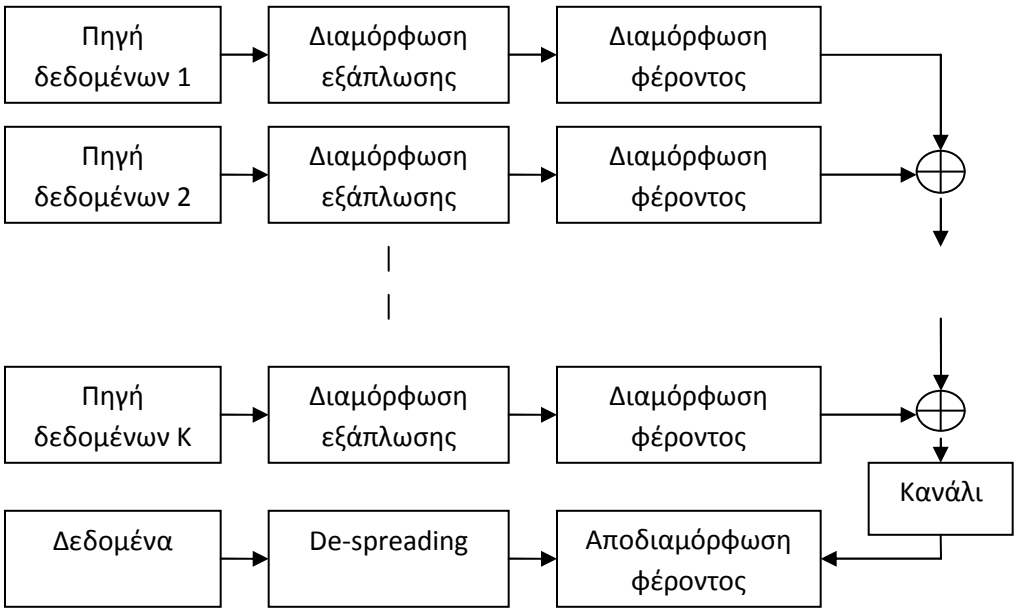
- Πρώτον, μέχρι στιγμής το CDMA είναι μια από τις τεχνολογίες (η άλλη είναι το OFDMA, που χρησιμοποιείται και για αντιμετώπιση της διασυμβολικής παρεμβολής λόγω πολύοδης διάδοσης) που μπορεί να μετριάσει την παρεμβολή λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath interference, MI) με αποτελεσματικό τρόπο, χωρίς τη χρήση πολύπλοκων υπο-συστημάτων, όπως γίνεται στα FDMA και CDMA.
- Δεύτερον, μπορεί να παρέχει καλύτερη χωρητικότητα από τα FDMA και CDMA σχήματα, ικανοποιώντας της αυξανόμενη ζήτηση για κινητές κυψελωτές εφαρμογές.
- Τρίτον, η συνολική αποδοτικότητα εύρους ζώνης ενός CDMA συστήματος είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των συμβατικών τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης, δίνοντας έτσι ένα μεγάλο κίνητρο σε κάποιον να το χρησιμοποιήσει λόγω του μεγάλου κόστους του φάσματος.
- Τέλος, η σχετικά χαμηλή ισχύς εκπομπής ενός CDMA πομπού δίνει τη δυνατότητα στα CDMA συστήματα να μπορούν να συνυπάρχουν με υπάρχοντα ραδιο-συστήματα σε λειτουργία, χωρίς να εισάγεται σημαντική παρεμβολή μεταξύ τους.

Από την άλλη, οι δύο βασικοί παράγοντες που περιορίζουν τη χωρητικότητα και την απόδοση ενός CDMA συστήματος, συμπεριλαμβανομένου των τεχνολογιών 2G και 3G, είναι η παρεμβολή λόγω πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference, MAI) και η παρεμβολή λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης (Multipath Interference, MI). Ερωτήματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα: (1) Αν η απόδοση ενός CDMA συστήματος θα πρέπει να περιορίζεται μόνο σε θέματα παρεμβολής, (2) Γιατί ένα CDMA σύστημα θα πρέπει να λειτουργεί με τόσο πολύπλοκα βοηθητικά υποσυστήματα, όπως ο έλεγχος ισχύος ανοιχτού και κλειστού βρόχου, ο RAKE δέκτης, αλγόριθμοι ταιριάσματος ρυθμών, έλεγχος συγχρονισμού άνω ζεύξης, ανίχνευση πολλαπλών χρηστών και ούτω καθεξής, (3) Αν μπορεί το CDMA να απαλλαχθεί από όλα τα παραπάνω πολύπλοκα υποσυστήματα, ώστε να είναι πιο απλό και με καλύτερη απόδοση.

Πολλοί πιστεύουν ότι ποτέ δεν θα προκύψει ένα CDMA σύστημα χωρίς παρεμβολές. Με βάση την εξέλιξη από τις σημερινές 2G και 3G στις επόμενης γενιάς

τεχνολογίες, με ιδιαίτερη ικανότητα στην αντιμετώπιση των MIA και MI παρεμβολών, μπορούν να εκφραστούν διαφορετικές ιδέες.

Στη συγκεκριμένη εργασία έχουν γίνει κάποιες υποθέσεις προς απλοποίηση. Αρχικά, γίνεται αναφορά μόνο σε DS-CDMA συστήματα και όχι σε άλλα σχήματα, όπως είναι το FH-CDMA και το TH-CDMA. Δεύτερον, σε ένα τέτοιο DS-CDMA σύστημα, η εξάπλωση του σήματος πληροφορίας γίνεται χρησιμοποιώντας βραχείς κώδικες (με πλάτος του chip ίσο με T_c), των οποίων το μήκος είναι ίσο με τη διάρκεια ενός bit (T_b), και το κέρδος επεξεργασίας (processing gain, PG) είναι ίσο με $N = T_b = T_c$. Με άλλα λόγια, δεν γίνεται αναφορά σε μεγάλους κώδικες εξάπλωσης, των οποίων το μήκος ξεπερνά το πλάτους ενός bit πληροφορίας. Τρίτον, θεωρείται ασύρματο σύστημα με full-duplex λειτουργία, το οποίο αποτελείται από κινητά τερματικά και έναν σταθμό βάσης (base station, BS). Η ζεύξη από τα κινητά τερματικά στον σταθμό βάσης είναι η άνω ζεύξη, ενώ από το σταθμό βάσης προς τα τερματικά η κάτω ζεύξη. Το block διάγραμμα ενός τέτοιου DS-CDMA συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα , όπου στο σύστημα εξυπηρετούνται K χρήστες, σε καθέναν από τους οποίους ανατίθεται ένας μοναδικός κώδικας και το σήμα που ενδιαφέρει είναι από την πηγή δεδομένων 1.



Σχήμα 1.7. Ένα DS-CDMA μοντέλο, που εξυπηρετεί K χρήστες και θεωρούνται μόνο τα κανάλια άνω ζεύξης.

1.3.3.1.1 Δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης

Μια από τις πιο σημαντικές λειτουργίες της τεχνολογίας CDMA είναι η δυνατότητα να παρέχει πολλαπλή πρόσβαση σε πολλούς διαφορετικούς χρήστες που μοιράζονται την ίδια εναέρια υποδομή. Στην περίπτωση ενός κυψελωτού συστήματος κινητών επικοινωνιών, ένα CDMA σύστημα μπορεί να εξυπηρετεί διαφορετικά κινητά τερματικά

στην ίδια κυψέλη, τα οποία μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα χωρίς να προκαλούν μεγάλη παρεμβολή μεταξύ τους.

Η κύρια ιδέα της πολλαπλής πρόσβασης είναι να επιτραπεί σε έναν αριθμό χρηστών να μοιράζονται ένα κοινό κανάλι. Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, δύο παραδοσιακές μορφές πολλαπλής πρόσβασης είναι οι FDMA και TDMA. Στο FDMA, το εύρος συχνοτήτων χωρίζεται σε κανάλια. Σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένα κανάλι συχνότητας, το οποίο χρησιμοποιεί κατά βούληση. Μπορεί να συγκριθεί με το AM ή FM ραδιόφωνο ευρυεκπομπής, όπου κάθε σταθμός έχει ένα κανάλι συχνότητας. Η τεχνική FDMA απαιτεί καλό ενδοκαναλικό φιλτράρισμα προς αποφυγή της αμοιβαίας παρεμβολής. Για λόγους ασφαλείας, στα περισσότερα FDMA συστήματα, χρησιμοποιείται μια ζώνη συχνοτήτων δεξιά και αριστερά του διατιθέμενου φάσματος, προς τα γειτονικά κανάλια. Αυτή η ζώνη ασφαλείας εισάγει αναπόφευκτα μη αποδοτική αξιοποίηση του εύρους συχνοτήτων.

Από την άλλη, στην τεχνική TDMA, η ζώνη συχνοτήτων δε χωρίζεται, αλλά οι χρήστες επιτρέπεται να χρησιμοποιούν το κανάλι μόνο σε προκαθορισμένα διαστήματα χρόνου ή σε χρονοσχισμές, και μόνο ένας κάθε φορά. Γι' αυτό και η τεχνική αυτή απαιτεί πολύ καλό συγχρονισμό ανάμεσα στους χρήστες, γεγονός που είναι δύσκολο και πολύπλοκο να επιτευχθεί.

Η τεχνική CDMA διαφέρει από τα κλασικά σχήματα FDMA και TDMA στο ότι δεν αναθέτει συχνότητα ή χρόνο στις θυρίδες των χρηστών, αλλά δίνει το δικαίωμα σε όλους τους χρήστες να χρησιμοποιούν και τα δύο ταυτόχρονα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζεται η βοήθεια των τεχνικών εξάπλωσης φάσματος, όπως είναι οι τεχνικές ευθείας ακολουθίας, μεταπήδησης συχνότητας και μεταπήδησης χρόνου. Στην πραγματικότητα, σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένας κώδικας, ο οποίος εξαπλώνει το εύρος ζώνης του σήματος πληροφορίας με τέτοιον τρόπο που μόνο με τον ίδιο κώδικα μπορεί να ανακτηθεί το σήμα πληροφορίας στο δέκτη. Αυτή η μέθοδος έχει την ιδιότητα ότι τα μη επιθυμητά σήματα με διαφορετικούς κώδικες εξαπλώνονται ακόμα περισσότερο από τη διαδικασία, κάνοντάς τα να φαίνονται σαν θόρυβος στο δέκτη.

Όπως προαναφέρθηκε, η εξάπλωση φάσματος είναι ένας τρόπος μετάδοσης, όπου το σήμα πληροφορίας έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το χρειαζούμενο. Η εξάπλωση φάσματος επιτυγχάνεται πριν τη μετάδοση με χρήση ενός κώδικα εξάπλωσης, ανεξάρτητου από τη μεταδιδόμενη πληροφορία. Ο ίδιος κώδικας χρησιμοποιείται για να αποδιαμορφώσει τα δεδομένα στο δέκτη. Μια απλή μονάδα ευθείας ακολουθίας (DS) αποτελείται από έναν πολλαπλασιαστή με δύο εισόδους: η μια είναι το σήμα πληροφορίας x(t) και η άλλη το σήμα εξάπλωσης c(t). Η έξοδος του πολλαπλασιαστή είναι το σήμα μηνύματος m(t) που τελικά μεταδίδεται. Με τον ίδιο τρόπο επιτυγχάνεται και η FH/ TH εξάπλωση φάσματος.

Η τεχνική εξάπλωσης φάσματος αρχικά αναπτύχθηκε για στρατιωτική χρήση προς αποφυγή του jamming (εσκεμμένη παρεμβολή με σκοπό να αχρηστευτεί το κανάλι). Σήμερα, βρίσκει ευρεία εφαρμογή στα μη στρατιωτικά κινητά συστήματα επικοινωνιών χάρη στην εξαιρετική απόδοσή της σε περιβάλλοντα με κυρίαρχη την παρεμβολή.

Είναι προφανές ότι η ικανότητα πολλαπλής πρόσβασης σε ένα CDMA σύστημα συνδέεται άμεσα με τις ιδιότητες των CDMA κωδίκων που χρησιμοποιούνται. Το πλεονέκτημα του CDMA στις ασύρματες επικοινωνίες είναι η ικανότητά του να εξυπηρετεί πολλούς χρήστες στην ίδια συχνότητα στον ίδιο χρόνο. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένας συγκεκριμένος κώδικας και μόνο αυτός ο κώδικας μπορεί να αποδιαμορφώσει το μεταδιδόμενο σήμα. Με βάση τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα τρέχοντα 2G και 3G CDMA συστήματα, προκύπτει ότι υπάρχουν δύο τρόποι διαχωρισμού των χρηστών:

- ✓ Χρησιμοποιώντας ορθογωνικούς κώδικες για να επιτευχθεί η πολλαπλή πρόσβαση
- ✓ Χρησιμοποιώντας μη ορθογωνικές τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, γεγονός που συμβαίνει συχνά στα ασύγχρονα CDMA κανάλια

➢ <u>Ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση</u>

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία ή περισσότερες ορθογωνικές κυματομορφές προερχόμενες από έναν ορθογωνικό κώδικα. Εφόσον οι κυματομορφές αυτές είναι ορθογωνικές, χρήστες με διαφορετικούς κώδικες δεν παρεμβάλλουν μεταξύ τους, αν λειτουργούν σε ένα κανάλι χωρίς πολυδιαδρομική διάδοση και μοιράζονται ένα σύγχρονο κανάλι, όπου όλα τα σήματα μεταδίδουν τα bit streams τους ευθυγραμμισμένα στο χρόνο όσον αφορά τη διάρκεια των bits. Η τεχνική ορθογωνικού CDMA (Orthogonal CDMA , O-CDMA) απαιτεί αυστηρό συγχρονισμό των χρηστών, καθώς οι κυματομορφές είναι ορθογωνικές μόνο εάν είναι ευθυγραμμισμένες στο χρόνο.

Ένα βασικό σύνολο ορθογωνικών κωδίκων είναι το Walsh σύνολο. Οι συναρτήσεις Walsh δημιουργούνται χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία κατασκευής ενός πίνακα Hadamard, με αφετηρία $H_1 = [0]$. Ο πίνακας Hadamard κατασκευάζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$H_{2n} = \begin{pmatrix} H_n & H_n \\ H_n & \overline{H}_n \end{pmatrix} \quad \textbf{(1.8)}$$

Για παράδειγμα, οι κώδικες Walsh- Hadamard μήκους 2 και 4 αντίστοιχα είναι:

$$H_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \textbf{(1.9)}$$

$$H_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \textbf{(1.10)}$$

Οι κώδικες λέξεις Walsh- Hadamard δίνονται από τις γραμμές του πίνακα Hadamard. Τονίζεται ότι συνήθως τα δυαδικά δεδομένα διαμορφώνονται σε διανυσματική μορφή, έτσι ώστε να προκύπτουν μόνο πραγματικοί αριθμοί κατά τον υπολογισμό των συνελίξεων. Έτσι τα '0' διαμορφώνονται σε '1' και οι '1' σε '-1'. Οι κώδικες Walsh-Hadamard είναι ιδιαίτερα σημαντικοί, καθώς αποτελούν τη βάση για τους ορθογωνικούς κώδικες με διάφορους παράγοντες εξάπλωσης. Αυτή η ιδιότητα είναι χρήσιμη, όταν είναι επιθυμητό σήματα με διαφορετικούς παράγοντες εξάπλωσης να καταλαμβάνουν το ίδιο κανάλι συχνότητας. Οι κώδικες που έχουν την παραπάνω ιδιότητα ονομάζονται OVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor) κώδικες. Για την κατασκευή αυτών των κωδίκων, είναι καλύτερη η χρήση μιας διαφορετικής προσέγγισης από αυτήν των πινάκων, όπως είναι η δεντρική δομή, που δίνει καλύτερη άποψη για τις σχέσεις μεταξύ των διαφορετικών μηκών των κωδίκων και για την ορθογωνιότητα μεταξύ τους.

Για να ελεγχθεί η ορθογωνιότητα μεταξύ δύο Walsh- Hadamard κωδικών λέξεων, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Για παράδειγμα, έστω η κωδική λέξη W_2, που είναι η δεύτερη στήλη του πίνακα H_4, και η κωδική λέξη W_3 που είναι η Τρίτη στήλη του πίνακα H_4. Παρακάτω δίνονται οι κωδικές λέξεις με τη μορφή διανυσμάτων:

$$\begin{cases} W_2 \Rightarrow (1,-1,1,-1) \\ W_3 \Rightarrow (1,1,-1,-1) \end{cases} \quad \textbf{(1.11)}$$

Πολλαπλασιάζοντας στοιχείο προς στοιχείο προκύπτει ότι

$$W2 \otimes W3 = (1\times 1) + ((-1)\times 1) + (1\times(-1)) + ((-1)\times(-1)) = 1-1-1+1 = 0 \quad \textbf{(1.12)}$$

όπου ο τελεστής $\otimes$ δηλώνει τον πολλαπλασιασμό στοιχείο προς στοιχείο μεταξύ δύο διανυσμάτων ή ακολουθιών. Έτσι, είναι προφανές ότι οι κωδικές λέξεις W_2 και W_3 είναι όντως ορθογωνικές μεταξύ τους.

Παρόλα αυτά, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης των κωδικών λέξεων Walsh- Hadamard δεν έχει καλά χαρακτηριστικά. Ενδέχεται να έχει περισσότερες από μία κορυφές, και γι' αυτό δεν είναι δυνατό για τον δέκτη να ανιχνεύσει την αρχή της κωδικής λέξης χωρίς κάποιο εξωτερικό σχήμα συγχρονισμού. Η συνάρτηση ετερο-συσχέτισης των κωδικών λέξεων Walsh- Hadamard μπορεί να προκύψει μη μηδενική για έναν αριθμό μετατοπίσεων στο χρόνο και συνεπώς μη συγχρονισμένοι χρήστες μπορούν να παρεμβάλλουν μεταξύ τους. Αυτός είναι και ο λόγος που οι Walsh-Hadamard κώδικες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο σε σύγχρονα συστήματα CDMA. Έτσι, οι κώδικες αυτοί δεν έχουν και την καλύτερη συμπεριφορά εξάπλωσης ή τις καλύτερες ιδιότητες συσχέτισης.

- Μη ορθογωνικό CDMA

Η βασική ιδέα ενός μη ορθογωνικού CDMA συστήματος είναι η αποφυγή της ορθογωνιότητας μεταξύ των χρηστών με σκοπό τη μείωση της παρεμβολής χρησιμοποιώντας τεχνικές εξάπλωσης φάσματος. Η οικογένεια των PN ακολουθιών, γνωστές και ως Gold ακολουθίες, είναι ιδιαίτερα δημοφιλής όσον αφορά το μη ορθογωνικό CDMA. Οι συγκεκριμένες ακολουθίες έχουν συνάρτηση ετερο-συσχέτισης με τρεις κορυφές, που τείνουν να γίνονται όλο και πιο ασήμαντες καθώς το μήκος του κώδικα αυξάνεται. Έχουν επίσης συνάρτηση αυτοσυσχέτισης με μια μόνο κορυφή στο μηδέν, όπως και πολλές άλλες συνήθεις PN ακολουθίες. Οι Gold ακολουθίες- κώδικες μπορούν να κατασκευαστούν από τη modulo-2 άθροιση δύο προτιμώμενων PN ακολουθιών μεγίστου μήκους. Μετατοπίζοντας τη μια από τις δύο ακολουθίες, προκύπτει μια διαφορετική Χρυσή ακολουθία. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή κωδίκων που θα επιτρέπουν την πολλαπλή πρόσβαση στο κανάλι. Η χρήση των Gold ακολουθιών επιτρέπει την ασύγχρονη μετάδοση. Από την άλλη, ένας δέκτης μπορεί να συγχρονιστεί χρησιμοποιώντας την καλή ιδιότητας της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης που έχουν οι Χρυσές ακολουθίες.

1.3.3.1.2 Προστασία από παρεμβολές λόγω πολλαπλών διαδρομών (multipath interference)

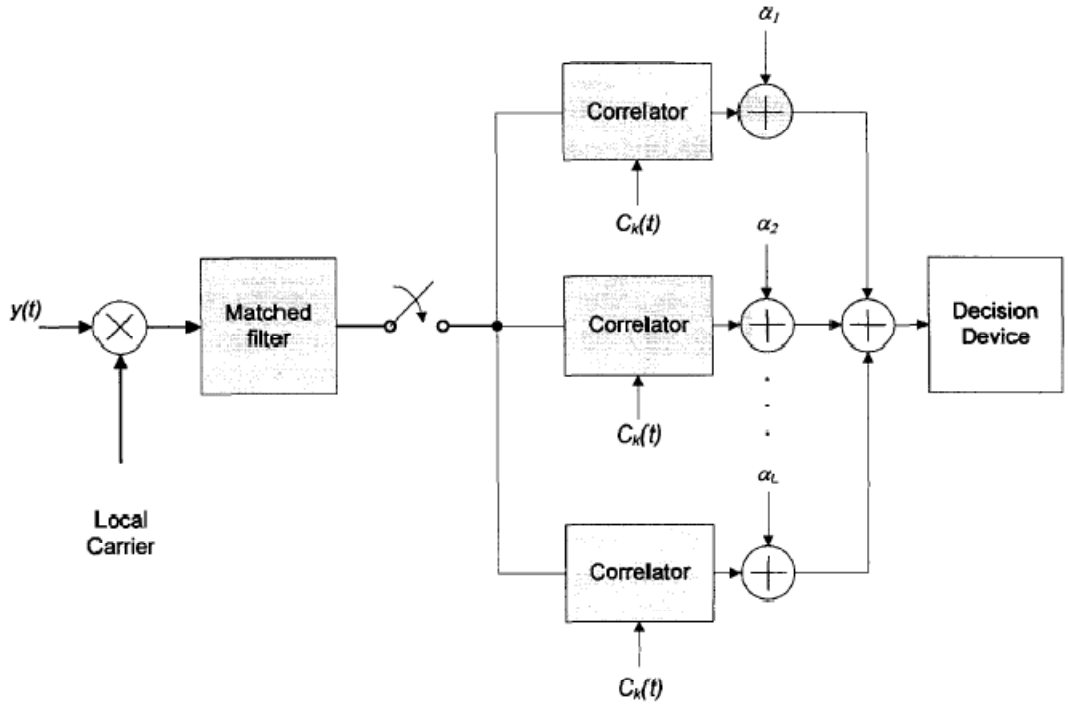
Μια άλλη χαρακτηριστική ιδιότητα της τεχνολογίας CDMA είναι η μοναδική της ικανότητα να μετριάζει έναν από τους κυριότερους παράγοντες εξασθένησης στις κινητές επικοινωνίες, την διασυμβολική παρεμβολή (inter-symbol interference-ISI) που προκαλείται από την πολυδιαδρομική διάδοση σε ένα ασύρματο κανάλι. Τονίζεται και πάλι ότι πρόκειται για την CDMA τεχνολογία βασισμένη στην DS τεχνική εξάπλωσης. Ασφαλώς, οι CDMA τεχνολογίες με βάση άλλες SS τεχνικές, όπως οι FH και TH, επίσης μπορούν να μετριάσουν το πρόβλημα της πολυδιαδρομικής διάδοσης. Η ικανότητα του CDMA να ξεπερνά την multipath παρεμβολή βασίζεται στη θεωρία εξάπλωσης του φάσματος του σήματος σε πολύ μεγαλύτερο φάσμα απ’ ότι το εύρος ζώνης συνοχής (coherent bandwidth) του καναλιού.

Σε μια ραδιοζεύξη, το RF σήμα που εκπέμπεται μπορεί να υποστεί ανάκλαση από διάφορα αντικείμενα, όπως οι κτίρια, λόφοι ή οχήματα. Αυτό έχει ως συνέπεια την ύπαρξη πολλαπλών διαδρομών μέχρι το δέκτη. Η σχετική φάση των πολλαπλών ανακλώμενων σημάτων που φτάνουν στο δέκτη λειτουργεί είτε προσθετικά είτε αναιρετικά. Αυτό συμβαίνει σε πολύ μικρές αποστάσεις (τυπικά για μισό μήκος κύματος), και οι σχετικές διαλείψεις ονομάζονται γρήγορες (fast fading). Οι διακυμάνσεις κυμαίνονται από 10 έως 30 dB για μια μικρή απόσταση. Η κατανομή Rayleigh χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει στη στατιστική χρονικά μεταβαλλόμενη φύση της λαμβανόμενης ισχύος. Περιγράφει την πιθανότητα της ισχύος του σήματος που λαμβάνεται εξαιτίας των διαλείψεων. Το λαμβανόμενο ραδιοσήμα αποτελείται από το απευθείας σήμα και από τα

ανακλώμενα (από κτίρια, βουνά κλπ) σήματα. Τα ανακλώμενα σήματα φτάνουν με μια καθυστέρηση σε σχέση με το απευθείας σήμα.

Στα συστήματα απλωμένου φάσματος, οι ρυθμοί μετάδοσης στους διαύλους είναι πολύ υψηλοί και, κατά συνέπεια, η διάρκεια των συμβόλων είναι πολύ μικρή, συνήθως πολύ μικρότερη από την εξάπλωση καθυστέρησης του διαύλου. Επειδή οι ψευδοτυχαίες ακολουθίες έχουν μικρή συσχέτιση, μια εκδοχή του επιθυμητού σήματος που προέρχεται από πολλαπλή διαδρομή και καθυστερεί περισσότερο από ένα σύμβολο, θα εμφανίζεται σα θόρυβος. Μπορεί να χρησιμοποιηθούν δέκτες RAKE για τη βελτίωση της λήψης, συλλέγοντας καθυστερημένες εκδοχές του επιθυμητού σήματος.

Ουσιαστικά, ο RAKE δέκτης αποτελείται από μια τράπεζα συσχετιστών, ο καθένας από τους οποίους συσχετίζεται με συγκεκριμένη πολυδιαδρομική συνιστώσα του επιθυμητού σήματος. Οι έξοδοι από κάθε συσχετιστή πολλαπλασιάζονται με κατάλληλο βάρος σύμφωνα με την ένταση της συνιστώσας και ακολουθεί άθροισή τους για τελική εκτίμηση του σήματος.



Σχήμα 1.8. RAKE δέκτης με L κλάδους.

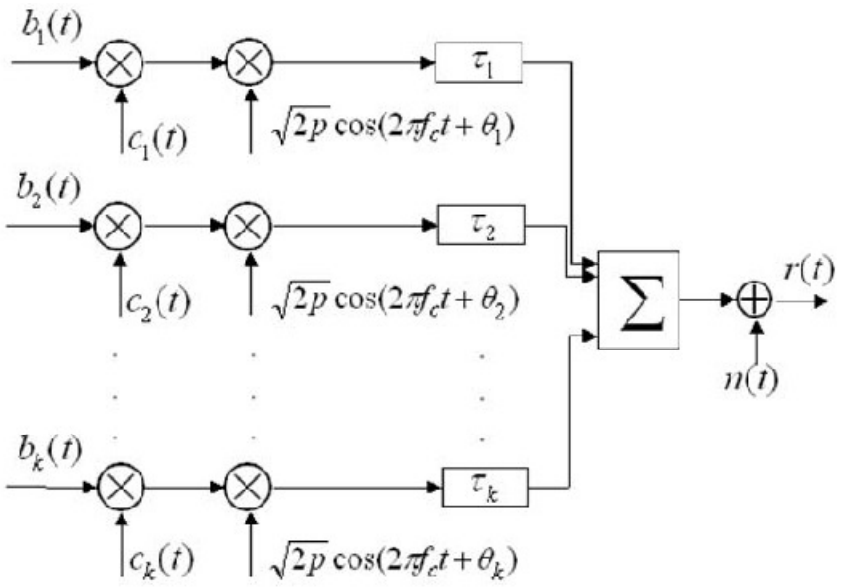
1.3.3.1.3 Απόρριψη παρεμβολής/ jamming

Ένα CDMA σύστημα μπορεί να απορρίψει αποτελεσματικά την ανεπιθύμητη παρεμβολή στο ίδιο κανάλι. Αυτή η ικανότητά του πηγάζει από την τεχνική εξάπλωσης φάσματος ή από την τεχνική εξάπλωσης ευθείας ακολουθίας. Γίνεται αναφορά σε δύο θέματα, την απόρριψη παρεμβολών και την απόρριψη jamming. Η διαφορά τους έγκειται

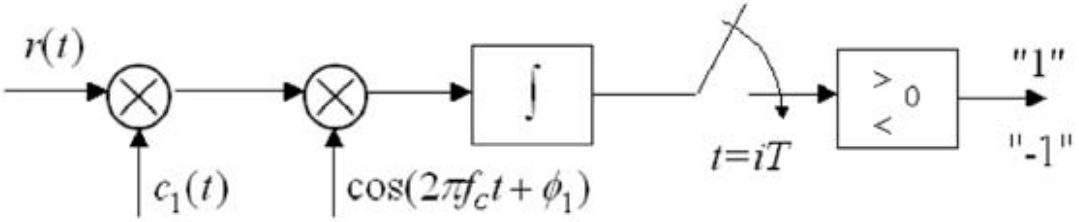
στο ότι ο όρος παρεμβολή είναι γενικός (και εκούσιος και/ ή ακούσιος), ενώ το jamming αναφέρεται μόνο σε κακόβουλη και 'εχθρική' παρεμβολή. Παρακάτω δεν θα γίνει διαχωρισμός των όρων παρεμβολής και jamming. Επιπρόσθετα, τονίζεται ότι η παρεμβολή μπορεί να είναι είτε στενής ζώνης είτε ευρείας ζώνης.

- <u>Στενής ζώνης παρεμβολή σε έναν συγκεκριμένο CDMA δέκτη</u>

Μια τυπική μορφή τέτοιας στενής ζώνης παρεμβολής μπορεί να είναι ένα σήμα με ένα φέρον σε συχνότητα ακριβώς ίδια με την κεντρική συχνότητα του CDMA συστήματος. Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται το μοντέλο του συστήματος και το μοντέλο ενός γενικού CDMA δέκτη.



Σχήμα 1.9. Μοντέλο DS-CDMA συστήματος με K χρήστες.



Σχήμα 1.10. Ένας CDMA δέκτης.

Τονίζεται ότι το μοντέλο του DS- CDMA συστήματος έχει K χρήστες και ο δέκτης θα πρέπει να συγχρονιστεί με τα σήμα ενός μόνο χρήστη (όπως με τον 1^{ο} όπως φαίνεται και παραπάνω). Ακόμη, γίνεται η υπόθεση ότι εκτός από το θόρυβο n(t) του καναλιού, δεν υπάρχει κάποιος άλλος παράγοντας εξασθένισης στο κανάλι που να απλοποιεί το σύστημα.

Στο Σχήμα 1.9 $b_k(t), k = 1,...,K$ είναι το σήμα πληροφορίας από το k-οστό χρήστη, $c_k(t)$ είναι ο κώδικας- υπογραφή του k-οστού χρήστη και $r(t)$ είναι το συνδυασμένο σήμα που λαμβάνεται από το δέκτη και περιλαμβάνει τα χρήσιμα σήματα και το θόρυβο. Αν δεν υπάρχει εξωτερική παρεμβολή, ο CDMA δέκτης θα μπορέσει να αποκωδικοποιήσει την επιθυμητή πληροφορία από το $r(t)$, αφού το λαμβανόμενο σήμα περάσει από de-spreading, αποδιαμόρφωση φέροντος, βαθυπερατό φιλτράρισμα, δειγματοληψία και λήψη απόφασης. Θεωρείται η περίπτωση όπου η παρεμβολή είναι στενής ζώνης, σαν ένα στενής ζώνης διαμορφωμένο σήμα (όπως AM διαμορφωμένο σήμα) με φέρουσα συχνότητα ακριβώς την ίδια με την κεντρική συχνότητα του CDMA συστήματος. Έτσι, το σήμα εισόδου στον CDMA δέκτη θα είναι το άθροισμα των $r(t)$ και του στενής ζώνης παρεμβάλλοντος σήματος $i(t)$, το εύρος ζώνης του οποίου θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από αυτό του CDMA σήματος. Προφανώς, αν το $i(t)$ περάσει στο πρώτο στάδιο επεξεργασίας του CDMA δέκτη, θα πολλαπλασιαστεί με τον κώδικα $c_1(t)$. Η έξοδος από τη μονάδα de-spreading του δέκτη θα αποτελείται από τρία κομμάτια: το ένα θα είναι το χρήσιμο μέρος, αποτέλεσμα της διαδικασίας de-spreading πάνω στο σήμα του 1^{ου} χρήστη, το δεύτερο το παρεμβάλλον κομμάτι λόγω πολλαπλής πρόσβασης, αποτέλεσμα του de-spreading πάνω σε όλα τα υπόλοιπα σήματα χρηστών (πλην του 1^{ου}) και το τρίτο θα είναι το γινόμενο $i(t) \cdot c_1(t)$. Το γινόμενο $i(t) \cdot c_1(t)$ δεν είναι πλέον σήμα στενής ζώνης και για το λόγο αυτό δεν θα μπορέσει να περάσει από το βαθυπερατό φίλτρο. Έτσι, απορρίπτεται η παρεμβολή στενής ζώνης.

- <u>Παρεμβολή ευρείας ζώνης</u>

Ένα τυπικό σήμα ευρείας ζώνης είναι ένα ψηφιακά διαμορφωμένο σήμα εξάπλωσης, όπως αυτό που παράγεται στο σχήμα 1.10. Οπότε, στην πραγματικότητα, ένα τέτοιο ευρείας ζώνης παρεμβάλλον σήμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σήμα που στέλνεται από έναν εκ των K χρηστών, όπως του 2^{ου} χρήστη ή $\sqrt{2p} \cdot b_2(t) \cdot c_2(t) \cdot \cos(2\pi f_c t + \vartheta_2)$. Είναι γνωστό ότι το σήμα από το 2^{ο} χρήστη δεν θα μπορέσει να περάσει από το βαθυπερατό φίλτρο, καθώς θα εξακολουθεί να είναι σήμα ευρείας ζώνης και μετά το de-spreading στο δέκτη. Έτσι, η ικανότητα απόρριψης παρεμβολής λόγω πολλαπλής πρόσβασης επιτρέπει στο CDMA δέκτη να απορρίπτει την παρεμβολή ευρείας ζώνης, που μοιάζει με οποιοδήποτε από τα σήματα που στέλνονται από το k-οστό χρήστη. Ίδια συμπεράσματα προκύπτουν και για οποιασδήποτε άλλης μορφής παρεμβολή ευρείας ζώνης.

Λόγω της ικανότητας της τεχνολογίας CDMA να απορρίπτει τόσο παρεμβάλλοντα όσο και jamming σήματα, αυτή είναι ιδιαίτερα δημοφιλής σε όλες τις 3^{ης} γενιάς ασύρματες επικοινωνίες, χάρη στην πιθανή συνύπαρξη με άλλα ασύρματα συστήματα στην ίδια ή σε γειτονικές ζώνες συχνοτήτων.

1.3.3.1.4 Ασφάλεια- privacy

Σε σύγκριση με το FDMA και το TDMA, η τεχνολογία CDMA προσφέρει καλύτερη ασφάλεια σε ένα ασύρματο σύστημα επικοινωνιών. Σε ένα CDMA κυψελωτό σύστημα κινητών επικοινωνιών οι επικοινωνίες μεταξύ ενός κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης είναι υπό πλήρη έλεγχο του σταθμού βάσης ή του MTSO (mobile terminal switching office). Όλα τα εναέρια κανάλια κωδικοποιούνται από διαφορετικούς κώδικες, γνωστοί μόνο στο συγκεκριμένο τερματικό και τον σταθμό βάσης. Κάποιος τρίτος χρειάζεται να ξέρει τον συγκεκριμένο κώδικα σε πραγματικό χρόνο για να μπορέσει να παρεμποδίσει τις επικοινωνίες μεταξύ του κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης. Ο αριθμός των κωδίκων για ένα δεδομένο CDMA κυψελωτό σύστημα είναι περιορισμένος. Για παράδειγμα, το IS-95 standard χρησιμοποιεί 64-Walsh-Hadamard ακολουθίες ως κώδικες κάτω ζεύξης. Έτσι, γίνεται κατανοητό ότι κάποιος τρίτος μπορεί να χρησιμοποιήσει trial-and-error για να αποκωδικοποιήσει τη μεταδιδόμενη πληροφορία στην εναέρια ραδιοζεύξη μεταξύ ενός τερματικού και του σταθμού βάσης. Παρόλα αυτά, συνήθως είναι πολύ δύσκολο να γίνει αυτό, με την προϋπόθεση ότι οι κώδικες αλλάζουν με προκαθορισμένο τρόπο γνωστό μόνο στο ζευγάρι τερματικό- σταθμός βάσης που τους χρησιμοποιούν.

Από την άλλη, ένας υποκλοπέας μπορεί να ακολουθήσει το μοτίβο των σχισμών συχνότητας ή χρόνου, εφόσον μάθει τον τρόπο που οι διάφορες σχισμές αποδίδονται στα διάφορα κινητά τερματικά στα FDMA και TDMA συστήματα. Με αυτήν την έννοια, τα CDMA ασύρματα συστήματα επικοινωνιών παρέχουν καλύτερη ασφάλεια στους τελικούς πελάτες σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης (όπως FDMA, TDMA). Τέλος, σε ένα CDMA κυψελωτό σύστημα μπορούν να υπάρχουν επιπλέον αλγόριθμοι κρυπτογράφησης για περαιτέρω ενίσχυση της ασφάλειας των επικοινωνιών.

1.3.3.1.5 Μικρή πιθανότητα υποκλοπής

Η μικρή πιθανότητα υποκλοπής είναι ένα άλλο ελκυστικό χαρακτηριστικό των τεχνικών εξάπλωσης φάσματος, γεγονός που τις καθιστά πολύ δημοφιλείς στα στρατιωτικά συστήματα επικοινωνιών. Η μικρή πιθανότητα υποκλοπής έχει να κάνει με την ασφάλεια (privacy), που αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά η λειτουργία τους είναι λίγο διαφορετική. Από τη μία, η μικρή πιθανότητα υποκλοπής οφείλεται στο γεγονός ότι το μέσο επίπεδο μεταδιδόμενης ισχύος σε ένα CDMA σύστημα μπορεί να είναι πολύ μικρότερο απ' ότι σε ένα FDMA ή TDMA σύστημα, πράγμα που καθιστά πολύ δύσκολο σε κάποιον τρίτο να ανιχνεύσει την παρουσία μεταδιδόμενων σημάτων σε περιβάλλον με θόρυβο και

παρεμβολές. Έτσι, η μικρή πιθανότητα υποκλοπής ενός CDMA ασύρματου συστήματος είναι άμεση συνέπεια της εφαρμογής τεχνικών εξάπλωσης φάσματος (για παράδειγμα DS, FH, TH). Από την άλλη, ως privacy υπονοείται η ασφάλεια των επικοινωνιών και δεν έχει σχέση με το χαμηλό μέσο επίπεδο ισχύος εκπομπής.

Η μικρή πιθανότητα υποκλοπής είναι εφικτή σύμφωνα με τη θεωρία του Shannon περί χωρητικότητας του καναλιού. Προκειμένου να επιτευχθεί μια συγκεκριμένη χωρητικότητα καναλιού, είναι δυνατόν είτε να αυξηθεί το επίπεδο της μεταδιδόμενης ισχύος υπό τον όρο να χρησιμοποιείται σταθερό εύρος ζώνης, είτε να εξαπλωθεί το εύρος ζώνης του σήματος με σταθερή μεταδιδόμενη ισχύ. Γι' αυτό στις CDMA επικοινωνίες χρησιμοποιείται πολύ μεγαλύτερο φάσμα για μετάδοση της πληροφορίας του χρήστη απ' ότι χρειάζεται και έτσι μπορεί να επιτευχθεί ένας δεδομένος μεταδιδόμενος ρυθμός-ταχύτητα (rate) με μικρή σχετικά μεταδιδόμενη ισχύ, σε σύγκριση με τα FDMA και TDMA συστήματα. Κατά αυτόν τον τρόπο, θα είναι δύσκολο για κάποιον τρίτο να ανιχνεύσει την παρουσία φάσματος ενός CDMA σήματος χάρη στην πολύ μικρής ισχύος συνάρτηση πυκνότητας φάσματος, λόγω της τεχνικής εξάπλωσης φάσματος. Αυτή η ιδιότητα ενός CDMA ασύρματου δικτύου επιτρέπει και τη συνύπαρξη με άλλα υπάρχοντα συστήματα.

1.3.3.1.6 Μικρή ισχύς εκπομπής

Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι δεν υπάρχει κίνδυνος από τις ραδιο-μεταδόσεις σε ένα κυψελωτό σύστημα κινητών επικοινωνιών ή από οποιαδήποτε άλλη ασύρματη εφαρμογή για την ανθρώπινη υγεία. Παρόλα αυτά, η αυξανόμενη χρήση των κινητών τηλεφώνων, των ασυρμάτων LANs, των cordless τηλεφώνων ,και ούτω καθεξής, έχει προφανώς αυξήσει και τον κίνδυνο μεταλλάξεων των ανθρωπίνων κυττάρων. Σαφώς, δεν είναι δυνατόν να ζητηθεί από τους χρήστες να μειώσουν τη χρήση των ασύρματων συσκευών τους, που είναι πλέον μέρος της καθημερινής τους ζωής. Παρόλα αυτά, αυτό που θα πρέπει να ερευνηθεί είναι το πώς θα μειωθεί η μέση έκθεση στις ραδιοσυχνότητες. Με αυτήν την έννοια, η τεχνολογία CDMA είναι εξαιρετική επιλογή, έχοντας την ανθρώπινη υγεία ως προτεραιότητα, με βάση και τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Τεχνικά, ένα CDMA κινητό τηλέφωνο μειώνει αποτελεσματικά την εκπεμπόμενη ισχύ, που πιθανώς να επηρεάζει και τους χρήστες κινητών τηλεφώνων. Κάποιες έρευνες έχουν δείξει ότι η μέση RF ισχύς εκπομπής από ένα CDMA κινητό τηλέφωνο είναι μόνο το 1/3 της ισχύος που εκπέμπεται από ένα TDMA κινητό τηλέφωνο με ίδια περίπου χαρακτηριστικά. Τέλος, όσον αφορά τη σύγκριση CDMA και OFDMA τερματικών, για τα οποία η έρευνα συνεχίζεται, πρέπει να τονιστεί ότι η OFDMA τεχνολογία δεν παρέχει κάποιο κέρδος επεξεργασίας, και άρα δεν είναι δυνατόν να μειωθεί η εκπεμπόμενη ισχύς προς επίτευξη ενός συγκεκριμένου ρυθμού μετάδοσης.

1.3.3.2 CDMA κώδικες και οι ιδιότητές τους

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η CDMA τεχνολογία διαφέρει από τις FDMA και TDMA στον τρόπο διαχωρισμού των χρηστών ή των καναλιών σε ένα σύστημα επικοινωνιών. Ενώ τα συστήματα FDMA και TDMA απαιτούν 'διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων' και 'διαφορετικές χρονοσχισμές' για διαχωρίσουν ικανοποιητικά τα διάφορα κανάλια, ένα CDMA σύστημα βασίζεται στις ορθογωνικές ιδιότητες των CDMA κωδίκων για τον ίδιο σκοπό. Γι' αυτό το λόγο, οι ιδιότητες αυτών των κωδίκων έχουν να κάνουν άμεσα με την απόδοση του CDMA συστήματος. Αν επιλεγούν λάθος κώδικες, το σύστημα δεν θα λειτουργήσει ποτέ ικανοποιητικά όπως αναμένεται.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι χαρακτηρισμού ενός CDMA κώδικα, αλλά κανείς δεν είναι πιο αποτελεσματικός και ακριβής από τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (auto-correlation function) και τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης (cross-correlation function).

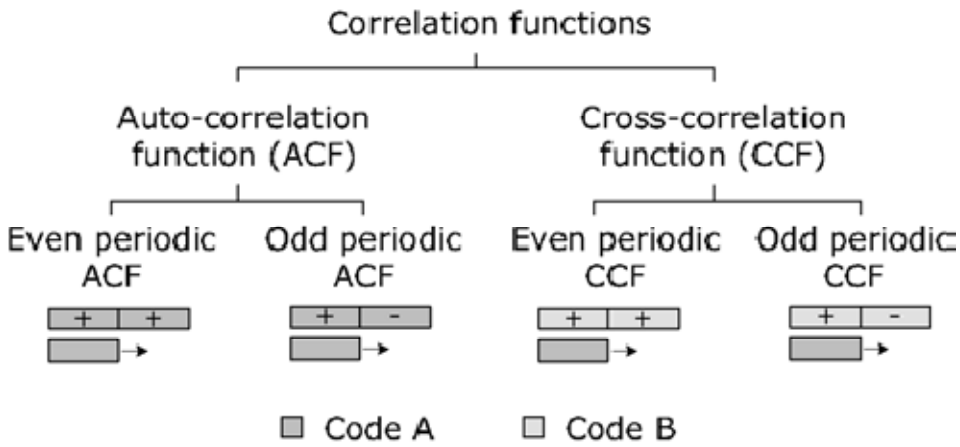
- <u>Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (auto-correlation function, ACF)</u>

Η ACF ορίζεται ως το αποτέλεσμα της συνέλιξης (με βάση τα chips), συσχέτισης ή matched-filtering λειτουργίας μεταξύ δύο χρονικά μετατοπισμένων εκδοχών του ίδιου κώδικα, και μπορεί περαιτέρω να διαιρεθεί σε δύο κατηγορίες: την περιοδική ACF και τη μη περιοδική ACF, πράγμα που εξαρτάται από τα ίδια ή διαφορετικά πρόσημα δύο συνεχόμενων bits αντίστοιχα. Πρακτικά, σε ένα CDMA σύστημα, οι περιοδικές και οι μη περιοδικές ACFs εμφανίζονται με ίδια πιθανότητα, καθώς τα ψηφία '+1' και '-1' εμφανίζονται και αυτά με την ίδια πιθανότητα στο δυαδικό ρεύμα. Η in-phase ACF ή η κορυφή της ACF, που είναι συνήθως ίση με το μήκος ή το PG (N) των κωδίκων, επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα ενός CDMA δέκτη, όπου χρησιμοποιείται ένας συσχετιστής (correlator) ή ένα φίλτρο ταιριάσματος (matched filter), να ανιχνεύσει το επιθυμητό σήμα. Από την άλλη, η out-of-phase ACF ενός CDMA κώδικα δε θα έχει κάποιο αρνητικό αντίκτυπο, εάν δεν παρατηρείται πολυδιαδρομική διάδοση και επιτυγχάνεται τέλειος συγχρονισμός. Θα συμβάλλει όμως στην MAI και μπορεί σημαντικά να δράσει αρνητικά στην απόδοση του συστήματος υπό την επήρεια του φαινόμενου της πολυδιαδρομικής διάδοσης.

- <u>Cross-Correlation Συνάρτηση (CCF)</u>

Η CCF ορίζεται ως το αποτέλεσμα της συνέλιξης (με βάση τα chips) μεταξύ δύο διαφορετικών κωδίκων εξάπλωσης. Όπως και προηγουμένως, υπάρχει η περιοδική CCF και η μη περιοδική CCF. Η πρώτη απαντάται κυρίως σε σύγχρονα κανάλια μετάδοσης, όπως στα κανάλια κάτω ζεύξης στα ασύρματα συστήματα, και η δεύτερη μπορεί να εμφανιστεί είτε σε σύγχρονα (αν υπάρχει MI) είτε σε ασύγχρονα κανάλια. Σε αντίθεση με την out-of-phase ACF, που συμβάλλει στην MAI μόνο σε κανάλια πολυδιαδρομικής διάδοσης, η CCF

συμβάλλει στην MIA ανεξάρτητα της παρουσίας πολυδιαδρομικής διάδοσης. Από την άλλη, η out-of-phase ACF γίνεται επιζήμια μόνο εάν υπάρχει κανάλι πολυδιαδρομικής διάδοσης, διαφορετικά δεν προκαλείται MAI στον συσχετιστή του δέκτη. Προφανώς η MAI είναι μια από τις πιο σοβαρές απειλές για την αποτελεσματικότητα ενός CDMA δέκτη, που χρησιμοποιεί είτε συσχετιστή είτε RAKE δέκτη, στην ανίχνευση σημάτων και γι' αυτό θα πρέπει να κρατηθεί κάτω από κάποιο ικανοποιητικό επίπεδο για να είναι και η απόδοση του συστήματος ανάλογη.



Σχήμα 1.11. Κατηγορίες των συναρτήσεων συσχέτισης CDMA κωδίκων.

- <u>Φασματικές ιδιότητες CDMA κωδίκων</u>

Οι ACF και CCF συναρτήσεις καθορίζουν τα χαρακτηριστικά στο πεδίο του χρόνου των CDMA κωδίκων. Η ACF έχει να κάνει με την απόδοση του CDMA συστήματος ενάντια της διασυμβολικής παρεμβολής (intersymbol interference, ISI) λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης, ενώ η CCF καθορίζει την ικανότητα του CDMA συστήματος να μετριάζει την MAI.

Μια άλλη σημαντική παράμετρος που καθορίζει την καταλληλότητα ενός CDMA κώδικα είναι οι φασματικές ιδιότητές του στο πεδίο της συχνότητας. Προφανώς, το εύρος T_c του chip του CDMA κώδικα είναι αυτό που επηρεάζει άμεσα το φασματικό εύρος των CDMA σημάτων. Συγκεκριμένα, το φασματικό εύρος ενός CDMA σήματος είναι ίσο με το αντίστροφο του εύρους του chip ($\frac{1}{T_c}$). Βέβαια, το εύρος του chip δεν καθορίζεται μόνο από το μήκος του κώδικα, αλλά και από το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης $R = \frac{1}{T}$ και το μήκος τως κωδίκων εξάπλωσης N, υποθέτοντας ότι κάθε bit δεδομένων πρέπει να εξαπλώνεται από έναν ολοκληρωμένο κώδικα, ώστε να εφαρμόζεται η υπόθεση για βραχείς κώδικες που αναφέρθηκε παραπάνω. Γι' αυτό το φασματικό εύρος ενός CDMA σήματος είναι $\frac{1}{T_c} = \frac{N}{T}$, όπου το N συχνά καλείται και κέρδος επεξεργασίας του CDMA συστήματος.

Τονίζεται ότι όλη η παραπάνω συζήτηση για τις φασματικές ιδιότητες των CDMA κωδίκων στηρίζεται στην υπόθεση ότι η κυματομορφή όλων των chip είναι τετραγωνική. Συνήθως αυτή η υπόθεση δεν ισχύει στα περισσότερα CDMA συστήματα, που συνήθως χρησιμοποιούν κάποιους τύπους κυματομορφών διαμορφωμένων από παλμούς (όπως συνημίτονα) για καλύτερη φασματική απόδοση. Στην πραγματικότητα, οι τεχνικές μορφοποιητικών παλμών χρησιμοποιούνται σε πολλά συστήματα επικοινωνιών, όχι μόνο σε συστήματα εξάπλωσης φάσματος, για ενίσχυση της απόδοσης εύρους ζώνης, χρησιμοποιώντας μόνο φασματικά αποδοτικούς παλμούς για τη μορφοποίηση των κυματομορφών των chip. Η βελτίωση αυτή δεν 'θυσιάζει' άλλα χαρακτηριστικά του συστήματος, και έτσι, οι τεχνικές αυτές βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε όλα τα συστήματα επικοινωνιών.

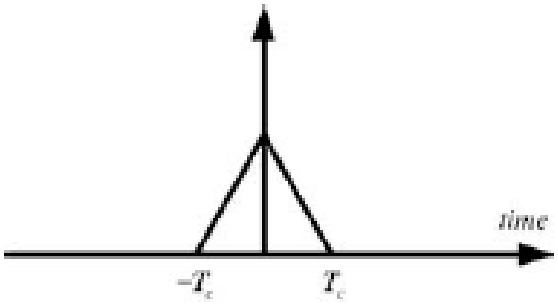
- <u>Ψευδο-τυχαίες ακολουθίες</u>

Έστω ένα σύστημα, όπου είναι επιθυμητή η χρήση της εξάπλωσης φάσματος προς αποφυγή στενής ζώνης παρεμβολής ή ηθελημένης παρεμβολής (jamming). Είναι εύκολο να δειχτεί ότι αν είναι επιθυμητό το σήμα να ξεπερνά την παρεμβολή στενής ζώνης (που είναι συνήθως ένα είδος εξωτερικής παρεμβολής), τότε η συνάρτηση εξάπλωσης θα πρέπει να συμπεριφέρεται ως θόρυβος. Τέτοιες συναρτήσεις είναι οι τυχαίες δυαδικές ακολουθίες, που επίσης καλούνται και pseudo- noise (PN) ακολουθίες.

Έχουν τις εξής ιδιότητες:

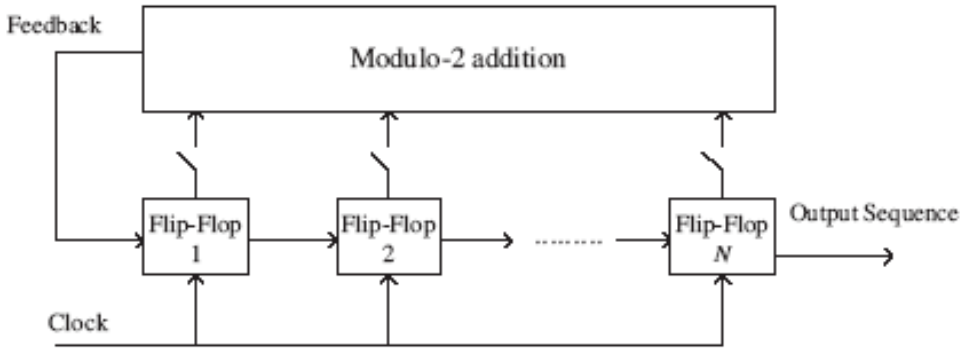
- Συνήθως έχουν ισορροπημένα chips, ή έχουν ίσο αριθμό '1' και '0'.
- Πάντα έχουν συνάρτηση αυτοσυσχέτισης με μοναδική κορυφή.

Στην πραγματικότητα, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας τυχαίας δυαδικής ακολουθίας είναι τριγωνικής μορφής, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, όπου T_c είναι η περίοδος ενός chip. Για το λόγο αυτό η φασματική πυκνότητα ισχύος μιας τέτοιας κυματομορφής είναι μια συνάρτηση sinc τετραγωνισμένη, με τα πρώτα μηδενικά στα σημεία $\pm 1/T_c$.



Σχήμα 1.12. Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας τυχαίας δυαδικής ακολουθίας.

Οι PN ακολουθίες είναι περιοδικές ακολουθίες με συμπεριφορά ανάλογη του θορύβου. Μπορούν να παραχθούν εύκολα χρησιμοποιώντας καταχωρητές ολίσθησης, modulo-2 αθροιστές (δηλ. XOR πύλες) και κυκλώματα με ανατροφοδότηση. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένα από block-διάγραμμα για μια γεννήτρια PN ακολουθιών.



Σχήμα 1.13. Block-διάγραμμα για γεννήτρια PN ακολουθιών.

Το μέγιστο μήκος μιας PN ακολουθίας καθορίζεται από το μήκος του καταχωρητή και τη διάταξη του κυκλώματος ανατροφοδότησης. Ένας N-bit καταχωρητής μπορεί να δεχτεί μέχρι και 2^N διαφορετικούς συνδυασμούς '1' και '0'. Εφόσον το κύκλωμα ανατροφοδότησης εκτελεί μόνο γραμμικές λειτουργίες, αν όλες οι είσοδοι είναι μηδενικές (δηλ. το περιεχόμενο των flip-flops), τότε η έξοδος του κυκλώματος ανατροφοδότησης θα είναι επίσης μηδενική. Γι' αυτό το λόγο, όλοι οι μηδενικοί συνδυασμοί θα δώσουν μηδενική έξοδο για όλους τους υποακόλουθους κύκλους ρολογιού., και γι' αυτό δεν συμπεριλαμβάνονται στην ακολουθία. Επομένως, το μέγιστο μήκος μιας PN ακολουθίας είναι 2^N-1 και ακολουθίες αυτού του μήκους ονομάζονται ακολουθίες μεγίστου μήκους ή m-ακολουθίες. Είναι χρήσιμες καθώς όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος τους, τόσο καλύτερες ιδιότητες έχουν. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορες διατάξεις ανατροφοδότησης για m-ακολουθίες.

Συνοπτικά, οι PN ακολουθίες είναι περιοδικές δυαδικές συναρτήσεις, μοιάζουν με θόρυβο και μπορούν να παραχθούν από ένα κύκλωμα ανατροφοδότησης, modulo-2 αθροιστές και flip-flops. Οι ακολουθίες μεγίστου μήκους έχουν περίοδο ίση με 2^N-1.

- <u>Πολυπλοκότητα της δημιουργίας CDMA κωδίκων</u>

Μια άλλη ιδιότητα μιας οικογένειας κωδίκων είναι η πολυπλοκότητα δημιουργίας τους με βοήθεια λογικών κυκλωμάτων. Στην πραγματικότητα, η παραπάνω πολυπλοκότητα περιλαμβάνει δύο έννοιες: πρώτον, η πολυπλοκότητα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι υπολογιστική, όσον αφορά τη διαδικασία σχεδιασμού κωδίκων για επιλογή των καταλληλότερων εξ αυτών. Υπό αυτή την έννοια, το επίπεδο πολυπλοκότητας διαφέρει από

κώδικα σε κώδικα, εξαρτώμενο από τις απαιτήσεις απόδοσης, όπως είναι οι απαιτήσεις για τις ACF και CCF ή για το κέρδος επεξεργασίας.

Για παράδειγμα, μια m-ακολουθία μπορεί να παραχθεί εύκολα χρησιμοποιώντας ένα καταχωρητή ολίσθησης, όπως προαναφέρθηκε, με τη βοήθεια της απλής λογικής ανατροφοδότησης σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρωταρχικό πολυώνυμο. Γ' αυτό και η m-ακολουθία μπορεί να θεωρηθεί ως ένας CDMA κώδικας, που μπορεί να παραχθεί με την ελάχιστη πολυπλοκότητα σε hardware.

Η ιδέα των πρωταρχικών πολυωνύμων είναι χρήσιμη για την κατανόηση της παραγωγής CDMA κωδίκων. Συγκεκριμένα, ένα πρωταρχικό πολυώνυμο (primitive ή irreducible polynomial) ορίζεται ως ένα πολυώνυμο που παράγει όλα τα στοιχεία ενός χώρου επέκτασης από ένα πεδίο βάσης. Για κάθε πρώτη δύναμη q και κάθε θετικό ακέραιο n, υπάρχει ένα πρωταρχικό πολυώνυμο n-οστού βαθμού στο πεδίο Galois GF(q). Υπάρχουν

$$a_q(n) = \frac{\phi(q^n - 1)}{n} \quad \textbf{(1.13)}$$

πρωταρχικά πολυώνυμα στο GF(n), όπου $\phi(n)$ είναι το πλήθος των θετικών ακεραίων μικρότερων από το n, που είναι πρώτοι ή δεν έχουν κοινό παράγοντα με το n, με το 1 να θεωρείται πρώτος αριθμός για όλους τους αριθμούς.

Ένα πολυώνυμο n-οστού βαθμού στο χώρο GF(2) (δηλαδή με συντελεστή 1 ή 0) είναι πρωταρχικό αν είναι τάξης $2^n - 1$. Για παράδειγμα, το πολυώνυμο $x^2 + x + 1$ είναι 3ης τάξης καθώς

$$\frac{x+1}{x^2+x+1} = \frac{x+1}{x^2+x+1} (\mathrm{mod}\, 2) \quad \textbf{(1.14)}$$

$$\frac{x^2+1}{x^2+x+1} = 1 + \frac{x+1}{x^2+x+1} (\mathrm{mod}\, 2) \quad \textbf{(1.15)}$$

$$\frac{x^3+1}{x^2+x+1} = x + 1 (\mathrm{mod}\, 2) \quad \textbf{(1.16)}$$

Θέτοντας $q = 2$ στην εξίσωση 1.13, προκύπτει το πλήθος των πρωταρχικών πολυωνύμων στο χώρο GF(2):

$$a_2(n) = \frac{\phi(q^2 - 1)}{n} \quad \textbf{(1.17)}$$

n	Πρωταρχικά πολυώνυμα
1	$1+x$
2	$1+x+x^2$
3	$1+x+x^3, 1+x^2+x^3$
4	$1+x+x^4, 1+x^3+x^4$ $1+x^2+x^5, 1+x+x^2+x^3+x^5$
5	$1+x^3+x^5, 1+x+x^3+x^4+x^5$ $1+x^2+x^3+x^4+x^5, 1+x+x^2+x^4+x^5$

Πίνακας 1.2. Πρωταρχικά πολυώνυμα (mod2) τάξης 1 έως 5.

Από την άλλη, ίσως χρειαστούν πιο πολύπλοκες μέθοδοι για την παραγωγή των ζητούμενων CDMA κωδίκων. Για παράδειγμα, η παραγωγή ορθογωνικών συμπληρωματικών κωδίκων, που έχουν πραγματικά ορθογωνικές ιδιότητες μη διαθέσιμες σε άλλους τύπους κωδίκων, απαιτεί πολύ πιο πολύπλοκη διαδικασία απ' ότι η παραγωγή m-ακολουθιών.

Γενικά, δεν θα πρέπει να υπερεκτιμηθεί η σημασία της επιλογής των CDMA κωδίκων για ένα σύστημα, ιδιαίτερα κατά την εφαρμογή των επόμενης γενιάς CDMA τεχνολογιών. Στα περισσότερα συστήματα επικοινωνιών, οι κώδικες/ ακολουθίες εξάπλωσης μπορούν να παραχθούν offline, και στη συνέχεια να αποθηκευτούν σε έναν πίνακα, σχηματισμένο από ένα RAM chip, που να μπορεί να ανακαλείται οποτεδήποτε. Έτσι, οι κώδικες εξάπλωσης δε χρειάζεται να παράγονται σε πραγματικό χρόνο για τα περισσότερα σενάρια CDMA εφαρμογών. Υπό αυτήν την έννοια, η ορθογωνιότητα των κωδίκων αποκτά μεγαλύτερη σημασία από την πολυπλοκότητα παραγωγής τους.

1.3.3.3 CDMA Ευθείας Ακολουθίας (DS-CDMA)

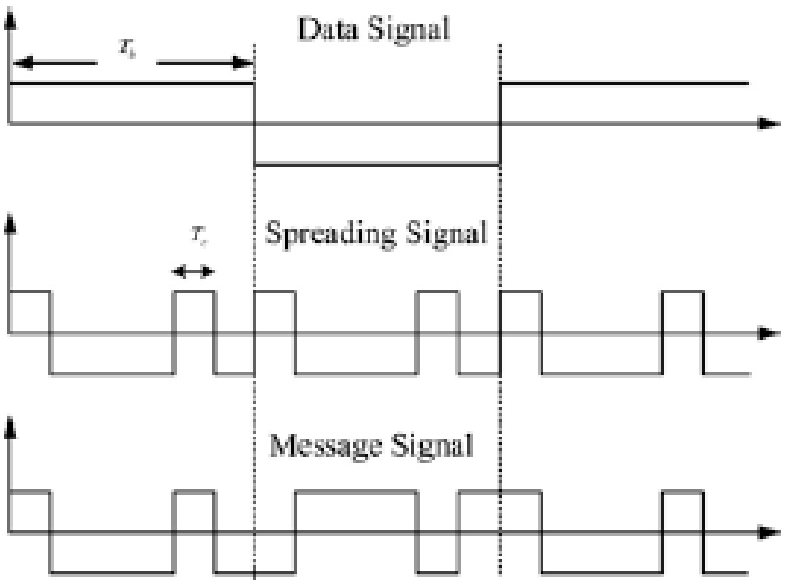
Ο απλούστερος τρόπος να εξαπλωθεί το φάσμα ενός διαμορφωμένου σήματος πληροφορίας είναι η διαμόρφωση του σήματος για δεύτερη φορά χρησιμοποιώντας ένα ευρείας ζώνης σήμα εξάπλωσης, συνήθως μια PN (pseudo-noise) ακολουθία. Αυτή η δεύτερη διαμόρφωση συνήθως είναι ψηφιακή διαμόρφωση φάσης, αν και η αναλογική διαμόρφωση πλάτους ή φάσης είναι γενικά αποδεκτή. Αυτή η τεχνική εξάπλωσης

φάσματος ονομάζεται εξάπλωση φάσματος ευθείας ακολουθίας (direct- sequence, DS) και είναι η πιο δημοφιλής. Αυτό οφείλεται στη σχετική απλότητά της, υπό την έννοια ότι δεν απαιτεί υψηλής ταχύτητας στην τοποθέτηση συχνοτήτων synthesizer.

Τη σημερινή εποχή, η DS διαμόρφωση έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλά εμπορικά διαθέσιμα συστήματα (σχεδόν όλα τα κυψελωτά συστήματα 3^{ης} γενιάς χρησιμοποιούν το DS-CDMA ως βασική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης) και σε πολλά όργανα μετρήσεων. Είναι λογικό να περιμένει κανείς η τεχνολογία DS-CDMA να εξακολουθήσει να πρωταγωνιστεί και τα επόμενα χρόνια χάρη στα μοναδικά χαρακτηριστικά της. Ακόμη και σήμερα, ερευνώνται εμπορικές εφαρμογές των DS-SS συστημάτων, όπως στα ασύρματα ή ακόμα και στα οπτικά συστήματα. Βασικό χαρακτηριστικό της DS τεχνικής είναι η διαμόρφωση του φέροντος από μια κωδική ακολουθία, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Γενικά, πρόκειται είτε για διαμόρφωση AM ή FM ή οποιαδήποτε άλλα διαμόρφωση πλάτους ή φάσης. Συνήθως χρησιμοποιείται η BPSK κωδικοποίηση, καθώς το υλικό (hardware) για αυτήν την κωδικοποίηση είναι χαμηλού κόστους: απαιτούνται μόνο δύο πολλαπλασιαστές, ακολουθούμενοι από ένα βαθυπερατό φίλτρο και μια μονάδα απόφασης, αν είναι στην πλευρά του δέκτη. Η βασική μορφή ενός DS σήματος είναι αυτή που παράγεται από ένα απλό φέρον διαμορφωμένο κατά BPSK. Λεπτομέρειες δίνονται παρακάτω.

Η επιλογή των σημάτων εξάπλωσης είναι μεγάλης σημασίας σε ένα DS-SS σύστημα, για να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες που διευκολύνουν τη αποδιαμόρφωση του μεταδιδόμενου σήματος πληροφορίας από τον επιθυμητό χρήστη, και δυσκολεύουν την αποδιαμόρφωση από ανεπιθύμητους χρήστες. Οι ίδιες αυτές ιδιότητες καθιστούν ικανό τον επιθυμητό δέκτη να διαχωρίσει το χρήσιμο σήμα από την παρεμβολή, που συνήθως έχει διαφορετική μορφή στο δέκτη από ότι στον πομπό. Αν το εύρος ζώνης του σήματος εξάπλωσης είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του αρχικού σήματος πληροφορίας, τότε το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου SS σήματος που θα καταλαμβάνεται κυρίως από το σήμα εξάπλωσης και το αρχικό σήμα πληροφορίας δεν θα έχει σχεδόν κανέναν ρόλο. Κάθε στοιχείο της ακολουθίας εξάπλωσης ή του κώδικα λέγεται chip, του οποίου το πλάτος καθορίζεται από το εύρος ζώνης του σήματος μετά την διαμόρφωση εξάπλωσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε ένα DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum) σύστημα, το σήμα πληροφορίας διαμορφώνεται από ένα σήμα εξάπλωσης, το οποίο καταλαμβάνει πολύ μεγαλύτερο φάσμα από το αρχικό σήμα πληροφορίας. Εφόσον ο πολλαπλασιασμός στο πεδίο του χρόνου ισοδυναμεί με συνέλιξη στο πεδίο της συχνότητας, ένα σήμα στενής ζώνης πολλαπλασιασμένο με ένα σήμα ευρείας ζώνης καταλήγει να είναι και αυτό σήμα ευρείας ζώνης. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η χρήση μιας δυαδικής κυματομορφής ως ακολουθία εξάπλωσης, με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό (συχνότητα) από το σήμα πληροφορίας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1.14 . Απεικόνιση ενός ευθείας ακολουθίας σήματος εξάπλωσης.

Τα τρία σήματα που εικονίζονται παραπάνω αντιστοιχούν στο σήμα πληροφορίας (data signal) x(t), το σήμα εξάπλωσης (spreading signal) c(t) και στο τελικό σήμα μηνύματος (message signal) m(t). Τα πρώτα δύο σήματα πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους και δίνουν το τρίτο σήμα. Τα bits του σήματος εξάπλωσης c(t) ονομάζονται chips. Το T_b αντιπροσωπεύει την περίοδο ενός bit πληροφορίας και το T_c αντιπροσωπεύει την περίοδο ενός chip. Ο ρυθμός των chip 1/ T_c χρησιμοποιείται συχνά για να χαρακτηρίσει ένα σύστημα μετάδοσης εξάπλωσης φάσματος και ομοίως ένα CDMA σύστημα.

Εισάγεται ο όρος του κέρδους επεξεργασίας (processing gain, PG), που ορίζεται ως ο λόγος του RF εύρους ζώνης του DS μεταδιδόμενου σήματος προς το εύρος ζώνης του αρχικού σήματος πληροφορίας πριν τη διαμόρφωση φέροντος. Το PG αναφέρεται σε βελτίωση του λόγου σήματος προς παρεμβολή (signal-to-interference) και στη μετρίαση διαφόρων ανεπιθύμητων παραγόντων που εμφανίζονται κατά την επεξεργασία σημάτων, όπως anti-jamming. Συνήθως γίνεται η υπόθεση ότι το RF εύρος ζώνης είναι ίσο με το εύρος του κύριου λοβού του DS φάσματος, που είναι πάντα συνάρτηση της μορφής $\frac{\sin x}{x}$. Σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, ως PG μπορεί να θεωρηθεί και ο λόγος του chip rate προς τον data rate ή ο λόγος της διάρκειας ενός bit πληροφορίας προς τη διάρκεια ενός chip. Έτσι, σε ένα DS-SS σύστημα με chip rate=10 Mcps και data rate=1 kbps, το PG θα είναι $(10^7)/(10^3) = 10^4$ ή 40 dB.

$$PG_{DS} = \frac{RF\,\epsilon\acute{\upsilon}\rho o\varsigma_\zeta\acute{\omega}\nu\eta\varsigma_DS/SS\,\sigma\acute{\eta}\mu\alpha\tau o\varsigma}{\epsilon\acute{\upsilon}\rho o\varsigma_\zeta\acute{\omega}\nu\eta\varsigma_\sigma\acute{\eta}\mu\alpha\tau o\varsigma_\pi\lambda\eta\rho o\phi o\acute{\rho}\iota\alpha\varsigma} \approx \frac{chip_rate_DS/SS\,\sigma\acute{\eta}\mu\alpha\tau o\varsigma}{rate_\tau o\upsilon_\sigma\acute{\eta}\mu\alpha\tau o\varsigma_\tau o\upsilon_\chi\rho\acute{\eta}\sigma\tau\eta} = T_b / T_c \quad \textbf{(1.18)}$$

Επομένως, το PG αντιπροσωπεύει το πλήθος των chips που 'χωράνε' σε μια περίοδο των bits πληροφορίας. Μεγαλύτερο PG σημαίνει μεγαλύτερη εξάπλωσης, και επομένως μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Γενικά, ένα υψηλό PG σημαίνει επίσης και ότι περισσότεροι κώδικες μπορούν να αντιστοιχούν στο ίδιο κανάλι συχνοτήτων.

Προκύπτει το ερώτημα αν μπορεί κανείς να αυξήσει το PG σε πολύ μεγάλα επίπεδα για να βελτιώσει την απόδοση ενός DS/SS συστήματος. Υπάρχουν βέβαια περιορισμοί. Δύο είναι οι βασικοί παράγοντες για προσαρμογή του PG. Ο πρώτος είναι το RF εύρος ζώνης, που εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο chip rate. Για παράδειγμα, αν το RF εύρος ζώνης είναι 100 MHz, τότε το chip rate θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 50 Mcps. Με βάση τα παραπάνω, πόσο μεγάλο θα πρέπει να είναι το RF εύρος ζώνης και πόσο όφελος προκύπτει από την αύξηση του chip rate; Για διπλασιασμό του RF εύρους ζώνης, είναι δυνατόν μόνο να αυξηθεί το PG κατά 3 dB. Παρόλα αυτά, το αντίτιμο που προκύπτει είναι η πολυπλοκότητα. Με διπλάσιο chip rate, ο ρυθμός δειγματοληψίας (sampling rate) στον ψηφιακό δέκτη θα πρέπει τουλάχιστον να διπλασιαστεί. Αυτό θα αυξήσει και το φορτίο επεξεργασίας σήματος στη CPU και στη μονάδα DSP (digital signal processing). Τονίζεται επίσης ότι η αύξηση στο φορτίο υπολογισμών δεν είναι γραμμική με την αύξηση του ρυθμού δειγματοληψίας. Με άλλα λόγια, ο διπλασιασμός του chip rate πιθανότατα να οδηγήσει σε 'τρεμόπαιγμα', τετραπλασιασμό ή ακόμα μεγαλύτερο υπολογιστικό φορτίο στο DSP chip. Αυτή είναι μια μεγάλη πρόκληση για την εφαρμογή πολυμεσικών υπηρεσιών, που είναι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου. Με τη μείωση της διάρκειας του chip (αύξηση του chip rate), το μικρότερο διάστημα για λήψη απόφασης στο δέκτη μειώνεται επίσης, με αποτέλεσμα το υλικό και το λογισμικό να πρέπει να 'προφτάσουν' το data rate για να ληφθεί λογική απόφαση για κάθε λαμβανόμενο bit. Βέβαια, τα χαρακτηριστικά του καναλιού δεν αλλάζουν με την αύξηση του chip rate. Με τη λήψη κάθε chip στον δέκτη, θα πρέπει να 'τρέξουν' όλοι οι απαραίτητοι αλγόριθμοι (όπως είναι η εκτίμηση του καναλιού, οι ανατροφοδοτήσεις αποφάσεων, η equalization) και να ολοκληρωθούν εγκαίρως πριν το τέλος του συγκεκριμένου chip. Εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση η εφαρμογή ενός πλήρως ψηφιακού δέκτη με chip rate=10 Gcps με τη βοήθεια της μικροηλεκτρονικής. Έτσι, δεν είναι καλή η προσέγγιση αύξησης του PG χρησιμοποιώντας υψηλότερο chip rate. Από την άλλη, δεν αποτελεί σοφή επιλογή ούτε η αύξηση του PG με μείωση του data rate. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιο γνωστές τεχνικές DS εξάπλωσης.

- BPSK DS-SS(Binary Phase-shift Keying DS-SS)

Η απλούστερη μορφή της DS-SS τεχνικής χρησιμοποιεί την BPSK κωδικοποίηση ως διαμόρφωση εξάπλωσης. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι γίνεται αναφορά σε δύο τύπους διαμόρφωσης, τη διαμόρφωση εξάπλωσης και τη διαμόρφωση φέροντος. Η πρώτη δηλώνει τη διαμόρφωση του σήματος πληροφορίας από μια προκαθορισμένη ακολουθία ή κώδικα εξάπλωσης με αποτέλεσμα την εξάπλωση του εύρους ζώνης, και η δεύτερη τη διαμόρφωση του σήματος με ένα υψηλής συχνότητας φέρον, μεταθέτοντας μόνο το φάσμα του αρχικού σήματος βασικής ζώνης σε μια συγκεκριμένη RF συχνότητα, χωρίς να επιφέρει εξάπλωση φάσματος. Έτσι, για ένα BPSK DS-SS σύστημα η διαμόρφωση εξάπλωσης γίνεται χρησιμοποιώντας ένα BPSK modem. Παρόλα αυτά, ένα BPSK DS-SS σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει και άλλα modems, όπως BPSK, QPSK, MSK κ.ο.κ. για τη διαμόρφωση φέροντος.

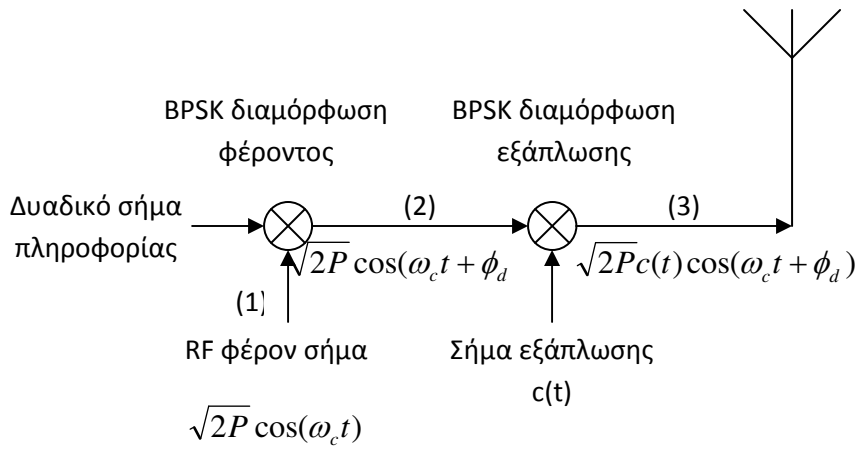
Ένα άλλο σημαντικό σημείο που θα πρέπει να τονιστεί είναι ότι η σειρά της διαμόρφωσης εξάπλωσης και της διαμόρφωσης φέροντος είναι τις περισσότερες φορές μη αναστρέψιμη, και συνήθως η διαμόρφωση εξάπλωσης προηγείται της διαμόρφωσης φέροντος στον πομπό. Το σήμα πληροφορίας, δηλαδή, θα πρέπει πρώτα να διαμορφωθεί από το σήμα εξάπλωσης και στη συνέχεια να διαμορφωθεί εκ νέου από το RF φέρον πριν οδηγηθεί στην κεραία για μετάδοση. Παρόλα αυτά, αν τόσο η διαμόρφωση εξάπλωσης όσο και η διαμόρφωση φέροντος χρησιμοποιούν BPSK modems, μπορεί να γίνει αλλαγή στη σειρά των δύο διαμορφώσεων.

Στην ιδανική BPSK διαμόρφωση γίνεται ακαριαία μετατόπιση φάσης του φέροντος κατά 0° και 180° ανάλογα με το πρόσημο δυαδικού σήματος πληροφορίας ως ένα διαμορφωμένο σήμα. Μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί ως το γινόμενο του φέροντος με τη συνάρτηση $c(t)$, που παίρνει τιμές ±1. Θεωρούμε ένα διαμορφωμένο φέρον με σταθερή περιβάλλουσα, με ισχύ P και κυκλική συχνότητα φέροντος ω_c:

$$f_d(t) = \sqrt{2P} \cdot \cos\left[\omega_c t + \phi_d(t)\right] \quad \textbf{(1.19)}$$

όπου $\phi_d(t)$ είναι η φάση του διαμορφωμένου σήματος πληροφορίας, η οποία παίρνει δύο τιμές, είτε 0° είτε 180° ανάλογα με το πρόσημο (+1 ή -1 αντίστοιχα) της δυαδικής πληροφορίας, και ο όρος $\sqrt{2P}$ δίνει τη μέση ισχύ P.

Το σήμα καταλαμβάνει ένα εύρος ζώνης ανάμεσα στο μισό και το διπλάσιο του data rate πριν την DS διαμόρφωση εξάπλωσης, ανάλογα με τις λεπτομέρειες της διαμόρφωσης και τη μορφή των μορφοποιητικών παλμών κατά το σχηματισμό των αρχικών bits δεδομένων. Η BPSK εξάπλωση επιτυγχάνεται πολλαπλασιάζοντας το $f_d(t)$ με το $c(t)$, που ονομάζεται και σήμα/ ακολουθία εξάπλωσης όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.15.



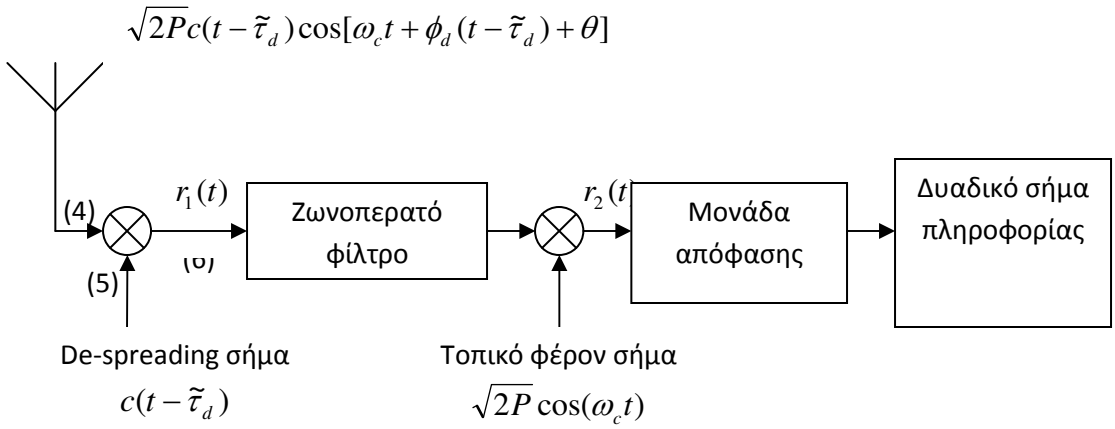
Σχήμα 1.15. BPSK DS-SS πομπός.

Το μεταδιδόμενο σήμα μετά τη διαμόρφωση εξάπλωσης είναι

$$f_s(t) = \sqrt{2P} \cdot c(t) \cdot \cos\left[\omega_c t + \phi_d(t)\right] \quad \textbf{(1.20)}$$

του οποίου το εύρος ζώνης κατά βάση καθορίζεται από το φάσμα του $c(t)$, που είναι συνήθως ευρείας ζώνης σήμα ακολουθίας. Τονίζεται επίσης ότι ο πολλαπλασιασμός του $f_d(t)$ με το $c(t)$ δεν θα μεταβάλει την ισχύ του $f_d(t)$, παρά μόνο θα επεκτείνει το εύρος ζώνης του. Αυτό ουσιαστικά είναι το SS σήμα. Σύμφωνα με την ιδιότητα της κλιμάκωσης (scaling) του μετασχηματισμού Fourier, η επέκταση στο πεδίο της συχνότητας οδηγεί σε 'συρρίκνωση' στο πεδίο του χρόνου. Ακόμη, σύμφωνα με την αρχή διατήρησης ενέργειας, η επέκταση του φάσματος στο πεδίο της συχνότητας θα προκαλέσει μείωση του μέγιστου πλάτους, εφόσον η συνολική ισχύς παραμένει η ίδια. Αυτό κάνει το SS σήμα να εμφανίζεται σε κάποιον ανεπιθύμητο τρίτο δέκτη ως ευρείας ζώνης παρεμβολή, που μοιάζει με θόρυβο. Είναι προφανές ότι ένας συμβατικός δέκτης (χωρίς εξάπλωση φάσματος) δεν είναι χρήσιμος για την ανίχνευση του ευρείας ζώνης σήματος- θορύβου, καθώς είναι κάτω από το όριο του πραγματικού θορύβου που λαμβάνεται στο δέκτη.

Το σήμα $f_s(t)$ μεταδίδεται σε ένα κανάλι με προσθετικό λευκό Gaussian θόρυβο (AWGN) με μια χρονική καθυστέρηση μετάδοσης τ_d. Το σήμα λαμβάνεται μαζί με παρεμβολή και με AWGN θόρυβο. Η αποδιαμόρφωση επιτυγχάνεται εν μέρει με αποδιαμόρφωση ή με επαναδιαμόρφωση με τον κώδικα εξάπλωσης, που παράγεται τοπικά και υφίσταται την κατάλληλη καθυστέρηση, $c(t-\tau_d)$, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.16.



Σχήμα 1.16. BPSK DS-SS δέκτης.

Η αποδιαμόρφωση ή η συσχέτιση/ συνέλιξη του λαμβανόμενου σήματος με την καθυστερημένη κυματομορφή εξάπλωσης ονομάζεται de-spreading διαδικασία και είναι ιδιαίτερα σημαντική σε ένα SS σύστημα. Το σήμα μετά τη μονάδα de-spreading είναι:

$$r_1(t)=\sqrt{2P}c(t-\tau_d)c(t-\tilde{\tau}_d)\cos\left[\omega_c t+\phi_d(t-\tau_d)+\theta\right] \quad \textbf{(1.21)}$$

όπου $\tilde{\tau}_d$ είναι η εκτιμώμενη καθυστέρηση στο δέκτη, τ_d είναι η καθυστέρηση διάδοσης που υφίσταται το μεταδιδόμενο σήμα και ϑ είναι η καθυστέρηση φάσης που προκαλείται από την καθυστέρηση διάδοσης.

Αν $\tilde{\tau}_d=\tau_d$, η παραπάνω εξίσωση γίνεται

$$r_1(t)=\sqrt{2P}\cos\left[\omega_c t+\phi_d(t-\tau_d)+\theta\right] \quad \textbf{(1.22)}$$

αφού $c(t-\tau_d)c(t-\tilde{\tau}_d)=1$ για $\tilde{\tau}_d=\tau_d$. Αυτό το de-spread σήμα είναι πλέον στενής ζώνης, και είναι παρόμοιο με το αρχικά μεταδιδόμενο διαμορφωμένο κατά φάση σήμα πληροφορίας με μόνες διαφορές στην καθυστέρηση τ_d και στην επιπλέον φάση θ, που προκαλούνται από την καθυστέρηση μετάδοσης από τον πομπό στο δέκτη. Η de-spreading διαδικασία παίζει καθοριστικό ρόλο στη μετατροπή του λαμβανόμενου σήματος ευρείας ζώνης στο αρχικό στενής ζώνης σήμα πληροφορίας.

Από την άλλη, αν ο δέκτης χρησιμοποιεί λανθασμένο σήμα/ ακολουθία εξάπλωσης, έστω $c'(t-\tau_d)$, για να γίνει το de-spread του λαμβανόμενου ευρείας ζώνης σήματος

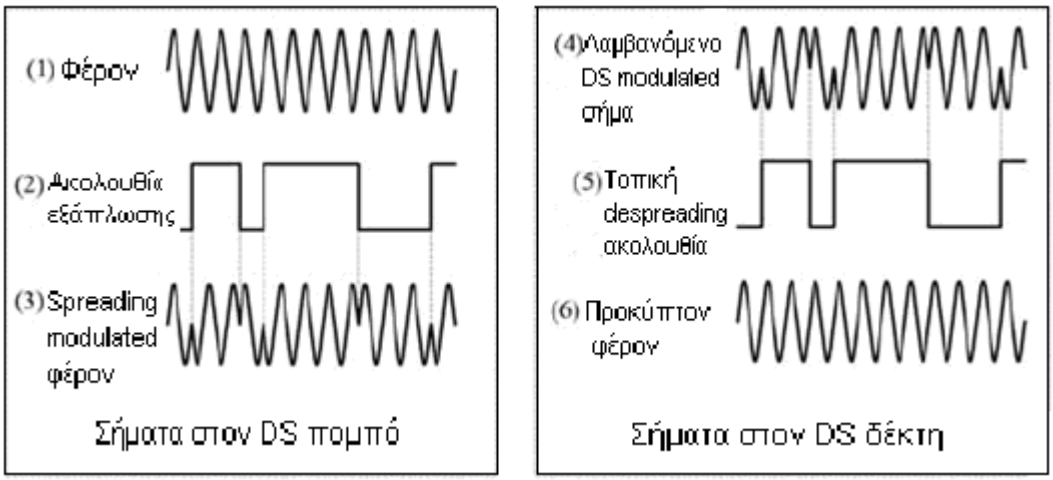
$$\sqrt{2P}c(t-\tau_d)\cos[\omega_c t+\phi_d(t-\tau_d)+\theta] \quad \textbf{(1.23)}$$

δεν θα επιτευχθεί ποτέ η διαδικασία de-spreading για σωστή αποκατάσταση του στενής ζώνης σήματος, καθώς το γινόμενο $c(t-\tau_d)c'(t-\tilde{\tau}_d)$ θα είναι ακόμη μια ακολουθία ευρείας ζώνης ανεξάρτητα αν $\tilde{\tau}_d = \tau_d$ ή όχι, και έτσι, το σήμα

$$\sqrt{2P}c(t-\tau_d)c'(t-\tilde{\tau}_d)\cos[\omega_c t+\phi_d(t-\tau_d)+\theta] \quad \textbf{(1.24)}$$

θα παραμείνει ένα ευρείας ζώνης διαμορφωμένο σήμα. Γι' αυτό το λόγο, το σήμα εξάπλωσης $c(t)$ συνήθως καλείται ακολουθία/κώδικας- υπογραφή (signature sequence/code), καθώς είναι κλειδί για την αποδιαμόρφωση και το de-spreading του λαμβανόμενου σήματος.

Υπάρχουν έξι διαφορετικές κυματομορφές στο πεδίο του χρόνου που παρατηρούνται στον πομπό και στο δέκτη, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.17. Είναι επίσης δυνατό να γίνει κατανομή των αντίστοιχων σημείων παρατήρησης από τα σχήματα 1.15 και 1.16 αντίστοιχα, υποθέτοντας ότι η δυαδική πληροφορία σε αυτή την περίπτωση (σχήμα 1.17) παίρνει τη σταθερή τιμή +1 για λόγους απλότητας της απεικόνισης. Έτσι μπορεί να δει κανείς πώς ένας BPSK DS-SS μεταδότης λειτουργεί βήμα προς βήμα στο πεδίο του χρόνου.



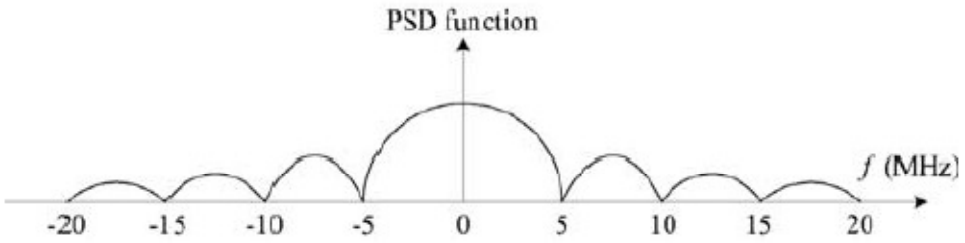
Σχήμα 1.17. Απεικόνιση των κυματομορφών στο πεδίο του χρόνου ενός BPSK DS-SS πομπού και δέκτη. Οι κυματομορφές αντιστοιχούν στα σημεία παρατήρησης (1) και (3) του σχήματος 1.15 και (4) και (6) του Σχήματος 1.16.

Τα block διαγράμματα στα σχήματα 1.15 και 1.16 απεικονίζουν τη δομή ενός τυπικού DS-SS μεταδότη. Ένα DS-SS μπορεί να θεωρηθεί ως μία συμβατική AM ή FM ζεύξη

επικοινωνίας με μόνο ένα επιπρόσθετο κομμάτι για εφαρμογή της διαμόρφωσης εξάπλωσης και της αποδιαμόρφωσης. Η πληροφορία βασικής ζώνης διακριτοποιείται και αρχικά προστίθεται στην ακολουθία εξάπλωσης. Για τη συγκεκριμένη συζήτηση, παρόλα αυτά, γίνεται η υπόθεση ότι το RF φέρον έχει ήδη διαμορφωθεί πριν την διαμόρφωση εξάπλωσης, καθώς αυτό απλοποιεί τη διαδικασία διαμόρφωσης – αποδιαμόρφωσης σε ένα BPSK DS-SS σύστημα. Αφού ενισχυθεί το λαμβανόμενο σήμα πολλαπλασιάζεται με μια ακολουθία αναφοράς που παράγεται τοπικά στο δέκτη και, δεδομένου ότι οι ακολουθίες του πομπού και του δέκτη είναι σύγχρονες και ίδιες οι φάσεις αντιστροφής του φέροντος (σχήμα 1.17, 3-4) θα αφαιρεθούν αποτελεσματικά και η κυματομορφή του αρχικού φέροντος θα αποκατασταθεί. Το στενής ζώνης φέρον μπορεί τώρα να περάσει από ένα βαθυπερατό φίλτρο σχεδιασμένο να επιτρέπει τη διέλευση μόνο του αρχικού διαμορφωμένου φέροντος.

Όλα τα ανεπιθύμητα λαμβανόμενα σήματα τα χειρίζεται ο δέκτης με ανάλογο τρόπο με το επιθυμητό σήμα, πολλαπλασιάζοντας το λαμβανόμενο DS σήμα με την τοπικά παραγόμενη ακολουθία αναφοράς. Κάθε εισερχόμενο σήμα, που δεν είναι σύγχρονο με την τοπική ακολουθία αναφοράς του δέκτη (ευρείας ζώνης σήμα), εξαπλώνεται σε ένα εύρος ζώνης ίσο με το εύρος ζώνης του λαμβανόμενου σήματος επειδή ένα ασύγχρονο σήμα εισόδου καθορίζεται να έχει εύρος ζώνης τουλάχιστο όση και η αναφορά του δέκτη, έτσι ώστε το βαθυπερατό φίλτρο να απορρίψει το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος αυτών των ανεπιθύμητων σημάτων. Αυτός είναι και ο μηχανισμός με τον οποίο υλοποιείται το κέρδος επεξεργασίας σε ένα DS-SS σύστημα: δηλαδή ο δέκτης μετατρέπει τα σύγχρονα σήματα εισόδου από ευρείας ζώνης σήματα που έχουν περάσει από διαμόρφωση εξάπλωσης (sequence-modulated bandwidth) σε στενής ζώνης διαμορφωμένα σήματα(data-modulated bandwidth). Παράλληλα, τα μη-σύγχρονα σήματα εισόδου εξαπλώνονται τουλάχιστον στο διαμορφωμένο εύρος ζώνης της ακολουθίας εξάπλωσης. Το data-modulated εύρος ζώνης καθορίζει και το εύρος ζώνης του ζωνοπερατού φίλτρου, που ακολουθείται από τη συσκευή απόφασης, και αυτό το ζωνοπερατό φίλτρο ελέγχει αποτελεσματικά το ποσό της ισχύος ενός μη-συγχρονισμένου ή ανεπιθύμητου σήματος που φτάνει στον αποδιαμορφωτή δεδομένων. Είναι φανερό ότι η διαδικασία του πολλαπλασιασμού και του φιλτραρίσματος πριν την ανίχνευση δεδομένων στο δέκτη δίνει στο επιθυμητό σήμα πλεονέκτημα ή κέρδος επεξεργασίας. Στην πραγματικότητα το RF εύρος ζώνης σε ένα DS-SS σύστημα, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, επηρεάζει άμεσα πολλές δυνατότητες του συστήματος, όπως για παράδειγμα το πόσο αποτελεσματικά μπορεί να απορρίψει το εξωτερικό jamming. Για παράδειγμα αν είναι διαθέσιμο ένα μέγιστο εύρος ζώνης των 10 MHz το πιθανό PG περιορίζεται από αυτά τα 10 MHz. Διάφορες πρακτικές προσεγγίσεις είναι διαθέσιμες όσο αφορά την επιλογή του κατάλληλου εύρους ζώνης σε μια εφαρμογή anti-interception: βασικό μέλημα είναι η ελαχιστοποίηση της εκπεμπόμενης ισχύος σε watt/Hz. Όταν είναι απαραίτητο ένα μέγιστο PG για την απόρριψη παρεμβολής, το εύρος ζώνης θα πρέπει και πάλι να μεγαλώσει αρκετά. Αν είτε η κατανομή των συχνοτήτων είτε το μέσο διάδοσης δεν επιτρέπουν τη χρήση ενός μεγάλου RF εύρους ζώνης, θα πρέπει να εφαρμοστούν κάποιοι περιορισμοί. Βασικό ζήτημα στα SS συστήματα (και ιδιαίτερα στα DS συστήματα) είναι το εύρος ζώνης τους σε σχέση με την παρεμβολή από άλλα συστήματα, όχι απαραίτητα SS συστήματα, που λειτουργούν στο ίδιο ή σε γειτονικά κανάλια.

Ένα διάγραμμα φάσματος αυτού του τύπου DS-SS συστήματος απεικονίζεται στο σχήμα 1.18, όπου φαίνεται μόνο η περιβάλλουσα της συνάρτησης πυκνότητας φασματικής ισχύος (power spectral density, PSD) ενός BPSK διαμορφωμένου DS-SS σήματος.



Σχήμα 1.18. Απεικόνιση της PSD για ένα BPSK DS-SS σήμα. Ο chip rate του συστήματος είναι 5Mcps και το εύρος ζώνης (από μηδενισμό σε μηδενισμό) 10MHz.

Το εύρος του κύριου λοβού του σήματος είναι συνήθως ίσο με το διπλάσιο του ρυθμού ρολογιού (clock rate) της κωδικής ακολουθίας που χρησιμοποιείται ως σήμα διαμόρφωσης εξάπλωσης. Κάθε ένας από τους πλευρικούς λοβούς έχει εύρος ζώνης ίσο με το clock rate. Εάν η χρησιμοποιούμενη κωδική ακολουθία έχει ρυθμό λειτουργίας 5 Mcps, ο κύριος λοβός θα έχει εύρος ζώνης 10 MHz ενώ κάθε πλευρικός λοβός 5 MHz (Σχήμα 1.18). Από την άλλη στο πεδίο του χρόνου, το BPSK διαμορφωμένο DS-SS φέρον μοιάζει με το Σχήμα 1.17, όπου το φέρον αποστέλλεται με φάση 0°, εάν η κωδική ακολουθία παίρνει την τιμή +1, και με μετατόπιση φάσης 180° εάν η κωδική ακολουθία παίρνει την τιμή -1.

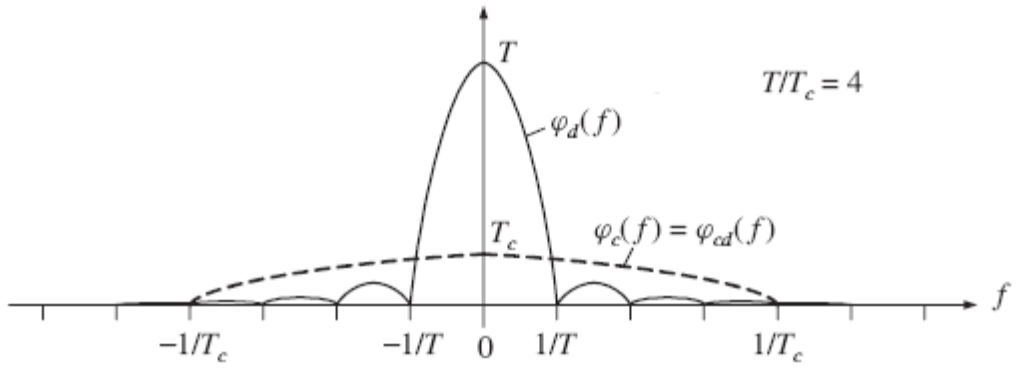
Από τη σκοπιά της συνάρτησης PSD , γίνεται η υπόθεση ότι το ρεύμα της πληροφορίας εισόδου (Σχήμα 1.15) είναι τυχαία ακολουθία με ρυθμό μετάδοσης $\frac{1}{T} bps$:

$$d(t) = \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} d_k \, p_T(t - kT) \quad \textbf{(1.25)}$$

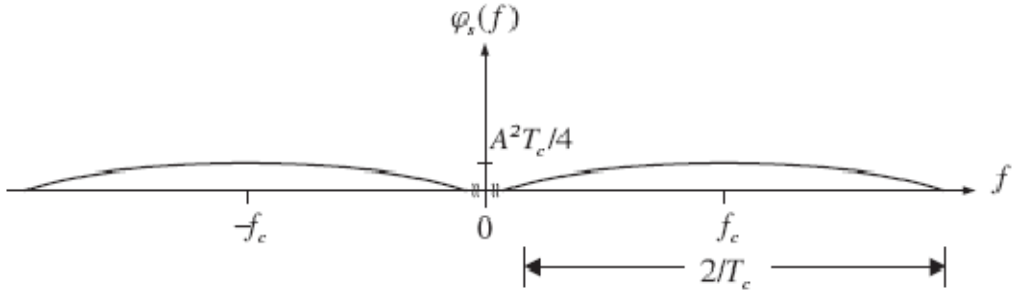
όπου $d_k = \pm 1$, η διάρκεια ενός bit είναι T, και $p_T(t)$ είναι ο μορφοποιητικός παλμός. Η συνάρτηση PSD $\varphi_d(f)$ μπορεί να γραφεί ως:

$$\varphi_d(f) = T\left(\frac{\sin fT}{fT}\right)^2 \quad \textbf{(1.26)}$$

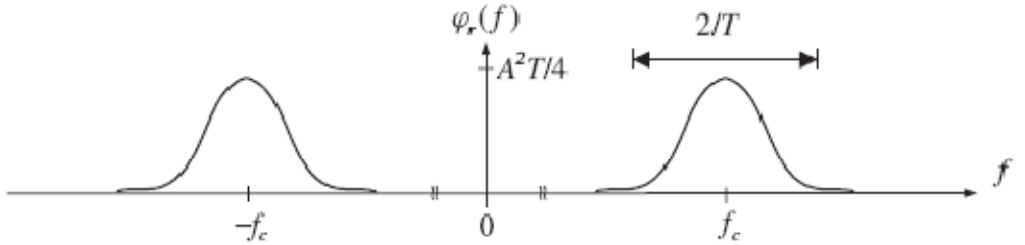
της οποίας το σχήμα φαίνεται στο σχήμα 1.19(α).



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 1.19. (α) PSD συναρτήσεις για την ακολουθία εξάπλωσης και το σήμα πληροφορίας, (β) PSD συναρτήσεις για το BPSK spreading modulated σήμα, (γ) PSD συνάρτηση για το φέρον σήμα μετά το de-spreading ($r_1(t)$ στον DS-SS δέκτη).

Το εύρος ζώνης του είναι ίσο με $\frac{1}{T}Hz$. Γίνεται η υπόθεση ότι η ακολουθία εξάπλωσης είναι επίσης τυχαία ακολουθία και το chip rate είναι ίσο με $\frac{1}{T_c}$. Έτσι, η συνάρτηση PSD $\varphi_c(f)$ μπορεί να γραφεί ως:

$$\varphi_c(f) = T_c\left(\frac{\sin fT_c}{fT_c}\right)^2 \text{, } \textbf{(1.27)}$$

ίδιας μορφής με την $\varphi_d(f)$, όπου αντί για τη διάρκεια ενός bit T χρησιμοποιείται το εύρος του chip T_c. Η συνάρτηση PSD της ακολουθίας εξάπλωσης $\varphi_c(f)$ απεικονίζεται μαζί με τη συνάρτηση PSD της ακολουθίας δεδομένων $\varphi_d(f)$ στο Σχήμα 1.14(α), όπου $T = 4T_c$. Προφανώς, το εύρος ζώνης της ακολουθίας εξάπλωσης είναι ίσο με $\frac{1}{T_c}Hz$.

Θεωρείται τώρα η διαδικασία διαμόρφωσης εξάπλωσης ως έναν απλό πολλαπλασιασμό του σήματος πληροφορίας και της ακολουθίας εξάπλωσης, που με όρους συνάρτησης PSD εκφράζεται ως εξής:

$$\varphi_{cd}(f) = T_c\left(\frac{\sin fT_c}{fT_c}\right)^2 \textbf{(1.28)}$$

που έχει ακριβώς την ίδια μορφή και καταλαμβάνει το ίδιο εύρος ζώνης με την $\varphi_c(f)$. Έτσι, η διαμόρφωση εξάπλωσης επέκτεινε το εύρος ζώνης του σήματος κατά $\frac{T}{T_c} = N$ φορές (στο σχήμα 1.19 N=4). Το N ισούται με το PG του DS-SS συστήματος και συνήθως είναι μεγάλος αριθμός. Η διαμόρφωση φέροντος μετά τη διαμόρφωση εξάπλωσης απλά μετατοπίζει το φάσμα $\varphi_{cd}(f)$ σε μια κεντρική συχνότητα f_c, αλλά ποτέ δεν αλλάζει τη μορφή του $\varphi_{cd}(f)$ (Σχήμα 1.19(β)).

Η συνάρτηση PSD του μεταδιδόμενου σήματος από την κεραία- πομπό γίνεται:

$$\varphi_s(f) = \frac{PT_c}{2}\left\{\left[\frac{\sin(f - f_c)T_c}{(f - f\ )T_c}\right]^2 + \left[\frac{\sin(f + f_c)T_c}{(f + f_c)T_c}\right]^2\right\} \textbf{(1.29)}$$

που είναι ένα ζωνοπερατό σήμα με εύρος ζώνης $\frac{2}{T_c}Hz$ (Σχήμα 1.14(β)). Από το σχήμα φαίνεται ότι το πλάτος του $\varphi_s(f)$ μειώνεται κατά $\frac{2T}{PT_c}$ σε σύγκριση με το $\varphi_d(f)$, ενώ το

εύρος του αυξάνει κατά $N = \frac{T}{T_c}$ (που είναι και το PG) φορές σε σύγκριση με το και πάλι με το $\varphi_d(f)$.

Στον DS-SS δέκτη, η συνάρτηση PSD του λαμβανόμενου σήματος είναι ίδιας μορφής με αυτήν του εκπεμπόμενου σήματος, με μόνο μια καθυστέρηση και κάποια επιπλέον φάση λόγω της καθυστέρησης διάδοσης (Σχήμα 1.16). Η καθυστέρηση δεν αλλάζει τη μορφή της συνάρτησης PSD. Είναι εύκολο να δειχθεί ότι η συνάρτησης PSD του σήματος $r_1(t)$ μετά τη διαδικασία de-spreading είναι:

$$\varphi_r(f) = \frac{PT}{2}\left\{\left[\frac{\sin(f-f_c)T}{(f-f\ )T}\right]^2 + \left[\frac{\sin(f+f_c)T}{(f+f_c)T}\right]^2\right\} \quad \textbf{(1.30)}$$

που απεικονίζεται στο σχήμα 1.19 (γ). Τονίζεται επίσης ότι το $\varphi_r(f)$ έχει ίδια μορφή με το $\varphi_s(f)$, με μόνη διαφορά την αλλαγή από T_c σε T.

Τέλος, στο σχήμα 1.19 φαίνεται ότι, παρόμοια με τη $\varphi_d(f)$, η $\varphi_r(f)$ έχει ένα στενής ζώνης φάσμα ίσο με $\frac{2}{T}$, το διπλάσιο του σήματος $d(t)$. Το φάσμα $\varphi_r(f)$ αποκαθίσταται ως στενής ζώνης συνάρτηση PSD μετά την αποδιαμόρφωση φέροντος, που απλά μετατοπίζει την κεντρική συχνότητα από την f_c πίσω στο μηδέν.

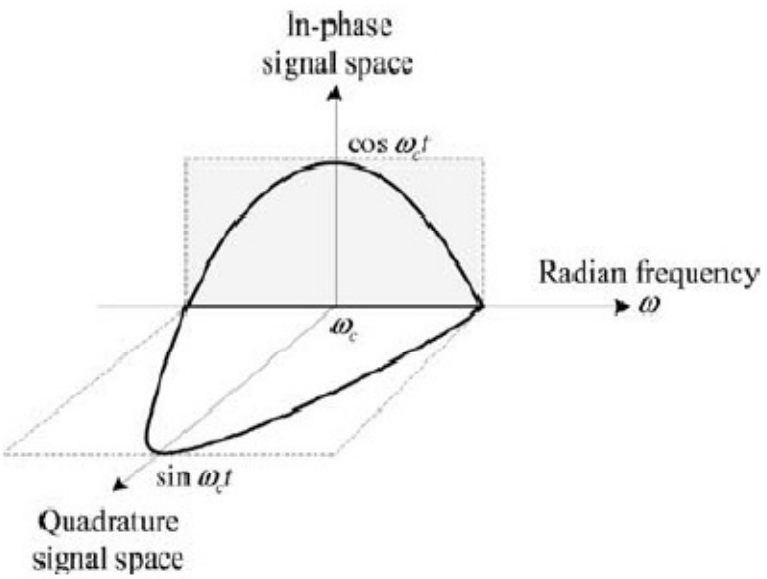
- <u>QPSK DS-SS</u>

Είναι γνωστό ότι η χρήση της ορθογωνικής διαμόρφωσης βελτιώνει αποτελεσματικά τη φασματική απόδοση του ψηφιακού modem χωρίς να θυσιαστεί η απόδοση ισχύος. Τα δύο φέροντα, $\sin(\omega_c t)$ και $\cos(\omega_c t)$, είναι τέλεια ορθογωνικά μεταξύ τους, καθώς

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \sin(\omega_c t)\cos(\omega_c t)dt = \int_{0}^{2\pi} \sin(\omega_c t)\cos(\omega_c t)dt = 0 \quad \textbf{(1.31)}$$

Βέβαια δεν μπορούν να βρεθούν άλλοι τύποι φέροντος εκτός από τα $\sin(\omega_c t)$ και $\cos(\omega_c t)$ που να είναι τέλεια ορθογωνικά μεταξύ τους. Για παράδειγμα σε ένα OFDM σύστημα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πολλά επιμέρους φέροντα για να στείλουμε την πληροφορία παράλληλα. Όμως αυτά τα επιμέρους φέροντα δεν είναι ορθογωνικά με την αυστηρή έννοια, καθώς το καθένα από αυτά υφίσταται πάντα επικάλυψη στο μισό του με τα δυο γειτονικά του φέροντα, πράγμα που εισάγει μεγάλη παρεμβολή σε πολλές περιπτώσεις, όπως σε περιπτώσεις που ισχύει η πολυδιαδρομική διάδοση και το φαινόμενο

Doppler. Παρόλα αυτά τα δυο φέροντα $\sin(\omega_c t)$ και $\cos(\omega_c t)$ μπορούν να λειτουργήσουν πιο εύρωστα σε περιπτώσεις βλάβης του καναλιού, με την τέλεια ορθογωνιότητά τους να μένει ανεπηρέαστη, καθώς αυτή δεν καθορίζεται στο ίδιο επίπεδο σήματος. Αντίθετα η ορθογώνιά τους βασίζεται στο χώρο δυο διαστάσεων, των in-phase και των quadrature χώρο που είναι κάθετοι μεταξύ τους (Σχήμα 1.15).

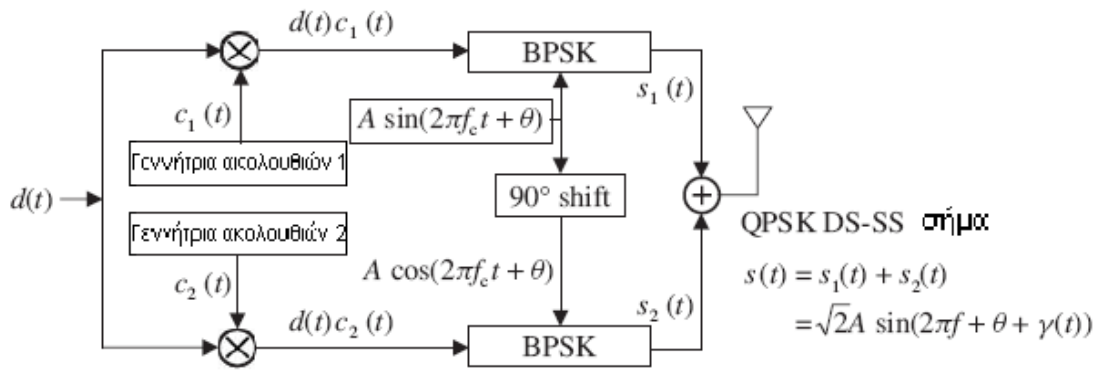


Σχήμα 1.20. Ορθογωνιότητα των $\sin(\omega_c t)$ και $\cos(\omega_c t)$ φερόντων στους χώρους in-phase και quadrature στην QPSK ψηφιακή διαμόρφωση.

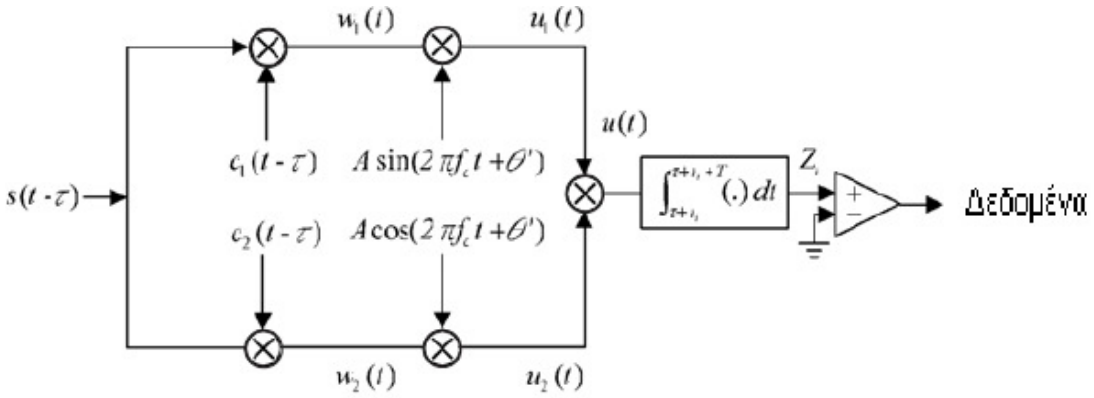
Για το λόγο αυτό, τα φέροντα $\sin(\omega_c t)$ και $\cos(\omega_c t)$ διατηρούν την ορθογωνιότητά τους ακόμα και σε ανεπιθύμητες συνθήκες λειτουργίας, χάρη στο γεγονός ότι πρόκειται για διαφορετικούς χώρους, που είναι ήδη τέλεια ορθογωνικοί μεταξύ τους. Η χρήση της QPSK διαμόρφωσης σε ένα ψηφιακό modem μπορεί να διπλασιάσει τη φασματική απόδοση με αμετάβλητη την απόδοση ισχύος.

Η ίδια ιδέα μπορεί να εφαρμοστεί και σε ένα DS-SS σύστημα για τη βελτίωση της φασματικής απόδοσης σε σύγκριση με ένα BPSK DS-SS σύστημα. Παρόλα αυτά θα πρέπει να τονιστεί ότι η χρήση των in-phase και των quadrature καναλιών σε ένα QPSK DS-SS σύστημα θα πρέπει να λάβει υπόψη και προβλήματα ανάθεσης κωδίκων/ακολουθιών εξάπλωσης (πχ αν πρέπει να ανατεθούν ένας ή δυο διαφορετικοί κώδικες στα in-phase και quadrature κανάλια). Γι' αυτό το λόγο ένα QPSK DS-SS σύστημα δεν θα πρέπει να θεωρείται ισοδύναμο με ένα κανονικό QPSK ψηφιακό σύστημα διαμόρφωσης.

Παρακάτω θεωρούνται ένας γενικός QPSK DS-SS πομπός και ένας δέκτης (Σχήματα 1.21 και 1.22 αντίστοιχα).



Σχήμα 1.21. Ένας QPSK πομπός.



Σχήμα 1.22. Ένας QPSK δέκτης.

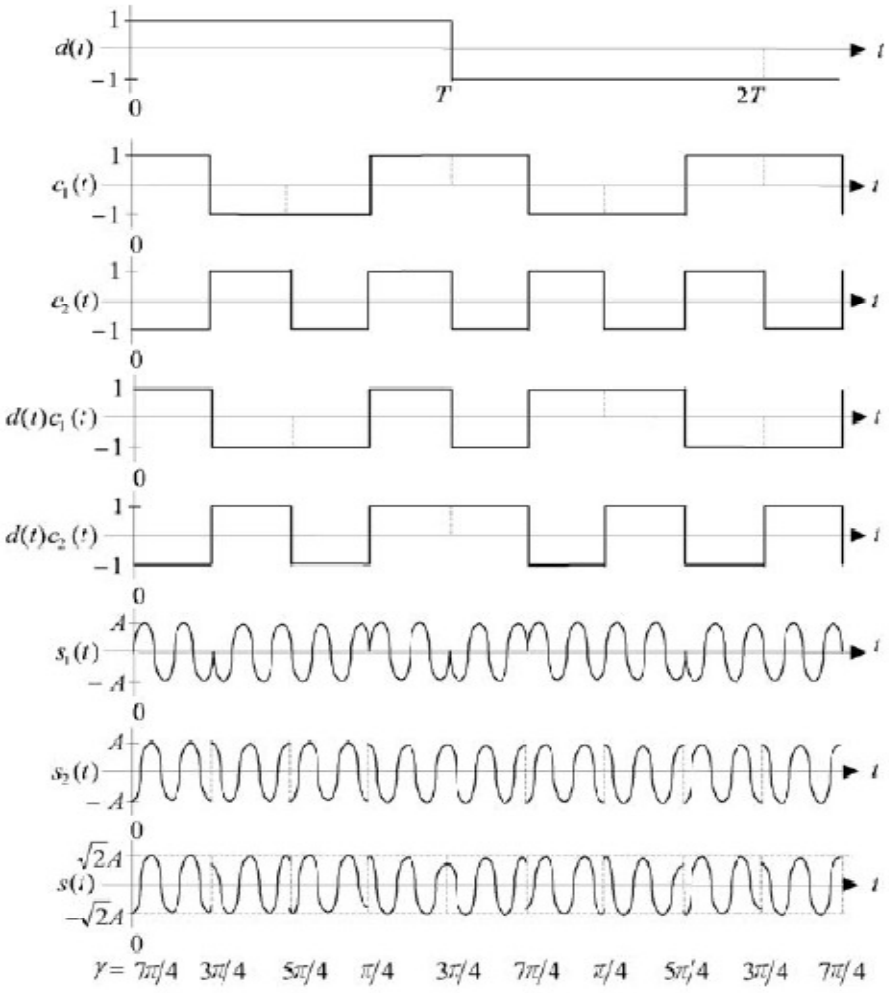
όπου $d(t)$ είναι το ρεύμα εισόδου της πληροφορίας (εξίσωση 1.20) με διάρκεια T, $c_1(t)$ και $c_2(t)$ είναι δύο ακολουθίες εξάπλωσης που παράγονται στον πομπό για τη διαμόρφωση εξάπλωσης στα I και Q κανάλια, $A\sin(2\pi f_c t+\theta)$ και $A\cos(2\pi f_c t+\theta)$ είναι τα in-phase και quadrature φέροντα της QPSK διαμόρφωσης, όπου η μέση ισχύς του φέροντος είναι $P=\frac{A^2}{2}$, και θ είναι η αρχική φάση των φερόντων. Σύμφωνα με το Σχήμα 1.21, το QPSK DS-SS σήμα μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\begin{aligned} s(t) &= s_1(t)+s_2(t) = Ad(t)c_1(t)\sin(2\pi f_c t+\theta)+Ad(t)c_2(t)\cos(2\pi f_c t+\theta) = \\ &= \sqrt{2}A\sin(2\pi f_c t+\theta+\gamma(t)) \end{aligned} \quad \textbf{(1.32)}$$

όπου το διαμορφωμένο κατά φάση $\gamma(t)$ είναι:

$$\gamma(t) = \arctan\left[\frac{c_2(t)d(t)}{c_1(t)d(t)}\right] = \begin{cases} \frac{\pi}{4}, \alpha\nu_c_1(t)d(t) = +1, c_2(t)d(t) = +1 \\ \frac{3\pi}{4}, \alpha\nu_c_1(t)d(t) = -1, c_2(t)d(t) = +1 \\ \frac{5\pi}{4}, \alpha\nu_c_1(t)d(t) = -1, c_2(t)d(t) = -1 \\ \frac{7\pi}{4}, \alpha\nu_c_1(t)d(t) = +1, c_2(t)d(t) = 1 \end{cases} \quad \textbf{(1.33)}$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι το $s(t)$ θα έχει 4 διαφορετικές φάσεις $\theta + \frac{\pi}{4}, \theta + \frac{3\pi}{4}, \theta + \frac{5\pi}{4}, \theta + \frac{7\pi}{4}$, ανάλογα με τους διάφορους συνδυασμούς των $d(t)c_1(t)$ και $d(t)c_2(t)$. Το Σχήμα 1.23 απεικονίζει τις κυματομορφές του σήματος σε διαφορετικά σημεία του QPSK DS-SS μεταδότη.



Σχήμα 1.23. Κυματομορφές σημάτων σε QPSK DS-SS δέκτη.

Τονίζεται ότι χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές ακολουθίες εξάπλωσης $c_1(t)$ και $c_2(t)$. Φυσικά, υπάρχουν και άλλες εναλλακτικές στην επιλογή των ακολουθιών για τα I και Q κανάλια με αποτέλεσμα την πολύ διαφορετική απόδοση, την πολυπλοκότητα εφαρμογής, και άλλα χαρακτηριστικά στοιχεία του QPSK DS-SS συστήματος. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ίδια ακολουθία εξάπλωσης και για τα δύο κανάλια. Τότε, σαφώς και χρειάζεται μικρότερος αριθμός ακολουθιών για κάθε χρήστη για να υποστηριχθούν περισσότεροι χρήστες στο ίδιο SSMA (Spread Spectrum Multiple Access) σύστημα. Η χρήση της ίδιας ακολουθίας εξάπλωσης και για τα δύο κανάλια επιτρέπεται εφόσον τα in-phase και quadrature κανάλια χρησιμοποιούν δύο ορθογωνικά φέροντα, τα $\sin(2\pi f_c t+\theta)$ και $\cos(2\pi f_c t+\theta)$, που ήδη εγγυώνται καλό διαχωρισμό των δύο καναλιών. Παρόλα αυτά, επιπλέον προστασία παρέχεται αν τα δύο κανάλια χρησιμοποιούν διαφορετικές ακολουθίες εξάπλωσης. Σε κάποιες περιπτώσεις συμβαίνουν και διασταυρώσεις των συνομιλιών (cross-talk) λόγω των μη ιδανικών χαρακτηριστικών λειτουργίας, όπως είναι κάποια ανακρίβεια στην εκτίμηση της συχνότητας ή της φάσης ή το jitter στον τοπικό ταλαντωτή του QPSK DS-SS δέκτη. Το τίμημα της επιπλέον προστασίας συνίσταται στο ότι ο αριθμός των απαραίτητων ακολουθιών εξάπλωσης σε όλο το SSMA δίκτυο διπλασιάζεται, και σε πολλές περιπτώσεις ο αριθμός τους είναι περιορισμένος.

Ο δέκτης ενός QPSK DS-SS συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 1.22, όπου γίνεται η υπόθεση ότι ο δέκτης γνωρίζει την ακριβή καθυστέρηση διάδοσης τ από τον πομπό στο δέκτη και παράγει δύο διαφορετικές ακολουθίες εξάπλωσης $c_1(t-\tau)$ και $c_2(t-\tau)$ αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση, στο δέκτη γίνεται πρώτα η διαδικασία de-spreading και μετά ακολουθεί η αποδιαμόρφωση φέροντος, σύμφωνα με τη σειρά του de-spreading και της αποδιαμόρφωσης φέροντος στον πομπό. Καθώς το QPSK modem μπορεί να θεωρηθεί ως δύο BPSK modems που δουλεύουν παράλληλα, η σειρά της διαμόρφωσης εξάπλωσης και της διαμόρφωσης φέροντος μπορεί να μεταβληθεί ταυτόχρονα τόσο στον πομπό όσο και στο δέκτη. Δηλαδή, σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να γίνει η διαμόρφωση φέροντος πριν τη διαμόρφωση εξάπλωσης στον πομπό, και έτσι να γίνει η αποδιαμόρφωση φέροντος πριν τη διαδικασία de-spreading στο δέκτη.

Επίσης, γίνεται η υπόθεση ότι ο δέκτης γνωρίζει τις αρχικές φάσεις θ' των in-phase και quadrature φερόντων στο λαμβανόμενο σήμα $s(t-\tau)$, ώστε να μπορεί να παράγει τα τοπικά φέροντα αναφοράς $A\sin(2\pi f_c t+\theta')$ και $A\cos(2\pi f_c t+\theta')$, που είναι το in-phase μαζί με το λαμβανόμενο σήμα, καταλήγοντας στη λήψη του συνεκτικού QPSK DS-SS σήματος. Τονίζεται ότι η διαφορά μεταξύ της αρχικής φάσης θ των in-phase και quadrature φερόντων στον πομπό και της αρχικής φάσης θ' στο δέκτη οφείλεται στην καθυστέρηση διάδοσης λόγω καναλιού.

Μετά τη διαδικασία de-spreading και την αποδιαμόρφωση φέροντος, τα σήματα από τα I και Q κανάλια συνδυάζονται και περνούν από τη μονάδα ολοκλήρωσης, που λειτουργεί σαν βαθυπερατό φίλτρο, ώστε να 'κοπούν' οι αρμονικές στις υψηλές συχνότητες που δημιουργούνται κατά την αποδιαμόρφωση φέροντος. Η ολοκλήρωση γίνεται στο διάστημα διάρκειας του i-οστού bit πληροφορίας, και συγκεκριμένα από $\tau+t_i$ μέχρι

$\tau + t_i + T$, όπου t_i είναι η στιγμή που αρχίζει το i-οστό bit και τ είναι η καθυστέρηση διάδοσης. Η έξοδος από τον ολοκληρωτή δίνει τη μεταβλητή απόφασης Z_i.

Παρακάτω θα θεωρείται ένα μόνο μονοπάτι διάδοσης με οπτική επαφή (line-of-sight, LoS), και δεν θα ληφθούν υπόψη άλλοι παράγοντες, όπως η πολυδιαδρομική διάδοση, το φαινόμενο Doppler και ούτω καθεξής. Έτσι, το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$s(t-\tau) = Ad(t-\tau)c_1(t-\tau)\sin(2\pi f_c t + \theta') + Ad(t-\tau)c_2(t-\tau)\cos(2\pi f_c t + \theta') \quad \textbf{(1.34)}$$

όπου $\theta' = \theta - 2\pi f_c t$ και τ η καθυστέρηση διάδοσης στο μονοπάτι από τον πομπό ως το δέκτη. Τα σήματα στα I και Q κανάλια μετά το de-spreading και την αποδιαμόρφωση φέροντος γίνονται αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= Ad(t-\tau)\sin^2(2\pi f_c t + \theta') + Ad(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)\sin(2\pi f_c t + \theta')\cos(2\pi f_c t + \theta') = \\ &= \frac{A}{2}d(t-\tau)\left[1-\cos(4\pi f_c t + 2\theta')\right] + \frac{A}{2}d(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)\sin(4\pi f_c t + 2\theta') \end{aligned} \quad \textbf{(1.35)}$$

$$\begin{aligned} u_2(t) &= Ad(t-\tau)\cos^2(2\pi f_c t + \theta') + Ad(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)\sin(2\pi f_c t + \theta')\cos(2\pi f_c t + \theta') = \\ &= \frac{A}{2}d(t-\tau)\left[1+\cos(4\pi f_c t + 2\theta')\right] + \frac{A}{2}d(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)\sin(4\pi f_c t + 2\theta') \end{aligned} \quad \textbf{(1.36)}$$

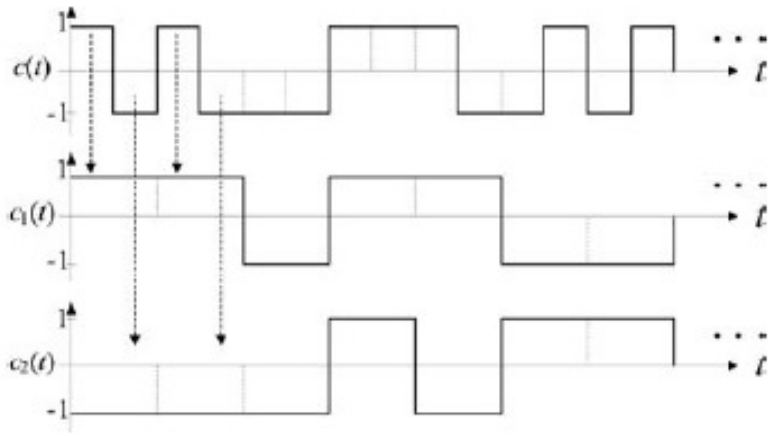
Το άθροισμα των δύο παραπάνω σημάτων είναι:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) = Ad(t-\tau) + Ad(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)\sin(4\pi f_c t + 2\theta') \quad \textbf{(1.37)}$$

Προφανώς, λόγω του βαθυπερατού φιλτραρίσματος, ο δεύτερος όρος της παραπάνω εξίσωσης απαλείφεται και μόνο ο όρος $Ad(t-\tau)$, που αντικατοπτρίζει το σήμα πληροφορίας, παραμένει και δίνει τη μεταβλητή απόφασης $Z_i = AT$, αν αποστέλλεται το ψηφίο +1, ή $Z_i = -AT$, αν αποστέλλεται το ψηφίο -1. Έτσι, η ισχύς της μεταβλητής απόφασης που παράγεται από τον QPSK DS-SS δέκτη είναι η διπλάσια από αυτήν που παράγεται από έναν μόνο BPSK DS-SS δέκτη, εφόσον λειτουργούν υπό τις ίδιες συνθήκες (ίδιος ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας), υποδηλώνοντας ένα κέρδος 3dB στον SNR. Αυτό το κέρδος στο SNR δεν επιβαρύνει την φασματική απόδοση, καθώς τα I και Q κανάλια καταλαμβάνουν το ίδιο εύρος ζώνης, που είναι ακριβώς το ίδιο με το εύρος ζώνης για ένα BPSK DS-SS σύστημα. Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο χρησιμοποιώντας τα ιδανικά ορθογωνικά φέροντα $\sin(\omega_c t)$ και $\cos(\omega_c t)$.

Οι δύο ακολουθίες εξάπλωσης $c_1(t)$ και $c_2(t)$ που εφαρμόζονται στα I κα Q κανάλια μπορεί να είναι διαφορετικές ή να προκύπτουν από διάσπαση μιας ακολουθίας

$c(t)$ (Σχήμα 1.24), όπου η διάρκεια του chip του $c(t)$ είναι η μισή της διάρκειας του chip των $c_1(t)$ ή $c_2(t)$, άρα το μήκος των $c_1(t)$ ή $c_2(t)$ είναι το μισό από το μήκος του $c(t)$.

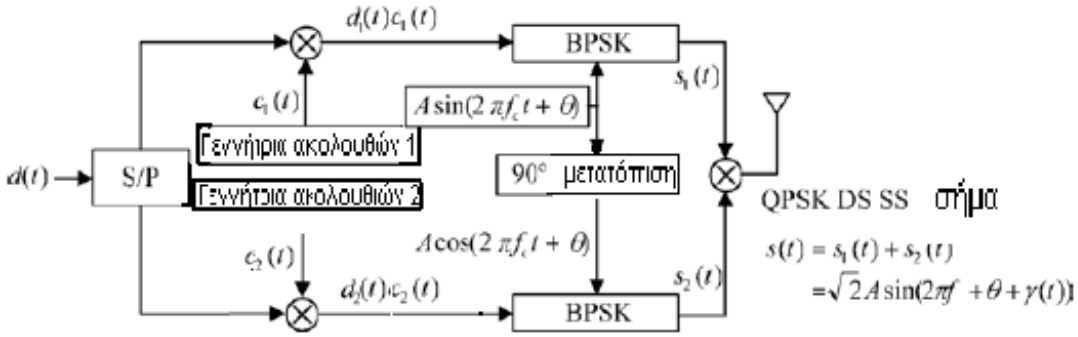


Σχήμα 1.24. Διαχωρισμός της μιας ακολουθίας σε δύο ακολουθίες εξάπλωσης για τη χρήση τους σε ένα QPSK DS-SS σύστημα.

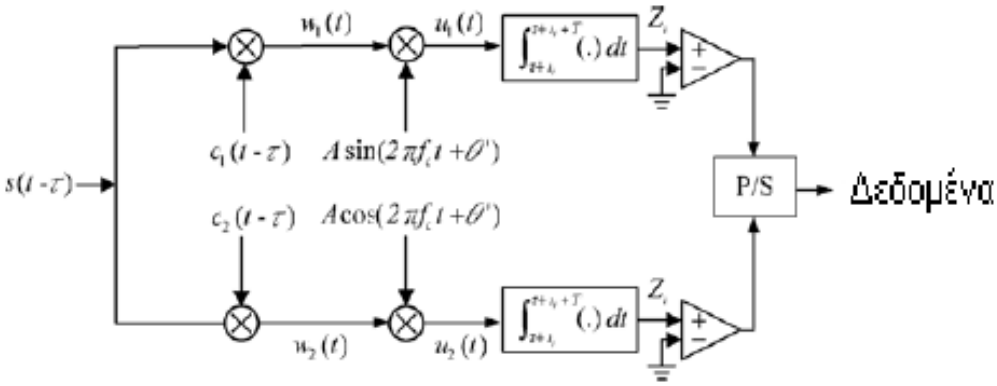
Η απόδοση με όρους bit error rate (BER) ενός QPSK DS-SS συστήματος είναι ίδια με αυτήν ενός BPSK DS-SS συστήματος. Στην πραγματικότητα, κάθε I ή Q κανάλι μπορεί να θεωρηθεί ως ένα BPSK DS-SS σύστημα και καθένα από αυτά έχει το ίδιο BER με ένα κανονικό BPSK DS-SS σύστημα. Έτσι, δυο BPSK συστήματα, σε ένα συγκεκριμένο QPSK DS-SS σύστημα που δουλεύουν μαζί έχουν το ίδιο BER με ένα κανονικό BSPK σύστημα.

Παρόλα αυτά η φασματική απόδοση ενός QPSK DS-SS συστήματος είναι η διπλάσια από αυτή ενός απλού BPSK DS-SS συστήματος και μπορεί να εξηγηθεί ως εξής: έστω T_c το πλάτος του chip για τα $c_1(t)$ και $c_2(t)$ έτσι, τα $s_1(t)$ και $s_2(t)$ έχουν το ίδιο εύρος ζώνης ίσο με $\frac{2}{T_c}$. Αυτό το QPSK DS-SS σύστημα έχει ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας $\frac{1}{T}$ και κέρδος επεξεργασίας $PG = \frac{T}{T_c}$. Το εύρος ζώνης αυτού του QPSK DS-SS συστήματος καθορίζεται από το πλάτος του chip των $c_1(t)$ και $c_2(t)$.

Τονίζεται ότι τα I και Q κανάλια στον πομπό του σχήματος 1.21 στέλνουν το ίδιο ρεύμα bit πληροφορίας με data rate ίσο με $\frac{1}{T}$. Παρόλα αυτά, τα I και Q κανάλια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μοιράζουν διαφορετικά δεδομένα προς αύξηση του ρυθμού μετάδοσης σε $\frac{2}{T}$, εάν η διάρκεια των bit στα δύο κανάλια μένει αμετάβλητη. Σε αυτή την περίπτωση, η δομή του δέκτη θα πρέπει να τροποποιηθεί για να ανιχνεύσει την πληροφορία στα I και Q κανάλια ξεχωριστά (Σχήματα 1.25, 1.26).



Σχήμα 1.25. Μια εναλλακτική δομή ενός QPSK DS-SS πομπού με διπλάσιο ρυθμό μετάδοσης.



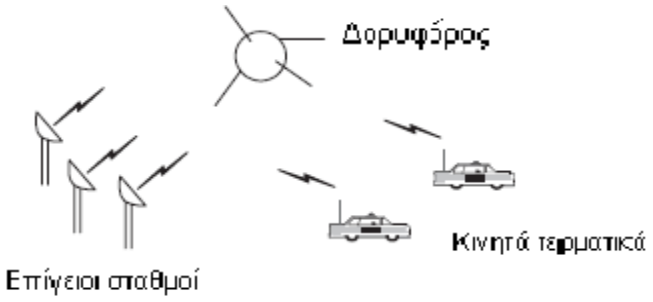
Σχήμα 1.26. Μια εναλλακτική δομή ενός QPSK DS-SS δέκτη με διπλάσιο ρυθμό μετάδοσης.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός QPSK DS-SS συστήματος είναι ο ρυθμός μετάδοσης ή το εύρος ζώνης, το κέρδος επεξεργασίας και το SNR ή η εκπεμπόμενη ισχύς. Προκειμένου να γίνει σύγκριση της απόδοσης δύο DS-SS συστημάτων, όπως ενός QPSK και BPSK DS-SS συστήματος, θα πρέπει δύο από τους παραπάνω παράγοντες να είναι σταθεροί και να μεταβάλλεται μόνο μία παράμετρος. Για παράδειγμα, για τη σύγκριση των QPSK και BPSK DS-SS συστημάτων των Σχημάτων 1.15 και 1.25 θα πρέπει πρώτα να επιλεγεί μια σταθερή τιμή για τον data rate και το κέρδος επεξεργασίας (δηλαδή εύρος ζώνης, ώστε να γίνει καλή σύγκριση των SNR τιμών για τα δύο σχήματα). Εφόσον ο data rate είναι ίδιος, η διάρκεια ενός bit στο I ή στο Q κανάλι στο Σχήμα 1.25 θα είναι διπλάσια από αυτήν στο Σχήμα 1.15. Επίσης, επειδή έχει υποτεθεί ίδιο PG, προκύπτει ότι η φασματική απόδοση για τα δύο σχήματα είναι ίδια. Παρόλα αυτά, η απόδοση ισχύος του QPSK DS-SS συστήματος στο Σχήμα 1.25 είναι διπλάσια από αυτή του BPSK DS-SS συστήματος στο Σχήμα 1.15, εξαιτίας της μεγαλύτερης διάρκειας bit, και άρα της μεγαλύτερης ισχύος του σήματος διαθέσιμη προς την ανίχνευση κάθε bit στο QPSK σχήμα, υποδηλώνοντας υψηλότερο SNR (Signal to Noise Ratio).

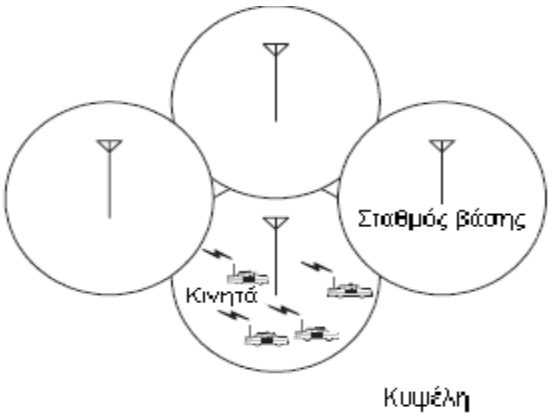
Μια από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές της τεχνικής QPSK DS-SS είναι το GPS σύστημα, που χρησιμοποιήθηκε αρχικά από τις Η.Π.Α σε στρατιωτικές επιχειρήσεις. Τη σημερινή εποχή, το GPS εφαρμόζεται ευρέως σε πολλά πρακτικά συστήματα τα περισσότερα από τα οποία είναι μη στρατιωτικές εφαρμογές και υπηρεσίες. Με ανάλογη μεθοδολογία μπορούν να αναλυθούν DS-SS συστήματα που χρησιμοποιούν άλλα σχήματα διαμόρφωσης, όπως τα MSK (Minimum Shift-Keying)και QAM (Quadrature Amplitude Modulation).

- <u>Εφαρμογές της τεχνικής DS-CDMA</u>

Ένα γενικό μοντέλο ενός DS-CDMA με K χρήστες φαίνεται στο Σχήμα 1.7, όπου θεωρείται μόνο η άνω ζεύξη του συστήματος προκειμένου να είναι η απεικόνιση όσο πιο γενική γίνεται, καθώς οι μεταδόσεις στην κάτω ζεύξη λειτουργούν ως ένα σύγχρονο κανάλι, που είναι ειδική περίπτωση των ασύγχρονων καναλιών όπως γίνεται στην άνω ζεύξη. Ένα καλύτερο παράδειγμα με θεώρηση ενός CDMA συγκεντρωμένου συστήματος φαίνεται στο σχήμα 1.27, όπου απεικονίζονται δύο DS-CDMA συστήματα, ένα δορυφορικό και ένα κινητό κυψελωτό.



(α)



(β)

Σχήμα 1.27. (α) DS-CDMA δορυφορικό σύστημα, (β) DS-CDMA κινητό κυψελωτό σύστημα.

Αναφέρεται ότι ο δορυφόρος στο δορυφορικό DS-CMDA σύστημα λειτουργεί ακριβώς όπως ο σταθμός βάσης στο επίγειο κινητό κυψελωτό σύστημα, ως ένας μοναδικός σταθμός αναμετάδοσης προκειμένου να μεταφέρει τις επικοινωνίες προς και από τερματικά εξωτερικών δικτύων. Ένα παράδειγμα ενός δορυφορικού επίγειου κινητού συστήματος είναι το σύστημα Iridium που προτάθηκε αρχικά από το Motorola. Όμως το σύστημα αυτό απέτυχε. Πολλοί υποστήριξαν ότι η αποτυχία του δεν ήταν εξαιτίας της τεχνολογίας που χρησιμοποιούσε, αλλά της χρονικής στιγμής που λάνσαρε τις υπηρεσίες του. Περισσότεροι εξακολουθούν να έχουν ισχυρή πεποίθηση ότι τα δορυφορικά συστήματα έχουν σημαντικές και αναντικατάστατες εφαρμογές επειδή η λειτουργία τους δεν περιορίζεται γεωγραφικά ή από χρήστες. Επίσης οι υπηρεσίες τους μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο σε στρατιωτικές επιχειρήσεις και σε περιπτώσεις καταστροφών όπου η υποδομή του σταθερού επίγειου κινητού κυψελωτού συστήματος δεν είναι διαθέσιμη.

Από την άλλη, ένα παράδειγμα ενός DS-CDMA κινητού κυψελωτού συστήματος είναι το IS-95A/B σύστημα, που αναπτύχθηκε από την Qualcomm Inc., και πολλά άλλα 3^{ης} γενιάς standards όπως το UNTS-UTRA, W-CDMA, cdma2000 και το TD-SCDMA. Εκτός από τα δορυφορικά και κινητά κυψελωτά συστήματα, η τεχνολογία DS-CDMA, έχει εφαρμοστεί ευρέως και σε πολλές άλλες ασύρματες εφαρμογές, όπως είναι τα WRANs (wireless regional area networks, IEEE 802.22 standard), WMANs (wireless metropolitan area networks, IEEE 802.16 standard), WLANs (wireless local area networks, IEEE 802.11a/b/c standard), WPANs (wireless personal area networks, IEEE 802.15 standard) και οι επικοινωνίες από όχημα σε όχημα (IEEE 802.11p standard).

Η χρήση του DS-CDMA μπορεί να ενισχύσει σημαντικά τη φασματική απόδοση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά σχήματα πολλαπλής πρόσβασης, όπως είναι τα FDMA και TDMA. Το φάσμα είναι υπερβολικά ακριβό: θα πρέπει να αγοραστεί από αρμόδιες κυβερνητικές αρχές μέσω δημοπρασίας, και πολλές φορές σε τέτοιες δημοπρασίες ακούγονται ποσά δισεκατομμυρίων. Αντιπροσωπεύει μια αξιοσημείωτη επένδυση από κάποιο φορέα. Συνεπώς, η ευρυζωνική αποδοτικότητα των τεχνολογιών επικοινωνίας είναι και η βασική μέριμνα του διαχειριστή του δικτύου. Η σωστή επιλογή του κατάλληλου σχήματος πολλαπλής πρόσβασης είναι υψίστης σημασίας. Το DS-CDMA κινητό κυψελωτό σύστημα διεκπεραιώνει περισσότερες κλήσεις από τις TDMA τεχνολογίες. Γενικά μιλώντας, το CDMA μπορεί να διεκπεραιώνει δύο ή τρείς φορές ταυτόχρονες κλήσεις από το TDMA για το ίδιο εύρος ζώνης. Αυτό το συμπέρασμα προέκυψε από τη σύγκριση των συστημάτων IS-95 και DAMPS, τα οποία ήταν τεχνολογίας 2^{ης} γενιάς ευρέως χρησιμοποιούμενες στη Βόρεια Αμερική. Αυτό έχει να κάνει με το συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνότητας που για ένα CDMA σύστημα μπορεί να είναι ίσος με τη μονάδα. Από την άλλη τα FDMA και TDMA σχήματα χρησιμοποιούν ένα παράγοντα χρησιμοποίησης συχνότητας πολύ μεγαλύτερο από τη μονάδα, με αποτέλεσμα τη μειωμένη αποδοτικότητα στη χρήση του μειωμένου εύρους ζώνης.

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα του CDMA είναι η δυνατότητά του για δυναμική ανάθεση του εύρους ζώνης. Για να γίνει κατανοητό αυτό, ο όρος «εύρος ζώνης» αναφέρεται στην ικανότητα κάποιου χρήστη να λάβει δεδομένα από τη μια άκρη στην άλλη. Δεν αναφέρεται στο ποσό του φάσματος που χρησιμοποιείται από το χρήστη, επειδή

στο CDMA κάθε τερματικό χρησιμοποιεί ολόκληρο το φάσμα του φέροντος, οποτεδήποτε στέλνει ή λαμβάνει. Από την άλλη, το TDMA λειτουργεί παίρνοντας ένα κανάλι με ένα σταθερό εύρος ζώνης και διαιρώντας το σε χρονοσχισμές. Κάθε κινητό τερματικό έχει τότε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει μία ή περισσότερες από τις χρονοσχισμές για την πραγματοποίηση κλήσης. Για παράδειγμα, αν το κανάλι έχει εύρος 200KHz με 8 χρονοσχισμές και σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία από αυτές, τότε ο χρήστης έχει ενεργό εύρος ζώνης 200/8=25KHz. Αυτό το εύρος ζώνης ανατίθεται στο χρήστη όσο κλήση είναι σε εξέλιξη ανεξάρτητα αν ο χρήστης το χρησιμοποιεί πραγματικά ή όχι. Με άλλα λόγια, σε TDMA σύστημα όταν κάποιος είναι σε μία κλήση και σιωπά επειδή ακούει τον άλλο να μιλά, το τηλέφωνο εξακολουθεί να χρησιμοποιεί όλο το εύρος ζώνης. Το CDMA είναι πιο αποδοτικό όσον αφορά τη συγκεκριμένη περίπτωση. Τόσο στο TDMA όσο και στο CDMA η εξερχόμενη κίνηση φωνής διακριτοποιείται και συμπιέζεται. Αλλά ο CDMA κωδικοποιητής αντιλαμβάνεται πότε το πακέτο είναι αρκετά απλούστερο (σιωπή ή κάποιος τόνος με μικρή αλλαγή στη διαμόρφωση) και συμπιέζει το πακέτο με πολύ καλύτερο τρόπο. Έτσι το πακέτο μπορεί να περιλαμβάνει λιγότερα bits και να χρειάζεται λιγότερος χρόνος για τη μετάδοση με εξοικονόμηση του μέσου εύρους ζώνης που χρησιμοποιεί κάθε τερματικό.

Και εδώ προκύπτει το ερώτημα του τι σημαίνει «εύρος ζώνης» στο CDMA. Με την κυριολεκτική έννοια, το εύρος ζώνης στο CDMA είναι ίσο με τη λαμβανόμενη ισχύ στην κυψέλη. Τα CDMA συστήματα συνεχώς προσαρμόζουν την ισχύ για να βεβαιωθούν ότι χρησιμοποιείται η λιγότερη δυνατή και αυτό το αντισταθμίζουν με το κέρδος κωδικοποίησης χρησιμοποιώντας πρόσθια διόρθωση λαθών (forward error correction, FEC) και άλλες προσεγγίσεις, όπως είναι το PG. Το chip rate είναι σταθερό και, εάν μεταφέρονται περισσότερα πραγματικά δεδομένα από το σταθερό chip rate τότε το κέρδος επεξεργασίας θα είναι μικρότερο. Έτσι είναι απαραίτητη η χρήση περισσότερης ισχύος.

Γενικά, ένας δεδομένος τομέας της κυψέλης μπορεί να αντέξει ένα συγκεκριμένο ποσό της συνολικά λαμβανόμενης ισχύος πριν γίνει δύσκολη η αποκρυπτογράφηση όλων των καναλιών που λαμβάνονται. Αν ένα κινητό τερματικό χρησιμοποιεί περισσότερη από αυτήν την κατανομή ισχύος, τότε μένει λίγο διαθέσιμο για τους υπόλοιπους. Αυτό είναι πλεονέκτημα και όχι μειονέκτημα. Σε ένα TDMA σύστημα, γίνεται η υπόθεση ότι ένα κινητό τερματικό χρειάζεται λίγο πολύ μια χρονοσχισμή των 25 kHz. Δεν υπάρχει τρόπος το τερματικό να πάρει μικρότερο εύρος, ενώ για μεγαλύτερο θα χρειαζόταν επιπλέον χρονοσχισμή, γεγονός που θα απαιτούσε επικοινωνία σε επίπεδο πρωτοκόλλου: το τερματικό λέει στο σταθμό βάσης «χρειάζομαι περισσότερο εύρος ζώνης», η κυψέλη βρίσκει κάποιο άλλο τερματικό στο ίδιο κανάλι και του λέει να φύγει ελευθερώνοντας μια χρονοσχισμή και τέλος στέλνει ένα μήνυμα πίσω στο τερματικό «εντάξει μπορείς να χρησιμοποιήσεις αυτή τη χρονοσχισμή». Για να γίνει αυτό χρειάζεται να περάσει κάποιος χρόνος και πολλές φορές όταν ολοκληρωθεί η ανάγκη για περισσότερο εύρος ζώνης.

Από την άλλη το CDMA το κάνει αυτό δυναμικά . όταν ένα CDMA κινητό τερματικό αντιλαμβάνεται ότι δεν χρειάζεται να μεταδώσει ένα γεμάτο ψηφιακό πακέτο, χρησιμοποιεί ένα πακέτο με ρυθμό ½ ή ¼ ή 1/8 του κανονικού ρυθμού και μεταδίδει για λιγότερο χρόνο. Μεταδόσεις πακέτων συμβαίνουν 59 φορές το δευτερόλεπτο στα σημερινά CDMA συστήματα (IS-95 standard) αλλά ένα κινητό τερματικό που έχει να στείλει ένα

πακέτο μισού ρυθμού, θα στείλει ψευδοτυχαία τα μισά σύμβολα σε ένα πακέτο των 20 ms. Λαμβανόμενη ισχύς στην κυψέλη μετριέται ακαριαία. Αν δύο κινητά τερματικά μεταδίδουν με μισό ρυθμό, αλλά σε διαφορετικές στιγμές, η κυψέλη λαμβάνει ισχύ μόνο από το ένα τερματικό τη φορά. Έτσι ανατίθεται το εύρος ζώνης δυναμικά στο CDMA. Και όταν κάποιος ακούει και σιωπά ο ρυθμός πέφτει στο 1/8 και ουσιαστικά δεν χρησιμοποιεί το εύρος ζώνης. Αυτό είναι ιδιαίτερα θετικό για την κίνηση φωνής και είναι ένας επιπρόσθετος λόγος του γιατί το CDMA είναι περισσότερο αποδοτικό στη χρήση του φάσματος, αλλά εκεί που είναι ιδιαίτερα πολύτιμο είναι όταν γίνεται μετάδοση δεδομένων. Αυτό οφείλεται στο ότι η κίνηση δεδομένων είναι πολύ εκρηκτική, ακόμα περισσότερο από την κίνηση φωνής. Δεν έχει παρά να σκεφτεί κανείς πως χρησιμοποιεί ένα browser, κάνοντας κλικ για παράδειγμα σε μια URL σύνδεση και βλέποντας τον υπολογιστή να κατεβάζει πολύ γρήγορα πολλά Kbytes δεδομένων, ενώ μετά κάθεται κανείς και διαβάζει ό,τι κατέβασε χωρίς να υπάρχει κίνηση δεδομένων. Σε ένα CDMA σύστημα είναι πολύ εύκολο να αναθέσει κανείς ένα κομμάτι του εύρους ζώνης σε ένα κινητό τερματικό για ένα διάστημα. Τίποτα ιδιαίτερο δεν χρειάζεται να γίνει, παρά να αναθέσει στο τερματικό την ανάλογη ισχύ, χωρίς να ζητηθεί άδεια από την κυψέλη. Η υψηλή φασματική απόδοση και η δυναμική ανάθεση φάσματος είναι οι βασικοί λόγοι που όλα τα τρίτης γενιάς κινητά κυψελωτά συστήματα χρησιμοποιούν το CDMA. Τονίζεται ότι το δεύτερης γενιάς ETSI σύστημα, το GSM, βασίζεται στο TDMA, αλλά η εκδοχή του στην $3^{η}$ γενιά χρησιμοποιεί το CMDA, ή το UMTS-UTRA.

Η ευρεία χρήση της τεχνολογίας DS-CDMA στις $2^{ης}$ και $3^{ης}$ γενιάς ασύρματες επικοινωνίες μπορεί να αποδοθεί και στην σχετικά χαμηλή εκπεμπόμενη ισχύ σε σύγκριση με τα σχήματα FDMA και TDMA. Το χαμηλό επίπεδο της εκπεμπόμενης ισχύος είναι άμεση απώλεια της θεωρίας του Shannon. Ένα DS-CDMA σύστημα χρησιμοποιεί πολύ μεγαλύτερο εύρος ζώνης από το απαιτούμενο σε ένα στενής ζώνης TDMA ή FDMA σύστημα. Έτσι είναι φυσικό το DS-CDMA σύστημα να χρειάζεται λιγότερη ισχύ για να εξυπηρετήσει τους χρήστες με τον ίδιο μέγιστο ρυθμό από ένα TDMA ή FDMA σύστημα.

Είναι γνωστό ότι το μέσο επίπεδο ισχύος σε ένα DS-CDMA τερματικό είναι μόνο το 1/3 από αυτό που είναι απαραίτητο σε ένα TDMA τερματικό, υπό τον όρο να λειτουργούν και τα δύο με τον ίδιο μέγιστο ρυθμό μετάδοσης. Το FDMA τερματικό απαιτεί το υψηλότερο επίπεδο ισχύος και από τα τρία σχήματα. Η μικρότερη εκπεμπόμενη ισχύς είναι ένα από τα πιο ελκυστικά χαρακτηριστική των DS-CDMA κινητών κυψελωτών συστημάτων. Πολλοί άνθρωποι ανησυχούν για το γεγονός ότι η συχνή χρήση κινητών τηλεφώνων στην καθημερινή ζωή μπορεί να προκαλέσει ασθένειες, όπως όγκοι στον εγκέφαλο και άλλα. Πολλές έρευνες, οι περισσότερες κατά την απαίτηση των παρόχων υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, έχουν δείξει ότι δεν υπάρχει έμμεση σχέση της συχνής χρήσης κινητών τηλεφώνων και των παραπάνω ασθενειών. Κάποιες άλλες ερευνητικές ομάδες βέβαια έδειξαν ότι η εκπομπή RF ισχύος προκαλεί δυσλειτουργίες στα ανθρώπινα κύτταρα ή ακόμα και γενετικές μεταλλάξεις.

Από τη σκοπιά της ανθρώπινης υγείας η DS-CDMA τεχνολογία είναι ακόμα πιο ελκυστική από τα FDMA και TDMA σχήματα. Ακόμα και η τεχνική OFDMA δεν μπορεί να συγκριθεί με το DS-CDMA σε όρους εκπεμπόμενης ισχύος. Ο λόγος είναι ότι ο OFDMA πομπός χρησιμοποιεί ένα απλό AM modem για τη μετάδοση των RF σημάτων και το AM

modem είναι γνωστό για την πολύ μικρή απόδοση ισχύος. Άρα η μέση εκπεμπόμενη ισχύς σε ένα OFDMA πομπό πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν ενός DS-CDMA πομπού, παρόλο που η OFDMA τεχνική έχει πολλά άλλα ελκυστικά χαρακτηριστικά, διαφορετικά από αυτά της DS-CDMA.

1.3.3.4 CDMA με μεταπήδηση συχνότητας (FH-CDMA)

Στα FH-CDMA συστήματα, το φέρον του διαμορφωμένου σήματος πληροφορίας δεν είναι σταθερό αλλά αλλάζει περιοδικά. Κατά τη διάρκεια χρονικού διαστήματος T η συχνότητα φέροντος παραμένει σταθερή, αλλά μετά την παρέλευση χρόνου T το φέρον μεταπηδά σε άλλη (ή πιθανόν στην ίδια) συχνότητα. Το σχήμα μεταπήδησης καθορίζεται από την ακολουθία κώδικα. Το σύνολο των διαθέσιμων φερόντων ονομάζεται σύνολο μεταπήδησης (hop-set).

Το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει ένα σύστημα FH-CDMA διαφέρει αρκετά από εκείνο ενός συστήματος DS-CDMA. Το σύστημα DS-CDMA καταλαμβάνει όλο το εύρος ζώνης συχνοτήτων όταν μεταδίδει, ενώ το FH-CDMA χρησιμοποιεί μόνο ένα μικρό μέρος του εύρους ζώνης, αλλά η θέση του μέρους αυτού στο συνολικό εύρος ζώνης μεταβάλλεται χρονικά.

Πέρα από τις γενικές ιδιότητες των σημάτων απλωμένου φάσματος, το FH-CDMA έχει ακόμα μερικά πλεονεκτήματα. Ο συγχρονισμός είναι πολύ ευκολότερος από ότι στην DS-CDMA. Το σφάλμα συγχρονισμού πρέπει να διατηρηθεί σε κλάσμα του χρόνου μεταπήδησης. Επειδή το άπλωμα του φάσματος δεν λαμβάνεται με τη χρήση υψηλής συχνότητας μεταπήδησης αλλά με τη χρήση μεγάλου συνόλου συχνοτήτων μεταπήδησης, ο χρόνος μεταπήδησης είναι πολύ μεγαλύτερος από τη διάρκεια ενός chip. Συνεπώς, το FH-CDMA επιτρέπει μεγαλύτερο σφάλμα συγχρονισμού από ότι η DS-CDMA.

Οι διάφορες ζώνες συχνοτήτων που καταλαμβάνει η FH-CDMA δεν είναι ανάγκη να είναι γειτονικές στο φάσμα, δεδομένου ότι μπορεί εύκολα ο συνθέτης συχνοτήτων να μεταπηδά σε συγκεκριμένα τμήματα του φάσματος. Το γεγονός τούτο, σε συνδυασμό με τον ευκολότερο συγχρονισμό, επιτρέπει χρησιμοποίηση πολύ μεγαλύτερων περιοχών συχνοτήτων. Επίσης, η πιθανότητα να μεταδίδουν πολλοί χρήστες ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή συχνοτήτων είναι μικρή. Ένας χρήστης που μεταδίδει ευρισκόμενος μακριά από το σταθμό βάσης θα λαμβάνει ακόμη και αν οι χρήστες που βρίσκονται κοντά στο σταθμό βάσης μεταδίδουν, επειδή οι κοντινοί χρήστες θα μεταδίδουν πιθανόν σε διαφορετικές συχνότητες. Συνεπώς, η επίδοση της FH-CDMA ως προς το φαινόμενο near-far είναι πολύ καλύτερη από εκείνη της DS-CDMA. Τέλος, ένα σύστημα FH-CDMA, λόγω του μεγαλύτερου εύρους ζώνης που μπορεί να χρησιμοποιεί, μπορεί να παρέχει μεγαλύτερη απόρριψη παρεμβολής στενής ζώνης.

Ως κύριο μειονέκτημα της FH-CDMA μπορεί να αναφερθεί ο πιο πολύπλοκος συνθέτης συχνοτήτων που απαιτείται. Επίσης, δεδομένου ότι μια απότομη μεταβολή του σήματος κατά τη μεταπήδηση σε άλλη ζώνη συχνοτήτων οδηγεί σε αύξηση του καταλαμβανόμενου εύρους ζώνης, πρέπει να διακόπτεται το σήμα τη στιγμή της

μεταπήδησης. Τέλος, είναι δύσκολη η ομόδυνη αποδιαμόρφωση, λόγω των προβλημάτων διατήρησης των σχέσεων φάσης κατά τη μεταπήδηση.

Στο σύστημα FH-CDMA ανατίθεται σε κάθε χρήστη ένα μοναδικό σχέδιο FH βάσει του οποίου πραγματοποιεί μεταπηδήσεις συχνότητας. Το FH-CDMA μοιάζει με το FDMA μέσα σε κάθε μεταπήδηση. Το FH-CDMA μπορεί περαιτέρω να διακριθεί σε Fast FH-CDMA (FFH-CDMA) και Slow FH-CDMA (SFH-CDMA) σύμφωνα με τη συχνότητα μεταπήδησης (πολλές μεταπηδήσεις ανά bit ή πολλά bit ανά μεταπήδηση). Φυσικά, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα μεταπήδησης, τόσο καλύτερη είναι η επίδοση και πιο ακριβό το σύστημα. Με καλά σχεδιασμένο μηχανισμό διόρθωσης σφαλμάτων, τα ταυτόχρονα μεταδιδόμενα πακέτα που συγκρούονται μπορεί να ληφθούν επιτυχώς.

1.3.3.5 CDMA με μεταπήδηση χρόνου (TH-CDMA)

Στα συστήματα TH-CDMA, το σήμα δεδομένων μεταδίδεται κατά ριπές σε χρονικά διαστήματα που καθορίζονται από την ακολουθία κώδικα που εκχωρείται σε κάθε χρήστη. Ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια και κάθε πλαίσιο διαιρείται σε M χρονοσχισμές. Κατά τη διάρκεια ενός πλαισίου, ο χρήστης μεταδίδει σε μια από της M χρονοσχισμές. Το ποια από τις M χρονοσχισμές κάθε πλαισίου θα χρησιμοποιήσει κάθε φορά ο χρήστης καθορίζεται από τον κώδικά του και, έτσι, σε κάθε χρήστη ανατίθεται ένα μοναδικό σχέδιο TH. Δεδομένου ότι ένας χρήστης μεταδίδει όλα τα δεδομένα του σε μία αντί σε M χρονοσχισμές, το εύρος ζώνης που χρειάζεται για τη μετάδοσή του είναι M φορές μεγαλύτερο. Το TH-CDMA χρησιμοποιεί όλο το εύρος ζώνης για σύντομα χρονικά διαστήματα. Το TH-CDMA μοιάζει με το TDMA μέσα σε κάθε μεταπήδηση.

Πέρα από τις γενικές ιδιότητες των σημάτων απλωμένου φάσματος, το TH-CDMA έχει ακόμα μερικά πλεονεκτήματα. Πρώτον, είναι πολύ πιο εύκολο να υλοποιηθεί από ότι το FH-CDMA. Δεύτερον, είναι πολύ χρήσιμη μέθοδος, όταν υπάρχει περιορισμός ως προς τη μέση ισχύ του πομπού και όχι ως προς τη μέγιστη, δεδομένου ότι τα δεδομένα μεταδίδονται κατά ριπές. Τρίτον, όπως και στο FH-CDMA, το φαινόμενο near-far είναι πολύ πιο ασήμαντο, δεδομένου ότι κάθε τερματικό μεταδίδει μόνο του και δεν εμποδίζεται από μεταδόσεις άλλων τερματικών, ευρισκομένων είτε κοντά είτε μακριά από το σταθμό βάσης. Ως μειονέκτημα, μπορεί να αναφερθεί το γεγονός ότι η χρονική διάρκεια που απαιτείται για το συγχρονισμό είναι μεγάλη, ενώ ο χρόνος που πρέπει να συγχρονιστεί ο δέκτης είναι πολύ μικρός. Επίσης, εάν υπάρχουν πολλαπλές μεταδόσεις, χάνεται ένας μεγάλος αριθμός δεδομένων, οπότε χρειάζεται καλός κώδικας διόρθωσης λαθών καθώς και ανάδευση (interleaving) των δεδομένων.

1.3.3.6 Εξάπλωση φάσματος ή χρόνου;

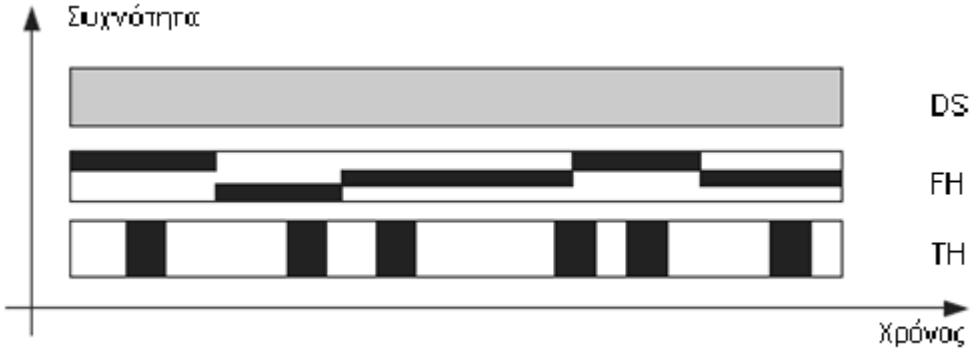
Παρακάτω δίνεται μια σύνοψη των 3 βασικών σχημάτων CDMA:

- DS-CDMA: Η πιο δημοφιλής από τις 3 τεχνικές CDMA για διάφορους λόγους. Πρώτον, είναι η απλούστερη και μπορεί να εφαρμοστεί με σχετικά χαμηλό κόστος

σε σύγκριση με τις τεχνικές FH-CDMA, TH-CDMA. Όλα τα 3ης γενιάς βασικά standards κινητών επικοινωνιών βασίζονται στην DS-CDMA τεχνική. Δεύτερον, ένα DS-CDMA σύστημα μπορεί να είναι συμβατό με άλλα υπάρχοντα δίκτυα επικοινωνιών, που λειτουργούν με βάση άλλες τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης, όπως TDMA, και έτσι επιτυγχάνεται ομαλή αναβάθμιση. Η πρόταση για ένα 3ης γενιάς σύστημα ή WCDMA βασίστηκε κυρίως σε αυτή την ιδιότητα, σε μια προσπάθεια ομαλής αναβάθμισης από το 2ης γενιάς σύστημα GSM που βασίζεται στην TDMA τεχνολογία.

- FH-CDMA: χρησιμοποιείται λιγότερο σε μη στρατιωτικά συστήματα επικοινωνιών σε σύγκριση με την τεχνική DS-CDMA. Η FH τεχνική έχει εφαρμοστεί σε GSM δίκτυα για αντιμετώπιση των συχνο-επιλεκτικών διαλείψεων κυρίως σε αστικά περιβάλλοντα, όπου η πολυδιαδρομική διάδοση είναι έντονη. Η εφαρμογή ενός FH-CDMA συστήματος βασίζεται σε έναν ακριβή και γρήγορο συνθέτη (synthesizer), που μπορεί να είναι και ακριβός αν χρησιμοποιεί μικροηλεκτρονική και τρέχουσα state-of-the-art τεχνολογία. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιείται ευρέως σε στρατιωτικά συστήματα επικοινωνιών, όπως τα συστήματα εντολών μάχης.

- TH-CDMA: χρησιμοποιείται λιγότερο από τις προηγούμενες τεχνικές, καθώς μπορεί να προκύψουν σοβαρά προβλήματα παρεμβολών, αν υπάρχει συνεχής μετάδοση στην περιοχή κάλυψης, διότι το TH σύστημα λειτουργεί με on-and-off τρόπο σε ένα πλαίσιο. Για το λόγο αυτό, η TH τεχνική συνήθως λειτουργεί μαζί με κάποια άλλη SS τεχνική, κυρίως την FH, σχηματίζοντας ένα υβριδικό TH-FH σύστημα. Η TH τεχνική είναι η βάση πολλών UWB τεχνολογιών.



Σχήμα 1.28. Σύγκριση των τεχνικών εξάπλωσης φάσματος/ χρόνου.

1.3.3.6 Τεχνολογίες ασύρματης διεπαφής για τα συστήματα τρίτης γενιάς

Κατά την έρευνα για την πιο κατάλληλη τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στα ασύρματα συστήματα 3ης γενιάς, προτάθηκαν αρκετά σχήματα πολλαπλής πρόσβασης. Το CDMA ευρείας ζώνης (Wideband CDMA, WCDMA) χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 5MHz. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για την επιλογή αυτού του εύρους ζώνης των 5 MHz. Πρώτον, οι

ρυθμοί μετάδοσης των 144 και 384 kbps, που αποτελούν τους κύριους στόχους των συστημάτων 3^{ης} γενιάς, μπορεί να επιτευχθούν με αυτό το εύρος ζώνης, με λογική χωρητικότητα. Μπορεί να παρασχεθεί μέγιστος ρυθμός μετάδοσης μέχρι και 2 Mbps, κάτω από περιορισμένες συνθήκες. Δεύτερον, η έλλειψη φάσματος υπαγορεύει τη λογική εκχώρησή του, ιδιαίτερα όταν το σύστημα πρέπει να λειτουργήσει στις ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται ήδη από τα συστήματα δεύτερης γενιάς. Τρίτον, το εύρος ζώνης των 5 MHz μπορεί να διαχωρίσει περισσότερες πολλαπλές διαδρομές από ότι οι στενότερες περιοχές συχνοτήτων, αυξάνοντας έτσι τη διαφορική λήψη και, κατά συνέπεια, την επίδοση. Έχουν προταθεί και μεγαλύτερα εύρη ζώνης των 10, 15 και 20 MHz για την αποτελεσματική υποστήριξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων.

Έχουν γίνει αρκετές προτάσεις CDMA για τα ασύρματα συστήματα 3^{ης} γενιάς. Μπορούν να χαρακτηριστούν από τις ακόλουθες προηγμένες ιδιότητες:

- Παροχή υπηρεσιών με πολλαπλούς ρυθμούς μετάδοσης
- Μετάδοση δεδομένων με πακέτα
- Σύνθετη εξάπλωση φάσματος
- Συγχρονισμένη άνοδος με χρήση πιλοτικού διαύλου αφιερωμένου στο χρήστη
- Πρόσθετος πιλοτικός δίαυλος στην κάθοδο για τη μορφοποίηση της δέσμης
- Διαφανής διαπομπή μεταξύ συχνοτήτων
- Ταχύς έλεγχος ισχύος στην κάθοδο

Η προτυποποίηση της ασύρματης διεπαφής για τα συστήματα 3^{ης} γενιάς που χρησιμοποιούν CDMA φαίνεται ότι επικεντρώνεται σε δύο κύριες κατηγορίες CDMA ευρείας ζώνης: ασύγχρονου δικτύου και σύγχρονου δικτύου. Στα σχήματα ασύγχρονου δικτύου, οι σταθμοί βάσης δεν είναι συγχρονισμένοι, ενώ στα σχήματα σύγχρονου δικτύου οι σταθμοί βάσης είναι συγχρονισμένοι σε χρονικό διάστημα λίγων μsec. Κυριότερος εκπρόσωπος των σχημάτων ασύγχρονου δικτύου είναι το WCDMA, που προτάθηκε από τον Ευρωπαϊκό οργανισμό προτυποποίησης ETSI και τον Ιαπωνικό ARIB. Κυριότερος εκπρόσωπος των σχημάτων σύγχρονου δικτύου είναι το cdma2000, που προτάθηκε από την Αμερικανική επιτροπή προτυποποίησης TR45.5. Όλα τα σχήματα προσαρμόζονται προς την τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης IMT-2000 της ITU-R. Έγιναν πολλές προσπάθειες για την εναρμόνιση των διαφόρων προσεγγίσεων του CDMA ευρείας ζώνης προς μία ενιαία παγκόσμια ασύρματη διεπαφή. Ωστόσο, λόγω της ανάπτυξης των τρεχόντων σχημάτων και των ισχυρών εμπορικών ενδιαφερόντων των υποστηρικτών τους, φαίνεται ότι θα υπάρχουν, προς το παρόν, δύο τουλάχιστον πρότυπα CDMA ευρείας ζώνης για τα συστήματα 3^{ης} γενιάς.

Στην επιλογή ασύρματης διεπαφής του ETSI, η λύση για την αμφιδρόμηση διαίρεσης χρόνου (TDD) αποφασίστηκε να βασιστεί στις αρχές του TD-CDMA. Ο ρόλος του CDMA στο TD-CDMA είναι να πολυπλέκει τους διάφορους διαύλους σε μια χρονοσχισμή. Ο λόγος εξάπλωσης είναι μικρός και έτσι, αν είναι επιθυμητό να υπάρχουν περισσότεροι χρήστες ανά πλαίσιο, χρειάζεται συνδυασμένη φώραση για την απομάκρυνση της ενδοκυψελικής παρεμβολής. Επίσης, ο αργός έλεγχος ισχύος έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές της στάθμης του λαμβανόμενου σήματος και, συνεπώς, απαιτείται συνδυασμένη φώραση.

Κεφάλαιο 2: Το Ασύρματο Περιβάλλον Στις Κινητές Τηλεπικοινωνίες

2.1 Γενικές αρχές για τη διάδοση

Οι κινητές επικοινωνίες χρησιμοποιούν κυρίως ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητες στη ζώνη που εκτείνεται από μερικές εκατοντάδες MHz μέχρι λίγα GHz. Τα αποτελέσματα της διάδοσης επηρεάζουν τις κινητές τηλεπικοινωνίες κατά αρκετούς τρόπους. Η κατανομή της μέσης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος σε μια συγκεκριμένη περιοχή ή σε έναν συγκεκριμένο χώρο είναι βασική απαίτηση για αξιόπιστη επικοινωνία. Η ισχύς αυτή πρέπει να επαρκεί για την εξυπηρέτηση της ζητούμενης ζεύξης, αλλά δεν πρέπει να είναι τόσο ισχυρή, ώστε να προκαλεί παρεμβολή σε άλλη ζεύξη που λειτουργεί με την ίδια συχνότητα σε άλλη κυψέλη. Επειδή η ραδιοζεύξη μεταβάλλεται πολύ καθώς το κινητό τερματικό διανύει μικρές αποστάσεις, δεν ενδιαφέρει μόνο η μέση ισχύς αλλά και η στατιστική συμπεριφορά της ζεύξης, ειδικότερα σε περιπτώσεις όπου η κατανομή των διαλείψεων εξαρτάται από το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος. Ενδιαφέρει επίσης η ποιότητα του σήματος, διότι μπορεί να είναι τέτοια, ώστε να εμφανίζονται σφάλματα ακόμη και αν υπάρχει επαρκής διαθέσιμη ισχύς για επικοινωνία. Σφάλματα δύναται να συμβούν κατά τις απότομες κινήσεις σε περιβάλλον που προκαλεί σκεδάσεις ή από υποβάθμιση του σήματος από ηχώ μεγάλης διάρκειας που οδηγεί σε διασυμβολική παρεμβολή.

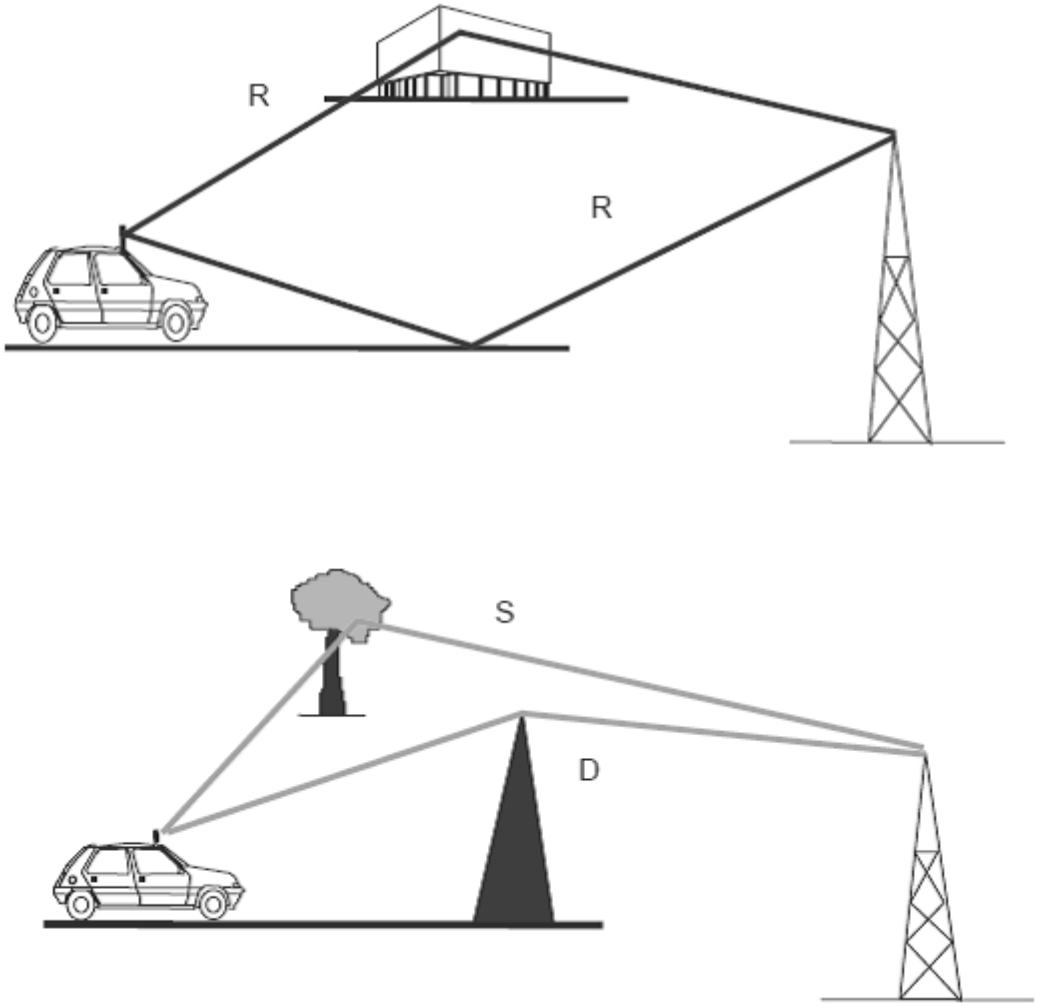
Οι μηχανισμοί που διέπουν την ραδιοδιάδοση είναι πολύπλοκοι και ποικίλοι, και μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις βασικούς: την ανάκλαση (reflection), την περίθλαση (diffraction) και τη σκέδαση (scattering) [4].

- *Ανάκλαση* εμφανίζεται όταν ένα διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε εμπόδιο με διαστάσεις πολύ μεγαλύτερες από το μήκος κύματός του. Ανακλώμενα κύματα παράγονται ύστερα από πρόσπτωση των διαδιδόμενων κυμάτων στην επιφάνεια του εδάφους και σε κτίρια, και 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 φθάνουν στο δέκτη ακόμη και όταν δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη. Η περίθλαση εξηγεί την διάδοση της ενέργειας των ραδιοκυμάτων σε αστικές ή ημιαστικές περιοχές, απουσία οπτικής επαφής.

- *Σκέδαση* εμφανίζεται στην περίπτωση όπου στη διαδρομή του ραδιοκύματος παρεμβάλλονται 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 αποδειχθεί ότι η σκέδαση είναι ο μηχανισμός

διάδοσης που είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί στα ασύρματα συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών.

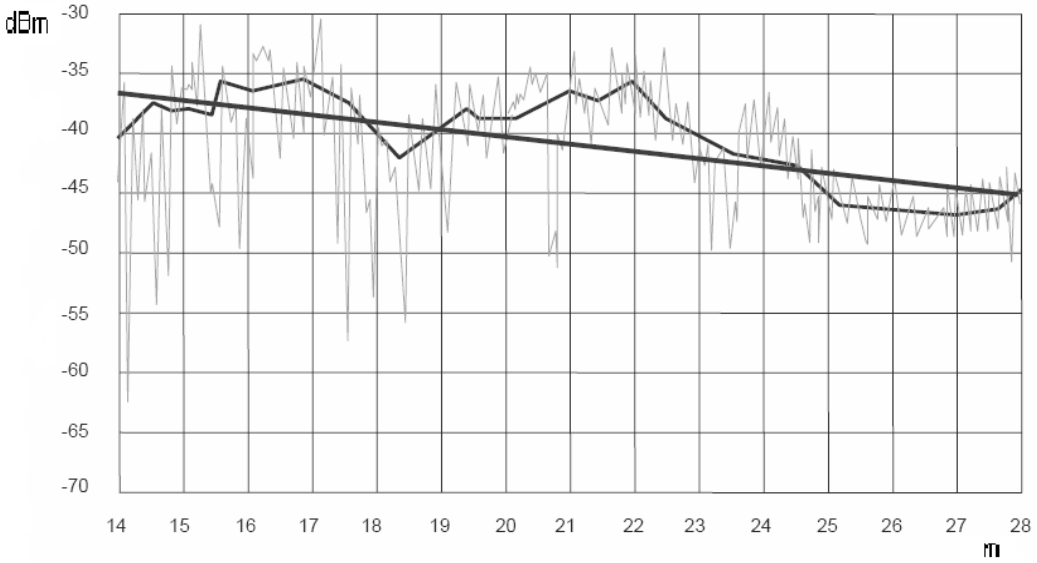


Σχήμα 2.1. Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί διάδοσης, ανάκλαση (R), περίθλαση (D), σκέδαση (S).

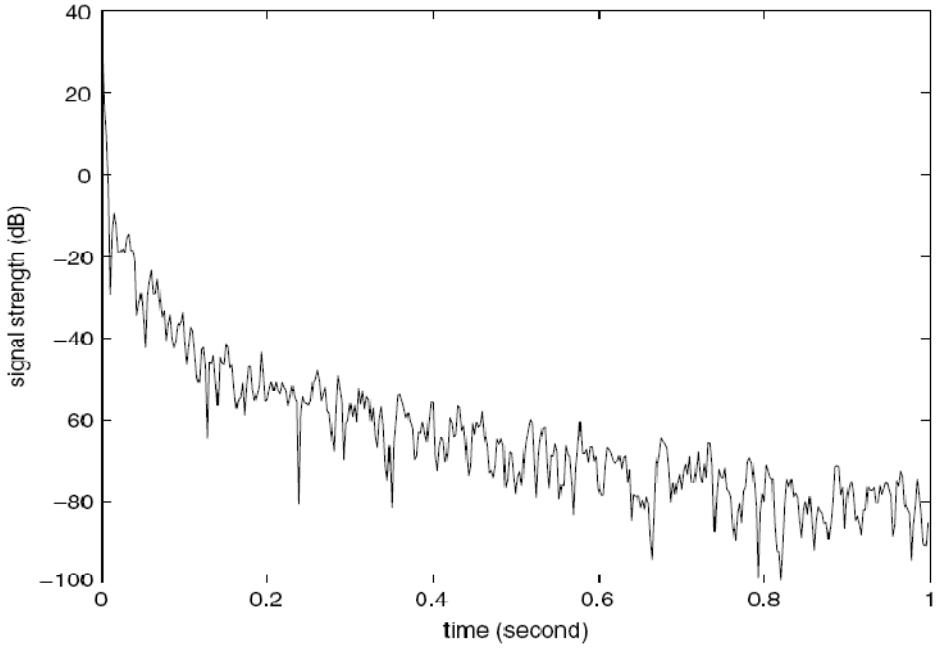
Καθώς το κινητό τερματικό κινείται σε μια περιοχή, οι τρεις μηχανισμοί διάδοσης επιδρούν κάθε στιγμή στο λαμβανόμενο σήμα κατά διαφορετικούς τρόπους. Στην περίπτωση όπου το κινητό τερματικό έχει οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης, η περίθλαση και η σκέδαση ενδέχεται να μην επηρεάζουν τη διάδοση. Αντιθέτως, αν το κινητό τερματικό εκπέμπει από το ύψος του οδοστρώματος, σε μεγάλη μητροπολιτική περιοχή, εκτός οπτικής επαφής με τον σταθμό βάσης, η περίθλαση και η σκέδαση είναι πολύ πιθανό να κυριαρχούν στη διάδοση. Καθώς το κινητό διανύει μικρές αποστάσεις, η λαμβανόμενη στιγμιαία ένταση του σήματος στενής ζώνης μεταβάλλεται απότομα και εμφανίζονται βραχύχρονες διαλείψεις. Αυτό συμβαίνει, διότι η ένταση του πεδίου είναι άθροισμα πολλών συνιστωσών που προέρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις και, καθώς οι

φάσεις τους είναι τυχαίες, το άθροισμα τους συμπεριφέρεται σαν θόρυβος, όπως λόγου χάριν οι διαλείψεις Rayleigh [2].

Συνοπτικά, η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών χαρακτηρίζεται από τέσσερα επιμέρους φαινόμενα, που είναι γνωστά ως απώλειες διαδρομής (path loss), σκίαση (shadowing), διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (multipath fading) και παρεμβολές (interference). Οι διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών περιγράφονται από τις διαλείψεις περιβάλλουσας, την εξάπλωση Doppler και την εξάπλωση χρονοκαθυστέρησης.



Σχήμα 2.2. Στάθμη λαμβανόμενου σήματος συναρτήσει της απόστασης πομπού-δέκτη.



Σχήμα 2.3. Στάθμη λαμβανόμενου σήματος σε κινητό τερματικό που ταξιδεύει με ταχύτητα 50km/h.

2.1.1 Απώλειες Διαδρομής

2.1.1.1 Διάδοση στον Ελεύθερο Χώρο

Θεωρώντας πως ένας πομπός εκπέμπει στον ελεύθερο χώρο ισχύ P_t Watt με κεραία που έχει κατευθυντικό κέρδος G_t και πως ο δέκτης βρίσκεται σε απόσταση d από τον πομπό, η μέση επιφανειακή πυκνότητα ισχύος στον δέκτη σε απόσταση d μέτρων από τον πομπό δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$S_0 = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi d^2} \text{ (W/m}^2\text{) } \textbf{(2.1)}$$

Αν $E_{0,rms}$, $H_{0,rms}$ οι ενεργές τιμές της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα, τότε η μέση τιμή του διανύσματος Poynting σε απόσταση d μέτρων από τον πομπό μπορεί να εκφραστεί ως

$$S_0 = E_{0,rms} \cdot H_{0,rms} \text{ (W/m}^2\text{) } \textbf{(2.2)}$$

όπου

$$H_{0,rms} = \frac{E_{0,rms}}{120\pi} \text{ (A/m) } \textbf{(2.3)}$$

Εύκολα προκύπτει ότι

$$E_{0,rms} = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{d} \text{ (V/m) } \textbf{(2.4)}$$

$$E_{0,\max} = \frac{\sqrt{60 P_t G_t}}{d} \textbf{ (2.5)}$$

Η μέση ισχύς που λαμβάνεται στο δέκτη δίνεται από τη σχέση

$$P_{0r} = \frac{E_{0,rms}^{\ 2}}{120\pi} A_r \text{ (W) } \textbf{(2.6)}$$

όπου A_r η ενεργός επιφάνεια της κεραίας του δέκτη. Επειδή ισχύει

$$A_r = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \textbf{ (2.7)}$$

Προκύπτει

$$P_{0r} = \left(\frac{E_{0,rms} \cdot \lambda}{2\pi} \right)^2 \frac{G_r}{120} \text{ (W) } \textbf{(2.8)}$$

$$\frac{P_{0r}}{P_t} = G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = G_t G_r \left(\frac{c/f}{4\pi d} \right)^2 \quad \textbf{(2.9)}$$

Στη σχεδίαση των ασύρματων συστημάτων χρησιμοποιείται ο όρος απώλειες διάδοσης (propagation loss) ή απώλειες διαδρομής (path loss) για να εκφραστεί ο λόγος της ισχύος που ακτινοβολείται από την κεραία του πομπού προς την ισχύ που λαμβάνεται από την κεραία του δέκτη. Όταν το σύστημα λειτουργεί στον ελεύθερο χώρο και χρησιμοποιούνται ισοτροπικές κεραίες, δηλαδή $G_t = G_r = 1$, οι απώλειες διάδοσης δίνονται από την σχέση

$$L_f = \frac{P_t}{P_{0r}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi d}{c/f} \right)^2 \quad \textbf{(2.10)}$$

και σε dB

$$L_f \left[dB \right] = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{c/f} \right) \quad \textbf{(2.11)}$$

Η παραπάνω σχέση αντικατοπτρίζει το γεγονός ότι οι απώλειες διαδρομής στον ελεύθερο χώρο εξαρτώνται από το τετράγωνο της απόστασης d. Επίσης, καθώς μειώνεται το μήκος κύματος, δηλαδή αυξάνεται η συχνότητα εκπομπής, αυξάνουν και οι απώλειες διάδοσης. Για την αντιστάθμιση των απωλειών αυτών είθισται να χρησιμοποιούνται κεραίες εκπομπής και λήψης με μεγαλύτερο κέρδος. Οι απώλειες διαδρομής εξαρτώνται επίσης από το ύψος των κεραιών του σταθμού βάσης και του κινητού τερματικού, τη μορφολογία της περιοχής και τις ανθρώπινες κατασκευές. Αυτοί οι πρόσθετοι παράγοντες κάνουν τον προσδιορισμό των απωλειών διαδρομής πιο δύσκολο.

2.1.1.2 Διάδοση μη οπτικής επαφής

Η πλειονότητα των επίγειων κυψελωτών συστημάτων κινητών και προσωπικών επικοινωνιών [2] λειτουργεί σε περιβάλλον όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (non-line-of-sight, NLOS). Η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής αυξάνει εκθετικά με την απόσταση, με εκθέτη n. Στην εξίσωση (2.10) παρατηρείται ότι, για διάδοση οπτικής επαφής (line-of-sight, LOS) χωρίς φυσικά εμπόδια, η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής είναι ανάλογη του d^2, δηλαδή ο εκθέτης απωλειών διαδρομής είναι $n = 2$. Έχει αναπτυχθεί ένα αρκετά γενικό μοντέλο για την NLOS διάδοση, που περιγράφεται από την παρακάτω σχέση και δείχνει ότι η μέση τιμή των απωλειών διαδρομής L αυξάνει εκθετικά με την απόσταση.

$$L(d) \propto L(d_0) \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad \textbf{(2.12)}$$

όπου

n : εκθέτης απωλειών διαδρομής με τυπικές τιμές $3.5 \le n \le 5$

d : απόσταση μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης

d_0 : απόσταση αναφοράς, μέχρι την οποία ισχύει η διάδοση LOS

$L(d_0)$: απώλειες διαδρομής σε απόσταση d_0 και διάδοση LOS

$L(d)$: απώλειες διαδρομής για συνδυασμένη διάδοση, LOS και NLOS

Ο εκθέτης n δείχνει πόσο γρήγορα αυξάνουν οι απώλειες διαδρομής με την απόσταση. Μέχρι την απόσταση αναφοράς d_0 θεωρείται ότι υπάρχει διάδοση στην ελεύθερο χώρο (χωρίς εμπόδια), δηλαδή μέχρι απόσταση d_0 από την κεραία. Ενδιαφέρουσα είναι η επιλογή απόστασης αναφοράς κατάλληλη για το εκάστοτε περιβάλλον. Σε κυψελωτά συστήματα μεγάλης κάλυψης χρησιμοποιείται d_0 =1km, ενώ σε εσωτερικούς χώρους d_0 =1 έως 3m.

Η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής (absolute mean path loss) σε dB, ορίζεται ως το άθροισμα των απωλειών διαδρομής $L(d_0)$, για LOS διάδοση από τον πομπό ως την απόσταση αναφοράς d_0, και των απωλειών διαδρομής για NLOS διάδοση στο διάστημα από d_0 έως d. Η απόλυτη μέση τιμή απωλειών διαδρομής δίνεται από την ακόλουθη σχέση

$$L(d) = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d/d_0) \text{ (dB)} \quad \textbf{(2.13)}$$

και ονομάζεται επίσης μέσος όρος περιοχής (area mean). Τυπικά, $d - d_0 \approx d$, καθότι d_0 είναι πολύ μικρότερο από d. Στα τυπικά NLOS συστήματα επικοινωνιών εξωτερικών χώρων ο εκθέτης απωλειών διαδρομής είναι $3.5 \le n \le 5$, ενώ στους διαύλους εσωτερικών χώρων $2 \le n \le 4$.

2.1.1.3 Σκίαση

Λόγω της ανομοιομορφίας του περιβάλλοντος και της χρονικής μεταβολής αυτού, η μέση ισχύς που λαμβάνεται σε διάφορες θέσεις του δέκτη, που ισαπέχουν από τον πομπό, είναι πολύ διαφορετική από εκείνη που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.13).

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 λαμβανόμενου 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 εκείνες που προβλέπει η σχέση (2.13). Μετρήσεις έχουν δείξει ότι η τιμή των απωλειών διαδρομής σε μια συγκεκριμένη θέση είναι τυχαία μεταβλητή και έχει λογαριθμοκανονική κατανομή γύρω από την απόλυτη μέση τιμή των απωλειών διαδρομής $L(d)$. Δηλαδή

$$\mathcal{L}(d) = L(d) + X_\sigma = L(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log_{10}(d/d_0) + X_\sigma \text{ (dB)} \quad \textbf{(2.14)}$$

και η ισχύς λήψης σε απόσταση d από τον πομπό θα είναι

$$P_r(d) = P_t(d) - L(d) \text{ (dB)} \quad \textbf{(2.15)}$$

όπου X_σ είναι τυχαία μεταβλητή με κατανομή που εξαρτάται από τη συνιστώσα διάλειψης. Η λογαριθμοκανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από τη σχέση

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \textbf{(2.16)}$$

όπου μ είναι η μέση λαμβανόμενη τιμή σήματος και σ η τυπική της απόκλιση.

Η λογαριθμοκανονική κατανομή περιγράφει τις τυχαίες επιδράσεις σκίασης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μεγάλου αριθμού μετρήσεων, σε θέσεις που έχουν μεν την ίδια απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά έχουν διαφορετικούς βαθμούς αταξίας στη διαδρομή διάδοσης. Το φαινόμενο αναφέρεται και ως λογαριθμοκανονική σκίαση. Η σκίαση προκαλείται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του εδάφους στην περιοχή όπου διαδίδεται το σήμα, στο περιβάλλον των επίγειων κινητών επικοινωνιών [2]. Η λογαριθμοκανονική κατανομή περιγράφει τις διαλείψεις μακράς διαρκείας ή τον αποκαλούμενο τοπικό μέσο όρο (local mean) της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, ο οποίος επιφέρει έναν αργά μεταβαλλόμενο μέσον όρο στην στατιστική διαλείψεων Rayleigh.

Η κανονική και η λογαριθμοκανονική κατανομή σχετίζονται άμεσα. Αντικαθιστώντας $y = \ln x$ στη σχέση (2.16), λαμβάνεται για τη μεταβλητή y κανονική κατανομή με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \textbf{(2.17)}$$

όπου οι παράμετροι στην εξίσωση εκφράζονται σε dB. Όσο πιο ακριβές είναι το μοντέλο απωλειών διάδοσης τόσο μικρότερη είναι και η τιμή της τυπικής απόκλισης, με συνήθεις τιμές από 4dB έως 12dB, και τυπική εκείνη των 8dB.

Πρόβλημα αποτελεί λόγω σκίασης το γεγονός ότι όλες οι θέσεις που βρίσκονται σε δοθείσα απόσταση από τον πομπό, πιθανόν να μην λαμβάνουν στάθμη του σήματος επαρκή για την σωστή αποδιαμόρφωση της πληροφορίας. Προς την επίτευξη επαρκούς ραδιοκάλυψης, πρέπει να προστεθεί στις απώλειες διαδρομής ένα περιθώριο διαλείψεων (fade margin). Το περιθώριο διαλείψεων αποτελεί συνήθως επιπρόσθετη εκπεμπόμενη ισχύ, προκειμένου να παρέχεται σε συγκεκριμένο ποσοστό περιοχών στα όρια της κυψέλης η απαιτούμενη στάθμη σήματος. Η κατανομή X_σ χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του περιθωρίου διαλείψεων. Δεδομένου ότι η $\measuredangle(d)$, εκφραζόμενη σε dB, έχει κατανομή Gauss γύρω από την απόλυτη μέση τιμή απωλειών, η X_σ που αντιστοιχεί στη σκίαση θα αποτελεί τυχαία μεταβλητή Gauss με μηδενική μέση τιμή. Στα όρια της κυψέλης, αν η κυψέλη θεωρηθεί κυκλική, η μέση τιμή της σκίασης είναι 0dB. Λόγω συμμετρίας ως προς τη μέση τιμή, το 50% των θέσεων θα έχουν θετική συνιστώσα σκίασης και το υπόλοιπο 50% αρνητική. Τούτο σημαίνει ότι οι θέσεις με θετική σκίαση εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες διαδρομής, που οδηγεί σε μη αποδεκτή στάθμη σήματος. Προς αντιμετώπιση της περίπτωσης αυτής, προστίθεται ένα περιθώριο διαλείψεων για να αποκτήσουν περισσότερες υποψήφιες θέσεις αποδεκτή στάθμη σήματος. Το περιθώριο διαλείψεων υλοποιείται είτε με αύξηση της ισχύος εκπομπής και διατήρηση του μεγέθους της κυψέλης, είτε με μείωση του μεγέθους της κυψέλης.

2.1.1.4 Καθορισμός περιοχής κάλυψης

Είναι προφανές ότι, λόγω των τυχαίων μεταβολών του σήματος εξαιτίας της σκίασης, σε μια περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης κάποιες υποπεριοχές θα έχουν τιμές μικρότερες από ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Η μέγιστη απόσταση $d_{\max}$ που μπορεί να καλυφθεί με συνθήκες διάδοσης οπτικής επαφής στον ελεύθερο χώρο προκύπτει από τη σχέση (2.9). Θεωρώντας ότι η μέση στάθμη ισχύος στο δέκτη είναι $P_{or} = P_{r,\min}$ που αντιπροσωπεύει την ελάχιστη ισχύ φέροντος στο δέκτη, τούτο οδηγεί σε μια παραδεκτή επίδοση (κατώφλι) όσον αφορά στον BER. Συμπεραίνεται ότι για συστήματα LOS

$$d_{\max} = \left(\frac{P_t G_t G_r}{P_{r,\min}} \right)^{1/2} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \text{ (m) } \textbf{(2.18)}$$

Για γενικότερες συνθήκες NLOS, υποτίθεται ότι υπάρχει μια απόσταση αναφοράς d_0 μεταξύ της κεραίας του πομπού και του πλησιέστερου εμποδίου, όπου τα ραδιοκύματα καλύπτουν την απόσταση d_0 με άμεση δέσμη και στη συνέχεια υφίστανται σκέδαση και διαδίδονται κατά τρόπο NLOS. Η ισχύς λήψης για τη συνδυασμένη διαδρομή LOS και NLOS είναι

$$P_{or} = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot L_{TOT} \textbf{ (2.19)}$$

όπου το

$$L_{TOT} = L_{LOS} \cdot L_{NLOS} \textbf{ (2.20)}$$

έχει δυο συνιστώσες, τις απώλειες LOS και τις απώλειες NLOS. Τελικά, προκύπτει

$$L_{TOT}(d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{d_0}{d} \right)^n \textbf{ (2.21)}$$

Συνεπώς, για την μέγιστη απόσταση ραδιοκάλυψης ισχύει

$$d_{\max} = \left[\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2}{P_{r,\min}} \right]^{1/n} \cdot d_0 \text{ (m) } \textbf{(2.22)}$$

2.1.2 Διαλείψεις

Τα φαινόμενα που, μέχρι στιγμής, έχουν αναλυθεί αποτελούν μια σταθερά με το χρόνο απώλεια διάδοσης της ισχύος του σήματος [1]. Παρατηρείται, όμως, επίσης μια χρονική διακύμανση της στάθμης λήψεως του σήματος, που εξαρτάται από τη φέρουσα συχνότητα και συμπίπτει με ορισμένες τοπικές, εποχικές ή μετεωρολογικές συνθήκες. Αυτού του είδους τα φαινόμενα συνιστούν τις διαλείψεις (fading), που μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες αποσβέσεις στο σήμα. Η ένταση γενικά της διάλειψης αυξάνει με τη συχνότητα του φέροντος και το μήκος της ζεύξεως. Λόγω του μεγάλου αριθμού των παραγόντων που συμβάλλουν στη δημιουργία των διαλείψεων, οι διαλείψεις αποτελούν ένα τυχαίο φαινόμενο που μπορεί να καθορισθεί μόνο με τη χρήση μιας συνάρτησης

στατιστικής κατανομής. Οι κυριότερες αιτίες διαλείψεων που αναφέρονται σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα και οφείλονται στην τροπόσφαιρα είναι οι ακόλουθες:

- *Το φαινόμενο των πολλαπλών διοδεύσεων (multipath propagation)*, που οφείλεται βασικά στη συμβολή κυμάτων που φθάνουν στο δέκτη ακολουθώντας διάφορους δρόμους. Πρόκειται για πολύ σημαντικό φαινόμενο που λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων, αλλά για συχνότητες κάτω των 10GHz.

- *Οι διαλείψεις που οφείλονται στην εξασθένηση του Η/Μ κύματος από ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις* (βροχή, χιόνι, χαλάζι). Η απόσβεση που εισάγεται είναι πολύ σημαντική, αλλά για συχνότητες φέροντος που υπερβαίνουν τα 10GHz.

- *Αξιόλογη επίδραση έχει η απορρόφηση που εισάγουν στο διαδιδόμενο σήμα τα αέρια της ατμόσφαιρας* (οξυγόνο, ατμοί) για συχνότητες που υπερβαίνουν τα 30GHz.

2.1.2.1 Το φαινόμενο των πολλαπλών διοδεύσεων

Όσον αφορά στην ασύρματη επικοινωνία στο περιβάλλον κινητών επικοινωνιών, λαμβάνει χώρα μεταξύ σταθερών σταθμών βάσης και περιφερόμενων κινητών τερματικών. Η διαδρομή διάδοσης, όπως έχει προαναφερθεί, λόγω φυσικών ή τεχνητών εμποδίων αποτελείται από ένα τμήμα οπτικής επαφής, σχετικά μικρού μήκους, ακολουθούμενο από πολλά τμήματα μη οπτικής επαφής. Σε τέτοιο περιβάλλον, καθώς το κινητό τερματικό κινείται σε μια περιοχή, οι ανακλάσεις, οι περιθλάσεις και οι σκεδάσεις που λαμβάνουν χώρα έχουν ως αποτέλεσμα την άφιξη πολλών επίπεδων κυμάτων στο κινητό τερματικό, από πολλές κατευθύνσεις και με διαφορετικές καθυστερήσεις. Το φαινόμενο αυτό αποτελεί τη λεγόμενη διάδοση πολλαπλών διοδεύσεων. Τα πολλαπλά επίπεδα κύματα συνδυάζονται στην κεραία του δέκτη ώστε να παράγουν ένα σύνθετο λαμβανόμενο σήμα [1].

Η διαδρομή διάδοσης μεταβάλλεται με την κίνηση του κινητού και τη μεταβολή του περιβάλλοντα χώρου. Δεδομένου του μικρού μήκους κύματος, της τάξεως των 15 έως 60cm, στα λειτουργούντα συστήματα κινητών επικοινωνιών, μικρές μεταβολές στις καθυστερήσεις διάδοσης λόγω της μετακίνησης του τερματικού προκαλούν μεγάλες μεταβολές στις φάσεις των επίπεδων κυμάτων που καταφθάνουν στο δέκτη. Οι μεταβολές φάσης δρουν εποικοδομητικά ή αρνητικά κατά την ανυσματική άθροιση των συνιστωσών των κυμάτων στην κεραία του δέκτη, πράγμα που γίνεται αντιληπτό από τις μεγάλες μεταβολές στο πλάτος και τη φάση του λαμβανόμενου σήματος.

Ανάμεσα στους μηχανισμούς διάδοσης που είναι η ανάκλαση, η περίθλαση και η σκέδαση, γίνεται να ελεγχθεί και να περιοριστεί αυτός της περίθλασης, φροντίζοντας τη σχεδίαση του συστήματος, ώστε να εξασφαλίζεται καθαρότητα της πρώτης ζώνης Fresnel. Οι ζώνες Fresnel αναφέρονται σε ελλειψοειδείς περιοχές με κέντρα τον πομπό και το δέκτη,

στις οποίες η παρεμβολή εμποδίων οδηγεί σε εμφάνιση περίθλασης κατά τη μετάδοση σημάτων. Η απουσία εμποδίων στην πρώτη ζώνη Fresnel είναι ικανή να εξασφαλίσει ασφαλή μετάδοση. Η ακτίνα της ορίζεται από τη σχέση

$$h_1 = \left[\frac{\lambda}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}} \right]^{1/2} \quad \textbf{(2.23)}$$

όπου d_1, d_2 είναι οι αποστάσεις του πομπού και του δέκτη, αντίστοιχα, από το αμέσως κοντινότερο εμπόδιο στην ευθεία μετάδοσης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που συγκρίνεται πόσο απότομα αλλάζει το μεταδιδόμενο σήμα με τον ρυθμό μεταβολής του διαύλου, οι δίαυλοι κατατάσσονται σε δίαυλους με <u>ταχείες διαλείψεις (fast fading)</u> και σε δίαυλους με <u>αργές διαλείψεις (slow fading)</u>. Σε δίαυλο με ταχείες διαλείψεις, η κρουστική απόκριση αυτού αλλάζει απότομα κατά τη διάρκεια μετάδοσης ενός συμβόλου, ενώ σε δίαυλο με αργές διαλείψεις, από την άλλη, η κρουστική του απόκριση μεταβάλλεται με ρυθμό πολύ μικρότερο από το ρυθμό μεταβολής του μεταδιδόμενου σήματος βασική ζώνης.

Οι διαλείψεις, επίσης κατατάσσονται σε επίπεδες ή επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα. Στις <u>επίπεδες διαλείψεις (flat fading)</u>, η δομή του ραδιοδιαύλου όσον αφορά τις πολλαπλές διαδρομές είναι τέτοια, ώστε τα φασματικά χαρακτηριστικά του μεταδιδόμενου σήματος να διατηρούνται στο δέκτη. Ωστόσο, η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος μεταβάλλεται με το χρόνο, λόγω διακυμάνσεων της απόκρισης πλάτους του διαύλου, πράγμα που οφείλεται στις πολλαπλές διαδρομές. Σε δίαυλο που παρουσιάζει σταθερή απόκριση πλάτους και γραμμική απόκριση φάσης σε εύρος ζώνης μικρότερο από εκείνο του μεταδιδόμενου σήματος, προκαλούνται στο σήμα <u>διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα (frequency selective fading)</u>. Στην περίπτωση αυτή, το λαμβανόμενο σήμα περιέχει πολλαπλές εκδοχές της μεταδιδόμενης κυματομορφής με διαφορετικές εξασθενήσεις και καθυστερήσεις, και συνεπώς είναι παραμορφωμένο. Οι επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα διαλείψεις οφείλονται στη χρονική διασπορά των μεταδιδόμενων συμβόλων στο δίαυλο, έτσι ο δίαυλος προκαλεί διασυμβολική παρεμβολή. Στο πεδίο των συχνοτήτων, διαλείψεις επιλεκτικές ως προς τη συχνότητα σημαίνει ότι κάποιες συνιστώσες συχνότητας στο φάσμα του λαμβανόμενου σήματος έχουν μεγαλύτερο κέρδος από άλλες [2].

2.1.3 Παρεμβολές σε περιβάλλον ασύρματων συστημάτων

Σημαντικό χαρακτηριστικό της ασύρματης διάδοσης είναι η παρουσία παρεμβολών, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα περιορισμού της χωρητικότητας των συστημάτων κινητών επικοινωνιών [17]. Η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων στα κυψελωτά συστήματα

αποτελεί τη βασική πηγή ομοδιαυλικών παρεμβολών, που προκύπτει από την πλήρη επικάλυψη της φασματικής πυκνότητας ισχύος του επιθυμητού και των ανεπιθύμητων σημάτων. Οι παρεμβολές λόγω επαναχρησιμοποίησης συχνότητας περιορίζονται χρησιμοποιώντας είτε τεχνικές δυναμικής απόδοσης διαύλων, είτε κατευθυντικές κεραίες, είτε τεχνικές ανίχνευσης πολλαπλών χρηστών (multiuser detection). Όλες όμως οι τεχνικές αυτές αυξάνουν την πολυπλοκότητα του συστήματος.

Άλλες πηγές παρεμβολών στα ασύρματα συστήματα είναι οι παρεμβολές γειτονικών διαύλων, όπου λαμβάνει χώρα μερική επικάλυψη της φασματικής πυκνότητας ισχύος του επιθυμητού και των ανεπιθύμητων σημάτων, και οι παρεμβολές στενής ζώνης που προκαλούνται από χρήστες διαφορετικών συστημάτων που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων.

Οι κυψελωτές ραδιοζεύξεις συνήθως παρουσιάζουν το φαινόμενο του κατωφλίου (threshold effect), δηλαδή η ποιότητα της ζεύξης είναι αποδεκτή όταν ο μέσος λαμβανόμενος λόγος ισχύος φέροντος προς θόρυβο C/N και ο μέσος λόγος ισχύος φέροντος προς παρεμβολή C/I υπερβαίνουν συγκεκριμένες τιμές κατωφλίου. Οι τιμές κατωφλίου εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους της ζεύξης, συμπεριλαμβανομένων του είδους διαμόρφωσης, της κωδικοποίησης, της αρχιτεκτονικής του δέκτη, του περιβάλλοντος διάδοσης, της επιθυμητής ποιότητας μετάδοσης και της ταχύτητας του κινητού σταθμού.

2.2 Παρεμβολές στο ασύρματο περιβάλλον των συστημάτων κινητών επικοινωνιών

2.2.1 Περιβάλλον με θόρυβο και παρεμβολές

Στην επικοινωνία δύο ακίνητων πομποδεκτών με σύνδεση σημείου προς σημείο, κύριος παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα της επικοινωνίας είναι ο θόρυβος που προέρχεται από τον άνθρωπο. Οι δυο πομποδέκτες, στην περίπτωση αυτή, αποτελούν ένα επικοινωνιακό περιβάλλον, που περιορίζεται μόνο από θόρυβο. Αν ο ένας ή και οι δύο πομποδέκτες κινούνται, τότε η ποιότητα της επικοινωνίας επηρεάζεται επίσης και από τις διαλείψεις λόγω πολλαπλών διοδεύσεων. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, για τα διάφορα είδη διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται, μπορεί να περιοριστούν σε σχετικά πολύ χαμηλές τιμές, ανάλογα με την εκπεμπόμενη ισχύ ή το μήκος της επικοινωνιακής ζεύξης.

Στην περίπτωση όπου υπάρχουν πολλοί πομποδέκτες σε κάποια περιοχή, οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους και μερικοί από αυτούς χρησιμοποιούν διαύλους της ίδιας συχνότητας, ενώ άλλοι χρησιμοποιούν διαύλους με παραπλήσιες συχνότητες, σχηματίζεται ένα επικοινωνιακό περιβάλλον, όπου ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την ποιότητα της υπηρεσίας είναι οι παρεμβολές. Προφανώς, οι παρεμβολές ισχύουν επιπρόσθετα με τις

συνθήκες που ισχύουν σε περιβάλλον που περιορίζεται από θόρυβο, λόγω ύπαρξης διαύλων της ίδιας ή παραπλήσιας συχνότητας σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή.

Οι παρεμβολές είναι ο κυριότερος περιοριστικός παράγοντας που επηρεάζει την επίδοση των κυψελωτών συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Πηγή παρεμβολών μπορεί να είναι ένα άλλο κινητό στην ίδια κυψέλη, μια κλήση που εξελίσσεται σε γειτονική κυψέλη, άλλοι σταθμοί βάσης που λειτουργούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, ή οποιοδήποτε μη κυψελωτό σύστημα που από αμέλεια εισάγει ενέργεια στη ζώνη συχνοτήτων του κυψελωτού συστήματος. Παρεμβολή σε δίαυλο ομιλίας προκαλεί διαφωνία (cross-talk), όπου ο χρήστης ακούει άλλη συνομιλία στο βάθος λόγω κάποιας ανεπιθύμητης μετάδοσης. Στους διαύλους ελέγχου, η παρεμβολή οδηγεί σε απώλεια ή αποκοπή κλήσεως, λόγω σφαλμάτων στην ψηφιακή σηματοδοσία. Οι παρεμβολές είναι πιο σοβαρές στις αστικές περιοχές, εξαιτίας της μεγάλης στάθμης θορύβου ραδιοσυχνοτήτων (RF) και του μεγάλου αριθμού σταθμών βάσης και κινητών τερματικών. Οι παρεμβολές αποτελούν μεγάλο εμπόδιο στην αύξηση της χωρητικότητας και συχνή αιτία απόρριψης κλήσεων. Οι δύο κύριοι τύποι παρεμβολών που ενυπάρχουν στα κυψελωτά συστήματα είναι η ομοδιαυλική παρεμβολή και η παρεμβολή γειτονικών διαύλων.

Παρά το γεγονός ότι τα σήματα που παρεμβάλλουν παράγονται συχνά μέσα στο κυψελωτό σύστημα, είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθούν στην πράξη λόγω της τυχαιότητας των φαινομένων διάδοσης. Ακόμη πιο δύσκολος είναι ο έλεγχος των παρεμβολών που οφείλονται σε χρήστες εντός ζώνης, καθώς εκείνες εμφανίζονται χωρίς προειδοποίηση. Στην πράξη, πομποί από ανταγωνιστικά κυψελωτά συστήματα είθισται να αποτελούν σημαντική πηγή παρεμβολής εντός ζώνης, καθότι οι ανταγωνιστές τοποθετούν συχνά τους σταθμούς βάσης σε παραπλήσιες θέσεις για να παρέχουν συγκριτικά παρόμοια κάλυψη στους χρήστες τους.

2.2.1.1 Ομοδιαυλική παρεμβολή

Στην περιοχή κάλυψης ενός συστήματος κινητών επικοινωνιών, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος που διατίθεται, επαναχρησιμοποιούνται ραδιοδίαυλοι της ίδιας συχνότητας σε διάφορες μη γειτονικές μεταξύ τους περιοχές. Αυτή η επαναχρησιμοποίηση διαύλων (συχνοτήτων) έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλών κυψελών στην περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος, οι οποίες χρησιμοποιούν την ίδια ομάδα συχνοτήτων και ονομάζονται ομοδιαυλικές (co-channel cells). Η παρεμβολή μεταξύ σημάτων που προέρχονται από τέτοιες κυψέλες ονομάζεται ομοδιαυλική παρεμβολή (co-channel interference) και είναι η αμοιβαία παρεμβολή διαύλων της ίδιας συχνότητας, οι οποίοι λειτουργούν σε διαφορετικές θέσεις στην περιοχή κάλυψης του κυψελωτού συστήματος. Η ομοδιαυλική παρεμβολή μπορεί να αποτελέσει σοβαρό πρόβλημα αν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Σε αντίθεση με τον θερμικό θόρυβο, που μπορεί να αντιμετωπισθεί με αύξηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), η ομοδιαυλική παρεμβολή δεν μπορεί να καταπολεμηθεί με απλή αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, διότι η αύξηση της ισχύος εκπομπής προκαλεί ταυτόχρονη αύξηση της παρεμβολής στις

γειτονικές ομοδιαυλικές κυψέλες. Για να περιοριστεί η ομοδιαυλική παρεμβολή, θα πρέπει οι ομοδιαυλικές κυψέλες να απέχουν μεταξύ τους κάποια ελάχιστη απόσταση, ώστε να παρέχεται επαρκής απομόνωση όσον αφορά τη διάδοση. Αν P_S είναι η στάθμη του λαμβανόμενου επιθυμητού σήματος και P_t η στάθμη του σήματος παρεμβολής, τότε ο λόγος σήματος προς παρεμβολή είναι

$$\frac{S}{I} = \frac{P_S}{P_t} \quad \textbf{(2.24)}$$

και θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από κάποια αποδεκτή τιμή κατωφλίου T (threshold). Γενικά, λοιπόν, ισχύει

$$10\log\frac{P_S}{P_t} > T(dB) \quad \textbf{(2.25)}$$

όπου η τιμή T εξαρτάται από την εκάστοτε προσφερόμενη υπηρεσία. Θεωρείται ότι το μέγεθος της κυψέλης που καλύπτει κάθε σταθμός βάσης με την εκπεμπόμενη ισχύ του είναι σταθερό, συνεπώς η ομοδιαυλική παρεμβολή είναι ανεξάρτητη από τη μεταδιδόμενη ισχύ σε κάθε περιοχή, που σημαίνει ότι το κατώφλι της στάθμης λήψης στο κινητό τερματικό ρυθμίζεται στο μέγεθος της κυψέλης. Αν υποτεθεί ότι κάθε σταθμός βάσης καλύπτει κυκλική περιοχή ακτίνας R και ότι η απόσταση μεταξύ δύο ομοδιαυλικών σταθμών βάσης είναι D, τότε ο λόγος D/R χρησιμοποιείται ως βασική παράμετρος για τη μελέτη της ομοδιαυλικής παρεμβολής

$$a = \frac{D}{R} \quad \textbf{(2.26)}$$

όπου το a ονομάζεται συντελεστής μείωσης της ομοδιαυλικής παρεμβολής (co-channel interference reduction function) και μπορεί να προσδιοριστεί για οποιονδήποτε απαιτούμενο λόγο σήματος προς παρεμβολή. Συνεπώς, μια καλή διάταξη σε μια περιοχή με πολλές κεραίες θα πρέπει να βασίζεται στον συντελεστή a, αυξανομένου του οποίου η παρεμβολή μειώνεται. Επιπλέον, η απόσταση D είναι συνάρτηση του αριθμού K των κυψελών που παρεμβάλουν στον ίδιο δίαυλο.

Στη γενική περίπτωση, για τον υπολογισμό του επιθυμητού λόγου σήματος προς παρεμβολή στον δέκτη, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο θόρυβος, που στην παρούσα ανάλυση η επίδρασή του θεωρείται αμελητέα διότι η στάθμη του τοπικού θορύβου είναι πολύ μικρότερη από τη στάθμη της παρεμβολής. Οπότε ο λόγος S/I σε απόσταση R από τον κυρίως πομπό, μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$S/I = \frac{1}{\sum_{k=1}^{K}\left(\frac{D_k}{R}\right)^{-n}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{K} a_k^{-n}} \quad \textbf{(2.27)}$$

όπου

$$a_k = \frac{D_k}{R} \quad \textbf{(2.28)}$$

είναι ο συντελεστής μείωσης της ομοδιαυλικής παρεμβολής από την k-στη παρεμβάλλουσα κυψέλη [2], [17].

2.2.1.1.1 Περιορισμός της ομοδιαυλικής παρεμβολής

Ο περιορισμός της ομοδιαυλικής παρεμβολής στα κυψελωτά συστήματα μπορεί να επιτευχθεί με τους εξής τρόπους:

- Αύξηση του αριθμού των κυψελών στην ομάδα επαναχρησιμοποίησης
- Συνετή επιλογή στην κατανομή διαύλων
- Χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών
- Χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών σε συνδυασμό με την κατανομή διαύλων
- Χρησιμοποίηση διαφορικής λήψης

Η χρήση μεγάλου αριθμού κυψελών ανά ομάδα επαναχρησιμοποίησης αυξάνει την απόσταση D μεταξύ των ομοδιαυλικών και, κατά συνέπεια, τον συντελεστή μείωσης της ομοδιαυλικής παρεμβολής a. Τούτο περιορίζει μεν τη στάθμη παρεμβολής στις κυψέλες, έχει την αρνητική επίπτωση δε να περιορίζει και την τηλεπικοινωνιακή κίνηση που μπορεί να διεκπεραιώσει το σύστημα.

Μια άλλη τεχνική, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τον περιορισμό της ομοδιαυλικής παρεμβολής, είναι η συνετή επιλογή στην κατανομή των διαύλων. Η κατανομή των διαύλων μπορεί να παρακολουθείται κατάλληλα, ώστε η παρεμβολή αυτού του τύπου να περιορίζεται όσο είναι πρακτικά δυνατό , τουλάχιστον κατά τις ώρες που δεν υπάρχει αιχμή.

2.2.1.2 Παρεμβολή γειτονικών διαύλων

Η παρεμβολή γειτονικών διαύλων ελέγχεται ελαφρώς καλύτερα από την ομοδιαυλική. Κατά παρόμοιο τρόπο, για να αποφευχθεί η παρεμβολή μεταξύ γειτονικών διαύλων, δεν κατανέμονται στην ίδια κυψέλη δίαυλοι που είναι γειτονικοί στο φάσμα συχνοτήτων. Έτσι, ρυθμιστικός παράγων είναι η συγκεκριμένη κατανομή διαύλων στην κυψέλη. Γειτονικός δίαυλος του διαύλου που μελετάται είναι ο πλησιέστερος σε συχνότητα δίαυλος που κατανέμεται στην ίδια κυψέλη, και όχι ο αληθινά γειτονικός δίαυλος στο φάσμα. Ωστόσο, υπάρχει παρεμβολή γειτονικού διαύλου ακόμη και αν οι παρεμβάλλοντες δίαυλοι δεν είναι γειτονικοί στο φάσμα, πράγμα που συμβαίνει διότι, για πρακτικούς

λόγους, οι ραδιοδίαυλοι δεν έχουν αυστηρά περιορισμένο εύρος ζώνης. Στην παρούσα ανάλυση, θεωρείται απόσταση διαύλων τέτοια, ώστε η παρεμβολή γειτονικών διαύλων να είναι αμελητέα.

2.2.2 Μοντέλα κινητικότητας

Η συνεχής αύξηση όσον αφορά τον αριθμό των χρηστών και το φορτίο κίνησης, στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, και η εμφάνιση νέων υπηρεσιών έχουν αρχίσει ήδη να επηρεάζουν ή ακόμη και να αλλάζουν τον τρόπο σχεδίασης των κυψελωτών συστημάτων. Επιπρόσθετα, ο ανταγωνισμός που εισάγεται από νεοεισερχόμενους φορείς, όπως οι πάροχοι προσωπικών επικοινωνιών, και η εισαγωγή νέων εφαρμογών, όπως λόγου χάριν είναι τα πολυμέσα , δεν προκαλούν μόνο σημαντική αύξηση του φορτίου που μεταφέρει το δίκτυο, αλλά τείνουν να δημιουργήσουν ένα ετερογενές περιβάλλον τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Επιπλέον, το ειδικό περιβάλλον των κινητών επικοινωνιών με τις πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές κυψελών, τις βελτιωμένες διαδικασίες διαπομπής, τον έλεγχο κινητικότητας και τη δυναμική εκχώρηση πόρων έχει ως αποτέλεσμα σημαντικό επιπρόσθετο φορτίο σηματοδοσίας και προσθέτει μια ακόμη συνιστώσα στη διαχείριση κίνησης. Τα χαρακτηριστικά επίδοσης και η παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας στα υπάρχοντα και τα μελλοντικά συστήματα κινητών επικοινωνιών αποκτούν ουσιαστική σημασία. Η κίνηση των τερματικών επηρεάζει ποικιλοτρόπως την επίδοση των δικτύων, τόσο στο ασύρματο όσο και στο ενσύρματο μέρος. Προκειμένου να λαμβάνεται υπόψη η κινητική συμπεριφορά των χρηστών κατά τη σχεδίαση και διαστασιοποίηση των δικτύων αυτών, απαιτούνται μοντέλα κινητικότητας για να βοηθήσουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς αυτής και την πρόχειρη εκτίμηση των παραμέτρων ποιότητας εξυπηρέτησης.

Για τη μελέτη επίδοσης κυψελωτών συστημάτων χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης και απλοποιημένα αναλυτικά μοντέλα, τα οποία προσεγγίζουν την κινητικότητα των τερματικών σε μία ή πολλαπλές κυψέλες. Παρά το γεγονός ότι τα μοντέλα αυτά επαρκούν για τη σχεδίαση και αρχιτεκτονική των συστημάτων πρώτης και δεύτερης γενιάς, χρειάζονται ακριβέστερα αναλυτικά μοντέλα για την καθοδήγηση της σχεδίασης και για να βοηθούν στην αξιολόγηση εναλλακτικών αρχιτεκτονικών λύσεων και στην επιλογή παραμέτρων των συστημάτων κινητών επικοινωνιών επόμενης γενιάς. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθούν αναλυτικά μοντέλα ώστε να εκτιμάται πόσο καλά εξυπηρετείται η προσφερόμενη κίνηση και να προσδιορίζεται η κίνηση σηματοδοσίας και η χωρητικότητα του συστήματος.

Ειδικότερα, ορίζονται τρεις παράμετροι επίδοσης, η πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων (call blocking probability), η πιθανότητα αποκλεισμού διαπομπής (handoff blocking probability) και η πιθανότητα διακοπής κλήσεων (call dropping probability).Για την τελευταία παράμετρο θεωρείται ότι η περιοχή εξυπηρέτησης του συστήματος είναι συνεχής και η απόρριψη κλήσεων λόγω κακής ραδιοκάλυψης είναι αμελητέα. Συμπληρωματικά, μπορούν να ορισθούν οι παράμετροι μεταφερόμενη κίνηση (throughput), πιθανότητα απώλειας κλήσεων (call loss probability), πιθανότητα παράδοσης

κλήσης, καθυστέρηση εγκατάστασης κλήσης, αλλά η παρούσα ανάλυση αρκείται στον υπολογισμό των τεσσάρων πρώτων παραμέτρων.

Συνοπτικά, παρουσιάζονται μερικά απλά και αρκετά γενικά μοντέλα για την κυψέλη και την κίνησή της.

- *Το Μοντέλο Ρευστών* παρομοιάζει την τηλεπικοινωνιακή κίνηση με τη ροή ρευστών και μπορεί να δώσει προσεγγιστικές λύσεις για την επίδοση των συστημάτων.
- *Με το Τυχαίο Μοντέλο* αναπτύσσονται μαθηματικές σχέσεις για τη συστηματική παρακολούθηση της τυχαίας κίνησης των κινητών τερματικών.
- *Το Βαρυτικό Μοντέλο* έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην έρευνα για τις μεταφορές, με σκοπό να μοντελοποιήσει τη συμπεριφορά των ανθρώπων όσον αφορά στις μετακινήσεις τους.
- *Το Μαρκοβιανό Μοντέλο* προσπαθεί να προσδιορίσει την κατεύθυνση μετακίνησης κάποιου χρήστη δίνοντας διάφορες πιθανότητες στις γειτονικές κυψέλες.

2.2.2.1 Τυχαίο Μοντέλο

Με το μοντέλο αυτό αναπτύσσονται μαθηματικές σχέσεις για τη συστηματική παρακολούθηση της τυχαίας κίνησης των κινητών τερματικών στα κυψελωτά δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Χρησιμοποιούνται παράμετροι κινητικότητας με γενικευμένες συνθήκες, κατά σχεδόν τυχαίο τρόπο και με καθοριζόμενους βαθμούς ελευθερίας, ώστε το μοντέλο να μπορεί να διαμορφωθεί και να είναι εφαρμόσιμο στα περισσότερα κυψελωτά συστήματα. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει διάφορες παραμέτρους κινητικότητας στα κυψελωτά συστήματα, περιλαμβανομένων της κατανομής του χρόνου παραμονής στην κυψέλη, τόσο για τις νέες κλήσεις όσο και για τις κλήσεις που προέρχονται από διαπομπή, του χρόνου κράτησης διαύλου και του μέσου αριθμού διαπομπών ανά κλήση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η γενικευμένη κατανομή Γάμμα είναι κατάλληλη να περιγράψει την κατανομή του χρόνου παραμονής στην κυψέλη, και η αρνητική εκθετική κατανομή αποτελεί καλή προσέγγιση του χρόνου κράτησης διαύλου.

2.3 Μηχανισμός Διαπομπής

Ο μηχανισμός διαπομπής είναι ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό που επιτρέπει στα κυψελωτά συστήματα να λειτουργούν αποτελεσματικά, όπως αποδεικνύεται στην πράξη. Όταν ένα κινητό αρχίζει μια κλήση σε μια κυψέλη και στη συνέχεια εισέρχεται σε κάποια άλλη, η κλήση αυτόματα μεταφέρεται στη νέα συχνότητα της νέας κυψέλης. Αυτή η διαδικασία αλλαγής συχνότητας, που γίνεται αυτόματα από το σύστημα δίχως τη μεσολάβηση του χρήστη, λέγεται διαπομπή (handoff) και είναι χαρακτηριστική διαδικασία των κυψελωτών συστημάτων. Η διαπομπή αποτελεί μια διαδικασία μεταγωγής, όπου η επικοινωνία ενός κινητού τερματικού μεταφέρεται από έναν σταθμό βάσης σε κάποιον

γειτονικό, όταν η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος πέσει κάτω από μια στάθμη κατωφλίου του συστήματος.

Κατά τη σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διαπομπή, καθώς βασικά στοιχεία σχεδίασης αποτελούν οι επιτυχείς διαπομπές, ο περιορισμός όλων των μη αναγκαίων διαπομπών και ο έλεγχος της κίνησης στην κυψέλη μέσω της αλλαγής του αλγορίθμου διαπομπής.

Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι διαπομπές είναι μεν αναγκαίες, αλλά δεν μπορούν να γίνουν, όπως όταν ένα κινητό τερματικό βρίσκεται σε περιοχή κυψέλης που παρατηρείται χαμηλή ισχύς του λαμβανόμενου σήματος, δεν βρίσκεται όμως στα όρια της κυψέλης ώστε να γίνει τελικά διαπομπή στη γειτονική της. Στην περίπτωση αυτή η κλήση παραμένει στο δίαυλο που χρησιμοποιεί μέχρις ότου διακοπεί λόγω μη παραδεκτής στάθμης σήματος. Μια διαφορετική περίπτωση αποτελεί η απουσία διαθέσιμων διαύλων στη νέα κυψέλη, καθώς το κινητό τερματικό βρίσκεται ή πλησιάζει στα όρια της οικείας του κυψέλης, όπου και η κλήση απορρίπτεται αν η νέα κυψέλη δεν δύναται να αναδιατάξει τις εκχωρήσεις των διαύλων της και να δεχτεί την κλήση.

Υπάρχουν δύο κύριες μορφές διαπομπής:

- *η σκληρή διαπομπή (hard handoff)*, όπου η επικοινωνία του κινητού τερματικού με το σταθμό βάσης αποκόπτεται πριν αποκατασταθεί μέσω του νέου σταθμού βάσης.
- *η ήπια διαπομπή (soft handoff)*, όπου και ο αρχικός σταθμός βάσης και εκείνος που δέχεται τελικά τη συνέχιση της κλήσης επικοινωνούν ταυτόχρονα με το κινητό τερματικό, παρέχοντας μια μορφή διαφορικής λήψης και στο τερματικό και στο δίκτυο.

Σκληρές διαπομπές χρησιμοποιούνται στα κυψελωτά συστήματα FDMA και TDMA, ενώ ήπιες στα CDMA. Οι ήπιες διαπομπές έχουν το πλεονέκτημα ότι βελτιώνουν την ποιότητα της ζεύξης όπου χρειάζεται, και κυρίως στα όρια των κυψελών [2].

2.3.1 Η Διαδικασία διαπομπής

Στην πιο γενική άποψη, ο όρος διαπομπή υποδηλώνει τη διαδικασία αλλαγής διαύλου (συχνότητα, χρονοσχισμή, κώδικα εξάπλωσης , ή συνδυασμό των παραπάνω ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης) σε σχέση με την τρέχουσα σύνδεση, προκειμένου να διατηρηθεί αποδεκτή ποιότητα υπηρεσίας ή να παρασχεθεί καλύτερη. Η διαπομπή ξεκινά είτε όταν το κινητό τερματικό διασχίζει τα σύνορα της κυψέλης είτε όταν υποβαθμίζεται η ποιότητα υπηρεσίας στον τρέχοντα δίαυλο.

Με τη διείσδυση των συστημάτων προσωπικών επικοινωνιών, αξιοποιείται η μικροκυψελική δομή, καθώς και άλλες υβριδικές (macro-, micro-, pico-) για την υποστήριξη της δραστικά αυξανόμενης ζήτησης. Καθώς χρησιμοποιούνται ολοένα μικρότερες κυψέλες προς ικανοποίηση των αναγκών σε αυξημένη χωρητικότητα, ο αριθμός των διαπομπών

αυξάνει. Κάθε διαπομπή απαιτεί πόρους του δικτύου για την αναδρομολόγηση της κλήσης σε νέο σταθμό βάσης, και η ελαχιστοποίηση του αναμενόμενου αριθμού διαπομπών ελαχιστοποιεί το φορτίο μεταγωγής. Βασικό πρόβλημα επίσης αποτελεί η καθυστέρηση, καθώς αν η διαπομπή δεν εκτελεσθεί γρήγορα, η ποιότητα υπηρεσίας ίσως να πέσει κάτω από τη συμφωνημένη στάθμη, ενώ, ακόμη, μείωση της καθυστέρησης προκαλεί και ταυτόχρονη μείωση της ομοδιαυλικής παρεμβολής.

Βασικές απαιτήσεις που αφορούν τη διαδικασία διαπομπής είναι:

- Από την άποψη του χρήστη, η διαπομπή θα πρέπει να μην γίνεται αντιληπτή.
- Από την άποψη του δικτύου, η διαδικασία διαπομπής δεν πρέπει να αυξάνει σημαντικά το φορτίο σηματοδοσίας.

Για να διατηρηθεί η εξυπηρέτηση σε στάθμη αποδεκτή από το χρήστη, οι βασικές απαιτήσεις για τη διαδικασία διαπομπής είναι η ταχύτητα εκτέλεσης, η αξιοπιστία, καθώς και η διαφάνεια προς το χρήστη. Ακόμη, λόγω των πολλαπλών τύπων υπηρεσιών στα συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών, η στρατηγική διαπομπής χρειάζεται να λαμβάνει υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των υπηρεσιών αυτών, δηλαδή η ιδανική διαπομπή εξαρτάται από την υπηρεσία. Συγκεκριμένα, η μετάδοση υπηρεσιών φωνής είναι πολύ ευαίσθητη στην καθυστέρηση και τις διακοπές, πράγμα που δεν συμβαίνει και στην περίπτωση μετάδοσης δεδομένων, και, ως εκ τούτου, μια επιτυχημένη διαπομπή είναι πολύ σημαντική για την μετάδοση φωνής.

2.3.1.1 Παράμετροι επίδοσης της διαπομπής

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό της επίδοσης της διαπομπής είναι:

- Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης *(call blocking probability)*: η πιθανότητα αποκλεισμού αίτησης για νέα κλήση
- Πιθανότητα αποκλεισμού διαπομπής *(handoff blocking probability)*: η πιθανότητα αποκλεισμού αίτησης για διαπομπή
- Πιθανότητα διαπομπής *(handoff probability)*: η πιθανότητα να απαιτείται διαπομπή πριν τον τερματισμό κλήσης που βρίσκεται σε εξέλιξη σε μια κυψέλη και μεταφράζεται στον μέσο αριθμό διαπομπών ανά κλήση
- Πιθανότητα απόρριψης κλήσης *(call dropping probability)*: η πιθανότητα να τερματιστεί μια κλήση λόγω αποτυχίας της διαπομπής
- Πιθανότητα μη αναγκαίας διαπομπής *(probability of an unnecessary handoff)*: η πιθανότητα να γίνει διαπομπή σύμφωνα με τον εφαρμοζόμενο αλγόριθμο, ενώ ο τρέχων δίαυλος είναι ακόμη κατάλληλος

- Ρυθμός διαπομπών *(handoff rate)*: ο αριθμός των διαπομπών στη μονάδα του χρόνου

- Διάρκεια διακοπής *(duration of interruption)*: το χρονικό διάστημα, κατά τη διαδικασία διαπομπής, για το οποίο το κινητό τερματικό δεν επικοινωνεί με κανέναν από τους σταθμούς βάσης

- Καθυστέρηση *(delay)*: η απόσταση που διανύει το κινητό τερματικό από τη στιγμή που θα εμφανιστεί ανάγκη διαπομπής μέχρι την πραγματοποίησή της

2.3.1.2 Προετοιμασία διαπομπής

Η διαδικασία που προηγείται της διαπομπής αποτελεί το πιο ενδιαφέρον θέμα που επηρεάζει την απόδοση του φάσματος και την ποιότητα υπηρεσίας, όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από τους χρήστες. Η απόφαση για την έναρξη διαπομπής και η επιλογή της νέας κυψέλης βασίζονται σε έναν αριθμό παραμέτρων, καθώς αρκετοί λόγοι μπορούν να διεγείρουν μια τέτοια απόφαση.

Η διαπομπή μπορεί να αρχίσει κάτω από τρεις συνθήκες:

1. όταν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος υποβιβάζεται λόγω κακών συνθηκών διάδοσης,

2. όταν ο χρήστης διασχίζει τα σύνορα της κυψέλης,

3. όταν στο σύστημα χρειάζεται αναδιάταξη στον καταμερισμό των πόρων, ώστε να διευθετηθούν νέες υπηρεσίες.

Υπάρχουν δυο τύποι διαπομπής, όσον αφορά στην εξυπηρέτηση του κινητού τερματικού πριν και μετά τη διαπομπή, που αναφέρονται ως ενδοκυψελική διαπομπή (intracell handoff) και διακυψελική διαπομπή (intercell handoff). Στην ενδοκυψελική διαπομπή, ο χρήστης μεταφέρεται σε καινούριο δίαυλο, αλλά η υπηρεσία εξακολουθεί να παρέχεται από τον ίδιο σταθμό βάσης. Αυτό το είδος διαπομπής προκαλείται συνήθως από υποβαθμισμένη ποιότητα του διαύλου ή από αναδιάταξη των πόρων. Μια διακυψελική διαπομπή ενεργοποιείται, όταν ο χρήστης απομακρύνεται από το σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί, ή όταν ο τρέχων σταθμός βάσης αδυνατεί να παράσχει ικανοποιητική ποιότητα υπηρεσίας ίσως και λόγω του φαινομένου της σκίασης.

2.3.1.3 Κριτήρια έναρξης διαπομπής

Στην πράξη χρησιμοποιούνται τέσσερα κριτήρια έναρξης της διαπομπής στα κυψελωτά συστήματα.

- η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος (Received Signal Strength, RSS)

- ο λόγος φέροντος προς παρεμβολή (Carrier to Interference Ratio, CIR)
- η απόσταση μεταξύ κινητού τερματικού και σταθμού βάσης
- κριτήρια σχετικά με το δίκτυο

Η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος είναι το κριτήριο που χρησιμοποιείται περισσότερο. Όταν η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος στον τρέχοντα δίαυλο είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη τιμή , ενεργοποιείται η διαδικασία της διαπομπής. Για την αποφυγή πρόωρων διαπομπών χρησιμοποιούνται το παράθυρο μέσης τιμής και το περιθώριο υστέρησης (H), όταν πρόκειται να ληφθεί απόφαση για την πραγματοποίηση κάθε διαπομπής. Πριν από τη λήψη της απόφασης, λαμβάνεται η μέση τιμή της μετρούμενης ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με τη βοήθεια κάποιου αριθμού δειγμάτων (παράθυρο μέσης τιμής) έτσι, ώστε να απομακρυνθεί η επίδραση των διακυμάνσεων του σήματος που προκαλούνται από τις γρήγορες διαλείψεις, και μόνο όταν η μέση τιμή είναι μικρότερη από εκείνη των γειτονικών σταθμών κατά μια προκαθορισμένη ποσότητα (περιθώριο υστέρησης) θα αρχίσει η διαπομπή. Η κατάλληλη σχεδίαση του παραθύρου μέσης τιμής και της υστέρησης είναι κρίσιμη για το σύστημα, καθότι συντελεί στη μείωση της επιβάρυνσης στη σηματοδοσία, που προκαλείται από περιττές διαπομπές, και ταυτόχρονα στη διατήρηση της καθυστέρησης διαπομπής (μέση καθυστέρηση συν την καθυστέρηση της υστέρησης) σε ανεκτά επίπεδα [2], [11].

2.4 Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, QoS)

Η ταχεία εξέλιξη των δικτύων τηλεπικοινωνιών παγκοσμίως, και των ολοένα αυξανόμενων υπηρεσιών που αυτά προσφέρουν, συνεπάγονται συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας που πρέπει να εκπληρωθούν, προκειμένου να ικανοποιηθούν και οι αντίστοιχες προσδοκίες των τελικών χρηστών. Συγκεκριμένα, λαμβάνουν χώρα μια βασική ταξινόμηση υπηρεσιών, καθεμιά από τις οποίες αποτελεί κομβικό σημείο διαφορετικών ερευνητικών περιοχών, και η εξέλιξη ευρέος συνόλου μηχανισμών και πρωτοκόλλων με σκοπό την ταξινόμηση, διαφοροποίηση ή και παροχή ειδικής αντιμετώπισης σε οποιαδήποτε ροή δεδομένων. Παρόλα αυτά, η ποιότητα υπηρεσίας από την σκοπιά του τελικού χρήστη είναι μια ευρύτερη και πιο υποκειμενική έννοια και ορίζεται ως Quality of Experience (QoE). Σε οποιαδήποτε περίπτωση, βέβαια, από την προοπτική των κυψελωτών συστημάτων, η εξασφάλιση καλής QoE επάγεται στην εξασφάλιση καλής end-to-end QoS. Οι λειτουργίες αυτές αποτελούν τις αρχές της Quality of Service διαχείρισης [16].

2.4.1 QoS στα κυψελωτά συστήματα

Η QoS περιγράφεται και εφαρμόζεται ποιοτικά ή ποσοτικά. Μια ποιοτική προσέγγιση της QoS διαχείρισης βασίζεται στην απόδοση υψηλότερης ή χαμηλότερης προτεραιότητας σε διαφορετικούς τύπους υπηρεσιών (για παράδειγμα ένα e-mail συγκρινόμενο με μια Web εφαρμογή πραγματικού χρόνου δεν χρίζει άμεσης προώθησης). Από την άλλη, μια ποσοτική προσέγγιση της QoS διαχείρισης προσπαθεί να εγγυηθεί

συγκεκριμένες δυνατότητες μετάδοσης που απαιτούνται από την εκάστοτε υπηρεσία, καθώς η ποιότητα υπηρεσίας εξαρτάται από ποσότητες όπως throughput, καθυστέρηση, απώλεια.

Η QoS μπορεί να θεωρηθεί ξεχωριστά σε καθένα από τα στρώματα που θεωρούνται από την αρχή διαστρωμάτωσης OSI, αλλά περισσότερο ενδιαφέρον έχει η καθολική end-to-end θεώρησή του. Συγκεκριμένα, οι QoS μηχανισμοί ευθύνονται για την διαχείριση και διαφοροποίηση υπηρεσιών από την σκοπιά του δικτύου, σύμφωνα με συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας που καθορίζονται από την εκάστοτε εφαρμογή. Η end-to-end QoS επιτυγχάνεται αντιστοιχίζοντας τις απαιτήσεις των υπηρεσιών με τους κατάλληλους μηχανισμούς που είναι διαθέσιμοι στο δίκτυο όπως είναι οι AC (Admission Control), channel allocation, power control, handover control.

Τα κυψελωτά δίκτυα σχεδιάστηκαν αρχικά για υπηρεσίες φωνής, που χρησιμοποιούν συγκεκριμένους πόρους του δικτύου, δηλαδή συγκεκριμένο εύρος ζώνης. Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη να παρέχει σταθερό bit rate και αμελητέα σταθερή καθυστέρηση σε υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, ώστε να παράσχει ταυτόχρονα και την απαιτούμενη QoS, όπως για παράδειγμα στα συστήματα τύπου Erlang B όπου η τηλεπικοινωνιακή κίνηση σχετίζεται άμεσα με την απαιτούμενη blocking probability μιας κλήσης. Η εισαγωγή των υπηρεσιών δεδομένων, όμως, κάνει αδύνατη τη διαστασιοποίηση των πόρων ενός ασύρματου δικτύου, εξαιτίας τριών βασικών επιχειρημάτων

1. *Χαρακτηρισμός της κίνησης:* Η κίνηση σε υπηρεσίες φωνής χαρακτηρίζεται βασικά από τις παραμέτρους mean holding time (μέση διάρκεια κλήσης) και call arrival rate (ρυθμός άφιξης κλήσεων). Στις υπηρεσίες δεδομένων, όμως, τα χαρακτηριστικά της κίνησης δεν είναι πάντα σταθερά λόγω πληθώρας διαφορετικών εφαρμογών. Για παράδειγμα, η υπηρεσία FTP παράγει πιο σταθερή κίνηση σε σύγκριση με την υπηρεσία Web browsing που είναι πιο εκρηκτική.

2. *Quality of Service (QoS):* Διαφορετικές υπηρεσίες δεδομένων διεκδικούν διαφορετικές QoS απαιτήσεις (κυρίως bit rate και καθυστέρηση) από το ασύρματο δίκτυο, το οποίο οφείλει να έχει μηχανισμούς προς την ικανοποίηση των απαιτήσεων αυτών. Για παράδειγμα υπηρεσίες ανταλλαγής μηνυμάτων απαιτούν μικρή και σταθερή καθυστέρηση, ενώ υπηρεσίες ανάκτησης περιεχομένου έχουν λιγότερο περιοριστικές από πλευράς καθυστέρησης απαιτήσεις.

3. *Κατανομή των πόρων:* Η εκρηκτική φύση των υπηρεσιών δεδομένων επιβάλλει τον διαμοιρασμό των πόρων μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών και χρηστών, ώστε να βελτιστοποιήσει τη χρησιμότητά τους.

Συνοπτικά, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των διάφορων υπηρεσιών που παρέχει το δίκτυο, όλα τα στοιχεία του δικτύου πρέπει να διαμορφωθούν κατάλληλα για την εξυπηρέτηση του σκοπού αυτού. Οφείλει το δίκτυο αυτό καθαυτό να λαμβάνει υπόψη του τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε ζητούμενης υπηρεσίας και να παρέχει με τη σειρά του τους κατάλληλους πόρους (εύρος ζώνης) στους τελικούς χρήστες, ώστε να παρέχει τη λεγόμενη end-to-end QoS. Αν κάποιο μεμονωμένο στοιχείο του δικτύου δεν

είναι ικανό να ικανοποιήσει, για παράδειγμα, συγκεκριμένη ποσότητα throughput, η end-to-end ποσότητα throughput δεν είναι δυνατόν να υποστηριχθεί από το δίκτυο. Κατά παρόμοιο τρόπο, καθυστερήσεις σε διαφορετικούς κόμβους του δικτύου λαμβάνονται από τη σκοπιά του τελικού χρήστη αθροιστικά, που σημαίνει ότι ξεχωριστά κάθε καθυστέρηση πρέπει να βρίσκεται κάτω από συγκεκριμένο όριο προκειμένου να ικανοποιηθεί η end-to-end απαίτηση για καθυστέρηση.

2.4.2 Ανάλυση επίδοσης τελικού χρήστη

Ο όρος επίδοση τελικού χρήστη χρησιμοποιείται για να αποδώσει τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνεται ένας χρήστης την QoS χρησιμοποιώντας μια εφαρμογή/ υπηρεσία. Το ασύρματο δίκτυο που βρίσκεται πίσω από την προσφερόμενη στον χρήστη υπηρεσία (είτε πρόκειται για GPRS, CDMA2000, WCDMA, EDGE ή WiFi) δεν παίζει κανέναν ρόλο στον προσδιορισμό της επίδοσης της εφαρμογής, εφόσον εκείνη είναι πλέον στενά συνδεδεμένη με τα χαρακτηριστικά της υπηρεσίας.

Από την σκοπιά του χρήστη, το δίκτυο θεωρείται ως το μέσο που φέρει τα δεδομένα και παρέχει ορισμένες δυνατότητες μετάδοσης. Οι δυνατότητες αυτές καθορίζονται από τον συνδυασμό δυο βασικών παραμέτρων, των throughput και latency, και κάποιων συμπληρωματικών για λόγους πληρότητας, όπως accessibility (προσβασιμότητα) και retainability (ικανότητα διατήρησης) των διαύλων. Οι όροι αυτοί περιγράφονται ακολούθως.

- *Throughput* – είναι η ποσότητα των μεταφερόμενων δεδομένων προς μια κατεύθυνση μιας ζεύξης διαιρούμενη με τον χρόνο που χρειάστηκε για τη μεταφορά αυτών, και εκφράζεται σε bits ή σε bytes per second. Γενικά, η ποσότητα αυτή μετρείται στους ραδιοδιαύλους με τον δείκτη RLC (Radio Link Control), ο οποίος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ενδεικτικά οι τεχνολογικές δυνατότητες των τερματικών, η δομή του κυψελωτού δικτύου, οι συνθήκες τηλεπικοινωνιακής κίνησης (φορτίο) ή η απουσία προβλεπτικότητας στην ασύρματη διάδοση.

- *Latency* – είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα πακέτο (μιλώντας πλέον για πακέτα στο φυσικό επίπεδο) να διασχίσει μια ζεύξη (σύνδεση) από τον αποστολέα στο δέκτη.

- *Accessibility* – είναι η πιθανότητα μια υπηρεσία να είναι διαθέσιμη τη στιγμή που θα ζητηθεί από έναν χρήστη. Στην περίπτωση ασύρματων δικτύων, η παράμετρος αυτή θα εξαρτηθεί από την κάλυψη του δικτύου (signal coverage) και τη συνδεσιμότητα του δικτύου με εξωτερικούς κόμβους και application servers. Οπότε, η πρόσβαση σε κάποια υπηρεσία είναι πιθανόν να αποτύχει είτε λόγω αποτυχίας εγκατάστασης μιας σύνδεσης (ζεύξης) στο εσωτερικό του κυψελωτού δικτύου είτε λόγω αποτυχίας σύνδεσης με το εξωτερικό δίκτυο (Internet).

- *Retainability* – του κυψελωτού δικτύου είναι η πιθανότητα μια κλήση να τερματιστεί επιτυχώς, χωρίς λάθη κατά τη μετάδοση που πιθανόν να επηρεάσουν δυσμενώς και την επίδοση του συστήματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, από την πλευρά του τελικού χρήστη, προβλήματα με τις παραμέτρους accessibility και retainability φαίνονται τελικά ως απλή υποβάθμιση του συστήματος λόγω μείωσης του throughput, όταν η ραδιοζεύξη έχει τη δυνατότητα να ανακτήσει αμέσως τη σωστή λειτουργία της [16],[7].

Κεφάλαιο 3: Διαχείριση Επικοινωνίας Ασύρματων Συστημάτων

3.1 Αρχιτεκτονική ασύρματων συστημάτων

3.1.1 Αρχές Διαστρωμάτωσης OSI

Το βασικό πρότυπο αναφοράς (Basic Reference Model, BRM) της Διασύνδεσης Ανοιχτού Συστήματος (Open System Interconnection, OSI) του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποιήσεως (International Standardization Organization, ISO) είναι μια ευρέως αποδεκτή αφηρημένη αρχιτεκτονική για τη διασύνδεση ετερογενών συστημάτων. Το OSI BRM έχει μια διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική. Ένα στρώμα περιέχει μια καλά καθορισμένη ομάδα λειτουργιών, η οποία αναφέρεται ως λειτουργικότητα στρώματος, και τα στρώματα είναι ιεραρχικά τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο. Στον καθορισμό των στρωμάτων είναι επιθυμητό να αποφεύγεται η επικάλυψη λειτουργικότητας και να επιτυγχάνεται μια απεικόνιση των λειτουργιών των στρωμάτων σε διακεκριμένες διαδικασίες. Αυτές με τη σειρά τους συχνά σχετίζονται με την ανάπτυξη του λογισμικού ή του υλικού και με την επιλογή ειδικών τεχνολογικών λύσεων. Επιπλέον, είναι βασικό το όριο ενός στρώματος να αντιστοιχεί σε ένα σημείο προσαρμογής (interface) το οποίο θα αποτελέσει κοινώς αποδεκτή σύσταση. Στην ικανοποίηση των παραπάνω πρακτικών θεωρήσεων, πρέπει να εξασφαλιστεί ότι τα στρώματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και ότι τυχόν αλλαγές σε κάποιο από αυτά δεν επιφέρει μετατροπές σε κάποιο άλλο.

Στο OSI BRM αρχικά έχουν αναγνωριστεί επτά στρώματα για τη μεταφορά δεδομένων σε δίκτυα μεγάλων περιοχών. Τα δύο κατώτερα στρώματα που καλούνται Φυσικό στρώμα και Στρώμα Ζεύξης είναι εκείνα που ενδιαφέρουν στα ασύρματα δίκτυα, εφόσον ασχολούνται με τη μετάδοση της πληροφορίας και γενικά με τις λειτουργίες του δικτύου που απαιτούνται για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων από ένα τερματικό σε κάποιο άλλο [3].

3.1.2 Ασύρματα Τοπικά Δίκτυα

3.1.2.1 Αρχιτεκτονική WLAN

Ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο (Wireless Local Area Network ή Wireless Fidelity) επιτυγχάνει την αμφίδρομη μετάδοση δεδομένων, με φυσικό μέσο μετάδοσης τον αέρα. Η μετάδοση πραγματοποιείται είτε στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων είτε με υπέρυθρη ακτινοβολία. Τα τοπικά ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται εκτεταμένα τόσο σε κοινόχρηστους χώρους όσο και σε κατοικίες, καθώς εμφανίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην εγκατάσταση, τη λειτουργία και τη χρήση τους.

Η εγκατάσταση ενός ασύρματου τοπικού δικτύου είναι γρήγορη και εύκολη, ενώ το συνολικό κόστος μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερο από άλλες τεχνολογίες πρόσβασης. Παράλληλα, τα ασύρματα τοπικά δίκτυα παρέχουν στους χρήστες τη δυνατότητα πρόσβασης σε ευρυζωνικές υπηρεσίες για το διάστημα που παραμένουν σε σημεία εντός της περιοχής κάλυψης των εν λόγω δικτύων.

Αναφορικά με την αρχιτεκτονική των WiFi δικτύων, η βασική δομική τους μονάδα είναι οι βασικές ομάδες υπηρεσίας (Basic Service Set) ένα σύνολο από συσκευές-σταθμούς με δυνατότητα πρόσβασης στο ασύρματο μέσο (stations), οι οποίες επικοινωνούν μέσω του ίδιου καναλιού στην ίδια περιοχή. Αντίστοιχα, οι εκτεταμένες ομάδες υπηρεσίας (Extended Service Set) αποτελούν ένα σύνολο από BSSs και ενσύρματα τοπικά δίκτυα πρόσβασης. Το δίκτυο μεταφοράς διασυνδέει τα σημεία πρόσβασης μεταξύ τους καθώς και με τα υπόλοιπα ενσύρματα τοπικά δίκτυα, και ονομάζεται σύστημα διανομής (Distribution System). Το πρότυπο δεν ορίζει τη μορφή του, έτσι μπορεί να είναι είτε ένα ενσύρματο δίκτυο (λόγου χάριν Ethernet) είτε κάποιο ασύρματο.

Όσον αφορά την τοπολογία τους, τα δίκτυα αυτά εμφανίζονται με δύο βασικές δομές, τη δομημένη (Infrastructure), την τυχαία (Ad-hoc) ή συνδυασμό των παραπάνω. Με τη χρήση της δομημένης τοπολογίας, πολλαπλά σημεία πρόσβασης συνδέονται με το ενσύρματο δίκτυο, αυξάνοντας την κάλυψη και τη χωρητικότητα του δικτύου πρόσβασης. Με τη χρήση της τυχαίας διάταξης στο ασύρματο τοπικό δίκτυο, οι χρήστες συνδέονται απευθείας μεταξύ τους, χωρίς τη μεσολάβηση σημείων πρόσβασης. Προφανώς, ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει οποιονδήποτε συνδυασμό των παραπάνω τοπολογιών [3], [8].

3.1.2.2 Πρότυπο IEEE για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα

Τον Ιούνιο του 1997, η IEEE οριστικοποίησε το πρώτο πρότυπο για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα με την ονομασία 802.11. Σκοπός του προτεινόμενου προτύπου αποτέλεσε η ανάπτυξη μιας προδιαγραφής για την ασύρματη διασύνδεση σταθερών, φορητών και κινητών σταθμών μέσα σε μια τοπική περιοχή. Το τελικό πρότυπο, που δημοσιεύθηκε τον Νοέμβριο του 1997, καθορίζει τη λειτουργία πρωτοκόλλων ικανών να υποστηρίξουν την ασύρματη δικτύωση μιας τοπικής περιοχής. Η κύρια υπηρεσία του 802.11 είναι η μεταφορά των M-SDU (MAC Service Data Unit) μεταξύ ομότιμων στρωμάτων ζεύξης δεδομένων. Παράλληλα, περιλαμβάνει βασικές υπηρεσίες όπως διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα, συσχέτιση ενός σταθμού με ένα σημείο πρόσβασης, επανασυσχέτιση ενός σταθμού σε περίπτωση μετακίνησης, τερματισμός της συσχέτισης, πιστοποίηση (authentication), ασφάλεια και διαχείριση ισχύος τερματικού σταθμού.

Η IEEE, συνεπώς, είναι μια οικογένεια πρωτοκόλλων που περιγράφουν τη λειτουργία ασύρματων τοπικών δικτύων. Στο πρότυπο 802.11 προδιαγράφονται τα δύο πρώτα επίπεδα του OSI, δηλαδή το φυσικό επίπεδο (physical) και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων (υποεπίπεδο Medium Access Control), γεγονός που επιτρέπει σε οποιαδήποτε

δικτυακή εφαρμογή να «τρέχει» σε τοπικά δίκτυα που υποστηρίζουν το IEEE 802.11 όπως ακριβώς θα «έτρεχε» και σε τοπικό δίκτυο Ethernet (IEEE 802.3).

Συγκεκριμένα, για το υπόστρωμα MAC έχει προτυποποιηθεί η τεχνική Κατανεμημένης Συντονισμένης Λειτουργίας (Distributed Coordination Function) ως μέθοδος πρόσβασης στο φυσικό μέσο. Η κατανεμημένη συντονισμένη λειτουργία χρησιμοποιεί την πολλαπλή πρόσβαση κοινού φάσματος με ανίχνευση φέροντος (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance, CSMA/CA) για την αποφυγή συγκρούσεων και αναμεταδόσεων. Προαιρετικά, χρησιμοποιείται και η τεχνική Συντονισμένης Λειτουργίας Σημείου (Point Coordination Function) για την αποστολή χρονικά εξαρτώμενων δεδομένων. Με τη χρήση της Συντονισμένης Λειτουργίας Σημείου, η διάρκεια και η σειρά εκπομπής των ασύρματων σταθμών καθορίζεται από το σημείο πρόσβασης (Point Coordinator).

Όσον αφορά στο φυσικό επίπεδο, το πρότυπο 802.11 υποστηρίζει τόσο τη χρήση των ραδιοσυχνοτήτων ως μέσο μετάδοσης φάσματος, όπου δεν είναι απαραίτητη η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, όσο και τη χρήση υπέρυθρης ακτινοβολίας, όπου η οπτική επαφή είναι προϋπόθεση. Η παραπάνω διάκριση οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την περίοδο προτυποποίησης του 802.11 υπήρχαν ήδη υλοποιήσεις ασύρματων δικτύων που χρησιμοποιούσαν τα προαναφερόμενα συστήματα μετάδοσης, και σκοπός του 802.11 ήταν να εντάξει τις υπάρχουσες υλοποιήσεις στο νέο πρότυπο.

Το πρωτόκολλο 802.11 υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξεως των 1Mbps και 2Mbps. Η μετάδοση του σήματος γίνεται είτε στη ζώνη συχνοτήτων κοντά στα 2.4GHz, είτε με υπέρυθρη ακτινοβολία μήκους κύματος 850-950nm. Για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στο θόρυβο στενής ζώνης, το σήμα κωδικοποιείται με μεθόδους απλωμένου φάσματος. Το πρωτόκολλο υποστηρίζει την τεχνική εξάπλωσης φάσματος με εναλλαγή συχνότητας και την τεχνική εξάπλωσης φάσματος ευθείας ακολουθίας. Για τη μετάδοση του σήματος στη ζώνη συχνοτήτων χρησιμοποιείται (στην περίπτωση εξάπλωσης φάσματος με εναλλαγή συχνότητας) διαμόρφωση με μετατόπιση συχνότητας (FSK) δύο συχνοτήτων για ρυθμούς 1Mbps και τεσσάρων συχνοτήτων για ρυθμούς 2Mbps. Αντίστοιχα στην περίπτωση εξάπλωσης φάσματος ευθείας ακολουθίας χρησιμοποιείται δυαδική διαμόρφωση με μετατόπιση φάσης (BPSK) για ρυθμούς 1Mbps και τετραφασική PSK για ρυθμούς 2Mbps. Για την επικοινωνία μέσω υπερύθρων χρησιμοποιείται διαμόρφωση θέσης παλμών (Pulse Position Modulation). Η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς καθορίζεται από τους περιορισμούς που υπάρχουν για τη χρήση της ζώνης συχνοτήτων, και περιορίζεται στα 20dBm, ενώ η ευαισθησία του δέκτη ορίζεται από το πρωτόκολλο ότι πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση των –80dBm για ρυθμό λαθών της τάξης του 3%.

Το πρωτόκολλο 802.11 συνέβαλε ουσιαστικά στην ευρεία εξάπλωση των ασύρματων δικτύων, καθώς η προτυποποίηση κατέστησε δυνατή τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των συσκευών που το υλοποιούσαν. Ωστόσο, οι ταχύτητες των 1Mbps και 2Mbps που υποστήριζε ήταν πολύ μικρές για τα 10Mbps, αρχικά, και 100Mbps, σήμερα, που δίνει το ενσύρματο Ethernet. Πολύ γρήγορα, συνεπώς, εμφανίστηκαν παραλλαγές του 802.11, που αύξησαν την ταχύτητά του και διόρθωσαν διάφορα εγγενή προβλήματα. Στον

ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι σημαντικότερες παραλλαγές του προτύπου 802.11 [18], [8], [3], [15].

	802.11b	802.11g	802.11a
Συχνότητα λειτουργίας	2.4GHz	2.4GHz	5GHz
Αριθμός καναλιών	3	3	8
Ακτίνα κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους	30m (11Mbps) 90m (1Mbps)	30m (54Mbps) 90m (1Mbps)	12m (54Mbps) 90m (6Mbps)
Ακτίνα κάλυψης σε εξωτερικούς χώρους με οπτική επαφή	120m (11Mbps) 460m (1Mbps)	120m (54Mbps) 460m (1Mbps)	30m (54Mbps) 300m (6Mbps)
Ταχύτητα μετάδοσης (Mbps)	1, 2, 5.5 και 11	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 και 54	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 και 54
Διαμόρφωση	DSSS	OFDM	OFDM

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά και σύγκριση σημαντικότερων παραλλαγών του 802.11.

3.2 Έλεγχος Αποδοχής Κλήσης (Call Admission Control, CAC)

3.2.1 CAC στα ενσύρματα δίκτυα

Η έννοια του Call Admission Control έκανε την πρώτη της εμφάνιση στα ενσύρματα δίκτυα, στα οποία και βασίστηκε για έρευνα και την ανάπτυξη, και τη μετέπειτα εφαρμογή του στα σημερινά και ολοένα εξελισσόμενα ασύρματα δίκτυα. Κάθε ενσύρματο, λοιπόν, δίκτυο που χειρίζεται ποικίλες υπηρεσίες, με διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης για καθεμία από αυτές, χρησιμοποιεί έλεγχο ροής των δεδομένων για να εξασφαλίσει την απαιτούμενη ποιότητα υπηρεσίας (QoS). Συγκεκριμένα, εφαρμόζονται μεταγενέστερος/δραστικός (reactive) και προληπτικός (preventive) έλεγχος συμφόρησης. Ο μεταγενέστερος έλεγχος συμφόρησης λαμβάνει χώρα στο φυσικό επίπεδο, όπου η κίνηση εκφράζεται σε πακέτα δεδομένων καθώς ο μηχανισμός ελέγχου ροής ρυθμίζει τον ρυθμό εισόδου πακέτων στους ενδιάμεσους μεταγωγείς, και δεν απασχολεί στην παρούσα ανάλυση. Ο προληπτικός έλεγχος συμφόρησης έρχεται να λύσει το πρόβλημα της κατανομής των πόρων του δικτύου στις εγκατεστημένες συνδέσεις, παρέχοντας τους πόρους εκείνους ώστε η υπηρεσία να έχει

αποδεκτή ποιότητα αφενός, και αφετέρου να μην υποβαθμίζει την ποιότητα των εγκατεστημένων συνδέσεων. Τα ίδια εφαρμόζονται και στην περίπτωση επαναδιαπραγμάτευσης των παραμέτρων σύνδεσης κατά τη διάρκεια μιας εγκατεστημένης κλήσης.

Ο προληπτικός έλεγχος συμφόρησης ασκείται σε δύο διαφορετικά επίπεδα με τους ανάλογους μηχανισμούς. Στο επίπεδο πακέτου, που για λόγους πληρότητας αναφέρεται, γίνεται λόγος για τους Ελέγχους Παραμέτρων Χρήσης (Usage Parameter Control, UPC) και Δικτύου (Network Parameter Control, NPC), καθώς και για τον Έλεγχο Προτεραιότητας. Στο επίπεδο κλήσης, ή ακριβέστερα σύνδεσης, γίνεται λόγος για τον Έλεγχο Αποδοχής Κλήσης (Call Admission Control, CAC). Ο προληπτικός έλεγχος μπορεί να εφαρμοστεί μόνον αν είναι εξαρχής γνωστά από το δίκτυο τα χαρακτηριστικά κίνησης κάθε αιτούμενης κλήσης.

Αλληλένδετος με το πρόβλημα του καθορισμού αλγορίθμων για CAC είναι και ο καθορισμός περιγραφέων για την κίνηση που δημιουργεί μια νέα κλήση/σύνδεση. Οι περιγραφείς αυτοί πρέπει να είναι <u>απλοί</u>, ώστε κάθε χρήστης να μπορεί εύκολα να τους καθορίσει όταν ζητά μια υπηρεσία, <u>λίγοι στον αριθμό</u>, ώστε η λήψη απόφασης από το CAC για το αν η κλήση θα γίνει αποδεκτή ή όχι να γίνεται στους μεταγωγείς του ρυθμιστή του δικτύου, <u>ακριβείς</u>, υπό την έννοια ότι παρέχουν όλη την απαραίτητη πληροφορία για την εκτίμηση του εύρους ζώνης που θα καταναλώσει η σύνδεση, και <u>καθολικοί</u>, αφού θα πρέπει να δύνανται να περιγράψουν κάθε είδους κίνηση που, ως γνωστόν, ποικίλει από υπηρεσία σε υπηρεσία. Το CAC εδρεύει στο κατώτερο υπόστρωμα του στρώματος ζεύξης δεδομένων (MAC) της στοίβας πρωτοκόλλων, εφόσον ο έλεγχος για την αποδοχή ή απόρριψη μιας κλήσης/σύνδεσης πρέπει να είναι ανεξάρτητος από το μέσο μετάδοσης, που εκφράζεται από το φυσικό στρώμα και προφανώς διαφέρει από δίκτυο σε δίκτυο, ή ακόμη και σε διαφορετικές περιοχές του ιδίου δικτύου λόγω του συνδυασμού ενσύρματης και ασύρματης μετάδοσης στα σημερινά δίκτυα [14].

3.2.2 CAC στα ασύρματα δίκτυα

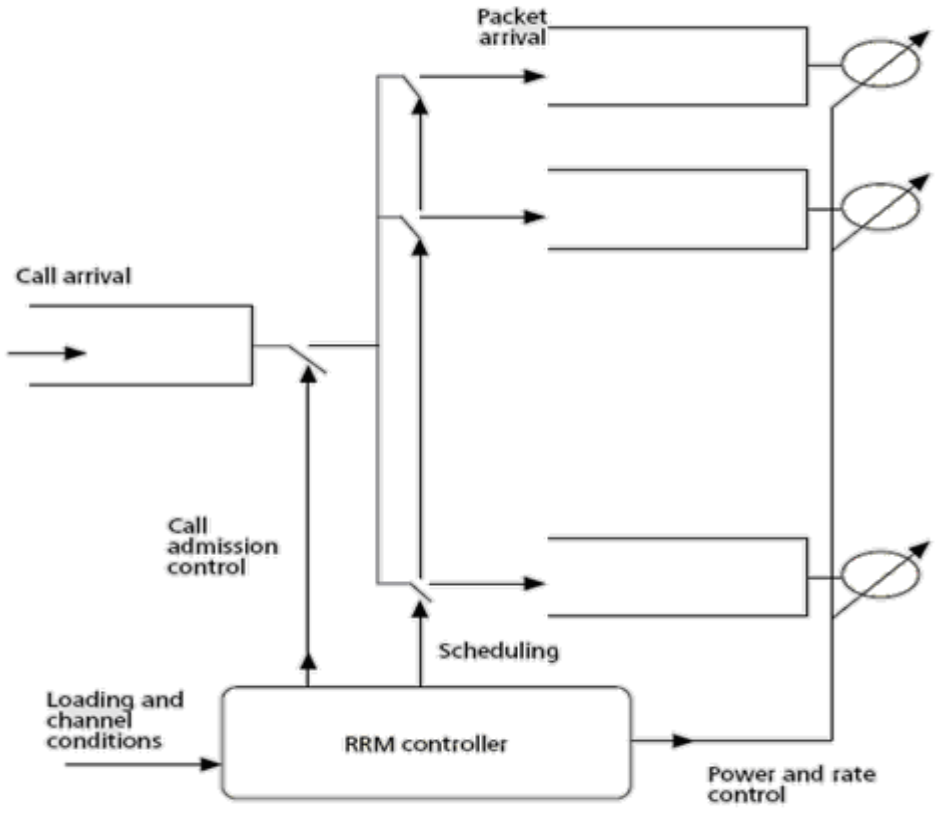
3.2.2.1 Γενικά

Στην Ποιότητα Υπηρεσίας (QoS) που παρέχεται στα ασύρματα επικοινωνιακά συστήματα σημαντικό ρόλο παίζει η τεχνική του Radio Resource Management (RRM). Στην πραγματικότητα, οι RRM πολιτικές, σε συνδυασμό με τον προγραμματισμό του δικτύου και το σχεδιασμό του ασύρματου μέσου μετάδοσης, καθορίζουν την επίδοση του συστήματος σε όρους QoS εξίσου σε επίπεδο χρήστη και επίπεδο δικτύου. Στις RRM τεχνικές ελέγχονται τα συχνοτικά ή χρονικά κανάλια, η εκπεμπόμενη ισχύς, και η πρόσβαση στους σταθμούς βάσης, προκειμένου να ελεγχθεί η ποσότητα των διατιθέμενων πόρων σε κάθε χρήστη με την προοπτική μεγιστοποίησης κάποιας παραμέτρου, όπως είναι το συνολικό throughput του δικτύου, ή η ολική χρησιμοποίηση πόρων, που υπόκεινται σε περιορισμούς όπως οι μέγιστοι ρυθμοί call blocking, call dropping και ο ελάχιστος λόγος σήματος προς παρεμβολή (SIR). Η επίδοση των RRM τεχνικών επιδρά άμεσα στην ατομική επίδοση κάθε χρήστη, και συνεπώς στη συνολική επίδοση του δικτύου. Για παράδειγμα, η εκπεμπόμενη ισχύς από

ένα χρήστη δεν καθορίζει μόνον την QoS που προσφέρεται σε αυτόν, αλλά επηρεάζει το επίπεδο παρεμβολών που λαμβάνεται από άλλους χρήστες, και συνεπώς επιδρά στην ποιότητα σήματος άλλων χρηστών.

Η διαχείριση των ασύρματων πόρων λαμβάνει χώρα χρησιμοποιώντας ποικίλα σενάρια, που μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει frequency/time resource allocation schemes όπως channel allocation, scheduling, έλεγχο ρυθμού μετάδοσης και bandwidth reservation schemes. Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από power allocation και control schemes, που ελέγχουν την εκπεμπόμενη ισχύ των τερματικών και των σταθμών βάσης. Η τρίτη κατηγορία εμπεριέχει call admission control, ανάθεση σταθμών βάσης (base station assignment), και handoff αλγόριθμους, που καθορίζουν την αποδοχή της σύνδεσης (access port connection).

Όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η αφικνούμενες κλήσεις γίνονται αποδεκτές ή απορρίπτονται από το δίκτυο με τη βοήθεια του call admission scheme (CAC) που βασίζεται σε προκαθορισμένα κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψη και τις συνθήκες φορτίου του δικτύου. Οι κλήσεις που γίνονται αποδεκτές, ελέγχονται μετέπειτα από άλλες RRM τεχνικές, όπως scheduling, ή schemes ελέγχου handoff και ισχύος.



Σχήμα 3.1. Μοντέλο Radio Resource Management.

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων έχει ερευνηθεί διεξοδικά στα ενσύρματα δίκτυα (B-ISDN, ATM) ως απαραίτητο εργαλείο ελέγχου συμφόρησης και παροχής της εκάστοτε QoS. Δυστυχώς, ο CAC στα ασύρματα δίκτυα είναι πιο περίπλοκος εξαιτίας των μοναδικών

χαρακτηριστικών των ασύρματων δικτύων, όπως είναι η πολλαπλή πρόσβαση και η παρεμβολή που προκαλείται, η εξασθένηση σε μια ζεύξη, και το περιορισμένο εύρος ζώνης. Παρόλα αυτά, τα CAC schemes ασύρματα δίκτυα έχουν προσελκύσει μεγάλη προσοχή τις τελευταίες δύο δεκαετίες, λόγω των συνεχώς αναπτυσσόμενων ασύρματων επικοινωνιακών συστημάτων και τον κεντρικό ρόλο του CAC στην παροχή QoS σε όρους ποιότητας σήματος, call blocking και dropping probabilities, καθυστέρησης πακέτων και ρυθμού απωλειών, και ρυθμού μετάδοσης. Στα πρώτης και δεύτερης γενιάς ασύρματα συστήματα, το CAC αναπτύχθηκε σε περιβάλλον μιας υπηρεσίας, ενώ στα τρίτης γενιάς ασύρματα συστήματα (3G) παρέχονται multimedia υπηρεσίες όπως φωνή, video, δεδομένα και audio, με διαφορετικές κάθε φορά ανάγκες σε QoS, και για το λόγο αυτό τα CAC schemes αναπτύχθηκαν ώστε να αντεπεξέλθουν στις αλλαγές αυτές [14].

3.2.2.2 Κύριοι λόγοι χρήσης των CAC schemes

3.2.2.2.1 Εγγύηση QoS

- *Ποιότητα σήματος*

Ο έλεγχος αποδοχής σήματος είναι βασικής σημασίας για την εγγύηση ποιότητας σήματος στα ασύρματα συστήματα, που περιορίζονται από παρεμβολές. Για παράδειγμα, τα CDMA ασύρματα συστήματα έχουν ένα όριο soft capacity τέτοιο, ώστε σε περίπτωση υπερφόρτωσης του δικτύου περιορίζεται η ποιότητα σήματος που αντιλαμβάνονται οι χρήστες σε όρους παρεμβολής, ή καλύτερα SIR (signal to interference ratio). Τα σχήματα CAC, συνεπώς, αποδέχονται νέους χρήστες μόνο αν μπορεί να διατηρηθεί μια ελάχιστη ποιότητα σήματος στους χρήστες, συμπεριλαμβανομένων των παλιών και της νέας κλήσης. Στην περίπτωση αυτή, το κριτήριο αποδοχής μπορεί να είναι ο αριθμός των χρηστών, η παρεμβολή ή ο λόγος σήματος προς παρεμβολή (SIR), η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς από το σταθμό βάσης, ή η λαμβανόμενη ισχύς είτε από το σταθμό βάσης είτε από το κινητό τερματικό.

- *Call dropping probability*

Από τη στιγμή που η απώλεια μιας ενεργής κλήσης είναι πιο ενοχλητική, σε επίπεδο χρήστη, από την απόρριψη νέων κλήσεων, το CAC χρησιμοποιείται στα περιορισμένα από εύρος ζώνης ασύρματα συστήματα για να ελέγχει την handoff failure probability, πράγμα που εφαρμόζεται παρέχοντας μερικούς από τους πόρους στις handoff κλήσεις αποκλειστικά. Το κριτήριο αποδοχής κλήσεων μπορεί να είναι είτε ο αριθμός των χρηστών ή μια εκτίμηση της handoff failure probability, είτε μερικές φορές η διαθεσιμότητα των πόρων. Σε όλες τις περιπτώσεις, το CAC είναι λιγότερο αυστηρό με τις handoff κλήσεις σε σύγκριση με τις νέες, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της blocking probability.

- *Packet level parameters*

Όταν στα ασύρματα συστήματα παρέχονται υπηρεσίες προσανατολισμένες σε πακέτα, η υπερφόρτωση δικτύου μπορεί να προκαλέσει μη αποδεκτή καθυστέρηση και να μειωθεί η παράμετρος του throughput τόσο δε επίπεδο χρήστη όσο και σε επίπεδο δικτύου. Χρησιμοποιείται, για το λόγο αυτό, το CAC για την εγγύηση αυτών των παραμέτρων, καθώς κριτήριο αποδοχής κλήσης μπορεί να αποτελέσει ο αριθμός των χρηστών, η διαθεσιμότητα πόρων ή οι αυτές παράμετροι.

- *Transmission rate*

Τα σχήματα CAC χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα που παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων, προκειμένου να εγγυηθούν στους χρήστες τους έναν ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης. Παρόλο που η διαδικασία ελέγχου αυτή έχει μελετηθεί εκτενώς στα ενσύρματα δίκτυα, το πρόβλημα είναι πιο περίπλοκο στα ασύρματα δίκτυα λόγω της κινητικότητας των χρηστών, του περιορισμένου εύρους ζώνης, και της co-channel παρεμβολής.

3.2.2.2.2 Καθορισμός παραμέτρων δικτύου

- *Revenue-based CAC*

Σε επίπεδο δικτύου, η αποδοχή μιας κλήσης έχει το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου, αλλά βασικό μειονέκτημα αποτελεί η πιθανή επιδείνωση της QoS που προσφέρεται στις υπάρχουσες κλήσεις. Το CAC, λοιπόν, ελέγχει το tradeoff αυτών των δύο καταστάσεων, καθώς κριτήρια αποδοχής συνήθως είναι ο αριθμός των χρηστών και μια εκτίμηση της πιθανότητας επιδείνωσης της QoS.

- *Προτεραιότητα υπηρεσιών*

Η παραχώρηση υψηλότερης προτεραιότητας σε ορισμένες υπηρεσίες είναι ένας από τους αντικειμενικούς στόχους του CAC. Για παράδειγμα, επικρατεί η άποψη ότι στις υπηρεσίες φωνής πρέπει να προσφέρεται υψηλότερη προτεραιότητα σε σύγκριση με τις υπηρεσίες δεδομένων που δεν είναι πάντα πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, κάποιες φορές παρέχεται υψηλότερη προτεραιότητα σε συγκεκριμένους χρήστες της ίδια υπηρεσίας, με κριτήρια όπως τα τέλη συνδρομής ή την έλλειψη χρονικών περιθωρίων (επείγουσες κλήσεις).

- *Δίκαιη κατανομή πόρων*

Η επίτευξη δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών αποτελεί αντικειμενικό στόχο του CAC, το οποίο χρησιμοποιείται για να αποδέχεται ή να απορρίπτει κλήσεις, βασιζόμενο στους διαθέσιμους πόρους, ώστε να μην μονοπωλεί μόνο μία υπηρεσία τους συνολικούς πόρους του δικτύου.

3.2.2.3 Κατηγορίες CAC σχημάτων

3.2.2.3.1 Γενικά

Τα CAC σχήματα κατηγοριοποιούνται με βάση ποικίλες σχεδιαστικές παραμέτρους, καθώς κάθε επιλογή έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα. Αρχικά, τα σχήματα CAC διαχωρίζονται σε συγκεντρωμένα και κατανεμημένα. Στα συγκεντρωμένα σχήματα αποδοχής κλήσεων, μία μοναδική οντότητα όπως για παράδειγμα το Mobile Switching Center (MSC) ελέγχει την αποδοχή της κλήσης σε ολόκληρο το σύστημα, ενώ στα κατανεμημένα σχήματα ο έλεγχος αυτός παρέχεται από τους σταθμούς βάσης σε κάθε κυψέλη. Παρόλο που τα συγκεντρωμένα CAC σχήματα έχουν πιο ολοκληρωμένη άποψη για τη συνολική κίνηση στο δίκτυο, είναι πιο περίπλοκα στην εφαρμογή τους και για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιούνται στα ασύρματα συστήματα.

Τα σχήματα CAC που εφαρμόζονται σε ένα σύστημα επίσης κατηγοριοποιούνται με βάση των αριθμό των υπηρεσιών που το προσφέρει το σύστημα αυτό. Τα single-class CAC επικρατούσαν στα κυψελωτά συστήματα πρώτης και δεύτερης γενιάς (2G), όπου η υπηρεσία φωνής ήταν η κυρίαρχη (και μερικές φορές η μόνη) προσφερόμενη υπηρεσία. Με την ανάπτυξη του ενδιαφέροντος για δεδομένα και multimedia υπηρεσίες, τα single-class CAC σχήματα δεν ήταν πλέον επαρκή και για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν παράλληλα τα multiple-service/class CAC σχήματα, ειδικά στην αναβαθμισμένη δεύτερη γενιά (2.5G) και από την τρίτη γενιά και έπειτα (3G/4G). Η σχεδίαση των multiple-service/class CAC σχημάτων αποτελεί πρόκληση, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως προτεραιότητα υπηρεσίας, fairness, κατανομή πόρων.

Άλλη κατηγοριοποίηση που γίνεται για τα CAC σχήματα είναι σε proactive (προληπτικός έλεγχος) και reactive (μεταγενέστερος). Στα proactive CAC σχήματα, η εισερχόμενη κλήση γίνεται αποδεκτή ή απορρίπτεται με βάση τις προβλεπόμενες αποτιμήσεις των περιορισμών της QoS. Στα reactive σχήματα από την άλλη, η εισερχόμενη κλήση μπορεί να αρχίσει να μεταδίδεται και, τότε, ο reactive έλεγχος με βάση τις μετρήσεις QoS κατά τη διάρκεια της μετάδοσης θα αποφασίσει αν τελικά θα αποδεχτεί ή θα απορρίψει την κλήση.

Ο σχεδιασμός των CAC σχημάτων γίνεται είτε για την άνω είτε για την κάτω ζεύξη. Στην άνω ζεύξη, ο περιορισμός εκπεμπόμενης ισχύος είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο περιορισμό στην κάτω ζεύξη, διότι τα κινητά τερματικά τροφοδοτούνται με περιορισμένη σε χωρητικότητα μπαταρία. Από την άλλη πλευρά, ο CAC στην κάτω ζεύξη χρειάζεται

συνεχώς ανάδραση πληροφοριών από τα κινητά τερματικά προς τον σταθμό βάσης, που είναι σαφώς πιο περίπλοκο σε υλοποίηση, με σκοπό την αποτελεσματικότερη χρησιμοποίηση πόρων. Τέλος, σχεδιάζονται CAC και στις δυο ζεύξεις ταυτόχρονα, όπου για να γίνει αποδεκτή μια κλήση πρέπει να πληροί τις προϋποθέσεις και των δυο ζεύξεων. Η παραπάνω διαδικασία είναι αρκετά κρίσιμη εξαιτίας της ασυμμετρίας της κίνησης, καθώς η κλήση μπορεί να γίνει αποδεκτή στη μία ζεύξη αλλά να απορριφθεί στην άλλη. Η ασυμμετρία αυτή ανάμεσα στην άνω και την κάτω ζεύξη, που αποτελεί από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά σε multimedia εφαρμογές όπως η Web browsing, έχει ληφθεί υπόψη από τα CAC σχήματα ρυθμίζοντας το διατιθέμενο εύρος ζώνης σε κάθε ζεύξη με βάση τα χαρακτηριστικά κίνησης των ζεύξεων. Έχει μάλιστα αποδειχθεί ότι αυτή η ασύμμετρη διάθεση εύρους ζώνης αυξάνει την χρησιμοποίηση των πόρων (BW) και άλλων QoS παραμέτρων, όπως η blocking probability και η handoff failure probability. Το σχήμα αυτό έχει επεκταθεί και στα CDMA συστήματα, που αντιμετώπιζαν το ίδιο πρόβλημα ασυμμετρίας, και η επίδραση της διάθεσης εύρους ζώνης, ανάμεσα στην άνω και την κάτω ζεύξη, στις QoS παραμέτρους έχει αναλυθεί χρησιμοποιώντας SIR-based CAC σχήματα για υπηρεσίες φωνής και δεδομένων (ασύμμετρη). Έχει δειχθεί, επίσης, ότι η βέλτιστη ανάθεση πόρων ελαχιστοποιεί τις outage probability, blocking probability και handoff failure probability.

Design choice	Option	Advantages	Disadvantages	Comments
Centralization	Central	More efficient	Complex, unreliable	Unrealistic
	Distributed	Simple More reliable	Less efficient	Commonly used
Information scale	Global	Most efficient	Most complex	Needs information exchange for distributed realization
	Semi-local	Efficient Less complex	Moderate complexity	Needs less information exchange
	Local	Simplest	Least efficient	No need for information exchange
Service dimension	Single service/class	—	—	Suits 1G/2G networks
	Multiple service/class	—	—	Needed in 2.5G, 3G/4G networks
Optimization	Optimal	More efficient	Harder to find Based on simplified assumptions	More desirable (particularly the revenue-based schemes)
	Suboptimal	More realistic Scalable	Less efficient	Heuristic and intelligent techniques
Decision time	Proactive	Fast	More error-prone Needs prior information	Also called parameter-based
	Reactive	Less error-prone No need for prior information	Slow	Also called measurement-based
Information type	Cell occupancy	No need for mobility estimation	Needs a cell occupancy model	—
	Mobility	No need for a cell-occupancy model	Needs mobility estimation	—
Information granularity	Uniform cell-based	Simplicity	Coarse granularity	—
	Non-uniform cell-based	Suitable for non-uniform traffic	Medium information size	—
	User-based	Most accurate information	Large information size	—
Considered link	Uplink	—	—	Transmit power is very limited
	Downlink	—	—	Information feedback from MSs to BSs might be needed

Πίνακας 3.2. Επιλογές σχεδιασμού των CAC σχημάτων.

3.2.2.3.2 Έλεγχος ποιότητας σήματος

Ο $SINR$ (signal to interference and noise ratio) χρησιμοποιείται συνήθως ως μέτρο της ποιότητας του σήματος, καθώς αντιστοιχίζεται ευθέως με τον BER (bit error rate) που δίνουν συγκεκριμένη κωδικοποίηση και σχήμα διαμόρφωσης. Η outage probability ορίζεται συνήθως ως η πιθανότητα ώστε $SINR < SINR_{\min}$, όπου $SINR_{\min}$ ο ελάχιστος αποδεκτός $SINR$. Σε δίκτυα που περιορίζονται από παρεμβολές, ο θόρυβος συνήθως αμελείται και, συνεπώς, χρησιμοποιείται ο SIR (signal to interference ratio). Τα περισσότερα CAC σχήματα, που ελέγχουν την ποιότητα του σήματος, προσπαθούν να επιτύχουν τον ελάχιστο SIR ($SIR_{\min}$) ή αντίστοιχα τον ελάχιστο λόγο E_b/I_o. Σχήματα CAC που ελέγχουν την ποιότητα σήματος μπορούν να τεθούν σε εφαρμογή υπό διαφορετικές προσεγγίσεις, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα.

Approach	Brief Explanation	Comments
Interference & SIR-based CAC	The incoming call is admitted if the interference level (SIR) is less (greater) than a predefined threshold value.	Needs measurements
Loading	The admission is based on the number of users or resource utilization factor.	Simple to implement
Effective bandwidth	The maximum number of admissible users is determined using the effective bandwidth concept.	Efficient, but based on approximations.
Power allocation feasibility	The incoming call is admitted if a feasible power allocation is determined.	Based on PC model or measurements
Transmitted/received power	The total transmitted/received power is used as the admission criterion.	Total Tx/Rx power is an indicator of the interference level
Optimum CAC with signal quality constraint	An admission policy is determined by optimizing some objective function subject to signal quality constraint.	Usually solved by Markovian Decision Process

Πίνακας 3.3. Προσεγγίσεις CAC για έλεγχο ποιότητας σήματος.

Στη συνέχεια, μελετώνται τα CAC schemes που αναφέρονται στον προαναφερόμενο πίνακα και αναπτύχθηκαν κυρίως για CDMA δίκτυα.

3.2.2.3.2.1 Παρεμβολές και SIR-based CAC

Η πιο άμεση μέθοδος επίτευξης του ελάχιστου SIR προκύπτει από τον έλεγχο της SIR τιμής που μπορεί να επιτευχθεί από τη νέα κλήση, και αν η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από το προκαθορισμένο κατώφλι η κλήση γίνεται αποδεκτή. Ποικίλα SIR-based CAC σχήματα έχουν προταθεί, με πιο γνωστά τα παρακάτω, που χρησιμοποιούν την παράμετρο residual capacity ως κριτήριο αποδοχής. Σε ένα DS-CDMA κυψελωτό σύστημα το R_k σε μια κυψέλη ορίζεται ως ο επιπρόσθετος αριθμός αρχικών κλήσεων που ένας σταθμός βάσης μπορεί να δεχτεί, ώστε η πιθανότητα διακοπής λειτουργίας του συστήματος (outage probability) θα διατηρηθεί κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο, ενώ οι κλήσεις από διαπομπή δεν θα συμπεριληφθούν στον υπολογισμό του R_k [12], [16], [13].

$$R_k = \begin{cases} \left\lfloor \frac{1}{SIR_{TH}} - \frac{1}{SIR_k} \right\rfloor, \alpha\nu \left\lfloor \frac{1}{SIR_{TH}} - \frac{1}{SIR_k} \right\rfloor > 0 \\ 0, \alpha\lambda\lambda o\acute{\upsilon} \end{cases} \quad \textbf{(3.1)}$$

όπου SIR_k είναι ο SIR στην άνω ζεύξη στην κυψέλη k, SIR_{TH} είναι ο SIR threshold που αποτελεί σχεδιαστική παράμετρο με $SIR_{TH} > SIR_{\min}$, και $\lfloor x \rfloor$ είναι ο μεγαλύτερος ακέραιος μικρότερος από x. Η residual capacity υπολογίζεται περιοδικά, και μόλις ένας νέος χρήστης καταφθάνει στην κυψέλη k, ο σταθμός βάσης ελέγχει αν η R_k είναι μεγαλύτερη από το μηδέν προκειμένου να αποδεχτεί την νέα κλήση, αλλιώς εκείνη απορρίπτεται.

Ένας δεύτερος αλγόριθμος, που δεν είναι απόλυτα τοπικός όπως ο πρώτος, χρησιμοποιεί και τις μετρήσεις του SIR από τις άμεσα γειτονικές κυψέλες. Ο σταθμός βάσης σε κάθε κυψέλη k μετράει όπως και πριν περιοδικά το SIR_k της άνω ζεύξης, απαιτεί όμως και SIR από τις γειτονικές κυψέλες. Το R_k υπολογίζεται από τον τύπο

$$R_k = \begin{cases} \min\left\{R_k^{(j)} \mid j \in \kappa(k)\right\}, \alpha\nu \min\left\{R_k^{(j)} \mid j \in \kappa(k)\right\} \\ 0, \alpha\lambda\lambda\iota\acute{\omega}\varsigma \end{cases} \quad \textbf{(3.2)}$$

όπου

$$R_k^{(j)} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{1}{SIR_{TH}} - \frac{1}{SIR_k} \right\rfloor, \alpha\nu\, j = k \\ \left\lfloor \frac{1}{\beta}\left(\frac{1}{SIR_{TH}} - \frac{1}{SIR_J} \right) \right\rfloor, \alpha\nu\, j \in \kappa_{(k)}(k) \end{cases} \quad \textbf{(3.3)}$$

Για κάθε μια άφιξη στην κυψέλη k, ο σταθμός βάσης ελέγχει την τιμή του R_k : αν R_k >0 η κλήση γίνεται δεκτή και το R_k μειώνεται κατά 1, αλλιώς η κλήση απορρίπτεται. Το β αντιπροσωπεύει την εκτίμηση της κανονικοποιημένης παρεμβολής σε ένα σταθμό βάσης, η οποία προκαλείται από ένα κινητό τερματικό που εκπέμπει στο σταθμό βάσης σε μια γειτονική κυψέλη.

Αποτελέσματα έχουν δείξει ότι στην περίπτωση ομογενούς κίνησης ο πρώτος αλγόριθμος έχει καλύτερη επίδοση από τον πρώτο, ενώ στην hot spot κίνηση ο δεύτερος αλγόριθμος ξεπερνά τον πρώτο. Σε όρους blocking και handoff failure probabilities, και οι δυο αλγόριθμοι ξεπερνούν σε επίδοση το fixed-CAC.

Έχει επίσης προταθεί ένα ενοποιημένο SIR-based σχήμα διαχείρισης πόρων που συμπεριλαμβάνει τα CAC, handoff, power control και δυναμική ανάθεση πόρων (dynamic channel allocation –DCA). Το CAC σχήμα αυτό συγκρίνει τον SIR που επιτυγχάνεται από το νέο χρήστη με μία τιμή threshold SIR_{new}, και αποδέχεται τον χρήστη αν και μόνο αν ο επιτεύξιμος SIR είναι μεγαλύτερος από την τιμή αυτή. Για ασύρματα συστήματα multimedia εφαρμογών μικρής εμβέλειας, χρησιμοποιούνται διαφορετικές SIR threshold τιμές για κάθε κλάση υπηρεσίας, λαμβάνοντας υπόψη τον απαιτούμενο BER και τον BER εξαιτίας της απώλειας πακέτων και την υπερχείλιση των καταχωρητών στο σταθερό δίκτυο.

Η επίδραση των SIR-based σχημάτων στην blocking probability σε WCDMA συστήματα έχει επίσης αναλυθεί. Έχει αποδειχθεί ότι σε δομή δικτύου εξαγωνικών κυψελών, η blocking probability αυξάνεται από 1.5 τοις εκατό σε 3 τοις εκατό καθώς η απόσταση μεταξύ του κινητού τερματικού και του σταθμού βάσης αυξάνει από 0.1 σε 0.5 km, ενώ περαιτέρω αύξηση της απόστασης δεν οδηγεί σε καμιά μεταβολή της πιθανότητας. Παρόλα αυτά, σε πραγματικό περιβάλλον δικτύου έχει αποδειχθεί ότι η λεγόμενη πιθανότητα φθάνει μέχρι και ποσοστό 50% στα όρια της κυψέλης, ακόμη κι αν είναι λιγότερο από το 5% στο κέντρο της.

Σε υβριδικά T/CDMA (TDMA και CDMA) συστήματα που παρέχουν υπηρεσίες φωνής και δεδομένων, έχει προταθεί SIR-based CAC σχήμα που χρησιμοποιεί δυο διαφορετικές προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιεί multicode T/CDMA ανάθεση για τους χρήστες δεδομένων, ενώ η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί multislot T/CDMA. Στους χρήστες φωνής διατίθενται ένας κώδικας (code) και μια σχισμή (slot) και στις δυο περιπτώσεις. Κατά την πρώτη προσέγγιση, η κλήση γίνεται αποδεκτή αν υπάρχει τουλάχιστον μια χρονική σχισμή με R κώδικες, ισχύουσας προφανώς της SIR συνθήκης, με R το λόγο του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων προς εκείνον της φωνής. Από την άλλη, στην δεύτερη προσέγγιση η SIR συνθήκη πρέπει να ικανοποιείται σε όλες τις R χρονικές σχισμές, με έναν μόνο κώδικα ανά σχισμή. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να ανατεθεί ο ίδιος κώδικας και στις R χρονικές σχισμές. Έχει αποδειχθεί ότι το σχήμα multicode T/CDMA ξεπερνά το multislot T/CDMA σε όρους χωρητικότητας συστήματος και ρυθμού μετάδοσης.

Σε συστήματα multicode CDMA, έχει προταθεί σχήμα CAC που εξυπηρετεί τους χρήστες βασιζόμενο στον απαιτούμενο από αυτούς λόγο E_b/N_0. Οι χρήστες αρχικά εξυπηρετούνται ξεκινώντας από εκείνον με την χαμηλότερη απαίτηση σε E_b/N_0 και ούτω καθεξής. Το σχήμα CAC, στη συνέχεια, ελέγχει αν είναι δυνατόν να διατεθούν στον χρήστη οι λιγότεροι σε αριθμό δυνατοί κώδικες που αντιστοιχούν και στον χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης. Αν ικανοποιούνται παράλληλα και οι περιορισμοί E_b/N_0, τότε η κλήση γίνεται αποδεκτή. Αλλιώς, γίνεται προσπάθεια για ανάθεση πρόσθετων κωδίκων (έναν προς έναν) στον χρήστη μέχρι να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης χρήστη στον μέγιστο επιτρεπόμενο. Η διαδικασία αυτή γίνεται για όλους τους χρήστες.

Εκτός από την χρήση του SIR, ως κριτήριο αποδοχής κλήσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η outage probability ($\Pr\left(SIR < SIR_{\min}\right)$). Κάθε προσφερόμενη υπηρεσία χωρίζεται σε κλάσεις υπηρεσίας, όπου παρέχεται η ίδια υπηρεσία με διαφορετικά χαρακτηριστικά, συνήθως στην κίνηση /φορτίο, ή ακόμη δίδεται και μεγαλύτερη προτεραιότητα ανάλογα την χρέωση της υπηρεσίας. Η outage probability κάθε κλάσης υπηρεσίας, συνεπώς, υπολογίζεται με βάση των αριθμό των χρηστών σε κάθε κλάση και την ισχύ κάθε ενεργού χρήστη. Η νέα κλήση γίνεται αποδεκτή αν η outage probability σε κάθε κλάση είναι μικρότερη από την αντίστοιχη απαιτούμενη τιμή.

Στα interference-based CAC σχήματα γίνεται χρήση της παρεμβάλλουσας ισχύος ως κριτήριο αποδοχής κλήσης για την εγγύηση της ποιότητας σήματος. Στα CDMA συστήματα εφαρμόζονται κυρίως δυο αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων, που κυρίως διαφέρουν στην ποσότητα πληροφορίας που χρησιμοποιούν για τη λήψη της απόφασης αποδοχής ή απόρριψης της κλήσης. Ο πρώτος αλγόριθμος, που καλείται local adaptive strategy, χρησιμοποιεί τις παραμέτρους κίνησης και τα χαρακτηριστικά του καναλιού στην κυψέλη. Η δεύτερη τεχνική, που καλείται global adaptive strategy, επεκτείνει τις πληροφορίες λαμβάνοντας υπόψη και τις γειτονικές κυψέλες. Κάθε αλγόριθμος απαρτίζεται από τις φάσεις εκτίμησης και απόφασης. Κατά τη φάση εκτίμησης, η μέση τιμή και η μεταβλητότητα του επιπέδου παρεμβολών εκτιμώνται από το επίπεδο παρεμβολών των ενεργών κλήσεων, μετρούμενο συνήθως με τη βοήθεια ενός Kalman φίλτρου. Η μέση τιμή και η μεταβλητότητα της νέας κλήσης επίσης προβλέπονται. Η συνολική παρεμβολή λαμβάνεται ως το άθροισμα της εκτιμώμενης παρεμβολής των ενεργών κλήσεων, της προβλεπόμενης παρεμβολής λόγω νέας κλήσης, και του reservation threshold (threshold που προστίθεται για να ληφθούν υπόψη πιθανά σφάλματα των εκτιμήσεων). Έπειτα, κατά τη φάση απόφασης συγκρίνεται η συνολική παρεμβολή με ένα μέγιστο όριο παρεμβολής που μπορεί να γίνει δεκτό από το σύστημα, $I_{\max}$, προκειμένου να ληφθεί η απόφαση για την αποδοχή ή την απόρριψη της κλήσης.

Αποτελέσματα έχουν δείξει ότι το Kalman φίλτρο μειώνει αισθητά το σφάλμα εκτίμησης, και συνεπώς η καλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μικρότερου reservation threshold. Η local strategy δίνει κέρδος χωρητικότητας της τάξης του 10-27% συγκρινόμενη με το fixed-CAC (fixed traffic threshold based-CAC), ενώ η global strategy δίνει αντίστοιχο κέρδος της τάξης του 17-33%.

Σε διάφορα σχήματα, χρησιμοποιούνται διαφορετικές threshold τιμές για την ποσότητα της παρεμβολής, αναλόγως αν οι χρήστες βρίσκονται στα όρια της κυψέλης ή στο εσωτερικό αυτής. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, αυξάνεται η blocking probability των χρηστών που φαίνεται να εισάγουν μεγαλύτερη ποσότητα παρεμβολής, πράγμα που, προφανώς, παραβιάζει τις συνθήκες fairness μεταξύ των χρηστών και περιορίζει το κέρδος χωρητικότητας [13], [14].

3.2.3.2.2 Loading-based CAC

Η διατήρηση της ποιότητας σήματος σε όρους SIR μπορεί να πραγματοποιηθεί ελέγχοντας το φορτίο του δικτύου ή της κυψέλης, καθώς όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των χρηστών τόσο μικρότερος ο SIR. Τα loading-based CAC schemes, που έχουν προταθεί, ελέγχουν τον αριθμό των χρηστών χρησιμοποιώντας δυο κατώφλια M_v και M_d για τους χρήστες φωνής και δεδομένων, αντίστοιχα. Οι M_v και M_d είναι σχεδιαστικές παράμετροι, των οποίων οι τιμές καθορίζουν την προτεραιότητα της μίας υπηρεσίας έναντι της άλλης. Κριτήριο αποδοχής κλήσης μπορεί να αποτελέσει το ενεργό φορτίο (effective load) που εκφράζεται ως άθροισμα με βάρη του αριθμού των χρηστών σε μια κυψέλη.

Ενδιαφέρουσα είναι η σύγκριση των σχημάτων loading-based CAC και interference based-CAC. Η επίδοση αυτών μετράται κυρίως σε όρους blocking probability και loss probability της ποιότητα επικοινωνίας, και έχει δειχθεί ότι είναι σχεδόν ίδια και για τα δυο σχήματα. Παρόλα αυτά, τα interference based-CAC σχήματα έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι λιγότερο ευάλωτα στις παραμέτρους του μοντέλου διάδοσης, της κατανομής της κίνησης, ή στον ρυθμό μετάδοσης, καθώς τα loading-based CAC προτιμώνται λόγω της απλότητάς τους και της ευκολίας εφαρμογής, δίχως να είναι αναγκαίες οι μετρήσεις του επιπέδου παρεμβολών.

3.2.3.3 Έλεγχος handoff failure probability

Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζουν τα CAC σχήματα που ελέγχουν την handoff failure probability. Έπειτα από πραγματοποίηση μετρήσεων, δίδεται προτεραιότητα στις κλήσεις από διαπομπή έναντι των νέων κλήσεων, καθώς είναι κοινώς αποδεκτό ότι η απώλεια μιας ενεργής κλήσης είναι πιο ενοχλητική (στο επίπεδο χρήστη) από την απόρριψη μιας νέας κλήσης. Στον παρακάτω πίνακα αναφέρονται συνοπτικά ποικίλες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται στα ασύρματα δίκτυα προς έλεγχο της handoff failure probability.

Approach	Brief explanation	Comments
Guard band	A certain amount of resources are reserved exclusively for handoff admission.	Leads to a high blocking probability
Loading in home cell and neighbor cells	New call is admitted if loading is less than a threshold value in home cell and neighbor cells.	Information exchange is needed
Resource availability in home cell and neighbor cells	New call is admitted if the needed resources are available in home cell and neighbor cells.	Information exchange is needed
Estimating handoff failure probability	Handoff failure/overloading probability is estimated and used as the admission criterion.	Based on some assumptions or approximations
Optimum CAC with handoff failure probability constraint	An admission policy is determined by optimizing some objective function subject to P_{hf} constraint.	Usually solved by Markovian Decision Process
Lower interference threshold for new calls	New calls and handoff calls are admitted based on the interference level. However, new calls must have lower interference level.	Used to control signal quality and P_{hf} in CDMA networks

Πίνακας 3.4. Προσεγγίσεις CAC για έλεγχο της handoff failure probability.

3.2.4 Προκύπτουσες τάσεις και μελλοντικά θέματα έρευνας

Τις τελευταίες δυο δεκαετίες, η ταχεία διάδοση του Internet και των IP τεχνολογιών συνέβαλε στην περαιτέρω ανάπτυξη των ασύρματων και κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Παρόλο που οι τομείς του Internet και των ασύρματων δικτύων ήταν σαφώς διαχωρισμένοι, ακολουθεί η υιοθέτηση του IP στα τρίτης γενιάς συστήματα και έπειτα, που αποτελεί σταθμό για την ενοποίησή τους. Λόγω της εκ φύσεως αναξιοπιστίας του IP πρωτοκόλλου, η παροχή ποιότητας υπηρεσίας (και ειδικά στα ασύρματα δίκτυα) απαιτεί επιπρόσθετα σχήματα ελέγχου της κίνησης δικτύου (κατηγοριοποίηση και παροχή προτεραιότητας) και διαχείριση των πόρων του δικτύου (ανάθεση και εξασφάλιση).

Προκειμένου να εγγυηθεί το δίκτυο end-to-end QoS, πρέπει να εκτελεσθεί έλεγχος σε όλα τα επίπεδα του δικτύου. Τα inter-domain, macro-level και micro-level αποτελούν τα επίπεδα του δικτύου. Στο πρώτο επίπεδο, χρησιμοποιούνται συγκεκριμένοι μηχανισμοί για την εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας καθώς το τερματικό κινείται από τον έναν τομέα στον άλλο, στο macro-level εγγυάται η QoS καθώς το κινητό τερματικό κινείται από το ένα υποδίκτυο στο άλλο, και, τέλος, στο micro-level εγγυάται η QoS καθώς το κινητό τερματικό κινείται από κυψέλη σε κυψέλη εντός του ίδιου υποδικτύου.

Τα multihop/ad hoc ασύρματα δίκτυα έχουν θεμελιώδεις διαφορές με τα κλασικά ασύρματα δίκτυα, και για το λόγο αυτό έπρεπε να αναπτυχθούν καινοτόμα CAC σχήματα

που να λαμβάνουν υπόψη τα νέα χαρακτηριστικά των δικτύων, προκειμένου να παράσχουν και την αποδεκτή QoS στους χρήστες τους. Τα CAC σχήματα, συνεπώς, οφείλουν να λάβουν υπόψη την έλλειψη δομής των ad hoc δικτύων, τη συνδεσιμότητα του δικτύου, τα νέα μοντέλα παρεμβολών, τη δρομολόγηση της κίνησης, την κατανεμημένη εφαρμογή του CAC, και τους περιορισμούς σε εκπεμπόμενη ισχύ.

Διάφορα σχήματα ελέγχου αποδοχής κλήσης έχουν προταθεί, όπως CAC βασισμένο στη διαθεσιμότητα του Bandwidth, threshold-based CAC που ελέγχει για παράδειγμα αν ο αριθμός κλήσεων ξεπερνά ένα προκαθορισμένο κατώφλι, σχήματα που προσαρμόζουν την προτεραιότητα των κλήσεων ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των πόρων (κυρίως για εκρηκτική κίνηση), καθολικά σχήματα που εκτιμούν την συνολική χρησιμοποίηση της ζεύξης, ή CAC βασισμένα σε μετρήσεις πραγματικού χρόνου έπειτα από την αποστολή δοκιμαστικών πακέτων κατά την άφιξη της νέας κλήσης.

Η απήχηση των ασύρματων multihop/ad hoc δικτύων ολοένα αυξάνεται. Για το λόγο αυτό, επικρατεί η άποψη ότι τα CAC σχήματα θα λάβουν περισσότερη προσοχή στο πλαίσιο των multihop/ad hoc δικτύων, καθώς η παροχή QoS στην ερευνητική αυτή περιοχή αποτελεί πρόκληση λόγω της κατανεμημένης (αποκεντρικοποιημένης) δομής των δικτύων, των περιορισμών σε ισχύ και της απουσίας δόμησης.

Προβλέπεται ότι στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα θα συνυπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης. Εφεξής, εκτός των 3G ασύρματων δικτύων θα περιλαμβάνονται τα 3G wideband CDMA (WCDMA) κυψελωτά συστήματα, wireless local area networks (WLAN) όπως η οικογένεια των IEEE 802.11 και HIPERLAN, digital video broadcasting (DVB), και broadband wireless access metropolitan network (MAN) όπως το IEEE 802.16. Κατά συνέπεια, η διαχείριση ασύρματων πόρων (RRM), γενικά, και ο έλεγχος αποδοχής κλήσης (CAC), ειδικότερα, πρέπει να ερευνηθούν εκ νέου, ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες του πολύπλοκου πλέον ασύρματου περιβάλλοντος.

Βέλτιστα CAC σχήματα έχουν ερευνηθεί διεξοδικά, ξεχωριστά όμως από άλλες τεχνικές διαχείρισης ασύρματων πόρων όπως ο έλεγχος ισχύος, και, προφανώς, δεν είναι δυνατή η εγγύηση προς το δίκτυο καθολικής ποιότητας υπηρεσιών. Κατά συνέπεια, στα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα προβλέπεται η υιοθέτηση ενοποιημένων τεχνικών διαχείρισης ασύρματων πόρων (συμπεριλαμβανομένου του CAC), που η επίδοσή τους αδιαμφισβήτητα ξεπερνά την επίδοση των αντίστοιχων μεμονωμένων RRM σχημάτων [14], [16], [12], [13].

3.3 Ανάλυση της Επίδοσης του Συστήματος

3.3.1 Γενικά

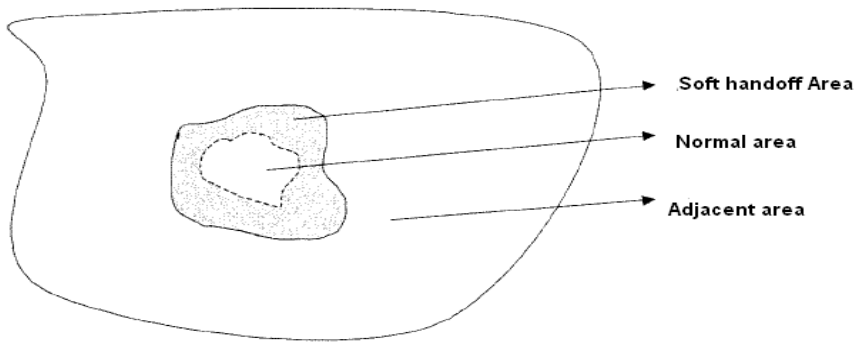
Στο παρόν κυψελωτό δίκτυο υιοθετούνται τεχνικές απλωμένου φάσματος ευθείας ακολουθίας (direct-sequence spread spectrum techniques). Ο σταθμός βάσης είναι εξοπλισμένος με ομοιοκατευθυντική κεραία, που εκπέμπει σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων για την άνω και την κάτω ζεύξη, για να αποφεύγεται η παρεμβολή του προς τα

άνω σήματος στο προς τα κάτω σήμα. Μοντελοποιείται και αναλύεται μόνο η άνω ζεύξη, καθώς είναι κοινώς αποδεκτό ότι η άνω ζεύξη σε ένα σταθμό βάσης υποφέρει περισσότερο από παρεμβολές συγκριτικά με την κάτω. Ο ρυθμός άφιξης νέων κλήσεων θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένος στην περιοχή της κυψέλης. Η κινητικότητα των χρηστών δεν μοντελοποιείται, ωστόσο θεωρείται εκθετικής κατανομής διάρκεια κατάληψης του διαύλου. Θεωρείται, ακόμη, μηχανισμός ανίχνευσης δραστηριότητας φωνής, ώστε σε κάθε χρήστη να παρέχεται μια ON πιθανότητα γ και μια OFF πιθανότητα 1- γ. Επιπλέον, το σύστημα ανιχνεύει όλες τις κλήσεις προερχόμενες από διαπομπή και εκχωρεί ψευδοτυχαία ακολουθία αμέσως αν η κλήση γίνει αποδεκτή. Η διαδικασία του soft handoff που υιοθετείται έχει ομοιότητες με το US IS-95 standard.

Ο δίαυλος επικοινωνίας ενός χρήστη με τον σταθμό βάσης της οικείας του κυψέλης, και δη ένας ασύρματος δίαυλος με έντονη την έννοια της τυχαιότητας, είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθεί με αναλυτικές μαθηματικές εκφράσεις, και για το λόγο αυτό εισάγεται η έννοια της Gaussian κατανομής. Γενικά, τυχαίες διαδικασίες που συμβαίνουν από φυσικά φαινόμενα συχνά προσεγγίζονται από το Gaussian μοντέλο, εφόσον έχει αποδειχθεί πειραματικά η καταλληλότητα και η ακρίβεια που αυτό προσφέρει στην περιγραφή φυσικών φαινομένων, όπως έχει αναλυθεί εκτενώς και σε προηγούμενη παράγραφο [10].

3.3.2 Τοπολογία Κυψελών Δικτύου

Στην παρούσα ανάλυση θεωρούνται σχεδόν κυκλικές κυψέλες, και καθεμία από τις οποίες χωρίζεται σε τρεις ομόκεντρες περιοχές, την κανονική (normal region) A_o, την περιοχή ήπιων διαπομπών (soft handoff region) A_h και την παρακείμενη περιοχή (adjacent region) A_a, που αποτελεί περιοχή έκτος της κυψέλης ενδιαφέροντος. Όπως φαίνεται και στο ακολούθως παρατιθέμενο σχήμα, οι περίμετροι της κανονικής και ηπίων διαπομπών περιοχής αναφέρονται ως L_o και L_h, αντίστοιχα. Ακόμη, επισημαίνεται ότι οι κλήσεις που λαμβάνουν χώρα στην κανονική περιοχή θεωρείται ότι συνδέονται αυστηρά και μόνο με το σταθμό βάσης ενδιαφέροντος (hard connection), καθώς οι κλήσεις στην handoff περιοχή συνδέονται και με έναν γειτονικό σταθμό βάσης (soft connection), ένεκα της διαδικασίας διαπομπής. Το κινητό τερματικό εντός της soft handoff περιοχής θεωρείται ότι εκπέμπει και λαμβάνει το ίδιο ακριβώς σήμα από τους σταθμούς βάσης που είναι συνδεδεμένο, ενώ οι σταθμοί βάσης είναι το πολύ δύο.



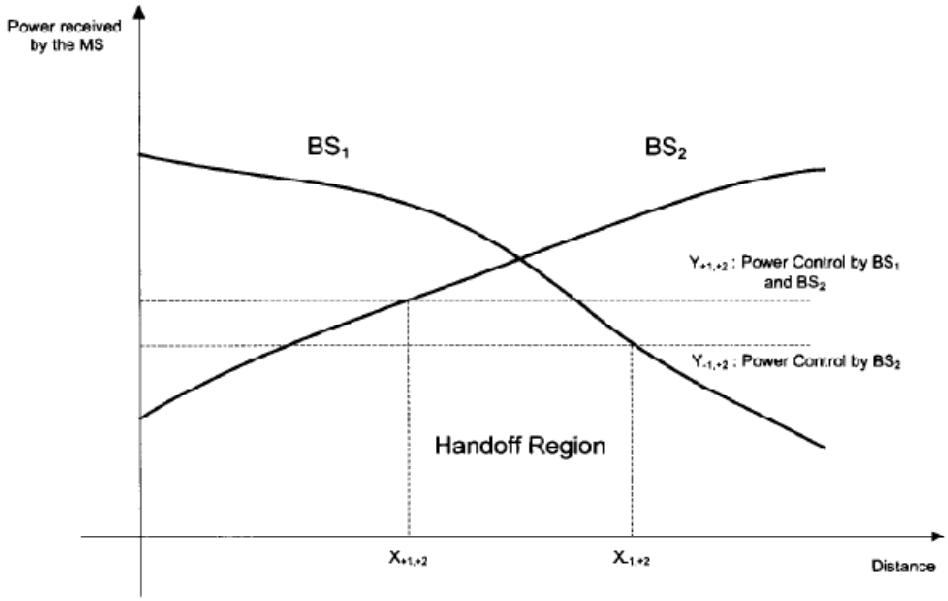
Σχήμα 3.2. Τοπολογία κυψέλης

Θεωρείται ότι κλήσεις προερχόμενες από διαπομπή από γειτονικές κυψέλες αφικνούνται μόνον στην handoff region. Η άφιξη νέων κλήσεων στην κυψέλη μοντελοποιείται ως Poisson διαδικασία με ρυθμό άφιξης κλήσεων $\lambda_{\mathrm{N},i}$, όπου ο δείκτης i υποδηλώνει την προσφερόμενη υπηρεσία s_i, καθώς για i=1 και i=2 θεωρείται υπηρεσία φωνής και multimedia traffic load, αντίστοιχα. Είναι ευρέως αποδεκτό ο ρυθμός άφιξης κλήσεων σε υπηρεσίες φωνής να μοντελοποιείται με Poisson κατανομή, σε αντίθεση με τις υπηρεσίες multimedia εφαρμογών όπου η κατανομή αυτή χρησιμοποιείται σπάνια. Παρόλα αυτά και για λόγους απλότητας, θεωρείται ότι και οι δύο υπηρεσίες ακολουθούν κατανομή Poisson και ο ρυθμός γέννησης κλήσεων είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος σε ολόκληρη την περιοχή εξυπηρέτησης. Οι ρυθμοί άφιξης νέων κλήσεων στην normal και την handoff region εκφράζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \lambda_{\mathrm{N},i}^{o} &= (1-\alpha)\lambda_{\mathrm{N},i} \\ \lambda_{\mathrm{N},i}^{h} &= \alpha\lambda_{\mathrm{N},i} \end{aligned} \quad \textbf{(3.4)}$$

όπου α είναι ο λόγος της περιοχής της handoff region προς ολόκληρη την περιοχή της κυψέλης. Ο ρυθμός άφιξης των soft handoff κλήσεων, που λαμβάνουν χώρα μόνο στην handoff region, ακολουθεί Poisson κατανομή και αναφέρεται ως $\lambda_{\mathrm{H},i}^{h}$.

3.3.3 Διαδικασία διαπομπής



Σχήμα 3.3. Διαδικασία διαπομπής

Αρχικά, το κινητό τερματικό ελέγχεται από το σταθμό βάσης της οικείας του κυψέλης και όσο απομακρύνεται προς την κυψέλη ενδιαφέροντος, η στάθμη λήψης ισχύος από αυτή αυξάνει, καθώς η αντίστοιχη στάθμη ισχύος από τη γειτονική πλέον κυψέλη μειώνεται. Το κινητό τερματικό κάνει αίτηση για σύνδεση με τον σταθμό βάσης ενδιαφέροντος, μόλις η λαμβανόμενη ισχύς ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο κατώφλι (threshold) και, αν η αίτηση αυτή γίνει αποδεκτή, το τερματικό αρχίζει να λειτουργεί υπό soft handoff mode, όπου εκπέμπει και λαμβάνει το ίδιο σήμα από τη γειτονική και την οικεία κυψέλη υπό μία μορφή διαφορικής λήψης. Μόλις η λαμβανόμενη ισχύς από την παλιά (γειτονική) κυψέλη μειωθεί κάτω από συγκεκριμένη στάθμη, η επικοινωνία με τον γειτονικό σταθμό βάσης διακόπτεται και το κινητό εκπέμπει και λαμβάνει πια με αποκλειστικό σταθμό βάσης το νέο. Θεωρείται, τέλος, ότι στην περίπτωση όπου η αίτηση γίνεται αποδεκτή οποιαδήποτε soft handoff μπορεί να ανιχνευθεί, καθώς επίσης αποδίδεται στην κλήση κατάλληλο κανάλι και CDMA κώδικας [4], [12], [13].

3.3.4 Μοντέλο κίνησης (Traffic model , random movement)

Στην παρούσα ανάλυση, θεωρείται μοντέλο τυχαίας κίνησης των χρηστών, που κινούνται με τυχαία ταχύτητα v_i ομοιόμορφα κατανεμημένη εντός του διαστήματος [0,V], ενώ οι call holding times στις normal και soft handoff region είναι $1/\mu_{o,i}$ και $1/\mu_{h,i}$, αντίστοιχα. Ο μέσος ρυθμός των εισερχόμενων χρηστών στην κυψέλη του ενδιαφέροντος

ισούται με τον αντίστοιχο μέσο ρυθμό των εξερχόμενων χρηστών. Παρόλο που η handoff κίνηση εξαρτάται γενικά από την κινητικότητα του χρήστη, το μέγεθος της κυψέλης και τα στατιστικά του δικτύου, έχει αποδειχθεί ότι η Poisson κατανομή αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση. Έτσι, οι διαπομπές καταφθάνουν με τον ακόλουθο ρυθμό

$$\lambda_{H,i}^{h} = E[n_{h,i}] \cdot \mu_{h,i} \quad \textbf{(3.5)}$$

όπου $E[n_{h,i}]$ αποτελεί τον μέσο αριθμό χρηστών στην handoff περιοχή. Η holding time της κλήσης είναι εκθετικά κατανεμημένη με μέση τιμή $1/\mu_{\mathrm{M},i}$. Ο regional transition rate σε μια κυψέλη προσεγγίζεται ως ο λόγος του μέσου αριθμού χρηστών ανά δευτερόλεπτο που εξέρχονται από την κυψέλη προς τον μέσο αριθμό χρηστών που λειτουργούν εντός της κυψέλης. Συνεπώς. Οι regional transition rates στις normal και handoff περιοχές είναι

$$\begin{aligned} \mu_{o,i} &= \frac{E[v_i] \cdot L_o}{\pi \mathrm{A}_o} \\ \mu_{h,i} &= \frac{E[v_i] \cdot \left(L_o + L_h\right)}{\pi \mathrm{A}_h} \end{aligned} \quad \textbf{(3.6)}$$

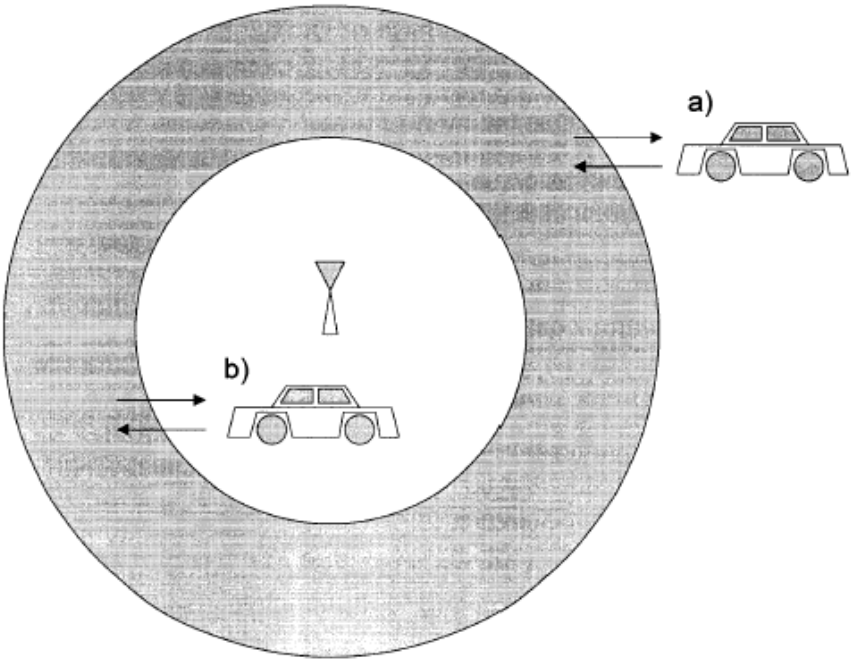
Ορίζονται, ακόμη, οι ρυθμοί μετάδοσης για τερματικά κινούμενα μεταξύ των περιοχών, με $\mu_{ha,i}$ για τερματικό κινούμενο από την handoff περιοχή προς γειτονική κυψέλη, και $\mu_{ho,i}$ για τερματικό κινούμενο από την handoff στην normal περιοχή. Επίσης, b_k είναι η μέση πιθανότητα ένας χρήστης να κινηθεί από την handoff στην normal περιοχή και προκύπτουν τα ακόλουθα

$$\begin{aligned} \mu_{ha,i} &= \left(1 - b_k\right) \mu_{h,i} \\ \mu_{ho,i} &= b_k \mu_{h,i} \end{aligned} \quad \textbf{(3.7)}$$

Οι συνολικοί ρυθμοί άφιξης κλήσεων στις δυο περιοχές είναι

$$\begin{aligned} \lambda_i^o &= \lambda_{N,i}^o \\ \lambda_i^h &= \lambda_{N,i}^h + \lambda_{H,i}^h \end{aligned} \quad \textbf{(3.8)}$$

Στο ακόλουθο σχήμα αναπαρίστανται α) οι αφίξεις κλήσεων από διαπομπή από γειτονικές κυψέλες στην handoff region, και β) η regional transition που αποτελεί την περίπτωση όπου το κινητό τερματικό διασχίζει το σύνορο των δυο περιοχών.



Σχήμα 3.4. Αφίξεις κλήσεων από διαπομπή α) από γειτονικές κυψέλες στην handoff region, και β) η regional transition που αποτελεί την περίπτωση όπου το κινητό τερματικό διασχίζει το σύνορο των δυο περιοχών.

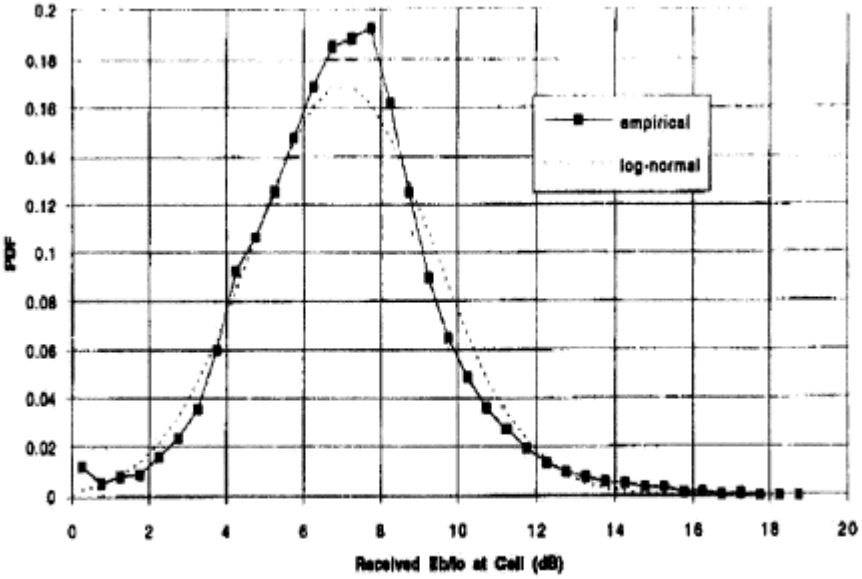
3.3.5 Ανάλυση Παρεμβολών

Στην άνω ζεύξη, η ανάλυση της οποίας και ενδιαφέρει, η λαμβανόμενη κάθε φορά ισχύς λήψης, από κάθε μεμονωμένο κινητό τερματικό που εκπέμπει στην κυψέλη ενδιαφέροντος ή όχι, καταφθάνει στο σταθμό βάσης με διαφορετική κάθε φορά απώλεια διαδρομής λόγω της διακύμανσης του περιβάλλοντος επικοινωνίας, όπως έχει ήδη αναφερθεί αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ακολουθούν αναλυτικά τα μοντέλα διάδοσης και παρεμβολών που θεωρούνται στην παρούσα μελέτη [13], [1], [5].

3.3.5.1 Μοντέλο Διάδοσης

Απαιτείται η εισαγωγή της έννοιας έλεγχος ισχύος, διότι όταν η λαμβανόμενη ισχύς από κάποιο τερματικό είναι αρκετά ισχυρή, εισάγει σημαντική παρεμβολή στους υπόλοιπους χρήστες της αυτής κυψέλης υποβαθμίζοντάς την επίδοσή τους. Παρομοίως, όταν η λαμβανόμενη ισχύς σήματος στο σταθμό βάσης είναι ασθενέστερη συγκρινόμενη με εκείνη των υπόλοιπων σημάτων, γίνεται εκείνο το σήμα εν προκειμένη περιπτώσει θύμα παρεμβολών. Συνεπώς, μεγιστοποιείται η χωρητικότητα ενός CDMA συστήματος όταν τα λαμβανόμενα σήματα από κάθε τερματικό είναι ίσης ισχύος(ιδανικός έλεγχος ισχύος), καθώς περιορίζεται το near-far effect. Παρόλα αυτά, ο έλεγχος ισχύος δεν είναι ιδανικός και, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, η ισχύς που λαμβάνεται είναι κατά προσέγγιση

λογαριθμοκανονικά κατανεμημένη. Η τυπική απόκλιση του λαμβανόμενου SIR βρίσκεται ενδιάμεσα των τιμών 1 και 2 dB.



Σχήμα 3.5. Σύγκριση λογαριθμοκανονικής κατανομής με εμπειρικές μετρήσεις της λαμβανόμενης ισχύος σε σταθμό βάσης.

Λόγω της παραδοχής ιδανικού ελέγχου ισχύος στο σταθμό βάσης, αν όλοι οι χρήστες εντός μιας κυψέλης ελέγχονται από τον ίδιο σταθμό βάσης, τότε όλοι λαμβάνουν στους δέκτες τους την ίδια ισχύ S. Η απόσταση κινητού τερματικού από τον σταθμό βάσης ενδιαφέροντος αναφέρεται ως r_d και υπόκειται σε λογαριθμοκανονική σκίαση ζ_d, ενώ για κινητό τερματικό εκτός κυψέλης οι αντίστοιχες παράμετροι είναι r_m και ζ_m.

Συνεπώς, η εκπεμπόμενη ισχύς από κινητό τερματικό, συμπεριλαμβανομένης της σκίασης και των απωλειών διαδρομής, είναι

$$S_T(r_m) = \frac{S r_m^{\ a}}{10^{\zeta_m/10}} \quad \textbf{(3.9)}$$

όπου a ο εκθέτης απωλειών διαδρομής, r_m η απόσταση του τερματικού από το σταθμό βάσης και ζ_m η τυχαία μεταβλητή σκίασης.

Κατά τον ίδιο τρόπο, η λαμβανόμενη ισχύς από το σταθμό βάσης προκύπτει

$$S_R(r_m) = \frac{S r_m^{\ a}}{10^{\zeta_m/10}} \cdot \frac{10^{\zeta_m/10}}{r_m^{\ a}} = S \quad \textbf{(3.10)}$$

Η παρεμβάλλουσα ισχύς από κινητό τερματικό σε γειτονική κυψέλη, σε απόσταση r_d από τον οικείο του σταθμό βάσης, εξαρτάται τόσο από τις απώλειες διάδοσης που προκαλεί το κινητό τερματικό σε εντός κυψέλης όσο και από τις απώλειες διάδοσης που προκαλεί το παρεμβάλλον κινητό τερματικό. Άρα, η παρεμβάλλουσα ισχύς είναι

$$\frac{I\left(r_d, r_m\right)}{S} = \left(\frac{r_m}{r_d}\right)^a 10^{\frac{\zeta_d - \zeta_m}{10}} \quad \textbf{(3.11)}$$

όπου οι ζ_d και ζ_m είναι τυχαίες μεταβλητές κανονικής κατανομής (Gauss) με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση σ .

3.3.5.2 Μοντέλο Παρεμβολών

Ενδοκυψελική παρεμβολή ορίζεται η λαμβανόμενη ποσότητα παρεμβολής στο σταθμό βάσης ενδιαφέροντος από χρήστες που βρίσκονται εντός της αυτής κυψέλης και εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης, ενώ διακυψελική ορίζεται η παρεμβολή προερχόμενη από χρήστες εκτός κυψέλης μη συνδεδεμένους με το σταθμό βάσης ενδιαφέροντος. Το δίκτυο της παρούσας ανάλυσης υποστηρίζει χρήστες υπηρεσίας φωνής, καθώς και χρήστες multimedia εφαρμογών. Σε ένα DS/CDMA multi-service δίκτυο, αποκλεισμός σε αίτηση νέας κλήσης συμβαίνει όταν η συνολική παρεμβολή που προέρχεται από χρήστες των δύο υπηρεσιών και το θερμικό θόρυβο υπερβαίνει το κατώφλι $\mathrm{WI_e}$, δηλαδή όταν

$$\text{Video Interference} + \text{Voice Interference} + \mathrm{WN_e} > \mathrm{WI_e}$$

όπου W, $\mathrm{N_e}$ και $\mathrm{I_e}$ είναι το spread spectrum bandwidth, η πυκνότητα θερμικού θορύβου και η πυκνότητα μέγιστης αποδεκτής παρεμβολής από το σύστημα, αντίστοιχα. Θεωρείται, επίσης, ότι τα κινητά τερματικά στην normal region έχουν hard connection με το σταθμό βάσης ενδιαφέροντος, ενώ τα τερματικά στην handoff region είναι soft συνδεδεμένα.

Ορίζονται τα παρακάτω:

I_o : παρεμβολή που εισάγεται από κινητό τερματικό στην normal region της κυψέλης ενδιαφέροντος

I_h^+ : ενδοκυψελική παρεμβολή από τερματικό με soft connection με το σταθμό βάσης

I_h^- : διακυψελική παρεμβολή από τερματικό με soft connection με το σταθμό βάσης

I_{ao}: παρεμβολή που εισάγεται από κινητό τερματικό στη normal region διαφορετικής κυψέλης

I_{ah}: παρεμβολή που εισάγεται από κινητό τερματικό υπό συνθήκη διαφορικής λήψης (από δυο σταθμούς βάσης εξαιρουμένου του σταθμού ενδιαφέροντος) στην handoff region διαφορετικής κυψέλης από την εξεταζόμενη

Η συνολική παρεμβολή μπορεί να εκφραστεί ως

$$Z_{n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}} = I_o + I_h^+ + I_h^- + I_{ao} + I_{ah} \quad \textbf{(3.12)}$$

όπου $n_{o,i}$ ο αριθμός χρηστών στη normal region, $n_{h,i}$ ο αριθμός χρηστών στην handoff region και i η προσφερόμενη υπηρεσία.

Θα πρέπει να ισχύει

$$Z_{n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}} \le G\left(1-\eta\right) \quad \textbf{(3.13)}$$

όπου $G = W/R$ είναι το processing gain και $\eta = N_e/I_e$ τυπικά έχει την τιμή 0,1.

Η παρεμβολή είναι κανονικής Gauss κατανομής με την ακόλουθη μέση τιμή και μεταβλητότητα

$$\overline{Z}_{n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}} = \left(n_{o,1}+n_{o,2}\right)C_{m,o} + \left(n_{h,1}+n_{h,2}\right)\left(C_{m,h}^+ + C_{m,h}^-\right) + E\left[n_o\right]C_{m,ao} + E\left[n_h\right]C_{m,ah} \quad \textbf{(3.14)}$$

$$\sigma^2_{n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}} = \left(n_{o,1}+n_{o,2}\right)C_{v,o} + \left(n_{h,1}+n_{h,2}\right)\left(C_{v,h}^+ + C_{v,h}^-\right) + E\left[n_o\right]C_{v,ao} + E\left[n_h\right]C_{v,ah} \quad \textbf{(3.15)}$$

όπου $E\left[n_o\right]$ και $E\left[n_h\right]$ αντιπροσωπεύουν τον μέσο αριθμό χρηστών στη normal και την handoff region. Επίσης ορίζονται υπό τη μορφή της μέσης παρεμβολής ανά χρήστη οι παρακάτω ποσότητες

$C_{m,o}$:παρεμβολή που εισάγεται από κινητό τερματικό στην normal region της κυψέλης ενδιαφέροντος

$C_{m,h}^+$: ενδοκυψελική παρεμβολή από τερματικό με soft connection με το σταθμό βάσης

$C_{m,h}^-$: διακυψελική παρεμβολή από τερματικό με soft connection με το σταθμό βάσης

$C_{m,ao}$:παρεμβολή που εισάγεται από κινητό τερματικό στη normal region διαφορετικής κυψέλης

$C_{m,ah}$: παρεμβολή που εισάγεται από κινητό τερματικό υπό συνθήκη διαφορικής λήψης (από δυο σταθμούς βάσης εξαιρουμένου του σταθμού ενδιαφέροντος) στην handoff region διαφορετικής κυψέλης από την εξεταζόμενη

Κατά τον ίδιο τρόπο ορίζονται και οι ποσότητες παρεμβολής ανά χρήστη υπό τη μορφή δεύτερης τάξης ροπών $C_{v,\sim}$.

Η πιθανότητα αποδοχής ενός χρήστη προκύπτει

$$E\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)=\frac{1}{2}+\frac{1}{2}erf\left(\frac{G\left(1-\eta\right)-\overline{Z}_{n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}}}{\sqrt{2}\sigma_{n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}}}\right) \quad \textbf{(3.16)}$$

Τέλος, θεωρείται ομοιόμορφη πυκνότητα χρηστών *ρ* στην εξεταζόμενη κυψέλη.

$$\rho=\frac{E\left[n_o\right]}{A_o}=\frac{E\left[n_h\right]}{A_h} \quad \textbf{(3.17)}$$

Εν συνεχεία, αναλύονται χωριστά οι διαφορετικής μορφής παρεμβολές, και η επίδραση που εκείνες έχουν στο παρόν ασύρματο δίκτυο, με τη βοήθεια αναλυτικών εξισώσεων.

α) <u>*Ενδοκυψελική παρεμβολή*</u> I_o

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενδοκυψελική παρεμβολή εισάγεται από κινητό τερματικό που εκπέμπει εντός της κανονικής περιοχής και είναι hard connected με το σταθμό βάσης της αυτής κυψέλης. Από το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, η I_o μπορεί να προσεγγιστεί από την κατανομή Gauss. Η μέση τιμή και η μεταβλητότητα της ενδοκυψελικής παρεμβολής είναι

$$\begin{aligned} E\left[I_o\right]&=n_{o,i}C_{m,o}\\ Var\left[I_o\right]&=n_{o,i}C_{v,o}\end{aligned} \quad \textbf{(3.18)}$$

όπου

$$\begin{aligned} C_{m,o}&=\gamma e^{(\beta\sigma_o)^2/2}e^{\beta m_o}\\ C_{v,o}&=\gamma e^{2(\beta\sigma_o)^2}e^{2\beta m_o}-\gamma^2 e^{(\beta\sigma_o)^2}e^{2\beta m_o}\end{aligned} \quad \textbf{(3.19)}$$

με γ τον channel activity factor. Η ανίχνευση δραστηριότητας καναλιού αναφέρεται στο γεγονός ότι κάθε κινητό τερματικό έχει μια ON πιθανότητα γ και μια OFF πιθανότητα 1- γ .

β) <u>*Ενδοκυψελική παρεμβολή*</u> I_h^+

Παρεμβολή αυτού του τύπου προκαλείται από τερματικό που εξυπηρετείται από το σταθμό βάσης ενδιαφέροντος, αλλά είναι soft connected με αυτόν. Από το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα, η I_h^+ μπορεί να προσεγγιστεί από την κατανομή Gauss. Η μέση τιμή και η μεταβλητότητα της ενδοκυψελικής παρεμβολής αυτής είναι

$$\begin{aligned} E\left[I_h^+\right]&=n_{h,i}C_{m,h}^+\\ Var\left[I_h^+\right]&=n_{h,i}C_{v,h}^+\end{aligned} \quad \textbf{(3.20)}$$

όπου

$$C_{m,h}^{+} = \gamma e^{(\beta\sigma_h)^2/2} e^{\beta m_h} \iint_{A_h} Q\left(\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h}\log\left(\frac{r_o}{r_m}\right)\right) dr_o dr_m$$

$$C_{v,h}^{+} = \gamma e^{2(\beta\sigma_h)^2} e^{2\beta m_h} \iint_{A_h} Q\left(\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h}\log\left(\frac{r_o}{r_m}\right)\right) dr_o dr_m - \gamma^2 e^{(\beta\sigma_h)^2} e^{2\beta m_h} \left\{\iint_{A_h} Q\left(\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h}\log\left(\frac{r_o}{r_m}\right)\right) dr_o dr_m\right\}^2$$

(3.21)

με Q(.) τη γνωστή ουρά Gauss. Η τιμή της I_h^+ υπολογίζεται ολοκληρώνοντας στην handoff region.

γ) <u>*Διακυψελική Παρεμβολή*</u> I_h^-

Η παρεμβολή αυτού του τύπου προκαλείται από τερματικό που δεν εξυπηρετείται από τον εξεταζόμενο σταθμό βάσης, αλλά από κάποιον άλλο γειτονικό του. Οι πρώτης και δεύτερης τάξης ροπές της I_h^- είναι

$$\begin{aligned} E\left[I_h^-\right] &\le n_{h,i} C_{m,h}^- \\ Var\left[I_h^-\right] &\le n_{h,i} C_{v,h}^- \end{aligned} \quad \textbf{(3.22)}$$

όπου

$$\begin{aligned} C_{m,h}^- &= \gamma \iint_{A_h} \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^4 f^-\left(\frac{r_m}{r_o}\right) dr_o dr_m \\ C_{v,h}^- &= \iint_{A_h} \left(\frac{r_m}{r_o}\right)^8 \left[\gamma g^-\left(\frac{r_m}{r_o}\right) - \gamma^2 \left(f^-\left(\frac{r_m}{r_o}\right)\right)^2\right] dr_o dr_m \end{aligned} \quad \textbf{(3.23)}$$

$$\begin{aligned} f^-\left(\frac{r_m}{r_d}\right) &= e^{\left(\frac{\sigma_h \ln 10}{10}\right)^2} \left\{1 - Q\left[\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h}\log\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - \sqrt{2}\sigma_h \frac{\ln 10}{10}\right]\right\} \\ g^-\left(\frac{r_m}{r_d}\right) &= e^{\left(\frac{\sigma_h \ln 10}{5}\right)^2} \left\{1 - Q\left[\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h}\log\left(\frac{r_d}{r_m}\right) - \sqrt{2}\sigma_h \frac{\ln 10}{5}\right]\right\} \end{aligned} \quad \textbf{(3.24)}$$

Η ολοκλήρωση γίνεται και σε αυτήν την περίπτωση στην handoff region.

δ) <u>*Διακυψελική παρεμβολή*</u> I_{ao}

Η I_{ao} προκαλείται από χρήστες εκτός της κυψέλης ενδιαφέροντος, που είναι hard connected με γειτονικό σταθμό βάσης. Η I_{ao} είναι ίδια με την I_h^- με τη μόνη διαφορά ότι η ολοκλήρωση γίνεται στην adjacent region. Ομοίως, οι πρώτης και δεύτερης τάξης ροπές είναι

$$\begin{aligned} E\left[I_{ao}\right] &= E\left[n_o\right] C_{m,ao} \\ Var\left[I_{ao}\right] &= E\left[n_o\right] C_{v,ao} \end{aligned} \quad \textbf{(3.25)}$$

όπου

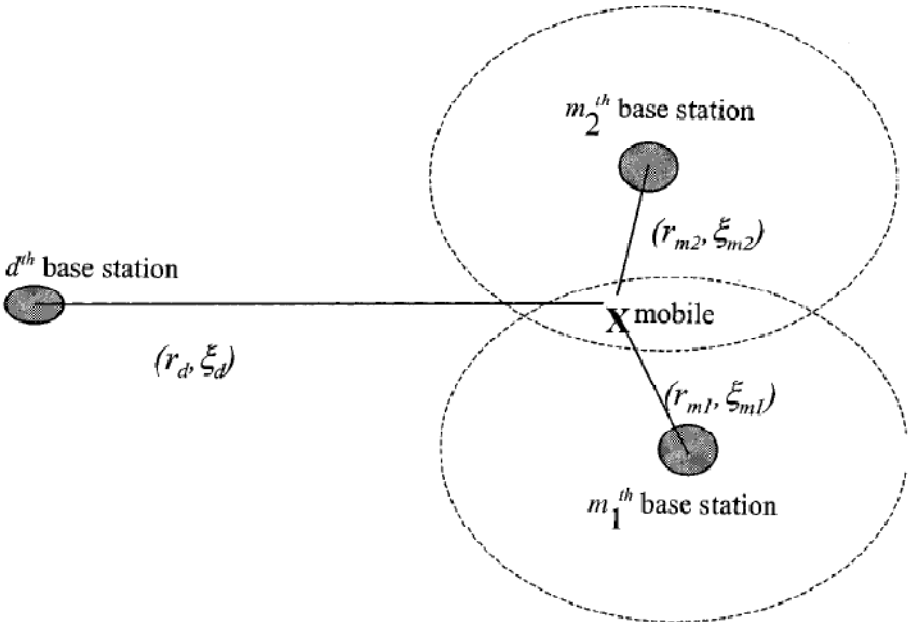
$$C_{m,ao} = \frac{\gamma}{A_o} \iint_{A_o} \left(\frac{r_m}{r_d} \right)^4 f^- \left(\frac{r_m}{r_d} \right) dr_d dr_m$$

$$C_{v,ao} = \frac{1}{A_o} \iint_{A_o} \left(\frac{r_m}{r_d} \right)^8 \left[\gamma g^- \left(\frac{r_m}{r_d} \right) - \gamma^2 \left(f^- \left(\frac{r_m}{r_d} \right) \right)^2 \right] dr_d dr_m \quad \textbf{(3.26)}$$

Οι συναρτήσεις $f^-\left(r_m/r_d\right)$ και $g^-\left(r_m/r_d\right)$ είναι όμοιες με προηγουμένως, με τη μόνη διαφορά ότι, επειδή εν προκειμένη περιπτώσει το τερματικό είναι hard connected με το σταθμό βάσης, χρησιμοποιείται η σ_o αντί της σ_h.

ε) <u>*Διακυψελική Παρεμβολή*</u> I_{ah}

Η διακυψελική παρεμβολή I_{ah} προκαλείται από χρήστη που είναι συνδεδεμένος με δυο σταθμούς βάσης m_1 και m_2, διαφορετικούς από εκείνον στην άνω ζεύξη του οποίου επιδρά η παρεμβολή. Σε απόσταση r_d είναι τοποθετημένος ο σταθμός βάσης ενδιαφέροντος, όπως αναπαρίσταται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.6. Κινητό τερματικό σε soft connection με δυο σταθμούς βάσης.

Ομοίως, οι πρώτης και δεύτερης τάξης ροπές είναι

$$E\left[I_{ah}\right] \le E\left[n_h\right] C_{m,ah}$$
$$Var\left[I_{ah}\right] \le E\left[n_h\right] C_{v,ah} \quad \textbf{(3.27)}$$

όπου

$$C_{m,ah} = \frac{\gamma}{A_h} \iiint \left[\left(\frac{r_{m1}}{r_d} \right)^4 f_{o1}\left(\frac{r_{m1}}{r_{m2}} \right) - \left(\frac{r_{m2}}{r_d} \right)^4 f_{o2}\left(\frac{r_{m1}}{r_{m2}} \right) \right] dr_d dr_{m1} dr_{m2}$$

$$f_{01}\left(\frac{r_{m1}}{r_{m2}} \right) = e^{\left(\frac{\sigma_h \ln 10}{10} \right)^2} \left\{ 1 - Q\left[\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h} \log\left(\frac{r_{m2}}{r_{m1}} \right) - \sqrt{2}\sigma_h \frac{\ln 10}{10} \right] \right\} \quad \textbf{(3.28)}$$

$$f_{02}\left(\frac{r_{m1}}{r_{m2}} \right) = e^{\left(\frac{\sigma_h \ln 10}{10} \right)^2} \left\{ Q\left[\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h} \log\left(\frac{r_{m2}}{r_{m1}} \right) - \sqrt{2}\sigma_h \frac{\ln 10}{10} \right] \right\}$$

$$C_{v,ah} \le \frac{1}{A_h} \iiint \operatorname{var}[\cdot] dr_d dr_{m1} dr_{m2}$$

$$\operatorname{var}[\cdot] = \gamma e^{\left(\frac{\sigma_h \ln 10}{5} \right)^2} \left[\left\{ 1 - Q\left[\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h} \log\left(\frac{r_{m2}}{r_{m1}} \right) - \sqrt{2}\sigma_h \frac{\ln 10}{5} \right] \right\} \left(\frac{r_{m1}}{r_d} \right)^8 + Q\left[\frac{40}{\sqrt{2}\sigma_h} \log\left(\frac{r_{m2}}{r_{m1}} \right) - \sqrt{2}\sigma_h \frac{\ln 10}{5} \right] \left(\frac{r_{m2}}{r_d} \right)^8 \right] - C_{m,ah}^2$$

(3.29)

3.3.6 Ανάλυση σχήματος Ελέγχου Αποδοχής Κλήσης

Η ποιότητα υπηρεσίας μετράται σε όρους call blocking probability και call dropping probability. Σε παλαιότερα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης, όπως είναι τα TDMA και FDMA, δίνεται ένα κανάλι σε κάποιον χρήστη ανάλογα με τη διαθεσιμότητα, που σημαίνει ότι μια κλήση απορρίπτεται αν δεν υπάρχει ελεύθερος δίαυλος.

Η blocking probability εκτιμάται από την ανάλυση μιας ουράς M/M/S/S. Γενικά, το πρώτο M υποδεικνύει ότι η άφιξη κλήσεων μοντελοποιείται ως Poisson διαδικασία με ρυθμό άφιξης κλήσεων λ κλήσεις/sec, το δεύτερο M αναφέρεται στην εκθετικής κατανομής διάρκεια κλήσεων με μέση τιμή $1/\mu$ sec/κλήση, το πρώτο S αναφέρεται στον αριθμό των καναλιών και, τέλος, το δεύτερο S υποδεικνύει το μέγιστο αριθμό αποδεκτών χρηστών του συστήματος. Ακολουθεί η γνωστή Erlang-B εξίσωση υπό συνθήκες M/M/S/S

$$P_B = \frac{(\lambda/\mu)^n / n!}{\sum_{k=0}^{n} (\lambda/\mu)^k / k!} \quad \textbf{(3.30)}$$

όπου (λ/μ) είναι η προσφερόμενη κίνηση σε μονάδες Erlang.

Στην παρούσα ανάλυση, οι μεταβάσεις σε επίπεδο κλήσεων περιγράφονται από τις Markov αλυσίδες. Μια κατάσταση ορίζεται ως q=($n_{o,1}$, $n_{o,2}$, $n_{h,1}$, $n_{h,2}$), ενώ η steady-state probability υπολογίζεται αριθμητικά λύνοντας την Markov διαδικασία στο ακόλουθο σχήμα υπό την παρακάτω συνθήκη

$$\sum_{n_{o,1}=0}^{\infty} \sum_{n_{o,2}=0}^{\infty} \sum_{n_{h,1}=0}^{\infty} \sum_{n_{h,2}=0}^{\infty} P\left(n_{o,1}, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2}\right) = 1 \quad \textbf{(3.31)}$$

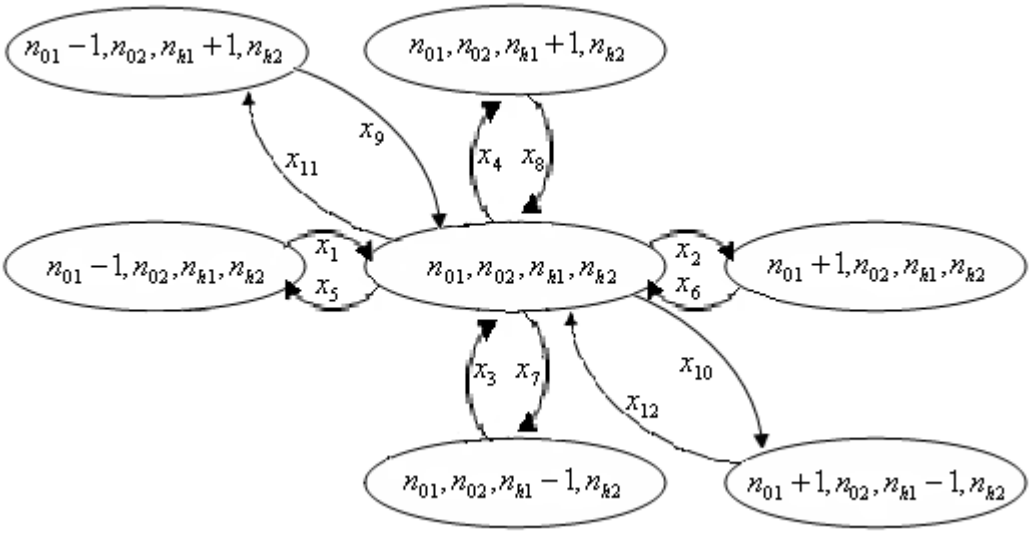
Θεωρητικά, το σύστημα μπορεί να αποδεχθεί άπειρο αριθμό χρηστών των δύο υπηρεσιών και στις δύο περιοχές normal και handoff, όσο ικανοποιούνται οι συνθήκες αποδοχής κλήσης (3.12) και (3.14). Πρακτικά, κατά τη διάρκεια της αριθμητικής ανάλυσης, το άπειρο άθροισμα προσεγγίζεται, υπολογίζοντας λογική μεν μεγάλη τιμή δε.

Υπάρχουν 12 διαφορετικές διαδικασίες που προκαλούν μετάβαση κατάστασης, όπως προκύπτει και από τα ακόλουθα σχήματα και κατηγοριοποιούνται στις εξής

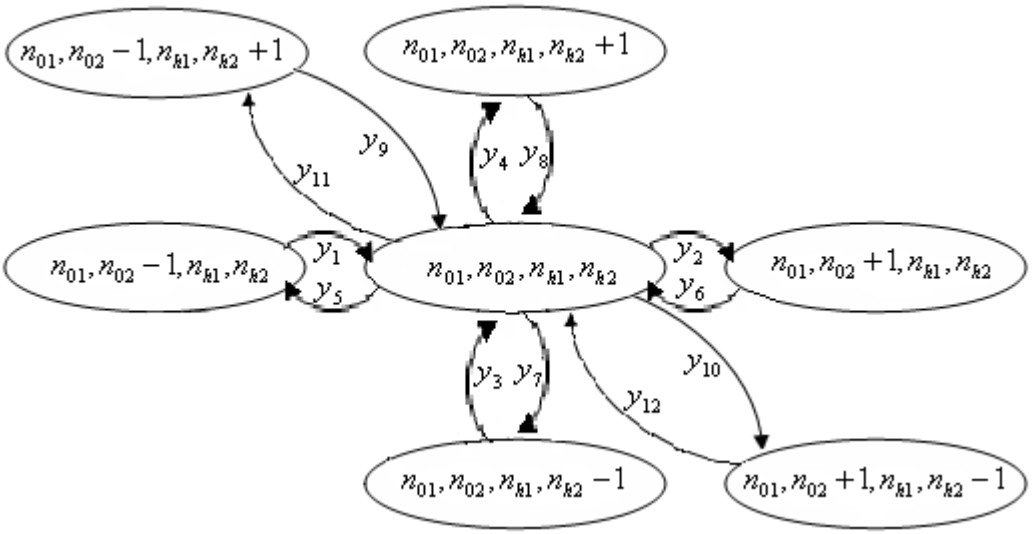
- μια άφιξη κλήσης υπηρεσίας φωνής στην κανονική περιοχή
- ένας τερματισμός κλήσης υπηρεσίας φωνής στην κανονική περιοχή
- μια άφιξη κλήσης υπηρεσίας φωνής στη soft handoff περιοχή
- ένας τερματισμός κλήσης υπηρεσίας φωνής στη soft handoff περιοχή
- μια μετάβαση κλήσης υπηρεσίας φωνής από την κανονική στη soft handoff περιοχή
- μια μετάβαση κλήσης υπηρεσίας φωνής από τη soft handoff στην κανονική περιοχή

Αντίστοιχες διαδικασίες που προκαλούν μετάβαση κατάστασης υπάρχουν και για την υπηρεσία δεδομένων.

Η πιθανότητα αποδοχής ενός χρήστη $E\left(n_{o,1}, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2}\right)$, ως έχει εκφραστεί παραπάνω, χρησιμοποιείται λοιπόν για να εκφράσει την πιθανότητα αποδοχής των προαναφερόμενων διαδικασιών.



α) Αλυσίδα Markov για κλήσεις φωνής στη normal και handoff περιοχή.



β) Αλυσίδα Markov για κλήσεις πολυμέσων στη normal και handoff περιοχή

Σχήμα 3.7. Αλυσίδες Markov

όπου οι state transition rates για την υπηρεσία φωνής είναι:

$$
\begin{aligned}
x_1 &= \lambda_1^o E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}) \\
x_2 &= \lambda_1^o E(n_{0,1}+1, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}) \\
x_3 &= \lambda_1^h E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}) \\
x_4 &= \lambda_1^h E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}+1, n_{h,2}) \\
x_5 &= n_{0,1}[\mu_{M,1} + \mu_{0,1}(1 - E(n_{0,1}-1, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}))] \\
x_6 &= (n_{0,1}+1)[\mu_{M,1} + \mu_{0,1}(1 - E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}))] \\
x_7 &= n_{h,1}[\mu_{M,1} + \mu_{h0,1} + \mu_{h0,1}(1 - E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}-1, n_{h,2}))] \\
x_8 &= (n_{h,1}+1)[\mu_{M,1} + \mu_{h0,1} + \mu_{h0,1}(1 - E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}))] \\
x_9 &= (n_{h,1}+1)[\mu_{h0,1} E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2})] \\
x_{10} &= n_{h,1}\mu_{h0,1} E(n_{0,1}+1, n_{0,2}, n_{h,1}-1, n_{h,2}) \\
x_{11} &= n_{0,1}\mu_{0,1} E(n_{0,1}-1, n_{0,2}, n_{h,1}+1, n_{h,2}) \\
x_{12} &= (n_{0,1}+1)\mu_{0,1} E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2})
\end{aligned}
\qquad \textbf{(3.32)}
$$

και για την υπηρεσία multimedia traffic load:

$$
\begin{aligned}
y_1 &= \lambda_2^o E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}) \\
y_2 &= \lambda_2^o E(n_{0,1}, n_{0,2}+1, n_{h,1}, n_{h,2}) \\
y_3 &= \lambda_2^h E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}) \\
y_4 &= \lambda_2^h E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}+1) \\
y_5 &= n_{0,2}[\mu_{M,2} + \mu_{0,2}(1 - E(n_{0,1}, n_{0,2}-1, n_{h,1}, n_{h,2}))] \\
y_6 &= (n_{0,2}+1)[\mu_{M,2} + \mu_{0,2}(1 - E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}))] \\
y_7 &= n_{h,2}[\mu_{M,2} + \mu_{h0,2} + \mu_{h0,2}(1 - E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}-1))] \\
y_8 &= (n_{h,2}+1)[\mu_{M,2} + \mu_{h0,2} + \mu_{h0,2}(1 - E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2}))] \\
y_9 &= (n_{h,2}+1)[\mu_{h0,2} E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2})] \\
y_{10} &= n_{h,2}\mu_{h0,2} E(n_{0,1}, n_{0,2}+1, n_{h,1}, n_{h,2}-1) \\
y_{11} &= n_{0,2}\mu_{0,2} E(n_{0,1}, n_{0,2}-1, n_{h,1}, n_{h,2}+1) \\
y_{12} &= (n_{0,2}+1)\mu_{0,2} E(n_{0,1}, n_{0,2}, n_{h,1}, n_{h,2})
\end{aligned}
\qquad \textbf{(3.33)}
$$

Στο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσης που αναλύεται, οι νέες κλήσεις και οι κλήσεις προερχόμενες από διαπομπή διαχειρίζονται από το σύστημα εξίσου. Μια κλήση απορρίπτεται αν ικανοποιεί τη σχέση

$$\text{Video Interference} + \text{Voice Interference} + \text{WN}_\text{e} > \text{WI}_\text{e}$$

Σημειώνεται για ακόμη μια φορά ότι οι νέες κλήσεις λαμβάνουν χώρα είτε στην κανονική είτε τη handoff περιοχή. Μια νέα κλήση μπορεί να ζητήσει hard ή soft connection, ενώ μια handoff κλήση ζητά μόνο soft connection. Από τη στιγμή που οι υπό soft connection κλήσεις εισάγουν διαφορετική παρεμβάλλουσα ισχύ συγκρινόμενες με τις υπό hard connection κλήσεις, υπόκεινται σε διαφορετικές πιθανότητες αποκλεισμού κλήσης.

Θεωρώντας, λοιπόν, ότι βρίσκονται σε εξέλιξη $n_{o,1} + n_{o,2} + n_{h,1} + n_{h,2}$ κλήσεις στην κυψέλη ενδιαφέροντος, μία κλήση έστω της πρώτης υπηρεσίας στην κανονική περιοχή θα γίνει αποδεκτή από το σύστημα αν ικανοποιεί το κριτήριο

$$Z_{n_{o,1}+1, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2}} \le G\left(1-\eta\right) \quad \textbf{(3.34)}$$

ενώ μια κλήση της ίδιας υπηρεσίας στην soft handoff περιοχή θα γίνει αποδεκτή αν

$$Z_{n_{o,1}, n_{o,2}, n_{h,1}+1, n_{h,2}} \le G\left(1-\eta\right) \quad \textbf{(3.35)}$$

Τα κινητά τερματικά συνήθως μεταβαίνουν από τη μία περιοχή στην άλλη, και οι μεταβάσεις αυτές οφείλουν επίσης να ικανοποιούν τη σχέση παρεμβολών, και η συνολική παρεμβολή δεν πρέπει να υπερβαίνει το προδιαγραφόμενο κατώφλι. Συνεπώς, μια μετάβαση κλήσης έστω της πρώτης υπηρεσίας από την κανονική στη soft handoff περιοχή θα γίνει αποδεκτή αν

$$Z_{n_{o,1}-1,n_{o,2},n_{h,1}+1,n_{h,2}} \le G\left(1-\eta\right) \textbf{(3.36)}$$

ενώ, αντίστοιχα, από τη soft handoff στην κανονική περιοχή θα γίνει αποδεκτή αν

$$Z_{n_{o,1}+1,n_{o,2},n_{h,1}-1,n_{h,2}} \le G\left(1-\eta\right) \textbf{(3.37)}$$

Προφανώς, αντίστοιχες σχέσεις προκύπτουν αν υποτεθεί η δεύτερη υπηρεσία.

3.3.6.1 Πιθανότητα Αποκλεισμού Κλήσης (Call Blocking Probability)

3.3.6.1.1 Πλήρης Καταμερισμός του Εύρους Ζώνης (Complete Sharing, CS)

Σύμφωνα με την πολιτική του Complete Sharing (CS), κάθε άφιξη νέας κλήσης ή κλήσης από διαπομπή εξυπηρετείται με την τακτική first-come-first-serve και καταναλώνει συγκεκριμένη ποσότητα εύρους ζώνης C. Σύμφωνα με την πολιτική αυτή, το συνολικό διατιθέμενο εύρος ζώνης διαμοιράζεται (με δίκαιο τρόπο)μεταξύ των δυο υπηρεσιών αλλά και των δυο περιοχών (soft handoff και normal areas), και εξυπηρετείται η κλήση που καταφθάνει πρώτη, είτε προέρχεται από διαπομπή είτε πρόκειται για νέα κλήση. Το εύρος ζώνης που δεσμεύει η εκάστοτε υπηρεσία (οι λεγόμενες bandwidth units) είναι διαφορετικό για καθεμιά από αυτές, και παρέχεται μεγαλύτερο εύρος ζώνης για την υπηρεσία της κίνησης δεδομένων, συγκριτικά πάντοτε με την υπηρεσία φωνής, προκειμένου να εγγυάται το δίκτυο ποιότητα υπηρεσίας σε όρους αποκλεισμού των κλήσεων. Προφανώς, όταν δεν θα υπάρχει πλέον ελεύθερος δίαυλος, εννοώντας το διαθέσιμο εύρος ζώνης για τις δυο υπηρεσίες, οι νεοεισερχόμενες ή από διαπομπή κλήσεις θα απορρίπτονται. Για να υπάρχει αντιστοιχία με την πραγματική κίνηση δεδομένων, επίσης θεωρείται για την υπηρεσία πολυμεσικών εφαρμογών εκτενέστερος χρόνος κατάληψης του διαύλου. Βασικός στόχος του διαχωρισμού αυτών των δύο πολιτικών εξυπηρέτησης των χρηστών είναι η μελέτη αποκλεισμού των κλήσεων όταν θα πρέπει από το δίκτυο να παρέχεται συγκεκριμένη QoS (όπως θα φανεί στην πορεία, στο επόμενο σχήμα εξυπηρέτησης), καθώς και η μελέτη του throughput του δικτύου σε κάθε πολιτική (αναφέρεται ακόμη μια φορά ότι throughput είναι η ποσότητα των μεταφερόμενων δεδομένων προς μια κατεύθυνση μιας ζεύξης διαιρούμενη με τον χρόνο που χρειάστηκε για τη μεταφορά αυτών). Μετράται η επίδοση του συστήματος με την CS policy σε όρους blocking probability, ως ακολούθως

- <u>*για την υπηρεσία φωνής στη normal region*</u>

$$Pb_{o,1} = \sum_{X_{o,1}} P\left(n_{o,1}, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2}\right)\left[1 - E\left(n_{o,1}+1, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2}\right)\right] \textbf{(3.38)}$$

όπου

$$X_{o,1}=\left\{\begin{array}{l} n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2} \mid 0\le n_{o,2}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{o,2}}\right\rfloor, 0\le n_{h,1}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{h,1}}\right\rfloor, 0\le n_{h,2}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{h,2}}\right\rfloor, \\ n_{o,1}=\left\lfloor\frac{C-n_{o,2}v_{o,2}-n_{h,1}v_{h,1}-n_{h,2}v_{h,2}}{v_{o,1}}\right\rfloor \end{array}\right\} \quad \textbf{(3.39)}$$

- <u>*για την υπηρεσία multimedia traffic load στη normal region*</u>

$$Pb_{o,2}=\sum_{X_{o,2}} P\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)\left[1-E\left(n_{o,1},n_{o,2}+1,n_{h,1},n_{h,2}\right)\right] \quad \textbf{(3.40)}$$

όπου

$$X_{o,2}=\left\{\begin{array}{l} n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2} \mid 0\le n_{o,1}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{o,1}}\right\rfloor, 0\le n_{h,1}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{h,1}}\right\rfloor, 0\le n_{h,2}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{h,2}}\right\rfloor, \\ n_{o,2}=\left\lfloor\frac{C-n_{o,1}v_{o,1}-n_{h,1}v_{h,1}-n_{h,2}v_{h,2}}{v_{o,2}}\right\rfloor \end{array}\right\} \quad \textbf{(3.41)}$$

- <u>*για την υπηρεσία φωνής στην handoff region*</u>

$$Pb_{h,1}=\sum_{X_{h,1}} P\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)\left[1-E\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1}+1,n_{h,2}\right)\right] \quad \textbf{(3.42)}$$

όπου

$$X_{h,1}=\left\{\begin{array}{l} n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2} \mid 0\le n_{o,1}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{o,1}}\right\rfloor, 0\le n_{o,2}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{o,2}}\right\rfloor, 0\le n_{h,2}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{h,2}}\right\rfloor, \\ n_{h,1}=\left\lfloor\frac{C-n_{o,1}v_{o,1}-n_{o,2}v_{o,2}-n_{h,2}v_{h,2}}{v_{h,1}}\right\rfloor \end{array}\right\} \quad \textbf{(3.43)}$$

- <u>*για την υπηρεσία multimedia traffic load στην handoff region*</u>

$$Pb_{h,2}=\sum_{X_{h,2}} P\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)\left[1-E\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}+1\right)\right] \quad \textbf{(3.44)}$$

όπου

$$X_{h,2}=\left\{\begin{array}{l} n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2} \mid 0\le n_{o,1}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{o,1}}\right\rfloor, 0\le n_{o,2}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{o,2}}\right\rfloor, 0\le n_{h,1}\le\left\lfloor\frac{C}{v_{h,1}}\right\rfloor, \\ n_{h,2}=\left\lfloor\frac{C-n_{o,1}v_{o,1}-n_{o,2}v_{o,2}-n_{h,1}v_{h,1}}{v_{h,2}}\right\rfloor \end{array}\right\} \quad \textbf{(3.45)}$$

Οι παράμετροι $v_{o,i}$ αντιπροσωπεύουν τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης για την εκάστοτε υπηρεσία στη normal region και, αντιστοίχως, οι παράμετροι $v_{h,i}$ στην handoff region. Η παράμετρος C αντιπροσωπεύει την soft capacity, η οποία στη συνέχεια κατά τη διάρκεια των υπολογισμών θα τεθεί σε μεγάλη, όμως ρεαλιστική, τιμή.

3.3.6.1.2 Μερικός Καταμερισμός του Εύρους Ζώνης (Partial Sharing, PS)

Η Partial Sharing (PS) αποτελεί μια διαφορετική πολιτική ελέγχου αποδοχής κλήσεων που μελετάται. Σύμφωνα με την πολιτική αυτή, δεσμεύεται συγκεκριμένο ποσοστό του ολικού εύρους ζώνης $C_{o,1}$, $C_{o,2}$, $C_{h,1}$, $C_{h,2}$ για συγκεκριμένες υπηρεσίες s_1, s_2, s_3, s_4, ενώ το εναπομένον ποσοστό C_s διαμοιράζεται ανάμεσα στις ανταγωνιστικές υπηρεσίες που εξυπηρετούνται πλέον με την τακτική first-come-first-serve. Προφανώς, στο παρόν σχήμα εξυπηρέτησης των χρηστών, ο διαμοιρασμός του εύρους ζώνης δεν είναι τόσο δίκαιος όσο ο προηγούμενος με την έννοια της ποσότητας πάντα, εφόσον τώρα διαχωρίζονται οι δύο υπηρεσίες (αλλά και οι δυο περιοχές) και διατίθεται σε αυτές διαφορετικό ποσοστό του συνολικού εύρους του συστήματος. Υπό μία έννοια, το σχήμα αυτό θα μπορούσε να είναι δίκαιο, επειδή η κίνηση δεδομένων λόγου χάριν χρειάζεται μεγαλύτερο bandwidth λόγω της υψηλής χρησιμοποίησής της από τους χρήστες, ή καλύτερα σε όρους μιας εταιρείας επειδή ο χρήστης το έχει πληρώσει και θέλει να του παρέχεται. Από την άλλη, υπάρχει και η πιθανότητα να έχει καταληφθεί το διαθέσιμο εύρος υπηρεσιών φωνής αλλά να υπάρχει ελεύθερος δίαυλος δεδομένων, και οι εισερχόμενοι στο σύστημα χρήστες να ζητούν υπηρεσία φωνής, με λίγα λόγια να υπάρχει διαθέσιμο BW αλλά να αποκλείονται οι χρήστες. Η κατάσταση αυτή διατηρεί την ποιότητα υπηρεσίας υπό την έννοια παροχής BW στους χρήστες δεδομένων μεν, άρει την ποιότητα υπηρεσίας υπό την έννοια αποδοχής κλήσεων στους χρήστες φωνής, όπως θα μελετηθεί στη συνέχεια.

Μετράται η επίδοση του συστήματος με την PS policy σε όρους blocking probability, ως ακολούθως

- *<u>για την υπηρεσία φωνής στη normal region</u>*

$$Pb_{o,1} = \sum_{Y_{o,1}} P\left(n_{o,1}, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2}\right)\left[1 - E\left(n_{o,1}+1, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2}\right)\right] \quad \textbf{(3.46)}$$

όπου

$$Y_{o,1}=\left\{\begin{array}{l} n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2} \mid 0\le n_{o,2}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{o,2}}{v_{o,2}}\right\rfloor, \\ 0\le n_{h,1}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{h,1}}{v_{h,1}}\right\rfloor, 0\le n_{h,2}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{h,2}}{v_{h,2}}\right\rfloor, \\ n_{o,1}=\min\left(\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{o,1}}{v_{o,1}}\right\rfloor\cdot\left\lfloor\dfrac{C-n_{o,2}v_{o,2}-n_{h,1}v_{h,1}-n_{h,2}v_{h,2}}{v_{o,1}}\right\rfloor\right) \end{array}\right\} \quad \textbf{(3.47)}$$

- <u>*για την υπηρεσία multimedia traffic load στη normal region*</u>

$$Pb_{o,2}=\sum_{Y_{o,2}}P\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)\left[1-E\left(n_{o,1},n_{o,2}+1,n_{h,1},n_{h,2}\right)\right] \quad \textbf{(3.48)}$$

όπου

$$Y_{o,2}=\left\{\begin{array}{l} n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2} \mid 0\le n_{o,1}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{o,1}}{v_{o,1}}\right\rfloor, \\ 0\le n_{h,1}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{h,1}}{v_{h,1}}\right\rfloor, 0\le n_{h,2}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{h,2}}{v_{h,2}}\right\rfloor, \\ n_{o,2}=\min\left(\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{o,2}}{v_{o,2}}\right\rfloor\cdot\left\lfloor\dfrac{C-n_{o,1}v_{o,1}-n_{h,1}v_{h,1}-n_{h,2}v_{h,2}}{v_{o,2}}\right\rfloor\right) \end{array}\right\} \quad \textbf{(3.49)}$$

- <u>*για την υπηρεσία φωνής στην handoff region*</u>

$$Pb_{h,1}=\sum_{Y_{h,1}}P\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)\left[1-E\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1}+1,n_{h,2}\right)\right] \quad \textbf{(3.50)}$$

όπου

$$Y_{h,1}=\left\{\begin{array}{l} n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2} \mid 0\le n_{o,1}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{o,1}}{v_{o,1}}\right\rfloor, \\ 0\le n_{o,2}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{o,2}}{v_{o,2}}\right\rfloor, 0\le n_{h,2}\le\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{h,2}}{v_{h,2}}\right\rfloor, \\ n_{h,1}=\min\left(\left\lfloor\dfrac{C_s+C_{h,1}}{v_{h,1}}\right\rfloor\cdot\left\lfloor\dfrac{C-n_{o,1}v_{o,1}-n_{o,2}v_{o,2}-n_{h,2}v_{h,2}}{v_{h,1}}\right\rfloor\right) \end{array}\right\} \quad \textbf{(3.51)}$$

- *<u>για την υπηρεσία multimedia traffic load στην handoff region</u>*

$$Pb_{h,2} = \sum_{Y_{h,2}} P\left(n_{o,1}, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2}\right)\left[1 - E\left(n_{o,1}, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2} + 1\right)\right] \quad \textbf{(3.52)}$$

όπου

$$Y_{h,2} = \left\{ \begin{array}{l} n_{o,1}, n_{o,2}, n_{h,1}, n_{h,2} \mid 0 \le n_{o,1} \le \left\lfloor \dfrac{C_s + C_{o,1}}{v_{o,1}} \right\rfloor, \\ 0 \le n_{o,2} \le \left\lfloor \dfrac{C_s + C_{o,2}}{v_{o,2}} \right\rfloor, 0 \le n_{h,1} \le \left\lfloor \dfrac{C_s + C_{h,1}}{v_{h,1}} \right\rfloor, \\ n_{h,2} = \min\left(\left\lfloor \dfrac{C_s + C_{h,2}}{v_{h,2}} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \dfrac{C - n_{o,1}v_{o,1} - n_{o,2}v_{o,2} - n_{h,1}v_{h,1}}{v_{h,2}} \right\rfloor \right) \end{array} \right\} \quad \textbf{(3.53)}$$

3.3.6.2 Πιθανότητα Απόρριψης Κλήσης (Call Dropping Probability)

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη παράγραφο, η πιθανότητα απόρριψης κλήσης αποτελεί την πιθανότητα τερματισμού μιας κλήσης λόγω κακής ποιότητας υπηρεσίας και συνεπώς αποτυχίας της διαπομπής. Θεωρούνται οι τυχαίες μεταβλητές εκθετικής κατανομής

$T_{h,j}$: ο χρόνος παραμονής ενός κινητού τερματικού στην handoff region

$T_{o,j}$: ο χρόνος παραμονής ενός κινητού τερματικού στη normal region

$T_{M,j}$: η συνολική διάρκεια κλήσης

με αντίστοιχες παραμέτρους $\mu_{h,j}$, $\mu_{o,j}$ και $\mu_{M,j}$.

Η πιθανότητα μετάβασης ενός κινητού τερματικού από την περιοχή A_h είτε στην A_o είτε στην A_a είναι h_i^h, ενώ η πιθανότητα μετάβασης από την περιοχή A_o στην A_h είναι h_i^o. Οι πιθανότητες μετάβασης, συνεπώς, πριν την ολοκλήρωση της κλήσης προσεγγίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις

$$\begin{aligned} h_i^h &= P\left(T_{m,j} > T_{h,j}\right) = \frac{\mu_{h,i}}{\mu_{M,i} + \mu_{o,i}} \\ h_i^o &= P\left(T_{m,j} > T_{o,j}\right) = \frac{\mu_{o,i}}{\mu_{M,i} + \mu_{o,i}} \end{aligned} \quad \textbf{(3.54)}$$

Θεωρώντας $\left\{R_0, R_1, ..., R_j\right\}$ τις διαδοχικές κυψέλες που έχει διασχίσει το τερματικό μέχρι την j-οστή του μετάβαση (με επιτρεπόμενες και τις μετά επιστροφής διαδρομές), προκύπτει η dropping probability για τις normal και handoff regions

$$\begin{aligned} Pd_{o,j} &= \sum_{j=1}^{\infty} Ph_{o,i}\left(j\right) \\ Pd_{h,j} &= \sum_{j=1}^{\infty} Ph_{h,i}\left(j\right) \end{aligned} \quad \textbf{(3.55)}$$

Έχοντας ομοιόμορφη κατανομή κίνησης, η πιθανότητα μια κλήση να μην ολοκληρωθεί και να τερματιστεί πριν την j-οστή της μετάβαση δίνεται

$$\begin{aligned} Ph_{o,i}\left(j\right) &= \left[h_i^o\left(1-Pb_{o,i}\right)\right]^{j-1} h_i^o Pb_{o,i} \\ Ph_{h,i}\left(j\right) &= \left[h_i^h\left(1-Pb_{h,i}\right)\right]^{j-1} h_i^h Pb_{h,i} \end{aligned} \quad \textbf{(3.56)}$$

όπου $j = 1, 2, 3 ... \infty$ και οι πιθανότητες $Pb_{h,i}$ και $Pb_{o,i}$ όπως προέκυψαν από προηγούμενη παράγραφο.

Συνεπώς, προκύπτουν οι dropping probabilities για τις normal και handoff regions

$$\begin{aligned} Ph_{o,i}\left(j\right) &= \left[h_i^o\left(1-Pb_{o,i}\right)\right]^{j-1} h_i^o Pb_{o,i} = \frac{h_i^o Pb_{o,i}}{1-\left[h_i^o\left(1-Pb_{o,i}\right)\right]} \\ Ph_{h,i}\left(j\right) &= \left[h_i^h\left(1-Pb_{h,i}\right)\right]^{j-1} h_i^h Pb_{h,i} = \frac{h_i^h Pb_{h,i}}{1-\left[h_i^h\left(1-Pb_{h,i}\right)\right]} \end{aligned} \quad \textbf{(3.57)}$$

Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα της Επίδοσης του Συστήματος

Οι προσφερόμενες από το σύστημα υπηρεσίες καθαρά για λόγους απλότητας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι οι ακόλουθες δύο υπηρεσίες φωνής και κίνησης πολυμέσων (multimedia traffic load). Ο διαχωρισμός των δυο αυτών υπηρεσιών γίνεται με βάση τη μέση εκτιμώμενη διάρκεια κλήσεων $1/\mu_{M,i}$ και τις δεσμευόμενες μονάδες επί του συνολικού εύρους ζώνης (bandwidth units). Συγκεκριμένα, για την πρώτη υπηρεσία (φωνή) οι μονάδες που δεσμεύονται είναι $v_{o,1} = 1$ για τη normal περιοχή και $v_{h,1} = 1,1$ για την handoff περιοχή, ενώ για την υπηρεσίας πολυμέσων δεσμεύονται αντίστοιχα $v_{o,2} = 2,2$ και $v_{h,2} = 2,1$. Η συνολική χωρητικότητα του μονοκυψελικού δικτύου που μελετάται θεωρείται ίση με $C = 20$. Η σύγκριση της ποιότητας υπηρεσίας λαμβάνει χώρα μεταξύ ξεχωριστών Call Admission Control πολιτικών, των Complete Sharing και Partial Sharing, πολιτικές που εξηγήθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Οι call blocking probabilities, για κάθε υπηρεσία, υπολογίζονται στην κανονική και την handoff περιοχή. Η ανάλυση που ακολουθεί εξετάζει το αντίκτυπο που έχει στις παραμέτρους της ποιότητας υπηρεσίας (QoS) η αύξηση του φορτίου κίνησης.

Σε προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν αναλυτικές εκφράσεις για τις call blocking probabilities στην κανονική και την handoff περιοχή. Εισάγεται, στη συνέχεια, η έννοια του αποκλεισμού των νέων κλήσεων (blocking of new calls) στην κανονική και την handoff περιοχή.

$$Pb_N = \frac{\lambda_{N,1}^{o} Pb_{o,1} + \lambda_{N,2}^{o} Pb_{o,2} + \lambda_{N,1}^{h} Pb_{h,1} + \lambda_{N,2}^{h} Pb_{h,2}}{\lambda_{N,1}^{o} + \lambda_{N,2}^{o} + \lambda_{N,1}^{h} + \lambda_{N,2}^{h}} \quad \textbf{(4.1)}$$

όπου $Pb_{o,1}$, $Pb_{o,2}$, $Pb_{h,1}$, $Pb_{h,2}$ όπως έχουν ορισθεί στο 3° Κεφάλαιο.

Handoffs από γειτονικές κυψέλες συμβαίνουν μόνο στην handoff περιοχή, όπως έχει σημειωθεί και νωρίτερα. Συνεπώς, οι κλήσεις που προέρχονται από γειτονικές κυψέλες στην handoff περιοχή υφίστανται αποκλεισμό κλήσης

$$Pb_H = \frac{\lambda_{H,1}^{h} Pb_{h,1} + \lambda_{H,2}^{h} Pb_{h,2}}{\lambda_{H,1}^{h} + \lambda_{H,2}^{h}} \quad \textbf{(4.2)}$$

Η επίλυση των Αλυσίδων Markov με αριθμητικές μεθόδους είναι υπολογιστικά δύσκολη. Οι state probabilities υπολογίζονται προσεγγιστικά με βάση τον ακόλουθο τύπο.

$$P\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)=\frac{\frac{\rho_{o,1}^{n_{o,1}}}{n_{o,1}!}\prod_{i=1}^{n_{o,1}}E\left(i,n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)}{\sum_{n_{o,1}=0}^{N_{o,1}}\frac{\rho_{o,1}^{n_{o,1}}}{n_{o,1}!}\prod_{i=1}^{n_{o,1}}E\left(i,n_{o,2},n_{h,1},n_{h,2}\right)}\bullet\frac{\frac{\rho_{o,2}^{n_{o,2}}}{n_{o,2}!}\prod_{i=1}^{n_{o,2}}E\left(n_{o,1},i,n_{h,1},n_{h,2}\right)}{\sum_{n_{o,2}=0}^{N_{o,2}}\frac{\rho_{o,2}^{n_{o,2}}}{n_{o,2}!}\prod_{i=1}^{n_{o,2}}E\left(n_{o,1},i,n_{h,1},n_{h,2}\right)}\bullet$$

$$\bullet\frac{\frac{\rho_{h,1}^{n_{h,1}}}{n_{h,1}!}\prod_{i=1}^{n_{h,1}}E\left(n_{o,1},n_{o,2},i,n_{h,2}\right)}{\sum_{n_{h,1}=0}^{N_{h,1}}\frac{\rho_{h,1}^{n_{h,1}}}{n_{h,1}!}\prod_{i=1}^{n_{h,1}}E\left(n_{o,1},n_{o,2},i,n_{h,2}\right)}\bullet\frac{\frac{\rho_{h,2}^{n_{h,2}}}{n_{h,2}!}\prod_{i=1}^{n_{o,2}}E\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},i\right)}{\sum_{n_{h,2}=0}^{N_{h,2}}\frac{\rho_{o,2}^{n_{h,2}}}{n_{h,2}!}\prod_{i=1}^{n_{h,2}}E\left(n_{o,1},n_{o,2},n_{h,1},i\right)}$$

(4.3)

όπου $\rho_{o,i}=\lambda_{N,i}^{o}\big/\mu_{M,i}$ για $i=1,2$ και αντιστοίχως $\rho_{h,i}=\left(\lambda_{N,i}^{o}+\lambda_{H,i}^{h}\right)\big/\mu_{M,i}$.

Κατά το διαμοιρασμό των πόρων, η δικαιοσύνη (fairness), είτε αφορά χρήστες της ίδιας κλάσης υπηρεσίας με διαφορετικά χαρακτηριστικά κινητικότητας και διαφορετικές συνθήκες καναλιού, είτε χρήστες διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών, αποτελεί ένα από τα βασικότερα θέματα για τους αλγορίθμους αποδοχής κλήσης. Η δικαιοσύνη για U κλάσεις υπηρεσιών υπολογίζεται ως εξής:

$$F=\sum_{u=1}^{U}\frac{\left(Pb_u-\overline{Pb}\right)^2}{\overline{Pb}} \quad \textbf{(4.4)}$$

όπου Pb_u είναι η call blocking probability για κάθε u κλάση υπηρεσίας στην κυψέλη και

$$\overline{Pb}=\frac{\sum_{u=1}^{U}Pb_u}{U} \quad \textbf{(4.5)}$$

είναι η μέση call blocking probability για όλες τις κλάσεις. Ένα CAC σχήμα θεωρείται ιδανικά δίκαιο όταν $F=0$ και τελείως άδικο όταν $F=1$. Μικρή τιμή της δικαιοσύνης F επιτυγχάνεται αν η διακύμανση της call blocking probability μεταξύ των κλήσεων διαφορετικών υπηρεσιών στην ίδια κυψέλη είναι και εκείνη μικρή. Η δέσμευση των πόρων στα ασύρματα δίκτυα μπορεί να προκαλέσει έλλειψη δικαιοσύνης κατά την αποδοχή κλήσης διαφορετικών υπηρεσιών.

Η απόδοση του μελετώμενου δικτύου εκτιμάται όχι μόνο υπολογίζοντας τις call blocking probabilities και τη δικαιοσύνη, αλλά και με βάση το κριτήριο του throughput. Το throughput εκφράζει το ρυθμό των αποδεχόμενων κλήσεων στη συγκεκριμένη κυψέλη, και είναι ίσο με

$$T=\sum_{u=1}^{U}\lambda\cdot\left(1-Pb_u\right) \quad \textbf{(4.6)}$$

όπου λ είναι ο ρυθμός άφιξης κλήσεων μοντελοποιημένος ως Poisson διαδικασία. Λόγω των περιορισμών σε εύρος ζώνης, ένα αποδοτικό CAC σχήμα θα πρέπει να παρέχει υψηλό throughput.

Στον παρακάτω πίνακα αναπαρίστανται οι παράμετροι του συστήματος, οι σημαντικότερες των οποίων είναι η μέση διάρκεια κλήσης (call holding time) $\mu_{M,i}$, το προσφερόμενο φορτίο $\rho = (10 \div 70)\, erlangs$, οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης $v_{o,i}$ και $v_{h,i}$, η μέση ταχύτητα χρήστη $E[v_i] = 20 km/hr$, η πιθανότητα μετάβασης από την handoff στην normal περιοχή $b_k = 0,5$, και ο λόγος της handoff προς τη συνολική περιοχή $a = 0,3$.

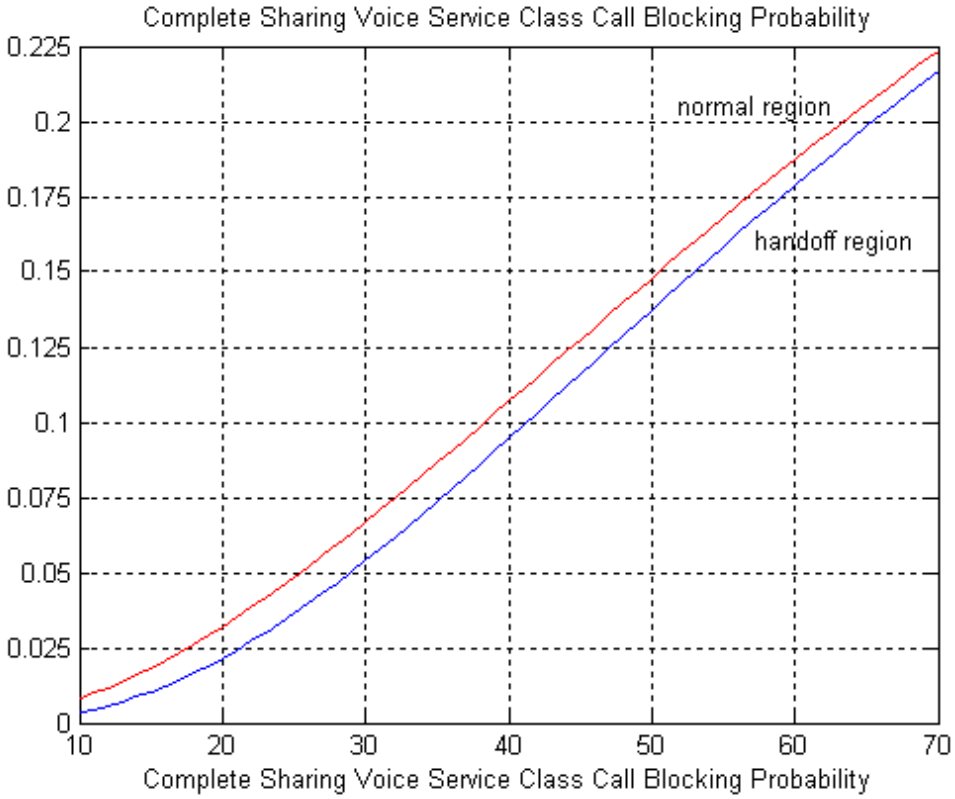
Τιμές Παραμέτρων Δικτύου	
C	20
$C_{o,1}, C_{o,2}$	$0.25 * C$
$C_{h,1}, C_{h,2}$	$0.15 * C$
C_s	$0.20 * C$
$E[n_o], E[n_h]$	3
r_h	$5000m$
r_0	$4183m$
r_a	$41830m$
a	0.3
m_h, m_o	7.0
σ_h, σ_o	2.5
$m_{M,1}, m_{M,2}$	$0.01/\sec$, $0.02/\sec$
β	$\ln 10/10$
$E[v_1], E[v_2]$	$20 km/hr$
b_k	0.5

$v_{o,1}$	1.0
$v_{o,2}$	2.2
$v_{h,1}$	1.1
$v_{h,2}$	2.1

Πίνακας 4.1. Παράμετροι συστήματος.

4.1 Complete Sharing (CS)

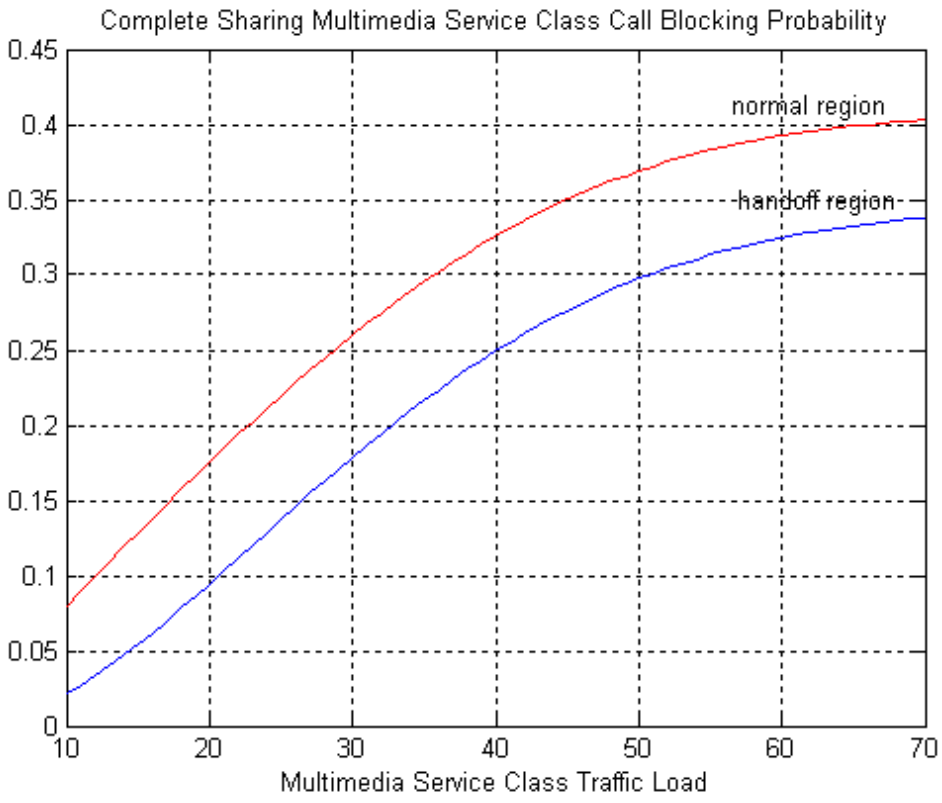
4.1.1 Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης για την υπηρεσία φωνής με CS



Σχήμα 4.1. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την υπηρεσία φωνής με CS.

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται η call blocking probability συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου για την υπηρεσία φωνής, τόσο στην κανονική περιοχή ($Pb_{o,1}$) όσο και στην handoff περιοχή ($Pb_{h,1}$). Στην CS πολιτική, η συνολική χωρητικότητα C μοιράζεται ανάμεσα στους ανταγωνιστικούς τύπους κίνησης. Εφόσον οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης της υπηρεσίας φωνής είναι παρόμοιες στην κανονική και handoff περιοχή, η διατιθέμενη χωρητικότητα για την φωνή στις δύο περιοχές θα είναι επίσης παρόμοια. Κατά συνέπεια, η call blocking probability της φωνής είναι συγκρίσιμη στις δύο περιοχές, και άρα το CS σχήμα για την υπηρεσία φωνής θεωρείται δίκαιο, όπως θα δειχθεί και στη συνέχεια με τον υπολογισμό του fairness, διότι το fairness υπολογίζεται με βάση τις διαφορές μεταξύ των δύο περιοχών για την εκάστοτε υπηρεσία.

4.1.2 Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης για την υπηρεσία multimedia traffic load με CS

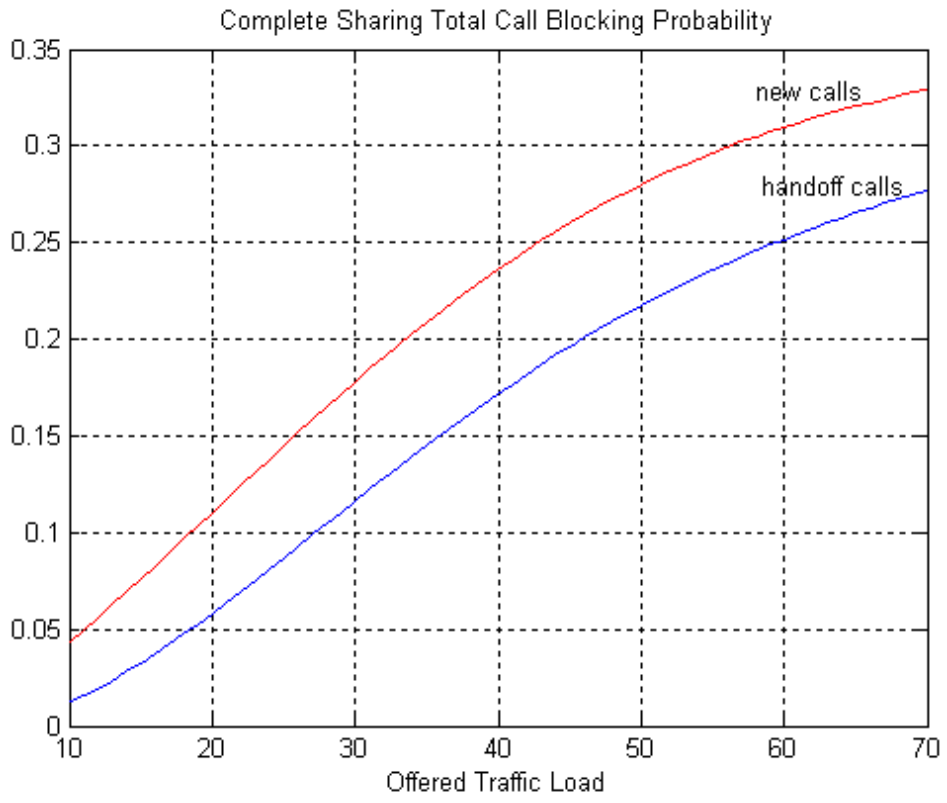


Σχήμα 4.2. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την υπηρεσία πολυμέσων με CS.

Στο παραπάνω σχήμα, απεικονίζεται η call blocking probability για την υπηρεσία multimedia traffic load στην κανονική ($Pb_{o,2}$) και handoff περιοχή($Pb_{h,2}$). Αντίθετα με τα αποτελέσματα για τη φωνή στο προηγούμενο σχήμα, η call blocking probability για το

multimedia traffic load δεν είναι παρόμοια στις δύο περιοχές. Καθώς οι απαιτήσεις της υπηρεσίας αυτής σε εύρος ζώνης είναι μεγαλύτερες από εκείνες της υπηρεσίας φωνής, υπάρχει μια αναμενόμενη αύξηση στην συνολική call blocking probability. Η διαφορά αυτή ενισχύεται με την αύξηση του φορτίου, και οφείλεται στην άνιση κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των δύο περιοχών, με αποτέλεσμα τον μη συμμετρικό αποκλεισμό των κλήσεων. Όπως αναμενόταν, λόγω του διαφορετικού φορτίου κίνησης και των ετερογενών χαρακτηριστικών στις δύο περιοχές, η CS πολιτική είναι πιο άδικη για την δεύτερη υπηρεσία, εφόσον η διαφορά των call blocking probabilities για τις δύο περιοχές είναι μεγαλύτερη στη δεύτερη υπηρεσία.

4.1.3 Πιθανότητα αποκλεισμού νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή με CS



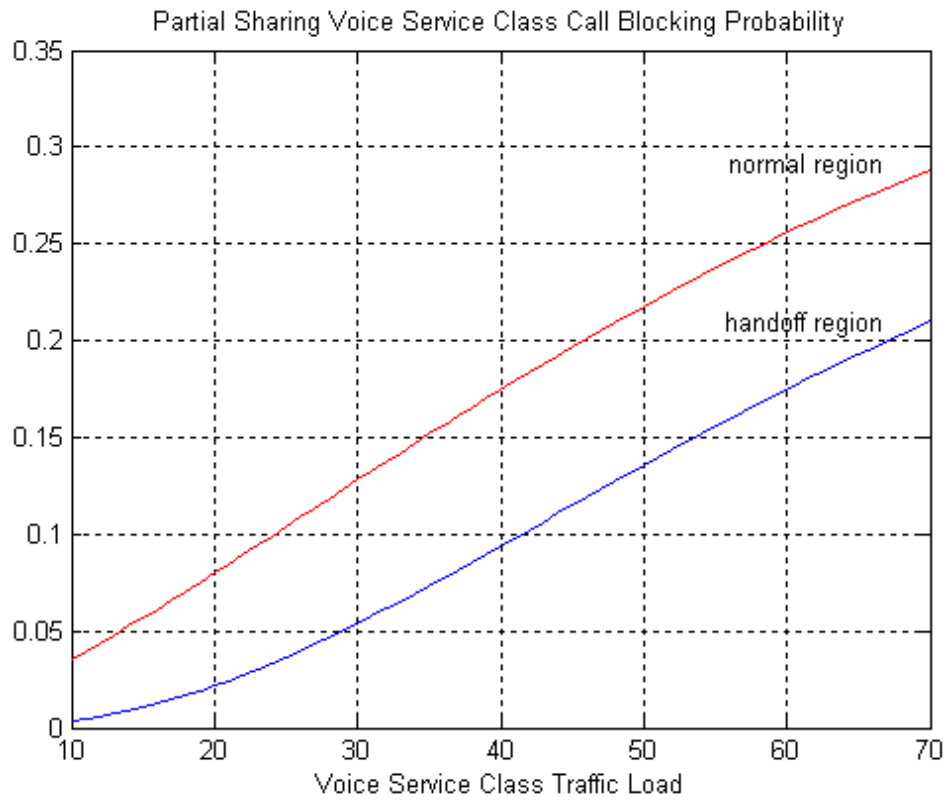
Σχήμα 4.3. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων με CS.

Παραπάνω φαίνεται η call blocking probability νέων και handoff κλήσεων, που έχει υπολογιστεί σύμφωνα με τους τύπους (4.1) και (4.2), αντίστοιχα. Οι κλήσεις από διαπομπή υπόκεινται σε αποκλεισμό μόνο στην handoff περιοχή, ενώ οι νέες κλήσεις τόσο στην κανονική όσο και την handoff περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η call blocking probability για τις νέες κλήσεις να είναι μεγαλύτερη από εκείνη για τις handoff. Επίσης, το σχήμα είναι

δικαιότερο για χαμηλό φορτίο, καθώς η διαφορά μεταξύ των call blocking probabilities για τη normal και handoff περιοχή είναι μικρότερη αρχικά.

4.2 Partial Sharing (PS)

4.2.1 Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης για την υπηρεσία φωνής με PS

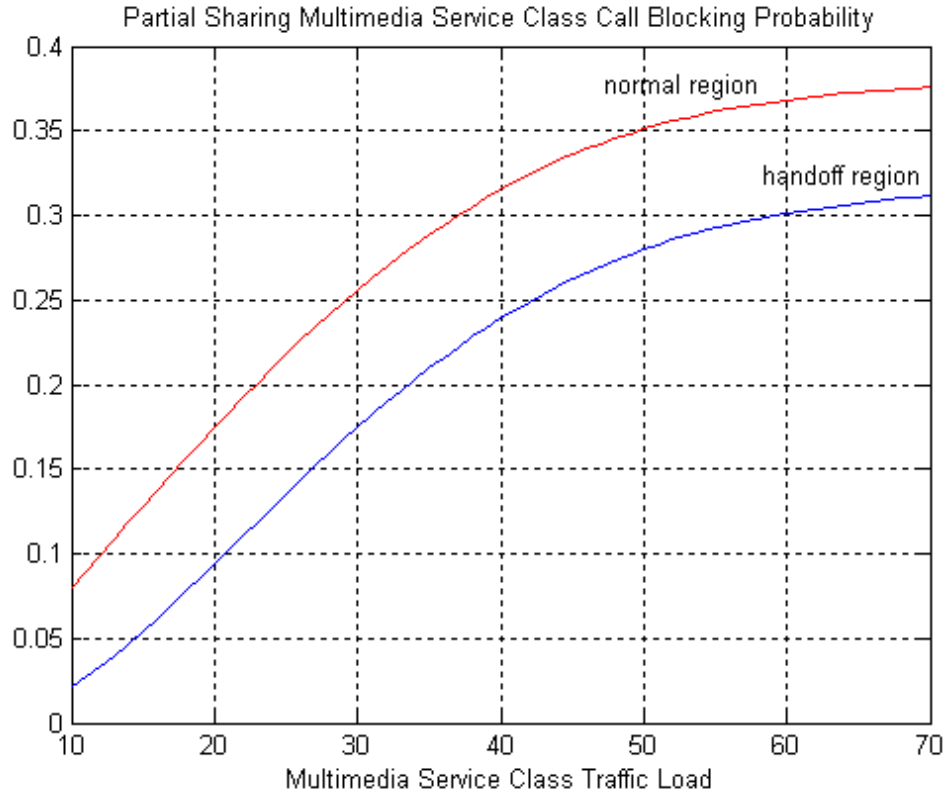


Σχήμα 4.4. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την υπηρεσία φωνής με PS.

Στο παραπάνω σχήμα δίνεται η call blocking probability συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου. Στην PS πολιτική, η συνολική χωρητικότητα C μοιράζεται ανάμεσα στους ανταγωνιστικούς τύπους κίνησης επί ένα ποσοστό του συνόλου. Συγκεκριμένα, για την normal περιοχή διατίθεται το 25% της συνολικής χωρητικότητας για κάθε υπηρεσία, ενώ στην handoff περιοχή διατίθεται αντίστοιχα το 15%. Το υπόλοιπο 20% της χωρητικότητας διαμοιράζεται με τη λογική του First-Come-First-Serve. Οι κλήσεις που βρίσκονται υπό soft connection στην handoff περιοχή, γενικά, μεταδίδονται με μικρότερη ισχύ από ότι οι κλήσεις υπό hard connection στην κανονική περιοχή. Κατά συνέπεια, οι κλήσεις στην κανονική περιοχή εισάγουν μεγαλύτερη παρεμβολή από τις κλήσεις στην handoff περιοχή, και συνεπώς υφίστανται υψηλότερη μέση call blocking probability. Συγκριτικά με την call blocking probability της υπηρεσίας φωνής στην CS πολιτική, υπάρχει μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων αποκλεισμού ανάμεσα στις δύο περιοχές,

και για αυτό το PS σχήμα είναι πιο άδικο από ότι το CS για την υπηρεσία φωνής. Όπως αναμενόταν, αυτή η διαφορά οφείλεται στο διατιθέμενο εύρος ζώνης για τους χρήστες φωνής, που είναι διαφορετικό στην κανονική και handoff περιοχή. Στο σημείο αυτό, προκύπτει το δυναμικά μεταβαλλόμενο fairness ως προς την αντιμετώπιση των ανταγωνιστικών τύπων υπηρεσίας. Οι πάροχοι υπηρεσιών στα ασύρματα κυψελωτά δίκτυα επιθυμούν να διαθέτουν στους χρήστες τους ποιότητα υπηρεσίας ανάλογη με το κόστος. Συνεπώς, μεταβάλλοντας τα παραπάνω ποσοστά, επιτυγχάνεται και η επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας υπό την έννοια του call blocking probability.

4.2.2 Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσης για την υπηρεσία multimedia traffic load με PS

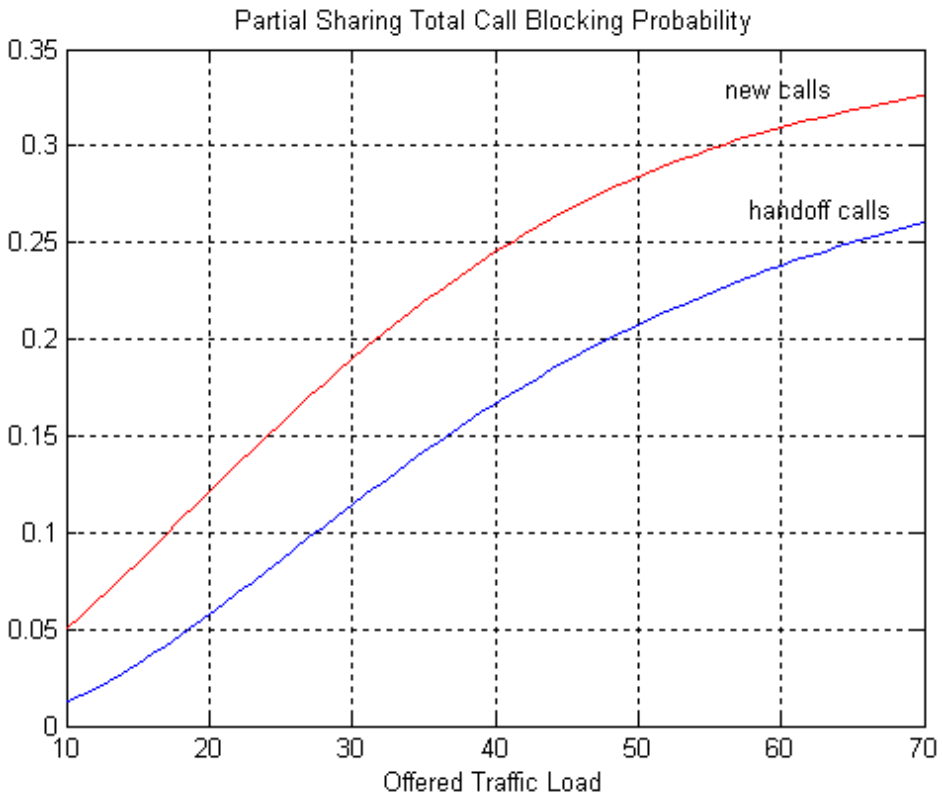


Σχήμα 4.5. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων για την υπηρεσία πολυμέσων με PS.

Όπως προκύπτει και από το παραπάνω σχήμα, οι call blocking probabilities στην κανονική και handoff περιοχή, για Partial Sharing, είναι συμμετρικές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες για Complete Sharing. Η PS τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της call blocking probability και της παραμέτρου throughput, ρυθμίζοντας εκ των προτέρων το εύρος ζώνης, που θα διατεθεί και θα διαμοιραστεί σε κάθε υπηρεσία και σε κάθε περιοχή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το διαμοιραζόμενο εύρος ζώνης έχει ορισθεί στο 20% του συνολικού εύρους ζώνης. Επίσης,

όπως προέκυψε και για το CS σχήμα, η call blocking probability για την υπηρεσία πολυμέσων είναι σαφώς μεγαλύτερη από εκείνη για τη φωνή, λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης των δύο υπηρεσιών.

4.2.3 Πιθανότητα αποκλεισμού νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή με PS



Σχήμα 4.6. Πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων με PS.

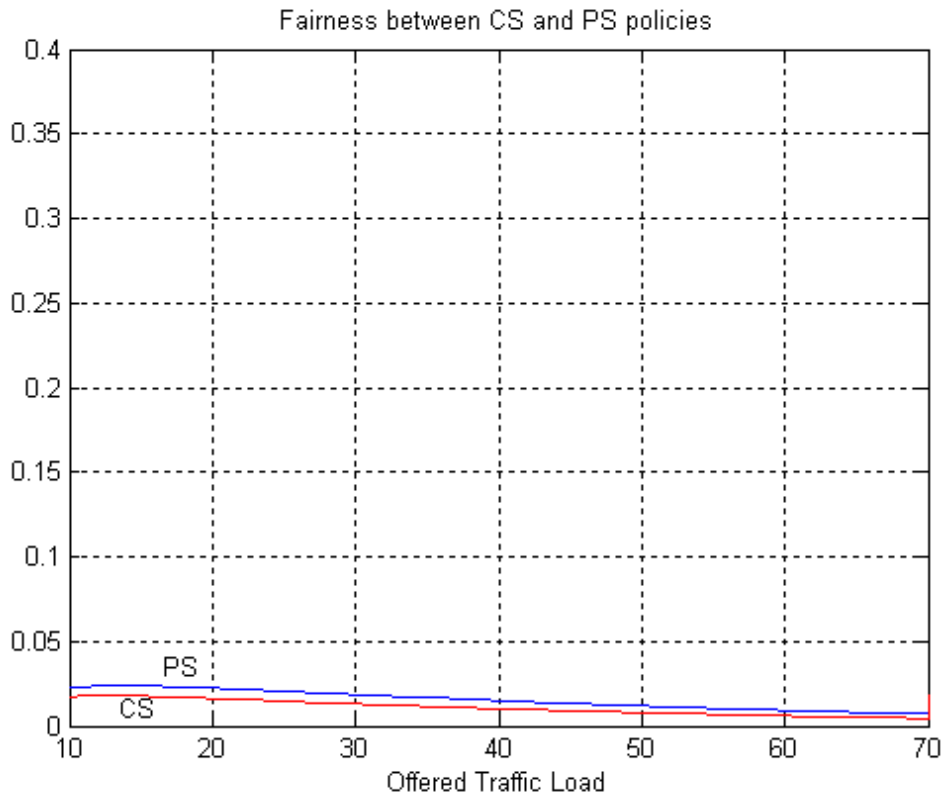
Οι κλήσεις της υπηρεσίας multimedia traffic load απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση της διατιθέμενης χωρητικότητας ανά χρήστη. Αντίθετα, οι κλήσεις φωνής, απαιτούν λιγότερο εύρος ζώνης και καταναλώνουν μικρότερη χωρητικότητα ανά χρήστη. Ως αποτέλεσμα, η call blocking probability των κλήσεων multimedia είναι υψηλότερη από εκείνη των κλήσεων φωνής. Και πάλι οι νέες κλήσεις υπόκεινται σε αποκλεισμό, τόσο στην κανονική όσο και την handoff περιοχή, ενώ οι handoff κλήσεις μόνο στην handoff περιοχή. Άρα, οι νέες και handoff κλήσεις έχουν διαφορετικές call blocking probabilities. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα (4.6) και (4.3), προκύπτει αυξημένη συμμετρία των πιθανοτήτων αποκλεισμού στις δύο περιοχές και για τις δύο τεχνικές. Αυτό οφείλεται στην ικανότητα του PS να ρυθμίζει την κατανομή του εύρους ζώνης. Επίσης, η διαφορά μεταξύ των call blocking probabilities των δύο περιοχών

είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στο CS σχήμα, και άρα το PS είναι πιο άδικο σε σύγκριση πάντα με το CS.

4.3 Σύγκριση Πολιτικών CS και PS

4.3.1 Δικαιοσύνη μεταξύ των κλάσεων υπηρεσιών (Fairness)

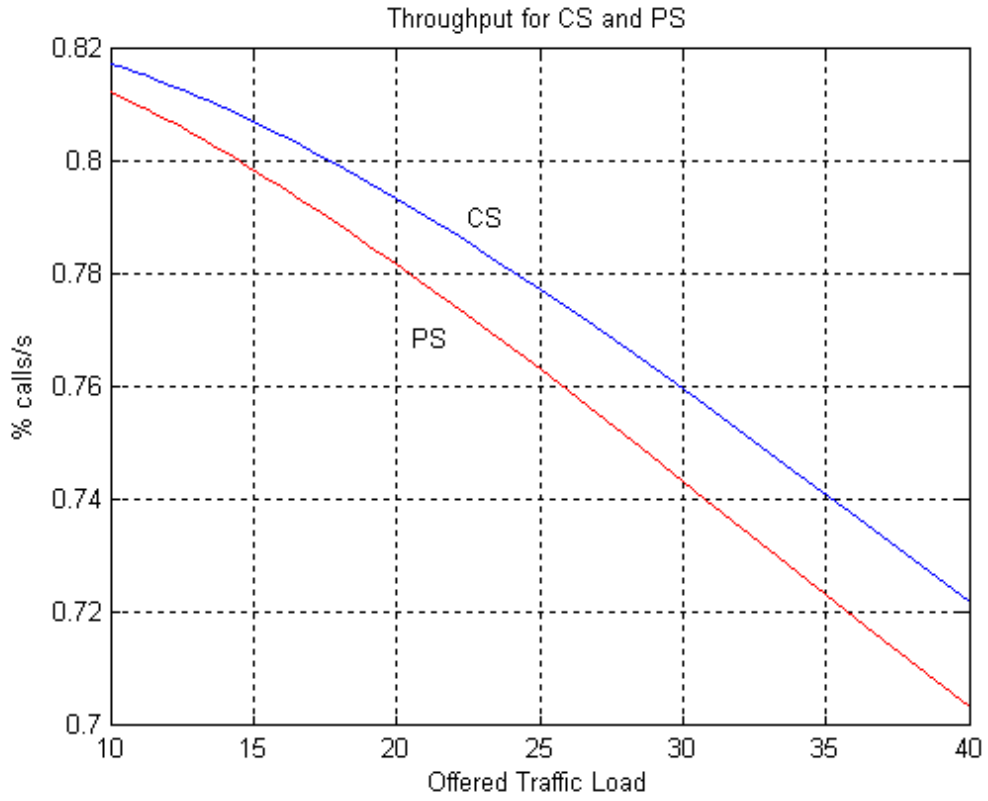
Πέρα από τον υπολογισμό των πιθανοτήτων αποκλεισμού των κλήσεων, η δικαιοσύνη που παρέχει το σύστημα σε χρήστες με διαφορετικές απαιτήσεις αποτελεί μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους επίδοσης του δικτύου. Αποδεικνύεται η προηγούμενη υπόθεση ότι η Complete Sharing πολιτική είναι πιο δίκαιη από την Partial Sharing. Το παρακάτω σχήμα προέκυψε λαμβάνοντας τις συνολικές call blocking probabilities από τα διαγράμματα 4.3 και 4.6. Η διαφορά αυτή μπορεί να μεταβληθεί αλλάζοντας το διατιθέμενο εύρος ζώνης για κάθε υπηρεσία, όσον αφορά το PS.



Σχήμα 4.7. Δικαιοσύνη μεταξύ CS και PS.

4.3.2 Throughput

Στην παρούσα ανάλυση έχει υπολογιστεί το throughput του δικτύου ως ποσοστό επί τοις εκατό του ρυθμού των αποδεχόμενων κλήσεων. Όπως αναμενόταν, καθώς αυξάνεται το φορτίο κίνησης, το throughput μειώνεται, για τον απλό λόγο ότι έχει αυξηθεί η πιθανότητα αποκλεισμού των κλήσεων, διότι έχει μειωθεί ταυτόχρονα ο αριθμός των διαθέσιμων διαύλων.



Σχήμα 4.8. Σύγκριση του Throughput (%calls/s) για CS και PS.

Γενικά, δεν υπάρχει ένα μοναδικό CAC σχήμα που να μπορεί να διαχειριστεί με μοναδικό τρόπο κριτήρια όπως διαφορετικού τύπου κίνηση, μικρή πιθανότητα αποκλεισμού κλήσεων, δικαιοσύνη και αυξημένο throughput. Στην πραγματικότητα, υφίσταται ένα trade-off μεταξύ των προαναφερόμενων κριτηρίων, και για το λόγο αυτό, η επιλογή του CAC σχήματος αποτελεί ανοιχτό θέμα για το διαχειριστή του δικτύου, που είναι εκείνος που λαμβάνει υπόψη τους διαθέσιμους πόρους και την κίνηση του δικτύου. Στην παρούσα ανάλυση, προκύπτει ότι το CS αποτελεί καλύτερο σχήμα ελέγχου αποδοχής κλήσης, τόσο λόγω της δικαιοσύνης που παρέχει, όσο και του αυξημένου throughput. Αυτό δικαιολογείται στην περίπτωση όπου στο PS σχήμα έρχονται συνεχώς κλήσεις της ίδιας υπηρεσίας, έχουν καταλειφθεί όλοι οι διατιθέμενοι προς αυτήν δίαυλοι, και δεν μπορούν να γίνουν αποδεκτές νέες κλήσεις ακόμα και αν υπάρχουν διαθέσιμα κανάλια άλλης

υπηρεσίας. Τέλος, τονίζεται για ακόμη μία φορά ότι το πλεονέκτημα του PS είναι η δυναμική διάθεση καναλιών ανάλογα με την απαιτούμενη ποιότητα σε κάθε υπηρεσία (εγγύηση QoS).

Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

Μεγάλο είναι το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας για τη σχεδίαση και την ανάλυση επίδοσης δεκτών, τεχνικών κωδικοποίησης και διαμόρφωσης και αλγορίθμων ελέγχου ισχύος. Θέματα όπως ο έλεγχος αποδοχής κλήσης, η ανάλυση της ήπιας διαπομπής, τα αποτελέσματα σταδιακής υπερφόρτωσης και ο μη τέλειος έλεγχος ισχύος πρόσφατα άρχισαν να κερδίζουν το ενδιαφέρον των ερευνητών. Τα κυψελωτά δίκτυα CDMA έχουν ήδη αρχίσει να πρωταγωνιστούν. Μελετήθηκε η συμπεριφορά δικτύων με σταθερή ανάθεση καναλιών και δόθηκε κάποια προσέγγιση για την ανάλυση της διαπομπής, εφόσον υποτίθεται διαχωρισμός της ανάλυσης της κίνησης από θέματα μετάδοσης. Δυστυχώς, στα CDMA δίκτυα ο διαχωρισμός θεμάτων κίνησης και μετάδοσης δεν είναι ο προφανής, καθώς η CDMA χωρητικότητα περιορίζεται από παρεμβολή.

Εξαιτίας του περιορισμένου διατιθέμενου φάσματος και της ολοένα αυξανόμενης ζήτησης ποικίλων υπηρεσιών, είναι αναγκαίο για τους παρόχους των ασύρματων υπηρεσιών να βελτιστοποιούν τα δίκτυά τους. Η ανάλυση της επίδοσης του δικτύου είναι πολύ σημαντική. Η συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζει ένα ακριβές μοντέλο κίνησης για την αποτελεσματική ανάλυση της συμπεριφοράς των CDMA κυψελωτών δικτύων. Το σύστημα χρησιμοποιεί ένα μοντέλο γεννήσεων-θανάτων τεσσάρων διαστάσεων για χρήστες φωνής και multimedia traffic load στην normal και handoff region. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί στο σχεδιασμό και τη ρύθμιση του bandwidth κυψελωτών δικτύων.

Τονίστηκε η συμπεριφορά CDMA κυψελωτών δικτύων όσον αφορά την κίνηση, λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα και την ήπια διαπομπή μεταξύ των κυψελών. Στην άνω ζεύξη, η ήπια διαπομπή οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα επικοινωνίας καθώς το σήμα ενισχύεται. Στην κάτω ζεύξη, οι σταθμοί βάσης αποκωδικοποιούν ανεξάρτητα το σήμα και το MSC ειδοποιεί το σταθμό βάσης ότι λαμβάνει το ισχυρότερο σήμα. Αυτό οδηγεί σε μικρή μεταδιδόμενη ισχύ για τα κινητά τερματικά σε soft connection, έτσι ώστε να εισάγεται λιγότερη παρεμβολή στο σύστημα. Προέκυψαν αναλυτικές εκφράσεις για τη συνολική παρεμβολή από τα τερματικά σε soft και hard connection. Η επίδοση υπολογίστηκε με όρους πιθανότητας αποκλεισμού κλήσεων σε soft και hard connection και πιθανότητας αποκλεισμού νέων κλήσεων και κλήσεων από διαπομπή.

Επίσης, το μοντέλο κίνησης εφαρμόζεται στα Complete και Partial Sharing Call Admission Control Schemes, που χρησιμοποιούνται στην RRM (Radio Resource Management). Χρησιμοποιούνται αναλυτικοί τύποι για τον υπολογισμό παραμέτρων QoS, όπως είναι οι προαναφερόμενες call blocking probabilities, η δικαιοσύνη (fairness) και το throughput. Και για τις δύο πολιτικές ελέγχου αποδοχής κλήσεων, οι κλήσεις από διαπομπή υπόκεινται σε αποκλεισμό μόνο στην handoff περιοχή, ενώ οι νέες κλήσεις τόσο στην κανονική όσο και την handoff περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η call blocking probability για τις νέες κλήσεις να είναι μεγαλύτερη από εκείνη για τις handoff, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα. Επίσης, οι κλήσεις της υπηρεσίας πολυμέσων απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση της διατιθέμενης χωρητικότητας

ανά χρήστη. Αντίθετα, οι κλήσεις φωνής, απαιτούν λιγότερο εύρος ζώνης και καταναλώνουν μικρότερη χωρητικότητα ανά χρήστη. Ως αποτέλεσμα, η call blocking probability των κλήσεων multimedia είναι υψηλότερη από εκείνη των κλήσεων φωνής. Η CS τεχνική αποδεικνύεται τελικά, για τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων του δικτύου, πιο δίκαιη από την PS, και μάλιστα και με μεγαλύτερο ρυθμό αποδεχόμενων κλήσεων (throughput). Παρόλα αυτά, το PS χρησιμοποιείται συχνά από τους διαχειριστές δικτύων χάρη στην ικανότητά του να ρυθμίζει την κατανομή του εύρους ζώνης.

Τα διαγράμματα και τα αποτελέσματα που παρατέθηκαν στην παρούσα ανάλυση προέκυψαν για μια δεδομένη τιμή της χωρητικότητας του συστήματος. Για υψηλότερη χωρητικότητα, είναι προφανές ότι οι πιθανότητες αποκλεισμού θα ήταν γενικά μικρότερες. Επίσης, ο λόγος εμβαδού της soft handoff περιοχής προς το συνολικό εμβαδό της κυψέλης θεωρήθηκε επίσης δεδομένος. Είναι φανερό ότι για μεγαλύτερο λόγο, η πιθανότητα αποκλεισμού νέων κλήσεων θα ήταν μικρότερη για τον εξής λόγο: τα κινητά τερματικά στη soft handoff περιοχή εκπέμπουν χαμηλότερη ισχύ και άρα μπλοκάρονται λιγότερο σε σύγκριση με τα κινητά τερματικά στη normal περιοχή. Καθώς η handoff περιοχή μεγαλώνει και η normal μικραίνει, το πλήθος των αφίξεων νέων κλήσεων στη handoff περιοχή αυξάνεται σε σχέση με τις αντίστοιχες αφίξεις κλήσεων στη normal. Έτσι, η συνολική πιθανότητα αποκλεισμού νέων κλήσεων μειώνεται με την αύξηση του παραπάνω λόγου. Τέλος, τονίζεται ότι οι ρεαλιστικές τιμές των πιθανοτήτων αποκλεισμού κυμαίνονται κάτω από το 10%. Αυτό είναι εφικτό στα πραγματικά συστήματα με μεγάλο κέρδος επεξεργασίας. Όλα τα παραπάνω μπορούν να αναλυθούν περεταίρω σε μελλοντική μελέτη.

Βιβλιογραφία

1. Ι.Δ. Κανελλόπουλος, «Διάδοση Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων σε Γήινο Περιβάλλον», Τζιόλα, Αθήνα, 2006.
2. Μ.Ε. Θεολόγου , «Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών», Τζιόλα, Αθήνα, 2007.
3. Ι.Στ Βενιέρης, «Δίκτυα Ευρείας Ζώνης», 2η έκδοση, Τζιόλα, Αθήνα, 2007.
4. Π.Γ. Κωττής, «Διαμόρφωση και Μετάδοση Σημάτων»,Τζιόλα, Αθήνα, 2003.
5. Χ.Καψάλης, Π.Κωττής, «Κεραίες, Ασύρματες Ζεύξεις», Τζιόλα, Αθήνα, 2005.
6. J.G. Proakis, M. Salehi, «Συστήματα Τηλεπικοινωνιών», Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, 2002.
7. A.S. Tanenbaum, «Δίκτυα Υπολογιστών», 4η αμερικάνικη έκδοση, Κλειδάριθμος, 2003.
8. Π-Δ.Μ. Αράπογλου, «Θέματα Φυσικού Στρώματος και Στρώματος MAC Σταθερών Ασύρματων Ευζωνικών Δικτύων», Διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ, Αθήνα, 2007.
9. Hsiao-Hwa Chen, «The Next Generation CDMA Technologies», National Cheng Kung University, Taiwan,2007.
10. King Yung Hor, «Performance Analysis of Multi-service DS-CDMA Cellular Networks with Soft Handoff», Simon Fraser University,2004.
11. R.P.Narrainen, F.Takawira, «Performance Analysis of Soft Handoff in CDMA cellular networks», IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume 50, No. 6, November 2001.
12. Zhao Liu, Magda El Zarki, «SIR-Based Call Admission Control for DS-CDMA Cellular Systems», IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 12, No. 4, May 1994.
13. Il-Min Kim, Byung-Cheol Shin, and Dong-Jun Lee, «SIR-Based Call Admission Control by Intercell Interference Prediction for DS-CDMA Systems», IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 4, NO. 1, JANUARY 2000
14. M.H. Ahmed, «Call Admission Control in Wireless Networks: A Comprehensive Survey», IEEE Communications surveys, The Electronic Magazine of Original Peer-Reviewed Survey Articles, Volume 7, No. 1, Memorial University of Newfoundland, First Quarter 2005.
15. J.F. Kurose, K.W. Ross, «Δικτύωση Υπολογιστών: Προσέγγιση από πάνω προς τα κάτω με έμφαση στο διαδίκτυο», Γκιούρδας, Αθήνα, 2004
16. G.Gomez, R.Sanchez, «End-to-End Quality of Service over Cellular Networks», John Wiley & Sons, Ltd, England, 2005.
17. M.Ibnkahla, «Signal Processing for Mobile Communications»,CRC Press,Florida,2005.
18. IEEE 802.11a-j standards