

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	I
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	VII
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	IX
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	1-1
1.1 Εξέλιξη των κινητών ραδιοεπικοινωνιών	1-1
1.2 Παραδείγματα συστημάτων κινητών επικοινωνιών	1-4
1.3 Συστήματα κυψελωτής τηλεφωνίας	1-7
1.4 Πως πραγματοποιείται μια τηλεφωνική κλήση	1-10
1.5 Προβλήματα	1-15
2 ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΩΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	2-1
2.1 Εισαγωγή	2-1
2.2 Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας	2-3
2.3 Στρατηγικές ανάθεσης καναλιών	2-7
2.4 Τεχνικές μεταπομπής	2-9
2.5 Είδη μεταπομπής	2-13
2.6 Χορήγηση προτεραιότητας στην μεταπομπή	2-15
2.7 Πρακτικά ζητήματα στο χειρισμό μεταπομπών κλήσης	2-16
2.8 Παρεμβολές και επιπτώσεις στη χωρητικότητα συστήματος	2-18
2.9 Συγκαναλική παρεμβολή και χωρητικότητα συστήματος	2-19
2.10 Παρεμβολή γειτονικού καναλιού	2-24
2.11 Έλεγχος ισχύος για την μείωση παρεμβολών	2-26

2.12	Θεωρία τηλεφωνικής κίνησης	2-27
2.13	Αύξηση της χωρητικότητας σε συστήματα κυψελωτής τηλεφωνίας	2-35
2.14	Διαίρεση κυψέλης	2-36
2.15	Τεχνική τομεοποίησης κυψελών	2-37
2.16	Η τεχνική της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες	2-41
2.17	Προβλήματα	2-43

3 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ **3-2**

3.1	Βασικές αρχές διάδοσης ραδιοκυμάτων	3-2
3.2	Συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης	3-5
3.3	Διάδοση με περίθλαση	3-7
3.3.1	Απώλειες για εμπόδιο αμελητέου πάχους ευθείας ακμής	3-7
3.3.2	Απώλειες για μονό κυρτό εμπόδιο	3-10
3.4	Μοντέλο μακροσκοπικής διάδοσης για κινητές επικοινωνίες	3-12
3.5	Το μοντέλο διάδοσης Okumura-Hata	3-17
3.6	Το μοντέλο των Walfisch και Bertoni	3-19
3.7	Προβλήματα	3-21

4 ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ GSM **4-1**

4.1	Η αρχιτεκτονική του προτύπου GSM	4-3
4.2	Το ασύρματο τμήμα του GSM	4-6

5 ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 3^{HS} ΓΕΝΙΑΣ UMTS **5-1**

5.1	Αρχιτεκτονική του Ευρωπαϊκού προτύπου ψηφιακών κινητών υπηρεσιών 3 ^{ns} γενιάς UMTS	5-1
5.2	Δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (UTRAN)	5-5
5.3	Το φυσικό στρώμα στο UTRA	5-9
5.4	Τεχνικές διασποράς φάσματος	5-10
5.4.1	Διασπορά φάσματος απευθείας ακολουθίας	5-13
5.4.2	Δέκτης RAKE	5-16
5.4.3	Πιθανότητα σφάλματος σε συστήματα DS-SS	5-20
5.4.4	Πολλαπλή πρόσβαση στο DS-CDMA	5-21

5.4.5	Έλεγχος ισχύος στο UMTS	5-23
5.4.6	Είδη μεταπομπής στο UMTS	5-24
5.5	Διασπορά φάσματος και εφαρμογή σε πρωτόκολλο CDMA	5-27
5.6	Κώδικες που χρησιμοποιούνται στο WCDMA του UMTS	5-31
5.6.1	Κώδικες διαυλοποίησης στο UMTS	5-31
5.6.2	Κώδικες περίπλεξης στο UMTS	5-33
5.6.3	Συντομογραφίες όρων που αφορούν στην κωδικοποίηση και διαμόρφωση του DL και UL του UMTS	5-34
5.6.4	Κωδικοποίηση και διαμόρφωση στην ανοδική ζεύξη (UL) του UMTS	5-36
5.6.5	Κωδικοποίηση και διαμόρφωση στην καθοδική ζεύξη (DL) του UMTS	5-38
5.7	Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών FDD στο UTRAN	5-39
5.8	Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών TDD στο UTRAN	5-42
5.9	Προϋπολογισμός ζεύξης στο UMTS	5-43
5.10	Προβλήματα	5-45
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	5-47

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1. Παγκόσμια πρόοδος στην αδειοδότηση υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας 3 ^{ης} γενιάς (μέχρι το έτος 2004).....	1-3
Πίνακας 1-2. Ορισμοί βασικών όρων στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας.....	1-5
Πίνακας 1-3. Διάγραμμα χρονισμού που δείχνει τα στάδια που μεσολαβούν για να λάβει χώρα μια κλήση από ένα χρήστη του σταθερού δικτύου PSTN προς ένα χρήστη με κινητό τηλέφωνο.....	1-13
Πίνακας 1-4. Διάγραμμα χρονισμού που δείχνει τα στάδια που μεσολαβούν για να λάβει χώρα μια κλήση από ένα χρήστη κινητού τηλεφώνου προς ένα χρήστη του σταθερού δικτύου PSTN.	1-14
Πίνακας 2-1. Συγκαναλικός λόγος επαναχρησιμοποίησης ως συνάρτηση του μεγέθους ομάδας..	2-20
Πίνακας 2-2. Ορισμοί συνήθων όρων που χρησιμοποιούνται στην θεωρία πολυπλεξίας κορμού.	2-28
Πίνακας 2-3. Χωρητικότητα ενός συστήματος Erlang-B.	2-31
Πίνακας 3-1. Τιμές του συντελεστή απωλειών διάδοσης για διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης.	3-14
Πίνακας 4-1. Προδιαγραφές της ραδιοδιεπαφής του προτύπου GSM.	4-8
Πίνακας 5-1. Ανάλυση κάποιων βασικών συντομογραφιών των όρων που χρησιμοποιούνται στην έκδοση 99 του προτύπου UMTS.	5-4
Πίνακας 5-2. Διαδικασία διασποράς, υπέρθεσης και αποδιασποράς σε σύστημα CDMA με δύο χρήστες.	5-29
Πίνακας 5-3. Συντομογραφίες προτυποποιημένων τεχνικών όρων του UMTS αναφερόμενων στην κωδικοποίηση και διαμόρφωση που εφαρμόζονται στο φυσικό στρώμα.	5-35
Πίνακας 5-4. Σύνοψη των κυριότερων κωδίκων που χρησιμοποιούνται στο FDD του UTRAN. .	5-41
Πίνακας 5-5. Τυπικός προϋπολογισμός ανοδικής ζεύξης για WCDMA στο UMTS.....	5-44

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1. Τυπική αρχιτεκτονική δικτύου ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας 2 ^{ης} γενιάς (Εδώ το ευρωπαϊκό πρότυπο GSM παρουσιάζεται σχηματικά).....	1-9
Σχήμα 2-1. Παρουσίαση της αρχής επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Κυψέλες με το ίδιο γράμμα χρησιμοποιούν την ίδια ομάδα συχνοτήτων.....	2-4
Σχήμα 2-2. Μεθοδολογία προσδιορισμού συγκαναλικών κυψελών σε σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας με $i=3$, $j=2$ και $N=19$	2-7
Σχήμα 2-3. Διαγραμματική απεικόνιση της διαδικασίας μεταπομπής όταν ο χρήστης μετακινείται από κυψέλη σε κυψέλη. Στην περίπτωση (α) δεν επιτυγχάνεται μεταπομπή και η κλήση τερματίζεται, ενώ στη (β) η διαδικασία μεταπομπής είναι επιτυχής.	2-10
Σχήμα 2-4. Διάφορες περιπτώσεις μεταπομπής.....	2-14
Σχήμα 2-5. Διαγραμματική απεικόνιση της τεχνικής της κυψέλης-ομπρέλα.....	2-18
Σχήμα 2-6. Απεικόνιση του σεναρίου παρεμβολής στη λήψη του καθοδικού καναλιού σε κινητό σταθμό εξ αιτίας του πρώτου στρώματος συγκαναλικών σταθμών βάσης σε σύστημα κινητής τηλεφωνίας με μέγεθος ομάδας $N=7$. Η δυσμενέστερη περίπτωση παρεμβολής παρατηρείται όταν το κινητό τηλέφωνο ευρίσκεται στα όρια της κυψέλης (στο σημείο Α).....	2-24
Σχήμα 2-7. Το διάγραμμα Erlang-B που απεικονίζει την πιθανότητα μπλοκαρίσματος P_b [blocked] ως συνάρτηση του αριθμού καναλιών C και της εντάσεως τηλεφωνικής κίνησης A σε Erlangs. ...	2-33
Σχήμα 2-8. Το διάγραμμα Erlang-C που απεικονίζει την πιθανότητα μπλοκαρίσματος P_d [delay>0] ως συνάρτηση του αριθμού καναλιών C και της εντάσεως τηλεφωνικής κίνησης A σε Erlangs. ...	2-34
Σχήμα 2-9. Παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής διαίρεσης κυψελών.....	2-36
Σχήμα 2-10. Τομεοποίηση κυψέλης για (α) τρεις και (β) έξι τομείς.....	2-38
Σχήμα 2-11. Πως η τεχνική τομεοποίησης κυψέλης σε τρεις τομείς οδηγεί στην ελάττωση συγκαναλικής παρεμβολής. Εδώ από το πρώτο στρώμα συγκαναλικών σταθμών βάσης μόνο δύο παρεμβάλλουν την κεντρική κυψέλη. Στην περίπτωση που οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν πανκατευθυντικές κεραιές το σύνολο (έξι) των συγκαναλικών σταθμών παρεμβάλλει την κεντρική κυψέλη.	2-40
Σχήμα 2-12. Η αρχή της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες.....	2-42
Σχήμα 2-13. Η εφαρμογή της τεχνικής της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες (τρεις ανά κυψέλη) σε σύστημα κινητής τηλεφωνίας με $N=7$ και παρουσίαση της σχετικής γεωμετρίας.....	2-43
Σχήμα 3-1. Γεωμετρία στοιχειώδους γραμμικού στοιχείου ακτινοβολίας.....	3-2
Σχήμα 3-2. Γεωμετρία για τον ορισμό των συντελεστών ανάκλασης και διάθλασης.....	3-6
Σχήμα 3-3. Γεωμετρία περίθλασης για εμπόδιο αμελητέου πάχους ευθείας ακμής.....	3-9
Σχήμα 3-4. Απώλεια περίθλασης συναρτηθεί της παραμέτρου ν για εμπόδιο αμελητέου πάχους ευθείας ακμής.....	3-10
Σχήμα 3-5. Γεωμετρία περίθλασης για μονό κυρτό εμπόδιο.....	3-11
Σχήμα 3-6. Τυπική μεταβολή της στάθμης σήματος σε ζεύξη σταθμού βάσης - κινητού τηλεφώνου, ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των.....	3-13
Σχήμα 3-7. Γραφική παράσταση της συνάρτησης Q	3-16
Σχήμα 3-8. Γεωμετρία για την εφαρμογή του μοντέλου διάδοσης των Walfisch και Bertoni... ..	3-20
Σχήμα 4-1. Αρχιτεκτονική του προτύπου GSM.....	4-3
Σχήμα 4-2. Η δομή του πλαισίου ομιλίας στο πρότυπο GSM.....	4-7
Σχήμα 5-1. Διαγραμματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής του ευρωπαϊκού προτύπου 3 ^{ης} γενιάς UMTS.....	5-3
Σχήμα 5-2. Αρχιτεκτονική του UTRAN στο Ευρωπαϊκό πρότυπο UMTS.....	5-6
Σχήμα 5-3. Διασύνδεση RNS με δίκτυο BSS που υποστηρίζει την διεπαφή Iu, μέσω της διεπαφής Iur-g.....	5-7
Σχήμα 5-4. Σύνδεση UE με RNS Εξυπηρέτησης (SRNS) και Ολίσθησης (DRNS).....	5-7
Σχήμα 5-5. Τεχνική διασποράς φάσματος. Η συνολική ισχύς του σήματος δεν μεταβάλλεται και τα δύο εμβαδά του αρχικού και του απλωμένου φάσματος είναι ίσα.....	5-10
Σχήμα 5-6. Μετάδοση και λήψη πληροφορίας με την τεχνική της διασποράς φάσματος.....	5-12

Σχήμα 5-7. Παράδειγμα εφαρμογής κώδικα διασποράς φάσματος απευθείας ακολουθίας.	5-14
Σχήμα 5-8. Δέκτης συσχέτισης για ανάκτηση πληροφορίας σε ασύρματο σύστημα επικοινωνίας που χρησιμοποιεί DS-CDMA.	5-15
Σχήμα 5-9. Τυπικό διάγραμμα δέκτη RAKE.....	5-17
Σχήμα 5-10. Γεωμετρία για την επίδειξη της ήπιας μεταγωγής.	5-25
Σχήμα 5-11. Τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στον κώδικα CDMA.	5-28
Σχήμα 5-12. Δενδρική δομή για την παραγωγή κωδίκων OVSF.	5-32
Σχήμα 5-13. Εφαρμογή κωδίκων στην ανοδική ζεύξη (UL) του UMTS.	5-37
Σχήμα 5-14. Διαμόρφωση στην ανοδική ζεύξη του UMTS.	5-37
Σχήμα 5-15. Διαδικασία διασποράς για όλα τα φυσικά κανάλια εκτός των καναλιών συγχρονισμού στην καθοδική ζεύξη (DL) του UMTS.	5-38
Σχήμα 5-16. Διαμόρφωση στην καθοδική ζεύξη (DL) του UMTS.	5-39

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ο σκοπός των σημειώσεων αυτών είναι να εξοικειώσει τους φοιτητές του Τμήματος Πληροφορικής & Επικοινωνιών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Σερρών με τις ασύρματες κυψελωτές προσωπικές επικοινωνίες, που αποτελούν σήμερα ένα σημαντικό πεδίο στην επιστήμη των επικοινωνιών. Τεχνολογικά ζητήματα που ευρίσκονται στο επίκεντρο της σχεδίασης, υλοποίησης και εξέλιξης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών παρουσιάζονται με παιδαγωγικό τρόπο ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση των γενικών αρχών, ενώ ιδιαίτερη έμφαση έχει τοποθετηθεί στα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις αρχές σχεδίασης συγκεκριμένων συστημάτων ασύρματων κυψελωτών προσωπικών επικοινωνιών.

Οι σημειώσεις αυτές απευθύνονται στους φοιτητές του 4^{ου} έτους του Τμήματος και προϋποθέτουν την εξοικείωσή τους με βασικές έννοιες της θεωρίας πιθανοτήτων, θεωρίας επικοινωνιών και βασικής θεωρίας ηλεκτρομαγνητισμού. Προκειμένου ο φοιτητής να εμπεδώσει γρήγορα και αποτελεσματικά το μάθημα των Κινητών Επικοινωνιών τα σημαντικά ειδικά τεχνικά θέματα παρουσιάζονται με πρωτόλειο τρόπο, ώστε να καταστεί εφικτή η εκμάθηση των θεμελιωδών αρχών των ασύρματων κυψελωτών επικοινωνιών.

Το πρώτο κεφάλαιο περιγράφει την ταχύτερη εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών στις πρόσφατες δεκαετίες αλλά και τις προοπτικές των για το εγγύς μέλλον. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της θεωρίας της κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας. Έτσι οι έννοιες της επαναχρησιμοποίησης συχνότητας, της μεταπομπής, των παρεμβολών και της εξυπηρέτησης δεδομένης τηλεφωνικής κίνησης που είναι κεντρικές στην κατανόηση της σχεδίασης και υλοποίησης ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας με περιορισμένο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων αποτελούν θέματα διαπραγμάτευσης του δευτέρου κεφαλαίου. Το κεφάλαιο τρία διαπραγματεύεται φαινόμενα διάδοσης

ραδιοκυμάτων σε μακροσκοπικό επίπεδο (απώλειες και στατιστική καναλιού διάδοσης, ραδιοσκίαση). Αντικείμενο του τρίτου κεφαλαίου αποτελεί επίσης η επίδραση των φαινομένων διάδοσης στο κανάλι επικοινωνίας και οι επιπτώσεις τους στην σχεδίαση του πομποδέκτη (modem) της κινητής τηλεφωνίας. Στο κεφάλαιο τέσσερα περιγράφεται η αρχιτεκτονική του εξαιρετικά επιτυχημένου ευρωπαϊκού προτύπου GSM που συνετέλεσε στην ευρύτατη διάδοση των υπηρεσιών κινητών επικοινωνιών σε παγκόσμια κλίμακα. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται η τεχνική διασποράς φάσματος και το Ευρωπαϊκό πρότυπο κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς, κυρίως στο φυσικό επίπεδο.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Το πρώτο σύστημα επικοινωνίας ασύρματης μετάδοσης έλαβε χώρα στα τέλη του 19^{ου} αιώνα όταν ο Guglielmo Marconi παρουσίασε πρώτος τις δυνατότητες του ασυρμάτου. Έκτοτε ο κλάδος των ασύρματων επικοινωνιών γνώρισε ραγδαία εξέλιξη, με την ανάπτυξη του ραντάρ, της ραδιοφωνίας και τηλεόρασης, των μικροκυματικών αναμεταδοτών, των αεροναυτικών, ναυτικών και δορυφορικών επικοινωνιών και στις τελευταίες δεκαετίες με την καταγιστική εξάπλωση της κινητής τηλεφωνίας. Σήμερα στην χώρα μας το ποσοστό διείσδυσης της κινητής τηλεφωνίας έφθασε το έτος 2006 στο εκπληκτικό ποσοστό του 123% του πληθυσμού, -δηλαδή 13,140,000 ενεργές συνδέσεις- όντας το δεύτερο υψηλότερο ποσοστό στον κόσμο! Στην εκπληκτική επιτυχία της κινητής τηλεφωνίας συνετέλεσε μια σειρά σημαντικών παραγόντων, όπως η πρόοδος που επετεύχθη στην κατασκευή ψηφιακών κυκλωμάτων και κυκλωμάτων ραδιοσυχνοτήτων, στην ολοκλήρωση κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας (VLSI) και στην αλματώδη ανάπτυξη της μικροτεχνολογίας που κατέστησαν εφικτή την κατασκευή αξιόπιστου και μικρού μεγέθους φορητού ραδιοεξοπλισμού με οικονομικό τρόπο.

1.1 Εξέλιξη των κινητών ραδιοεπικοινωνιών

Την χρονική αυτή στιγμή, οι κινητές επικοινωνίες έχουν όχι μόνο καθιερωθεί παγκοσμίως αλλά θα έλεγε κανείς -και ιδίως οι κοινωνιολόγοι- ότι σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν καθιερώσει και ένα νέο τρόπο ζωής, τον οποίο αποφασιστικά χαρακτηρίζει η συνεχής και απρόσκοπτη δυνατότητα του χρήστη

να επικοινωνήσει στιγμιαία από οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη με τον οποιοδήποτε. Εν τούτοις λίγοι συνειδητοποιούν ότι ιστορικά η εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών υπήρξε αργή και πάντοτε συνδεδεμένη με την πρόοδο των τεχνολογικών εξελίξεων. Η δυνατότητα προσφοράς υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας σε μεγάλες πληθυσμιακές μάζες συνειδητοποιήθηκε μόλις στις δεκαετίες του 60 και του 70 όταν ερευνητές στα Bell Laboratories ανέπτυξαν τις αρχές λειτουργίας της κυψελωτής επικοινωνίας. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας στερεάς κατάστασης κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1970, επετεύχθη η κατασκευή φθηνού ραδιοκυματικού εξοπλισμού μικρού μεγέθους και υψηλής αξιοπιστίας προετοιμάζοντας το έδαφος για την έλευση της εποχής της κινητής τηλεφωνίας. Επομένως η σημερινή θεαματική εξάπλωση των κινητών προσωπικών επικοινωνιών είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ωρίμανση των τεχνολογικών επιτευγμάτων της δεκαετίας του 1970. Το μέλλον των κινητών προσωπικών επικοινωνιών διαγράφεται λαμπρό. Οι διαδικασίες αδειοδότησης για την ανάπτυξη κι εκμετάλλευση δικτύων κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς έχουν περατωθεί στις Ευρωπαϊκές χώρες ενώ τα δίκτυα και οι σχετικές υποδομές εξασφαλίζουν στους πολίτες πλήρεις υπηρεσίες 3^{ης} γενιάς. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τα αποτελέσματα της αδειοδότηση κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς στον παγκόσμιο χώρο, δίδοντας στοιχεία για το πλήθος, την μεθοδολογία απονομής και την ημερομηνία χορήγησης των αδειών σε κάθε χώρα.

<i>Χώρα</i>	<i>Χορηγηθείσες άδειες Μέθοδος μέχρι σήμερα</i>	<i>Ημερομηνία απονομής</i>
Europe, Middle East & Africa		
Austria	6	Δημοπρασία
Belgium	3	Δημοπρασία
Croatia	0 (από 2)	Δημοπρασία
Czech Republic	2 (από 3)	Δημοπρασία
Denmark	4	Σφραγισμένων προσφορών
Estonia	0 (από 4;)	Καλλιστεία
Finland	4 + 2 περιφερ.	Καλλιστεία
France	2 (από 4)	Καλλιστεία
Germany	6	Δημοπρασία
Greece	3 (από 4)	Δημοπρασία
Ireland	3	Καλλιστεία
Isle of Man	1	Μη εφαρμόσιμο
		Νοέμβριος 2000
		Φεβρουάριος 2001
		Μάρτιος 2003
		Δεκέμβριος 2001
		Σεπτέμβριος 2001
		2002;
		Μάρτιος 2000
		Μάιος 2001
		Ιούλιος 2000
		Ιούλιος 2001
		2002
		Μάιος 2000

Israel	3	Δημοπρασία	Δεκέμβριος 2001
Italy	5	Δημοπρασία	Οκτώβριος 2000
Latvia	3	Καλλιστεία	ΠΝΕ
Liechtenstein	1	Μη εφαρμόσιμο	Φεβρουάριος 2000
Luxembourg	0 (από 4)	Καλλιστεία	Μάιος 2002
Monaco	1	Μη εφαρμόσιμο	Ιούνιος 2000
Netherlands	5	Δημοπρασία	Ιούλιος 2000
Norway	3 (από 4)	Καλλιστεία	Δεκέμβριος 2000
		σε συνδυασμό με ετήσια τέλη	
Poland	3 (από 4)	Καλλιστεία (ανεβλήθη)	Δεκέμβριος 2000
Portugal	4	Καλλιστεία	Δεκέμβριος 2000
Romania	4	Δημοπρασία	Αρχές 2003
Russia	4	Καλλιστεία	2003
Slovakia	3	Καλλιστεία	Αύγουστος 2002
Slovenia	1 (από 3)	Δημοπρασία	Νοέμβριος 2001
Spain	4	Καλλιστεία	Μάρτιος 2000
South Africa	2 (από 5)	Χωρίς διαγωνισμό	2003-2004
Sweden	4	Καλλιστεία	Δεκέμβριος 2000
Switzerland	4	Δημοπρασία	Δεκέμβριος 2000
Turkey	1 (από 4)	Δημοπρασία	Σεπτέμβριος 2007
United Arab Emirates	3	Προσφορές	2003-2007
United Kingdom	5	Δημοπρασία	Απρίλιος 2000
Asia Pacific			
Australia	6	Δημοπρασία	Μάρτιος 2001
China	4	Καλλιστεία	Αρχές 2003;
Hong Kong	4	Ποσοστό επί τζίρου	Σεπτέμβριος 2001
India	3-5	Δημοπρασία	2002;
Indonesia	3-5	Καλλιστεία	ΠΝΕ
Japan	3	Καλλιστεία	Ιούνιος 2000
Malaysia	3	Καλλιστεία	Ιούλιος 2002
New Zealand	4	Δημοπρασία	Ιούλιος 2000
Philippines	3	Δημοπρασία	ΠΝΕ
Singapore	3 (από 4)	Χωρίς διαγωνισμό	Απρίλιος 2001
South Korea	3	Καλλιστεία	Δεκέμβριος 2000
Taiwan	5	Δημοπρασία	Φεβρουάριος 2002
Thailand	4	ΠΝΕ	
Americas			
Canada	5	Δημοπρασία	Ιανουάριος 2001
Chile	ΠΝΕ	ΠΝΕ	ΠΝΕ
Honduras	0 (από 1)	Δημοπρασία 2002	
Jamaica	0 (από 2)	Δημοπρασία 2002	
Uruguay	ΠΝΕ	Δημοπρασία 2002	
USA	ΠΝΕ	ΠΝΕ	ΠΝΕ
Venezuela	ΠΝΕ	ΠΝΕ	ΠΝΕ

Πίνακας 1-1. Παγκόσμια πρόοδος στην αδειοδότηση υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς (μέχρι το έτος 2004).

1.2 Παραδείγματα συστημάτων κινητών επικοινωνιών

Οι περισσότεροι από εμάς γνωρίζουν διάφορα συστήματα κινητών επικοινωνιών που χρησιμοποιούνται στην καθημερινή μας ζωή. Παραδείγματα κινητών επικοινωνιών αποτελούν οι μηχανισμοί για τον τηλεχειρισμό θυρών, τηλεχειριστήρια τηλεόρασης και στερεοφωνικών συγκροτημάτων, φορητοί ασύρματοι, βομβητές και φυσικά κινητά τηλέφωνα. Ο όρος **φορητό (portable)** χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει κάθε ραδιοτερματικό το οποίο είναι προσαρτημένο σε ένα όχημα που κινείται με υψηλή ταχύτητα και ο όρος **κινητό (mobile)** χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει κάθε ραδιοτερματικό το οποίο είναι χειρομεταφερόμενο και χρησιμοποιείται από χρήστη που μετακινείται με ταχύτητα βάδισης. Ο όρος **συνδρομητής (subscriber)** χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει έναν κινητό ή φορητό χρήστη, διότι στα περισσότερα συστήματα κινητών επικοινωνιών ο χρήστης καταβάλλει κάποιο αντίτιμο για να χρησιμοποιήσει το σύστημα. Κάθε δε συσκευή ανήκουσα στον χρήστη, ονομάζεται **συνδρομητική συσκευή (subscriber unit)**. Γενικά το σύνολο των χρηστών σε ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας ονομάζονται **κινητά (mobiles)** ή **χρήστες (users)**, παρά το γεγονός ότι κάποιοι από τους χρήστες στην πραγματικότητα μπορεί να χρησιμοποιούν φορητό εξοπλισμό. Τα κινητά επικοινωνούν με σταθερούς **σταθμούς βάσης (base stations)**, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι σε ένα **σταθερό δίκτυο κορμού (backbone network)**. Ο Πίνακας 2 παραθέτει τους κυριότερους όρους που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των βασικών δομικών στοιχείων ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας.

Όρος	Ορισμός
Σταθμός Βάσης Base Station (BS)	Ένας σταθερός σταθμός σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας που χρησιμοποιείται για επικοινωνία με τους κινητούς σταθμούς. Οι σταθμοί βάσης τοποθετούνται στο κέντρο ή την άκρη της περιοχής κάλυψης και αποτελούνται από κανάλια ραδιοεπικοινωνίας και κεραίες εκπομπής και λήψης τοποθετημένες σε κατάλληλα διαμορφωμένο ιστό.
Κινητός Σταθμός Mobile Station (MS)	Σταθμός εντασσόμενος στα πλαίσια δικτύου κυψελωτής τηλεφωνίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εν κινήσει και σε μη προκαθορισμένες τοποθεσίες.
Δίαυλος Ελέγχου Control Channel	Δίαυλοι ραδιοεπικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση πληροφορίας που αφορά στην προετοιμασία, αίτηση και έναρξη της κλήσης και άλλων παραμέτρων ελέγχου και σηματοδότησης μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού.
Καθοδικός Δίαυλος Forward Channel	Δίαυλος ραδιοεπικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την μετάδοση πληροφορίας από το σταθμό βάσης προς το κινητό.
Ανοδικός Δίαυλος Reverse Channel	Δίαυλος ραδιοεπικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την μετάδοση πληροφορίας από το κινητό προς το σταθμό βάσης.
Κέντρο Μεταγωγής Mobile Switching Centre (MSC)	Κέντρο μεταγωγής που συντονίζει την δρομολόγηση κλήσεων στα όρια μιας περιοχής εξυπηρέτησης ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Το κέντρο μεταγωγής συνδέει το συγκεκριμένο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με άλλα σταθερά ή κινητά δίκτυα.
Μεταπομπή Handoff	Η διαδικασία της μεταφοράς ενός κινητού σταθμού από ένα κανάλι ή σταθμό βάσης σε κάποιο άλλο ή άλλον, αντίστοιχα.
Συνδρομητής Subscriber	Ένας χρήστης ο οποίος καταβάλλει συνδρομητικά τέλη σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για να το χρησιμοποιήσει.
Περιαγωγή Roaming	Η εξυπηρέτηση ενός κινητού σταθμού από δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στο οποίο ο χρήστης δεν είναι συνδρομητής.

Πίνακας 1-2. Ορισμοί βασικών όρων στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας.

Τα κινητά συστήματα επικοινωνιών μπορούν να ταξινομηθούν σε **μονοδρομικής (simplex)**, **ημι-αμφίδρομης (semi-duplex)** και **αμφίδρομης (duplex)** κατεύθυνσης. Στα συστήματα μονοδρομικής κατεύθυνσης η επικοινωνία είναι εφικτή μόνον προς την μία κατεύθυνση. Για παράδειγμα συστήματα τηλεειδοποίησης στα οποία μηνύματα αποστέλλονται αλλά δεν υπάρχει η δυνατότητα επιβεβαίωσης της αποστολής τους από τον παραλήπτη είναι συστήματα μονοδρομικής κατεύθυνσης. Συστήματα ημι-αμφίδρομης κατεύθυνσης είναι αυτά που επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία, αλλά με την

χρήση ενός κοινού ραδιοδιαύλου τόσο για εκπομπή όσο και για λήψη. Στα συστήματα αυτά ο χρήστης μπορεί είτε να λαμβάνει είτε να αποστέλλει σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Τυπικό παράδειγμα αυτού του τύπου επικοινωνίας αποτελούν τα γνωστά σε όλους μας ειδικά ραδιοδίκτυα που χρησιμοποιούν τα ταξί. Τέλος, στα αμφίδρομου τύπου συστήματα η αποστολή και η λήψη πληροφορίας επιτρέπεται ταυτόχρονα και στα δύο άκρα του συστήματος, με την ταυτόχρονη χρήση δύο ξεχωριστών ραδιοδιαύλων επιμερισμένων είτε στο πεδίο της συχνότητας (**frequency division duplex - FDD**), είτε του χρόνου (**time division duplex - TDD**), είτε στον κώδικα διασποράς (**coded division duplex - CDD**).

Ο επιμερισμός στο πεδίο της συχνότητας πραγματοποιείται με την ταυτόχρονη χρήση του καθοδικού ραδιοδιαύλου από το σταθμό βάσης προς τον κινητό σταθμό και του ανοδικού ραδιοδιαύλου από τον κινητό σταθμό προς το σταθμό βάσης. Στο σταθμό βάσης χρησιμοποιούνται ξεχωριστές κεραίες για την εκπομπή του καθοδικού ραδιοδιαύλου και την λήψη του ανοδικού ραδιοδιαύλου. Στον κινητό σταθμό όμως, η ίδια κεραία χρησιμοποιείται τόσο για εκπομπή όσο και για λήψη. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση μιας διάταξης που ονομάζεται διπλέκτης (**duplexer**), η οποία επιτρέπει στον κινητό σταθμό να χρησιμοποιήσει την ίδια κεραία για ταυτόχρονη εκπομπή και λήψη. Για την επιτυχή αξιοποίηση της τεχνικής του επιμερισμού της συχνότητας (FDD) στον κινητό σταθμό, θα πρέπει οι συχνότητες εκπομπής και λήψης να απέχουν κατά ένα ποσοστό περίπου ίσο προς το 5% της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας της ζώνης εντός της οποίας λειτουργεί το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (π.χ. στο πρότυπο GSM η απόσταση μεταξύ ενός ζεύγους καθοδικού και ανοδικού ραδιοδιαύλου είναι 45MHz, δηλαδή ακριβώς το 5% των 900MHz που αντιστοιχεί στην κεντρική συχνότητα).

Η τεχνική του επιμερισμού του χρόνου (TDD) εκμεταλλεύεται την δυνατότητα ενός ραδιοδιαύλου να επιμεριστεί στο χρόνο, έτσι ώστε για ένα ποσοστό του χρόνου να χρησιμοποιηθεί για την αποστολή πληροφορίας από το σταθμό βάσης

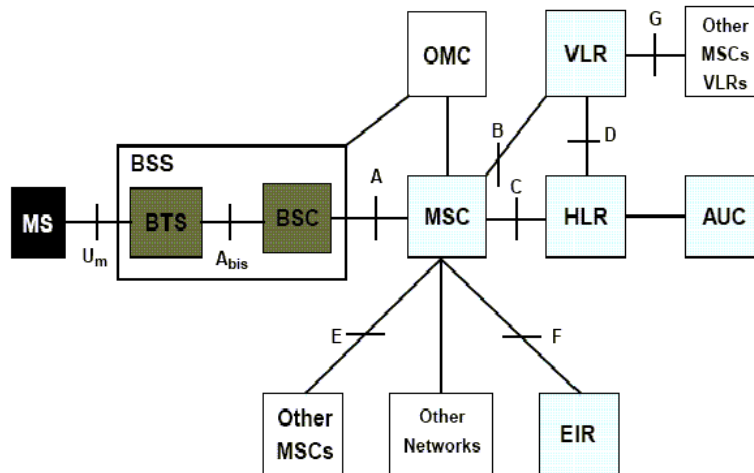
προς το κινητό και το υπόλοιπο του χρόνου να χρησιμοποιηθεί για την αποστολή πληροφορίας από το κινητό προς το σταθμό βάσης. Επιπλέον, εάν ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας στο ραδιοδίαυλο είναι πολύ μεγαλύτερος από τον ρυθμό παραγωγής πληροφορίας στο άκρο του χρήστη, καθίσταται δυνατή η αποθήκευση ριπών πληροφορίας και η δημιουργία της εντύπωσης πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας (full duplex) στο χρήστη, παρά το γεγονός ότι στην πραγματικότητα δεν υφίστανται δύο ταυτόχρονες ραδιομεταδόσεις σε κάθε χρονική στιγμή. Η τεχνική TDD είναι υλοποιήσιμη αποκλειστικά και μόνο από ψηφιακά τηλεπικοινωνιακά συστήματα και όπως είναι φυσικό είναι πολύ ευαίσθητη σε ζητήματα χρονισμού.

1.3 Συστήματα κυψελωτής τηλεφωνίας

Ένα κυψελωτό σύστημα κινητής τηλεφωνίας εξασφαλίζει την διασύνδεση κάθε χρήστη που ευρίσκεται εντός των ορίων ραδιοκάλυψης του συστήματος αυτού με το δημόσιο δίκτυο σταθερής τηλεφωνίας (public switched telephone network - PSTN). Τα κυψελωτά συστήματα εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό χρηστών εντός των ορίων μιας μεγάλης γεωγραφικής περιοχής κάνοντας χρήση περιορισμένης ποσότητας φάσματος ραδιοσυχνοτήτων. Οι προσφερόμενες από τα συστήματα αυτά υπηρεσίες είναι υψηλού επιπέδου και συχνά συγκρίσιμες σε ποιότητα με ανάλογες υπηρεσίες που προσφέρονται από δίκτυα σταθερής τηλεφωνίας. Η υψηλή χωρητικότητα που απαιτείται για την εξυπηρέτηση του μεγάλου αριθμού χρηστών εξασφαλίζεται με την εκμετάλλευση της αρχής της επαναχρησιμοποίησης των ραδιοσυχνοτήτων (διαύλων). Η περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης περιορίζεται σε μια μικρή σχετικά γεωγραφική περιοχή η οποία αποκαλείται **κυψέλη (cell)**, επιτρέποντας έτσι την επαναχρησιμοποίηση των ίδιων ραδιοδιαύλων από άλλη κυψέλη που ευρίσκεται σε κάποια απόσταση από την πρώτη. Μια εξελιγμένη διακοπτική (switching) τεχνική που ονομάζεται **μεταπομπή (handoff)** επιτρέπει στην τηλεφωνική κλήση να συνεχίσει απρόσκοπτα όταν ο χρήστης μετακινείται από την μία κυψέλη στην άλλη.

Το

Σχήμα 1-1 δείχνει ένα βασικό σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας που αποτελείται από κινητούς σταθμούς, σταθμούς βάσης, σταθμούς ελέγχου σταθμών βάσης και ένα κέντρο μεταγωγής. Κάθε κινητό επικοινωνεί ασύρματα με έναν από τους σταθμούς βάσης και είναι δυνατόν να μεταχθεί σε όσους σταθμούς βάσης απαιτείται κατά την διάρκεια μιας κλήσης. Ο κινητός σταθμός περιλαμβάνει διάταξη **πομποδέκτη (transceiver)**, κεραία και κυκλώματα ελέγχου. Ο σταθμός βάσης αποτελείται από αρκετούς πομπούς και δέκτες οι οποίοι διαχειρίζονται ταυτόχρονα πολλές αμφίδρομες επικοινωνίες και διαθέτουν αρκετές κεραίες εκπομπής και λήψης που αναρτούνται σε ειδικούς ιστούς στήριξης. Ο σταθμός βάσης δρα ουσιαστικά ως γέφυρα συνδέοντας όλους τους χρήστες που ευρίσκονται στη γεωγραφική περιοχή που εξυπηρετεί μέσω τηλεφωνικών γραμμών ή μικροκυματικών ζεύξεων με το κέντρο ελέγχου σταθμών βάσης και στην συνέχεια με το αρμόδιο κέντρο μεταγωγής. Ακολουθως, το κέντρο μεταγωγής συντονίζει τις λειτουργίες όλων των σχετικών σταθμών βάσης δια μέσω του κέντρου ελέγχου σταθμών βάσης και συνδέει το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας με άλλα ομοειδή ή το σταθερό δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο προκειμένου να δρομολογηθούν με κατάλληλο τρόπο οι τηλεφωνικές κλήσεις. Ένα τυπικό κέντρο μεταγωγής μπορεί να εξυπηρετήσει αρκετές δεκάδες χιλιάδες συνδρομητών και αρκετές χιλιάδες ταυτόχρονων συνδιαλέξεων και είναι επίσης υπεύθυνο για την τιμολόγηση των υπηρεσιών και την συντήρηση του συστήματος. Σε μεγάλες πόλεις απαιτείται η εγκατάσταση αρκετών κέντρων μεταγωγής για την εξυπηρέτηση των τηλεπικοινωνιακών αναγκών των χρηστών από μια εταιρεία κινητής τηλεφωνίας.



Σχήμα 1-1. Τυπική αρχιτεκτονική δικτύου ψηφιακής κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} γενιάς (Εδώ το ευρωπαϊκό πρότυπο GSM παρουσιάζεται σχηματικά).

Η επικοινωνία μεταξύ του σταθμού βάσης και των κινητών σταθμών καθορίζονται από μία προτυποποιημένη κοινή ραδιοδιεπαφή (common air interface - CAI) που προβλέπει τέσσερα διαφορετικά κανάλια. Τα κανάλια που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά φωνής από το σταθμό βάσης προς το κινητό και από το κινητό προς το σταθμό βάσης, ονομάζονται καθοδικά κανάλια ομιλίας (forward voice channels - FVC) και ανοδικά κανάλια ομιλίας (reverse voice channels - RVC), αντίστοιχα. Κατ' ανάλογο τρόπο, τα κανάλια που προετοιμάζουν την πραγματοποίηση των κινητών τηλεφωνικών κλήσεων ονομάζονται καθοδικά κανάλια ελέγχου (forward control channels - FCC) και ανοδικά κανάλια ελέγχου (reverse control channels - RCC), αντίστοιχα. Τα κανάλια ελέγχου μεταδίδουν και λαμβάνουν μηνύματα τα οποία περιέχουν αιτήματα για έναρξη κλήσεων και υπηρεσιών και λαμβάνονται από τα κινητά όταν αυτά δεν εξυπηρετούν τηλεφωνική συνδιάλεξη. Τα καθοδικά κανάλια λειτουργούν ως 'φάροι' που συνεχώς εκπέμπουν όλα τα αιτήματα για τηλεφωνική συνδιάλεξη προς όλα τα κινητά τηλέφωνα του συστήματος.

1.4 Πως πραγματοποιείται μια τηλεφωνική κλήση

Όταν ένα κινητό τηλέφωνο ενεργοποιείται και δεν ευρίσκεται απασχολημένο σε κλήση, εξετάζει την ομάδα των ευθέων καναλιών ελέγχου για να διαπιστώσει ποιο από αυτά έχει το ισχυρότερο σήμα. Στην συνέχεια ‘παρακολουθεί’ αυτό το κανάλι έως ότου το σήμα πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη μη αποδεκτή στάθμη. Εάν αυτό συμβεί, τότε εξετάζει εκ νέου τα καθοδικά κανάλια ελέγχου για να διαπιστώσει ποιος είναι ο σταθμός βάσης με το ισχυρότερο σήμα και στην συνέχεια ‘κλειδώνει’ σε αυτόν. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται αδιαλείπτως, έτσι ώστε το κινητό να ευρίσκεται πάντοτε ‘συνδεδεμένο’ με τον σταθμό βάσης με το ισχυρότερο σήμα. Για την μεγάλη πλειοψηφία των ενεργών συστημάτων κινητής τηλεφωνίας τα κανάλια ελέγχου είναι ορισμένα και προτυποποιημένα εντός ολοκλήρου της γεωγραφικής περιοχής κάλυψης του δικτύου και αποτελούν συνήθως το 5% του συνολικού αριθμού των διαθέσιμων καναλιών. Επίσης επειδή τα κανάλια ελέγχου είναι προτυποποιημένα και όμοια μεταξύ τους ακόμα και σε διαφορετικές αγορές, χώρες ή ακόμα και ηπείρους, κάθε κινητή συσκευή εξετάζει τα ίδια κανάλια (συχνότητες) όταν είναι ανενεργή.

Όταν γίνεται μια κλήση από ένα συνδρομητή του σταθερού δημόσιου δικτύου PSTN προς ένα χρήστη κινητού τηλεφώνου, το κέντρο μεταγωγής προωθεί το αίτημα προς όλους τους σταθμούς βάσης του συστήματος κινητής τηλεφωνίας. Αυτό επιτυγχάνεται με την προώθηση του αριθμού ταυτότητας του κινητού (mobile identification number - MIN), -που αποτελεί κατ’ ουσία τον αριθμό κλήσης του κινητού,- δια μέσου των καθοδικών καναλιών ελέγχου (FCC) από όλους τους σταθμούς βάσης του συστήματος. Το κινητό λαμβάνει το μήνυμα από τον σταθμό βάσης με τον οποίο είναι εκείνη τη χρονική στιγμή συνδεδεμένο και ανταποκρίνεται στο σταθμό βάσης επιβεβαιώνοντας τον αριθμό του και αποστέλλοντας τον ηλεκτρονικό σειριακό αριθμό του (electronic serial number - ESN) και το επίπεδο της ενεργειακής του ικανότητας (station class mark - SCM)

δια μέσω του ανοδικού καναλιού ελέγχου. Εν συνεχεία ο σταθμός βάσης προωθεί τα στοιχεία αυτά και το μήνυμα επιβεβαίωσης στο κέντρο μεταγωγής (MSC) και το ενημερώνει για την ανταλλαγή σημάτων ελέγχου μεταξύ αυτού και του κινητού. Ακολούθως και αφού το κέντρο μεταγωγής εξακριβώσει ότι τα στοιχεία του κινητού είναι έγκυρα, ζητά από τον σταθμό βάσης να δεσμεύσει στην κυψέλη ευθύνης του ένα ζεύγος μη χρησιμοποιούμενων καναλιών (τυπικά σε κάθε κυψέλη χρησιμοποιούνται από δέκα έως εξήντα ζεύγη καναλιών ομιλίας και ένα ζεύγος καναλιών ελέγχου). Σε αυτό το σημείο ο σταθμός βάσης ζητά από το κινητό να αλλάξει συχνότητες και να μεταβεί σε ένα ελεύθερο ζεύγος καναλιών ομιλίας, ενώ ταυτόχρονα αποστέλλει ένα μήνυμα (το μήνυμα αυτό ονομάζεται συναγερμός - alert) δια μέσου του καθοδικού καναλιού ελέγχου που υποχρεώνει το κινητό να χτυπήσει, έτσι ώστε ο χρήστης να απαντήσει την συσκευή του. Ο Πίνακας 1-3 παρουσιάζει την σειρά με την οποία οι παραπάνω ενέργειες λαμβάνουν χώρα. Οι ενέργειες αυτές λαμβάνουν χώρα εντός λίγων δευτερολέπτων και δεν γίνονται αντιληπτές από τον χρήστη.

Καθ' όση διάρκεια μια κλήση ευρίσκεται σε εξέλιξη, το κέντρο μεταγωγής ή το κέντρο ελέγχου σταθμών βάσης κατά περίπτωση, ρυθμίζει την εκπέμπουσα ισχύ του κινητού και αλλάζει τα κανάλια ομιλίας τόσο του κινητού όσο και του σταθμού βάσης έτσι ώστε να διατηρήσει την επιθυμητή ποιότητα κλήσης καθώς ο συνδρομητής μετακινείται εντός και εκτός της περιοχής κάλυψης του κάθε σταθμού βάσης. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται **μεταπομπή (handoff)**. Ο δυναμικός έλεγχος του κινητού σταθμού από τον σταθμό βάσης και το κέντρο μεταγωγής καθόσον μια κλήση ευρίσκεται σε εξέλιξη, επιτυγχάνεται με κατάλληλη κωδικοποίηση σημάτων ελέγχου στα κανάλια ομιλίας.

Από την άλλη πλευρά, όταν δηλαδή ένας χρήστης κινητού τηλεφώνου επιθυμεί την σύνδεση με έναν χρήστη του δημόσιου σταθερού δικτύου PSTN, το αίτημα για την έναρξη της κλήσης διαβιβάζεται δια μέσου του ανοδικού καναλιού ελέγχου. Με το αίτημα το κινητό αποστέλλει στο υπεύθυνο σταθμό βάσης τον αριθμό κλήσης του συνδρομητή του PSTN, τον ηλεκτρονικό σειριακό αριθμό του

(ESN) και το επίπεδο της ενεργειακής του ικανότητας (SCM). Ο σταθμός βάσης προωθεί την πληροφορία αυτή στο κέντρο μεταγωγής (MSC). Το κέντρο μεταγωγής εξακριβώνει την εγκυρότητα των παραμέτρων του κινητού σταθμού, εν συνεχεία πραγματοποιεί την σύνδεση με τον καλούμενο χρήστη δια μέσου του PSTN και ζητά από τον σταθμό βάσης να εκκινήσει την μετάβαση του κινητού σε κάποιο διαθέσιμο ζεύγος καναλιών ομιλίας. Αφού ολοκληρωθεί η απαραίτητη ανταλλαγή σημάτων ελέγχου μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τηλεφώνου δια μέσω των καναλιών ελέγχου, αρχίζει η συνομιλία χρησιμοποιώντας το καθορισμένο ζεύγος καναλιών ομιλίας. Ο Πίνακας 1-4 παρουσιάζει την χρονική ακολουθία των ενεργειών που μεσολαβούν από την αρχική αίτηση για κλήση μέχρι και την έναρξη της συνομιλίας. Στην περίπτωση που τα δύο άκρα της κλήσης είναι χρήστες διαφορετικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας, η αλληλουχία γεγονότων είναι παρόμοια, με την διαφορά ότι η διασύνδεση του ενός δικτύου με το άλλο πραγματοποιείται μεταξύ των αρμόδιων MSCs των δικτύων.

MSC		Δέχεται κλήση από PSTN. Αποστέλλει το αιτούμενο MIN σε όλους τους σταθμούς βάσης			Εξακριβώνει ότι το κινητό έχει έγκυρο συνδυασμό MIN και ESN.	Ζητά από το BS να οδηγήσει το κινητό σε μη δεσμευμένο ζεύγος καναλιών ομιλίας.		Συνδέει το κινητό με το συνδρομητή του δικτύου PSTN που εκκίνησε την κλήση.
	BTS	FCC	Μεταδίδει σελίδα (MIN) για τον συγκεκριμένο χρήστη.				Μεταδίδει μήνυμα προς το κινητό να μετακινηθεί σε συγκεκριμένο ζεύγος καναλιών ομιλίας.	
		RCC			Λαμβάνει MIN, ESN, Station Class Mark και το προωθεί στο MSC.			
		FVC						Ξεκινά τη μετάδοση ομιλίας.
RVC							Ξεκινά τη λήψη ομιλίας.	
MS	FCC	Λαμβάνει σελίδα και ταυτίζει το MIN με το δικό του MIN.					Λαμβάνει μήνυμα για μετακίνηση σε συγκεκριμένο ζεύγος καναλιών ομιλίας.	
	RCC			Επιβεβαιώνει λήψη του MIN και αποστέλλει ESN και Station Class Mark.				
	FVC							Ξεκινά τη λήψη ομιλίας.
	RVC							Ξεκινά τη μετάδοση ομιλίας.

Χρόνος, t \longrightarrow

Πίνακας 1-3. Διάγραμμα χρονισμού που δείχνει τα στάδια που μεσολαβούν για να λάβει χώρα μια κλήση από ένα χρήστη του σταθερού δικτύου PSTN προς ένα χρήστη με κινητό τηλέφωνο.

MSC			Λαμβάνει το αίτημα για κλήση και εξακριβώνει ότι το κινητό έχει έγκυρο συνδυασμό MIN και ESN.	Ζητά από το BS να οδηγήσει το κινητό σε μη δεσμευμένο ζεύγος καναλιών ομιλίας.		Συνδέει το κινητό με τον κληθέντα συνδρομητή του δικτύου PSTN.	
BTS	FCC				Μεταδίδει μήνυμα προς το κινητό ζητώντας να μετακινηθεί σε συγκεκριμένο ζεύγος καναλιών ομιλίας.		
	RCC	Δέχεται αίτηση για κλήση και τα στοιχεία MIN, ESN και SCM.					
	FVC						Ξεκινά τη μετάδοση ομιλίας.
	RVC						Ξεκινά τη λήψη ομιλίας.
MS	FCC				Ταυτοποίηση MIN και λήψη οδηγιών για μετακίνηση σε συγκεκριμένο ζεύγος καναλιών ομιλίας.		
	RCC	Αποστέλλει αίτημα για κλήση, τον αριθμό του κληθέντος και τα στοιχεία MIN, ESN και SCM.					
	FVC						Ξεκινά τη λήψη ομιλίας.
	RVC						Ξεκινά τη μετάδοση ομιλίας.

Χρόνος, t \longrightarrow

Πίνακας 1-4. Διάγραμμα χρονισμού που δείχνει τα στάδια που μεσολαβούν για να λάβει χώρα μια κλήση από ένα χρήστη κινητού τηλεφώνου προς ένα χρήστη του σταθερού δικτύου PSTN.

1.5 Προβλήματα

- 1.1) Ποιοτικά περιγράψτε πως ενδεχομένως διαφέρουν οι απαιτήσεις των κινητών και φορητών συσκευών αναφορικά στην κατανάλωση ισχύος. Πως επηρεάζει σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας το μέγεθος της κυψέλης την ζωή της μπαταρίας του κινητού τηλεφώνου;
- 1.2) Υποθέσατε ότι ένα κινητό τηλέφωνο διαθέτει μπαταρία χωρητικότητας 750mAh και ότι κατά την αναμονή 'τραβάει' 4mA ενώ κατά τη διάρκεια μιας συνομιλίας 'τραβάει' ρεύμα 35mA και 250mA κατά τη λήψη και εκπομπή, αντίστοιχα. Για πόση ώρα το κινητό τηλέφωνο μπορεί να λειτουργήσει εάν ο χρήστης κάνει ένα τρίλεπτο τηλεφώνημα κατανέμοντας ισόποσα τον χρόνο λήψης και εκπομπής α) την ημέρα; β) κάθε έξη ώρες; γ) κάθε ώρα; Ποιος είναι ο μέγιστος διαθέσιμος χρόνος ομιλίας για το συγκεκριμένο τηλέφωνο; Θα αγοράζατε το συγκεκριμένο τηλέφωνο;
- 1.3) Συζητήστε την σπουδαιότητα των περιφερειακών και διεθνών οργανισμών προτυποποίησης, όπως η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU), το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunication Standardisation Institute - ETSI) και το Παγκόσμιο Συνέδριο Ραδιοεπικοινωνιών (World Radio Conference - WRC). Αξιολογήστε τα ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που συνεπάγεται η χρήση διαφορετικών συχνοτήτων και η υιοθέτηση διαφορετικών προτύπων ασύρματων κινητών επικοινωνιών σε διαφορετικές περιοχές του κόσμου.
- 1.4) Συζητήστε τις ομοιότητες και διαφορές μεταξύ ενός συμβατικού επίγειου συστήματος κινητής τηλεφωνίας και ενός που βασίζεται στο διάστημα. Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εκάστου συστήματος; Ποιο σύστημα θα μπορούσε να εξυπηρετήσει μεγαλύτερο αριθμό χρηστών για

δεδομένη κατανομή συχνοτήτων; Ποιες θα ήταν οι επιπτώσεις στο κόστος της υπηρεσίας για κάθε συνδρομητή;

- 1.5) Γιατί στα περισσότερα σύγχρονα συστήματα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιείται διαμόρφωση συχνότητας (FM) αντί πλάτους (AM); Παραθέστε όσους λόγους νομίζετε και αιτιολογείστε τους. (για παράδειγμα αξιολογείστε ζητήματα όπως αυτά της αξιοπιστίας, κατανάλωσης ισχύος, θορύβου, κλπ.)

2 ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΚΥΨΕΛΩΤΗΣ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑΣ - ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ

Η φιλοσοφία σχεδίασης των πρώτων συστημάτων κινητής τηλεφωνίας ήταν η επίτευξη ραδιοκάλυψης σε μεγάλη έκταση χρησιμοποιώντας έναν πομπό υψηλής ισχύος και με την κεραία του εγκατεστημένη σε ένα μεγάλου ύψους ιστό. Παρά το γεγονός ότι αυτή η προσέγγιση εξασφάλιζε πολύ καλή ραδιοκάλυψη, ταυτόχρονα σήμαινε ότι ήταν αδύνατη η επαναχρησιμοποίηση των ιδίων συχνοτήτων εντός των ευρύτατων αυτών ορίων κάλυψης. Για παράδειγμα τα πρώτα αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας μπορούσαν να εξυπηρετήσουν μόλις μερικές δεκάδες ταυτόχρονες συνδιαλέξεις σε εκτάσεις χιλιάδων τετραγωνικών χιλιομέτρων. Επιπροσθέτως η αδυναμία των εθνικών ρυθμιστικών αρχών να καταλείμουν επαρκές φάσμα για την κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων απαιτήσεων για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, οδήγησε στην αναθεώρηση των αρχών σχεδίασης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών. Έτσι, για την ανάπτυξη νέων δικτύων κινητών επικοινωνιών υιοθετήθηκε η σχεδιαστική αρχή της κυψελωτής τηλεφωνίας που παρά την περιορισμένη ποσότητα φάσματος, είναι σε θέση να ικανοποιήσει την απαίτηση για μεγάλη χωρητικότητα ενώ ταυτόχρονα να προσφέρει κάλυψη σε περιοχές μεγάλης έκτασης.

2.1 Εισαγωγή

Η σύλληψη της αρχής της κυψελωτής τηλεφωνίας ήταν μια σημαντική ανακάλυψη η οποία έλυσε το πρόβλημα της αυξημένης ζήτησης χωρητικότητας από περιορισμένη ποσότητα φάσματος. Το αξιοσημείωτο επίσης είναι ότι η λύση αυτή έλυσε το πρόβλημα με υπάρχουσα τεχνολογία. Η αρχή της κυψελωτής τηλεφωνίας είναι κατ' ουσία η αντικατάσταση ενός πομπού υψηλής ισχύος και

ευρείας κάλυψης (μεγάλη κυψέλη) με πολλούς πομπούς πολύ μικρότερης ισχύος και κάλυψης μικρού μέρους (μικρή κυψέλη) της περιοχής εξυπηρέτησης. Σε κάθε σταθμό βάσης εκχωρείται κλάσμα του συνολικού αριθμού των διαθέσιμων καναλιών του συστήματος, ενώ σε όμορους σταθμούς βάσης εκχωρούνται διαφορετικές ομάδες καναλιών έτσι ώστε η διάθεση όλων των καναλιών του συστήματος να εξαντληθεί εντός των ορίων μιας μικρής σχετικά γεωγραφικής περιοχής, η οποία εξυπηρετείται από ένα σχετικά μικρό αριθμό σταθμών βάσης. Σε σταθμούς βάσης που ευρίσκονται ο ένας δίπλα στον άλλο εκχωρούνται διαφορετικές ομάδες συχνοτήτων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές μεταξύ των σταθμών βάσης αλλά και των κινητών τηλεφώνων. Με την συστηματική επιλογή θέσεων για τους σταθμούς βάσης και την ανάθεση σε αυτούς κατάλληλων καναλιών καθίσταται δυνατή η εξυπηρέτηση μιας συγκεκριμένης περιοχής και ταυτοχρόνως η επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων καναλιών στην ευρύτερη περιοχή κάλυψης από νέους σταθμούς βάσης τόσες φορές όσες απαιτείται με την προϋπόθεση ότι η παρεμβολή μεταξύ συγκαναλικών σταθμών βάσης (δηλαδή σταθμών που χρησιμοποιούν τα ίδια κανάλια) παραμένει κάτω από τα αποδεκτά όρια.

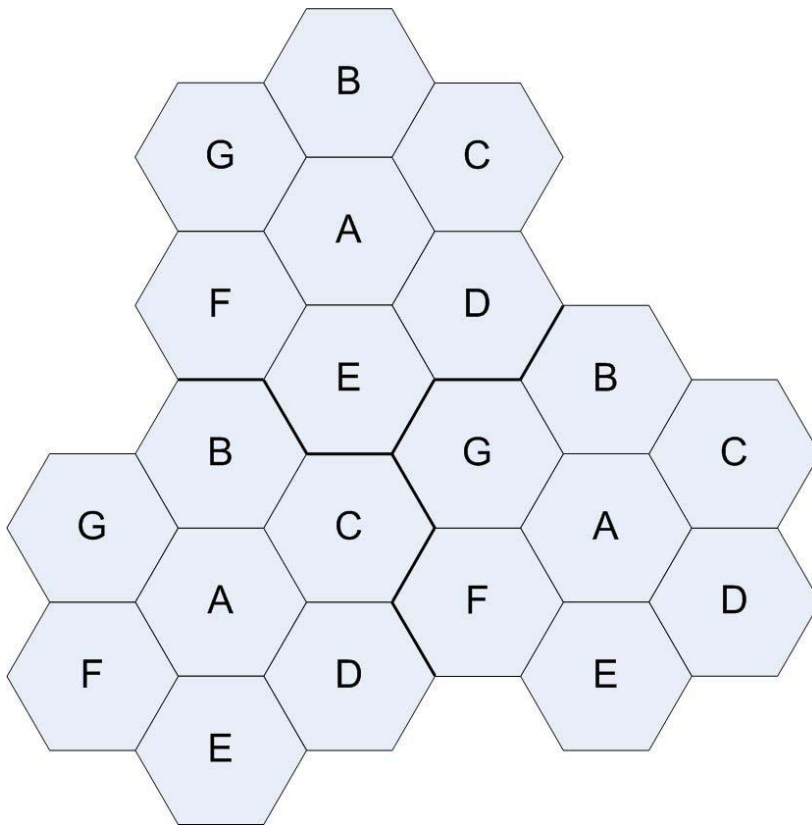
Καθώς η απαίτηση για χωρητικότητα αυξάνεται (δηλαδή περισσότεροι χρήστες ζητούν υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας), ο αριθμός των σταθμών βάσης μπορεί να αυξηθεί και ταυτόχρονα η ισχύς εκπομπής τους να μειωθεί έτσι ώστε και ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών να αυξηθεί για μια δεδομένη γεωγραφική περιοχή εξυπηρέτησης αλλά και η συνκαναλική παρεμβολή να διατηρηθεί σε αποδεκτά επίπεδα. Με την τακτική αυτή η χωρητικότητα του συστήματος κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται χωρίς να απαιτείται περαιτέρω αύξηση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων, δηλαδή ο αριθμός των καναλιών του συστήματος παραμένει σταθερός. Η θεμελιώδης αυτή αρχή αποτελεί την βάση για όλα τα σύγχρονα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών, διότι επιτρέπει σε ένα συγκεκριμένο (περιορισμένο) αριθμό διαύλων να εξυπηρετήσει οποιονδήποτε αριθμό χρηστών επαναχρησιμοποιώντας τους διαύλους εντός των γεωγραφικών ορίων της περιοχής κάλυψης. Επιπλέον, η αρχή της κυψελωτής τηλεφωνίας

επιτρέπει σε κάθε κινητό τηλέφωνο που χρησιμοποιείται εντός των γεωγραφικών ορίων μιας χώρας ή ηπείρου να λειτουργεί στην ίδια περιοχή συχνοτήτων, και έτσι ο χρήστης να μπορεί να το χρησιμοποιήσει οπουδήποτε εντός της αυτής της περιοχής.

2.2 Επαναχρησιμοποίηση συχνότητας

Τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας βασίζονται στην ευφυή ανάθεση και επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (καναλιών) εντός των γεωγραφικών ορίων της περιοχής κάλυψης. Το Σχήμα 2-1 στο οποίο οι κυψέλες που αναφέρονται με το ίδιο γράμμα χρησιμοποιούν τις ίδιες ομάδες συχνοτήτων, παρουσιάζει την αρχή της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Το διάγραμμα ραδιοκάλυψης κάθε σταθμού βάσης έχει συμβολικά εξαγωνικό σχήμα (στην πραγματικότητα η περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή) και έχει καθολικά υιοθετηθεί διότι παρέχει έναν εύκολο κι εποπτικό τρόπο για την ανάλυση και σχεδίαση ενός συστήματος κυψελωτής τηλεφωνίας. Το πραγματικό διάγραμμα κάλυψης μιας κυψέλης ονομάζεται **αποτύπωμα (footprint)** και καθορίζεται είτε από μετρήσεις πεδίου είτε από μοντέλα διάδοσης ραδιοκυμάτων. Επίσης θα μπορούσε κανείς να θεωρήσει ότι το καταλληλότερο γεωμετρικό σχήμα για την αναπαράσταση του διαγράμματος κάλυψης ενός σταθμού βάσης θα ήταν ο κύκλος. Εν' τούτοις γειτονικοί κύκλοι δεν μπορούν να υπερτεθούν σε χάρτη που περιγράφει την περιοχή κάλυψης χωρίς να αφήσουν κενά ή να δημιουργήσουν επικαλυπτόμενες επιφάνειες. Έτσι, όταν κανείς εξετάσει ποια γεωμετρικά σχήματα ίδιας μορφής μπορούν να καλύψουν μια ολόκληρη περιοχή χωρίς επικάλυψη υπάρχουν τρεις ρεαλιστικές επιλογές: το τετράγωνο, το ισόπλευρο τρίγωνο και το εξάγωνο. Από αυτά τα τρία σχήματα το εξάγωνο αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση του διαγράμματος ακτινοβολίας της πανκατευθυντικής (omni-directional) κεραίας ενός σταθμού βάσης τοποθετημένου στο κέντρο της κυψέλης. Επιπλέον, για δεδομένη

απόσταση μεταξύ του κέντρου ενός πολυγώνου και του πιο απομακρυσμένου σημείου επί της περιμέτρου του, το εξάγωνο έχει το μεγαλύτερο εμβαδόν από τα τρία σχήματα, με αποτέλεσμα να απαιτείται μικρότερος αριθμός εξαγώνων (και κατά συνέπεια σταθμών βάσης) για την κάλυψη της περιοχής εξυπηρέτησης του δικτύου.



Σχήμα 2-1. Παρουσίαση της αρχής επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Κυψέλες με το ίδιο γράμμα χρησιμοποιούν την ίδια ομάδα συχνοτήτων.

Όταν χρησιμοποιούμε εξάγωνα για να μοντελοποιήσουμε περιοχές κάλυψης, οι πομποί των σταθμών βάσης θεωρούνται ότι ευρίσκονται είτε στο κέντρο της κυψέλης (κυψέλη κεντρικά διαγειρόμενη) είτε σε τρεις από τις έξη γωνίες της κυψέλης (κυψέλη περιφερειακά διαγειρόμενη). Συνήθως πανκατευθυντικές κεραιές τοποθετούνται σε κυψέλες κεντρικά διαγειρόμενες και κατά τομείς κατευθυντικές κεραιές σε κυψέλες περιφερειακά διαγειρόμενες. Πρακτικές δυσκολίες δεν επιτρέπουν συνήθως την τοποθέτηση των κεραιών ακριβώς όπως

απεικονίζονται στο εξιδανικευμένο εξαγωνικό σχέδιο, αλλά οι περισσότερες υλοποιήσεις συστημάτων επιτρέπουν την τοποθέτηση του σταθμού βάσης μακριά από την ιδανική θέση σε απόσταση μέχρι και το ένα τέταρτο της ακτίνας της κυψέλης.

Προκειμένου να αντιληφθούμε την αρχή επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας, ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας με συνολικό αριθμό S διαθέσιμων αμφίδρομων (ζεύγος - duplex) καναλιών. Εάν σε κάθε κυψέλη έχουν εκχωρηθεί μια ομάδα με k κανάλια και εάν τα S κανάλια έχουν καταναμηθεί σε μοναδικές και ασυσχέτιστες ομάδες καναλιών μεταξύ N κυψελών οι οποίες έχουν τον ίδιο αριθμό καναλιών, τότε ο συνολικός αριθμός καναλιών δίδεται από την σχέση:

$$S = k \times N \quad (2.1)$$

Οι N κυψέλες που χρησιμοποιούν το συνολικό αριθμό των διαθέσιμων στο σύστημα συχνοτήτων λέγεται ότι αποτελούν μια ομάδα (cluster). Εάν υπάρχουν M αντίγραφα της ομάδας εντός του συστήματος, ο συνολικός αριθμός των αμφίδρομων καναλιών C αποτελεί ένα μέτρο εκτίμησης της χωρητικότητας του συστήματος και δίδεται από την σχέση:

$$C = M \times k \times N \quad (2.2)$$

Όπως εύκολα διαπιστώνεται, η χωρητικότητα ενός συστήματος κυψελωτής τηλεφωνίας είναι ανάλογη του αριθμού των αντιγράφων της ομάδας εντός της περιοχής κάλυψης. Η παράμετρος N ονομάζεται μέγεθος ομάδας (cluster size) και στα περισσότερα συστήματα λαμβάνει τυπικές τιμές 4, 7 ή 12. Εάν το μέγεθος ομάδας ελαττωθεί και ταυτόχρονα το μέγεθος της κυψέλης διατηρηθεί σταθερό, τότε περισσότερες ομάδες απαιτούνται για την κάλυψη δεδομένης περιοχής με άμεσο αποτέλεσμα την επίτευξη περισσότερης χωρητικότητας. Το

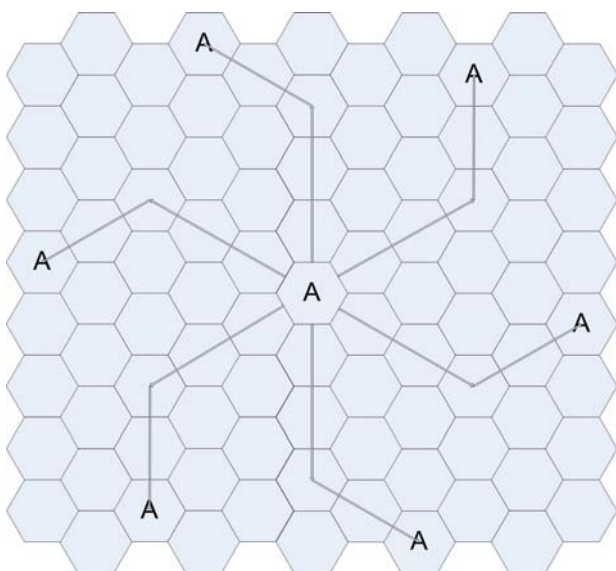
μέγεθος της ομάδας είναι άμεσα συνδεδεμένο με την απόσταση επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων. Έτσι, για ένα μεγάλο μέγεθος ομάδας ο λόγος της απόστασης D μεταξύ συγκαναλικών κυψελών και της ακτίνας R της κυψέλης είναι μεγάλος. Συνεπώς, μικρό μέγεθος ομάδας συνεπάγεται ότι οι συγκαναλικές κυψέλες είναι κοντά τοποθετημένες η μία στην άλλη. Η τιμή του μεγέθους ομάδας N είναι συνάρτηση της στάθμης των παρεμβολών που μπορεί να ανεχθεί ο σταθμός βάσης ή το κινητό τηλέφωνο χωρίς η ποιότητα της επικοινωνίας να πέσει σε ανεπίτρεπτα επίπεδα. Από την οπτική γωνία της σχεδίασης συστημάτων είναι επιθυμητό να επιτύχουμε την μεγαλύτερη δυνατή χωρητικότητα μειώνοντας το μέγεθος ομάδας, αλλά ταυτόχρονα παρατηρούμε ότι το τίμημα είναι η αύξηση της στάθμης της συγκαναλικής παρεμβολής. Ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (**frequency reuse factor**) ενός συστήματος κυψελωτής τηλεφωνίας ισούται με $1/N$, καθόσον εντός κάθε κυψέλης που ανήκει σε μια ομάδα μεγέθους N ο αριθμός των εκχωρηθέντων καναλιών είναι ίσος προς $1/N$.

Λόγω της εξαγωνικής γεωμετρίας του συστήματος κυψελών που διακρίνεται στο

Σχήμα 1-1, κάθε κυψέλη έχει γύρω της ακριβώς έξη γειτονικές κυψέλες. Το κέντρο της κάθε κυψέλης απέχει την ίδια απόσταση από τα κέντρα των έξη παρακειμένων της (τα κέντρα δηλαδή ευρίσκονται στην περιφέρεια κύκλου), τα οποία και αντιστοιχούν σε τόξα των εξήντα (60) μοιρών. Λόγω του χαρακτηριστικού αυτού γνωρίσματος της εξαγωνικής γεωμετρίας η υλοποίηση ενός συστήματος κυψελωτής τηλεφωνίας είναι εφικτή μόνο για συγκεκριμένα μεγέθη ομάδων και διατάξεις κυψελών. Έτσι ο αριθμός των κυψελών, N , σε κάθε ομάδα πρέπει να δίδεται από την σχέση:

$$N = i^2 + j^2 + i \cdot j \quad (2.3)$$

όπου i και j είναι μη αρνητικοί ακέραιοι. Για να προσδιορίσουμε την πλησιέστερη συγκαναλική κυψέλη μιας συγκεκριμένης κυψέλης θα πρέπει να μετακινηθούμε i κυψέλες κατά μήκος οποιασδήποτε αλυσίδας εξαγώνων, κατόπιν να στρίψουμε εξήντα (60) μοίρες με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού και τέλος να μετακινηθούμε j κυψέλες κατά μήκος της νέας διεύθυνσης. Η τεχνική αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 2-2 για το οποίο $i=3$, $j=2$ και $N=19$.



Σχήμα 2-2. Μεθοδολογία προσδιορισμού συγκαναλικών κυψελών σε σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας με $i=3$, $j=2$ και $N=19$.

2.3 Στρατηγικές ανάθεσης καναλιών

Για την αποδοτική αξιοποίηση του φάσματος ραδιοσυχνοτήτων απαιτείται μια τακτική επαναχρησιμοποίησης συχνότητας που είναι συνεπής τόσο με την απαίτηση για αυξημένη χωρητικότητα, όσο και για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Διάφορες στρατηγικές έχουν εξελιχθεί για να ικανοποιήσουν τους παραπάνω στόχους. Οι στρατηγικές ανάθεσης καναλιών διακρίνονται σε σταθερές (fixed) και δυναμικές (dynamic). Η επιλογή μιας συγκεκριμένης

στρατηγικής επιδρά στην απόδοση του συστήματος και ειδικότερα στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα διαχειρίζεται την μεταπομπή των χρηστών καθώς αυτοί μετακινούνται από την μία κυψέλη στην άλλη.

Στην σταθερή στρατηγική ένας προκαθορισμένος αριθμός καναλιών ανατίθεται σε κάθε κυψέλη. Κάθε επιχειρούμενη κλήση εντός των γεωγραφικών ορίων μιας κυψέλης μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο από τα εκείνη τη στιγμή μη δεσμευμένα κανάλια. Εάν όλα τα κανάλια είναι απασχολημένα, τότε η κλήση εμποδίζεται (**blocked**) και ο χρήστης δεν εξυπηρετείται. Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της σταθερής στρατηγικής. Σε μία από αυτές που ονομάζεται **στρατηγική δανεισμού (borrowing strategy)** ο χρήστης επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει (δανειστεί) ακρησιμοποιήτα κανάλια γειτονικής κυψέλης, εάν όλα τα δικά του είναι απασχολημένα. Η επίβλεψη των διαδικασιών δανεισμού διενεργείται από το κέντρο μεταγωγής (MSC), το οποίο διασφαλίζει ότι ο δανεισμός δεν δημιουργεί ενοχλήσεις ή παρεμβολές στις κλήσεις που ευρίσκονται σε εξέλιξη στην κυψέλη δανειστή και τις παρακείμενες των.

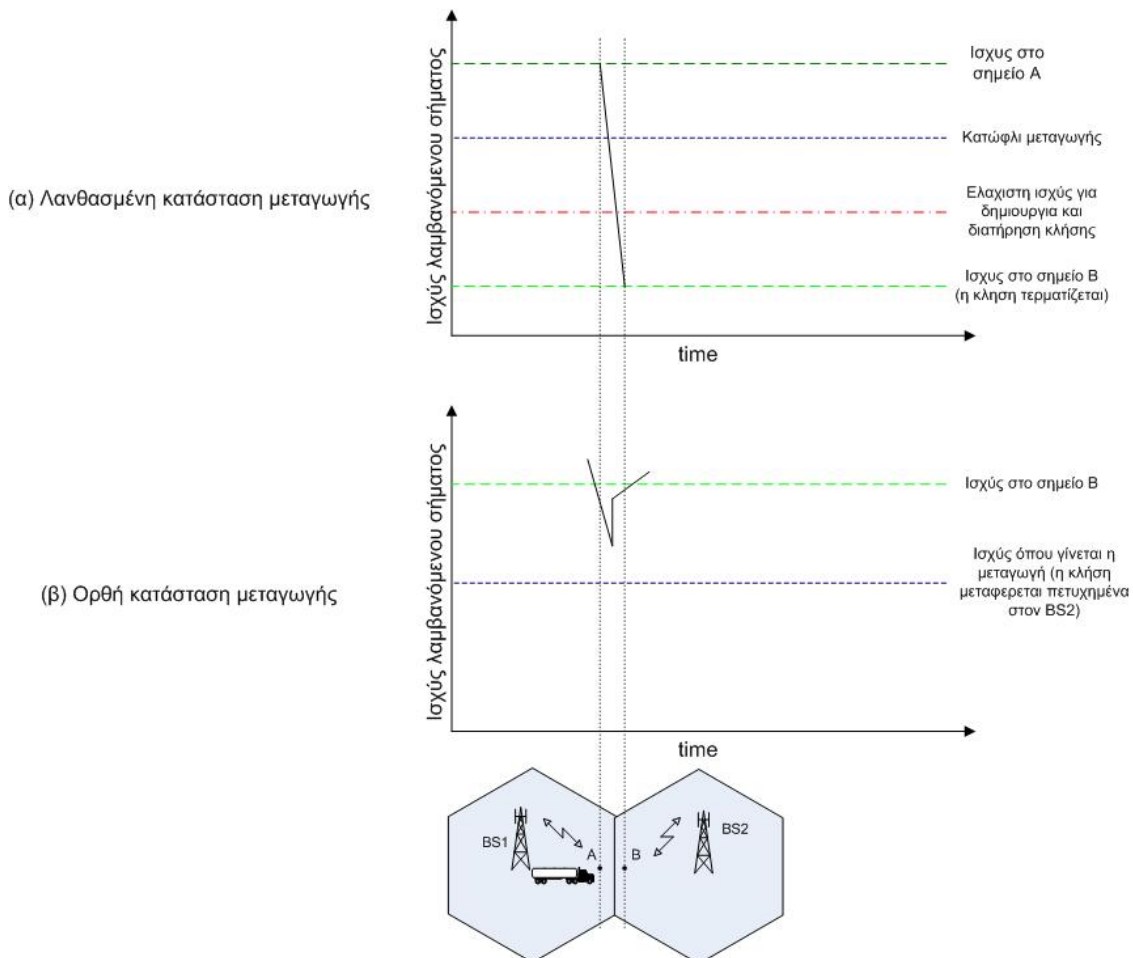
Στην δυναμική στρατηγική τα κανάλια ομιλίας δεν αναθέτονται σε μόνιμη βάση στις διάφορες κυψέλες. Κάθε φορά που πραγματοποιείται μια κλήση ο σταθμός βάσης που εξυπηρετεί την κλήση απευθύνει αίτημα για χρήση καναλιού προς το κέντρο μεταγωγής. Στη συνέχεια το κέντρο μεταγωγής εκχωρεί κανάλια ομιλίας στον αιτούντα σταθμό βάσης λαμβάνοντας υπόψη του την **πιθανότητα μπλοκαρίσματος (blocking probability)** εντός της κυψέλης, την συχνότητα του υποψήφιου καναλιού, την απόσταση επαναχρησιμοποίησης του καναλιού καθώς και άλλα στοιχεία σχετικά με τον οικονομικότερο τρόπο διάθεσης των πόρων του συστήματος. Η στρατηγική δυναμικής ανάθεσης μειώνει την πιθανότητα μπλοκαρίσματος μιας κλήσης και αυξάνει την **χωρητικότητα κορμού (trunking capacity)** του συστήματος διότι ο συνολικός αριθμός των καναλιών του είναι διαθέσιμος σε όλες τις κυψέλες. Από την άλλη πλευρά όμως αυτή η στρατηγική απαιτεί από το κέντρο μεταγωγής την σε πραγματικό χρόνο συλλογή δεδομένων σχετικά με την κατάληψη διαύλων, την κατανομή της τηλεφωνικής

κίνησης και τον δείκτη στάθμης σήματος (radio signal strength indication - RSSI) όλων των καναλιών σε συνεχή και αδιάλειπτο βάση. Η επίπτωση για το κέντρο μεταγωγής είναι οι σημαντικές απαιτήσεις για αυξημένη χωρητικότητα και υψηλό υπολογιστικό φορτίο.

2.4 Τεχνικές μεταπομπής

Όταν ένα κινητό μετακινείται από την μία κυψέλη σε άλλη κατά την διάρκεια μιας συνομιλίας, το κέντρο μεταγωγής αυτόματα μεταφέρει την κλήση σε νέο δίαυλο που ελέγχεται από τον νέο σταθμό βάσης. Η διαδικασία αυτή της μεταπομπής εκτός από την αναγνώριση του νέου σταθμού βάσης προϋποθέτει και την εκχώρηση των καναλιών ελέγχου και ομιλίας στο νέο σταθμό βάσης. Η διευθέτηση των μεταπομπών είναι ιδιαίτερη σημαντική διαδικασία σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Πολλές στρατηγικές χειρισμού μεταπομπών δίδουν προτεραιότητα στα αιτήματα για μεταπομπή σε σχέση με αυτά για την έναρξη νέων κλήσεων όταν αποδίδουν μη χρησιμοποιούμενα κανάλια σε μία κυψέλη. Η διαδικασία της μεταπομπής πρέπει να υλοποιείται χωρίς να γίνεται αντιληπτή από τον χρήστη και εν γένει να αποφεύγεται κατά το δυνατόν. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να καθορίσει τη βέλτιστη στάθμη σήματος η οποία θα σηματοδοτήσει την έναρξη της διαδικασίας μεταπομπής. Αφού καθοριστεί στο σταθμό βάσης η ελάχιστη στάθμη σήματος P_{min_usable} για την οποία η ποιότητα ομιλίας θεωρείται αποδεκτή (συνήθως η τιμή αυτή κυμαίνεται μεταξύ -90dBm και -100dBm), μια τιμή κατά τι μεγαλύτερη $P_{handoff}$ θεσπίζεται ως κατώφλι μεταπομπής. Η διαφορά τους που ονομάζεται **περιθώριο μεταπομπής (handoff margin)**, δηλαδή $\Delta = P_{handoff} - P_{min_usable}$, δεν θα πρέπει να είναι ούτε πολύ μεγάλη ούτε πολύ μικρή. Μια μεγάλη τιμή του Δ θα σήμαινε την πραγματοποίηση πολλών και στην πλειοψηφία τους μη απαραίτητα αναγκαίων μεταπομπών, επιβαρύνοντας έτσι σημαντικά το κέντρο μεταγωγής, ενώ μια πολύ μικρή τιμή του Δ δεν θα επέτρεπε αρκετό χρόνο για την έγκαιρη υλοποίηση της διαδικασίας μεταπομπής, πριν δηλαδή η στάθμη του

σήματος πέσει σε μη αποδεκτά επίπεδα οδηγώντας στον τερματισμό της κλήσης. Επομένως η διαφορά Δ πρέπει να επιλεγεί πολύ προσεκτικά από τον σχεδιαστή του συστήματος και κατά τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιεί τις αντικρουόμενες αυτές απαιτήσεις. Το Σχήμα 2-3 απεικονίζει την διαδικασία της μεταπομπής.



Σχήμα 2-3. Διαγραμματική απεικόνιση της διαδικασίας μεταπομπής όταν ο χρήστης μετακινείται από κυψέλη σε κυψέλη. Στην περίπτωση (α) δεν επιτυγχάνεται μεταπομπή και η κλήση τερματίζεται, ενώ στη (β) η διαδικασία μεταπομπής είναι επιτυχής.

Στο Σχήμα 2-3(a) απεικονίζεται μια περίπτωση που δεν έχουμε μεταπομπή και η στάθμη του σήματος πέφτει κάτω από το ελάχιστο επιτρεπτό όριο και η κλήση τερματίζεται. Η περίπτωση αυτή στην οποία η κλήση τερματίζεται μπορεί να

συμβεί όταν για παράδειγμα το κέντρο μεταγωγής καθυστερεί να οργανώσει επιτυχώς τις ενέργειες που απαιτούνται για την μεταπομπή (δηλαδή το Δ είναι πολύ μικρό για αυτήν την περίπτωση). Η καθυστέρηση αυτή μπορεί να οφείλεται στην υπερφόρτωση του κέντρου μεταγωγής λόγω του αυξημένου υπολογιστικού φορτίου που συνεπάγονται συνθήκες υψηλής τηλεφωνικής κίνησης ή απλά στο ότι μπορεί να μην υπάρχουν διαθέσιμα κανάλια στο σταθμό βάσης της γειτονικής κυψέλης για να πραγματοποιηθεί η μεταπομπή (αναγκάζοντας έμμεσα το κέντρο μεταγωγής να καθυστερήσει περιμένοντας μέχρις ότου κάποιο κανάλι γίνει διαθέσιμο).

Στο Σχήμα 2-3(b) απεικονίζεται το σενάριο μιας επιτυχούς διαδικασίας μεταπομπής. Το κέντρο μεταγωγής έγκαιρα μετάγει τον κινητό σταθμό καθώς αυτός μεταβαίνει από το σημείο Α που ελέγχεται από το σταθμό βάσης BS1, στο σημείο Β που ελέγχεται από το σταθμό βάσης BS2. Έτσι κατά την μετάβαση από το σημείο Α στο σημείο Β η στάθμη του σήματος σε καμία χρονική στιγμή δεν πέφτει κάτω από τα επιτρεπτά όρια. Στην περίπτωση που ληφθεί απόφαση για μεταπομπή, θα πρέπει να βεβαιωθεί κανείς για το ότι η πτώση της στάθμης του σήματος δεν οφείλεται σε στιγμιαία εξασθένηση αλλά ότι το κινητό απομακρύνεται πραγματικά από τον σταθμό βάσης που το εξυπηρετεί. Προκειμένου αυτό να διασφαλιστεί ο σταθμός βάσης παρακολουθεί τη στάθμη του σήματος για ικανή περίοδο χρόνου πριν αρχίσει η διαδικασία έναρξης της μεταπομπής. Η περίοδος του χρόνου που ο σταθμός βάσης παρακολουθεί τον κινητό σταθμό εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία αυτός κινείται. Εάν η κλίση του βραχυπρόθεσμου μέσου όρου της στάθμης σήματος σε δεδομένο χρονικό διάστημα είναι μεγάλη (απότομη), η διαδικασία της μεταπομπής θα πρέπει να διενεργηθεί άμεσα και γρήγορα.

Άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την σχεδίαση πρακτικών αλγορίθμων για την εκτέλεση μεταπομπής, είναι ο χρόνος που μια κλήση διατηρείται εντός των ορίων της κυψέλης χωρίς να μεταχθεί. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται **χρόνος εγκατάστασης (dwell time)**. Ο χρόνος εγκατάστασης ενός

συγκεκριμένου χρήστη διέπεται από αριθμό παραγόντων συμπεριλαμβανομένων της διάδοσης, παρεμβολών, απόστασης μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τηλεφώνου και άλλων φαινομένων χρονικά εξαρτωμένων. Αξίζει εδώ να σημειώσουμε ότι ακόμα και στην περίπτωση που ένας χρήστης είναι ακίνητος, κινούμενα αντικείμενα γύρω από τον σταθμού βάσης και το κινητό είναι σε θέση να προκαλέσουν απόσβεση, με συνέπεια ακόμα και ο χρόνος εγκατάστασης ενός χρήστη που ευρίσκεται σε πλήρη ακινησία να είναι τυχαίος και πεπερασμένος! Μια πιο διεξοδική ανάλυση αποδεικνύει ότι η στατιστική του χρόνου εγκατάστασης είναι ευμετάβλητη και εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία κινείται ο χρήστης και το είδος της ραδιοκάλυψης. Για παράδειγμα, σε ώριμες κυψέλες που εξυπηρετούν χρήστες που κινούνται προβλέψιμα (δηλαδή σταθερά στην κατάλληλη για την ταχύτητα του οχήματος λωρίδα κυκλοφορίας) σε αυτοκινητοδρόμους με υψηλές αλλά εν γένει σταθερές ταχύτητες, ο χρόνος εγκατάστασης περιγράφεται από μια τυχαία μεταβλητή της οποίας η κατανομή είναι ισχυρά συγκεντρωμένη περί την μέση τιμή της (παρουσιάζει δηλαδή πολύ μικρή διασπορά). Αντιθέτως, για χρήστες που εξυπηρετούνται σε πυκνοδομημένο και συνωστισμένο αστικό περιβάλλον, η μεταβολή του χρόνου εγκατάστασης περί την μέση τιμή είναι μεγάλη (δηλαδή η διασπορά είναι μεγάλη) και οι τιμές που λαμβάνει ο χρόνος εγκατάστασης είναι μικρότερες από ότι θα περίμενε κανείς λαμβάνοντας υπόψη του τις διαστάσεις της κυψέλης.

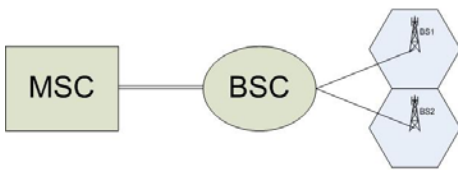
Στα σημερινά συστήματα κινητής τηλεφωνίας 2^{ης} γενεάς που χρησιμοποιούν ψηφιακή τεχνολογία πολλαπλής πρόσβασης με καταμερισμό στο χρόνο (**Time Division Multiple Access - TDMA**), οι αποφάσεις για την εκτέλεση της διαδικασίας της μεταπομπής είναι υποβοηθούμενες από τον κινητό σταθμό (mobile assisted). Στην περίπτωση αυτή το κινητό τηλέφωνο μετρά σε πραγματικό χρόνο την στάθμη του σήματος που λαμβάνει από τους παρακείμενους σταθμούς βάσης και διαβιβάζει τα στοιχεία αυτά στο σταθμό βάσης που το εξυπηρετεί. Η διαδικασία μεταπομπής άρχεται όταν η ισχύς που λαμβάνεται από κάποιον παρακείμενο σταθμό βάσης αρχίζει να ξεπερνά την ισχύ του τρέχοντος σταθμού βάσης κατά μια προκαθορισμένη διαφορά ή για

συγκεκριμένη χρονική περίοδο ή για συνδυασμό των παραπάνω. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται MAHO (Mobile Assisted Handoff) και επιτρέπει την ταχύτερη διεκπεραίωση της διαδικασίας μεταπομπής απαλλάσσοντας το κέντρο μεταγωγής από το φόρτο της συνεχούς παρακολούθησης της στάθμης σημάτων όλων των ενεργών καναλιών του συστήματος. Στο σύστημα GSM η διαδικασία της μεταπομπής ολοκληρώνεται εντός 250ms ή το πολύ ενός δευτερολέπτου, η δε τιμή του Δ τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 0 και 6dB.

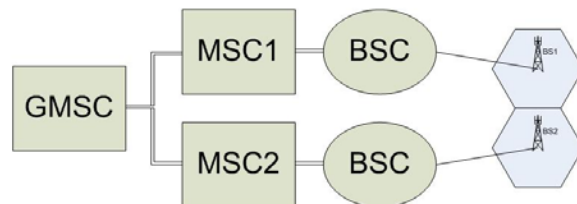
2.5 Είδη μεταπομπής

Κατά την διάρκεια μιας κλήσης διάφορα είδη μεταπομπής μπορούν να λάβουν χώρα. Η απλούστερη περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 5(α) και απαντάται όταν οι δύο εμπλεκόμενοι σταθμοί βάσης BS1 και BS2 εποπτεύονται από το ίδιο κέντρο ελέγχου σταθμών βάσης BSC και κατά συνέπεια από το ίδιο κέντρο μεταγωγής MSC. Εδώ, τον διαχειριστικό φόρτο επωμίζεται το BSC το οποίο απλά ενημερώνει το MSC μετά την περάτωση της διαδικασίας μεταπομπής.

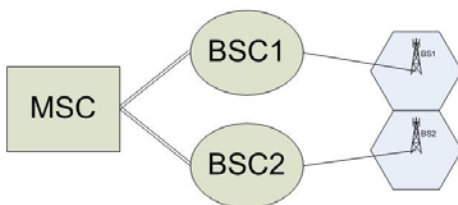
(Α) Μεταγωγή από το ίδιο BSC



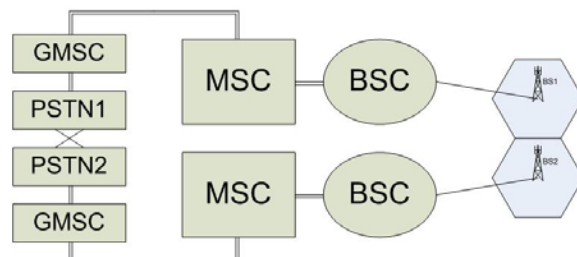
(Γ) Μεταγωγή σε διαφορετικά MSC



(Β) Μεταγωγή σε διαφορετικά BSC, αλλά στο ίδιο MSC



(Δ) Περιαγωγή (Roaming)



Σχήμα 2-4. Διάφορες περιπτώσεις μεταπομπής.

Μια πιο σύνθετη περίπτωση που απεικονίζεται στο **Σχήμα 2-4(b)** απαντάται όταν οι δύο εμπλεκόμενοι σταθμοί βάσης BS1 και BS2 -και κατά συνέπεια οι κυψέλες τους- εποπτεύονται από δύο διαφορετικά κέντρα ελέγχου σταθμών βάσης BSC1 και BSC2, αντίστοιχα, τα οποία είναι υπό τον έλεγχο του ιδίου κέντρου μεταγωγής MSC. Εδώ το κέντρο ελέγχου BSC1 ενημερώνει το MSC ότι αδυνατεί να μετάγει τον κινητό σταθμό σε κατάλληλη κυψέλη της ευθύνης του ώστε να συνεχιστεί η κλήση. Το MSC αντιλαμβάνεται την αδυναμία αυτή και απευθύνεται στα συνδεδεμένα με αυτό κέντρα ελέγχου σταθμών βάσης, αναζητώντας ποιο από αυτά ελέγχει τον σταθμό βάσης BS2. Στην συνέχεια το MSC ζητά τόσο από το BSC1 όσο και από το νέο κέντρο BSC2 να προετοιμαστούν για την έναρξη της διαδικασίας μεταπομπής, η οποία τελικά λαμβάνει χώρα με την ενεργή μεσολάβηση του MSC.

Μια δύσκολη περίπτωση απεικονίζεται στο **Σχήμα 2-4(c)** και αφορά μεταπομπή στην οποία εμπλέκονται δύο διαφορετικά MSCs. Εδώ οι δύο εμπλεκόμενοι σταθμοί βάσης BS1 και BS2 -και κατά συνέπεια οι κυψέλες τους- εποπτεύονται από δύο διαφορετικά κέντρα ελέγχου σταθμών βάσης που με την σειρά τους εποπτεύονται από διαφορετικά κέντρα μεταγωγής, δηλαδή τα MSC1 και MSC2, αντίστοιχα. Εδώ το κέντρο ελέγχου MSC1 ενημερώνει το **κέντρο μεταγωγής-πύλη (Gateway Mobile Switching Centre - GMSC)** ότι αδυνατεί να μετάγει τον κινητό σταθμό σε κατάλληλη κυψέλη της ευθύνης του ώστε να συνεχιστεί η κλήση. Το GMSC αντιλαμβάνεται την αδυναμία αυτή και απευθύνεται στα κέντρα μεταγωγής του συστήματος κινητής τηλεφωνίας, αναζητώντας ποιο από αυτά ελέγχει τον σταθμό βάσης BS2. Στην συνέχεια το GMSC ζητά τόσο από το MSC1 όσο και από το νέο κέντρο MSC2 να προετοιμαστούν για την έναρξη της διαδικασίας μεταπομπής (που εμπλέκει αλυσιδωτά τα αρμόδια κέντρα ελέγχου σταθμών βάσης και φυσικά τους σταθμούς βάσης), η οποία λαμβάνει χώρα με την ενεργή μεσολάβηση του GMSC.

Τέλος, στην περίπτωση που εικονίζεται στο **Σχήμα 2-4(d)** που ο σταθμός βάσης-προορισμός B2 και η αντιστοιχούσα κυψέλη ανήκουν σε διαφορετικό σύστημα κινητής τηλεφωνίας -και με την προϋπόθεση ότι οι δύο πάροχοι κινητής τηλεφωνίας έχουν υπογράψει την σχετική συμφωνία,- η επιτυχής διεκπεραίωση της διαδικασίας της μεταπομπής οδηγεί στην **περιαγωγή (roaming)** του χρήστη σε διαφορετικό δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή η μεταπομπή/περιαγωγή του χρήστη επιτυγχάνεται δια μέσου των κέντρων μεταγωγής των σταθερών δημόσιων δικτύων PSTN1 και PSTN2 με την συνεργασία των κέντρων μεταγωγής-πυλών των διαφορετικών δικτύων. Αυτή είναι η περίπτωση όπου για παράδειγμα ένας Έλληνας χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει το κινητό του τηλέφωνο για να δεχθεί ή να εκκινήσει κλήσεις στο εξωτερικό ως **περιαγωγός (roamer)**.

2.6 Χορήγηση προτεραιότητας στην μεταπομπή

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί κάποιο σύστημα κινητής τηλεφωνίας να διαχειριστεί αιτήματα για μεταπομπή. Για παράδειγμα κάποια συστήματα αντιμετωπίζουν τα αιτήματα για μεταπομπή όπως τα αιτήματα για έναρξη κλήσεων. Σε αυτά τα συστήματα η πιθανότητα μη ικανοποίησης αιτήματος μεταπομπής ισούται με την πιθανότητα μπλοκαρίσματος κλήσης. Αυτός ο τρόπος διαχείρισης μεταπομπής δεν είναι ιδιαίτερα φιλικός προς τον χρήστη αφού υπάρχει πάντα η πιθανότητα μια συνομιλία σε εξέλιξη να διακοπεί απροσδόκητα καθώς ο χρήστης μεταβαίνει σε νέα κυψέλη. Προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα παροχής υπηρεσιών προς το χρήστη, διάφορες μεθοδολογίες διαχείρισης αιτημάτων μεταπομπής έχουν εξελιχθεί, οι οποίες δίδουν προτεραιότητα στα αιτήματα μεταπομπής έναντι αυτών για έναρξης νέας κλήσης.

Μια τέτοια μέθοδος προτεραιότητας αιτημάτων μεταπομπής βασίζεται στην αρχή των καναλιών φύλαξης, σύμφωνα με την οποία ένα κλάσμα των συνολικά διαθέσιμων καναλιών σε μια κυψέλη τίθεται σε εφεδρεία προκειμένου να εξυπηρετήσουν αιτήματα μεταπομπής. Το μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι η ελάττωση της χωρητικότητας του συστήματος, αφού πρακτικά λιγότερα από τα εν δυνάμει διαθέσιμα κανάλια χρησιμοποιούνται για την εξυπηρέτηση του τηλεφωνικού φορτίου. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος των καναλιών φύλαξης είναι ιδιαίτερα καλής φασματικής απόδοσης όταν αξιοποιείται στα πλαίσια δυναμικών στρατηγικών ανάθεσης καναλιών (παράγραφος 2.3).

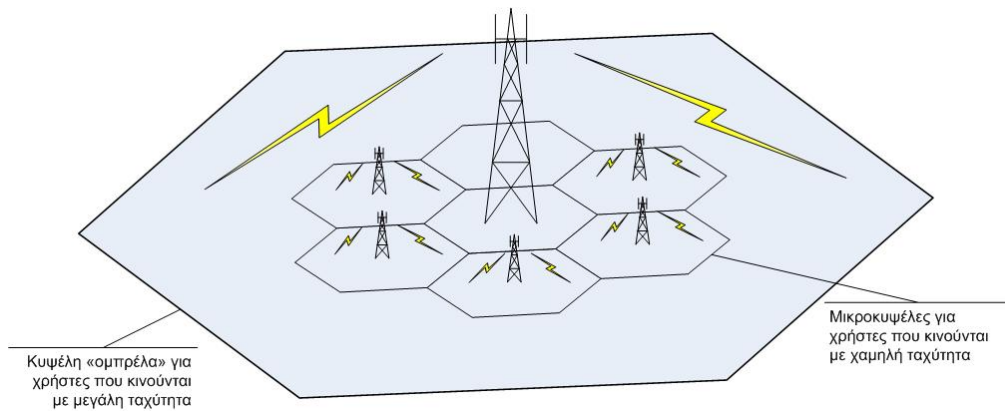
Ένας εναλλακτικός τρόπος χειρισμού της εξυπηρέτησης αιτημάτων για μεταπομπή που αποσκοπεί στη μείωση της πιθανότητας τερματισμού κλήσης λόγω ελλείψεως διαθέσιμου καναλιού είναι η μέθοδος της τοποθέτησης των αιτημάτων σε ουρά αναμονής. Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι για τη μετάβαση της στάθμης του σήματος από το επίπεδο κατωφλίου μεταπομπής μέχρι το όριο τερματισμού κλήσης απαιτείται ένα μικρό χρονικό διάστημα. Το χρονικό αυτό διάστημα μπορεί να αξιοποιηθεί για την υλοποίηση της τεχνικής της ουράς αναμονής, η οποία όμως πρέπει να υπογραμμιστεί ότι αν και ελαττώνει σημαντικά την πιθανότητα τερματισμού κλήσης λόγω μεταπομπής δεν την μηδενίζει.

2.7 Πρακτικά ζητήματα στο χειρισμό μεταπομπών κλήσης

Σε πρακτικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας ο σχεδιαστής του συστήματος αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα όταν σχεδιάζει την πολιτική εξυπηρέτησης αιτημάτων μεταπομπής. Η πολιτική αυτή θα πρέπει να μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για μεταπομπή τόσο χρηστών που κινούνται με υψηλές ταχύτητες και διατρέχουν τα όρια κάλυψης μιας κυψέλης εντός λίγων δευτερολέπτων, όσο

και χρηστών που κινούνται με ταχύτητα βάδισης καθ' όλη την διάρκεια της κλήσης. Ιδιαίτερα δε σε περιπτώσεις που για την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος έχει προστεθεί μεγάλος αριθμός μικροκυψελών, το κέντρο ελέγχου σταθμών βάσης και κατ' επέκταση το κέντρο μεταγωγής επιφορτίζεται σημαντικά από χρήστες που κινούνται με υψηλές ταχύτητες και διατρέχουν εντός ολίγων δευτερολέπτων τα όρια αρκετών μικροκυψελών.

Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα σε πρακτικά συστήματα είναι και η δυσκολία των εταιρειών κινητής τηλεφωνίας να βρουν νέες θέσεις για την εγκατάσταση σταθμών βάσης. Η δυσκολία αυτή οφείλεται κυρίως στην θέσπιση διαφόρων δημοτικών κανονισμών, πολεοδομικών διατάξεων και εν γένει μη τεχνολογικών εμποδίων που καθιστούν προτιμότερη την εγκατάσταση νέων σταθμών βάσης ή και καναλιών στις υφιστάμενες θέσεις παρά την εξεύρεση νέων θέσεων. Με την εγκατάσταση κεραιών με διαφορετικές κλίσεις και ισχύ εκπομπής σε διαφορετικά ύψη, καθίσταται δυνατή η υλοποίηση διαφορετικών κυψελών από την ίδια θέση. Ένα παράδειγμα αξιοποίησης της συνεγκατάστασης κεραιών αποτελεί η τεχνική της **κυψέλης-ομπρέλα (umbrella cell)**. Στο Σχήμα 2-5 απεικονίζεται η τεχνική της κυψέλης-ομπρέλα. Η κυψέλη ομπρέλα εξυπηρετεί χρήστες που κινούνται με υψηλή ταχύτητα, ενώ η εξυπηρέτηση αργά κινουμένων χρηστών επαφίεται στις μικροκυψέλες με αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων μεταγωγών. Για την εκτίμηση της ταχύτητας ενός χρήστη ο σταθμός βάσης ή το κέντρο ελέγχου σταθμών βάσης αναλύει τα στατιστικά της μικροπρόθεσμης μεταβολής της στάθμης σήματος του ανοδικού καναλιού ομιλίας και αναλόγως της ταχύτητάς του αποφασίζεται η ανάθεση εξυπηρέτησής του από την αρμόδια μικροκυψέλη ή την κυψέλη-ομπρέλα. Στην περίπτωση που η ταχύτητα ενός χρήστη που εξυπηρετείται από κυψέλη-ομπρέλα μειωθεί δραστικά, το σύστημα δύναται να αποφασίσει την μεταπομπή του στην κυψέλη του αρμόδιου συνεγκατεστημένου σταθμού βάσης.



Σχήμα 2-5. Διαγραμματική απεικόνιση της τεχνικής της κυψέλης-ομπρέλα.

2.8 Παρεμβολές και επιπτώσεις στη χωρητικότητα συστήματος

Οι παρεμβολές αποτελούν τον κύριο παράγοντα περιορισμού της απόδοσης των συστημάτων κυψελωτής κινητής τηλεφωνίας. Πηγές παρεμβολών αποτελούν κινητά τηλέφωνα που λειτουργούν στην ίδια κυψέλη, κανάλια ομιλίας που χρησιμοποιούνται σε γειτονική κυψέλη, άλλοι σταθμοί βάσης που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες, ή γενικά κάθε ασύρματη εφαρμογή η οποία δημιουργεί παρεμβολές στην ζώνη λειτουργίας του συστήματος κυψελωτής τηλεφωνίας. Οι παρεμβολές είναι πολύ πιο ισχυρές σε αστικές περιοχές λόγω της αυξημένης στάθμης του **δαπέδου του θορύβου (noise floor)** και του μεγάλου αριθμού των σταθμών βάσης και κινητών συσκευών που λειτουργούν εκεί. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι παρεμβολές θεωρούνται από τους σχεδιαστές συστημάτων κινητής τηλεφωνίας ως ο κύριος περιοριστικός παράγοντας για την αύξηση χωρητικότητας του συστήματος και είναι συχνά υπεύθυνες για τον τερματισμό κλήσεων.

Δύο είναι τα είδη παρεμβολής που δημιουργούνται ενδογενώς στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας: η συγκαναλική (**co-channel**) και η γειτονική (**adjacent**)

παρεμβολή (**interference**). Παρά το γεγονός ότι το χαρακτηριστικό των παρεμβολών αυτών είναι η ενδογενής καταγωγή τους, είναι εξαιρετικά δύσκολος ο έλεγχός τους λόγω στην απροσδιοριστία των συνθηκών διάδοσης. Ακόμα όμως πιο δύσκολος είναι ο έλεγχος των παρεμβολών που οφείλονται σε πηγές εξωτερικές του συστήματος, όπως για παράδειγμα εκπομπές από άλλες ασύρματες εφαρμογές επικοινωνιών και ιδίως άλλους παρόχους κινητής τηλεφωνίας, οι οποίοι συχνά εγκαθιστούν τους σταθμούς βάσης τους ο ένας πλησίον του άλλου για να επιτύχουν παρόμοια κάλυψη στους συνδρομητές τους.

2.9 Συγκαναλική παρεμβολή και χωρητικότητα συστήματος

Η εφαρμογή της αρχής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας στα συστήματα κινητής τηλεφωνίας συνεπάγεται την χρήση των ιδίων συχνοτήτων σε διαφορετικές κυψέλες. Οι κυψέλες αυτές ονομάζονται **συγκαναλικές κυψέλες** (co-channel cells) και η παρεμβολή που οφείλεται σε αυτές **συγκαναλική παρεμβολή** (co-channel interference). Σε αντιδιαστολή με τον θερμικό θόρυβο, η συγκαναλική παρεμβολή δεν μπορεί να καταπολεμηθεί με την αύξηση της ισχύος εκπομπής του πομπού. Και αυτό διότι η αύξηση της ισχύος του πομπού οδηγεί στην αύξηση της στάθμης ισχύος της παρεμβολής στις γειτονικές συγκαναλικές κυψέλες. Για την μείωση της συγκαναλικής παρεμβολής, οι συγκαναλικές κυψέλες πρέπει να απέχουν μεταξύ τους κατά μια ελάχιστη απόσταση, ώστε να διασφαλίζεται κατάλληλη απομόνωση στα φαινόμενα διάδοσης ραδιοκυμάτων.

Σε ένα σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας όπου το μέγεθος των κυψελών του είναι περίπου το ίδιο, η συγκαναλική παρεμβολή δεν εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης αλλά είναι συνάρτηση της ακτίνας R της κυψέλης

και της απόστασης D που απέχει το σημείο στο οποίο είναι εγκατεστημένος ο συγκαναλικός σταθμός βάσης. Επομένως, αυξάνοντας τον λόγο D/R το δυναμικό της παρεμβολής μειώνεται. Ο λόγος $Q=D/R$ ονομάζεται **συγκαναλικός λόγος επαναχρησιμοποίησης (co-channel reuse ratio)**, και στην περίπτωση της εξαγωνικής γεωμετρίας της κυψέλης συνδέεται με το μέγεθος ομάδας, με την ακόλουθη σχέση:

$$Q = \frac{D}{R} = \sqrt{3 \cdot N} \quad (2.4)$$

Μικρή τιμή του λόγου Q συνεπάγεται μεγαλύτερη χωρητικότητα εφόσον το μέγεθος ομάδας είναι μικρό, ενώ μια μεγάλη τιμή του λόγου Q βελτιώνει την ποιότητα μετάδοσης λόγω του μικρότερου επιπέδου της στάθμης συγκαναλικής παρεμβολής. Είναι επομένως ευκόλως αντιληπτό, ότι στη σχεδίαση πρακτικών συστημάτων η επιλογή μιας συγκεκριμένης τιμής του λόγου Q αποτελεί απόφαση συμβιβασμού. Ο Πίνακας 2-1 συσχετίζει το μέγεθος ομάδας με την παράμετρο Q .

i	j	Μέγεθος Ομάδας (N)	Συγκαναλικός λόγος επαναχρησιμοποίησης
1	1	3	3.00
1	2	7	4.58
2	2	12	6.00
1	3	13	6.24
2	3	19	7.55

Πίνακας 2-1. Συγκαναλικός λόγος επαναχρησιμοποίησης ως συνάρτηση του μεγέθους ομάδας.

Ας υποθέσουμε ότι οι κυψέλες που δημιουργούν συγκαναλική παρεμβολή σε κάποια κυψέλη είναι i_0 . Τότε, ο λόγος του σήματος προς παρεμβολή (signal-to-interference ratio - S/I) στην είσοδο ενός κινητού τηλεφώνου που λαμβάνει το κανάλι καθοδικής ζεύξης δίδεται από την σχέση:

$$\frac{S}{I} = \frac{S}{\sum_{i=1}^{i_0} I_i} \quad (2.5)$$

όπου S είναι η στάθμη ισχύος από τον επιθυμητό σταθμό βάσης και I_i είναι η ισχύς παρεμβολής του i -οστού συγκαταλκικού σταθμού βάσης. Πειραματικές μετρήσεις διάδοσης που αφορούν στο χαρακτηρισμό των καναλιών στις κινητές επικοινωνίες αποδεικνύουν ότι η στάθμη ισχύος σε κάθε σημείο της κυψέλης εξασθενεί εκθετικά με την απόσταση που χωρίζει τον πομπό από το δέκτη. Η μέση λαμβανόμενη ισχύς P_r σε απόσταση d από την κεραία του πομπού δίδεται από τον τύπο:

$$P_r = P_0 \left(\frac{d_0}{d} \right)^n \quad (2.6)$$

ή σε λογαριθμική μορφή από τη σχέση:

$$P_r[\text{dBm}] = P_0[\text{dBm}] + 10 \cdot n \cdot \log_{10} \left(\frac{d_0}{d} \right) \quad (2.7)$$

όπου P_0 είναι η ισχύς στην απόσταση αναφοράς¹ (close-in reference distance) d_0 , και n είναι ο εκθέτης απωλειών διάδοσης (path loss exponent). Ο εκθέτης απωλειών διάδοσης τυπικά κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2 (διάδοση ελευθέρου χώρου) και 5 (διάδοση εντός πυκνοδομημένου αστικού περιβάλλοντος). Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση ενός σταθμού βάσης και των συγκαταλκικών του που δημιουργούν παρεμβολές στην κυψέλη δράσης του. Εάν η απόσταση του i -οστού παρεμβάλλοντος σταθμού βάσης από το σταθμό λήψης (κινητό τηλέφωνο ή σταθμό βάσης) είναι D_i , η λαμβανόμενη από το σταθμό λήψης ισχύς

¹ Απόσταση στο μακρινό πεδίο της κεραίας στην οποία μπορούν να ληφθούν με ευκολία μετρήσεις της ισχύος του πομπού. Στα πλαίσια της κινητής τηλεφωνίας η απόσταση αναφοράς είναι συνήθως 100 μέτρα και 1 χιλιόμετρο για κυψέλες μικρού και μεγάλου μεγέθους, αντίστοιχα.

παρεμβολής θα είναι ανάλογη του $(D_i)^{-n}$. Εάν δε υποθέσουμε ότι όλοι οι συγκαναλικοί παρεμβάλλοντες σταθμοί βάσης εκπέμπουν την ίδια ισχύ εκπομπής, τότε ο λόγος S/I στην είσοδο του δέκτη του σταθμού λήψης δίδεται από την σχέση:

$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-n}}{\sum_{i=1}^{i_0} (D_i)^{-n}} \quad (2.8)$$

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα σταθμό βάσης και μόνο το πρώτο επίπεδο συγκαναλικών παρεμβαλλόντων σταθμών βάσης οι οποίοι απέχουν περίπου την ίδια απόσταση D από το σταθμό βάσης που παρεμβάλλεται. Τότε η εξίσωση (2.8) απλοποιείται ως εξής:

$$\frac{S}{I} = \frac{(D/R)^n}{i_0} = \frac{(\sqrt{3} \cdot N)^n}{i_0} \quad (2.9)$$

Η εξίσωση (2.9) συνδέει το λόγο S/I με το μέγεθος ομάδας N , που καθορίζει την συνολική χωρητικότητα του συστήματος από την Εξίσωση (2.2). Για παράδειγμα εάν για ένα σύστημα ο ελάχιστος απαιτούμενος λόγος S/I είναι 18dB τότε θεωρώντας μόνο το πρώτο επίπεδο συγκαναλικών κυψελών το μέγεθος ομάδας θα πρέπει να τουλάχιστον 4.95, υποθέτοντας ότι ο εκθέτης απωλειών διάδοσης n λαμβάνει την τιμή 4.4. Επομένως το μέγεθος ομάδας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με 7 για να ικανοποιηθεί η απαίτηση για το λόγο S/I . Θα πρέπει εδώ να τονίσουμε ότι η Εξίσωση (2.9) παράγει αισιόδοξες εκτιμήσεις διότι προϋποθέτει απόλυτη εξαγωνική συμμετρία και ότι οι συγκαναλικοί παρεμβάλλοντες σταθμοί βάσης απέχουν ίση απόσταση από τον παρεμβαλλόμενο σταθμό βάσης. Στην πράξη οι αποστάσεις μεταξύ των αμοιβαία παρεμβαλλομένων σταθμών βάσης και κινητών τηλεφώνων κυμαίνονται σε

ευρύτητα πλαίσια και ειδικοί υπολογισμοί για την εκτίμηση του λόγου S/I απαιτούνται κατά περίπτωση.

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας όπου το μέγεθος ομάδας είναι επτά, $N=7$, και το κινητό τηλέφωνο που δέχεται παρεμβολή από το πρώτο στρώμα συγκαταλιικών κυψελών ευρίσκεται στα όρια της κυψέλης εντός της οποίας εξυπηρετείται. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2-6, όπου η απόσταση του κινητού τηλεφώνου από τους πλησιέστερους συγκαταλιικούς σταθμούς βάσης είναι $D-R$, και $D+R/2$, $D-R/2$, $D+R$ από τους υπόλοιπους. Κάνοντας χρήση της Εξίσωσης (2.8) ο λόγος σήματος προς παρεμβολή δίδεται προσεγγιστικά από την σχέση:

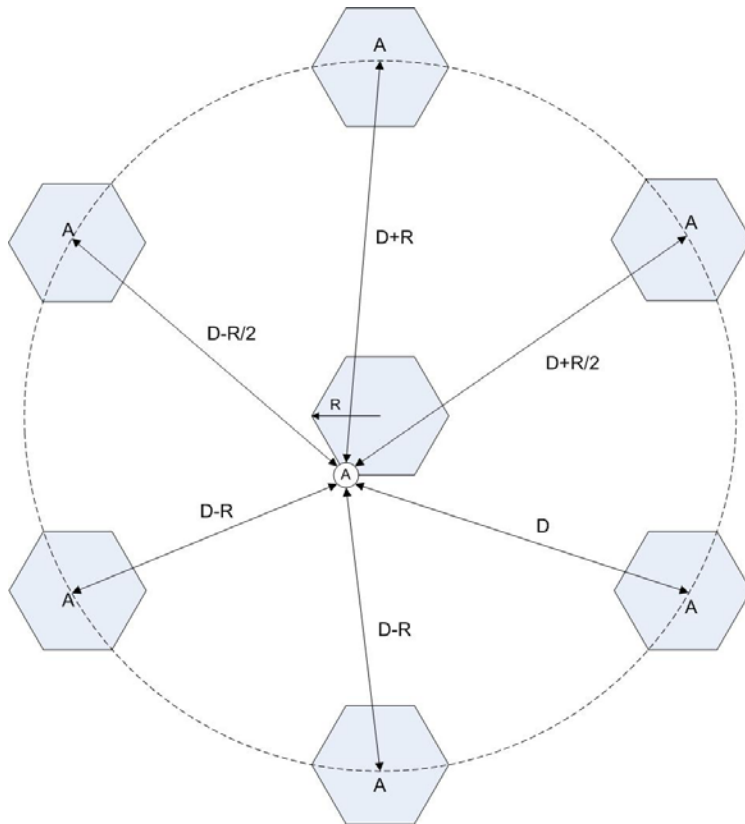
$$\frac{S}{I} = \frac{R^{-n}}{2(D-R)^{-n} + (D-R/2)^{-n} + (D+R/2)^{-n} + (D+R)^{-n} + D^{-n}} \quad (2.10)$$

Η Εξίσωση (2.10) μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση του λόγου επαναχρησιμοποίησης Q , ως εξής:

$$\frac{S}{I} = \frac{1}{\frac{2(Q+1)^n + (Q-1)^n}{(Q^2-1)^n} + \frac{(Q+1/2)^n + (Q-1/2)^n}{(Q^2-1/4)^n} + \frac{1}{Q^n}} \quad (2.11)$$

Χρησιμοποιώντας την προσεγγιστική σχέση (2.9) για $N=7$ (δηλαδή $Q=4.58$) και $n=4$, ο λόγος σήματος προς παρεμβολή είναι $S/I=18.66\text{dB}$, ενώ χρησιμοποιώντας την ακριβή λύση, δηλαδή την σχέση (2.11) ο λόγος $S/I=17\text{dB}$. Επομένως, εάν για το προηγούμενο σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας ο ελάχιστος αποδεκτός λόγος S/I είναι 18dB , τότε για να ικανοποιηθεί το κριτήριο S/I το μέγεθος ομάδας θα πρέπει να πάρει την αμέσως επόμενη διαθέσιμη τιμή, δηλαδή 12. Η επίπτωση είναι η μείωση της χωρητικότητας του συστήματος κατά $7/12$, μια μείωση που για πρακτικά συστήματα είναι ανεπίτρεπτη. Είναι λοιπόν φανερό

ότι η συγκαναλική παρεμβολή επηρεάζει σημαντικά τη στρατηγική επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων και κατ' επέκταση την χωρητικότητα συστημάτων κυψελωτής τηλεφωνίας.



Σχήμα 2-6. Απεικόνιση του σεναρίου παρεμβολής στη λήψη του καθοδικού καναλιού σε κινητό σταθμό εξ αιτίας του πρώτο στρώματος συγκαναλικών σταθμών βάσης σε σύστημα κινητής τηλεφωνίας με μέγεθος ομάδας $N=7$. Η δυσμενέστερη περίπτωση παρεμβολής παρατηρείται όταν το κινητό τηλέφωνο ευρίσκεται στα όρια της κυψέλης (στο σημείο A).

2.10 Παρεμβολή γειτονικού καναλιού

Παρεμβολή που οφείλεται σε σήματα τα οποία εκπέμπονται σε συχνότητες όμορες αυτής του επιθυμητού σήματος ονομάζεται **παρεμβολή γειτονικού καναλιού (adjacent channel interference)**. Η παρεμβολή γειτονικού καναλιού οφείλεται στην ύπαρξη μη ιδανικών φίλτρων που επιτρέπουν την λήψη γειτονικών συχνοτήτων εντός της ζώνης λήψης συχνοτήτων του δέκτη. Το

πρόβλημα καθίσταται ιδιαίτερα σοβαρό όταν η εκπομπή παρεμβάλλοντος γειτονικού καναλιού λαμβάνει χώρα σε πολύ κοντινή απόσταση από τον παρεμβαλλόμενο δέκτη. Η περίπτωση αυτή αναφέρεται ως το **κοντινό-μακρινό φαινόμενο (near-far effect)**. Το κοντινό-μακρινό φαινόμενο συμβαίνει επίσης όταν ένας κινητός σταθμός που ευρίσκεται κοντά στο σταθμό βάσης (και επομένως έχει ισχυρή στάθμη σήματος) μεταδίδει σε κανάλι γειτονικό προς αυτό που χρησιμοποιείται από κινητό σταθμό με ασθενή στάθμη σήματος.

Η παρεμβολή γειτονικού καναλιού μπορεί να μειωθεί με την προσεκτική επιλογή φίλτρων και στρατηγικές ανάθεσης καναλιών. Εφόσον σε κάθε κυψέλη αποδίδεται μόνο κλάσμα των διαθέσιμων καναλιών δεν είναι απαραίτητο σε γειτονικές κυψέλες να ανατεθούν γειτονικά σε συχνότητα κανάλια. Διατηρώντας την ‘απόσταση’ συχνότητας μεταξύ των καναλιών σε μια κυψέλη όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, το φαινόμενο γειτονικής παρεμβολής μπορεί να περιοριστεί σε σημαντικό βαθμό. Σε περίπτωση που ο παράγοντας επαναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι μικρός, η ‘απόσταση’ μεταξύ γειτονικών καναλιών μπορεί να μην είναι επαρκής να διατηρήσει την στάθμη παρεμβολής σε χαμηλά (επιτρεπτά) επίπεδα. Ας υποθέσουμε τώρα ότι ένα κινητό με ισχυρό σήμα έχει διαρροή ενέργειας εκτός του διαύλου που χρησιμοποιεί και απέχει απόσταση d_i από το σταθμό βάσης. Την ίδια στιγμή ένα άλλο κινητό με αδύνατο σήμα χρησιμοποιεί γειτονικό δίαυλο και απέχει απόσταση d_w ($d_w \ll d_i$) από τον ίδιο σταθμό βάσης. Τότε, για περιβάλλον διάδοσης στο οποίο ο εκθέτης απωλειών διάδοσης είναι n , ο λόγος του σήματος προς την παρεμβολή S/I στην είσοδο του απομακρυσμένου κινητού σταθμού (πριν ο δέκτης φιλτράρει το σήμα) δίδεται προσεγγιστικά από την σχέση:

$$\frac{S}{I} = \left(\frac{d_w}{d_i} \right)^n \quad (2.12)$$

Για $n=4$ και $d_i=20 \cdot d_w$ ο λόγος S/I λαμβάνει την τιμή -52dB . Εάν το φίλτρο της ενδιάμεσης βαθμίδας του δέκτη του σταθμού βάσης έχει κλίση $-20\text{dB}/\text{οκτάβα}$, τότε η συχνότητα παρεμβολής γειτονικού καναλιού θα πρέπει να απέχει από το κέντρο της ζώνης εκπομπής κατά ένα εύρος ζώνης ίσο τουλάχιστον με το εξαπλάσιο του εύρους ζώνης εκπομπής για να επιτευχθεί εξασθένηση ίση με 52dB . Στην πράξη φίλτρα με υψηλό παράγοντα Q τοποθετούνται πριν το δέκτη του σταθμού βάσης, έτσι ώστε να απορρίπτεται η παρεμβολή γειτονικού καναλιού.

2.11 Έλεγχος ισχύος για την μείωση παρεμβολών

Σε πρακτικά συστήματα κινητών και προσωπικών επικοινωνιών η ισχύς που εκπέμπουν οι κινητοί σταθμοί ελέγχονται διαρκώς από τον εκάστοτε εξυπηρετούμενο σταθμό βάσης. Αυτό γίνεται ώστε κάθε κινητός σταθμός να διατηρεί ανοδική ζεύξη καλής ποιότητας με το σταθμό βάσης εκπέμποντας την ελάχιστη δυνατή ισχύ εκπομπής. Ο έλεγχος της ισχύος εκπομπής όχι μόνο επιμηκύνει την ζωή της μπαταρίας του κινητού σταθμού του συνδρομητή, αλλά επίσης μειώνει σημαντικά το λόγο S/I στο ανοδικό κανάλι του συστήματος. Ο έλεγχος ισχύος είναι ιδιαίτερα σημαντικός στα συστήματα κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενεάς που χρησιμοποιούν τεχνικές διασποράς φάσματος (**spread spectrum techniques**) και πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης με κωδικοποιημένο επιμερισμό (**coded division multiple access - CDMA**) και επιτρέπουν σε κάθε χρήστη να μοιραστεί με άλλους τον ίδιο ακριβώς ραδιοδιάυλο.

2.12 Θεωρία τηλεφωνικής κίνησης

Τα συστήματα κυψελωτής τηλεφωνίας βασίζονται στην αρχή της **πολυπλεξίας κορμού (trunking)** για να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό χρηστών με περιορισμένη ποσότητα φάσματος. Η αρχή πολυπλεξίας κορμού επιτρέπει σε μεγάλο αριθμό χρηστών να μοιραστούν το σχετικά μικρό αριθμό καναλιών σε μια κυψέλη προσδίδοντας κατ' απαίτηση πρόσβαση σε κάθε χρήστη από ένα αποθεματικό (δεξαμενή) διαθέσιμων καναλιών. Για κάθε τηλεφωνική κλήση σε ένα σύστημα πολυπλεξίας κορμού διατίθεται στο χρήστη ένα κανάλι το οποίο μετά το πέρας της συνδιάλεξης επιστρέφεται στη δεξαμενή των διαθέσιμων καναλιών.

Η πολυπλεξία κορμού εκμεταλλεύεται την στατιστική συμπεριφορά των συνηθειών χρήσης έτσι ώστε ένας περιορισμένος αριθμός καναλιών ή κυκλωμάτων να είναι σε θέση να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο πληθυσμό χρηστών. Οι εταιρείες σταθερής τηλεφωνίας (π.χ. ο ΟΤΕ) έχουν εφαρμόσει εδώ και πολλά χρόνια την αρχή της πολυπλεξίας κορμού. Η ίδια αρχή χρησιμοποιείται και στα πλαίσια των κινητών επικοινωνιών για την σχεδίαση των δικτύων εξυπηρέτησης των συνδρομητών.

Για να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο συστήματα πολυπλεξίας κορμού μπορούν να εξυπηρετήσουν την απαίτηση για συγκεκριμένη χωρητικότητα με δεδομένη ποιότητα υπηρεσίας (grade of service - GoS), είναι απαραίτητο να κατανοήσουμε τη θεωρία πολυπλεξίας γραμμών και τη θεωρία ουρών. Οι βασικές αρχές της θεωρίας πολυπλεξίας γραμμών θεμελιώθηκαν από τον Δανό μαθηματικό Erlang στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Σήμερα, η μονάδα μέτρησης τηλεφωνικής κίνησης φέρει το όνομά του. Ένα Erlang ισοδυναμεί με την τηλεφωνική κίνηση που μεταφέρει ένα κανάλι που είναι πλήρως απασχολημένο (π.χ. κλήση διάρκειας μιας ώρας σε χρονικό διάστημα μιας ώρας). Ο δείκτης ποιότητας υπηρεσίας (GoS) αποτελεί μέτρο της δυνατότητας του χρήστη να έχει πρόσβαση στο σύστημα πολυπλεξίας κορμού κατά την διάρκεια της ώρας

αιχμής (busiest hour) τηλεφωνικής ζήτησης. Η ώρα αιχμής τηλεφωνικής ζήτησης μπορεί να αναφέρεται σε χρονικό διάστημα μιας εβδομάδας, μήνα ή ακόμα και χρόνου. Οι ώρες αιχμής για συστήματα κινητής τηλεφωνίας συνήθως συμπίπτουν με τις ώρες αυξημένης οδικής κυκλοφορίας στους δρόμους. Ο δείκτης ποιότητας υπηρεσίας συνήθως εκφράζεται ως η πιθανότητα μπλοκαρίσματος μιας κλήσης, ή ως η πιθανότητα μια κλήση να καθυστερήσει να πραγματοποιηθεί για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από ένα συγκεκριμένο χρόνο αναμονής στην ουρά αναμονής κλήσεων. Ο Πίνακας 2-2 περιγράφει τους όρους που χρησιμοποιούνται στην θεωρία πολυπλεξίας κορμού.

Παράμετρος	Ορισμός
Χρόνος προετοιμασίας (set-up time)	Ο χρόνος που απαιτείται για την ανάθεση ραδιοδιαύλου σε αιτούντα χρήστη
Μπλοκαρισμένη κλήση (blocked call)	Κλήση που δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί την στιγμή που ο χρήστης την αιτείται λόγω συμφόρησης (δεν υπάρχει διαθέσιμο κανάλι).
Διάρκεια κλήσης (holding time)	Μέση διάρκεια τυπικής κλήσης. Συμβολίζεται με H και μετράται σε δευτερόλεπτα (s).
Ένταση τηλεφωνικής κίνησης (traffic intensity)	Τρόπος μέτρησης της χρονικής απασχόλησης καναλιού που μετράται σε Erlangs. Συμβολίζεται με A .
Φορτίο (load)	Η συνολική ένταση τηλεφωνικής κίνησης στο σύστημα πολυπλεξίας κορμού, η οποία μετράται σε Erlangs.
Ρυθμός αιτήσεων (request rate)	Ο μέσος αριθμός αιτήσεων κλήσεων στη μονάδα του χρόνου. Συμβολίζεται με μ και μετράται σε Hz (1/s).
Δείκτης ποιότητας υπηρεσίας (grade of service - GoS)	Δείκτης μέτρο της συμφόρησης, ο οποίος ορίζεται ως η πιθανότητα μπλοκαρίσματος μιας κλήσης, ή ως η πιθανότητα μια κλήση να καθυστερήσει να πραγματοποιηθεί για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από ένα συγκεκριμένο χρόνο αναμονής στην ουρά αναμονής κλήσεων.

Πίνακας 2-2. Ορισμοί συνήθων όρων που χρησιμοποιούνται στην θεωρία πολυπλεξίας κορμού.

Η προσφερόμενη από κάθε χρήστη ένταση τηλεφωνικής κίνησης ισούται με το γινόμενο του ρυθμού αιτήσεων κλήσεων και της διάρκειας κλήσης, δηλαδή κάθε χρήστης συνεισφέρει ένταση τηλεφωνικής κίνησης A_u Erlangs που δίδεται από την σχέση:

$$A_u = \mu \cdot H \quad (2.13)$$

Για ένα σύστημα που έχει αριθμό U χρηστών και απροσδιόριστο αριθμό καναλιών (δηλαδή διαθέτει άπειρη χωρητικότητα), η συνολική προσφερόμενη ένταση τηλεφωνικής κίνησης A δίδεται από την σχέση:

$$A = U \cdot A_u \quad (2.14)$$

Επίσης, εάν σε ένα σύστημα πολυπλεξίας κορμού χωρητικότητας (capacity) C , η ένταση τηλεφωνικής κινήσεως είναι ισομερώς κατανεμημένη στα κανάλια του συστήματος, τότε η ένταση ανά κανάλι A_c δίδεται από την σχέση:

$$A_c = \frac{U \cdot A_u}{C} \quad (2.15)$$

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προσφερόμενη τηλεφωνική κίνηση δεν αποτελεί απαραίτητα την τηλεφωνική κίνηση που μεταφέρεται από το σύστημα πολυπλεξίας κορμού, αλλά απλά την κίνηση που προσφέρεται προς εξυπηρέτηση στο σύστημα πολυπλεξίας κορμού. Όταν η προσφερόμενη τηλεφωνική κίνηση υπερβεί τη μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος, τότε η μεταφερόμενη κίνηση περιορίζεται στη μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος.

Στην πράξη χρησιμοποιούνται ευρέως δύο συστήματα πολυπλεξίας κορμού. Το πρώτο σύστημα δεν διαθέτει ουρά αναμονής για τις επιχειρούμενες κλήσεις. Δηλαδή, για την έναρξη μιας κλήσης δεν υφίσταται χρόνος προετοιμασίας, και εάν υπάρχει διαθέσιμο κανάλι τότε αυτό δεσμεύεται και η κλήση πραγματοποιείται. Εάν δεν υπάρχει διαθέσιμο κανάλι η κλήση μπλοκάρεται αλλά ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσπαθήσει πάλι αργότερα. Το είδος αυτό πολυπλεξίας κορμού ονομάζεται **σύστημα εκκαθάρισης μπλοκαρισμένων κλήσεων (blocked calls cleared)**. Θεωρώντας ότι ισχύουν οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- 1) οι αφιχθείσες κλήσεις ακολουθούν την κατανομή Poisson,
- 2) ο αριθμός χρηστών είναι άπειρος,
- 3) κάθε χρήστης συμπεριλαμβανομένων και αυτών που είναι μπλοκαρισμένοι μπορούν να ζητήσουν την πραγματοποίηση κλήσης οποιαδήποτε στιγμή,
- 4) η πιθανότητα κάποιος χρήστης να έχει δεσμευμένο κανάλι ακολουθεί την εκθετική κατανομή, δηλαδή κλήσεις μεγάλης διάρκειας έχουν πολύ μικρότερη πιθανότητα να συμβούν,
- 5) ο διαθέσιμος αριθμός καναλιών στο αποθεματικό του συστήματος είναι πεπερασμένος,
- 6) ο αριθμός των απασχολημένων καναλιών ισούται με τον αριθμό των ενεργών χρηστών,
- 7) τα χρονικά διαστήματα που μεσολαβούν μεταξύ των αιτημάτων για πραγματοποίηση κλήσεων είναι ανεξάρτητα μεταξύ των,

καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός της πιθανότητας μπλοκαρίσματος $P_r[\text{blocked}]$ μιας κλήσης. Στην μαθηματική ορολογία το σύστημα αυτό πολυπλεξίας κορμού ονομάζεται Erlang- B και η πιθανότητα μπλοκαρίσματος κλήσης δίδεται από την σχέση:

$$P_r(C, A) = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} = GoS \quad (2.16)$$

όπου C είναι ο αριθμός των καναλιών του συστήματος πολυπλεξίας κορμού και A είναι η συνολικά προσφερόμενη ένταση τηλεφωνικής κίνησης. Η παραπάνω σχέση είναι γνωστή ως η εξίσωση Erlang-B και ενώ είναι μαθηματικά εφικτή η ανάλυση πολυπλεγμένων συστημάτων κορμού με ορισμένο αριθμό χρηστών, οι προκύπτουσες μαθηματικές εκφράσεις είναι τόσο πολύπλοκες και το ουσιαστικό κέρδος σε ακρίβεια τόσο μικρό, που δεν δικαιολογείται η ρεαλιστική υιοθέτησή τους για την ανάλυση πρακτικών συστημάτων.

Επιπροσθέτως, εξαιτίας της υπόθεσης του απείρου αριθμού χρηστών, η υιοθέτηση της φόρμουλας Erlang-B εκτιμά πάντοτε πιο συντηρητικά τον δείκτη ποιότητας υπηρεσίας (GoS) συστημάτων πολυπλεξίας κορμού. Ο Πίνακας 2-3 περιέχει τις τιμές χωρητικότητας ενός συστήματος Erlang-B για το οποίο οι κλήσεις μπλοκάρονται για συγκεκριμένο δείκτη ποιότητας υπηρεσίας.

Αριθμός καναλιών C (capacity)	Χωρητικότητα σε Erlangs για δεδομένο δείκτη ποιότητας υπηρεσίας			
	$GoS = 0.01$	$GoS = 0.005$	$GoS = 0.002$	$GoS = 0.001$
2	0.153	0.105	0.065	0.046
4	0.869	0.701	0.535	0.439
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09
20	12.0	11.1	10.1	9.41
24	15.3	14.2	13.0	12.2
40	29.0	27.3	25.7	24.5
70	56.1	53.7	51.0	49.2
100	84.1	80.9	77.4	75.2

Πίνακας 2-3. Χωρητικότητα ενός συστήματος Erlang-B.

Το δεύτερο είδος συστήματος πολυπλεξίας κορμού διαθέτει ουρά αναμονής στην οποία τοποθετούνται κλήσεις που έχουν μπλοκαριστεί. Εάν κάποιο κανάλι δεν είναι άμεσα διαθέσιμο, το αίτημα για κλήση καθυστερείται (παραμένοντας στην ουρά) μέχρις ότου κάποιο καταστεί διαθέσιμο. Το είδος αυτό πολυπλεξίας κορμού ονομάζεται σύστημα **καθυστερημένων μπλοκαρισμένων κλήσεων (blocked calls delayed)** και ο δείκτης ποιότητας υπηρεσίας ορίζεται ως η πιθανότητα μπλοκαρίσματος $P_r[\text{delay} > t]$ μιας κλήσης μετά από αναμονή (delay) ορισμένου χρονικού διαστήματος t στην ουρά αναμονής. Προκειμένου να εκτιμήσουμε το δείκτη ποιότητας υπηρεσίας (GoS) είναι αναγκαίο πρώτα να εκτιμήσουμε την πιθανότητα μια κλήση αρχικά να μην εξυπηρετηθεί από το σύστημα, δηλαδή να εκτιμήσουμε την πιθανότητα $P_r[\text{delay} > 0]$. Η πιθανότητα αυτή δίδεται από τη σχέση, η οποία είναι επίσης γνωστή και ως η φόρμουλα Erlang-C:

$$P_r[\text{delay} > 0] = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}} \quad (2.17)$$

Εάν κανένα κανάλι δεν είναι άμεσα διαθέσιμο η κλήση τοποθετείται στην ουρά αναμονής, και η πιθανότητα $P_r[\text{delay} > t]$ να καθυστερήσει παραπάνω από χρόνο t , δίδεται από το γινόμενο της πιθανότητας να καθυστερήσει και της δεσμευμένης πιθανότητας η καθυστέρηση να είναι μεγαλύτερη από t δευτερόλεπτα. Επομένως ο δείκτης ποιότητας υπηρεσίας σε ένα σύστημα Erlang-C δίδεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} P_r[\text{delay} > t] &= P_r[\text{delay} > 0] \cdot P_r[\text{delay} > t \mid \text{delay} > 0] \\ &= P_r[\text{delay} > 0] \cdot \exp\left[-\frac{(C-A) \cdot t}{H}\right] \end{aligned} \quad (2.18)$$

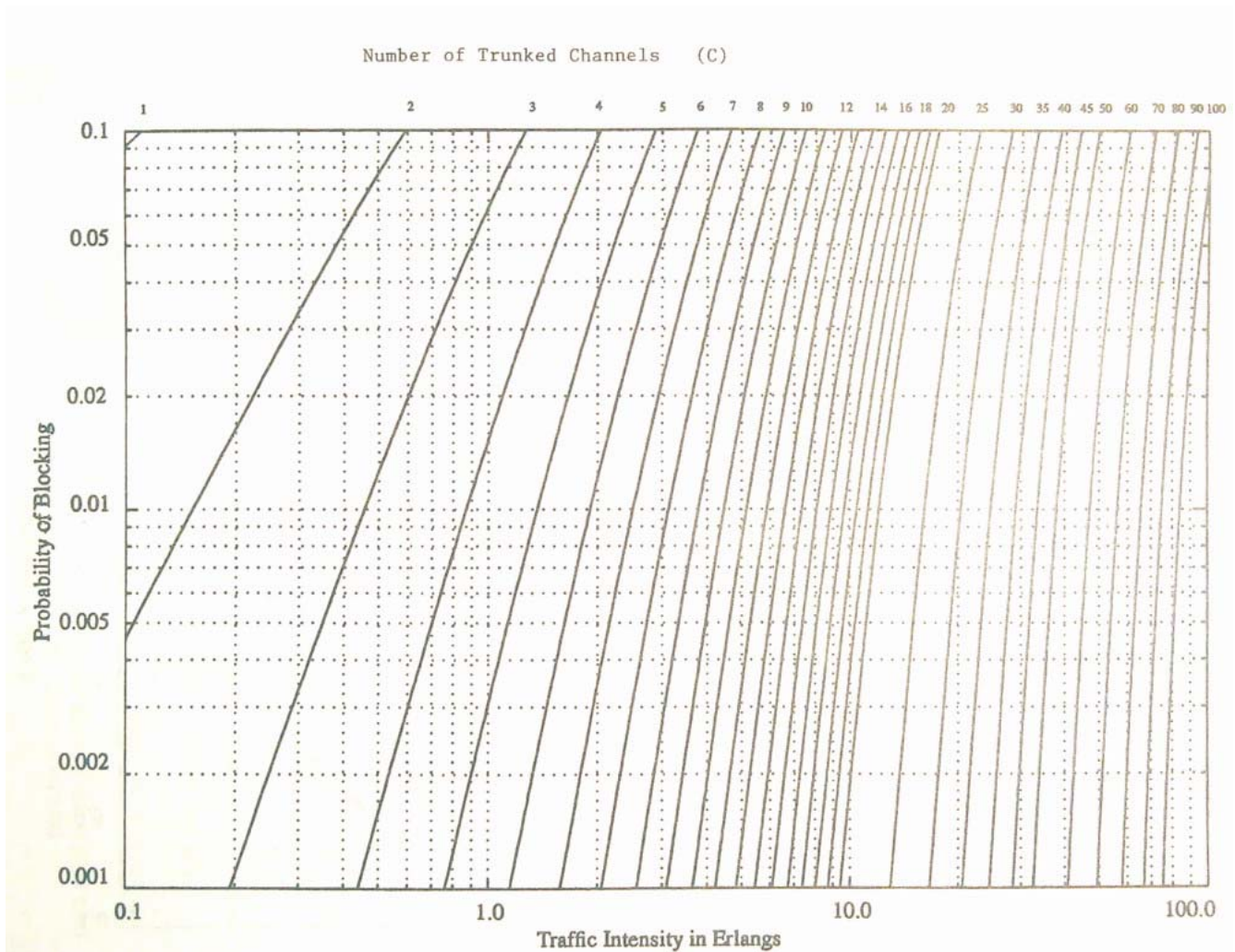
Η μέση καθυστέρηση D για όλες τις κλήσεις σε ένα σύστημα που διαθέτει ουρά αναμονής δίδεται από την σχέση:

$$D = P_r[\text{delay} > 0] \cdot \frac{H}{C-A} \quad (2.19)$$

όπου η μέση καθυστέρηση για τις κλήσεις που ευρίσκονται στην ουρά αναμονής δίδεται από το κλάσμα $H/(C-A)$.

Οι μαθηματικές σχέσεις Erlang-B και Erlang-C έχουν σχεδιαστεί διαγραμματικά στο Σχήμα 2-7 και

Σχήμα 2-8, αντίστοιχα. Τα Σχήματα αυτά είναι χρήσιμα για τον ταχύ υπολογισμό του δείκτη ποιότητας υπηρεσίας χωρίς τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών.

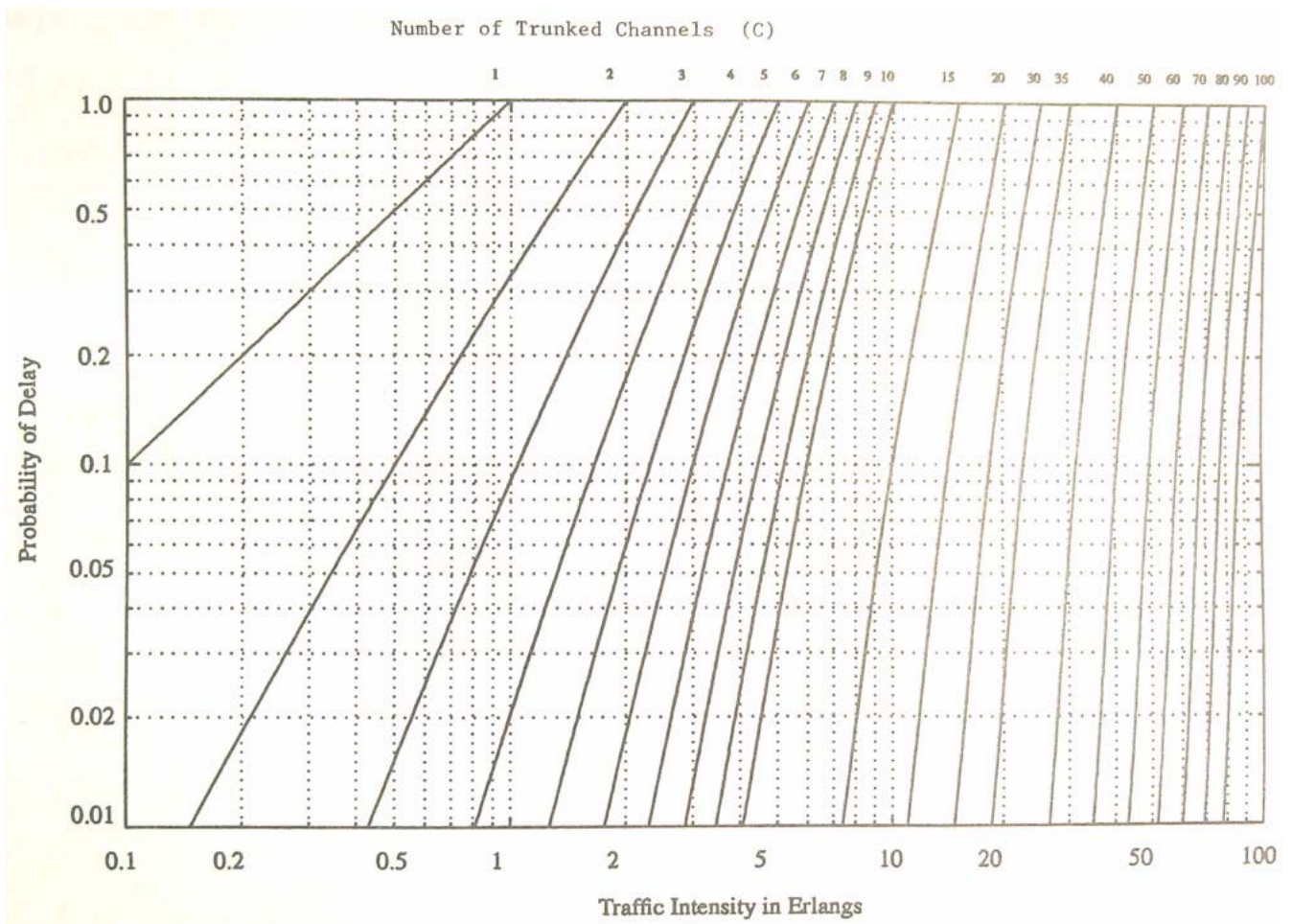


Σχήμα 2-7. Το διάγραμμα Erlang-B που απεικονίζει την πιθανότητα μπλοκαρίσματος $P_r[\text{blocked}]$ ως συνάρτηση του αριθμού καναλιών C και της εντάσεως τηλεφωνικής κίνησης A σε Erlangs.

Ο ακριβής υπολογισμός της σχέσης (2.16) είναι επίσης με ακρίβεια εφικτός με τη χρήση του ακόλουθου επαναληπτικού αλγορίθμου:

$$P_r(0, A) = 1$$

$$P_r(C, A) = \frac{A \cdot P_r(C-1, A)}{C + A \cdot P_r(C-1, A)} \quad (2.20)$$



Σχήμα 2-8. Το διάγραμμα Erlang-C που απεικονίζει την πιθανότητα μπλοκαρίσματος $P_r[\text{delay} > 0]$ ως συνάρτηση του αριθμού καναλιών C και της εντάσεως τηλεφωνικής κίνησης A σε Erlangs.

Η απόδοση ενός συστήματος πολυπλεξίας κορμού (trunking efficiency) μετράται με τον αριθμό χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν με δεδομένο δείκτη

ποιότητας υπηρεσίας από μια συγκεκριμένη συνδεσμολογία καναλιών. Ο τρόπος με τον οποίο ομαδοποιούνται τα κανάλια επηρεάζει σημαντικά την χωρητικότητα του συστήματος (δηλαδή τον αριθμό των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από το σύστημα). Για παράδειγμα, αναφερόμενοι σε ένα σύστημα Erlang-B για το οποίο $GoS=0.002$, είκοσι κανάλια κορμού εξυπηρετούν ένταση τηλεφωνικής κίνησης 10.1 Erlangs, ενώ τέσσερις ομάδες των πέντε καναλιών κορμού εξυπηρετούν ένταση τηλεφωνικής κίνησης $4 \times 0.9 = 3.6$ Erlangs. Είναι φανερό ότι είκοσι κανάλια κορμού εξυπηρετούν τηλεφωνική κίνηση κατά 280% περισσότερο από τέσσερις ομάδες των πέντε καναλιών!

2.13 Αύξηση της χωρητικότητας σε συστήματα κυψελωτής τηλεφωνίας

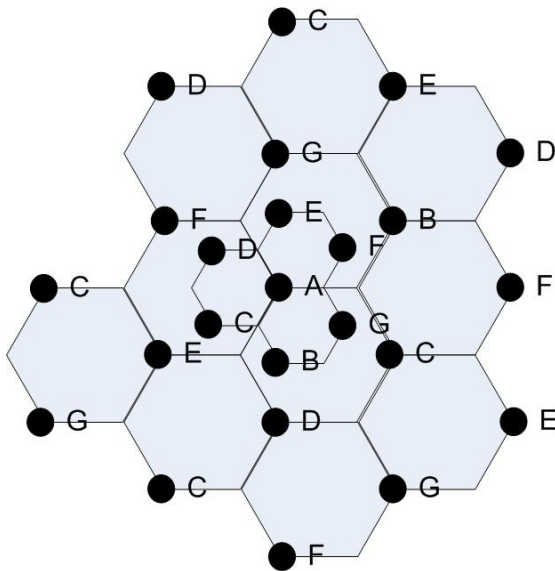
Καθώς η ζήτηση για παροχή υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας αυξάνεται, ο αρχικός αριθμός συχνοτήτων που εκχωρήθηκε σε μια κυψέλη δεν επαρκεί για να καλύψει τις νέες ανάγκες. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές που αποσκοπούν στην αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων καναλιών ανά κυψέλη. Αυτές είναι: (α) η τεχνική της διαίρεσης κυψέλης, (β) η τεχνική της τομεοποίησης κυψέλης και (γ) η τεχνική της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες. Η διαίρεση κυψελών επιτρέπει την αύξηση χωρητικότητας με συστηματικό τρόπο. Η τεχνική της τομεοποίησης κυψέλης χρησιμοποιεί κατευθυντικές κεραίες για να βελτιώσει την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων και να περιορίσει τις παρεμβολές. Η τεχνική της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες οδηγεί στην κατανεμημένη ραδιοκάλυψη της κυψέλης, ενώ ταυτόχρονα επεκτείνει τα όρια κάλυψης σε περιοχές που είναι δύσκολο να καλυφθούν.

Για να επιτύχει την αύξηση της χωρητικότητας, η τεχνική της διαίρεσης κυψέλης αυξάνει τον αριθμό των απαιτούμενων σταθμών βάσης. Οι τεχνικές της τομεοποίησης κυψέλης και της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες επιτυγχάνουν την αύξηση χωρητικότητας με την ελάττωση της συγκαταλικής παρεμβολής

τοποθετώντας τις κεραιών των σταθμών βάσης σε κατάλληλα σημεία. Αντίθετα με την τεχνική της τομεοποίησης κυψέλης, η εφαρμογή των τεχνικών διαίρεσης κυψέλης και ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες δεν έχει επίπτωση στην απόδοση του συστήματος πολυπλεξίας κορμού, επιτρέποντας ουσιαστικά στους σταθμούς βάσης να χειριστούν τα τοπικά ζητήματα μεταπομπής και απαλλάσσοντας το κέντρο μεταγωγής από το διαχειριστικό φόρτο. Οι τρεις αυτές διαδεδομένες τεχνικές αύξησης χωρητικότητας περιγράφονται παρακάτω με λεπτομέρεια.

2.14 Διαίρεση κυψέλης

Διαίρεση κυψέλης είναι η διαδικασία υποδιαίρεσης μιας κορεσμένης κυψέλης σε μικρότερες και η ανάθεση εξυπηρέτησής των σε αντίστοιχους νέους σταθμούς βάσης που έχουν ελαττωμένο ύψος κεραιών και μειωμένη ισχύ εκπομπής σε σχέση με τον αρχικό. Η διαίρεση κυψέλης αυξάνει την χωρητικότητα ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας καθότι τα κανάλια επαναχρησιμοποιούνται περισσότερες φορές.



Σχήμα 2-9. Παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής διαίρεσης κυψελών.

Στο Σχήμα 2-9 παρουσιάζεται ένα κλασσικό παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής διαίρεσης κυψέλης. Οι σταθμοί βάσης του αρχικού πλάνου κάλυψης

είναι τοποθετημένοι στις γωνίες των εξαγωνικών κυψελών και η κυψέλη που εξυπηρετείται από το σταθμό βάσης A είναι κορεσμένη. Έτσι προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα, ο σταθμός βάσης A περιστοιχίζεται από τρεις νέους σταθμούς βάσης οι οποίοι έχουν ακτίνα κυψέλης τη μισή από την αρχική, ενώ το πλάνο συχνοτήτων εξακολουθεί να είναι συνεπές προς το αρχικό σχέδιο επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Μια πιο προσεκτική επισκόπηση στο Σχήμα 2-9 αποκαλύπτει ότι η τεχνική της διαίρεσης κυψέλης απλά έχει ως αποτέλεσμα την σμίκρυνση της γεωμετρίας της ομάδας. Για να εξακολουθήσει να ισχύει το σχέδιο συχνοτήτων, η ισχύς εκπομπής των νέων μικρότερων κυψελών πρέπει να μειωθεί. Η νέα μειωμένη ισχύς εκπομπής μπορεί να προσδιοριστεί εξισώνοντας τις τιμές της ληφθείσας ισχύος στα νέα και παλαιά όρια. Πιο συγκεκριμένα, στα παλαιά όρια $P_{r1} \propto P_{t1} / R^n$ και στα νέα $P_{r2} \propto P_{t2} / (R/2)^n$ και εξισώνοντας προκύπτει ότι:

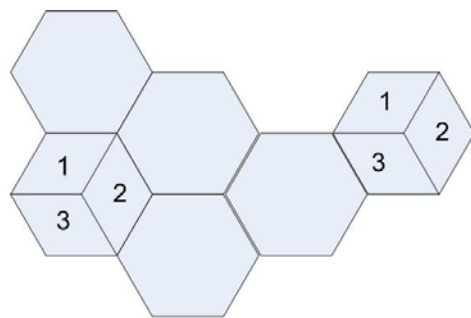
$$P_{t2} = \frac{P_{t1}}{2^n} \quad (2.21)$$

Στην πραγματικότητα δεν διαιρούνται όλες οι κυψέλες ταυτόχρονα, διότι είναι αρκετά δύσκολο στους παρόχους κινητής τηλεφωνίας να βρουν κατάλληλες θέσεις για την εγκατάσταση νέων σταθμών βάσης στα προβλεπόμενα σημεία. Έτσι σε πρακτικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας συνυπάρχουν κυψέλες διαφόρων μεγεθών ως αποτέλεσμα της εφαρμογής της τεχνικής διαίρεσης κυψελών. Συνοψίζοντας, η τεχνική της διαίρεσης κυψέλης επιτυγχάνει την αύξηση χωρητικότητας ελαττώνοντας την ακτίνα R της κυψέλης και διατηρώντας το λόγο συγκαναλικής επαναχρησιμοποίησης D/R σταθερό.

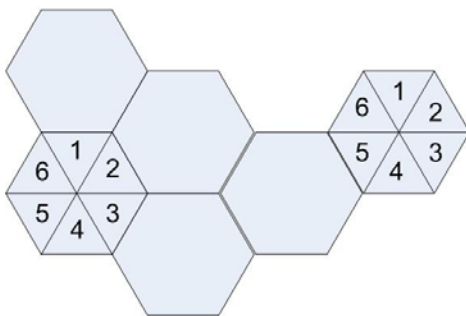
2.15 Τεχνική τομεοποίησης κυψελών

Στην τεχνική αυτή η αύξηση της χωρητικότητας επιτυγχάνεται με την ελάττωση του λόγου συγκαναλικής επαναχρησιμοποίησης D/R και τη διατήρηση της

ακτίνας R της κυψέλης σταθερή, που ουσιαστικά ισοδυναμεί με την μείωση του μεγέθους ομάδας. Προκειμένου να εφαρμοστεί η τεχνική αυτή θα πρέπει να μειωθεί το επίπεδο συγκαταλικής παρεμβολής χωρίς όμως ανάλογη μείωση της ισχύος εκπομπής. Αυτό καθίσταται δυνατό με την αντικατάσταση της πανκατευθυντικής κεραίας του σταθμού βάσης από άλλες κατευθυντικές καθεμιά από τις οποίες εκπέμπει σε ορισμένο τομέα. Με την χρήση κατευθυντικών κεραιών μόνο ένα μέρος των διαθέσιμων συχνοτήτων εκπέμπεται προς μια ορισμένη κατεύθυνση και επομένως μια κυψέλη δέχεται συγκαταλική παρεμβολή μόνο από τους σχετικούς διαύλους και από συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η μείωση της στάθμης της συγκαταλικής παρεμβολής εξαρτάται από το βαθμό τομεοποίησης. Μια εξαγωνική κυψέλη συνήθως διαχωρίζεται σε τρεις ή έξη τομείς των 120° ή 60° , αντίστοιχα. Το Σχήμα 2-10 παρουσιάζει την τεχνική της τομεοποίησης κυψέλης για τις παραπάνω περιπτώσεις.



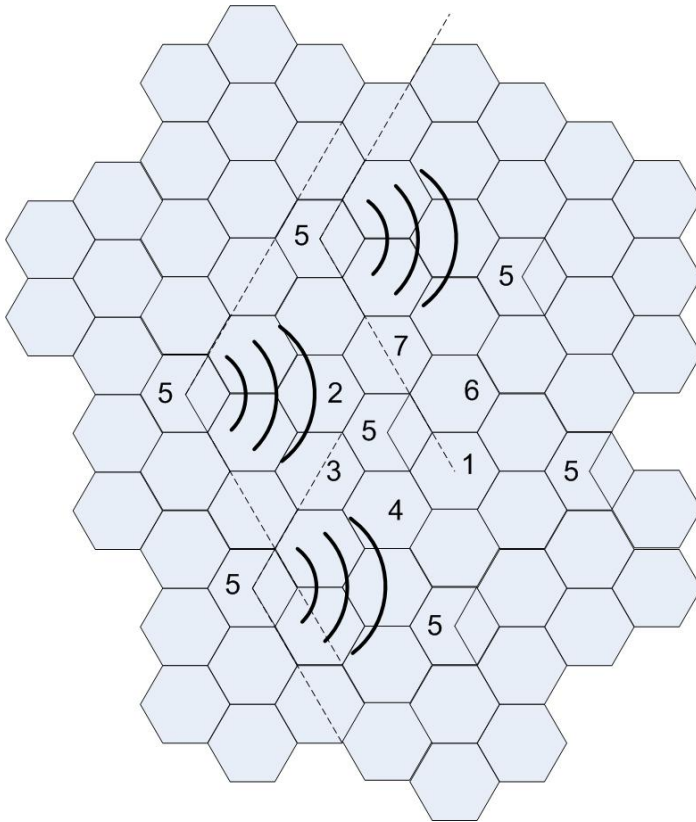
(a)



(b)

Σχήμα 2-10. Τομεοποίηση κυψέλης για (a) τρεις και (b) έξη τομείς.

Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται με την τομεοποίηση η μείωση της συγκαναλικής παρεμβολής προκύπτει από προσεκτική επισκόπηση στο Σχήμα 2-11 στο οποίο παρουσιάζεται ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας με μέγεθος ομάδας 7. Στην προκειμένη περίπτωση κάθε κυψέλη έχει τρεις τομείς των 120° . Ο αριθμός των συγκαναλικών παρεμβολών αναφορικά στο πρώτο στρώμα έχει μειωθεί αρχικά από 6 (περίπτωση χρήσης πανκατευθυντικής κεραίας στο κέντρο της κυψέλης) σε 2. Αναφερόμενοι στο Σχήμα 2-11 ας εξετάσουμε την παρεμβολή που δέχεται ένας κινητός σταθμός ευρισκόμενος στην κεντρική κυψέλη 5. Όπως βλέπουμε από το Σχήμα, οι τρεις συγκαναλικοί σταθμοί βάσης (υποδεικνύονται επίσης με τον αριθμό 5) που ευρίσκονται στα αριστερά της κεντρικής κυψέλης εκπέμπουν προς την κατεύθυνση που ευρίσκεται η κεντρική κυψέλη 5. Από αυτούς τους τρεις, μόνο οι δύο τελικά έχουν την δυνατότητα να παρεμβάλλουν την κεντρική κυψέλη όπως προκύπτει από την προέκταση των διαγραμμάτων ακτινοβολίας (το διάγραμμα ακτινοβολίας του σταθμού βάσης που ευρίσκεται αριστερά και πάνω δεν τέμνει την κεντρική κυψέλη).



Σχήμα 2-11. Πως η τεχνική τομεοποίησης κυψέλης σε τρεις τομείς οδηγεί στην ελάττωση συγκαταλικής παρεμβολής. Εδώ από το πρώτο στρώμα συγκαταλικών σταθμών βάσης μόνο δύο παρεμβάλλουν την κεντρική κυψέλη. Στην περίπτωση που οι σταθμοί βάσης χρησιμοποιούν πανκατευθυντικές κεραίες το σύνολο (έξι) των συγκαταλικών σταθμών παρεμβάλλει την κεντρική κυψέλη.

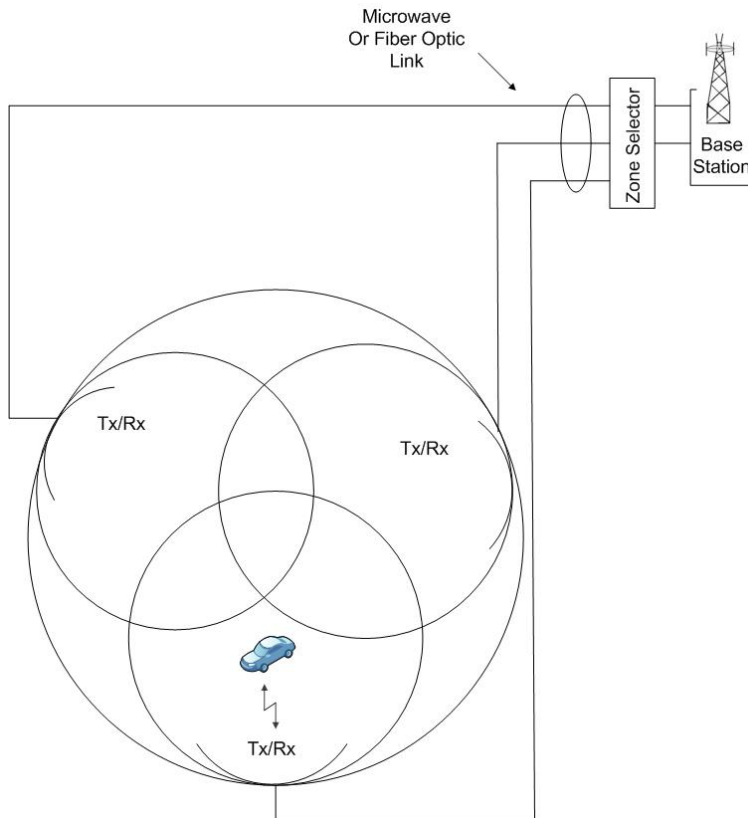
Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή S/I που προκύπτει προσεγγιστικά από την εφαρμογή του τύπου (2.9) για $n=3$ και $N=7$ είναι ίσος με 16.8dB, και αποτελεί σημαντική βελτίωση σε σχέση με την περίπτωση χρησιμοποίησης πανκατευθυντικών κεραιών όπου ο λόγος για $n=3$ και $N=12$ ισούται με 15.6dB. Η βελτίωση αυτή σημαίνει ότι με την τομεοποίηση 120° το κριτήριο του ελάχιστου αποδεκτού λόγου S/I των 15dB μπορεί να επιτευχθεί με μέγεθος ομάδας 7, σε αντιδιαστολή με την περίπτωση πανκατευθυντικών για την οποία όπως είδαμε το ελάχιστο μέγεθος ομάδας ήταν 12. Επομένως, η τεχνική της τομεοποίησης ελαττώνει την παρεμβολή και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας κατά έναν παράγοντα $12/7=1.714$ στη συγκεκριμένη περίπτωση.

Το αντίτιμο για τον βελτιωμένο λόγο S/I είναι η αύξηση του αριθμού κεραιών σε κάθε σταθμό βάσης και η μείωση της απόδοσης πολυπλεξίας κορμού. Επιπροσθέτως, λόγω του ότι η τομεοποίηση περιορίζει την ραδιοκάλυψη ενός συγκεκριμένου αριθμού καναλιών, αυξάνεται και ο αριθμός των μεταγωγών. Ευτυχώς, οι σύγχρονοι σταθμοί βάσεις υποστηρίζουν την τεχνική της τομεοποίησης επιτρέποντας στους κινητούς σταθμούς να μεταχθούν από τον ένα στον άλλο τομέα δίχως την μεσολάβηση του κέντρου μεταγωγής.

2.16 Η τεχνική της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες

Ο αυξημένος αριθμός των μεταγωγών που συνεπάγεται η υιοθέτηση της τεχνικής τομεοποίησης κυψέλης οδήγησε στην επινόηση της τεχνικής ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-12, κάθε μια από τις τρεις (ή πιθανόν περισσότερες) ζώνες ραδιοκάλυψης συνδέεται σε ένα και μόνο σταθμό βάσης με ενσύρματο ή ασύρματο τρόπο και μοιράζεται τον ίδιο ραδιοεξοπλισμό. Καθώς ο κινητός σταθμός μετακινείται εντός των ορίων της κυψέλης εξυπηρετείται από την ζώνη με το ισχυρότερο σήμα. Η προσέγγιση αυτή είναι ανώτερη από την τομεοποίηση διότι οι κεραίες τοποθετούνται στα εξωτερικά όρια της κυψέλης και κάθε συχνότητα μπορεί να εκχωρηθεί σε κάθε ζώνη από τον σταθμό βάσης. Καθώς ο κινητός σταθμός κινείται από την μια ζώνη στην άλλη εντός της κυψέλης, διατηρεί το ίδιο κανάλι κι έτσι δεν απαιτείται μεταπομπή όπως στην περίπτωση της τομεοποίησης. Επομένως, κάθε κανάλι είναι ενεργό μόνο στην ζώνη εντός της οποίας κινείται ο κινητός σταθμός περιορίζοντας έτσι την ακτινοβολία του σταθμού βάσης μόνο στα πλαίσια της ζώνης. Με αυτόν τον τρόπο το δυναμικό πρόκλησης παρεμβολής ελαττώνεται.

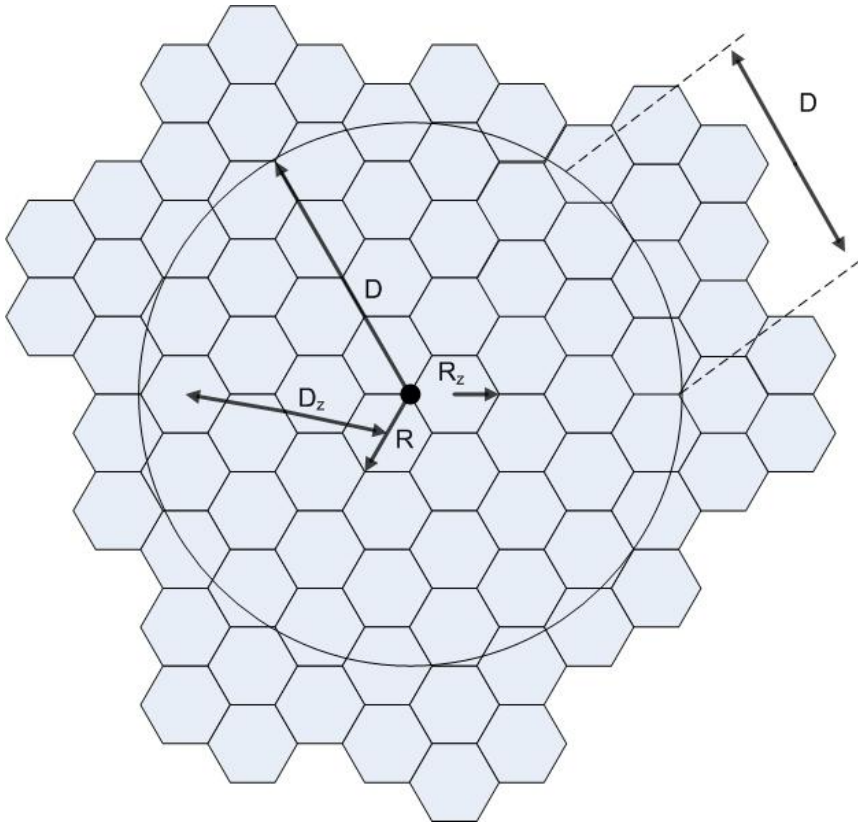
Το πλεονέκτημα της τεχνικής ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες είναι ότι παρά το ότι η κυψέλη διατηρεί την ακτίνα κάλυψής της, η συγκαναλική παρεμβολή στο σύστημα κινητής τηλεφωνίας ελαττώνεται αφού ένας σταθμός βάσης αντικαθίσταται από αρκετούς σταθμούς βάσης μικρότερης ισχύος.



Σχήμα 2-12. Η αρχή της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες.

Ο τρόπος με τον οποίο η τεχνική της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες επιτυγχάνει την αύξηση της χωρητικότητας ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-13. Στο Σχήμα αυτό κάθε κυψέλη του συστήματος αποτελείται από μια ομάδα τριών εξαγωνικών μικροκυψελών, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί και σε μια ζώνη κάλυψης. Η ακτίνα R_z εκάστης ζώνης ισούται προσεγγιστικά με την ακτίνα της μικροκυψέλης, ενώ η απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας όπως προκύπτει από το Σχήμα είναι D_z και περίπου τριπλάσια της ακτίνας της μικροκυψέλης. Έτσι ο λόγος επαναχρησιμοποίησης συχνότητας D_z/R_z λαμβάνει την τιμή 3, η οποία για το σύστημα αναφοράς της παραγράφου 2.9 επιτρέπει την υλοποίησή του με

μέγεθος ομάδας $N=3$ (γιατί;). Η μείωση του μεγέθους ομάδας οδηγεί στην αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος κατά ένα παράγοντα $7/3=2.33$ που ουσιαστικά οφείλεται μόνο και μόνο στην εφαρμογή της τεχνικής της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες.



Σχήμα 2-13. Η εφαρμογή της τεχνικής της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες (τρεις ανά κυψέλη) σε σύστημα κινητής τηλεφωνίας με $N=7$ και παρουσίαση της σχετικής γεωμετρίας.

2.17 Προβλήματα

2.1) Έστω ότι φάσμα 15MHz κατανέμεται σε κάποιο σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας που χρησιμοποιεί την τεχνική του επιμερισμού συχνότητας (FDD) και του οποίου κάθε αμφίδρομος δίαυλος ελέγχου ή ομιλίας

(ανοδική και καθοδική ζεύξη) έχει εύρος ζώνης $2 \times 25 \text{kHz} = 50 \text{kHz}$. Υπολογίστε τον αριθμό των καναλιών που είναι διαθέσιμα ανά κυψέλη εάν το σύστημα σχεδιαστεί με μέγεθος ομάδας 4, 7 και 12. Εάν φάσμα περίπου 5% πρέπει να δεσμευτεί για τα κανάλια ελέγχου, καθορίστε μια αναλογική κατανομή καναλιών ελέγχου και ομιλίας σε κάθε κυψέλη για κάθε ένα από τα τρία συστήματα.

- 2.2) Αποδείξτε ότι για την εξαγωνική γεωμετρία κυψελών, ο συγκαναλικός λόγος επαναχρησιμοποίησης δίδεται από τον τύπο $Q = \sqrt{3} \cdot N$.
- 2.3) Εάν ο ελάχιστος αποδεκτός λόγος σήματος προς παρεμβολή S/I για ένα ψηφιακό σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας είναι 15dB, ποιος πρέπει να είναι ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης συχνότητας και το μέγεθος ομάδας ώστε να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα του συστήματος όταν ο εκθέτης απωλειών διάδοσης λαμβάνει την τιμή 4 και 3. (Για την διευκόλυνσή σας υποθέστε ότι στο πρώτο στρώμα συγκαναλικών κυψελών υπάρχουν 6 κυψέλες, οι οποίες όλες απέχουν ίση απόσταση από τον κινητό σταθμό).
- 2.4) Ο ελάχιστος αποδεκτός λόγος σήματος προς παρεμβολή S/I για ένα ψηφιακό TDMA σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας είναι 15dB. Να προσδιοριστεί η βέλτιστη τιμή του μεγέθους ομάδας N για τις εξής περιπτώσεις: (α) όταν το σύστημα χρησιμοποιεί πανκατευθυντικές κεραιές, και (β) όταν χρησιμοποιείται τομεοποίηση 120° . Είναι κατά την άποψή σας προτιμητέο να υιοθετηθεί η τεχνική της τομεοποίησης όταν ο συνολικός αριθμός διαθέσιμων καναλιών στο σύστημα είναι 84; Υποθέστε ότι ο εκθέτης απωλειών διάδοσης $n=4$ και στην στοιχειοθέτηση των προτάσεων σας να λάβετε υπόψη σας και την απόδοση πολυπλεξίας κορμού.

- 2.5) Εάν στο προηγούμενο πρόβλημα ο εκθέτης απωλειών διάδοσης λάβει την τιμή 3, ποιες οι επιπτώσεις στην σχεδίαση του προτεινομένου συστήματος;
- 2.6) Ο συνολικός αριθμός καναλιών που χρησιμοποιούνται σε ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας είναι 60. Το σύστημα έχει 4 κυψέλες και η ακτίνα κάθε κυψέλης είναι 1.387km. Εάν το τηλεφωνικό φορτίο ανά χρήστη είναι 0.03Erlangs και $\mu=1$ κλήση/ώρα, υπολογίστε για σύστημα Erlang-C το οποίο έχει πιθανότητα μη εξυπηρέτησης κλήσης 5%: α) πόσοι χρήστες ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο μπορούν να εξυπηρετηθούν; β) Ποια η πιθανότητα μια καθυστερημένη κλήση να περιμένει για περισσότερο από 10s στην ουρά αναμονής; γ) Ποία η πιθανότητα μια κλήση να καθυστερηθεί για χρόνο μεγαλύτερο από 10s;
- 2.7) Για σύστημα κινητής τηλεφωνίας με συνολικό αριθμό διαθέσιμων καναλιών 84, μέγεθος ομάδας $N=7$ και αποδεκτή πιθανότητα μπλοκαρίσματος κλήσης $P_r[\text{blocking}]=1\%$, προσδιορίστε την μείωση της απόδοσης πολυπλεξίας κορμού κατά την μετάβαση από πανκατευθυντικές κεραίες σε κεραίες τομέων των 120° .
- 2.8) Υποθέστε ότι μια εταιρεία διανομής προϊόντων εξυπηρετείται από πομπό με ισοδύναμη ακτινοβολούμενη ισχύ $EIRP=32\text{Watt}$ που επαρκεί για την κάλυψη κυψέλης με ακτίνα 10km. Ο δείκτης ποιότητας υπηρεσίας για το συγκεκριμένο σύστημα είναι 5% αναφερόμενος σε μοντέλο πολυπλεξίας κορμού Erlang-B. Η μέση διάρκεια κλήσης είναι 2 λεπτά και κάθε χρήστης πραγματοποιεί 2 κλήσεις την ώρα. Η χωρητικότητα του παρόντος συστήματος έχει φθάσει σε σημείο κορεσμού και ο σχεδιαστής-μηχανικός αναγκάζεται να διαιρέσει την κυψέλη σε 4 μικρότερες, χρησιμοποιώντας τις τεχνικές του παρόντος κεφαλαίου. Για το σύστημα αυτό προσδιορίστε: (α) Ποια η τρέχουσα χωρητικότητα του συστήματος (πριν την διαίρεση); (β) Ποια η ακτίνα και η ισχύς εκπομπής των νέων κυψελών; (γ) Πόσα κανάλια πρέπει να έχουν οι νέες κυψέλες για να προκύψει ένα συνεπές

πλάνο επαναχρησιμοποίησης συχνότητας; (δ) Εάν η τηλεφωνική κίνηση είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη, ποια η τηλεφωνική κίνηση που εξυπηρετείται από κάθε νέα κυψέλη; (ε) Είναι δυνατόν η πιθανότητα μπλοκαρίσματος κλήσης να γίνει μικρότερη από 0.1% μετά την διαίρεση;

2.9) Ένας κινητός σταθμός λαμβάνει σήμα στάθμης 1mW σε απόσταση αναφοράς $d_0=1\text{m}$ από τον σταθμό βάσης. Προκειμένου να περιοριστεί το φαινόμενο συγκαταλικής παρεμβολής είναι αναγκαίο η ληφθείσα στάθμη σήματος στην είσοδο του δέκτη του σταθμού βάσης που οφείλεται στις εκπομπές των έξι πλησιέστερων συγκαταλικών σταθμών βάσης να μην είναι μεγαλύτερη από -100dBm. Εάν ο εκθέτης απωλειών διάδοσης για το συγκεκριμένο περιβάλλον προσδιορίστηκε ως $n=3$ κατόπιν της διενέργειας πειραματικών μετρήσεων, προσδιορίστε την ακτίνα κάθε κυψέλης για $N=7$ και $N=4$.

2.10) Ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας έχει $N=7$, ακτίνα κυψέλης 500m και συνολικό αριθμό διαθέσιμων καναλιών ομιλίας 105. Εάν η πυκνότητα χρηστών είναι 100χρήστες/ km^2 και κάθε χρήστης κάνει κατά μέσο όρο τρεις κλήσεις διάρκειας 3 λεπτών στην ώρα αιχμής, καθορίστε την πιθανότητα που έχει ένας χρήστης να ευρεθεί στην ουρά αναμονής για διάστημα μεγαλύτερο των 10 δευτερολέπτων, εάν όλες οι κλήσεις που δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν τοποθετούνται στην ουρά αναμονής.

2.11) Ποια η πιθανότητα μπλοκαρίσματος κλήσης σε ένα σύστημα Erlang-B με συνολικό προσφερόμενο τηλεπικοινωνιακό φορτίο 0.25 E και μία διαθέσιμη γραμμή;

2.12) Είναι γνωστό ότι με την τεχνική της τομεοποίησης αυξάνεται η χωρητικότητα ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας διότι βελτιώνεται ο λόγος σήματος προς θόρυβο. Την ίδια στιγμή όμως η συνεπαγόμενη μείωση απόδοσης πολυπλεξίας κορμού μειώνει την χωρητικότητα. Για

σύστημα κινητής τηλεφωνίας με $N=4$ και με τη βοήθεια του υπολογιστή σχεδιάστε την χωρητικότητα του συστήματος ως συνάρτηση του αριθμού καναλιών ανά κυψέλη και με παράμετρο τον αριθμό τομέων (1,3,6).

2.13) Είστε μηχανικός και εργάζεστε για την περίφημη εταιρεία κινητής τηλεφωνίας SerCom, η οποία μόλις απέκτησε άδεια παροχής κινητών τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών καταβάλλοντας τίμημα 10,000 ευρώ. Η άδεια θα πρέπει να καλύψει περιοχή έκτασης 140 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Κάθε σταθμός βάσης κοστίζει 150,000 ευρώ ενώ το κέντρο μεταγωγής 1,000,000 ευρώ. Τα έξοδα διαφήμισης πριν την έναρξη εμπορικής δραστηριότητας ανέρχονται στο ποσό των 500,000 ευρώ. Μετά από σχετικές διαπραγματεύσεις με τον διευθυντή της τράπεζας που σας χρηματοδοτεί, εξασφαλίσατε δάνειο ύψους 4,000,000 ευρώ εκτιμώντας ότι σε 4 περίπου χρόνια τα έσοδά σας θα ξεπεράσουν τα 6,000,000 ευρώ και θα είστε σε θέση να εξοφλήσετε το δάνειο. α) Με τα 6,000,000 ευρώ πόσους σταθμούς βάσης μπορείτε να εγκαταστήσετε; β) Υποθέτοντας επίπεδη γη και ομοιόμορφη κατανομή συνδρομητών, τι υπόθεση μπορείτε να κάνετε για την περιοχή κάλυψης κάθε σταθμού βάσης; Ποια η ακτίνα κάθε κυψέλης υποθέτοντας γεωμετρία εξαγωνικής κυψέλης; γ) Υποθέστε ότι κάθε συνδρομητής μπορεί να πληρώνει περίπου 50 ευρώ το μήνα για την περίοδο των 4 πρώτων ετών λειτουργίας του συστήματος της SerCom. Για λόγους απλοποίησης της ανάλυσης υποθέστε ότι τον πρώτο χρόνο ο αριθμός συνδρομητών είναι συγκεκριμένος και σταθερός. Ο αριθμός συνδρομητών διπλασιάζεται την πρώτη μέρα του κάθε επομένου έτους και παραμένει σταθερός για όλη τη διάρκεια του συγκεκριμένου έτους. Ποίος ο ελάχιστος αριθμός συνδρομητών που θα πρέπει να έχει η εταιρεία την πρώτη ημέρα λειτουργίας της προκειμένου να επαληθευτεί η πρόβλεψη της για 6,000,000 ευρώ έσοδα στο τέλος της περιόδου των 4 χρόνων;

2.14) Ένας σταθμός βάσης εξυπηρετεί χρήστες που ο καθένας πραγματοποιεί τρεις κλήσεις την ώρα μέσης διάρκειας πέντε λεπτών η καθεμιά. α) Ποία η

ένταση τηλεφωνικής κινήσεως του κάθε χρήστη; β) Ποιος ο αριθμός χρηστών που μπορεί να εξυπηρετήσει το σύστημα αυτό με πιθανότητα μπλοκαρίσματος 1% εάν μόνο ένα κανάλι είναι διαθέσιμο; γ) Επαναλάβετε το προηγούμενο ερώτημα εάν πέντε κανάλια είναι διαθέσιμα. δ) Εάν ο αριθμός χρηστών που προκύπτει από το ερώτημα γ) διπλασιαστεί, ποια η νέα πιθανότητα μπλοκαρίσματος για τα 5 πολυπλεγμένα κανάλια; Θα θεωρούσατε την νέα αυτή πιθανότητα αποδεκτή και γιατί ναι ή όχι;

2.15) Ένας σταθμός βάσης A εξυπηρετεί κινητό τηλέφωνο που ευρίσκεται στο σημείο K το οποίο απέχει απόσταση 500 m από το σταθμό βάσης A. Επίσης το κινητό τηλέφωνο παρεμβάλλεται από συγκαναλικό σταθμό βάσης B, ο οποίος απέχει 2 km από το κινητό τηλέφωνο. Αν $P_{0A} = 1 \text{ mW}$, $P_{0B} = 2 \text{ mW}$, $d_{0A} = d_{0B} = 1 \text{ m}$, $\eta_A = \eta_B = 3$, ποιος ο λόγος S/I στην είσοδο του κινητού;

2.16) Ένα κινητό τηλέφωνο που ευρίσκεται στην κορυφή εξαγωνικής κυψέλης ακτίνας 500 m με αζιμούθιο κατεύθυνσης 210° , δέχεται συγκαναλικές παρεμβολές από έξη σταθμούς βάσης που ευρίσκονται στο πρώτο στρώμα συγκαναλικών κυψελών. Τα χαρακτηριστικά εκπομπής των σταθμών βάσης και διάδοσης για τις διαδρομές από τους σταθμούς βάσης προς το κινητό τηλέφωνο συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Σταθμός Βάσης (ΣΒ)	Αζιμούθιο σκόπευσης από το ΣΒ εξυπηρέτησης προς τον παρεμβάλλοντα	P_0 [mW]	d_0 [m]	n
Εξυπηρέτησης		2	1	3
Συγκαναλικός 1	19	2	1	3
Συγκαναλικός 2	79	8	1	3.2

Συγκαναλικός 3	139	5	1	3.1
Συγκαναλικός 4	199	8	1	3.2
Συγκαναλικός 5	259	2	1	3
Συγκαναλικός 6	319	10	1	3.4

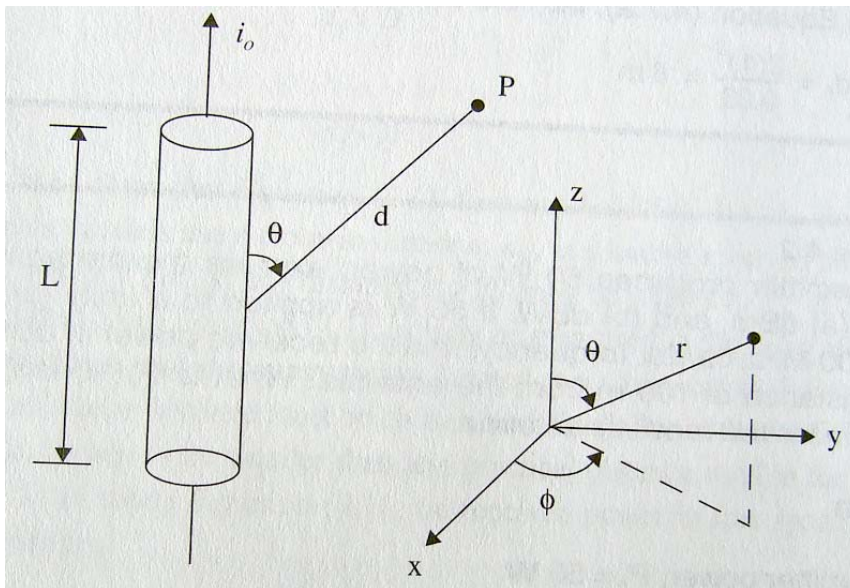
Εάν το μέγεθος ομάδας του συστήματος κινητής τηλεφωνίας είναι 7, προσδιορίστε το λόγο σήματος προς παρεμβολή στην είσοδο του κινητού τηλεφώνου. Κατά τη γνώμη σας είναι ο λόγος αυτός επαρκής για να λειτουργήσει σωστά το κινητό τηλέφωνο; Εάν όχι, τι λύση θα προτείνατε με την προϋπόθεση ότι τα χαρακτηριστικά εκπομπής και διάδοσης που εφαρμόζονται διατηρούν τις υφιστάμενες τιμές τους.

3 ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Το περιβάλλον διάδοσης επιβάλλει σημαντικούς περιορισμούς στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Το κυριότερο πρόβλημα προέρχεται από την μεγάλη μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών της ζεύξης μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού τηλεφώνου. Στην απλούστερη περίπτωση πομπός και δέκτης ευρίσκονται σε οπτική επαφή (line-of-sight), ενώ σε πιο σύνθετες περιπτώσεις πομπός και δέκτης διαχωρίζονται από κτίρια, βλάστηση, λόφους και κινούμενα αντικείμενα. Λόγω της μεταβλητότητας και σε πολλές περιπτώσεις της απροβλεψιμότητας των χαρακτηριστικών της ζεύξης η μοντελοποίηση της διάδοσης βασίζεται σε στατιστικούς μεθόδους και εμπειρικές μετρήσεις.

3.1 Βασικές αρχές διάδοσης ραδιοκυμάτων

Στο Σχήμα 3-1 παρουσιάζεται η γεωμετρία ενός γραμμικού αγωγού στοιχειώδους μήκους σε σφαιρικές συντεταγμένες.



Σχήμα 3-1. Γεωμετρία στοιχειώδους γραμμικού στοιχείου ακτινοβολίας.

Τα πεδία που δημιουργεί η διέλευση χρονικά μεταβαλλόμενου ρεύματος i_0 από ένα γραμμικό αγωγό στοιχειώδους μήκους $dL \ll \lambda$ δίδονται σε σφαιρικές συντεταγμένες από την ακόλουθη ομάδα εξισώσεων:

$$E_r = \frac{i_0 \cdot dL \cdot \cos(\theta)}{2\pi\epsilon_0 c} \left\{ \frac{1}{d^2} + \frac{c}{j\omega_c d^3} \right\} e^{j\omega_c(t-d/c)} \quad (3.1)$$

$$E_\theta = \frac{i_0 \cdot dL \cdot \sin(\theta)}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left\{ \frac{j\omega_c}{d} + \frac{c}{d^2} + \frac{c^2}{j\omega_c d^3} \right\} e^{j\omega_c(t-d/c)} \quad (3.2)$$

$$H_\phi = \frac{i_0 \cdot dL \cdot \sin(\theta)}{4\pi c} \left\{ \frac{j\omega_c}{d} + \frac{c}{d^2} \right\} e^{j\omega_c(t-d/c)} \quad (3.3)$$

Οι υπόλοιπες συνιστώσες του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι μηδενικές, δηλαδή $E_\phi = H_r = H_\theta = 0$. Στις παραπάνω εξισώσεις οι όροι $1/d$ αντιστοιχούν στην ακτινοβολούσα συνιστώσα των πεδίων, οι όροι $1/d^2$ στην επαγωγική συνιστώσα και οι όροι $1/d^3$ στην ηλεκτροστατική συνιστώσα. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, οι επαγωγικοί και ηλεκτροστατικοί όροι εξασθενούν πολύ πιο γρήγορα με την απόσταση απ' ό,τι οι ακτινοβολούντες. Σε μακρινές αποστάσεις από το στοιχείο ακτινοβολίας οι επαγωγικοί και ηλεκτροστατικοί όροι καθίστανται αμελητέοι και μόνο οι συνιστώσες E_θ και H_ϕ χρειάζεται να ληφθούν υπόψη. Η περιοχή του λεγομένου μακρινού πεδίου (far-field region) ξεκινά για απόσταση d μεγαλύτερη της αποστάσεως $d_{ff} = 2D^2/\lambda$, όπου D είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας.

Στον ελεύθερο χώρο η πυκνότητα ροής ισχύος (power flux density) P_d που μετράται σε μονάδες W/m^2 δίδεται από την σχέση:

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} = \frac{E^2}{Z_0} \quad (3.4)$$

όπου P_t είναι η εκπεμπόμενη από τον πομπό ισχύς, G_t είναι το κέρδος της κεραίας του, E είναι η ενεργός (rms) τιμή του ηλεκτρικού πεδίου και $Z_0=120\cdot\pi\approx 377\Omega$ είναι η εμπέδηση του κενού.

Η ισχύς P_r που προσλαμβάνεται από την κεραία ενός δέκτη στον οποίο προσπίπτει πυκνότητα ροής ισχύος P_d δίδεται από τη σχέση:

$$P_r = P_d \cdot A_e \quad (3.5)$$

όπου A_e είναι η ενεργός επιφάνεια (effective aperture) της κεραίας λήψης. Η ενεργός επιφάνεια μιας κεραίας δίδεται από τη σχέση:

$$A_e = A_{ei} \cdot G_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_r \quad (3.6)$$

όπου $A_{ei}=\lambda^2/4\pi$ είναι η ενεργός επιφάνεια της ιστροπικής κεραίας και G_r το κέρδος της κεραίας λήψης. Αναπτύσσοντας την σχέση (3.5), προκύπτει η Εξίσωση του Friis:

$$P_r = P_t G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3.7)$$

Το γινόμενο $P_t G_t$ ονομάζεται **ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύς (effective isotropic radiated power - EIRP)**.

Συχνά είναι χρήσιμο να σχετίσουμε την προσλαμβανόμενη ισχύ P_r με την τάση V ανοικτού βρόχου που αναπτύσσεται στους ακροδέκτες της κεραίας. Εάν η

κεραία είναι απολύτως προσαρμοσμένη στο δέκτη, τότε η τάση V_r που αναπτύσσεται στην είσοδο του δέκτη αντίστασης εισόδου Z , θα ισούται με το μισό της τάσης ανοικτού βρόχου. Τότε:

$$P_r = \frac{V_r^2}{Z} = \frac{V^2}{4 \cdot Z} \quad (3.8)$$

3.2 Συντελεστές ανάκλασης και διάθλασης

Αναφερόμενοι στη γεωμετρία που εικονίζεται στο

Σχήμα 3-2, οι συντελεστές ανάκλασης για τις δύο περιπτώσεις της κάθετης ρ_V και οριζόντιας ρ_H πόλωσης του ηλεκτρικού πεδίου στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων δίδονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\rho_V = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cdot \sin(\theta_t) - Z_1 \cdot \sin(\theta_i)}{Z_2 \cdot \sin(\theta_t) + Z_1 \cdot \sin(\theta_i)} \quad (3.9)$$

$$\rho_H = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_2 \cdot \sin(\theta_i) - Z_1 \cdot \sin(\theta_t)}{Z_2 \cdot \sin(\theta_i) + Z_1 \cdot \sin(\theta_t)} \quad (3.10)$$

όπου Z_i είναι η χαρακτηριστική αντίσταση του μέσου i ($i=1,2$) και δίδεται από τη σχέση:

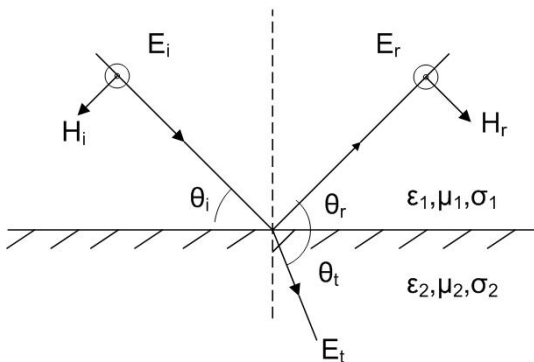
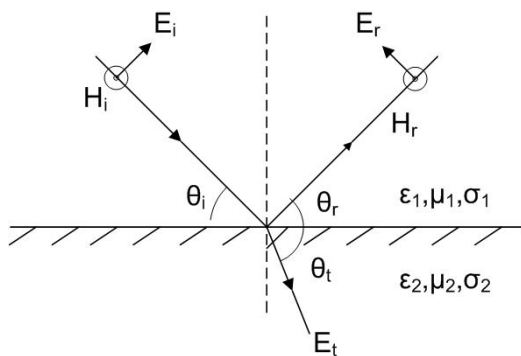
$$Z_i = \sqrt{\frac{j\omega_c \mu_i}{\sigma_i + j\omega_c \epsilon_i}} \quad (3.11)$$

Όσον αφορά τους αντίστοιχους συντελεστές διάθλασης τ_V , τ_H αυτοί μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα, καθότι $\tau=1+\rho$. Κατά συνέπεια η συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου που μεταδίδεται από το μέσο 1 στο μέσο 2 είναι $E_t = \tau \cdot E_i$.

Επίσης οι νόμοι ανάκλασης και διάθλασης του Snell σχετίζουν την γωνία πρόσπτωσης θ_i με τις γωνίες ανάκλασης θ_r και διάθλασης θ_t . Οι σχέσεις (3.12) και (3.13) είναι οι νόμοι ανάκλασης και διάθλασης του Snell, αντίστοιχα.

$$\theta_i = \theta_r \quad (3.12)$$

$$\sin(\theta_i) \cdot \sqrt{\mu_1 \epsilon_1} = \sin(\theta_t) \cdot \sqrt{\mu_2 \epsilon_2} \quad (3.13)$$



Σχήμα 3-2. Γεωμετρία για τον ορισμό των συντελεστών ανάκλασης και διάθλασης

Ειδικά για την περίπτωση της καθέτου πολώσεως και όταν τα μέσα 1 και 2 είναι καθαρά διηλεκτρικά, για μια ορισμένη τιμή της γωνίας προσπτώσεως δεν υφίσταται ανάκλαση αλλά το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαθλάται εντός του μέσου 2. Η γωνία αυτή ονομάζεται γωνία Brewster.

3.3 Διάδοση με περίθλαση

Σε πολλές περιπτώσεις καθώς τα ραδιοκύματα διαδίδονται, συναντούν ένα ή περισσότερα μεμονωμένα εμπόδια και είναι πολλές φορές χρήσιμο να μπορούμε να εκτιμήσουμε τις απώλειες που προκαλούνται από τέτοια εμπόδια. Για τον υπολογισμό των απωλειών απαιτείται συνήθως η εξιδανίκευση της μορφής των εμποδίων, είτε υποθέτοντας ότι πρόκειται για εμπόδιο αμελητέου πάχους ευθείας ακμής (knife-edge), είτε ότι πρόκειται για λείο εμπόδιο μεγάλου πάχους που χαρακτηρίζεται από καλά προσδιορισμένη ακτίνα καμπυλότητας στην κορυφή του. Φυσικά, τα πραγματικά εμπόδια έχουν πιο σύνθετες μορφές και ο υπολογισμός των απωλειών περίθλασης απαιτεί μεθόδους υπολογιστικού ηλεκτρομαγνητισμού για να εκτιμηθούν. Εν τούτοις, στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε τη μεθοδολογία προσδιορισμού απωλειών περίθλασης για τις παραπάνω εξιδανικευμένες περιπτώσεις.

3.3.1 Απώλειες για εμπόδιο αμελητέου πάχους ευθείας ακμής

Σε αυτή την ιδιαίτερα εξιδανικευμένη περίπτωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-3, όλοι οι γεωμετρικοί παράμετροι συνδυάζονται σε μια αδιάστατη παράμετρο που συνήθως συμβολίζεται ως v και η οποία δίδεται από διάφορες εκφράσεις ανάλογα με τις γεωμετρικές παραμέτρους που επιλέγονται. Έτσι, όλες οι επόμενες εκφράσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της παραμέτρου v :

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (\text{a})$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (\text{b})$$

$$v = \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}} \quad \text{το } v \text{ έχει το πρόσημο των } h \text{ και } \theta \quad (\text{c})$$

$$v = \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \alpha_1 \alpha_2} \quad \text{το } v \text{ έχει το πρόσημο των } \alpha_1 \text{ και } \alpha_2 \quad (\text{d})$$
(3.14)

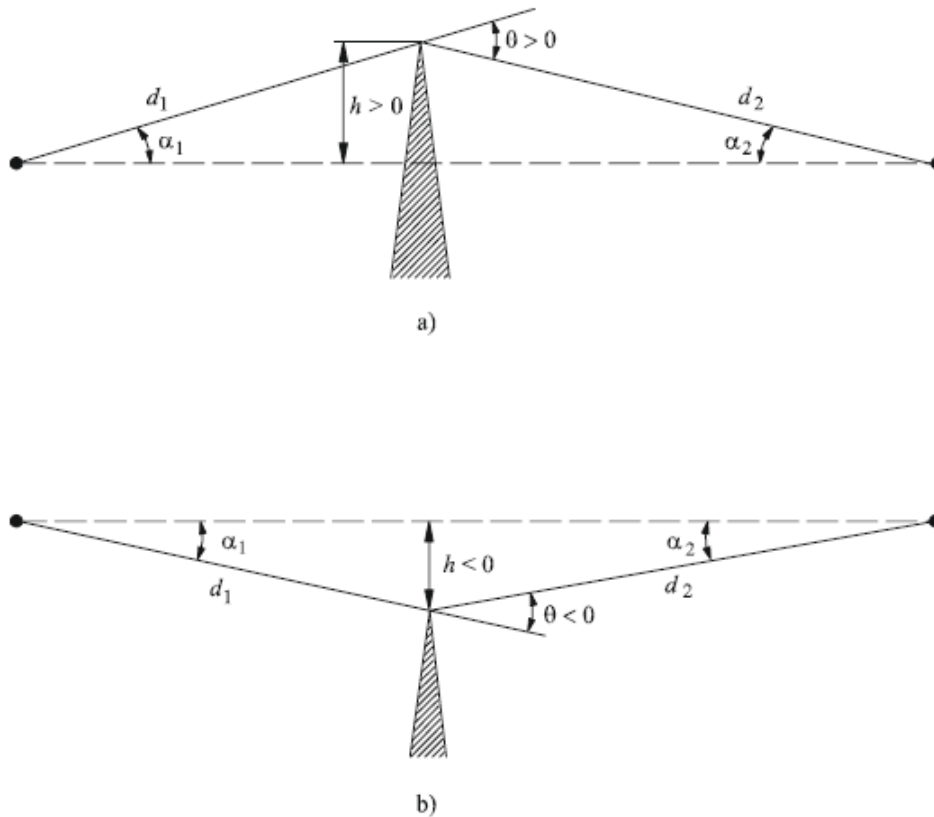
όπου: h είναι το ύψος της κορυφής του εμποδίου πάνω από τον ορίζοντα που ορίζουν τα άκρα της ζεύξης. Εάν το ύψος αυτό ευρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα, τότε είναι κατά σύμβαση αρνητικό.

d_1 και d_2 είναι οι αποστάσεις των άκρων της ζεύξης από την κορυφή του εμποδίου.

d είναι το μήκος της ζεύξης.

θ είναι η γωνία περίθλασης σε rad και έχει το ίδιο πρόσημο με αυτό του h . Η γωνία θ πρέπει να είναι μικρότερη από 0.2 rad ή 12° για την εφαρμογή των παραπάνω τύπων.

α_1 και α_2 είναι οι γωνίες που ορίζονται από τον ορίζοντα των άκρων και την σκόπευση προς την κορυφή του εμποδίου. Και πάλι οι γωνίες α_1 και α_2 έχουν το ίδιο πρόσημο με το ύψος h .



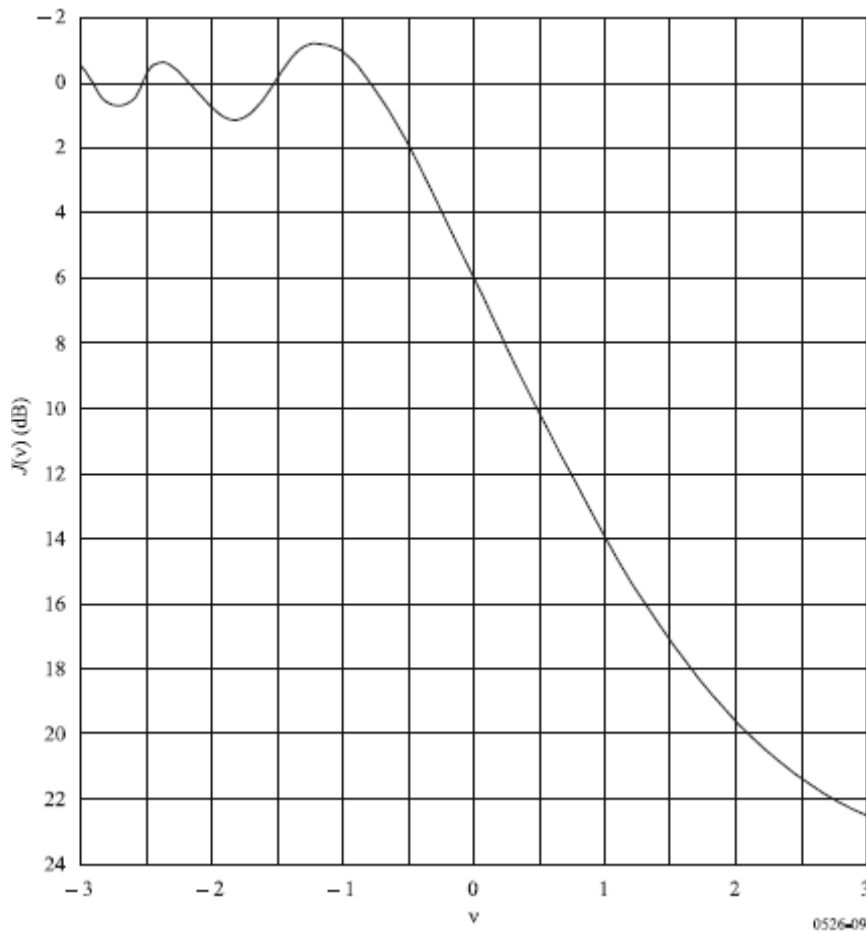
Σχήμα 3-3. Γεωμετρία περίθλασης για εμπόδιο αμελητέου πάχους ευθείας ακμής.

Σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμογής των παραπάνω σχέσεων τα h , d , d_1 και d_2 και a_1 και a_2 πρέπει να δίδονται σε συνεπείς μονάδες. Αφού προσδιοριστεί η παράμετρος v , οι απώλειες περίθλασης $J(v)$ δίδονται από τη σχέση:

$$J(v) = -20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{(1 - C(v) - S(v))^2 + (C(v) - S(v))^2}}{2} \right) \text{ σε [dB]} \quad (3.15)$$

όπου $C(v)$ και $S(v)$ είναι το πραγματικό και φανταστικό μέρος του μιγαδικού ολοκληρώματος Fresnel-Kirchoff, το οποίο ορίζεται ως:

$$F_c(v) = \int_0^v e^{j \frac{\pi s^2}{2}} ds = \int_0^v \cos \frac{\pi s^2}{2} ds + j \int_0^v \sin \frac{\pi s^2}{2} ds = C(v) + jS(v) \quad (3.16)$$



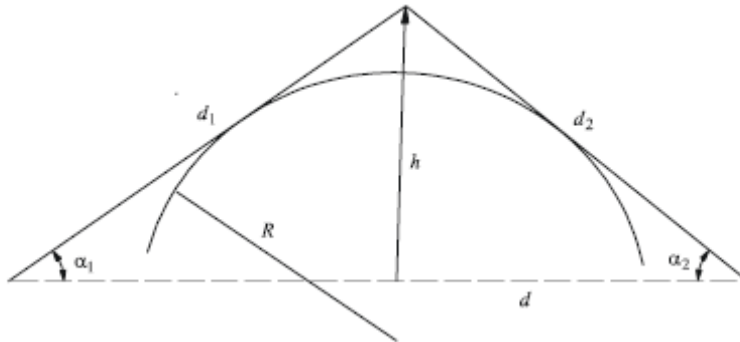
Σχήμα 3-4. Απώλεια περίθλασης συναρτήσει της παραμέτρου v για εμπόδιο αμελητέου πάχους ευθείας ακμής.

Η γραφική απεικόνιση των απωλειών $J(v)$ παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-4. Για τιμές του v μεγαλύτερες από -0.78 οι απώλειες περίθλασης $J(v)$ μπορούν να εκτιμηθούν από τη σχέση:

$$J(v) = 6.9 + 20 \log_{10} \left(\sqrt{(v-0.1)^2 + 1} + v - 0.1 \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.17)$$

3.3.2 Απώλειες για μονό κυρτό εμπόδιο

Το Σχήμα 3-5 απεικονίζει τη γεωμετρία ενός μονού κυρτού εμποδίου ακτίνας. Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι οι αποστάσεις d_1 και d_2 , και το ύψος h πάνω από τον ορίζοντα που ορίζουν τα άκρα της ζεύξης μετρούνται όλες αναφορικά στην κορυφή του τριγώνου όπου οι προβαλλόμενες ακτίνες τέμνονται πάνω από το εμπόδιο.



Σχήμα 3-5. Γεωμετρία περίθλασης για μονό κυρτό εμπόδιο.

Σε αυτήν την περίπτωση οι απώλειες περίθλασης υπολογίζονται από τη σχέση:

$$A = J(v) + T(m, n) \quad [\text{dB}] \quad (3.18)$$

όπου $J(v)$ είναι οι απώλειες Fresnel-Kirchoff που οφείλονται σε ένα ισοδύναμο εμπόδιο αμελητέου πάχους ευθείας ακμής με την κορυφή του τοποθετημένη στην κορυφή του τριγώνου και $T(m, n)$ είναι οι πρόσθετες απώλειες που οφείλονται στην κυρτότητα του εμποδίου. Οι απώλειες $T(m, n)$ δίδονται από τις σχέσεις:

$$T(m, n) = 7.2m^{1/2} - (2 - 12.5n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad [\text{dB}] \quad \text{για } mn \leq 4$$

$$T(m, n) = -6 - 20 \log_{10}(mn) + 7.2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3.6m^{3/2} - 0.8m^2 \quad [\text{dB}] \quad \text{για } mn > 4$$

(3.19)

όπου:

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] / \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} \quad (3.20)$$

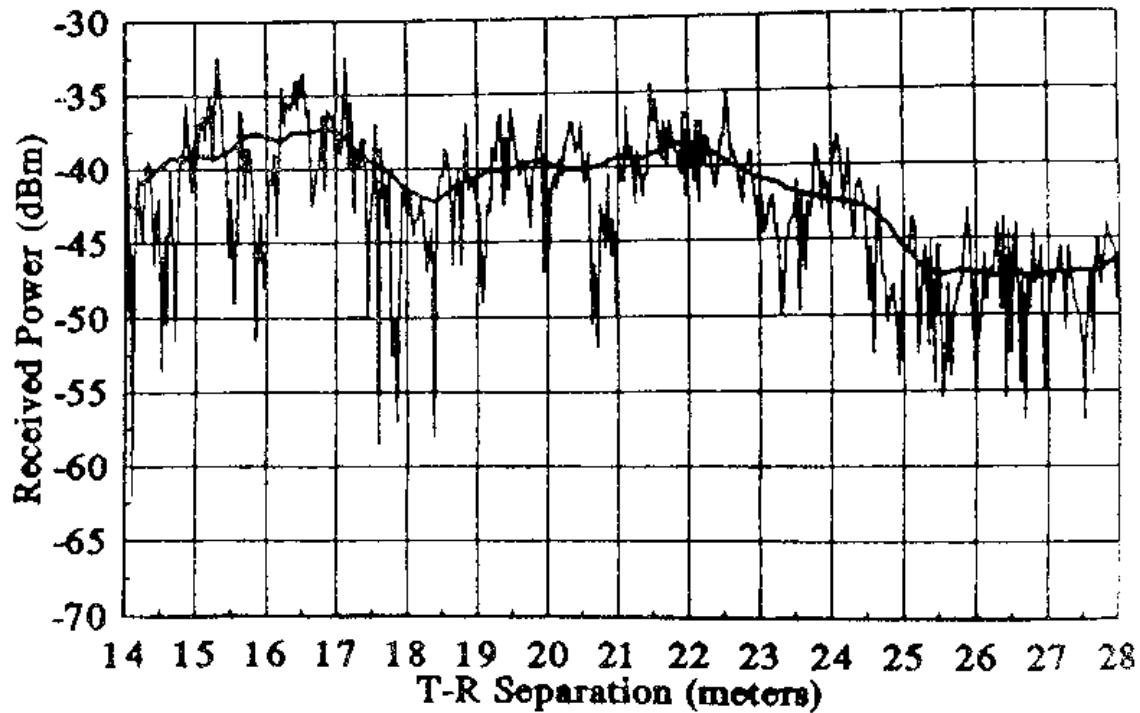
και

$$n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} / R \quad (3.21)$$

με τα R , d_1 , d_2 , h και λ να δίδονται σε συνεπείς μονάδες. Σημειώνεται ότι καθώς η ακτίνα R μειώνεται, οι απώλειες $T(m,n)$ μειώνονται αντίστοιχα, ενώ στην οριακή περίπτωση $R=0$, τότε και $T(m,n)=0$.

3.4 Μοντέλο μακροσκοπικής διάδοσης για κινητές επικοινωνίες

Θεωρητικές αναλύσεις και πειραματικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι η μέση λαμβανομένη ισχύς μειώνεται λογαριθμικά με την απόσταση τόσο εντός όσο και εκτός κτιρίων. Η χαρακτηριστική μεταβολή της στάθμης της ισχύος με την απόσταση διακρίνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6. Τυπική μεταβολή της στάθμης σήματος σε ζεύξη σταθμού βάσης - κινητού τηλεφώνου, ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των.

Η μέση μακροσκοπική απόσβεση διάδοσης PL (large-scale path loss) είναι ανάλογη της n -οστής δύναμης της αποστάσεως, δηλαδή:

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \quad (3.22)$$

ή σε λογαριθμική μορφή:

$$\overline{PL}(d) = \overline{PL}(d_0) + 10 \cdot n \cdot \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (3.23)$$

όπου n είναι ο εκθέτης απωλειών διάδοσης, d_0 είναι η απόσταση αναφοράς και d η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι παύλες στις Εξισώσεις (3.22) και (3.23) δηλώνουν μέσες τιμές. Η γραφική παράσταση του λογαρίθμου της μακροσκοπικής απόσβεσης διάδοσης ως συνάρτηση του λογαρίθμου της

αποστάσεως είναι μια ευθεία γραμμή κλίσεως $10 \cdot n$ ανά δεκάδα. Όπως έχουμε ήδη εξηγήσει, ο εκθέτης απωλειών διάδοσης λαμβάνει διάφορες τιμές ανάλογα με το περιβάλλον διάδοσης. Ο Πίνακας 3-1 εκθέτει τυπικές τιμές του εκθέτη απωλειών διάδοσης.

Περιβάλλον	Τιμές εκθέτη απωλειών διάδοσης
Ελεύθερος χώρος	2
Αστική περιοχή	2.7 έως 3.5
Σκιασμένη αστική περιοχή	3 έως 5
Εντός κτιρίου με οπτική επαφή	1.6 έως 1.8
Εντός σκιασμένου κτιρίου	4 έως 6
Εντός σκιασμένου βιομηχανικού κτιρίου	2 έως 3

Πίνακας 3-1. Τιμές του συντελεστή απωλειών διάδοσης για διάφορα περιβάλλοντα διάδοσης.

Η Εξίσωση (3.23) δεν λαμβάνει υπόψη της το γεγονός ότι για διαφορετικές θέσεις που όμως απέχουν την ίδια απόσταση από το σταθμό βάσης το περιβάλλον διάδοσης μπορεί να αλλάζει δραματικά. Η συνέπεια είναι ότι η στάθμη του λαμβανομένου σήματος τυγχάνει μεγάλης διακύμανσης περί την μέση τιμή που προσδιορίζεται από την Εξίσωση (3.23). Η ανάλυση μεγάλου όγκου πειραματικών μετρήσεων καταδεικνύει ότι οι απώλειες διάδοσης σε δεδομένη απόσταση d μπορούν να περιγραφούν από την Εξίσωση:

$$PL(d) = \overline{PL}(d) + X_{\sigma} [dB] \quad (3.24)$$

όπου $X_{\sigma}(dB)$ είναι τυχαία μεταβλητή² που ακολουθεί την κανονική κατανομή έχοντας μηδενικό μέσο όρο και τυπική απόκλιση $\sigma(dB)$. Η λαμβανομένη στο δέκτη ισχύς δίδεται από τη σχέση:

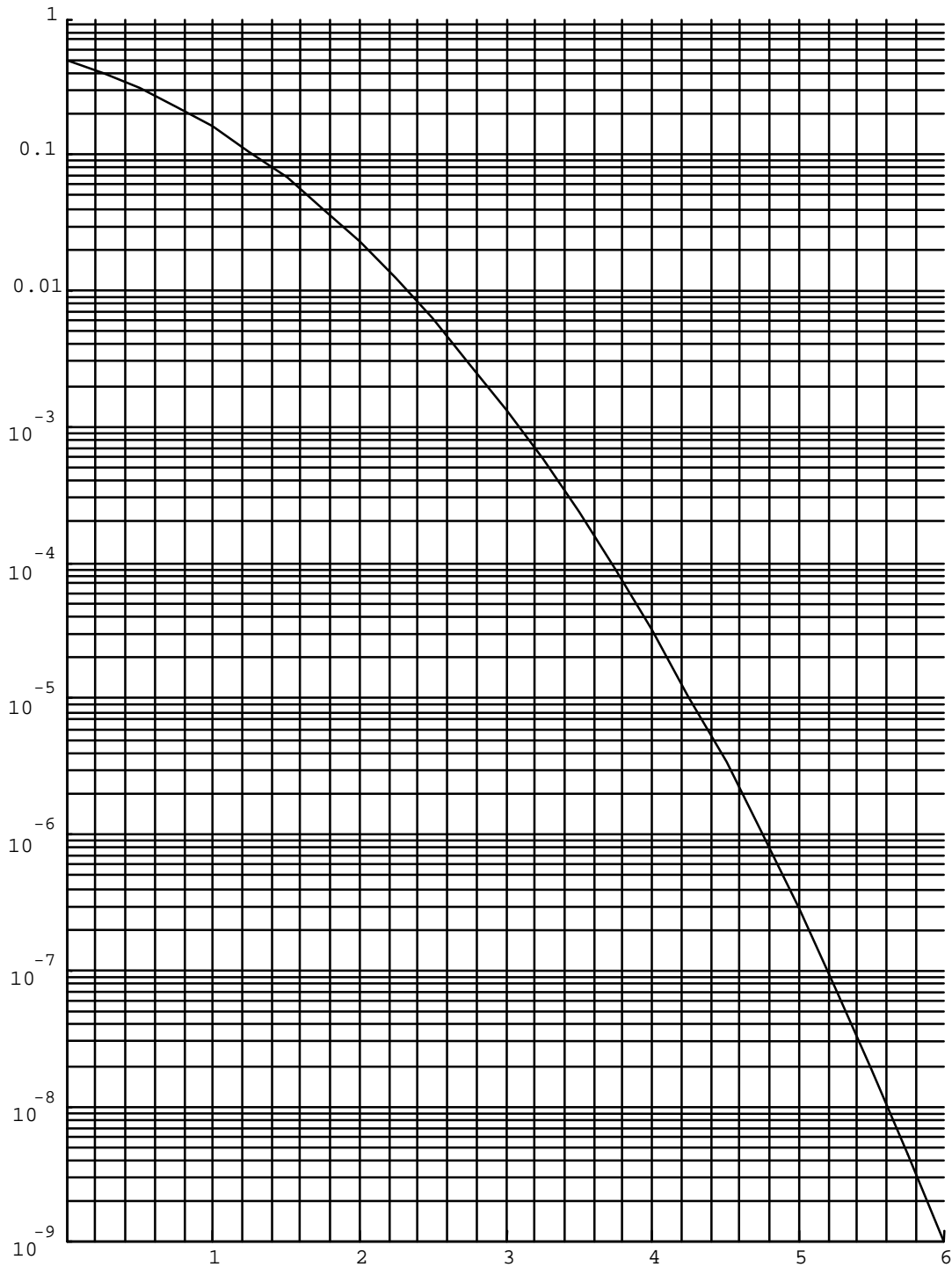
² Διευκρινίζεται ότι την κανονική κατανομή ακολουθεί ο λογάριθμος της τυχαίας μεταβλητής X_{σ} . Η κατανομή αυτή ονομάζεται λογαριθμική-κανονική κατανομή (log-normal distribution).

$$P_r(d) = P_t \cdot G_t G_r - PL(d) \quad (3.25)$$

Εφόσον $PL(d)$ είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την λογαριθμική-κανονική κατανομή, το ίδιο ισχύει και για την ισχύ $P_r(d)$, και η γνωστή συνάρτηση Q ή η συνάρτηση σφάλματος erf μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της πιθανότητας η στάθμη του λαμβανομένου σήματος να υπερβεί (ή να κατέλθει) μια συγκεκριμένη στάθμη. Υπενθυμίζεται ότι η συνάρτηση Q ορίζεται ως εξής:

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_z^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{2} \left[1 - erf\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (3.26)$$

Βασική ιδιότητα της συνάρτησης Q είναι $Q(-z)=1-Q(z)$. Η γραφική παράσταση της συναρτήσεως $Q(x)$ που εικονίζεται στο Σχήμα Σχήμα 3-7, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρακτικούς υπολογισμούς, καθότι η συνάρτηση αυτή δεν μπορεί να εκτιμηθεί με αναλυτικό τρόπο.



Σχήμα 3-7. Γραφική παράσταση της συνάρτησης Q .

Η πιθανότητα η λαμβανομένη στάθμη ισχύος να υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή P_x μπορεί να προσδιοριστεί από την αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$P[P_r(d) > P_x] = Q\left(\frac{P_x - \overline{P_r(d)}}{\sigma}\right) \quad (3.27)$$

Ομοίως, η πιθανότητα η λαμβανομένη στάθμη ισχύος να είναι μικρότερη από μια συγκεκριμένη τιμή P_x μπορεί να προσδιοριστεί από την σχέση:

$$P[P_r(d) < P_x] = Q\left(\frac{\overline{P_r(d)} - P_x}{\sigma}\right) \quad (3.28)$$

Είναι φανερό ότι λόγω της μεταβλητότητας του περιβάλλοντος διάδοσης, σε κάποιες θέσεις εντός της περιοχής κάλυψης η στάθμη του σήματος θα ευρίσκεται κάτω από το κατώφλι της ελάχιστα επιθυμητής στάθμης. Ας υποθέσουμε ότι η ελάχιστη επιθυμητή στάθμη σήματος εντός της κυκλικής περιοχής κάλυψης ακτίνας R ενός σταθμού βάσης είναι P_{min} . Τότε το ποσοστό της περιοχής κάλυψης για το οποίο η στάθμη σήματος υπερβαίνει το κατώφλι P_{min} αποδεικνύεται ότι δίδεται από την σχέση:

$$U(P_{min}) = \frac{1}{\pi R^2} \int P[P_r(r) > P_{min}] \cdot dA = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R P[P_r(r) > P_{min}] \cdot r dr \cdot d\theta \quad (3.29)$$

3.5 Το μοντέλο διάδοσης Okumura-Hata

Το μοντέλο των Okumura-Hata χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της στάθμης σήματος σε αστικές περιοχές. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό η μέση απόσβεση διάδοσης σε αστικές περιοχές δίδεται από την Εξίσωση:

$$L_{50}(urban)[dB] = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_{te}) - a(h_{re}) + [44.9 - 6.55 \log(h_{re})] \log(d) \quad (3.30)$$

όπου f_c είναι η συχνότητα (MHz) από 150MHz έως 1.5GHz, h_{te} είναι το ύψος του σταθμού βάσης που κυμαίνεται μεταξύ 30m και 200m, h_{re} είναι το ύψος της κεραίας του κινητού τηλεφώνου που κυμαίνεται από 1m έως 10m, d είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτου σε km, και $a(h_{re})$ είναι ένας διορθωτικός παράγοντας σχετιζόμενος με το ύψος της κεραίας του κινητού τηλεφώνου που είναι συνάρτηση του μεγέθους της περιοχής κάλυψης. Για μια μικρή ή μεσαίου μεγέθους πόλη, ο διορθωτικός παράγοντας $a(h_{re})$ δίδεται σε dB από την σχέση:

$$a(h_{re}) = [1.1 \log(f_c) - 0.7] \cdot h_{re} - [1.56 \log(f_c) - 0.8] \quad (3.31)$$

ενώ για πόλη μεγάλου μεγέθους δίδεται σε dB από την σχέση (3.32) για συχνότητες μικρότερες ή ίσες των 300MHz:

$$a(h_{re}) = 8.29 \cdot [\log(1.54 \cdot h_{re})]^2 - 1.1 \quad (3.32)$$

και από τη σχέση (3.33) πάλι σε dB για συχνότητες μεγαλύτερες ή ίσες των 300MHz:

$$a(h_{re}) = 3.2 \cdot [\log(11.75 \cdot h_{re})]^2 - 4.97 \quad (3.33)$$

Η απόσβεση διάδοσης σε ημιστική περιοχή δίδεται (σε dB) από την σχέση:

$$L_{50}(sub - urban)[dB] = L_{50}(urban)[dB] - 2 \cdot [\log(f_c / 28)]^2 - 5.4 \quad (3.34)$$

Τέλος, η απόσβεση διάδοσης σε ανοικτές αγροτικές περιοχές δίδεται (σε dB) από την σχέση:

$$L_{50}(\text{rural})[dB] = L_{50}(\text{urban})[dB] - 4.78 \cdot [\log(f_c)]^2 - 18.33 \cdot \log(f_c) - 40.98 \quad (3.35)$$

Για να προσδιορίσουμε την απόσβεση διάδοσης που αντιστοιχεί σε κάποιο σημείο της περιοχής κάλυψης υπολογίζουμε πρώτα την απόσβεση ελεύθερου χώρου και κατόπιν προσθέτουμε σε αυτή την απόσβεση που προκύπτει από το μοντέλο των Okumura-Hata. Το μοντέλο αυτό είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο για σχετικά μεγάλες κυψέλες ($d > 1\text{km}$), αλλά δεν είναι κατάλληλο για την εκτίμηση διάδοσης σε κυψέλες μικρού μεγέθους. Για τις κυψέλες αυτές απαιτείται η χρήση άλλων μοντέλων διάδοσης.

Η διευρωπαϊκή επιτροπή ερευνητικής και επιστημονικής συνεργασίας (European Co-operative for Scientific and Technical research - COST) και ειδικότερα η ερευνητική ομάδα εργασίας COST-231 προέκτεινε την εφαρμογή του μοντέλου των Okumura-Hata για συχνότητες μέχρι και 2GHz. Σύμφωνα με το ενημερωμένο μοντέλο η αστική απόσβεση διάδοσης δίδεται από την σχέση:

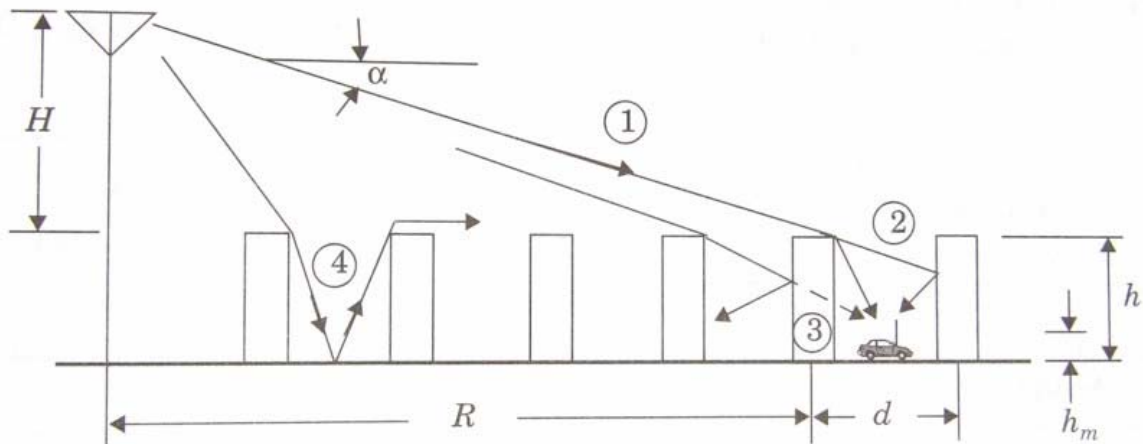
$$L_{50}(\text{urban})[dB] = 46.3 + 33.9 \cdot \log(f_c) - 13.82 \cdot \log(h_{te}) - a(h_{re}) + [44.9 - 6.55 \cdot \log(h_{te})] \cdot \log(d) + C_M \quad (3.36)$$

όπου ο συντελεστής C_M λαμβάνει τις τιμές 0dB για πόλεις μεσαίου μεγέθους και ημιαστικές περιοχές και 3dB για μητροπολιτικά κέντρα. Για την εφαρμογή του μοντέλου COST-231 οι παράμετροι περιορίζονται εντός των συγκεκριμένων ορίων, ως ακολούθως: f_c από 1.5GHz έως 2.0GHz, h_{te} από 30m έως 200m, h_{re} από 1m έως 10m και d από 1km έως 20km.

3.6 Το μοντέλο των Walfisch και Bertoni

Το μοντέλο διάδοσης που αναπτύχθηκε από τους Walfisch και Bertoni, λαμβάνει υπόψη του τις επιπτώσεις από τις κορυφές κτιρίων και το ύψος του κτιρίου

χρησιμοποιώντας θεωρία περίθλασης (**diffraction**) για να υπολογίσει τη στάθμη σήματος στο επίπεδο του δρόμου. Η σχετική γεωμετρία του μοντέλου των Walfisch και Bertoni παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 3-8. Γεωμετρία για την εφαρμογή του μοντέλου διάδοσης των Walfisch και Bertoni.

Σύμφωνα με το μοντέλο, η απώλεια διάδοσης, S , εκτιμάται από το γινόμενο τριών παραγόντων, δηλαδή:

$$S = P_0 \cdot Q^2 \cdot P_1 \quad (3.37)$$

όπου ο παράγοντας P_0 εκφράζει τις απώλειες ελεύθερου χώρου μεταξύ ιστροπικών κεραιών και δίδεται από τη σχέση:

$$P_0 = \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (3.38)$$

Ο παράγοντας Q^2 εκτιμά την μείωση στο σήμα οροφής λόγω της σειράς των κτιρίων που άμεσα σκιάζουν τον δέκτη σε επίπεδο δρόμου. Ο παράγοντας P_1 αντιπροσωπεύει τις απώλειες περίθλασης από την οροφή του κτιρίου μέχρι το δρόμο. Σε dB, οι απώλειες διάδοσης δίδονται από τη σχέση:

$$S[\text{dB}] = L_0 + L_{rts} + L_{ms} \quad (3.39)$$

όπου L_0 αφορά στις απώλειες ελεύθερου χώρου, L_{rts} αφορά στις απώλειες περίθλασης από την κορυφή του κτιρίου στο δρόμο καθώς και τις απώλειες σκέδασης, και L_{ms} αφορά περίθλαση πολλαπλής τάξης λόγω της σειράς των κτιρίων που μεσολαβούν μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού τηλεφώνου.

3.7 Προβλήματα

- 3.1) Στον ίδιο ιστό είναι συνεγκατεστημένοι τρεις σταθμοί βάσης κινητής τηλεφωνίας που ο καθένας εκπέμπει ξεχωριστά σε συχνότητες GSM, DCS και UMTS, αντίστοιχα. Τα κέρδη των κεραιών που χρησιμοποιούν οι σταθμοί βάσης είναι 15dB, 18dB και 20dB, αντίστοιχα, ενώ η ισχύς του πομπού είναι 40W για καθένα από αυτούς. Ποια η τιμή του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί σε απόσταση οπτικής επαφής 300m μακριά του ο κάθε σταθμός βάσης;
- 3.2) Εάν $P_t=40\text{W}$, $G_t=10\text{dB}$, $h_t=60\text{m}$, $G_r=0\text{dB}$, $h_r=15\text{m}$ στα 900MHz υπολογίστε την ισχύ που λαμβάνει ένας κινητός σταθμός ο οποίος ευρίσκεται σε απόσταση 1500m μακριά από το σταθμό βάσης. Επαναλάβετε τον υπολογισμό εάν σε απόσταση 300m από το σταθμό βάσης παρεμβάλλεται λόφος ύψους 74.5m, ο οποίος μπορεί να μοντελοποιηθεί ως αγωγήμη ακμή. Επαναλάβετε τους υπολογισμούς διατηρώντας όλες τις παραμέτρους ίδιες αλλά για συχνότητες 450MHz και 1800MHz.
- 3.3) Πειραματικές μετρήσεις για τη λαμβανόμενη ισχύ λήψης λαμβάνονται σε αποστάσεις 100m, 200m, 1km και 3km από τον πομπό κάποιου σταθμού βάσης. Οι τιμές αυτές δίδονται στον παρακάτω πίνακα:

Απόσταση από τον πομπό του σταθμού βάσης	Μετρηθείσα Ισχύς
100m	0dBm
200m	-20dBm
1000m	-35dBm
3000m	-70dBm

- 3.4) Το μοντέλο διάδοσης που ισχύει για το συγκεκριμένο σύστημα περιγράφεται από την Εξίσωση (3.23) με $d_0=100m$. α) Προσδιορίστε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τον εκθέτη απωλειών διάδοσης n . β) Υπολογίστε την τυπική απόκλιση σ . γ) Εκτιμήστε την λαμβανόμενη ισχύ για $d=2km$. δ) Ποια η πιθανότητα η στάθμη ισχύος στα 2km να είναι μεγαλύτερη από -60dBm; ε) Για τι ποσοστό της περιοχής κάλυψης που ορίζεται από ακτίνα μήκους 2km η στάθμη σήματος υπερβαίνει τα -60dBm;
- 3.5) Έστω ότι από πειραματικές μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι η μέση λαμβανόμενη ισχύς εντός κτιρίου ακολουθεί την λογαριθμική-κανονική κατανομή, με $Pr(d) \propto d^{-3.5}$. Εάν η μετρηθείσα μέση τιμή της στάθμη σήματος είναι 1mW σε απόσταση $d_0=1km$ από το σταθμό βάσης, και σε απόσταση $d=10m$, 10% των τιμών της ισχύος υπερβαίνουν τη στάθμη των -25dBm, προσδιορίστε την τυπική απόκλιση σ , για το μοντέλο διάδοσης στη συγκεκριμένη απόσταση.
- 3.6) Ο πομπός ενός σταθμού βάσης εκπέμπει 15W μέσω κεραίας που έχει κέρδος 17dB. Η κεραία του δέκτη έχει κέρδος 0dB και το εύρος ζώνης λήψης είναι 5MHz. Εάν η παράμετρος θορύβου (noise figure) στο δέκτη είναι 8dB και η συχνότητα του φορέα είναι 2100MHz, προσδιορίστε την μέγιστη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη για την οποία ο λόγος του σήματος προς θόρυβο στη βαθμίδα ανίχνευσης υπερβαίνει την τιμή των 12dB για 99% του χρόνου. Υποθέστε ότι η θερμοκρασία λειτουργίας του

κινητού τηλεφώνου είναι $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ και ότι για το περιβάλλον διάδοσης ισχύει $n=3$ και $\sigma=8\text{dB}$.

- 3.7) Σχεδιάστε και υλοποιήστε πρόγραμμα στον υπολογιστή που παράγει τυχαίες τιμές (δείγματα) απόσβεσης βασιζόμενο στο μοντέλο απωλειών διάδοσης d^n με σκίαση που ακολουθεί την λογαριθμική-κανονική κατανομή. Το πρόγραμμα αυτό θα πρέπει να είναι ουσιαστικά ένας εξομοιωτής διάδοσης ραδιοκυμάτων και θα πρέπει να χρησιμοποιεί ως εισόδους την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, την συχνότητα, τον εκθέτη απωλειών διάδοσης, την τυπική απόκλιση της λογαριθμικής-κανονικής σκίασης, την απόσταση αναφοράς και τον επιθυμητό αριθμό των τυχαίων δειγμάτων. Το πρόγραμμα θα πρέπει να ελέγχει εάν η απόσταση πομπού-δέκτη είναι ίση ή μεγαλύτερη από την δεδομένη απόσταση αναφοράς και θα πρέπει να σχεδιάζει τα παραγόμενα δείγματα ως συνάρτηση της αποστάσεως και της απόσβεσης. (Το διάγραμμα αυτό ονομάζεται διάγραμμα σκέδασης.)
- 3.8) Επιβεβαιώστε την ακρίβεια του προγράμματός σας τρέχοντάς το για πλήθος 500 συνολικά δειγμάτων που αντιστοιχούν σε 10 διαφορετικές αποστάσεις πομπού-δέκτη και καθορίστε με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων τον εκθέτη απωλειών διάδοσης και την τυπική απόκλιση. Σχεδιάστε το μοντέλο διάδοσης επί του διαγράμματος σκέδασης, έτσι ώστε να επιδείξετε την λειτουργικότητα του μοντέλου σας. (Θα διαπιστώσετε την ορθότητα του μοντέλου σας, εάν οι προσδιοριζόμενες από το πρόγραμμα τιμές του εκθέτη απωλειών διάδοσης και η τυπική απόκλιση είναι ίδιες με τις τιμές εισόδου που καθορίσατε αρχικά.)

4 ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ GSM

Το πρότυπο GSM (Global Standard for Mobile) είναι πρότυπο 2^{ης} γενιάς ψηφιακών κινητών επικοινωνιών που αναπτύχθηκε από το ETSI (<http://www.etsi.org>) με την προοπτική να υιοθετηθεί από όλες τις Ευρωπαϊκές χώρες. Το πρότυπο GSM ήταν το πρώτο σχετικό στον κόσμο που καθόρισε ψηφιακή διαμόρφωση, αρχιτεκτονική δικτύου και υπηρεσίες. Οι υπηρεσίες GSM ακολουθούν τις κατευθυντήριες γραμμές του ολοκληρωμένου δικτύου ψηφιακών υπηρεσιών (Integrated Services Digital Network - ISDN) και κατηγοριοποιούνται σε τηλευπηρεσίες (teleservices) και υπηρεσίες δεδομένων (data services). Στις τηλευπηρεσίες συμπεριλαμβάνονται η κλασική κινητή τηλεφωνία και γενικά η τηλεπικοινωνιακή κίνηση που προέρχεται είτε από τον σταθμό βάσης είτε από το κινητό τηλέφωνο. Στις υπηρεσίες δεδομένων συμπεριλαμβάνονται επικοινωνίες μεταξύ υπολογιστών και τηλεπικοινωνιακή κίνηση μεταγομένων πακέτων. Οι διαθέσιμες στους χρήστες υπηρεσίες διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:

- Τηλεφωνικές υπηρεσίες που συμπεριλαμβάνουν κλήσεις έκτακτης ανάγκης και φαξ.
- Υπηρεσίες δεδομένων που περιορίζονται στα επίπεδα 1, 2 και 3 του μοντέλου αναφοράς του ανοικτού συστήματος διασύνδεσης (Open System Interconnection - OSI). Στις υποστηριζόμενες υπηρεσίες συμπεριλαμβάνονται και πρωτόκολλα μεταγωγής πακέτων και ταχύτητες δεδομένων από 300bps έως 9.6kbps. Τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν είτε μέσω του διαφανούς τρόπου λειτουργίας (transparent mode), είτε μέσω του αδιαφανούς τρόπου λειτουργίας (non-transparent mode). Ο διαφανής τρόπος χρησιμοποιεί την προτυποποιημένη κωδικοποίηση καναλιού για την μετάδοση δεδομένων, ενώ ο αδιαφανής τρόπος λειτουργίας χρησιμοποιεί

ειδική κωδικοποίηση υψηλής απόδοσης προσαρμοσμένη στην συγκεκριμένη διεπαφή.

- Συμπληρωματικές ISDN υπηρεσίες, όπως εκτροπή κλήσης, κλειστές ομάδες χρηστών, αναγνώριση κλήσης, υπηρεσία αποστολής γραπτών μηνυμάτων (short messaging service - SMS) και άλλες.

Ένα ιδιαίτερα σπουδαίο χαρακτηριστικό του προτύπου GSM είναι η κάρτα ταυτότητας συνδρομητή (Subscriber Identity Module - SIM), που είναι ουσιαστικά ένα στοιχείο μνήμης που αποθηκεύει τον αριθμό ταυτότητας του συνδρομητή, τα δίκτυα και τις χώρες όπου ο συνδρομητής έχει την δυνατότητα να εξυπηρετηθεί, κωδικούς ασφαλείας και γενικά προσωπικού χαρακτήρα πληροφορία για τον χρήστη. Η κάρτα SIM είναι φορητή και μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιαδήποτε GSM συμβατή συσκευή, η οποία ενεργοποιείται με την πληκτρολόγηση ενός τετραψήφιου κωδικού.

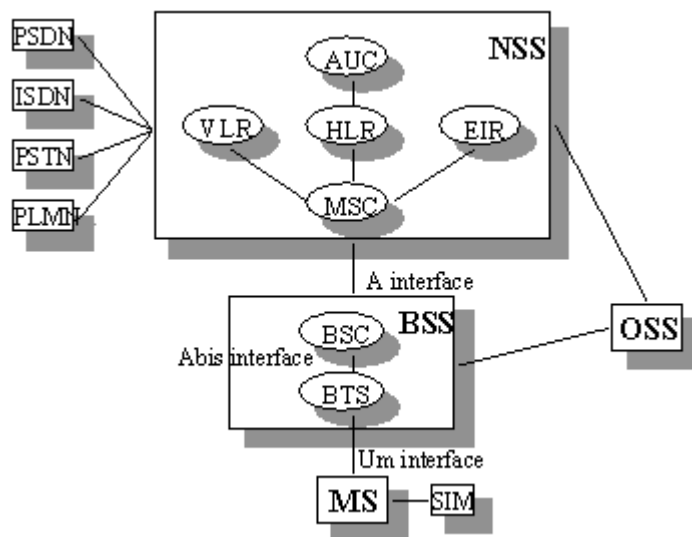
Ένα άλλο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του GSM είναι η ασφάλεια που παρέχει το σύστημα λόγω της χρήσης εξελιγμένης ψηφιακής κωδικοποίησης στη ραδιοδιεπαφή (στην επικοινωνία δηλαδή μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού τηλεφώνου). Το μυστικό κλειδί κρυπτογράφησης είναι γνωστό μόνο στον πάροχο και αλλάζει με τον χρόνο για κάθε χρήστη. Κάθε πάροχος υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και κατασκευαστής εξοπλισμού GSM πρέπει να υπογράψει το Πρωτόκολλο Συνεργασίας (Memorandum of Understanding - MoU) πριν αναπτύξει δίκτυο ή κατασκευάσει εξοπλισμό, αντίστοιχα. Το Πρωτόκολλο Συνεργασίας αποτελεί διεθνή συμφωνία που επιτρέπει την κοινή γνώση των αλγορίθμων κρυπτογράφησης και άλλης εμπιστευτικής πληροφορίας μεταξύ χωρών και παρόχων.

Χρήσιμες ηλεκτρονικές διευθύνσεις είτε για την εισαγωγή και παρουσίαση του προτύπου GSM αλλά και πλήρη λεπτομερή περιγραφή του είναι οι ακόλουθες:

- <http://www.tutorialspoint.com/gsm/index.htm>
- <http://www.3gpp.org>

4.1 Η αρχιτεκτονική του προτύπου GSM

Η αρχιτεκτονική του προτύπου GSM αποτελείται από τρία βασικά διασυνδεδεμένα υποσυστήματα που αλληλεπιδρούν τόσο μεταξύ τους όσο και με τους χρήστες δια μέσου ειδικών δικτυακών διεπαφών. Τα συστήματα αυτά είναι το υποσύστημα σταθμού βάσης (Base Station Subsystem - BSS), το υποσύστημα δικτύου και μεταγωγής (Network and Switching Subsystem - NSS), και το υποσύστημα υποστήριξης λειτουργιών (Operation Support Subsystem - OSS). Ο κινητός σταθμός (mobile station - MS) αποτελεί και αυτός ένα ξεχωριστό υποσύστημα αλλά κατά σύμβαση θεωρείται τμήμα του υποσυστήματος BSS. Στο Σχήμα 4-1 περιγράφεται διαγραμματικά η αρχιτεκτονική του προτύπου GSM.



Σχήμα 4-1. Αρχιτεκτονική του προτύπου GSM.

Το υποσύστημα σταθμών βάσης (BSS) που είναι επίσης γνωστό ως το ασυρματικό υποσύστημα, εξασφαλίζει και διαχειρίζεται τις οδούς επικοινωνίας μεταξύ των κινητών σταθμών και του κέντρου μεταγωγής. Το υποσύστημα BSS επίσης διαχειρίζεται την ραδιοδιεπαφή μεταξύ των κινητών σταθμών και των

άλλων υποσυστημάτων του GSM. Κάθε BSS αποτελείται από πολλούς σταθμούς ελέγχου σταθμών βάσης (Base Station Controllers - BSCs) που συνδέουν το MS με το NSS δια μέσου του MSC.

Το υποσύστημα NSS διαχειρίζεται τις διαδικασίες μεταπομπής του συστήματος και επιτρέπει στο MSC την επικοινωνία με άλλα δίκτυα όπως παραδείγματος χάριν τα PSTN, ISDN, PSDN και PLMN.

Το υποσύστημα OSS υποστηρίζει τις λειτουργίες και την συντήρηση του δικτύου GSM και επιτρέπει στους μηχανικούς συστημάτων να επιτηρούν, να κάνουν διαγνώσεις και να επιδιορθώνουν όλα τα χαρακτηριστικά συστήματα του δικτύου. Το σύστημα αυτό αλληλεπιδρά με όλα τα υπόλοιπα υποσυστήματα και ουσιαστικά απαρτίζεται αποκλειστικά από το ειδικό προσωπικό της εταιρείας παροχής κινητών υπηρεσιών για την απρόσκοπτη και ποιοτική παροχή υπηρεσιών από το δίκτυο.

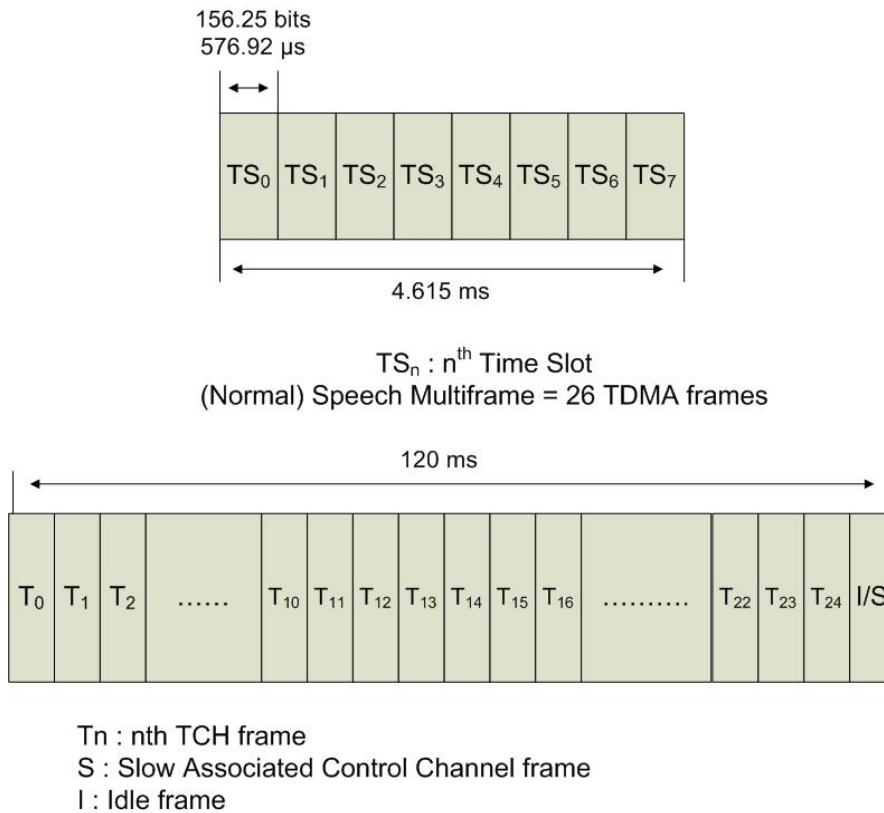
Η διεπαφή που συνδέει ένα σταθμό βάσης (Base Transceiver Station - BTS) σε ένα BSC ονομάζεται **Abis-διεπαφή**. Η Abis-διεπαφή μεταφέρει τηλεπικοινωνιακή κίνηση και δεδομένα ελέγχου και είναι προτυποποιημένη από το GSM. Έτσι BTS και BSC εξοπλισμός που προέρχεται από διαφορετικούς κατασκευαστές μπορεί να διασυνδεθεί λόγω της προτυποποίησης της διεπαφής. Τα BSCs συνδέονται με τα MSCs είτε με μικροκυματικές ζεύξεις είτε με κυκλώματα μισθωμένων γραμμών. Η διεπαφή μεταξύ ενός BSC και ενός MSC ονομάζεται **A-διεπαφή** και είναι επίσης προτυποποιημένη στο πρότυπο GSM. Η A-διεπαφή χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο **SS7 (Signalling System No. 7)** που ονομάζεται **Τμήμα Ελέγχου Διόρθωσης Σηματοδοσίας (Signalling Correction Control Part - SCCP)**, το οποίο υποστηρίζει την επικοινωνία μεταξύ του MSC και του BSC, όπως επίσης και την αποστολή μηνυμάτων δικτύου μεταξύ μεμονωμένων χρηστών και του MSC. Η A-διεπαφή επιτρέπει στους παρόχους να χρησιμοποιούν σταθμούς βάσης και εξοπλισμό μεταγωγής κατασκευασμένο από διαφορετικούς κατασκευαστές.

Το NSS χειρίζεται τη μεταπομπή των κλήσεων μεταξύ εξωτερικών δικτύων και των BSCs και είναι επίσης υπεύθυνο για την διαχείριση πρόσβασης σε διάφορες βάσεις δεδομένων πελατών. Το MSC είναι η κεντρική μονάδα του NSS και ελέγχει την τηλεφωνική κίνηση όλων των BSCs. Στο NSS υπάρχουν τρεις βάσεις δεδομένων που ονομάζονται **Home Location Register (HLR)**, **Visitor Location Register (VLR)** και **Authentication Centre (AUC)**, αντίστοιχα. Η βάση δεδομένων HLR περιέχει πληροφορίες σχετικά με τον συνδρομητή και τη θέση κάθε χρήστη που ευρίσκεται στην περιοχή ελέγχου του οικείου MSC. Στο πρότυπο GSM αποδίδεται σε κάθε συνδρομητή ένας μοναδικός αριθμός που ονομάζεται **International Mobile Subscriber Identity (IMSI)** και χρησιμοποιείται για την ταυτοποίησή του. Η βάση δεδομένων VLR αποθηκεύει προσωρινά πληροφορίες και της ταυτότητα IMSI κάθε περιηγόμενου χρήστη που δραστηριοποιείται σε περιοχή που ελέγχεται από το μη οικείο του MSC ως επισκέπτης. Από τη στιγμή που κάποιο κινητό εγγραφεί στο VLR, το αρμόδιο MSC ενημερώνει σχετικά την HLR του συνδρομητή-επισκέπτη, έτσι ώστε οι κλήσεις που αυτός πραγματοποιεί να δρομολογηθούν κατάλληλα εντός ή εκτός του δικτύου. Η βάση AUC είναι αυστηρά προστατευμένη και χειρίζεται τα κλειδιά αναγνώρισης και κρυπτογράφησης για κάθε συνδρομητή εγγεγραμμένο στις βάσεις HLR και VLR. Τέλος, η βάση AUC περιέχει ένα καταχωρητή που ονομάζεται **Equipment Identity Register (EIR)** ο οποίος καταγράφει κλεμμένες ή παρανόμως τροποποιημένες κινητές συσκευές που εκπέμπουν στοιχεία ταυτότητας που δεν ταιριάζουν με τα στοιχεία που περιέχονται στις βάσεις HLR και VLR.

Το υποσύστημα OSS υποστηρίζει ένα ή περισσότερα **Operation Maintenance Centres (OMC)**, τα οποία εποπτεύουν και διατηρούν την ποιοτική απόδοση κάθε MS, BTS, BSC και MSC εντός του δικτύου GSM. Επίσης το OSS διάγει τρεις βασικές λειτουργίες: α) φροντίζει για την συντήρηση όλου του τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και όλων των λειτουργιών δικτύου, β) διαχειρίζεται όλες τις διαδικασίες χρέωσης και τιμολόγησης, και γ) διαχειρίζεται όλο τον κινητό εξοπλισμό στο δίκτυο.

4.2 Το ασύρματο τμήμα του GSM

Το GSM αξιοποιεί δύο ζώνες συχνοτήτων εύρους ζώνης 25MHz η καθεμιά για την υλοποίηση δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η ζώνη 890-915MHz χρησιμοποιείται για την ανοδική ζεύξη από το χρήστη προς το σταθμό βάσης, και η ζώνη 935-960MHz για την καθοδική ζεύξη από το σταθμό βάσης προς το χρήστη. Το GSM χρησιμοποιεί FDD και ένα συνδυασμό TDMA και FHMA (Frequency Hopped Multiple Access) προκειμένου να δώσει τη δυνατότητα στους σταθμούς βάσης να εξυπηρετήσουν ταυτόχρονα πολλούς χρήστες. Οι διαθέσιμες ζώνες συχνοτήτων (ανοδικών και καθοδικών διαύλων) χωρίζονται σε διαύλους εύρους ζώνης 200kHz που ονομάζονται **Absolute Radio Frequency Channel Numbers (ARFCNs)**. Κάθε αριθμός ARFCN υποδηλώνει ένα συγκεκριμένο ζεύγος συχνοτήτων του οποίου το ανοδικό και καθοδικό κανάλι 'απέχουν' 45MHz. Κάθε κανάλι μπορεί επιμερίζεται στο χρόνο έτσι ώστε μέχρι και οκτώ χρήστες να μπορούν να το χρησιμοποιήσουν ταυτόχρονα. Κάθε ένας από τους οκτώ εν δυνάμει χρήστες χρησιμοποιεί τον ίδιο ARFCN αριθμό και δεσμεύει μια μοναδική **χρονοθυρίδα (timeslot-TS) ανά πλαίσιο (frame)**.



Σχήμα 4-2. Η δομή του πλαισίου ομιλίας στο πρότυπο GSM.

Η μετάδοση πληροφορίας τόσο στην ανοδική όσο και στην καθοδική ζεύξη επιτυγχάνεται με ρυθμό 270.833kbps χρησιμοποιώντας δυαδική ψηφιακή διαμόρφωση GMSK με $BT=0.3$. Έτσι, η διάρκεια κάθε συμβόλου (ή bit στην προκειμένη περίπτωση) είναι 3.692μs και ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας που αντιστοιχεί σε κάθε χρήστη είναι 33.854kbps. Λαμβάνοντας υπόψη και τη σηματοδοσία ελέγχου ο καθαρός ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας ανά χρήστη είναι ουσιαστικά 24.7kbps. Κάθε χρονοθυρίδα αντιστοιχεί σε 156.25 bits, αλλά από αυτά 8.25 bits χρησιμοποιούνται ως χρόνος φύλαξης (guard time) και 6 bits ως σηματοδοσία έναρξης και λήξης (start and stop bits). Κάθε TS έχει διάρκεια 576.92μs και κάθε TDMA πλαίσιο έχει διάρκεια 4.615ms, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-2.

Ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών στο εύρος ζώνης των 25MHz είναι 125. Επομένως ο μέγιστος αριθμός καναλιών ομιλίας στο GSM είναι 1,000. Σε

πρακτικές υλοποιήσεις συστημάτων όμως δεν αξιοποιείται όλο το φάσμα, αλλά ζώνες φύλαξης των 100kHz χρησιμοποιούνται εκατέρωθεν των ζωνών συχνοτήτων του GSM για λόγους προστασίας και μη πρόκλησης αμοιβαίων παρεμβολών με υπηρεσίες που λειτουργούν στις γειτονικές περιοχές συχνοτήτων. Τα χαρακτηριστικά της ραδιοδιεπαφής του προτύπου GSM παρουσιάζει ο Πίνακας 4-1.

<i>Παράμετρος</i>	<i>Προδιαγραφή</i>
Ανοδική Ζώνη Συχνοτήτων	880-890MHz, 890 -
Reverse Channel Frequency Band	915MHz, 1710-1785MHz
Καθοδική Ζώνη Συχνοτήτων	925-935MHz, 935 -
Forward Channel Frequency Band	960MHz, 1805-1880MHz
Αριθμός ARFCN	0 έως 124 και 975 έως
ARFCN Number	1023
Απόσταση μεταξύ ανοδικής και καθοδικής ζώνης	45MHz (GSM) και 95MHz (DCS)
Tx/Rx Frequency Spacing	
Απόσταση μεταξύ ανοδικής και καθοδικής χρονοθυρίδας (TS)	3 χρονοθυρίδες
Tx/Rx Time Slot Spacing	3 Time Slots
Ρυθμός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος	270.833kbps
Modulation Data Rate	
Διάρκεια πλαισίου	4.615ms
Frame Period	
Χρήστες ανά πλαίσιο	8
Users per Frame (full rate)	
Διάρκεια χρονοθυρίδας	576.9μs
Time slot Period	
Διάρκεια bit	3.692μs
Bit Period	
Τύπος διαμόρφωσης	GMSK, BT=0.3
Modulation	
Εύρος ζώνης καναλιού ARFCN	200kHz
ARFCN Channel Spacing	
Διεμπλοκή (μέγιστη καθυστέρηση)	40ms
Interleaving (maximum delay)	
Ρυθμός κωδικοποίησης φωνής	13.4kbps
Voice Coder Bit Rate	

Πίνακας 4-1. Προδιαγραφές της ραδιοδιεπαφής του προτύπου GSM.

Ο συνδυασμός μιας συγκεκριμένης χρονοθυρίδας TS και ενός αριθμού ARFCN αποτελούν ένα φυσικό κανάλι (physical channel) με συγκεκριμένη ανοδική και καθοδική συχνότητα. Κάθε φυσικό κανάλι μπορεί να αντιστοιχηθεί σε διαφορετικά λογικά κανάλια (logical channels) σε χρονικά διαφορετικές στιγμές. Δηλαδή, κάθε χρονοθυρίδα ή πλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για το χειρισμό τηλεφωνικών δεδομένων (ομιλία, φαξ ή teletext), δεδομένων σηματοδοσίας (αυτά απαιτούνται από την εσωτερική λειτουργία του συστήματος GSM) ή δεδομένων καναλιών ελέγχου (από το χρήστη, το σταθμό βάσης, ή το MSC). Στις προδιαγραφές του GSM ορίζεται μια μεγάλη ποικιλία λογικών καναλιών, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνδεση του φυσικού στρώματος (physical layer) με το στρώμα διακίνησης δεδομένων (data link layer) του δικτύου GSM. Τα λογικά αυτά κανάλια μεταφέρουν ιδιαίτερα αποδοτικά τα δεδομένα των χρηστών, ενώ ταυτόχρονα διάγουν τις απαραίτητες λειτουργίες ελέγχου του δικτύου χρησιμοποιώντας τα κανάλια ARFCN. Στο πρότυπο GSM προδιαγράφονται ειδικές αναθέσεις χρονοθυρίδων και πλαισίων για συγκεκριμένα λογικά κανάλια. Υπάρχουν δύο κατηγορίες λογικών καναλιών: α) τα κανάλια κίνησης (traffic channels - TCH) και β) τα κανάλια ελέγχου (control channels - CCH). Τα κανάλια κίνησης μεταφέρουν ψηφιακά κωδικοποιημένη ομιλία ή δεδομένα και έχουν τις ίδιες λειτουργίες και μορφή τόσο στην ανοδική όσο και στην καθοδική ζεύξη. Τα κανάλια ελέγχου μεταφέρουν εντολές σηματοδοσίας και συγχρονισμού μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τηλεφώνου.

Διάφοροι τύποι καναλιών ελέγχου προδιαγράφονται ξεχωριστά για την ανοδική ή την καθοδική ζεύξη. Υπάρχουν έξη τύποι καναλιών κίνησης που προδιαγράφονται στο GSM και ακόμη περισσότεροι καναλιών ελέγχου. Η αναλυτική περιγραφή των τύπων καναλιών, καθώς και τεχνικές λεπτομέρειες που αφορούν στις διεπαφές, τα διάφορα επίπεδα πρωτοκόλλων (π.χ. MAC layer) κλπ., ξεφεύγει από τα πλαίσια της διδασκαλίας του μαθήματος 'Κινητές Επικοινωνίες' και ο ενδιαφερόμενος φοιτητής παραπέμπεται να την αναζητήσει στα κατάλληλα Τεχνικά Πρότυπα του ETSI που ευρίσκονται στην ηλεκτρονική

διεύθυνση <http://www.etsi.org> ή στις κατάλληλες ιστοσελίδες του 3rd Generation Project Partnership (3GPP) <http://www.3gpp.org>, όπου συγκεντρώνονται όλα τα Ευρωπαϊκά Τεχνικά Πρότυπα που αφορούν στην προτυποποίηση και εξέλιξη συστήματα κινητών επικοινωνιών 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς.

5 ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ UMTS

Η ευρωπαϊκή αντίληψη για την υλοποίηση συστημάτων κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς εκφράζεται με την εξέλιξη και εκπόνηση του προτύπου Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) από την ομάδα 3GPP (3rd Generation Project Partnership, <http://www.3gpp.org>) του ETSI. Στις ιστοσελίδες αυτές ευρίσκεται όλη η τεχνική πληροφορία για την ανάπτυξη, εξέλιξη και διαρκή ανανέωση του προτύπου και συνιστώ στον ενδιαφερόμενο να ανατρέξει εκεί για την έγκυρη και ενδελεχή ενημέρωσή του.

5.1 Αρχιτεκτονική του Ευρωπαϊκού προτύπου ψηφιακών κινητών υπηρεσιών 3^{ης} γενιάς UMTS

Μια ουσιώδης απαίτηση για την έκδοση 99 (release 99) της αρχιτεκτονικής του προτύπου 3^{ης} γενιάς UMTS είναι η υποστήριξη περιαγωγής και η συμβατότητα λειτουργίας με το σύστημα GSM. Έτσι το σύστημα GSM εμφανίζεται ως δομικό στοιχείο της έκδοσης 99 του προτύπου UMTS. Η αρχιτεκτονική της έκδοσης 99 καθώς και η διαλειτουργικότητα των διαφόρων συστημάτων που την απαρτίζουν παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1.

Ένα δίκτυο UMTS αποτελείται από 3 συνάλληλες οντότητες:

- Δίκτυο Πυρήνα - Core Network (CN)
- Επίγειο Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης του UMTS - Terrestrial Radio Access Network (UTRAN), και
- Εξοπλισμός Χρήστη - User Equipment (UE).

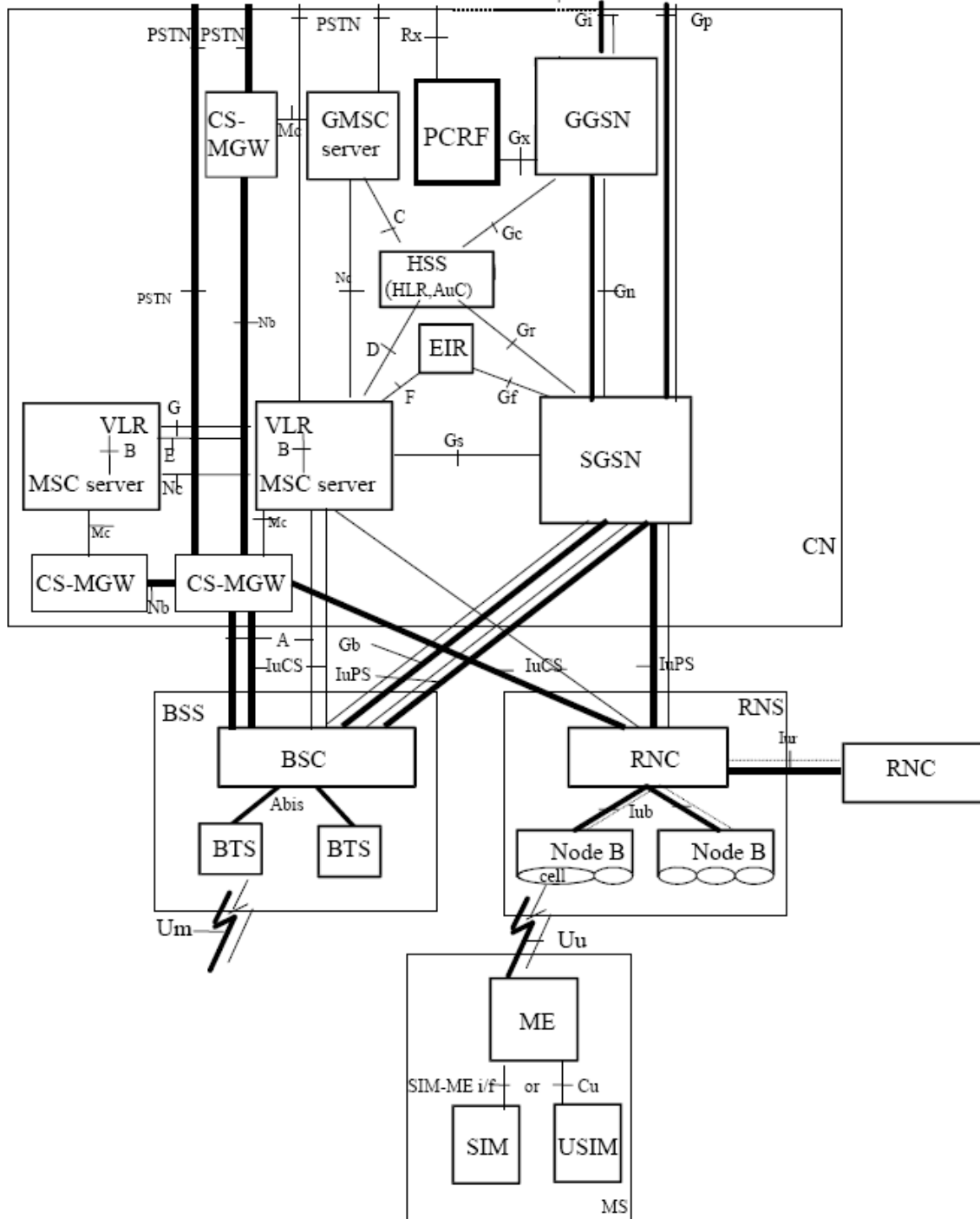
Η κύρια λειτουργία του Core Network είναι η μεταγωγή, δρομολόγηση και διακίνηση της κίνησης χρηστών. Επίσης το Core Network περιέχει βάσεις δεδομένων και λειτουργίες διαχείρισης δικτύου. Η βασική αρχιτεκτονική του UMTS βασίζεται στο δίκτυο GSM με GPRS. Βεβαίως, όλος ο εξοπλισμός πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα για να λειτουργήσει και να παρέχει υπηρεσίες στο UMTS.

Το UTRAN εξασφαλίζει τη μέθοδο πρόσβασης του UE μέσω της ραδιοεπαφής. Ο Σταθμός Βάσης ονομάζεται Node-B και ο εξοπλισμός που ελέγχει τα Node-B's ονομάζεται Radio Network Controller (RNC). Προκειμένου όμως το δίκτυο να επικοινωνήσει με το UE, πρέπει αυτό να γνωρίζει προσεγγιστικά την περιοχή στην οποία ευρίσκεται. Τέτοιες περιοχές με σειρά φθίνοντος μεγέθους είναι:

- UMTS systems (including satellite)
- Public Land Mobile Network (PLMN)
- MSC/VLR ή SGSN
- Location Area
- Routing Area (PS domain)
- UTRAN Registration Area (PS domain)
- Cell
- Sub cell

Επίσης, ιδιαίτερα χρήσιμες διευθύνσεις για την παρουσίαση των κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς είναι και οι ακόλουθες:

- <http://www.umtsworld.org>
- <http://www.umts-forum.org/>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System
- <http://www.iec.org/online/tutorials/umts/>



Σχήμα 5-1. Διαγραμματική αναπαράσταση της αρχιτεκτονικής του ευρωπαϊκού προτύπου 3^{ης} γενιάς UMTS.

Ο Πίνακας 5-1 εξηγεί μερικούς από τους όρους που αντιστοιχούν στα δομικά στοιχεία του προτύπου.

Ακρωνύμιο - Όρος	Περιγραφή
USIM	UMTS Subscriber Identity Module
Node B	UMTS Base Station
UE	User Equipment
SRNC	Serving Radio Network Controller
DRNC	Drift Radio Network Controller
SGSN	Serving GPRS Support Node
GGSN	Gateway GPRS Support Node
PDN	Public Data Network
SIM	Subscriber Identity Module
ME	Mobile Equipment
BTS	Base Transceiver Station
BSC	Base Station Controller
MSC	Mobile Switching Centre
PSTN	Public Switched Telephone Network
HLR	Home Location Register
VLR	Visitor Location Register
GMSC	Gateway Mobile Switching Centre

Πίνακας 5-1. Ανάλυση κάποιων βασικών συντομογραφιών των όρων που χρησιμοποιούνται στην έκδοση 99 του προτύπου UMTS.

Το επίγειο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης στο UMTS ονομάζεται UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) και αποτελείται από τον ελεγκτή σταθμών βάσης RNC και τους σταθμούς βάσης Node B. Το UTRAN είναι υπεύθυνο για τις λειτουργίες που σχετίζονται με την πρόσβαση και κινητικότητα των χρηστών όπως επίσης και με την αξιοποίηση των ασυρμάτων πόρων του δικτύου. Ο ελεγκτής SRNC είναι υπεύθυνος για τη λογική διασύνδεση μεταξύ του εξοπλισμού του χρήστη UE και δικτύου κορμού CN. Ο ελεγκτής DRNC φροντίζει για την εξασφάλιση επιπλέον ασυρμάτων πόρων σε ένα UE που είναι ενεργό και σε κατάσταση ήπιας μεταπομπής (soft-handover). Ο Node B, που ευρίσκεται συνδεδεμένος με το DRNC, εξασφαλίζει την διαθεσιμότητα του φυσικού πόρου στο UE και η πληροφορία στην ανοδική και καθοδική ζεύξη δρομολογείται προς το SRNC.

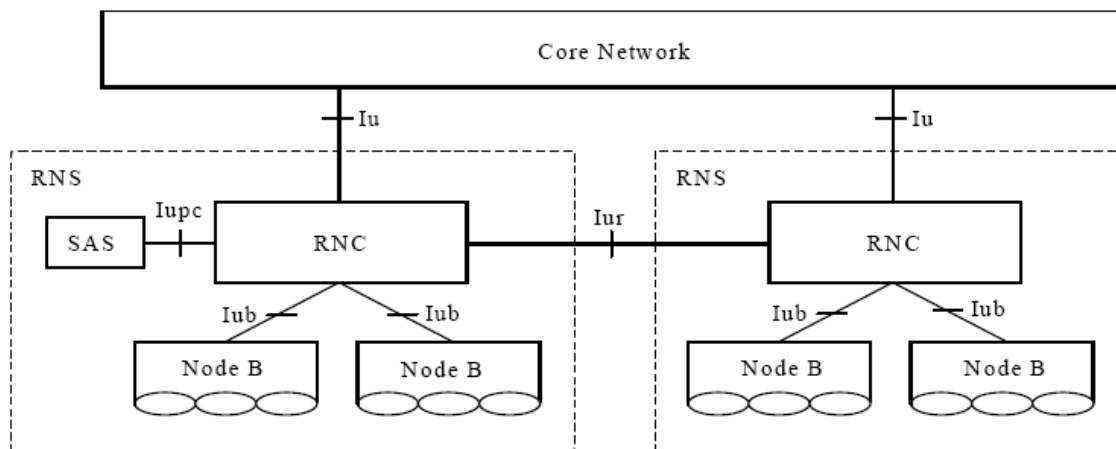
Ο ραδιοκυματικός εξοπλισμός που ο συνδρομητής χρησιμοποιεί για να λάβει υπηρεσίες από το UTRAN ονομάζεται User Equipment (UE). Ο εξοπλισμός αυτός

Βρίσκεται διαρκώς σε φάση συνεχούς εξέλιξης και σήμερα έχουν κάνει την εμφάνισή τους GSM/UMTS συσκευές που διαθέτουν μεταξύ άλλων χαρακτηριστικών, στερεοφωνικό ραδιόφωνο FM, stereo MP3 ή WMA players, internet browsing, ειδικά λειτουργικά συστήματα, email clients, εφαρμογές java, σύστημα πλοήγησης με ενσωματωμένο GPS δέκτη και χάρτες, κλπ.

Το πεδίο μεταγωγής κυκλωμάτων (Circuit Switched Domain - CS-D) χρησιμοποιείται για την παροχή κλασικών τηλεφωνικών συνδιαλέξεων. Το δίκτυο κορμού (Core Network - CN) που υλοποιεί τις CS υπηρεσίες για το UMTS είναι το κέντρο μεταγωγής 3^{ης} γενιάς 3G-MSC. Το πεδίο μεταγωγής πακέτων (Packet Switched Domain - PS-Domain) χρησιμοποιείται για την παροχή υπηρεσιών IP και υλοποιείται από τον κόμβο SGSN.

5.2 Δίκτυο ασύρματης πρόσβασης (UTRAN)

Το UTRAN αποτελείται από πολλά Υποσυστήματα Ραδιοδικτύων (Radio Network Subsystem - RNS) τα οποία συνδέονται με το Core Network μέσω της διεπαφής Iu. Το RNS αποτελείται από έναν Ελεγκτή Ραδιοδικτύου (Radio Network Controller - RNC), ένα ή περισσότερους Σταθμούς Βάσης (Node Bs) και προαιρετικά από ένα Αυτόνομο Κέντρο Εξυπηρέτησης Κινητών Σταθμών (Stand Alone Serving Mobile Location Centre - SAS). Ένας Node B συνδέεται με τον RNC μέσω της διεπαφής Iub, ενώ η προτυποποιημένη ασύρματη διεπαφή Uu χρησιμοποιείται για την σύνδεση του Node-B με τον κινητό σταθμό (UE). Η αρχιτεκτονική του δικτύου ασύρματης πρόσβασης UTRAN παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-2.



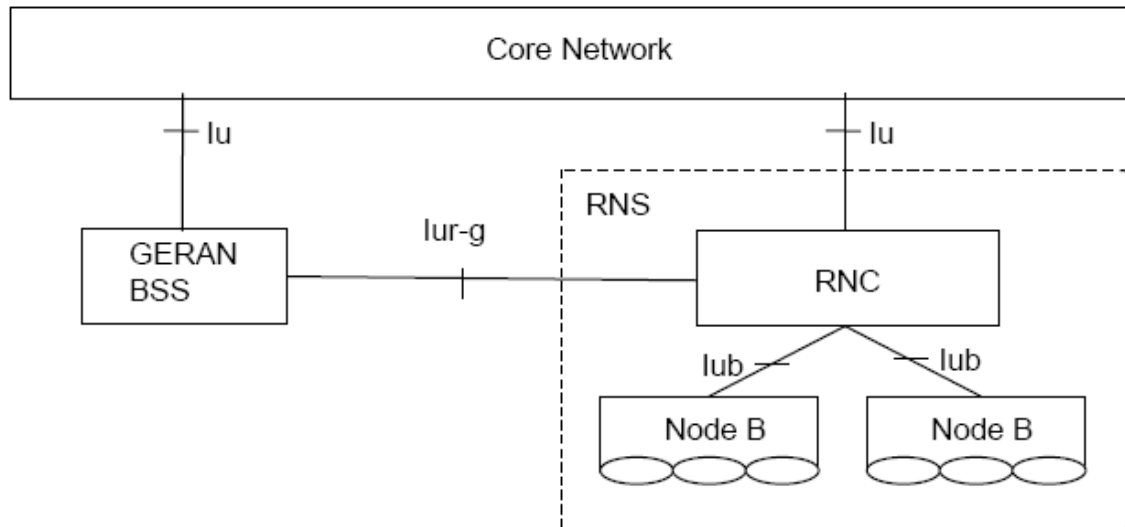
Σχήμα 5-2. Αρχιτεκτονική του UTRAN στο Ευρωπαϊκό πρότυπο UMTS.

Ο Node B υποστηρίζει πρωτόκολλο FDD, πρωτόκολλο TDD ή ακόμα και συνδυασμό αυτών. Υπάρχουν τρεις επιλογές ακολουθίας διασποράς (chip rate) στο πρωτόκολλο TDD: 7.68 Mcps TDD, 3.84 Mcps TDD and 1.28 Mcps TDD. Κάθε κυψέλη TDD υποστηρίζει μία εξ αυτών των ακολουθιών διασποράς. Ο Node B ο οποίος υποστηρίζει κυψέλες TDD δύναται να υποστηρίζει μόνο μια μόνο ή περισσότερες επιλογές ακολουθίας διασποράς.

Ο RNC ο οποίος υποστηρίζει κυψέλες TDD δύναται να υποστηρίζει μόνο μια ή περισσότερες επιλογές ακολουθίας διασποράς. Ο RNC χειρίζεται τα ζητήματα περιαγωγής που απαιτούν αποστολή σηματοδosis προς τον UE. Ένας RNC μπορεί να έχει την δυνατότητα λειτουργίας συνδυασμού/διαχωρισμού προκειμένου να υποστηρίξει το συνδυασμό/διαχωρισμό συρμών δεδομένων. Εντός του UTRAN, οι RNCs των RNSs μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω της διεπαφής Iur. Οι διεπαφές Iu και Iur είναι λογικού επιπέδου διεπαφές. Η διεπαφή Iur μπορεί να υλοποιηθεί μέσω απευθείας φυσικής ζεύξης μεταξύ RNCs ή εικονικών δικτύων χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε κατάλληλο δίκτυο μεταφοράς.

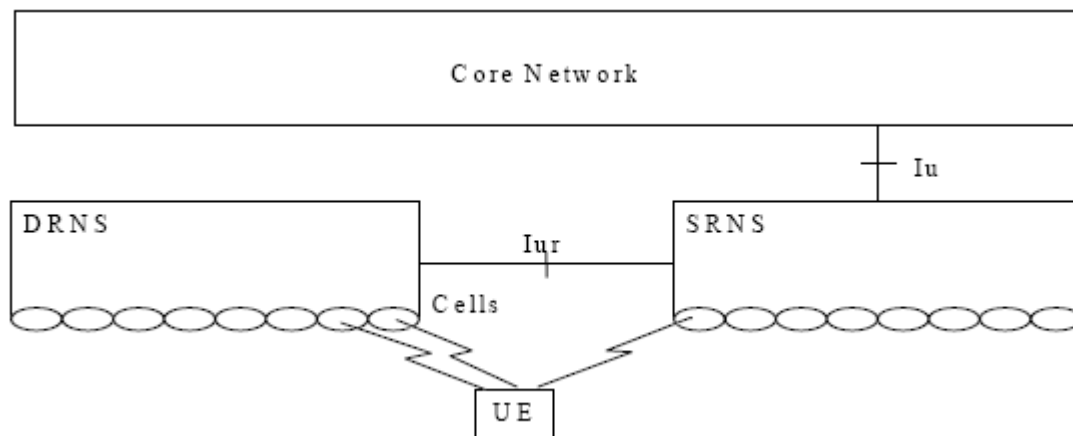
Το RNC μπορεί να συνδεθεί με BSS που υποστηρίζει GSM Edge Radio Access Network (GERAN) Iu διεπαφή μέσω της διεπαφής Iur-g. Το Σχήμα 5-3 που

ακολουθεί, απεικονίζει τη σύνδεση UTRAN και GERAN Iu διεπαφής όταν υιοθετείται η διεπαφή Iur-g.



Σχήμα 5-3. Διασύνδεση RNS με δίκτυο BSS που υποστηρίζει την διεπαφή Iu, μέσω της διεπαφής Iur-g.

Για κάθε σύνδεση μεταξύ UE και του UTRAN, ένα RNS είναι το RNS Εξυπηρέτησης. Εάν απαιτηθεί, RNSs Ολίσθησης (Drift RNSs) υποστηρίζουν το RNS Εξυπηρέτησης εξασφαλίζοντας ραδιοπόρους όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-4.



Σχήμα 5-4. Σύνδεση UE με RNS Εξυπηρέτησης (SRNS) και Ολίσθησης (DRNS).

Ο ρόλος ενός RNS (Εξυπηρέτησης ή Ολίσθησης) δεν είναι προκαθορισμένος αλλά καθορίζεται ειδικά για κάθε σύνδεση μεταξύ του UE και του UTRAN.

Το UTRAN χωρίζεται σε δύο στρώματα, στο Στρώμα Ασύρματου Δικτύου (Radio Network Layer) και στο Στρώμα Δικτύου Μεταφοράς (Transport Network Layer). Η αρχιτεκτονική του UTRAN architecture, δηλαδή οι λογικοί κόμβοι του UTRAN και οι διεπαφές μεταξύ αυτών, ορίζονται ως τμήμα του Radio Network Layer.

Για κάθε διεπαφή του UTRAN (Iu, Iur, Iub, Iurc) το σχετικό πρωτόκολλο στρώματος του δικτύου μεταφοράς και η λειτουργικότητα του ορίζεται. Το στρώμα δικτύου μεταφοράς παρέχει υπηρεσίες για το επίπεδο μεταφοράς του χρήστη, μεταφορά σηματοδοσίας και μεταφορά υλοποίησης συγκεκριμένων λειτουργιών O&M.

Κάθε υλοποίηση εξοπλισμού σύμφωνα με τις προδιαγραφές μιας συγκεκριμένης διεπαφής θα πρέπει να υποστηρίζει τα πρωτόκολλα του Στρώματος Ασύρματου Δικτύου (Radio Network Layer) που καθορίζονται για εκείνη τη διεπαφή. Ως ελάχιστη δε απαίτηση, για διαλειτουργικότητα, θα πρέπει να υποστηρίζει τα πρωτόκολλα του Στρώματος Δικτύου Μεταφοράς σύμφωνα με τις προδιαγραφές αυτού για εκείνη τη διεπαφή. Η αρχιτεκτονική του δικτύου του Στρώματος Δικτύου Μεταφοράς δεν προδιαγράφεται από το 3GPP και η υλοποίησή της είναι θέμα του παρόχου. Ο εξοπλισμός που είναι συμβατός με τα πρότυπα του 3GPP θα πρέπει τουλάχιστον να μπορεί να λειτουργήσει ως τερματικό σημείο στο Στρώμα Δικτύου Μεταφοράς, και να μπορεί να λειτουργήσει ως διακόπτης/δρομολογητής εντός του Στρώματος Δικτύου Μεταφοράς. Για την υλοποίηση ειδικών λειτουργιών σηματοδοσίας O&M προς τον Node B, μόνον τα πρωτόκολλα του Στρώματος Δικτύου Μεταφοράς αφορούν στις προδιαγραφές του UTRAN.

Αναλυτική και πλήρης περιγραφή της αρχιτεκτονικής του UTRAN, των επιπέδων Χρήστη και Ελέγχου, αλλά και της διαστρωμάτωσης των διαφόρων πρωτοκόλλων ευρίσκεται στο πρότυπο TS125.401 του 3GPP.

5.3 Το φυσικό στρώμα στο UTRA

Η τεχνική της πολλαπλής πρόσβασης με κώδικα (Coded Division Multiple Access - CDMA) αποτελεί την τεχνολογία στην οποία βασίζονται τα συστήματα κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς. Οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί ακολουθίας διασποράς για TDD πρωτόκολλο είναι 7.68Mcps, 3.84Mcps και 1.28Mcps, ενώ για FDD είναι 3.84Mcps. Ανάλογο με το ρυθμό της ακολουθίας διασποράς είναι και το καταλαμβανόμενο εύρος ζώνης ανά δίαυλο. Έτσι, στην περίπτωση υλοποίησης με τεχνική FDD, το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει το διασπαρμένο σήμα είναι 3.84MHz και προσθέτοντας εκατέρωθεν αυτού ζώνες φύλαξης, προκύπτει τελικά το εύρος ραδιοδιαύλου που φθάνει τα 5MHz. Στην περίπτωση υλοποίησης με τεχνική TDD το εύρος ζώνης του ραδιοδιαύλου είναι 10MHz, 5MHz και 1.66MHz για ρυθμούς ακολουθίας διασποράς 7.68Mcps, 3.84Mcps και 1.28Mcps, αντίστοιχα. Αναλυτική περιγραφή των τεχνικών παραμέτρων FDD και TDD παρουσιάζεται παρακάτω, στις ενότητες 5.7 και 5.8 .

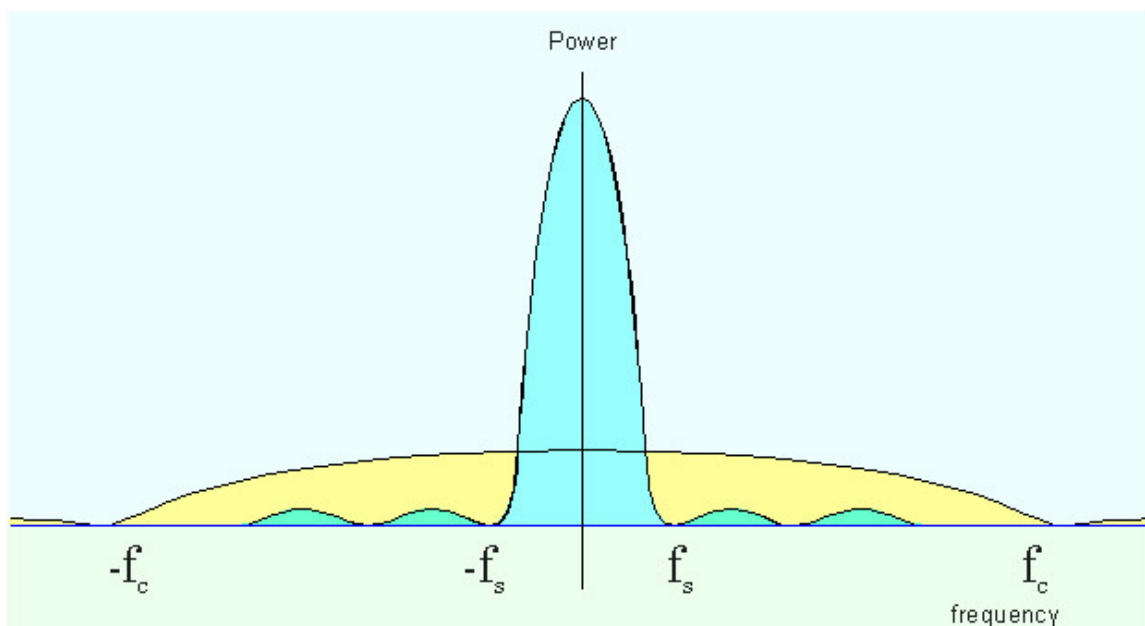
Οι συχνότητες που μέχρι σήμερα έχουν αποδοθεί και αξιοποιηθεί από διάφορους παρόχους στην Ελλάδα και την Ευρώπη είναι:

- FDD WCDMA: 1920MHz - 1980MHz για την ανοδική ζεύξη, και 2110MHz - 2170MHz για την καθοδική ζεύξη, δηλαδή ζευγαρωτό φάσμα 2x60MHz. (Αδειοδοτημένο)
- TDD WCDMA: 1900MHz - 1920MHz και 2020MHz - 2025 MHz. (Αδειοδοτημένο)
- TDD WCDMA: 2010MHz - 2020MHz. (Ελεύθερο)

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή της τεχνικής της διασποράς φάσματος και της πολλαπλής πρόσβασης με κώδικα (CDMA), καθώς και οι λεπτομέρειες που αφορούν στην υλοποίηση της εφαρμογής της τεχνικής στα πλαίσια των συστημάτων κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς.

5.4 Τεχνικές διασποράς φάσματος

Στα συστήματα διασποράς φάσματος το μεταδιδόμενο σήμα χρησιμοποιεί εύρος ζώνης W πολύ μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης R που πραγματικά καταλαμβάνει η πληροφορία που μεταφέρει, με ταυτόχρονη μείωση της φασματικής πυκνότητας ισχύος, ώστε η συνολική του ισχύς να παραμένει σταθερή. Λόγω της διασποράς (ή απλώματος) του μεταδιδόμενου σήματος στο πεδίο της συχνότητας, η τεχνική αυτή μετάδοσης ονομάζεται τεχνική διασποράς φάσματος (spread spectrum technique), παρουσιάζεται δε στο Σχήμα 5-5.



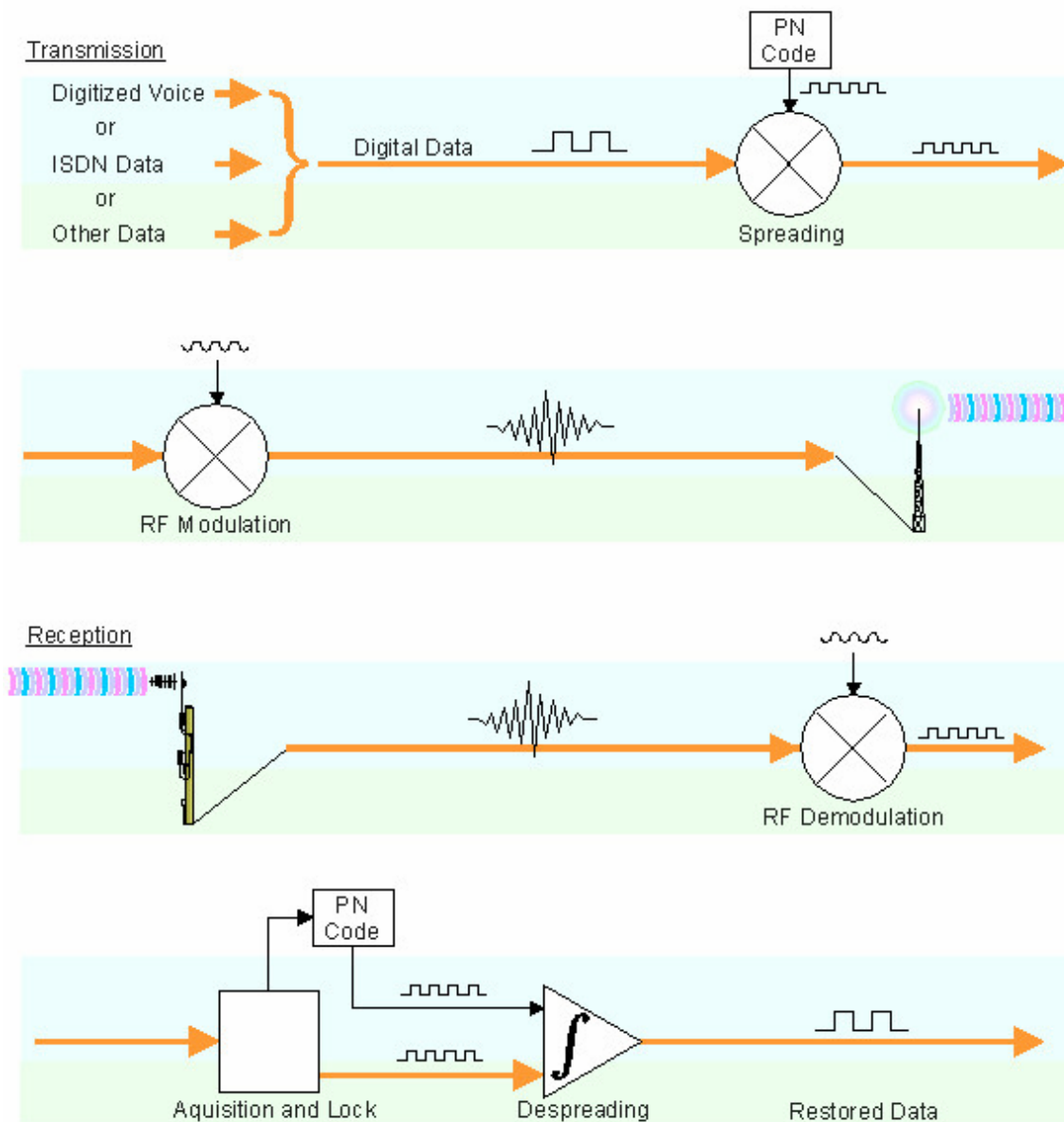
Σχήμα 5-5. Τεχνική διασποράς φάσματος. Η συνολική ισχύς του σήματος δεν μεταβάλλεται και τα δύο εμβαδά του αρχικού και του απλωμένου φάσματος είναι ίσα.

Γενικά, τα συστήματα επικοινωνιών διασποράς φάσματος χαρακτηρίζονται από τρεις βασικές ιδιότητες:

- Το εύρος ζώνης του σήματος είναι πολύ μεγαλύτερο από εκείνο που απαιτείται (συνήθως το καταλαμβανόμενο εύρος ζώνης στη βασική ζώνη) για την αποστολή της πληροφορίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αρκετά πλεονεκτήματα, όπως την αυξημένη ανοχή στο θόρυβο και τις παρεμβολές καθώς και την δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης.
- Η διασπορά (ή άπλωμα) του σήματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κώδικα διασποράς (spreading code), που είναι στατιστικά ασυσχέτιστος με το σήμα της πληροφορίας. Η ανεξαρτησία του κώδικα διαχωρίζει την τεχνική αυτή από τα κλασικά σχήματα διαμόρφωσης, στα οποία η διαμόρφωση των δεδομένων πάντοτε αυξάνει σε κάποιο βαθμό το εύρος ζώνης.
- Ο δέκτης συγχρονίζεται με τον κώδικα διασποράς προκειμένου να ανακτήσει τα δεδομένα. Η χρήση ενός ανεξάρτητου κώδικα και η σύγχρονη λήψη επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες την πρόσβαση στην ίδια περιοχή συχνοτήτων την ίδια χρονική στιγμή.

Για την προστασία του σήματος, ο κώδικας διασποράς που χρησιμοποιείται είναι ψευδοτυχαίος. Εμφανίζεται ως τυχαίος, αλλά στην ουσία είναι καθορισμένος, έτσι ώστε ο δέκτης να μπορέσει να τον αναπαράγει για σύγχρονη ανίχνευση. Ο ψευδοτυχαίος κώδικας ονομάζεται επίσης και ψευδοθόρυβος (pseudo-noise - PN). Η τεχνική διασποράς φάσματος περιγράφεται γενικά στο Σχήμα 5-6. Η μετάδοση του σήματος αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Για κάθε κανάλι και κάθε διαδοχική σύνδεση δημιουργείται ένας κώδικας ψευδοτυχαίας ακολουθίας κώδικας.
- Τα δεδομένα της πληροφορίας διαμορφώνουν τον ψευδοτυχαίο κώδικα.
- Το προκύπτων σήμα διαμορφώνει ένα φορέα
- Ο διαμορφωμένος φορέας ενισχύεται και εκπέμπεται



Σχήμα 5-6. Μετάδοση και λήψη πληροφορίας με την τεχνική της διασποράς φάσματος.

Η λήψη του σήματος αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

- Ο φορέας λαμβάνεται και ενισχύεται.
- Το ληφθέν σήμα μειγνύεται με έναν τοπικό φορέα για να ανακτηθεί το διεσπαρμένο ψηφιακό σήμα.
- Ένας κώδικας ψευδοτυχαίας ακολουθίας δημιουργείται όμοιος με αυτόν του αναμενόμενου σήματος.

- Ο δέκτης αποκτά τον ληφθέντα κωδικό και κλειδώνει τον δικό του κώδικα σε αυτόν.
- Το ληφθέν σήμα συσχετίζεται με τον δημιουργημένο κώδικα και έτσι εξαγονται τα δεδομένα της πληροφορίας.

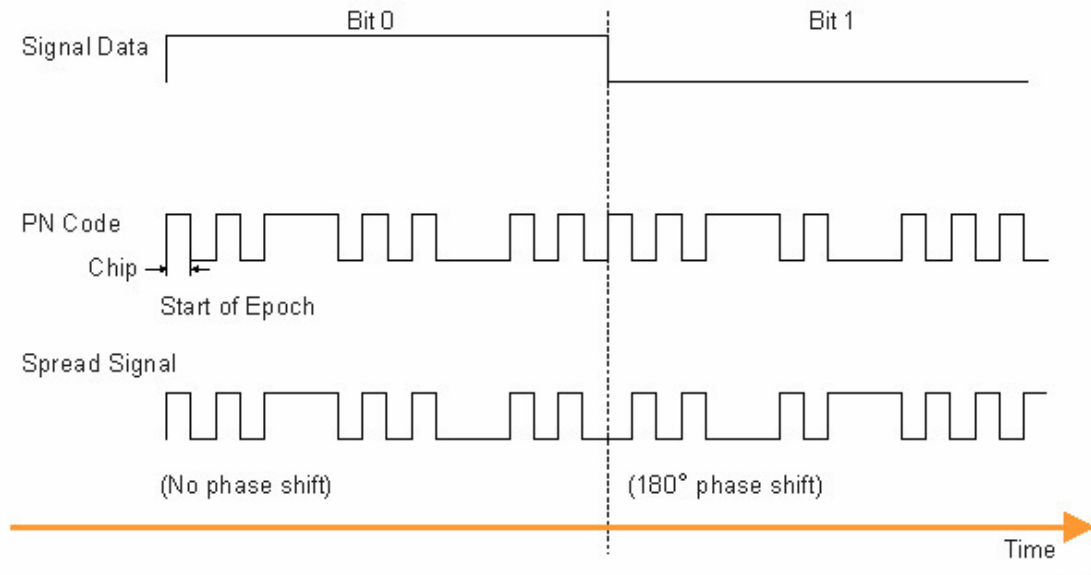
Στα σήματα διασποράς φάσματος ο παράγοντας διασποράς ή εξάπλωσης φάσματος (spreading factor) δίδεται από τη σχέση:

$$SF = \frac{W}{R} \quad (5.1)$$

Αποδεικνύεται, ότι ο παράγοντας διασποράς φάσματος είναι περίπου ίσος με το επιτυχανόμενο κέρδος στο λόγο σήματος προς θόρυβο στο δέκτη αναφορικά στην ίδια πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος (BER). Το επιτυχανόμενο κέρδος, ονομάζεται και κέρδος επεξεργασίας (processing gain). Δύο είναι οι σημαντικότερες τεχνικές διασποράς φάσματος που ευρίσκουν σήμερα εφαρμογή στο πρότυπο UMTS: α) η τεχνική απευθείας ακολουθίας (direct sequence - DS) και β) η τεχνική μεταπήδησης συχνότητας (frequency hopping - FH).

5.4.1 Διασπορά φάσματος απευθείας ακολουθίας

Σε αυτήν την τεχνική το σήμα της πληροφορίας $s(t)$ πολλαπλασιάζεται με τον κώδικα διασποράς $s_c(t)$, που είναι ανεξάρτητος από το σήμα της πληροφορίας. Η διαδικασία εικονίζεται στο Σχήμα 5-7. Ο κώδικας διασποράς αποτελείται από διαδοχικούς ορθογωνικούς παλμούς (chips) με πλάτος ± 1 και πολύ μικρή χρονική διάρκεια T_c (chip interval) σε σχέση με τη χρονική διάρκεια T_s του συμβόλου της πληροφορίας, δηλαδή $T_s \gg T_c$. Το αντίστροφο της χρονικής διάρκειας ενός chip, $1/T_c$, ονομάζεται ρυθμός διασποράς (chip rate) και ισούται προσεγγιστικά με το εύρος ζώνης που καταλαμβάνει ο κώδικας διασποράς. Ο παράγοντας διασποράς ή εξάπλωσης φάσματος ισούται με το λόγο T_s/T_c .



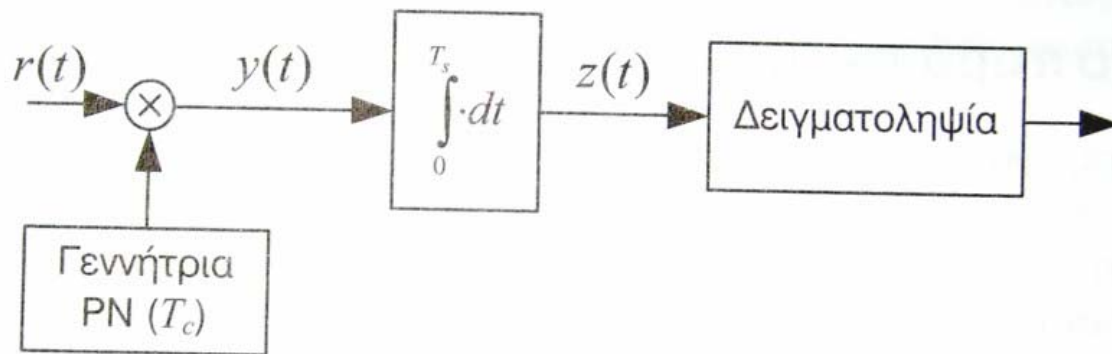
Σχήμα 5-7. Παράδειγμα εφαρμογής κώδικα διασποράς φάσματος απευθείας ακολουθίας.

Το φάσμα που καταλαμβάνει το σήμα διασποράς $s_c(t)$, που είναι αποτέλεσμα της μίξης των δύο σημάτων $s(t)$ και $s_c(t)$ στο πεδίο του χρόνου, προσδιορίζεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier:

$$F\{s(t) \cdot s_c(t)\} = S_{DS}(f) = S(f) * S_c(f) \quad (5.2)$$

κάνοντας χρήση της ιδιότητας του μετασχηματισμού Fourier, κατά την οποία ο μετασχηματισμός Fourier του γινομένου συναρτήσεων στο πεδίο του χρόνου, ισούται με τη συνέλιξη των επιμέρους μετασχηματισμών Fourier των συναρτήσεων. Επομένως, το φάσμα του σήματος διασποράς καθορίζεται ουσιαστικά από το φάσμα του κώδικα διασποράς, δηλαδή $B_{DS} \approx B_c$.

Η αντίστροφη διαδικασία ακολουθείται στο δέκτη προκειμένου να ανακτήσουμε το σήμα της πληροφορίας. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 5-8, όπου παρουσιάζεται διαγραμματικά ο σχετικός δέκτης συσχέτισης.



Σχήμα 5-8. Δέκτης συσχέτισης για ανάκτηση πληροφορίας σε ασύρματο σύστημα επικοινωνίας που χρησιμοποιεί DS-CDMA.

Ο δέκτης συσχέτισης πολλαπλασιάζει το λαμβανόμενο σήμα με ένα απόλυτα συγχρονισμένα αντίγραφο του κώδικα διασποράς που χρησιμοποίησε ο πομπός. Αν ο θόρυβος που πρόσκτησε το σήμα διασποράς φάσματος κατά τη διάδοσή του από τον πομπό στο δέκτη είναι λευκός προσθετικός θόρυβος κανονικής κατανομής (AWGN) $n(t)$, τότε:

$$\begin{aligned} y(t) &= r(t) \cdot s_c(t) = [s_{DS}(t) + n(t)] \cdot s_c(t) = [s(t) \cdot s_c(t) + n(t)] \cdot s_c(t) = \\ &= s(t) \cdot s_c^2(t) + n(t) \cdot s_c(t) = s(t) + n_c(t) \end{aligned} \quad (5.3)$$

αφού $s_c(t) = \pm 1 \Rightarrow s_c^2(t) = 1$. Επίσης, επειδή ο κώδικας διασποράς είναι ψευδο-τυχαίος και έχει επιλεγεί έτσι ώστε να εμφανίζει χαρακτηριστικά λευκού θορύβου, ο όρος $n_c(t)$ θα παρουσιάζει επίσης χαρακτηριστικά λευκού θορύβου και επομένως στην έξοδο του ολοκληρωτή θα έχουμε το σήμα της αρχικής πληροφορίας, δηλαδή:

$$z(t) = \int_0^{T_s} s(t) + n_c(t) dt = \int_0^{T_s} s(t) dt + \int_0^{T_s} n_c(t) dt = \int_0^{T_s} s(t) dt \quad (5.4)$$

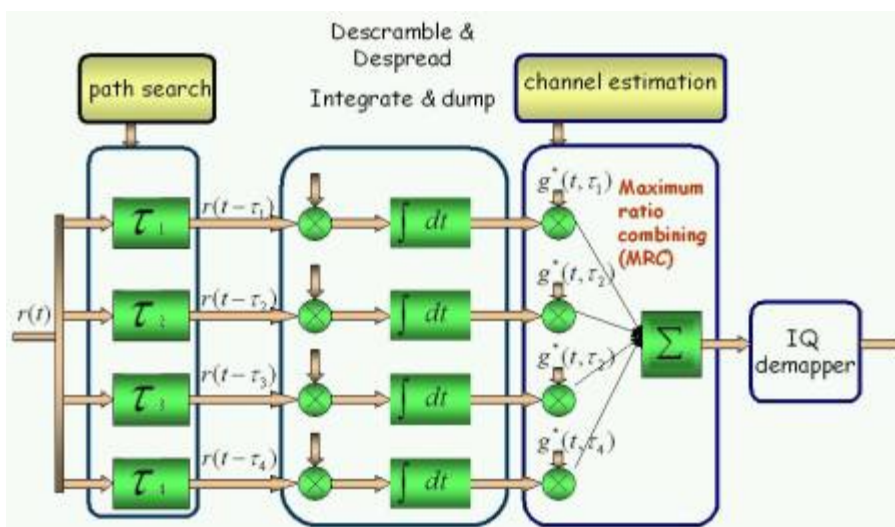
Επίσης, εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί ότι ο πολλαπλασιασμός του εισερχόμενου σήματος στο δέκτη με την κώδικα διασποράς δύναται να

λειτουργήσει θετικά απορρίπτοντας ενδεχόμενες παρεμβολές στενής ζώνης. Πράγματι, αν το σήμα παρεμβολής στενής ζώνης είναι $s_i(t)$ τότε το γινόμενο $s_i(t)s_c(t)=n_i(t)$ παρουσιάζει και αυτό χαρακτηριστικά λευκού θορύβου κι επομένως στην έξοδο του ολοκληρωτή ο όρος $\int n_i(t)dt=0$. Ουσιαστικά, ο δέκτης απλώνει την ισχύ του σήματος παρεμβολής σε όλο το εύρος ζώνης της ακολουθίας διασποράς, αυξάνοντας έτσι το επίπεδο του θορύβου. Επομένως, η επιλογή του κώδικα διασποράς πρέπει να είναι κατάλληλη (πλήρως ασυσχέτιστη) ώστε να διασφαλίζει ότι $\int n_c(t)dt=\int n_i(t)dt=0$.

Μια ακόμα χαρακτηριστική ιδιότητα του δέκτη συσχέτισης σήματος διασποράς είναι η απόρριψη της διασυμβολικής παρεμβολής. Έτσι, οι συνιστώσες της πολυοδευτικής διάδοσης με καθυστέρηση μεγαλύτερη του chip interval απορρίπτονται από το δέκτη.

5.4.2 Δέκτης RAKE

Στην περίπτωση των συστημάτων κινητών επικοινωνιών η πολυοδευτική διάδοση είναι δεδομένη. Ο δέκτης RAKE είναι ειδικά σχεδιασμένος για να καταπολεμήσει το πρόβλημα της εξασθένησης λόγω πολυόδευσης. Αυτό το επιτυγχάνει χρησιμοποιώντας αρκετούς ‘υπο-δέκτες’ που ονομάζονται δάκτυλα (fingers), δηλαδή αρκετούς συσχετιστές (correlators) στον κάθε ένα εκ των οποίων ανατίθεται και μια διαφορετική συνιστώσα πολυόδευσης. Με κατάλληλη εκτίμηση του καναλιού (δηλαδή εκτιμώντας το πλάτος και το χρόνο άφιξης κάθε συνιστώσας) τα δάκτυλα αποκωδικοποιούν ανεξάρτητα το κάθε ένα και από μια συνιστώσα πολυόδευσης, η οποία περιέχει την αρχική πληροφορία. Στη συνέχεια οι συνεισφορές από όλα τα δάκτυλα συνδυάζονται δημιουργικά προκειμένου να αξιοποιηθούν τα διαφορετικά χαρακτηριστικά μετάδοσης της κάθε διαδρομής. Η αξιοποίηση των συνεισφορών αυτών έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερου λόγου σήματος προς θόρυβο E_b/N_0 στο περιβάλλον πολυόδευσης συγκριτικά με ένα ‘καθαρό’ περιβάλλον διάδοσης. Το διάγραμμα βαθμίδων ενός τυπικού δέκτη RAKE απεικονίζεται στο Σχήμα 5-9.



Σχήμα 5-9. Τυπικό διάγραμμα δέκτη RAKE.

Στο Σχήμα 5-9 διακρίνεται ένας τυπικός δέκτης RAKE τεσσάρων δακτύλων, όπου $r(t)$ είναι το λαμβανόμενο σήμα. Εφόσον το $r(t)$ αποτελείται από διάφορες συνιστώσες πολυόδευσης, μπορεί να διαχωριστεί σε $r(t-\tau_i)$ ανεξάρτητες εκδόσεις, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με τους αντίστοιχους εκτιμητές καναλιού $g(t, \tau_i)$. Σε έναν τυπικό δέκτη WCDMA λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες διαδικασίες (με εξαίρεση την κωδικοποίηση διόρθωσης σφαλμάτων):

- Αποπερίπλεξη (descrambling): Τα ληφθέντα σήματα πολλαπλασιάζονται με τον κώδικα περίπλεξης καθώς και με καθυστερημένες στο χρόνο εκδόσεις του κώδικα περίπλεξης. Οι καθυστερήσεις καθορίζονται από έναν ανιχνευτή οδεύσεων πριν γίνει η αποπερίπλεξη. Κάθε καθυστέρηση αντιστοιχεί σε μια διαφορετική όδευση σήματος, που τελικά θα συνδυαστεί κατάλληλα στον δέκτη RAKE.
- Αποδιασπορά (despreading): Τα αποκωδικογραφημένα δεδομένα κάθε όδευσης αποδιασπείρονται με απλό πολλαπλασιασμό των δεδομένων αυτών με τον κώδικα διασποράς.
- Ολοκλήρωση και απόρριψη (integration and dump): Τα διπλωμένα δεδομένα ολοκληρώνονται σε διάστημα μιας περιόδου συμβόλου, προσφέροντας ένα μιγαδικό δείγμα στην έξοδο για κάθε QPSK σύμβολο.

- Η διαδικασία αυτή διεκπεραιώνεται για όλες τις οδεύσεις που τελικά θα συνδυαστούν στο δέκτη RAKE.
- Στη συνέχεια, τα ίδια σύμβολα που προέκυψαν από διαφορετικές οδεύσεις συνδυάζονται μαζί χρησιμοποιώντας τη σχετική πληροφορία για το κάθε κανάλι, κάνοντας χρήση μιας συνδυαστικής τεχνικής, όπως για παράδειγμα της τεχνικής του συνδυασμού του μέγιστου λόγου (maximum ratio combining - MRC).
 - Τέλος, οι συνδυασμένες έξοδοι στέλνονται σε ένα απλό κύκλωμα ανίχνευσης προκειμένου να εξαχθούν τα bits της πληροφορίας.

Ο στόχος της βαθμίδας εκτίμησης καναλιού είναι να εκτιμήσει τη φάση και το πλάτος $g(t, \tau_i)$ για κάθε μια από τις αναγνωρισθείσες οδεύσεις. Από τη στιγμή που αυτή η πληροφορία προσδιοριστεί, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον συνδυασμό κάθε οδεύσης του ληφθέντος σήματος.

Οι παραπάνω διαδικασίες μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά ως εξής, αρχής γενομένης από το σήμα που παράγει ο πομπός:

$$u(t) = \sum_{k=0}^{K-1} a_k \sum_{n=0}^{N-1} p_k(n) f(t - nT - kNT) \quad (5.5)$$

όπου $u(t)$ είναι το μεταδιδόμενο σήμα, a_k είναι το μιγαδικό μεταδιδόμενο σύμβολο, p_k είναι ο συνδυασμένος μιγαδικός κώδικας διασποράς και περίπλεξης, N είναι ο παράγοντας διασποράς, $f(t)$ είναι το φίλτρο μορφοποίησης παλμών (ρίζας υψωμένου συνημιτόνου με παράγοντα κλίσης 0.22) και T_c είναι η διάρκεια του chip.

Η Εξίσωση (5.6) δείχνει το ληφθέν σήμα $y(t)$ στο κινητό τηλέφωνο. Το κινητό τηλέφωνο μοντελοποιείται ως φίλτρο με μιγαδικές βαθμίδες c_j και καθυστερήσεις d_j , όπου $\{j=0..J-1\}$ για διαφορετικές J οδεύσεις, ενώ $n(t)$ είναι AWGN θόρυβος με πυκνότητα ισχύος (p.s.d) N_0 .

$$y(t) = \sum_{j=0}^{J-1} c_j u(t - d_j) + n(t) \quad (5.6)$$

Στην πλευρά του δέκτη, τα δεδομένα που λαμβάνονται περνούν πρώτα από προσαρμοσμένο φίλτρο, το οποίο ως γνωστόν αυξάνει το λόγο σήματος προς θόρυβο στο δέκτη. Η διαδικασία αυτή παρίσταται μαθηματικά ως εξής:

$$r(t) = \int f^*(\tau - t) y(\tau) d\tau \quad (5.7)$$

Ένας ερευνητής όδευσης εκτιμά την καθυστέρηση κάθε όδευσης (τ_i) στο σύνθετο ληφθέν σήμα $r(t)$. Κατόπιν το ληφθέν σήμα καθυστερείται κατά χρονικό διάστημα σύμφωνα με την εκτίμηση του ερευνητή όδευσης και πολλαπλασιάζεται με το συζυγή του κώδικα περίπλεξης και διασποράς που χρησιμοποιήθηκε κατά τη μετάδοση. Στη συνέχεια τα αποπεριπλεγμένα και συνεπτυγμένα δεδομένα αθροίζονται εντός διαστήματος χρόνου ίσου προς την περίοδο του συμβόλου, όπως φαίνεται στην Εξίσωση (5.8). Για παράδειγμα, εάν υπάρχουν τέσσερις ισχυρές οδεύσεις, τέσσερις διαφορετικές εκτιμήσεις του ίδιου συμβόλου θα δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (5.8).

$$x_k(t) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} p_k^*(m) r(t + mT - kNT) \quad (5.8)$$

Οι εκτιμήσεις που προέρχονται από την Εξίσωση (5.8) θα συνδυαστούν από το δέκτη RAKE με τις αντίστοιχες εκτιμήσεις του καναλιού, όπως φαίνεται στην Εξίσωση (5.9):

$$\hat{a} = \det \left\{ \sum_{j=0}^{J-1} \hat{c}_j^* x_k(\hat{d}_j) \right\} \quad (5.9)$$

όπου c_j είναι οι εκτιμήσεις του καναλιού d_j είναι οι εκτιμηθείσες καθυστερήσεις οδεύσεων, J είναι ο αριθμός των ισχυρών οδεύσεων, $det()$ είναι μια απλή συσκευή απόφασης και a είναι το εκτιμηθέν bit ή σύμβολο που παράγεται στην έξοδο του δέκτη RAKE.

5.4.3 Πιθανότητα σφάλματος σε συστήματα DS-SS

Αποδεικνύεται, ότι για ένα σήμα διασποράς φάσματος που χρησιμοποιεί διαμόρφωση BPSK που μεταδίδεται σε δίαυλο AWGN, η πιθανότητα σφάλματος, ή BER, δίδεται από τη σχέση:

$$P_b = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (5.10)$$

Σε περίπτωση που το σύστημα υφίσταται πλέον του AWGN θορύβου και παρεμβολή στενής ζώνης, τότε:

$$P_b = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0 + J_0}}\right) \quad (5.11)$$

όπου J_0 είναι η πυκνότητα ισχύος της παρεμβολής. Σε περίπτωση που η πυκνότητα ισχύος της παρεμβολής στενής ζώνης είναι πολύ μεγαλύτερη της φασματικής πυκνότητας του λευκού θορύβου, τότε $N_0 + J_0 \approx J_0$, και καθώς $E_b = P_S/R$ και $J_0 = P_J/W$, η σχέση (5.11) γίνεται:

$$P_b = Q\left(\sqrt{2\frac{W}{R}\frac{P_S}{P_J}}\right) \quad (5.12)$$

Ο λόγος W/R αποτελεί το κέρδος επεξεργασίας (gain processing) και εκφράζει την αύξηση του σηματοθορυβικού λόγου που επιτυγχάνεται με τη διασπορά του

φάσματος. Η μέγιστη τιμή του λόγου P_J/P_S για την οποία ο δέκτης λειτουργεί με πιθανότητα σφάλματος μικρότερη από μια καθορισμένη τιμή, ονομάζεται περιθώριο παρεμβολής (jamming margin). Το περιθώριο παρεμβολής μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με εφαρμογή κάποιας τεχνικής διόρθωσης σφαλμάτων FEC κατά ποσότητα ίση με το κέρδος επεξεργασίας G_p (coding gain), που ισούται με $G_p = R_c \cdot d_{\min}^H$, όπου R_c είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης και d_{\min}^H η ελάχιστη απόσταση Hamming του κώδικα. Σε αυτήν την περίπτωση:

$$\left(\frac{P_J}{P_S}\right)_{dB} = \left(\frac{W}{R}\right)_{dB} + (R_c \cdot d_{\max}^H)_{dB} - \left(\frac{E_b}{J_0}\right)_{dB}. \quad (5.13)$$

5.4.4 Πολλαπλή πρόσβαση στο DS-CDMA

Σε ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης στον κώδικα εκπέμπουν ταυτόχρονα N_u χρήστες έχοντας ο καθένας ισχύ P_S . Κάθε δέκτης λαμβάνει το σήμα του, ενώ ουσιαστικά παρεμβάλλεται από το άθροισμα της ισχύος των εκπομπών όλων των άλλων χρηστών. Τότε, ο λόγος ισχύος σήματος προς παρεμβολή στο δέκτη είναι:

$$\frac{P_S}{P_J} = \frac{P_S}{(N_u - 1) \cdot P_S} = \frac{1}{N_u - 1} \quad (5.14)$$

Έτσι, η πιθανότητα σφάλματος θα είναι:

$$P_b = Q\left(\sqrt{2 \frac{W}{R} \frac{1}{N_u - 1}}\right) \quad (5.15)$$

Αν κάθε χρήστης χρησιμοποιεί κώδικα FEC με ρυθμό κωδικοποίησης R_c και ελάχιστη απόσταση Hamming d_{\min}^H , τότε η πιθανότητα σφάλματος είναι άνω φραγμένη, δηλαδή:

$$P_b \leq (2^k - 1) \cdot Q \left(\sqrt{2 \frac{W}{R} \frac{G_p}{N_u - 1}} \right) \quad (5.16)$$

όπου G_p το κέρδος επεξεργασίας, ενώ έχει υποτεθεί ότι οι κώδικες διασποράς των χρηστών είναι μεταξύ τους ασυσχέτιστοι (ορθογωνικοί) και ότι παρουσιάζουν χαρακτηριστικά λευκού προσθετικού θορύβου που ακολουθεί την κανονική κατανομή.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι προκειμένου να υλοποιηθεί ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης με τεχνολογία διασποράς φάσματος, πρέπει να εφαρμοστεί κατάλληλη τεχνική ελέγχου της ισχύος εκπομπής (**power control**). Αυτό είναι εξαιρετικά αναγκαίο, γιατί ένα -αν όχι ίσως το σημαντικότερο- πρόβλημα που αντιμετωπίζει η ανοδική ζεύξη (UE προς Node-B), είναι ότι ο σταθμός βάσης λαμβάνει ισχυρά σήματα από κινητούς σταθμούς που ευρίσκονται κοντά σε αυτόν ή/και αντιμετωπίζουν ευνοϊκές συνθήκες διάδοσης, ενώ τα σήματα που λαμβάνει από κινητούς σταθμούς που ευρίσκονται σε μεγάλη απόσταση ή/και αντιμετωπίζουν δυσμενείς συνθήκες διάδοσης είναι ασθενή. Έτσι, για τις περιπτώσεις των κινητών σταθμών που ευρίσκονται μακριά από το σταθμό βάσης ή αντιμετωπίζουν δυσμενείς συνθήκες διάδοσης, ο λόγος σήματος προς παρεμβολή στην είσοδο του δέκτη του σταθμού βάσης είναι πολύ χαμηλός. Η κατάσταση αυτή αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως *near-far problem*. Με την υιοθέτηση όμως κατάλληλης τεχνική ελέγχου της ισχύος εκπομπής των κινητών σταθμών, διασφαλίζεται ότι τα σήματα από αυτούς φθάνουν στο σταθμό βάσης με την ίδια ισχύ. Ειδικότερα, όταν ο σταθμός βάσης διαπιστώνει πως ο λόγος σήματος προς παρεμβολή για μια συγκεκριμένη ανοδική ζεύξη είναι υψηλότερος ή χαμηλότερος από κάποια επιθυμητή τιμή, τότε αποστέλλει μήνυμα στο κινητό σταθμό να μειώσει ή να αυξήσει την ισχύ εκπομπής του, αντίστοιχα. Σημειώνεται, ότι αυτή η επιθυμητή τιμή μπορεί να διαφέρει για κάθε κινητό σταθμό, ανάλογα με τον τύπο της υπηρεσίας που εκείνη τη στιγμή προσφέρεται.

5.4.5 Έλεγχος ισχύος στο UMTS

Υπάρχουν τρεις τύποι ελέγχου ισχύος στο UMTS:

- Έλεγχος ισχύος ανοικτού βρόχου (**open loop power control**)
- Έλεγχος ισχύος εσωτερικού βρόχου (**inner loop power control**)
- Έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόχου (**outer loop power control**)

Ο έλεγχος ισχύος ανοικτού βρόχου είναι η ικανότητα του UE να καθορίζει την ισχύ εξόδου του πομπού. Χρησιμοποιείται για να καθορίσει την αρχική ισχύ ανοδικής και καθοδικής ζεύξης, όταν το UE ζητά πρόσβαση στο δίκτυο. Ο έλεγχος ισχύος ανοικτού βρόχου έχει ανοχή $\pm 9\text{dB}$ (κανονικές συνθήκες) ή $\pm 12\text{dB}$ (ακραίες συνθήκες).

Ο έλεγχος ισχύος εσωτερικού βρόχου στην ανοδική ζεύξη εκφράζει τη δυνατότητα του UE να ρυθμίσει την ισχύ εξόδου του πομπού του σύμφωνα με μία ή περισσότερες Transmit Power Command (TPC) εντολές που λαμβάνει κατά την καθοδική ζεύξη, προκειμένου να διατηρήσει το λαμβανόμενο στην ανοδική ζεύξη λόγο σήματος προς παρεμβολή (signal-to-interference ratio - SIR) εντός δεδομένων ορίων. Ο πομπός του UE είναι σε θέση να αλλάζει την ισχύ εξόδου του σε βήματα των 1, 2 και 3 dB, αμέσως μετά αφότου παραχθεί μια εντολή TPC. Η συχνότητα του ελέγχου ισχύος εσωτερικού βρόχου είναι 1500 Hz. Οι εξυπηρετούσες κυψέλες εκτιμούν το λόγο SIR του λαμβανόμενου ανοδικού καναλιού DPCH, δημιουργούν εντολές TPC και τις μεταδίδουν μια φορά ανά θυρίδα σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα: εάν $SIR_{\text{est}} > SIR_{\text{target}}$ τότε η εντολή TPC που μεταδίδεται είναι "0", ενώ εάν $SIR_{\text{est}} < SIR_{\text{target}}$ τότε η εντολή TPC που μεταδίδεται είναι "1". Με την λήψη ενός ή περισσότερων TPC εντολών σε μια θυρίδα, το UE παράγει μια μόνο εντολή TPC για κάθε θυρίδα, συνδυάζοντας πολλαπλές εντολές TPC εάν περισσότερες από μία λαμβάνονται σε μια θυρίδα. Δύο είναι οι αλγόριθμοι που υποστηρίζονται από το UE για την παραγωγή μιας εντολής TPC, η δε επιλογή του ενός ή του άλλου καθορίζεται από το UE.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο 1, το βήμα ελέγχου της ισχύος είναι η αλλαγή στην ισχύ εξόδου του UE σε ανταπόκριση μιας μόνο εντολής TPC. Στον αλγόριθμο 2, εάν πέντε διαδοχικές εντολές TPC είναι “0”, τότε η ισχύς εκπομπής ελαττώνεται κατά 1 dB, ενώ αν και οι πέντε είναι “1”, τότε η ισχύς εκπομπής αυξάνεται κατά 1 dB. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η ισχύς εκπομπής δεν μεταβάλλεται.

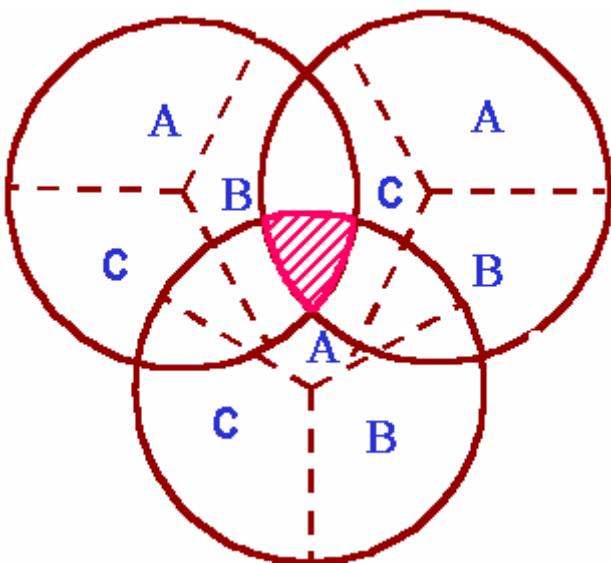
Η μεταδιδόμενη ισχύς των καθοδικών καναλιών καθορίζεται από το δίκτυο. Το βήμα ελέγχου της ισχύος δύναται να λάβει τις ακόλουθες τέσσερις τιμές: 0.5, 1, 1.5 ή 2 dB. Για το UTRAN είναι υποχρεωτικό να υποστηρίζει βήμα του 1 dB, ενώ για τα άλλα η υποστήριξη είναι προαιρετική. Το UE παράγει TPC εντολές για να ελέγξει την ισχύ εκπομπής του δικτύου και τις αποστέλλει στο πεδίο TPC του καναλιού DPCCCH. Με τη λήψη των TPC εντολών το UTRAN ρυθμίζει την ισχύ των καναλιών DPCCCH/DPDCH ανάλογα.

Ο έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόχου χρησιμοποιείται για να διατηρήσει την ποιότητα επικοινωνίας στο κατάλληλο επίπεδο που απαιτείται για την παροχή υπηρεσιών, χρησιμοποιώντας την ελάχιστη δυνατή ισχύ. Ο ανοδικός έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόχου είναι υπεύθυνος για τη θέσπιση ενός λόγου SIR-στόχου στον Node-B για κάθε περίπτωση ανοδικού ελέγχου ισχύος εσωτερικού βρόχου. Ο λόγος SIR επικαιροποιείται για κάθε UE σύμφωνα με την εκτιμώμενη ποιότητα της ανοδικής ζεύξης (block error ratio - BLER, bit error ratio) για κάθε RNC σύνδεση. Ο καθοδικός έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόχου εκφράζει την ικανότητα του δέκτη UE να συγκλίνει προς την απαιτούμενη ποιότητα ζεύξης (BLER) που θεσπίζεται από το δίκτυο (RNC) στην καθοδική ζεύξη.

5.4.6 Είδη μεταπομπής στο UMTS

Η μεταπομπή λαμβάνει χώρα όταν μια κλήση πρέπει να διαβιβαστεί από μια κυψέλη σε μια άλλη, καθώς ο χρήστης μετακινείται μεταξύ των κυψελών. Στα πλαίσια της κλασικής μεταπομπής (**hard handover**) του GSM, η σύνδεση του

χρήστη με την κυψέλη διακόπτεται, και στη συνέχεια πραγματοποιείται σύνδεση με τη νέα κυψέλη. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως “brake-before-make” handover. Στο UMTS όμως που χρησιμοποιεί CDMA, είναι δυνατόν όλες οι κυψέλες να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα, και είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί η σύνδεση στη νέα κυψέλη πριν εγκαταλειφθεί η τρέχουσα κυψέλη εξυπηρέτησης. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως “make-before-make” handover ή ήπια μεταπομπή (**soft handover**). Στο Σχήμα 5-10 απεικονίζεται μια περίπτωση σεναρίου ήπιας μεταγωγής, όπου ο κινητός σταθμός ο οποίος ευρίσκεται στη γραμμοσκιασμένη περιοχή δύναται να είναι συνδεδεμένος ακόμα και με τους τρεις σταθμούς βάσης



Σχήμα 5-10. Γεωμετρία για την επίδειξη της ήπιας μεταγωγής.

Οι ήπιες μεταγωγές απαιτούν λιγότερη ισχύ, με αποτέλεσμα την ελάττωση της στάθμης παρεμβολής και την συνεπακόλουθη αύξηση χωρητικότητας. Επίσης, στα πλαίσια της ήπιας μεταγωγής είναι δυνατόν ένας κινητός σταθμός να συνδέεται ταυτόχρονα με περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης. Μια ειδική περίπτωση της ήπιας μεταγωγής στο UMTS είναι η ηπιότερη μεταγωγή (**softer handover**), η οποία θα εξεταστεί παρακάτω.

Στο UMTS διακρίνονται τα ακόλουθα είδη μεταπομπής:

- **Ολοκληρωτική Μεταπομπή (Hard Handover):** Σε αυτό το είδος μεταπομπής καταργούνται όλες οι υφιστάμενες ραδιοζεύξεις του UE και υλοποιούνται νέες. Το hard handover μπορεί να είναι μη αντιληπτό ή αντιληπτό στο χρήστη. Κάθε μεταπομπή για την οποία διενεργείται αλλαγή συχνότητας φορέα χαρακτηρίζεται σκληρή μεταπομπή.
- **Ήπια μεταπομπή (Soft handover):** Στην ήπια μεταπομπή οι ραδιοζεύξεις εγκαθίστανται και τερματίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε το UE να διατηρεί τουλάχιστον μια ραδιοζεύξη προς το UTRAN. Η ήπια μεταπομπή πραγματοποιείται μέσω κάποιας κατάλληλης τεχνικής διαφορισμού, η οποία προϋποθέτει την ύπαρξη διάφορων ενεργών ζεύξεων την ίδια χρονική στιγμή. Συνήθως, η ήπια μεταπομπή χρησιμοποιείται όταν ο κινητός σταθμός μετακινείται σε άλλη κυψέλη διατηρώντας όμως τη συχνότητά του.
- **Ηπιότερη Μεταπομπή (Softer Handover):** Η ηπιότερη μεταπομπή είναι ειδική περίπτωση της ήπιας μεταπομπής, όπου οι ραδιοζεύξεις που εγκαθίστανται ή τερματίζονται ανήκουν στον ίδιο Node-B (δηλαδή η θέση συνεγκατεστημένων σταθμών βάσης από την οποία διάφοροι τομείς της κυψέλης εξυπηρετούνται). Στην περίπτωση της ηπιότερης μεταπομπής, συνήθως στο Node-B υλοποιείται διαφορική λήψη χώρου με συνδυαστική μεγίστου λόγου (**Maximal Ratio Combining - MRC**), ενώ γενικά στην ήπια μεταπομπή της καθοδικής ζεύξης εφαρμόζεται διαφορική λήψη χώρου με επιλεκτική συνδυαστική (**Selection Combining - SC**).

Γενικά, μπορούμε να διακρίνουμε τις μεταπομπές σε μεταπομπές μεταξύ διαφορετικών κυψελών και σε μεταπομπές που λαμβάνουν χώρα στην ίδια την κυψέλη. Για το UMTS ορίζονται οι ακόλουθοι τύποι μεταπομπών:

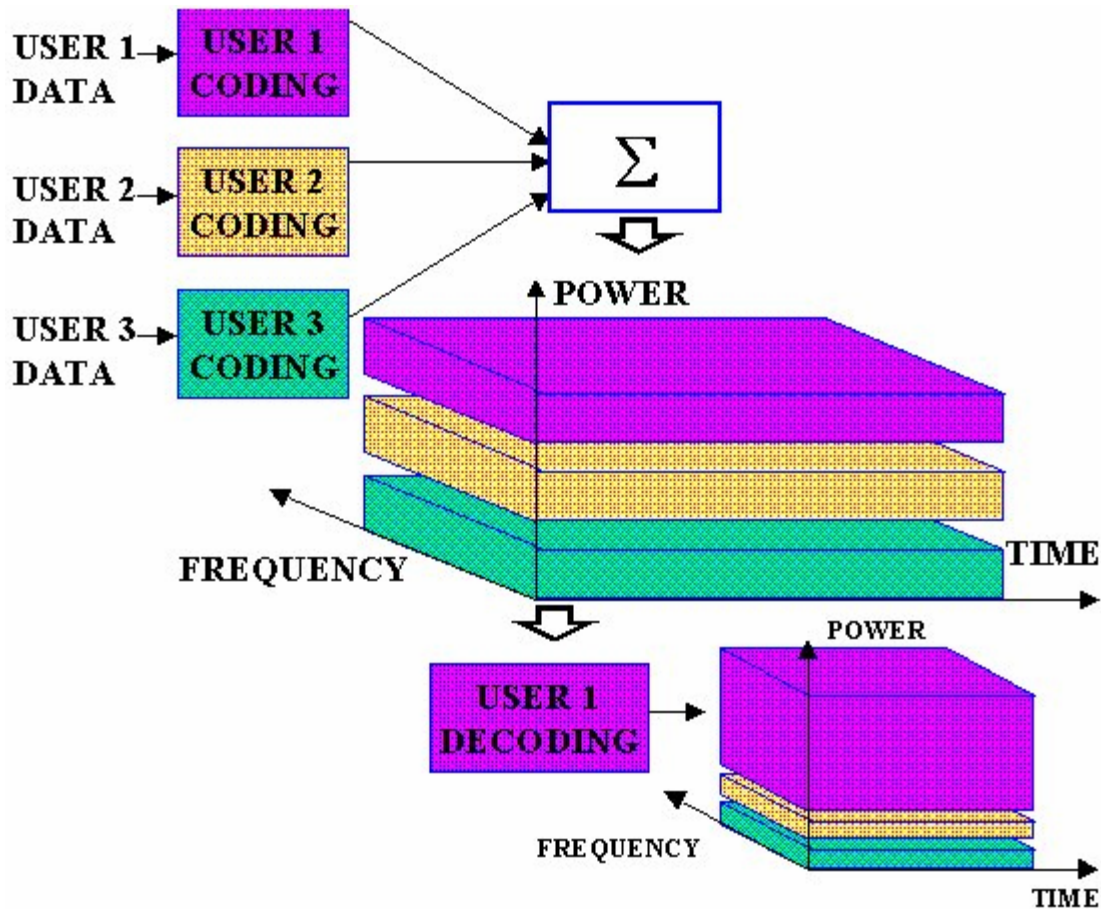
- Μεταπομπή 3G -3G (π.χ. μεταξύ UMTS και άλλων συστημάτων 3G)
- FDD ήπια/ηπιότερη μεταπομπή
- FDD δια-συχνοτική ολοκληρωτική μεταπομπή
- FDD/TDD μεταπομπή (αλλαγή κυψέλης)

- TDD/FDD μεταπομπή (αλλαγή κυψέλης)
- TDD/TDD μεταπομπή
- Μεταπομπή 3G - 2G (π.χ. μεταπομπή προς το GSM)
- Μεταπομπή 2G - 3G (π.χ. μεταπομπή από το GSM)

Ο πλέον προφανής λόγος για την πραγματοποίηση μιας μεταπομπής είναι ότι λόγω της μετακίνησης του ένας χρήστης μπορεί να εξυπηρετηθεί πιο αποδοτικά (λιγότερη ισχύς εκπομπής, χαμηλότερο επίπεδο παρεμβολής) από κάποια άλλη κυψέλη. Δύναται, όμως να πραγματοποιηθεί και για άλλους λόγους, όπως για παράδειγμα για λόγους ελέγχου του φορτίου του συστήματος.

5.5 Διασπορά φάσματος και εφαρμογή σε πρωτόκολλο CDMA

Το CDMA χρησιμοποιεί μοναδικούς κώδικες διασποράς για να αναπτύξει (απλώσει) τα δεδομένα βασικής ζώνης κάθε χρήστη πριν τη μετάδοση. Στη συνέχεια, η κυματομορφή κάθε χρήστη διαμορφώνεται και αφού αθροιστούν όλες οι κυματομορφές των εξυπηρετούμενων χρηστών το σύνθετο σήμα που ευρίσκεται κάτω από το επίπεδο του θορύβου μεταδίδεται στο κανάλι. Ο δέκτης χρησιμοποιεί έναν συσχετιστή για να αποδιασπείρει (διπλώσει) το επιθυμητό σήμα, το οποίο διαβιβάζεται σε ένα ζωνοπερατό φίλτρο. Τα μη επιθυμητά σήματα δεν αποδιασπείρονται και δεν περνούν από το φίλτρο, έτσι ώστε κάθε χρήστης να λαμβάνει μόνον την δική του κυματομορφή, και συνεπώς τα δικά του δεδομένα. Η διαδικασία πολλαπλής πρόσβασης στον κώδικα που χρησιμοποιείται στο UMTS απεικονίζεται στο Σχήμα 5-11.



Σχήμα 5-11. Τεχνική πολλαπλής πρόσβασης στον κώδικα CDMA.

Ειδικά για το UTRA ο παράγοντας διασποράς κυμαίνεται από 4 έως 512. Όσο μικρότερος είναι, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας που μπορεί να υποστηριχθεί από τη ραδιοεπαφή.

Ας δούμε τώρα ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης κώδικα διασποράς σε πρωτόκολλο CDMA και πως γίνεται η ανάκτηση της πληροφορίας στον δέκτη συσχέτισης. Έστω λοιπόν ότι έχουμε δύο χρήστες με συρμούς προς μετάδοση πληροφορίας $d_{1t}[10110]$ και $d_{2t}[11001]$. Οι χρησιμοποιούμενοι ασυσχέτιστοι (ορθογωνικοί) κωδικοί διασποράς είναι $s_{c1}[1100]$ και $s_{c2}[1001]$, αντίστοιχα, ενώ ο παράγοντας διασποράς είναι 4 (δηλαδή $T_b/T_{sc}=4$ ή ισοδύναμα, 4 bit του κώδικα διασποράς αντιστοιχούν σε 1 bit πληροφορίας). Για κάθε λογικό '1' αντιστοιχούμε μια τάση +1V, ενώ για κάθε λογικό '0' μια τάση -1V, οπότε $d_{1t}[1-$

111-1], $d_{2t}[11-1-11]$, $sc_1[11-1-1]$ και $sc_2[1-1-11]$. Το αποτέλεσμα της διασποράς του συρμού πληροφορίας d_1 είναι $S1[-1-11111-1-1-1-111-1-11111-1-1]$ και του d_2 είναι $S2[-111-1-111-11-1-111-1-11-111-1]$. Στη συνέχεια οι δύο διεσπαρμένες ακολουθίες προστίθενται για να μεταδοθεί τελικά η σύνθετη ακολουθία $S1+S2$.

d1t				1				-1					1				1			-1
sc1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
S1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1
d2t				1				1				-1			-1					1
sc2	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
S2	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1
S1+S2	-2	0	2	0	0	2	0	-2	0	-2	0	2	0	-2	0	2	0	2	0	-2
sc1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1
DS1	2	0	2	0	0	-2	0	-2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	-2	0	-2
d1r				4				-4				4			4				4	-4
sc2	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1
DS2	2	0	2	0	0	2	0	2	0	-2	0	-2	0	-2	0	-2	0	2	0	2
d2r				4				4				-4			-4				4	4

Πίνακας 5-2. Διαδικασία διασποράς, υπέρθεσης και αποδιασποράς σε σύστημα CDMA με δύο χρήστες.

Και οι δύο χρήστες λαμβάνουν την σύνθετη κυματομορφή $S1+S2$, αλλά ο κάθε δέκτης συντελεί τη δική του διαδικασία αποδιασποράς πολλαπλασιάζοντας την $S1+S2$ με ακριβές αντίγραφο του αρχικού κώδικα διασποράς. Έτσι ο πολλαπλασιασμός της $S1+S2$ με τον κώδικα sc_1 στο δέκτη 1 παράγει την ακολουθία $DS1[20200-20-2020202020-20-2]$, ενώ ο πολλαπλασιασμός της $S1+S2$ με τον κώδικα sc_2 στο δέκτη 2 παράγει την ακολουθία $DS2[202002020-20-20-20-$

20202]. Ολοκληρώνοντας³ τις DS1 και DS2 για χρονική περίοδο T_b ίση με τη διάρκεια του συμβόλου της πληροφορίας, προκύπτουν τελικά οι ακολουθίες δεδομένων $d_{1r}[4-444-4]$ και $d_{2r}[44-4-44]$, οι οποίες αντιστοιχούν ακριβώς στα σύμβολα που απέστειλε ο πομπός.

Σε συστήματα CDMA είναι δυνατό να προσεγγιστεί το πλήθος των χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει μια κυψέλη εάν ισχύουν οι κάτωθι παραδοχές:

- Η ισχύς που λαμβάνουν οι χρήστες είναι η ίδια.
- Η παρεμβολή (δηλαδή τα σήματα των $N-1$ χρηστών) έχει χαρακτηριστικά AWGN.
- Η σχέση που συνδέει το BER με το λόγο E_b/N_0 είναι γνωστή.

Τότε, ο θεωρητικός αριθμός των χρηστών δίδεται από τη σχέση:

$$N \approx \frac{G_p}{E_b/N_0} \quad (5.17)$$

Λαμβάνοντας περαιτέρω υπόψη μια σειρά από πρακτικά ζητήματα, ο αριθμός χρηστών προσεγγίζεται ρεαλιστικά από την σχέση:

$$N \approx \frac{G_p}{E_b/N_0} \cdot \frac{1}{1+\beta} \cdot \alpha \cdot \frac{1}{\nu} \cdot \lambda \quad (5.18)$$

όπου β είναι ένας παράγοντας υποβάθμισης που εκφράζει τη μείωση στον αριθμό των χρηστών λόγω παρεμβολής από γειτονικές κυψέλες και κυμαίνεται μεταξύ 0.4 και 0.55, α είναι ένας παράγοντας επιδείνωσης λόγω ελλιπούς ελέγχου ισχύος κυμαινόμενος μεταξύ 0.5 ως 0.9. Ο παράγοντας κέρδους ν λαμβάνει υπόψη την ασυνεχή εκπομπή σε φωνητικές κλήσεις και λαμβάνει τιμές εμπειρικά προσδιορισμένες από 0.45 ως 1, ενώ τέλος η χρήση κατευθυντικών

³ Για το παράδειγμά μας η πράξη της ολοκλήρωσης για χρονικό διάστημα ίσο με T_b είναι ισοδύναμη με την αλγεβρική πρόσθεση των σταθμών τάσης που αντιστοιχούν στα 4 σύμβολα της διεσπαρμένης ακολουθίας.

κεραιών στο σταθμό βάσης εξασφαλίζει ένα κέρδος ως προς τις παρεμβολές που συμβολίζεται με λ , το οποίο συνήθως κυμαίνεται τυπικά από 1.5 ως 3.5. Τυπικές μέσες τιμές για τις παραμέτρους αυτές σε πρακτικά υλοποιημένες UMTS κυψέλες είναι: $\beta=0.5$, $\alpha=0.85$, $\nu=0.6$ και $\lambda=2.55$. Ο πραγματικός αριθμός χρηστών είναι μεγαλύτερος από το θεωρητικό κατά περίπου 2.4 φορές.

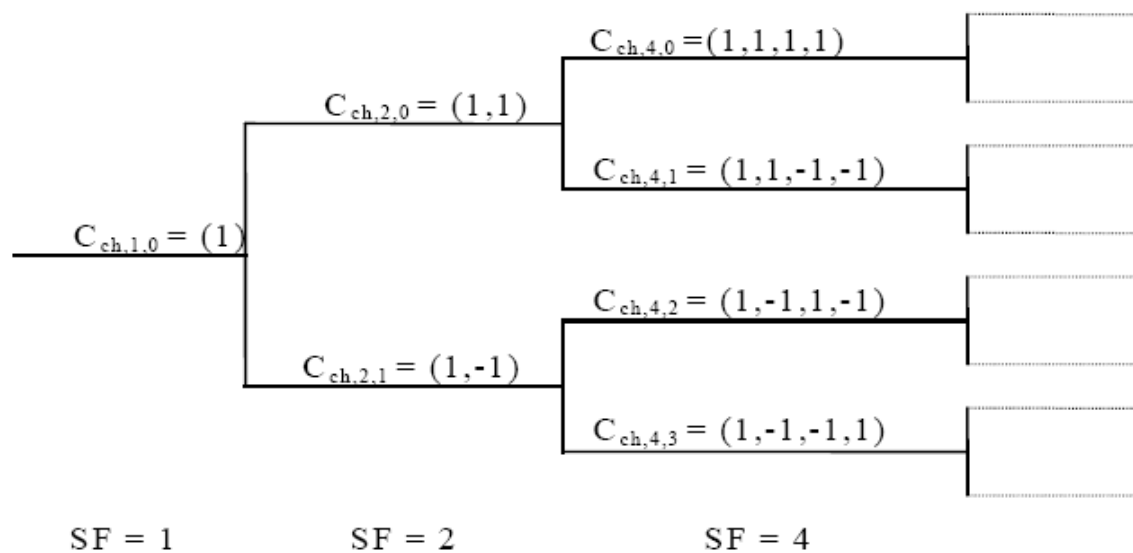
5.6 Κώδικες που χρησιμοποιούνται στο WCDMA του UMTS

Οι κώδικες διασποράς που χρησιμοποιούνται στο Wideband CDMA (WCDMA) είναι μοναδικοί, τουλάχιστον σε επίπεδο κυψέλης. Ενώ στο GSM ο διαχωρισμός μεταξύ δεδομένων και σηματοδοσίας αλλά και ο διαχωρισμός των χρηστών γίνεται με απόδοση διαφορετικών χρονοθυρίδων ή διαφορετικών συχνοτήτων, στο FDD WCDMA ο διαχωρισμός των μεταδόσεων από μια πηγή γίνεται με απόδοση διαφορετικών κωδίκων που λέγονται κώδικες διαυλοποίησης (channelization codes).

5.6.1 Κώδικες διαυλοποίησης στο UMTS

Οι κώδικες διαυλοποίησης είναι μεταβλητού μήκους και χρησιμοποιούνται για τη διασπορά φάσματος. Είναι δε ορθογωνικοί και επομένως η μηδενική ετεροσυσχέτισή τους εξασφαλίζει ότι όταν λειτουργούν σε ιδανικό περιβάλλον δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Επιπλέον αποτελούνται από άρτιο αριθμό chips. Όταν αποδοθεί κάποιος κώδικας σε μια σύνδεση, τότε αυτός προορίζεται για αποκλειστική χρήση στα πλαίσια αυτής και μόνον της σύνδεσης, χωρίς όμως αυτό να αποκλείει τη δυνατότητα μεταβολής του ρυθμού μετάδοσης αλλάζοντας τον παράγοντα διασποράς.

Στο FDD έχουμε 512 κώδικες στην καθοδική ζεύξη (downlink - DL) και 256 στην ανοδική (uplink - UL), ενώ στο TDD έχουμε 16 κώδικες τόσο για το DL όσο και το UL. Το μήκος κώδικα καθορίζεται ανάλογα με τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης, οπότε αφού επιλεγεί πρώτα ο παράγοντας διασποράς, για τον οποίο ισχύει $SF=2^k$, $k=0,\dots,8$, επιλέγεται και ο κατάλληλος κώδικας διαυλοποίησης. Υπενθυμίζεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης τόσο μικρότερο είναι το μήκος του κώδικα διασποράς και συνεπώς του κώδικα διαυλοποίησης. Επειδή οι κώδικες αυτοί έχουν μήκος και συμπεριφορά διασποράς που καθορίζεται από τον παράγοντα διασποράς, καλούνται Ορθογωνικοί Μεταβλητού Παράγοντα Διασποράς Κώδικες (**Orthogonal Variable Spreading Factor Codes - OVSF**). Οι OVSF κώδικες μεταβλητού μήκους παράγονται με απλή λογική και με τη βοήθεια της δενδρικής δομής, όπως εικονίζεται στο Σχήμα 5-12.



Σχήμα 5-12. Δενδρική δομή για την παραγωγή κωδίκων OVSF.

Οι κώδικες περιγράφονται μοναδικά ως $C_{ch,SF,k}$, όπου SF είναι ο παράγοντας διασποράς του κώδικα και k είναι ο αριθμός του κώδικα, με $0 \leq k \leq SF-1$. Κάθε επίπεδο στο δένδρο ορίζει κώδικες διαυλοποίησης που αντιστοιχούν στον παράγοντα διασποράς που σημειώνεται στο Σχήμα 5-12. Η μέθοδος παραγωγής του κώδικα διαυλοποίησης ορίζεται από τη σχέση:

$$c_{ch,1,0} = 1$$

$$\begin{bmatrix} c_{ch,2,0} \\ c_{ch,2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{ch,0,1} & c_{ch,0,1} \\ c_{ch,0,1} & -c_{ch,0,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Αν ένας από τους κώδικες OVFSF αποδοθεί σε μια σύνδεση τότε όλοι οι κώδικες που ακολουθούν αλλά και αυτοί που προηγούνται δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να εξακολουθήσει να ισχύει η αρχή της ορθογωνικότητας. Ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας στο UL και DL συναρτήσει του SF μπορεί να προσδιοριστεί από τη γενική σχέση:

$$C[bps] = Symbol_Rate[baud] \cdot \frac{bits}{symbol} = \frac{Chip_Rate[cps]}{SF} \quad (5.20)$$

Έτσι για παράδειγμα στο UMTS όπου chip rate=3.84Mcps και SF=128, έχουμε ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας 30kbps και 60kbps στο UL και DL, αντίστοιχα, καθότι στην ανοδική ζεύξη κωδικοποιείται 1bit/symbol, ενώ στην καθοδική 2bits/symbol.

5.6.2 Κώδικες περίπλεξης στο UMTS

Προκειμένου να αναγνωριστεί το Node-B στο DL και το UE στο UL, εισάγεται ένας επιπλέον κώδικας ο οποίος καλείται κώδικας περίπλεξης (scrambling code), ο οποίος πολλαπλασιάζει το διεσπαρμένο σήμα. Με την εφαρμογή αυτού του κώδικα δεν προκαλείται επιπλέον διασπορά του σήματος, απλά χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό των πομπών. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της χρήσης του κώδικα περίπλεξης είναι ότι η διαχείριση του δένδρου των κωδικών σε κάθε πομπό συντελείται πλέον ανεξάρτητα. Ένας ακόμα λόγος για τη χρήση του κώδικα περίπλεξης είναι ότι η πλήρης ορθογωνικότητα είναι εφικτή μόνον όταν πομπός και δέκτης είναι απόλυτα συγχρονισμένοι. Επομένως ο κώδικας διαυλοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρωτόκολλο FDD για να διαχωριστούν διαφορετικοί χρήστες στην καθοδική ζεύξη σε μια κυψέλη, όχι

όμως και στην ανοδική, όπου η μεταβλητή καθυστέρηση από κάθε UE στο Node-B έχει άμεση συνέπεια στην ορθογωνικότητα των μεταδόσεων. Στην περίπτωση βέβαια πρωτοκόλλου TDD που χρησιμοποιείται συγχρονισμός στο UL, είναι εφικτός ο διαχωρισμός μεταξύ χρηστών στο UL. Ο σημαντικότερος όμως λόγος για τη χρήση του κώδικα περίπλεξης είναι ο αντικειμενικά περιορισμένος αριθμός κωδικών OVSF, που μας υποχρεώνει να τους επαναχρησιμοποιούμε σε κάθε κυψέλη. Επομένως, δεν είναι εφικτό να διαχωρίσουμε δύο Node-B μόνον από τον OVSF κώδικα, ενώ είναι πιθανό για ένα UE που ευρίσκεται στα άκρα της περιοχής κάλυψης ενός Node-B να λαμβάνει σήμα και από τον γειτονικό του Node-B με τον ίδιο OVSF κώδικα που αντιστοιχεί όμως σε άλλο χρήστη.

Όλοι οι κώδικες περίπλεξης είναι ψευδοτυχαίες ακολουθίες. Το μήκος τους είναι $2^{18}-1=262,143$ στο DL και $2^{24}-1=16,777,215$ στο UL και αντιστοιχεί στο πλήθος των διάφορων διαθέσιμων κωδικών. Από αυτούς τους κώδικες επιλέγονται τμήματα των 10ms. Το διάστημα αυτό αντιστοιχεί σε μήκος κώδικα με 38,400 chips ανά πλαίσιο. Η εφαρμογή των κωδικών στο UL φαίνεται στο Σχήμα 5-13.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο UL οι κώδικες διαυλοποίησης διαχωρίζουν τη σηματοδότηση από τα δεδομένα, ενώ στην περίπτωση του DL που εικονίζεται στο Σχήμα 5-16 οι κώδικες διαυλοποίησης χρησιμοποιούνται για να διαχωρίσουν τις εκπομπές προς διαφορετικούς χρήστες (UE).

5.6.3 Συντομογραφίες όρων που αφορούν στην κωδικοποίηση και διαμόρφωση του DL και UL του UMTS

Στην Ενότητα αυτή παραθέτονται οι σχετικές συντομογραφίες των προτυποποιημένων τεχνικών όρων που αναφέρονται στην ανάλυση των τεχνικών και μεθόδων κωδικοποίησης και διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται από το UMTS.

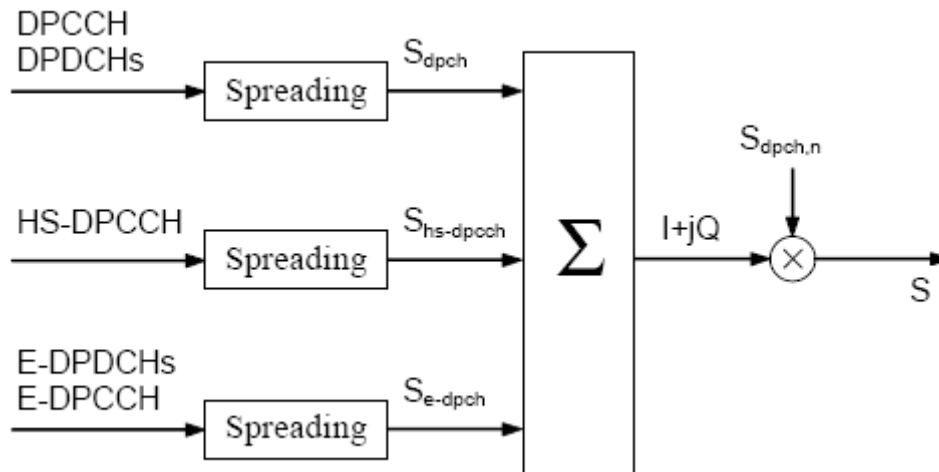
16QAM	16 Quadrature Amplitude Modulation
64QAM	64 Quadrature Amplitude Modulation
AICH	Acquisition Indicator Channel
BCH	Broadcast Control Channel
CCPCH	Common Control Physical Channel
CPICH	Common Pilot Channel
DCH	Dedicated Channel
DPCH	Dedicated Physical Channel
DPCCH	Dedicated Physical Control Channel
DPDCH	Dedicated Physical Data Channel
E-AGCH E-DCH	Absolute Grant Channel
E-DPCCH E-DCH	Dedicated Physical Control Channel
E-DPDCH E-DCH	Dedicated Physical Data Channel
E-HICH E-DCH	Hybrid ARQ Indicator Channel
E-RGCH E-DCH	Relative Grant Channel
FDD	Frequency Division Duplex
F-DPCH	Fractional Dedicated Physical Channel
HS-DPCCH	Dedicated Physical Control Channel (uplink) for HS-DSCH
HS-DSCH	High Speed Downlink Shared Channel
HS-PDSCH	High Speed Physical Downlink Shared Channel
HS-SCCH	Shared Control Physical Channel for HS-DSCH
MBSFN	MBMS over a Single Frequency Network
Mcps	Mega Chip Per Second
MICH	MBMS Indication Channel
OVSF	Orthogonal Variable Spreading Factor (codes)
PICH	Page Indication Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PSC	Primary Synchronisation Code
RACH	Random Access Channel
SCH	Synchronisation Channel
SSC	Secondary Synchronisation Code
SF	Spreading Factor
UE	User Equipment

Πίνακας 5-3. Συντομογραφίες προτυποποιημένων τεχνικών όρων του UMTS αναφερόμενων στην κωδικοποίηση και διαμόρφωση που εφαρμόζονται στο φυσικό στρώμα.

5.6.4 Κωδικοποίηση και διαμόρφωση στην ανοδική ζεύξη (UL) του UMTS

Στην ανοδική ζεύξη εφαρμόζεται διαδικασία διασποράς, η οποία περιλαμβάνει δύο λειτουργίες. Η πρώτη είναι η λειτουργία διαυλοποίησης και εδώ εφαρμόζεται διασπορά διαυλοποίησης κατά την οποία κάθε σύμβολο δεδομένων μετασχηματίζεται σε πλήθος chips, με αποτέλεσμα την αύξηση του εύρους ζώνης του σήματος. Ο αριθμός των chips ανά σύμβολο πληροφορίας δεν είναι άλλος από τον παράγοντα διασποράς SF. Η δεύτερη είναι η λειτουργία της περίπλεξης κατά την οποία ένας κώδικας περίπλεξης εφαρμόζεται στο ήδη διεσπαρμένο σήμα. Στη λειτουργία της διαυλοποίησης οι I και Q κλάδοι των συμβόλων της πληροφορίας πολλαπλασιάζονται με έναν OVSF κώδικα. Στη λειτουργία της περίπλεξης τα σήματα που παράγονται στους κλάδους I και Q πολλαπλασιάζονται επίσης με έναν μιγαδικό κώδικα περίπλεξης, όπου φυσικά I και Q δηλώνουν πραγματικά και φανταστικά μέρη, αντίστοιχα.

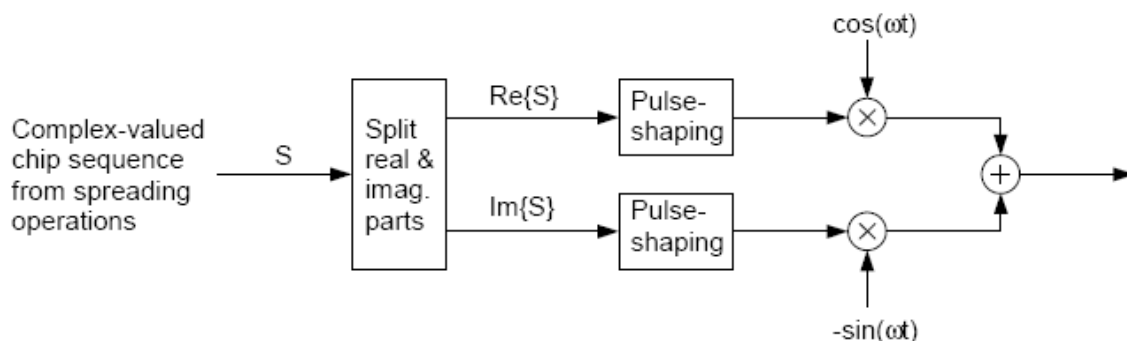
Στο Σχήμα 5-13 απεικονίζεται τη διαδικασία διασποράς για τα αφιερωμένα φυσικά κανάλια που χρησιμοποιούνται στην ανοδική ζεύξη. Η διαδικασία διασποράς περιλαμβάνει μια βαθμίδα διασποράς, μια βαθμίδα ανάθεσης βαρών και μια βαθμίδα χαρτογράφησης I και Q σημάτων. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις τεχνικές διασποράς που εφαρμόζεται σε κάθε είδος καναλιού, δηλαδή DPCCH, DPDCHs, HS-DPCCH, E-DPDCHs, E-DPCCHs, δίδονται στο Τεχνικό Πρότυπο του ETSI TS 125.213.



Σχήμα 5-13. Εφαρμογή κωδίκων στην ανοδική ζεύξη (UL) του UMTS.

Κατά τη διαδικασία, οι συρμοί του πραγματικού μέρους των chips των κλάδων I και Q προστίθενται, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός μιγαδικού συρμού chips για κάθε ομάδα καναλιών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-13, οι παραγόμενοι μιγαδικοί συρμοί S_{dpch} , $S_{hs-dpcch}$ και S_{e-dpch} αθροίζονται για να αποτελέσουν έναν ενιαίο μιγαδικό συρμό, ο οποίος στη συνέχεια περιπλέκεται από τον μιγαδικό κώδικα περίπλεξης $S_{dpch,n}$. Ο κώδικας περίπλεξης εφαρμόζεται ευθυγραμμισμένος με τα ραδιοπλαίσια, δηλαδή το πρώτο περιπλεγμένο chip αντιστοιχεί στην αρχή ενός ραδιοπλαισίου.

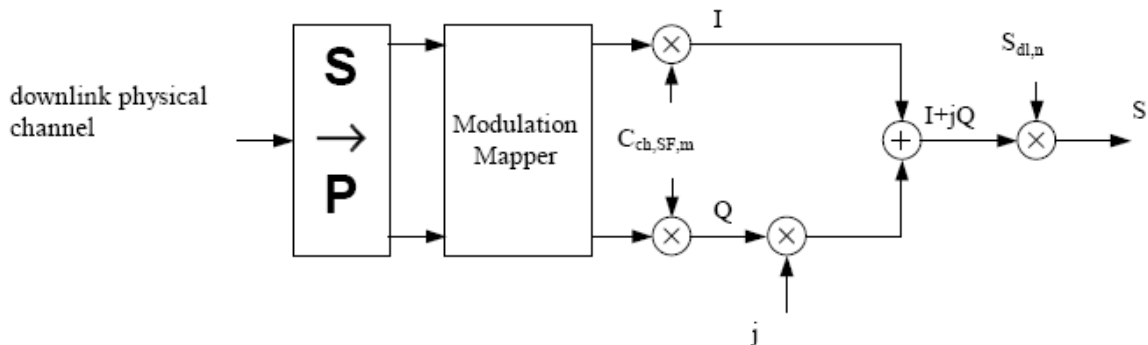
Η διαμόρφωση του μιγαδικού διεσπαρμένου συρμού chip που δημιουργείται από τη διαδικασία διασποράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-14. Ο ρυθμός διαμόρφωσης chip είναι 3.84Mcps.



Σχήμα 5-14. Διαμόρφωση στην ανοδική ζεύξη του UMTS.

5.6.5 Κωδικοποίηση και διαμόρφωση στην καθοδική ζεύξη (DL) του UMTS

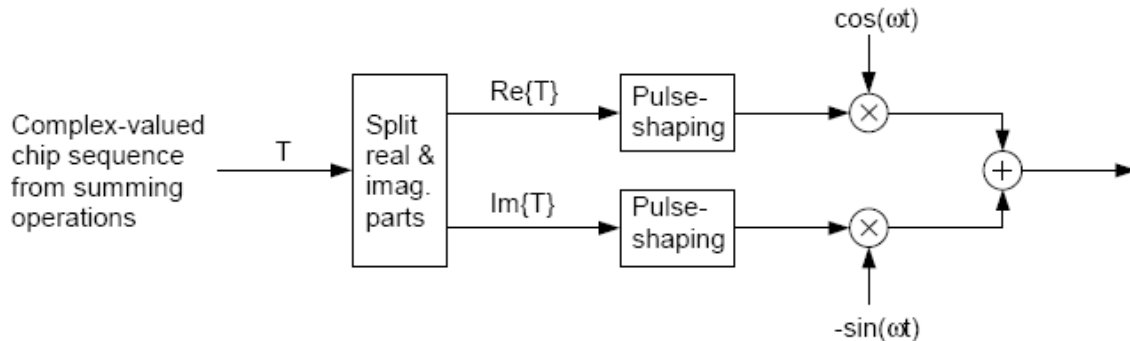
Στο Σχήμα 5-15 απεικονίζεται τη διαδικασία διασποράς για όλα τα φυσικά κανάλια που χρησιμοποιούνται στην καθοδική ζεύξη, εκτός από τα κανάλια SCH. Η διαδικασία διασποράς περιλαμβάνει μια βαθμίδα χαρτογράφησης διαμόρφωσης, αμέσως ακολουθούμενη από μια βαθμίδα διαυλοποίησης, μια συνδυαστική IQ βαθμίδα και μια βαθμίδα περίπλεξης. Στη συνέχεια όλα τα φυσικά κανάλια της καθοδικής ζεύξης συνδυάζονται και μεταδίδονται. Τα μη διεσπαρμένα φυσικά καθοδικά κανάλια, εκτός των SCH, AICH, E-HICH και E-RGCH, αποτελούνται από ακολουθία ψηφίων που δύνανται να λαμβάνουν τις αποκλειστικά τιμές 0, 1 και "DTX" για όσα κανάλια υποστηρίζουν μετάδοση DTX.



Σχήμα 5-15. Διαδικασία διασποράς για όλα τα φυσικά κανάλια εκτός των καναλιών συγχρονισμού στην καθοδική ζεύξη (DL) του UMTS.

Περισσότερα σχετικά με τις λεπτομέρειες που αφορούν στη διαδικασία διασποράς που εφαρμόζεται στη καθοδική ζεύξη, δίδονται στο Τεχνικό Πρότυπο του ETSI TS 125.213.

Η διαμόρφωση του μιγαδικού διεσπαρμένου συρμού chip που δημιουργείται από τη διαδικασία διασποράς παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-16. Ο ρυθμός διαμόρφωσης chip είναι όπως και στην ανοδική ζεύξη 3.84Mcps.



Σχήμα 5-16. Διαμόρφωση στην καθοδική ζεύξη (DL) του UMTS.

5.7 Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών FDD στο UTRAN

Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου πρόσβασης FDD που χρησιμοποιείται στο UTRAN, είναι:

Ζώνη Συχνοτήτων: 1920 MHz -1980 MHz and 2110 MHz - 2170 MHz (ζευγαρωτό φάσμα) UL και DL

Ελάχιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης: ~ 2x5MHz

Παράγοντας επαναχρησιμοποίησης συχνότητας: 1

Διαχωρισμός φορέα: 4.4MHz - 5.2 MHz

Μέγιστος αριθμός καναλιών φωνής σε 2x5MHz: ~196 (παράγοντας διασποράς 256 UL, AMR 7.95kbps) / ~98 (παράγοντας διασποράς 128 UL, AMR 12.2kbps)

Κωδικοποίηση φωνής: AMR codecs (4.75 kHz - 12.2 kHz, GSM EFR=12.2 kHz) and SID (1.8 kHz)

Κωδικοποίηση καναλιού: Συνελικτική κωδικοποίηση, κώδικας Turbo για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, απαιτείται διπλέκτης (με διαχωρισμό 190MHz), υποστηρίζεται ασύμμετρη σύνδεση.

Tx/Rx απομόνωση: MS: 55dB, BS: 80dB

Δέκτης: RAKE

Ευαισθησία δέκτη: Node B: -121dBm, Mobile -117dBm σε BER of 10^{-3}

Τύπος δεδομένων: Πακέτα και με διακοπτικά κυκλώματα

Διαμόρφωση: QPSK

Διαμόρφωση παλμού: φίλτρο ρίζας υψωμένου συνημίτονου με παράγοντα κλίσης 0.22

Ρυθμός chip: 3.84 Mcps

Channel raster: 200 kHz

Μέγιστος ρυθμός πληροφορίας (Φυσικό κανάλι): ~ 2.3Mbps (παράγοντας διασποράς 4, παράλληλοι κώδικες (3 DL / 6 UL), 1/2 ρυθμός κωδικοποίησης), αλλά περιοριζόμενο από παρεμβολή.

Ρυθμός μετάδοσης καναλιού: 5.76Mbps

Μήκος πλαισίου: 10ms (38400 chips)

Αριθμός θυρίδων / πλαίσιο: 15

Αριθμός chips / θυρίδα: 2560 chips

Μεταπομπές: Ήπια, Ηπιότερη, Ολοκληρωτική

Περίοδος ελέγχου ισχύος: Χρονοθυρίδα = 1500 Hz ρυθμός

Βήμα ελέγχου ισχύος: 0.5, 1, 1.5 and 2 dB (Μεταβλητό)

Εύρος ελέγχου ισχύος: UL 80dB, DL 30dB

Μέγιστη ισχύς κορυφής κινητού: Power class 1: +33 dBm (+1dB/-3dB) = 2W; class 2 +27 dBm, class 3 +24 dBm, class 4 +21 dBm

Αριθμός μοναδικών κωδικών ταυτοποίησης σταθμών βάσης: 512 / συχνότητα

Παράγοντες διασποράς στο φυσικό επίπεδο: 4 ... 256 UL, 4 ... 512 DL

Τους κυριότερους κώδικες που χρησιμοποιούνται στο UMTS FDD συνοψίζει ο Πίνακας 5-4.

	Κώδικες Συγχρονισμού	Κώδικες Καναλιού	Κώδικες Περίπλεξης, UL	Κώδικες Περίπλεξης, DL
Τύπος	Gold Codes Primary Synchronization Codes (PSC) and Secondary Synchronization Codes (SSC)	Orthogonal Variable Spreading Factor (OVSF) codes sometimes called Walsh Codes	Complex-Valued Gold Code Segments (long) or Complex-Valued S(2) Codes (short) Pseudo Noise (PN) codes	Complex-Valued Gold Code Segments Pseudo Noise (PN) codes
Μήκος	256 chips	4-512 chips	38400 chips / 256 chips	38400 chips
Διάρκεια	66.67 μ s	1.04 μ s - 133.34 μ s	10 ms / 66.67 μ s	10 ms
Αριθμός Κωδίκων	1 κύριος κώδικας / 16 δευτερεύοντες κώδικες	= παράγοντας διασποράς 4 ... 256 UL, 4 ... 512 DL	16,777,216	512 κύριοι κώδικες / 15 δευτερεύοντες για κάθε κύριο κώδικα
Διασπορά	Όχι, δεν μεταβάλλει το εύρος ζώνης	Ναι, αυξάνει το εύρος ζώνης	Όχι, δεν μεταβάλλει το εύρος ζώνης	Όχι, δεν μεταβάλλει το εύρος ζώνης
Χρήση	Να καταστήσει τα τερματικά να ανιχνεύσουν και να συγχρονιστούν στα κύρια κανάλια ελέγχου της κυψέλης	UL: να διαχωρίσει τα φυσικά δεδομένα και τα δεδομένα ελέγχου από το ίδιο τερματικό DL: να διαχωρίσει τη σύνδεση προς διαφορετικά τερματικά στην ίδια κυψέλη	Διαχωρισμός τερματικών	Διαχωρισμός τομέων

Πίνακας 5-4. Σύνοψη των κυριότερων κωδίκων που χρησιμοποιούνται στο FDD του UTRAN.

5.8 Σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών TDD στο UTRAN

Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου πρόσβασης TDD που χρησιμοποιείται στο UTRAN, είναι:

Frequency band: 1900 MHz - 1920 MHz and 2010 MHz - 2025 MHz (Time Division Duplex) Unpaired, channel spacing is 5 MHz and raster is 200 kHz. Tx and Rx are not separated in frequency, but by guard period.

Minimum frequency band required: ~ 5MHz with 3.84Mcps, ~ 1.6MHz with 1.28 Mcps

Frequency re-use: 1

Voice coding: AMR (and GSM EFR) codec

Channel coding: Convolutional coding, Turbo code for high rate data TDMA frame consist of 15 timeslots. Each time slot can be transmit of receive Duplexer not needed Asymmetric connection supported Data by packet and circuit switch QPSK modulation.

Receiver: Joint Detection, (mobile: RAKE)

Chip rate: 7.68Mcps, 3.84 Mcps or 1.28 Mcps

Channel raster: 200 kHz

Maximum RF ch bit rate (kbps): ~ 3.3Mbps (1/2 rate coding, spreading factor 1, 15 timeslots, ex overheads), but interference limited

Frame length: 10ms

Number of slots / frame: 15

Handovers: Hard

Power control period: 100 Hz or 200 Hz UL, ~ 800 Hz DL

Power control step size: 1, 2, 3 dB (Variable)

Power control range: UL 65dB, DL 30dB

Mobile peak power: Power class 1: +33 dBm (+1dB/-3dB) = 2W; class 2 +27 dBm, class 3 +24 dBm, class 4 +21 dBm

Number of unique base station identification codes: 512/frequency

Physical layer spreading factors: 1, 2, 4, 8, 16

5.9 Προϋπολογισμός ζεύξης στο UMTS

Η προϋπολογισμός ζεύξης αποτελεί τμήμα της σχεδίασης του δικτύου και βοηθά στη διαστασιολόγηση της επιθυμητής κάλυψης, χωρητικότητας και της ποιότητας υπηρεσίας που απαιτείται στο δίκτυο. Η κάλυψη μακροκυψελών (macro cells) στο UMTS WCDMA περιορίζεται από την ανοδική ζεύξη, λόγω της περιορισμένης ισχύος των κινητών σταθμών (ισχύς τερματικού ομιλίας 125 mW). Η καθοδική κατεύθυνση περιορίζει τη διαθέσιμη κάλυψη της κυψέλης, καθώς η ισχύς που εκπέμπεται από το σταθμό βάσης (τυπικά 20 - 40 W) διαμοιράζεται σε όλους τους κινητούς σταθμούς. Στο περιβάλλον ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς η κάλυψη και η χωρητικότητα είναι αλληλοεξαρτημένες παράμετροι λόγω παρεμβολής. Έτσι, η βελτίωση της μιας συνεπάγεται την επιδείνωση της άλλης, και εν τέλει το σύστημα σχεδιάζεται με κάποια συμβιβαστική λογική. Γενικά, ο στόχος του προσδιορισμού ενός προϋπολογισμού ζεύξης είναι να υπολογιστεί το μέγιστο μέγεθος κυψέλης με δεδομένα τα ακόλουθα κριτήρια:

- Τύπο υπηρεσίας (τύπος δεδομένων και ταχύτητα)
- Τύπος περιβάλλοντος διάδοσης (τύπος εδάφους, διείσδυση σε κτίριο)
- Κατάσταση και τύπος κινητού (ταχύτητα, μέγιστη ισχύ εκπομπής)
- Παραμετροποίηση συστήματος (κεραίες και ισχύς του BTS, απώλειες καλωδίου, κέρδος μεταπομπής)
- Επιθυμητή πιθανότητα κάλυψης
- Χρηματικοί και οικονομικοί λόγοι (χρήση ακριβότερου και καλύτερης ποιότητας εξοπλισμού ή όχι, επιλογή της φθηνότερης μεθόδου εγκατάστασης)

Προσαρμόζοντας όλα αυτά στην επιθυμητή κάλυψη συστήματος, χωρητικότητα και ποιότητα για τις προσφερόμενες υπηρεσίες εντός κάθε περιοχής.

Προϋπολογισμός ανοδικής ζεύξης UMTS	
TX	
Μέγιστη ισχύς κινητού = 0.125W (dBm)	21,00
Απώλειες σώματος - Κέρδος κεραίας (dB)	2,00
EIRP (dBm)	19,00
RX	
BTS πυκνότητα θορύβου (dBm/Hz) =Thermal noise density + BTS noise figure	-168,00
RX ισχύς θορύβου (dBm) = $-168+10*\log(3840000)$	-102,16
Περιθώριο παρεμβολής (dB)	3,00
RX ισχύς παρεμβολής (dBm) = $10*\LOG(10^{((-102.2+3)/10)}-10^{(-102.2/10)})$	-102,18
Θόρυβος & παρεμβολή (dBm) = $10*\LOG(10^{((-102.2)/10)}+10^{(-102.2/10)})$	-99,16
Κέρδος επεξεργασίας (dB), 12.2k codec φωνής = $10*\log(3840/12.2)$	24,98
Απαιτούμενος λόγος E_b/N_0 για φωνή (dB)	5,00
Κέρδος κεραίας BTS (dB)	17,00
Απώλειες καλωδίου και σύνδεσης (dB)	3,00
Περιθώριο γρήγορης κατακρήμνισης (dB) =slow moving mobile	4,00
RX ευαισθησία (dBm)	-129,14
Συνολικές απώλειες όδευσης (dB)	148,14
Διαστασιολόγηση	
Περιθώριο Log normal κατακρήμνισης (dB)	7,00
Απώλειες εσωτερικού χώρου / εντός οχήματος (dB)	0,00
Κέρδος ήπιας μεταπομπής (dB)	3,00
Απώλειες διάδοσης στα άκρα κυψέλης (dB)	144,14
Ακτίνα κυψέλης με το μοντέλο Okamura-Hata (km) $L=137.4+35.2*\LOG(R)$	1,55

Πίνακας 5-5. Τυπικός προϋπολογισμός ανοδικής ζεύξης για WCDMA στο UMTS.

Σε αστικές περιοχές, συνήθως η χωρητικότητα αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα, οπότε οι κυψέλες που ευρίσκονται στο κέντρο της πόλης θα πρέπει να διαστασιολογηθούν με βάση την πυκνότητα της προσφερόμενης

τηλεπικοινωνιακής ($\text{Erlang}/\text{km}^2$) κίνησης που προέρχεται από φωνή και δεδομένα. Αστικές κυψέλες έχουν τυπικές ακτίνες που κυμαίνονται από 150 - 350 m, παρά το γεγονός ότι οι απώλειες λόγω κτιρίων συχνά φθάνουν τα 25 dB. Σε αγροτικές περιοχές το μέγιστο μέγεθος της κυψέλης καθορίζεται ουσιαστικά από την ανοδική ζεύξη και όχι από την προσφερόμενη τηλεπικοινωνιακή κίνηση, η οποία είναι μειωμένη. Το τυπικό μέγεθος μιας κυψέλης σε αγροτικές περιοχές είναι της τάξης των αρκετών χιλιομέτρων, εξαρτώμενο βεβαίως από τον τύπο εδάφους. Στον παρουσιάζεται ένας τυπικός προϋπολογισμός ζεύξης WCDMA για υπηρεσία φωνής. Η επιλογή κάποιων από τις παραμέτρους είναι συζητήσιμη, αλλά σε κάθε περίπτωση δίδεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της μεθόδου υπολογισμού.

5.10 Προβλήματα

- 5.1) Για να λειτουργήσει σωστά ένας BPSK-CDMA δέκτης απαιτεί $E_b/N_0=10$. Αν επιθυμούμε να έχουμε περιθώριο παρεμβολής 20 dB, προσδιορίστε το κέρδος επεξεργασίας.
- 5.2) Ποια η πιθανότητα σφάλματος για ένα σύστημα BPSK-CDMA με παράγοντα διασποράς 1000 και λόγο σήματος προς παρεμβολή στενής ζώνης -20dB, αν η ισχύς του θορύβου είναι πολύ μικρότερη της ισχύος της παρεμβολής;
- 5.3) Ο παράγοντας διασποράς ενός συστήματος DS-CDMA είναι 100, το κέρδος κωδικοποίησης 6dB ενώ η επιθυμητή τιμή του σηματοθορυβικού λόγου $E_b/N_0=10$. Ποιος ο μέγιστος αριθμός χρηστών που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα;

- 5.4) Υπολογίστε την πιθανότητα σφάλματος για ένα σύστημα DS-CDMA για το οποίο ο παράγοντας διασποράς είναι 1000 και εκπέμπουν ταυτόχρονα με την ίδια μέση ισχύ 60 χρήστες.
- 5.5) Εάν στο προηγούμενο πρόβλημα ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί FEC κώδικα (7,4) με ρυθμό κωδικοποίησης $\frac{3}{4}$ και απόσταση Hamming 3, ποια η πιθανότητα σφάλματος;
- 5.6) Σε ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς WCDMA ο αριθμός των ταυτόχρονα εξυπηρετούμενων χρηστών σε μια κυψέλη είναι 50 και ο ρυθμός αποστολής συμβόλων στη ζεύξη είναι 30kbaud. Αν όλοι οι χρήστες στη κυψέλη πραγματοποιούν φωνητικές κλήσεις και λαμβάνουν την ίδια ισχύ και η παρεμβολή μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει χαρακτηριστικά AWGN, με ποιο σηματοθορυβικό λόγο E_b/N_0 λαμβάνει ο κινητός σταθμός;
- 5.7) Σε ένα σύστημα κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς WCDMA ο αριθμός των ταυτόχρονα εξυπηρετούμενων χρηστών σε μια κυψέλη είναι 30. Αν όλοι οι χρήστες στη κυψέλη πραγματοποιούν video κλήση η οποία απαιτεί ελάχιστο λόγο $E_b/N_0=10\text{dB}$, και λαμβάνουν την ίδια ισχύ και η παρεμβολή μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει χαρακτηριστικά AWGN, προσδιορίστε τους OSVF κώδικες που χρησιμοποιεί η ανοδική ζεύξη.
- 5.8) Σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών που χρησιμοποιεί διασπορά φάσματος DS-CDMA, το κάθε σύμβολο πληροφορίας διασπείρεται με 128 chips, ενώ η πιθανότητα σφάλματος στο δέκτη είναι 10^{-7} . Πόσοι χρήστες εξυπηρετούνται στην κυψέλη;

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Jakes, C W (editor), *Microwave Mobile Communications*, Wiley-IEEE Press, 1994, ISBN 0780310691.
- [2] Carg, V K, Carg, V, and Wilkes, J, *Wireless and personal Communication Systems (PCS): Fundamentals and Applications*, Prentice Hall PTR, 1995, ISBN 0132346265.
- [3] Mehrotra, A, *GSM System Engineering*, Artech House Publishers, 1996, ISBN 0890068607.
- [4] Schiller, J, H, Schiller, J, Schiller J, *Mobile Communications*, Addison-Wesley Pub. Co., 2000, ISBN 0201398362.
- [5] Rappaport, S, Theodore, *Wireless Communications - Principles and Practice*, 2nd Edition, Prentice Hall PTR, 2002, ISBN 0130422320.
- [6] <http://www.3gpp.org>
- [7] <http://www.etsi.org>, European Telecommunications Standards Institute.
- [8] <http://www.umtsworld.com>
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System
- [10] <http://www.umts-forum.org>