



ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

κ.ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΠΑΠΑΤΣΩΡΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





Κινητές Επικοινωνίες

Εργαστήριο Επικοινωνιών
Τμήμα Πληροφορικής & Επικοινωνιών
Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών

Καθηγητής Αναστάσιος Παπατσώρης
adp@teiser.gr, profadp@gmail.com Tel: +30 23210 49307

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

- Το πρώτο σύστημα επικοινωνίας ασύρματης μετάδοσης έλαβε χώρα στα τέλη του 19ου αιώνα όταν ο Guglielmo Marconi παρουσίασε πρώτος τις δυνατότητες του ασυρμάτου.
- 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!

Παράγοντες Επιτυχίας της Κινητής Τηλεφωνίας

- Η πρόοδος που επετεύχθη στην κατασκευή ψηφιακών κυκλωμάτων και κυκλωμάτων ραδιοσυχνοτήτων.
- Η πρόοδος που επετεύχθη στην ολοκλήρωση κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας (VLSI).
- Η αλματώδης ανάπτυξη της μικροτεχνολογίας.
- Οι παραπάνω παράγοντες κατέστησαν εφικτή την κατασκευή αξιόπιστου και μικρού μεγέθους φορητού ραδιοεξοπλισμού με οικονομικό τρόπο.

Η Εξέλιξη των Κινητών Επικοινωνιών

- 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 οποιονδήποτε.
- Πέρα από τις τεχνολογικές εξελίξεις, μεγάλο μέρος της επιτυχίας της κινητής τηλεφωνίας οφείλεται στην **αρχή της επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας**.
- Σύμφωνα με αυτή, 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 άλλες κυψέλες που ευρίσκεται σε κάποια απόσταση από την πρώτη.

Φασματικές Απαιτήσεις για Συστήματα Κινητής Τηλεφωνίας

- Η αρχή επαναχρησιμοποίησης της συχνότητας επιτρέπει την ανάπτυξη συστημάτων κινητής τηλεφωνίας ακόμα και με πολύ μικρές ποσότητες φάσματος (π.χ. $2 \times 10 \text{MHz}$ ανά πάροχο).
- Έτσι παρά τον κορεσμό των διαφόρων κατάλληλων για την ανάπτυξη συστημάτων κινητών επικοινωνιών ζωνών ραδιοσυχνοτήτων, κατέστη δυνατόν να εξευρεθούν μικρά –πλην όμως επαρκή- τμήματα φάσματος.

Διαδικασίες Απονομής Φάσματος

- Λόγω της σπανιότητας αλλά και του μεγάλου δυναμικού του φάσματος αυτού τα κράτη απέδωσαν στους παρόχους (εταιρείες κινητών επικοινωνιών) το περιορισμένο σχετικά αυτό φάσμα με κάποια από τις ακόλουθες διαδικασίες:
 - Δημοπρασίες
 - Καλλιστεία
 - Σφραγισμένες Προσφορές
- Στην Ελλάδα το φάσμα κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς (UMTS) καθώς και συμπληρωματικό τμήμα 2^{ης} γενιάς (GSM) αποδόθηκε στους παρόχους τον Ιούλιο του 2001 με Δημοπρασία, η οποία απέφερε έσοδα στο κράτος περίπου €540,000,000.

Ταξινόμηση Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών

- **Μονοδρομικής (simplex) 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.
- **Ημι-αμφίδρομης (semi-duplex) 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.
- **Αμφίδρομης (duplex) κατεύθυνσης.** 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**).

Παραδείγματα Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών

- Μηχανισμοί για τον τηλεχειρισμό θυρών.
- Τηλεχειριστήρια τηλεόρασης, στερεοφωνικών συγκροτημάτων και άλλων οικιακών συσκευών.
- Φορητοί ασύρματοι του στρατού, της αστυνομίας, του λιμενικού, κλπ.
- Συστήματα paging (π.χ. σε στόλους οχημάτων).
- Ειδικά ραδιοδίκτυα (Ταξί, Φορτηγά, Αστυνομία).
- Βομβητές (π.χ. σε Νοσοκομεία).
- Κινητά τηλέφωνα.

Ορολογία Συστημάτων Κινητών Επικοινωνιών

- **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.
- **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 or Handover.** Η διαδικασία της μεταφοράς ενός κινητού σταθμού από ένα κανάλι ή σταθμό βάσης σε κάποιο άλλο ή άλλον, αντίστοιχα.
- **Περιοχή – Roaming.** Η εξυπηρέτηση ενός κινητού σταθμού από δίκτυο κινητής τηλεφωνίας στο οποίο ο χρήστης δεν είναι συνδρομητής.
- **Συνδρομητής – Subscriber.** Ένας χρήστης ο οποίος καταβάλλει συνδρομητικά τέλη σε ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για να το χρησιμοποιήσει

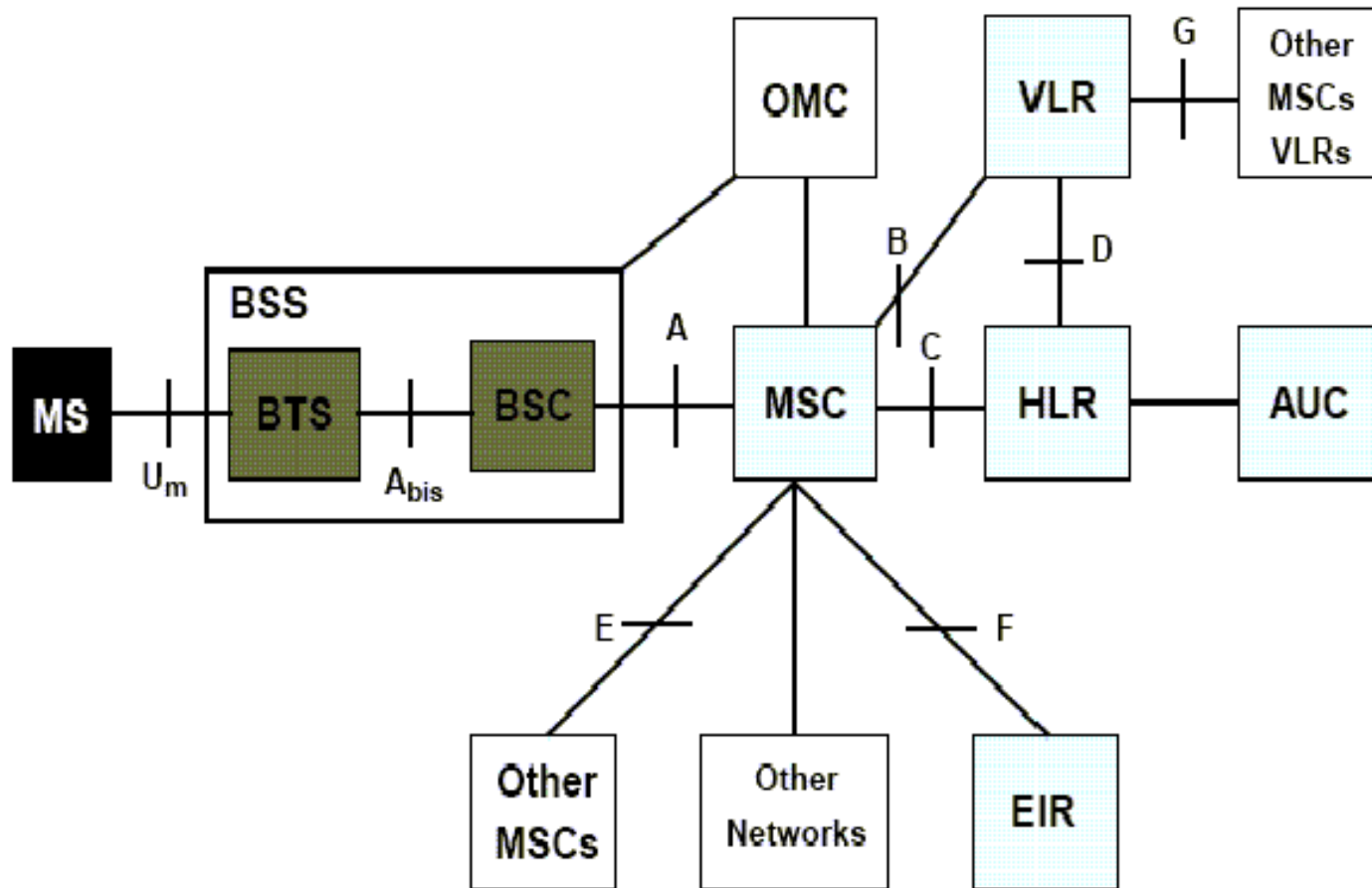
Κανάλια – Δίαυλοι στην Κινητή Τηλεφωνία

- **Δίαυλοι Ελέγχου – Control Channels.** 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. Ανάλογα με την κατεύθυνση επικοινωνίας, δηλαδή από σταθμό βάσης προς κινητό και αντίστροφα, διακρίνονται σε καθοδικούς – Forward Control Channel (FCC) και ανοδικούς – Reverse Control Channel (RCC).
- **Καθοδικός Δίαυλος Ομιλίας/Δεδομένων – Forward Voice/Data Channel (FVDC).** Δίαυλος ραδιοεπικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την μετάδοση ομιλίας/πληροφορίας από το σταθμό βάσης προς το κινητό.
- **Ανοδικός Δίαυλος Ομιλίας/Δεδομένων – Reverse Voice/Data Channel (RVDC).** Δίαυλος ραδιοεπικοινωνίας που χρησιμοποιείται για την μετάδοση ομιλίας/πληροφορίας από το κινητό προς το σταθμό βάσης.

Βασικά Δομικά Στοιχεία Συστήματος Κινητής Τηλεφωνίας

- Ένα βασικό σύστημα κυψελωτής τηλεφωνίας που αποτελείται από **Κινητούς Σταθμούς, Σταθμούς Βάσης, Σταθμούς Ελέγχου Σταθμών Βάσης** και ένα ή περισσότερα **Κέντρα 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 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.
- Ακολουθώς, 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 (PSTN) προκειμένου να δρομολογηθούν με κατάλληλο τρόπο οι τηλεφωνικές κλήσεις. Ένα τυπικό κέντρο μεταγωγής είναι επίσης υπεύθυνο για την τιμολόγηση των υπηρεσιών και την συντήρηση του συστήματος.

Τυπική Αρχιτεκτονική Συστήματος Κινητής Τηλεφωνίας (GSM εδώ)



Πως πραγματοποιείται μια τηλεφωνική κλήση από Σταθερό σε Κινητό Δίκτυο

- 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 το 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.

Πως πραγματοποιείται μια τηλεφωνική κλήση από Κινητό σε Σταθερό Δίκτυο

- Όταν 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.

Αρχή Σχεδίασης των Πρώτων Συστημάτων Κινητής Τηλεφωνίας

- 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 καταναείμουν επαρκές φάσμα για την κάλυψη των ολοένα αυξανομένων απαιτήσεων για υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας, οδήγησε στην αναθεώρηση των αρχών σχεδίασης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών.

Κυψελωτή Τηλεφωνία

- 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.
- 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

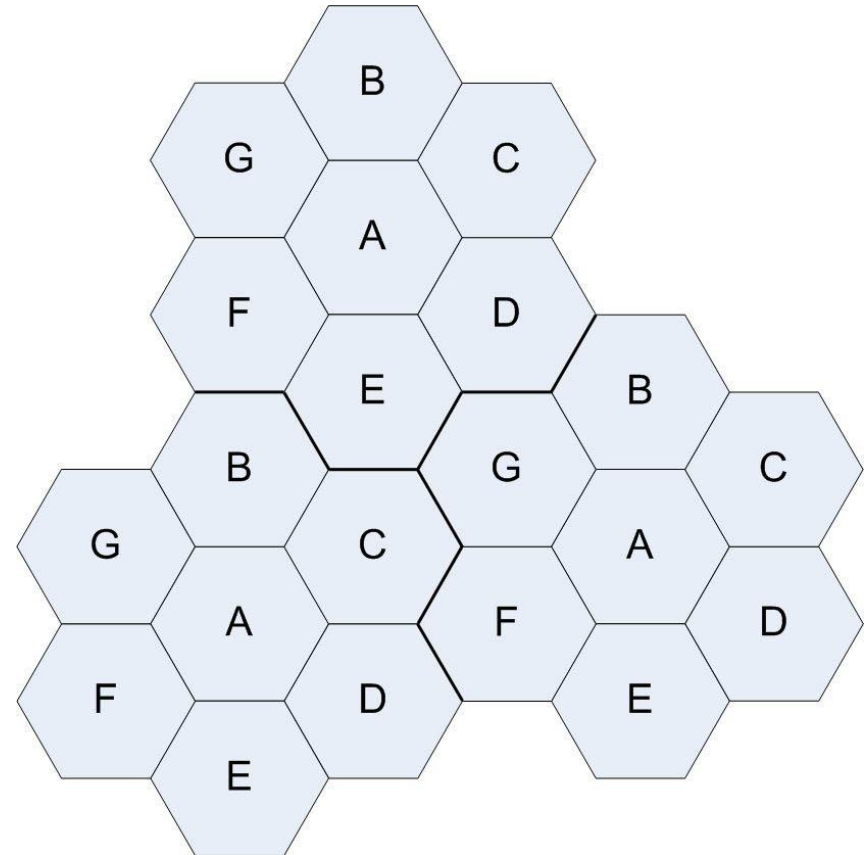
- Η αρχή της κυψελωτής τηλεφωνίας είναι κατ' ουσία η αντικατάσταση ενός πομπού υψηλής ισχύος και ευρείας κάλυψης (μεγάλη κυψέλη) με πολλούς πομπούς πολύ μικρότερης ισχύος και κάλυψης μικρού μέρους (μικρή κυψέλη) της περιοχής εξυπηρέτησης.
- Σε κάθε σταθμό βάσης εκχωρείται κλάσμα του συνολικού αριθμού 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.

Πλεονεκτήματα της Αρχής Κυψελωτής Τηλεφωνίας

- 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.

Αρχή Επαναχρησιμοποίησης Συχνότητας

- Τα συστήματα κινητής τηλεφωνίας βασίζονται στην ευφυή ανάθεση και επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων (καναλιών) εντός των γεωγραφικών ορίων της περιοχής κάλυψης.
- Κυψέλες που αναφέρονται με το ίδιο γράμμα χρησιμοποιούν τις ίδιες ομάδες συχνοτήτων συνιστώντας την αρχή της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων.
- Το διάγραμμα ραδιοκάλυψης κάθε σταθμού βάσης έχει συμβολικά εξαγωνικό σχήμα.

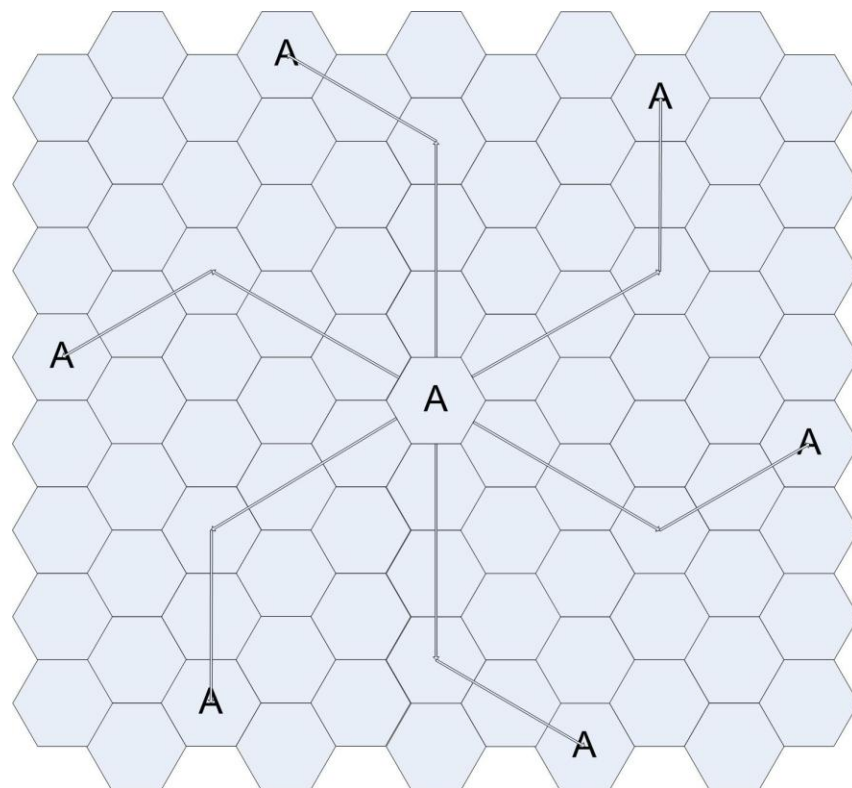


Κατανομή συχνοτήτων

- 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 κατανεμηθεί 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 **$S=kN$** .
- 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 **$C=MS$** .
- Η χωρητικότητα ενός συστήματος κυψελωτής τηλεφωνίας είναι ανάλογη του αριθμού των αντιγράφων της ομάδας εντός της περιοχής κάλυψης. Για ίδιο R , αν $N_1 > N_2$ τότε $C_1 < C_2$. (Γιατί;)

Προσδιορισμός Συγκαναλικών Κυψελών

- Λόγω της εξαγωνικής γεωμετρίας της κυψέλης 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 $N=i^2+ij+j^2$, όπου i και j είναι μη αρνητικοί ακέραιοι.
- $N=\{3,4,7,9,12,13,16,19, \dots\}$
- Για να προσδιορίσουμε την πλησιέστερη συγκαναλική κυψέλη μιας κυψέλης πρέπει:
 - να μετακινηθούμε i κυψέλες κατά μήκος οποιασδήποτε αλυσίδας εξαγώνων,
 - να στρίψουμε 60° μοίρες με φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, και
 - τέλος να μετακινηθούμε j κυψέλες κατά μήκος της νέας διεύθυνσης.
- Στο εδώ παράδειγμα: $i=3$ και $j=2$.



Στρατηγικές Ανάθεσης Καναλιών

- Οι στρατηγικές ανάθεσης καναλιών διακρίνονται σε **σταθερές (fixed)** και **δυναμικές (dynamic)**.
- 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.
 - Σε μία από αυτές που ονομάζεται **στρατηγική δανεισμού (borrowing strategy)** ο χρήστης επιτρέπεται να χρησιμοποιήσει (δανειστεί) αχρησιμοποίητα κανάλια γειτονικής κυψέλης, εάν όλα τα δικά του είναι απασχολημένα.
- Στην δυναμική στρατηγική τα κανάλια ομιλίας δεν αναθέτονται σε μόνιμη βάση στις διάφορες κυψέλες. 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.

Τεχνικές Μεταπομπής

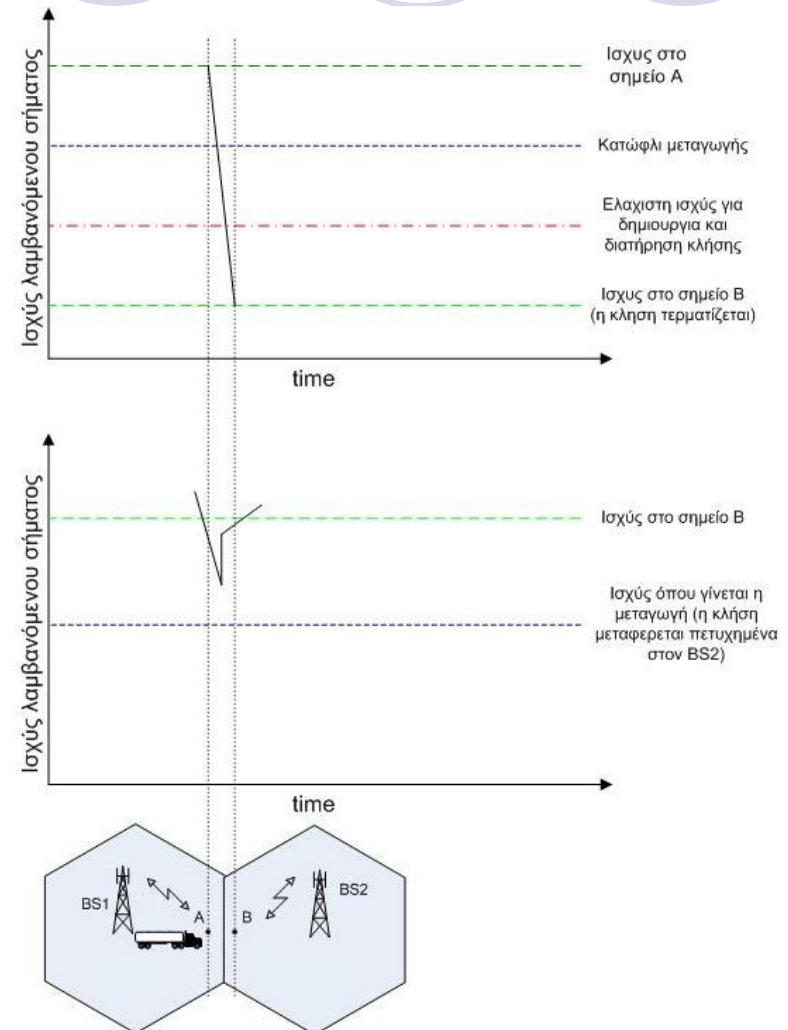
- Όταν ένα κινητό μετακινείται από την μία κυψέλη σε άλλη κατά την διάρκεια μιας συνομιλίας, το κέντρο μεταγωγής αυτόματα μεταφέρει την κλήση σε νέο δίαυλο που ελέγχεται από τον νέο σταθμό βάσης.
- Η διαδικασία της μεταπομπής πρέπει να υλοποιείται χωρίς να γίνεται αντιληπτή από τον χρήστη και εν γένει 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 $\Delta = P_{handoff} - P_{min_usable}$, θα πρέπει αφενώς να μην είναι ούτε πολύ μικρή ούτε πολύ μεγάλη και να είναι καλά προσαρμοσμένη στον τρόπο κίνησης των χρηστών στη κυψέλη.

Επιλογή Περιθωρίου Μεταπομπής

- Μια μεγάλη τιμή του Δ θα σήμαινε την πραγματοποίηση πολλών και στην πλειοψηφία τους μη απαραίτητα αναγκαίων μεταπομπών, επιβαρύνοντας έτσι σημαντικά το κέντρο μεταγωγής.
- 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.

Απεικόνιση Διαδικασίας Μεταπομπής

- 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.
- Στο Σχήμα 2-3(b) απεικονίζεται το σενάριο μιας επιτυχούς διαδικασίας μεταπομπής. Το κέντρο μεταγωγής έγκαιρα μετάρει τον κινητό σταθμό καθώς αυτός μεταβαίνει από το σημείο A που ελέγχεται από το σταθμό βάσης BS1, στο σημείο B που ελέγχεται από το σταθμό βάσης BS2. Έτσι κατά την μετάβαση από το σημείο A στο σημείο B η στάθμη του σήματος σε καμία χρονική στιγμή δεν πέφτει κάτω από τα επιτρεπτά όρια.



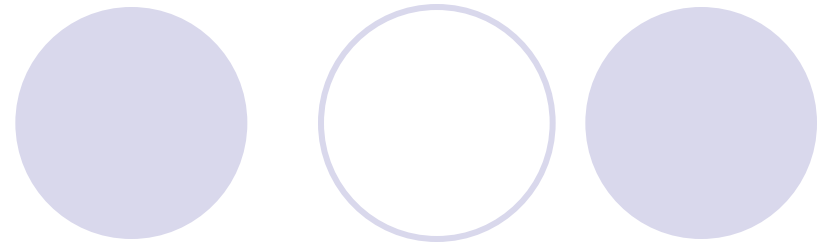
Χρόνος Εγκατάστασης (dwell time)

- Ένας 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.

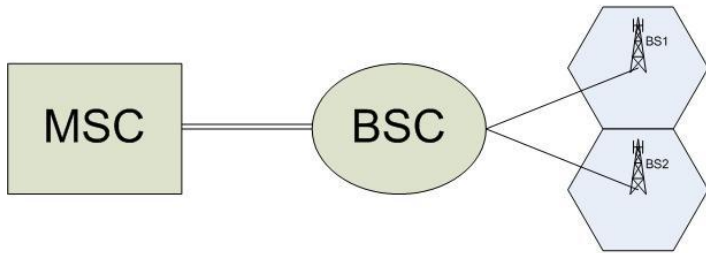
Μεταπομπή MAHO

- 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 handoff - MAHO).
- 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 αρχεται 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 MAHO 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 1s, η δε τιμή του Δ τυπικά κυμαίνεται μεταξύ 0 και 6dB.

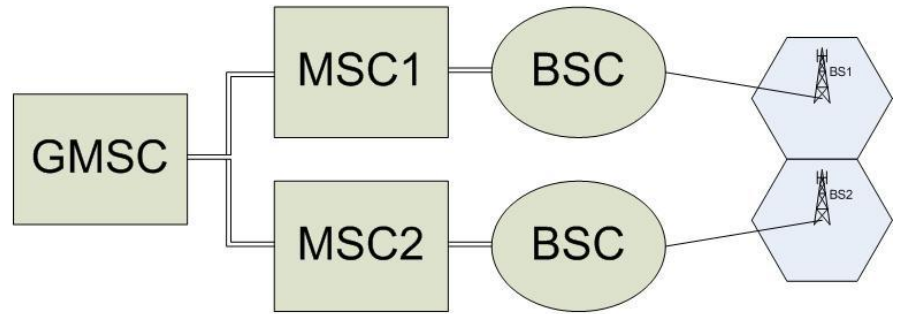
Είδη Μεταπομπής



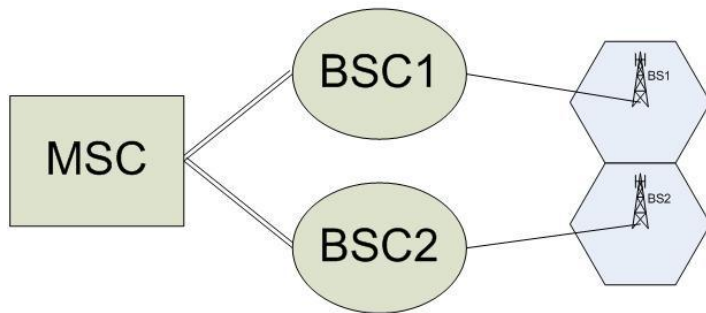
(Α) Μεταγωγή από το ίδιο BSC



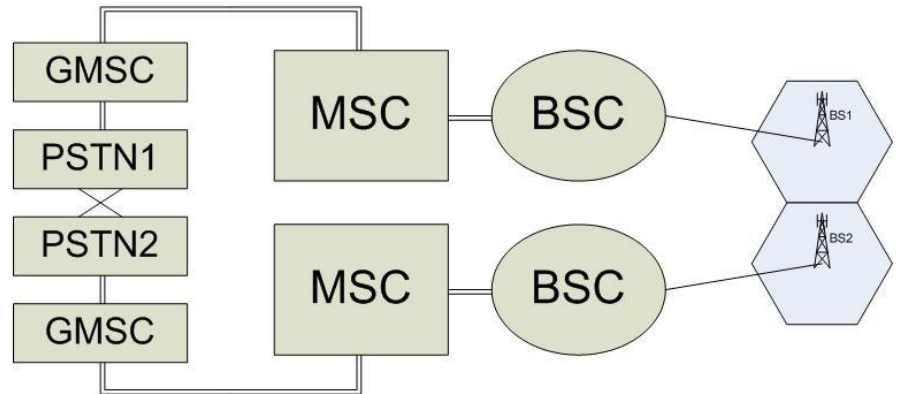
(Γ) Μεταγωγή σε διαφορετικά MSC



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



(Δ) Περιαγωγή (Roaming)



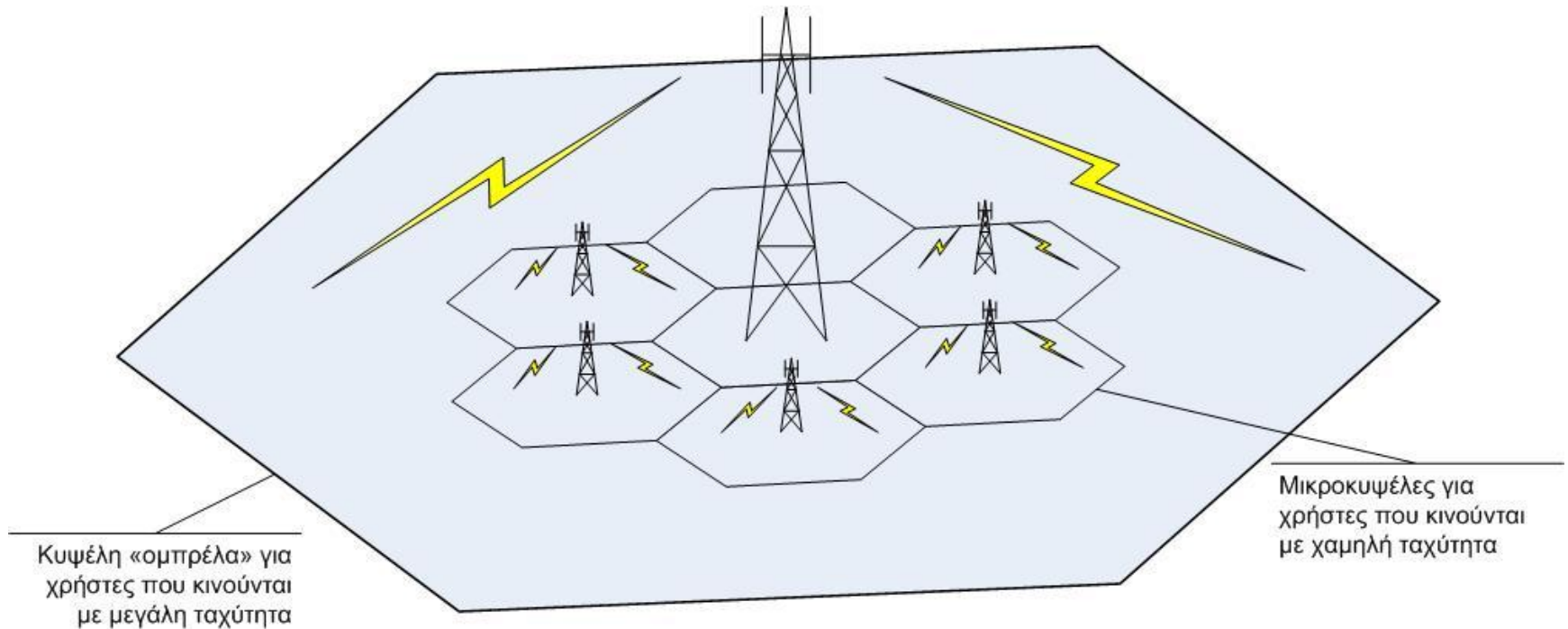
Χορήγηση Προτεραιότητας στη Μεταπομπή

- Διάφορες μεθοδολογίες διαχείρισης αιτημάτων μεταπομπής έχουν εξελιχθεί, οι οποίες δίδουν προτεραιότητα στα αιτήματα μεταπομπής έναντι αυτών για έναρξης νέας κλήσης, όπως:
- Η μέθοδος προτεραιότητας αιτημάτων μεταπομπής που 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.
 - Η μέθοδος των καναλιών φύλαξης είναι ιδιαίτερα καλής φασματικής απόδοσης όταν αξιοποιείται στα πλαίσια δυναμικών στρατηγικών ανάθεσης καναλιών
- 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 μέθοδος αυτή, αν και ελαττώνει σημαντικά την πιθανότητα τερματισμού κλήσης λόγω μεταπομπής δεν την μηδενίζει.

Πρακτικά Ζητήματα στο Χειρισμό Μεταπομπών Κλήσεων

- Σε πρακτικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να μπορούν να ικανοποιηθούν οι 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 βάρδισης καθ' όλη την διάρκεια της κλήσης.
- 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.

Η Κυψέλη 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.

Παρεμβολές και Επιπτώσεις στη Σχεδίαση Συστημάτων

- 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.
- 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.

Συγκαναλική Παρεμβολή

- 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.

Συγκαναλικός Λόγος Επαναχρησιμοποίησης

- 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 **$Q=\sqrt{3N}$** .

Βασική Εξίσωση Διάδοσης στο Κανάλι Κινητών Επικοινωνιών

- 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 $P_r(d)=P_o(d_0/d)^\eta$, όπου η είναι ο εκθέτης απωλειών διάδοσης.
- Ο εκθέτης απωλειών διάδοσης τυπικά κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 2 (διάδοση ελευθέρου χώρου) και 5 (διάδοση εντός πυκνοδομημένου αστικού περιβάλλοντος).

Υπολογισμός Συγκαναλικής Παρεμβολής

- 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 $S/I = S/\sum I_i$, όπου **S** είναι η στάθμη ισχύος από τον επιθυμητό σταθμό βάσης, και I_i είναι η ισχύς παρεμβολής του i -οστού συγκαναλικού σταθμού βάσης, για $i=1, \dots, i_0$.
- Εάν η απόσταση του i -οστού παρεμβάλλοντος σταθμού βάσης από το σταθμό λήψης (κινητό τηλέφωνο ή σταθμό βάσης) είναι D_i , η λαμβανομένη από το σταθμό λήψης ισχύς 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 θα δίδεται από την σχέση: $S/I = R^n / \sum D_i^n$.
- Αν 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: $S/I = (D/R)^n / i_0 = (\sqrt{3N})^n / i_0$.
- Δηλαδή ο λόγος **S/I** συνδέεται με το μέγεθος ομάδας **N**, που καθορίζει την συνολική χωρητικότητα του συστήματος.

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.

Μείωση Παρεμβολής Γειτονικού Καναλιού

- 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.
- 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: **$S/I = (d_w/d_i)^n$** .

Πολυπλεξία Κορμού

- 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 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.

Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

- Οι βασικές αρχές της θεωρίας πολυπλεξίας γραμμών θεμελιώθηκαν από τον Δανό μαθηματικό Erlang στα τέλη του 19ου 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).

Δείκτης Ποιότητας Υπηρεσίας

- 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.

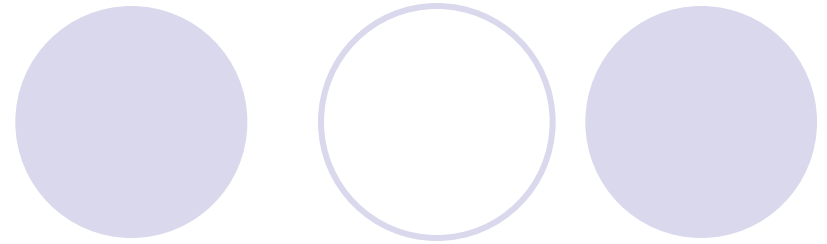
Όροι Πολυπλεξίας Κορμού

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.

Όροι 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: $A_u = \mu \cdot H$.
- 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: $A = U \cdot A_u$.
- Επίσης, εάν σε ένα σύστημα πολυπλεξίας κορμού χωρητικότητας (capacity) C , η ένταση τηλεφωνικής κινήσεως είναι ισομερώς κατανομημένη στα κανάλια του συστήματος, τότε η ένταση ανά κανάλι A_c δίδεται από την σχέση: $A_c = A/C$.
- Όταν η προσφερόμενη τηλεφωνική κίνηση υπερβεί τη μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος, τότε η μεταφερόμενη κίνηση περιορίζεται στη μέγιστη χωρητικότητα του συστήματος.

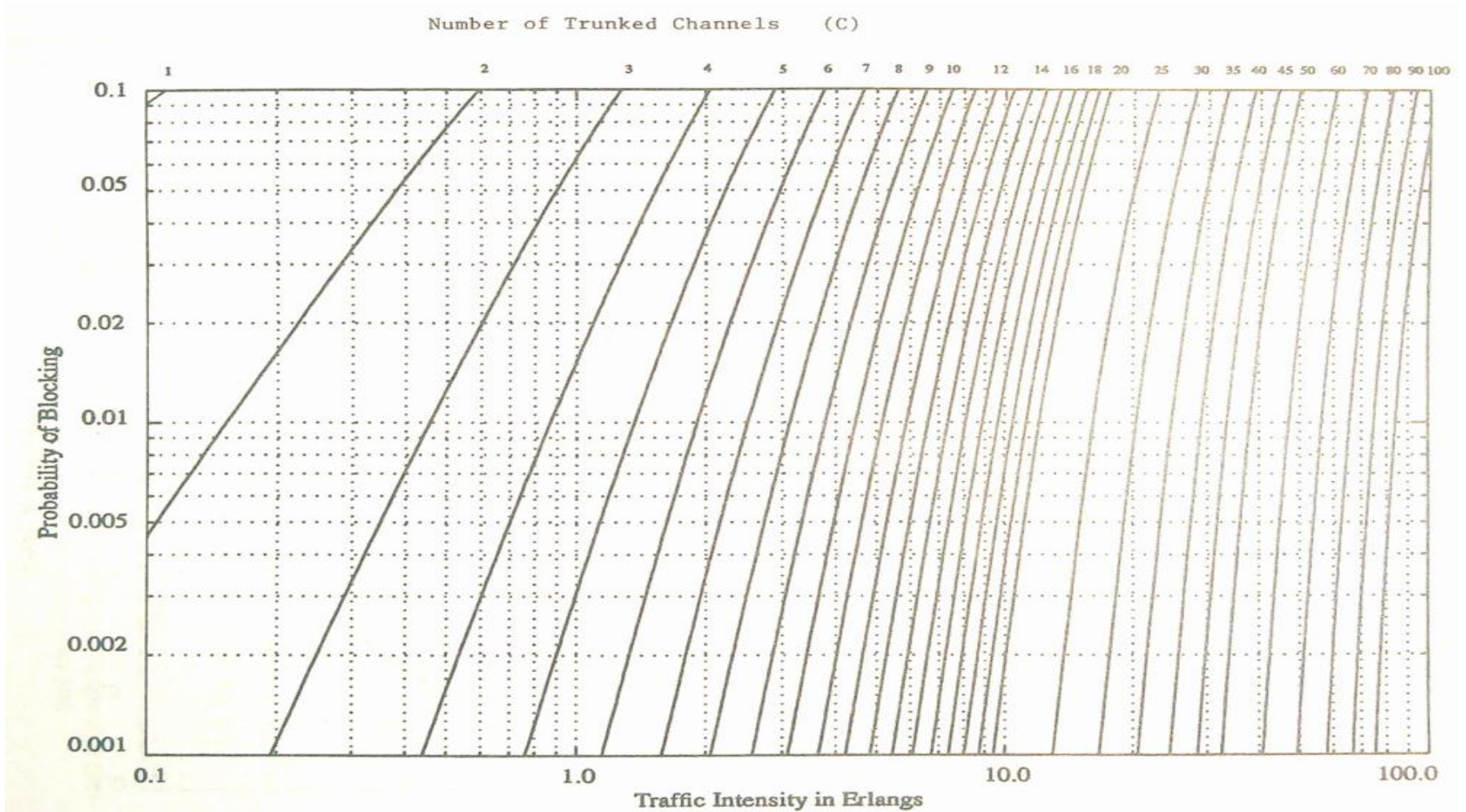
Σύστημα Erlang-B



- Θεωρώντας ότι ισχύουν οι ακόλουθες προϋποθέσεις:
 - οι αφιχθείσες κλήσεις ακολουθούν την κατανομή Poisson,
 - ο αριθμός χρηστών είναι άπειρος,
 - κάθε χρήστης συμπεριλαμβανομένων και αυτών που είναι μπλοκαρισμένοι μπορούν να ζητήσουν την πραγματοποίηση κλήσης οποιαδήποτε στιγμή,
 - η πιθανότητα κάποιος χρήστης να έχει δεσμευμένο κανάλι ακολουθεί την εκθετική κατανομή, δηλαδή κλήσεις μεγάλης διάρκειας έχουν πολύ μικρότερη πιθανότητα να συμβούν,
 - ο διαθέσιμος αριθμός καναλιών στο αποθεματικό του συστήματος είναι πεπερασμένος,
 - ο αριθμός των απασχολημένων καναλιών ισούται με τον αριθμό των ενεργών χρηστών,
 - 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 σε σύστημα **Erlang- B** από την σχέση:

$$P_r = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} = GoS$$

Διάγραμμα Erlang-B



Σύστημα Erlang-C

- 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 $P_r[delay > t]$ 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 $P_r[delay > 0]$. Η πιθανότητα αυτή δίδεται από τη σχέση, η οποία είναι επίσης γνωστή και ως η φόρμουλα **Erlang-C**:

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

Σύστημα Erlang-C (Συνέχεια)

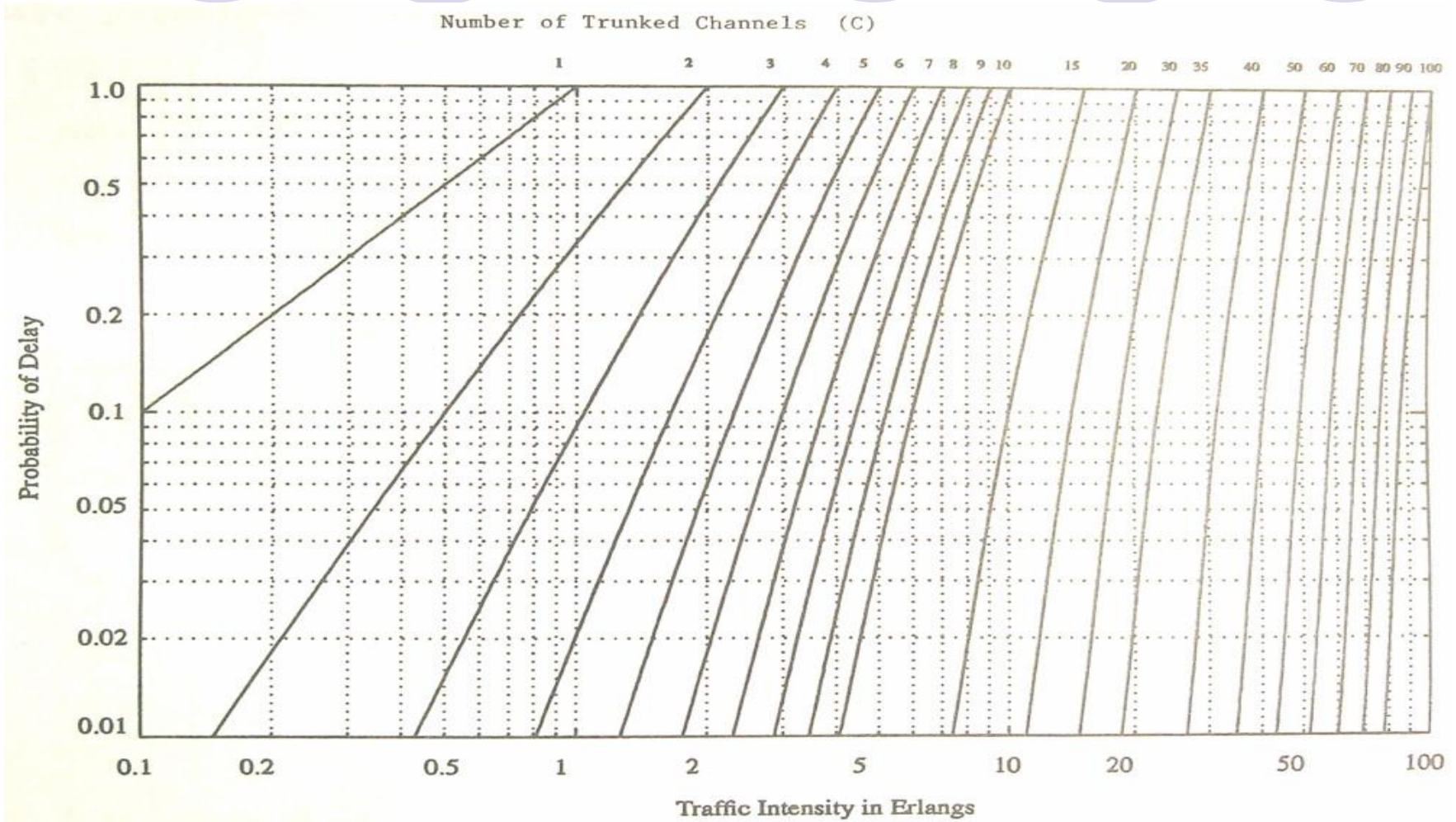
- Εάν κανένα κανάλι δεν είναι άμεσα διαθέσιμο η κλήση τοποθετείται στην ουρά αναμονής, και η πιθανότητα $P_r[\text{delay} > t]$ να καθυστερήσει παραπάνω από χρόνο t , δίδεται από το γινόμενο της πιθανότητας να καθυστερήσει και της δεσμευμένης πιθανότητας η καθυστέρηση να είναι μεγαλύτερη από t δευτερόλεπτα.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

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

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

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

Διάγραμμα Erlang-C

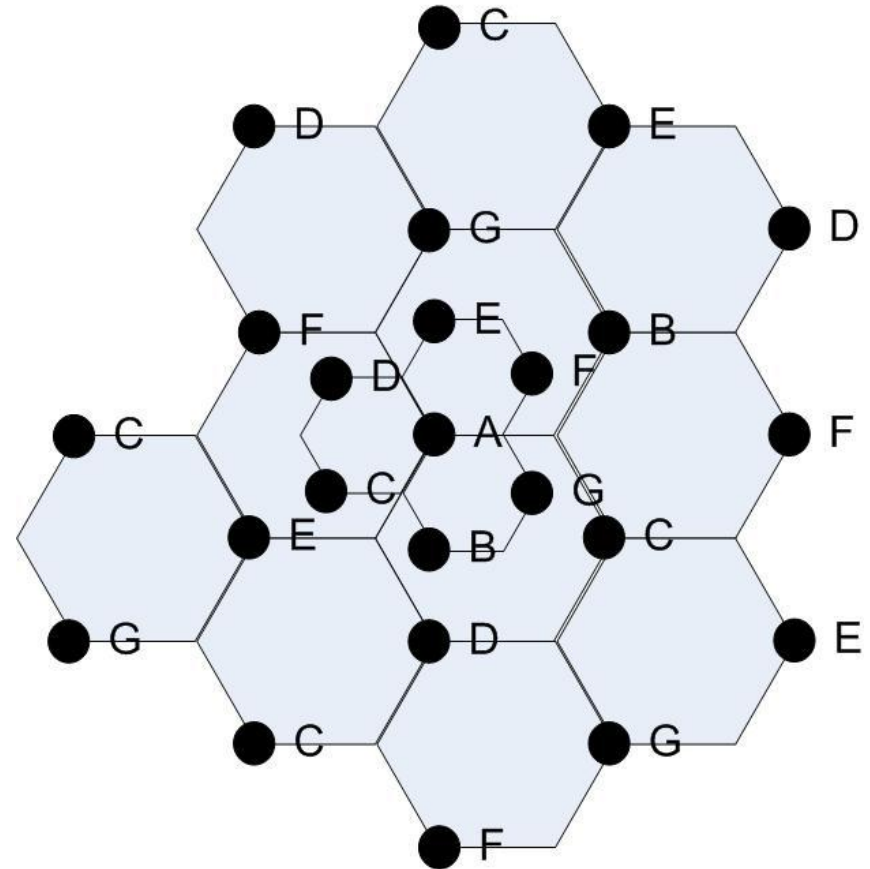


Αύξηση Χωρητικότητας σε Συστήματα Κινητής Τηλεφωνίας

- 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:
 - η τεχνική της διαίρεσης κυψέλης,
 - η τεχνική της τομεοποίησης κυψέλης, και
 - η τεχνική της ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες.

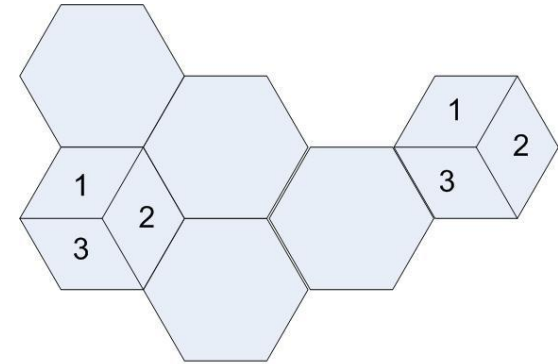
Τεχνική Διαίρεσης Κυψέλης

- 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 σμικρύνοντας απλά την γεωμετρία 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.

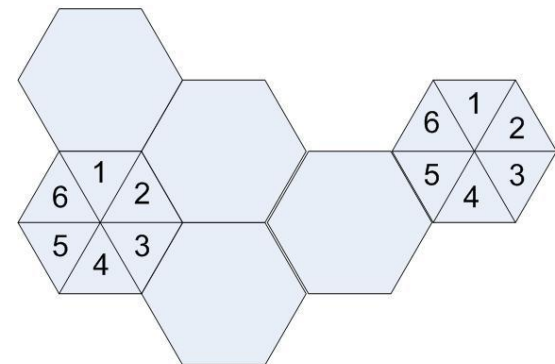


Τεχνική Τομεοποίησης Κυψέλης

- 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 συγκαναλικής 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 συγκαναλική παρεμβολή μόνο από τους σχετικούς διαύλους και από συγκεκριμένη κατεύθυνση.
- Η μείωση της στάθμης της συγκαναλικής παρεμβολής εξαρτάται από το βαθμό τομεοποίησης.



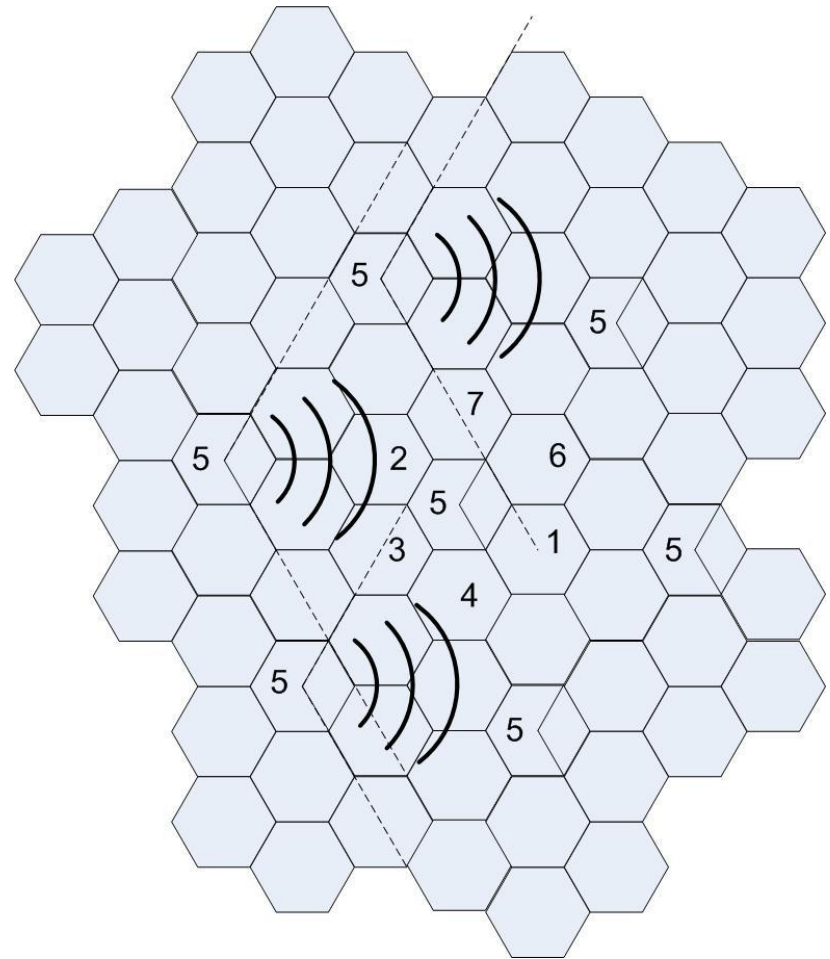
(a)



(b)

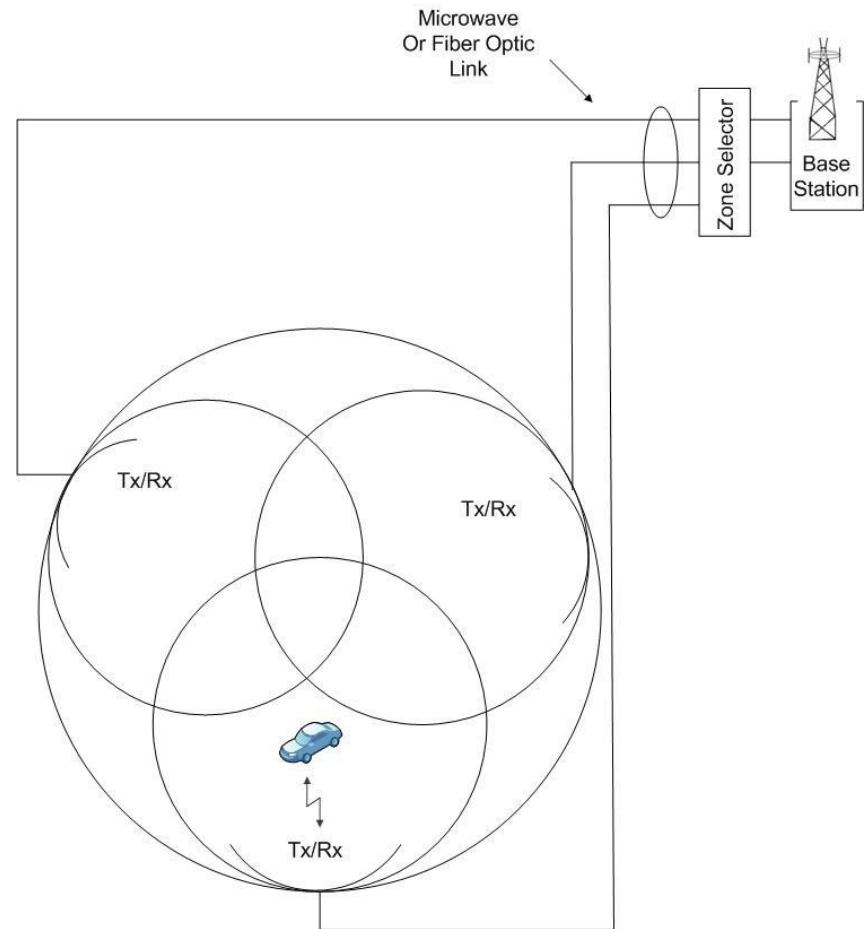
Τομεοποίηση Κυψέλης

- Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται με την τομεοποίηση η μείωση της συγκαναλικής παρεμβολής παρουσιάζεται στο διπλανό σχήμα.
- 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.
- Με απαίτηση για ελάχιστο $S/I=15dB$ για $n=3$ και πανκατευθυντικές κεραίες προκύπτει ελάχιστο $N=12$ και $S/I=15.6dB$.
- Για κατευθυντικές κεραίες 3 τομέων των 120° προκύπτει ελάχιστο $N=7$ και $S/I=16.8dB$.
- Επομένως, η τομεοποίηση αύξησε τη χωρητικότητα κατά $12/7=1.714$ φορές.



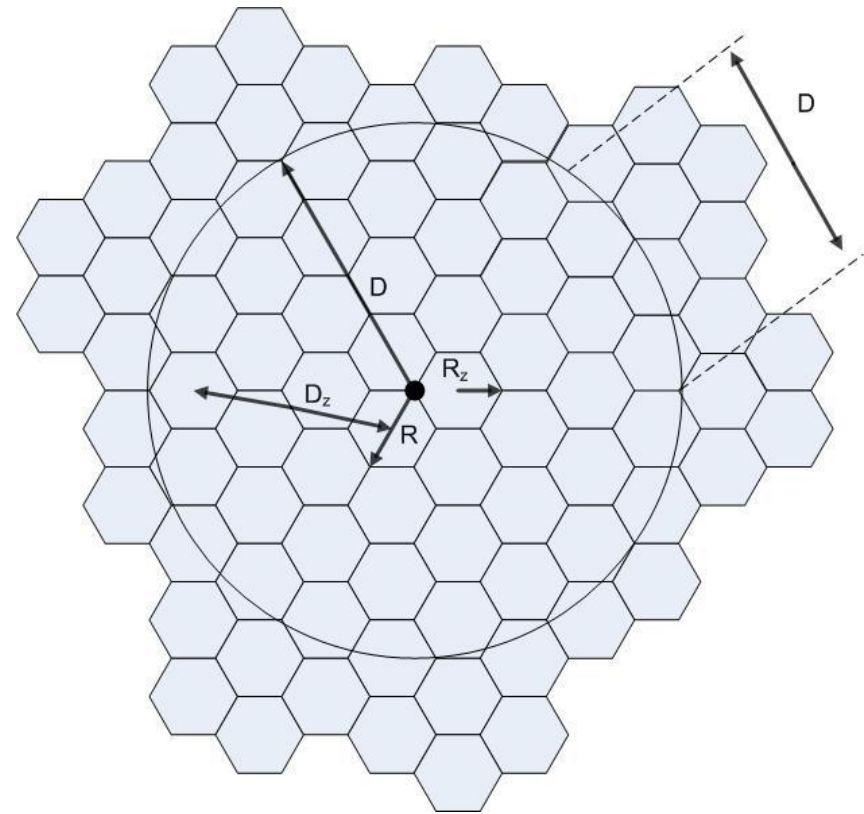
Η Τεχνική των Μικροκυψελών

- 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, 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 κεραιές 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.**



Αύξηση Χωρητικότητας με Μικροκυψέλες

- Το πλεονέκτημα της τεχνικής ζώνης κάλυψης με μικροκυψέλες είναι ότι παρά το ότι η κυψέλη διατηρεί την ακτίνα κάλυψής της, η συγκαταληκή παρεμβολή στο σύστημα κινητής τηλεφωνίας ελαττώνεται αφού ένας σταθμός βάσης αντικαθίσταται από αρκετούς σταθμούς βάσης μικρότερης ισχύος.
- Η ακτίνα R_z εκάστης ζώνης ισούται προσεγγιστικά με την ακτίνα της μικροκυψέλης, ενώ η απόσταση επαναχρησιμοποίησης συχνότητας είναι D_z και περίπου τριπλάσια της ακτίνας της μικροκυψέλης. Έτσι ο λόγος επαναχρησιμοποίησης συχνότητας $D_z/R_z < D/R$.

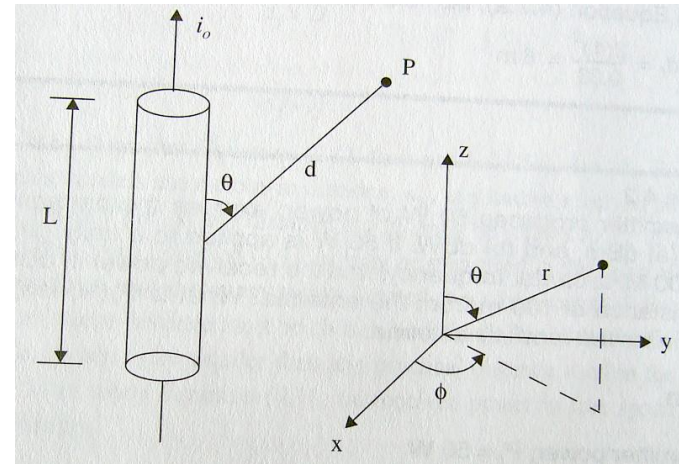


ΔΙΑΔΟΣΗ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΚΑΝΑΛΙ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

- 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.

Βασικές Αρχές Διάδοσης Ραδιοκυμάτων

- Τα πεδία που δημιουργεί η διέλευση χρονικά μεταβαλλόμενου ρεύματος i_0 από ένα γραμμικό αγώγιμο στοιχειώδες μήκος $dL \ll \lambda$ δίδονται από τις διπλανές εκφράσεις.
- 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.
- 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 $d > 2D^2/\lambda$, όπου D είναι η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας.



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

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

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

$$E_r = H_r = H_\theta = 0$$

Βασικές Εξισώσεις Διάδοσης

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

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

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: $P_r = P_d \cdot A_e$

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

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

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

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

Επίσης:

$$E = \frac{\sqrt{30 P_t G_t}}{d}$$

Συντελεστές Ανάκλασης & Διάθλασης

- Συντελεστές ανάκλασης για κάθετη

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

και οριζόντια πόλωση του

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

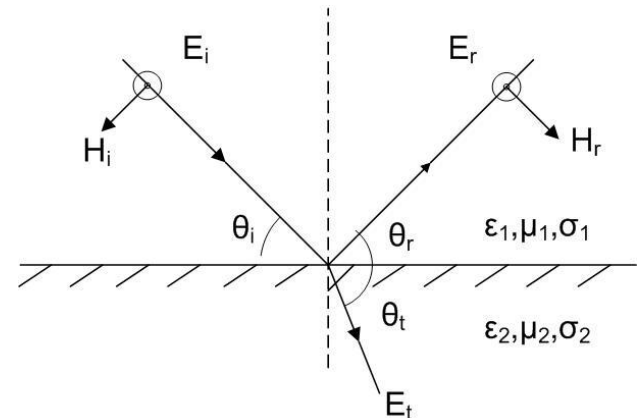
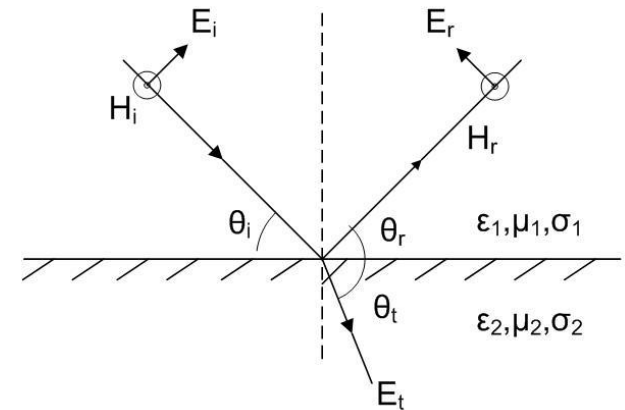
ηλεκτρικού πεδίου στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, όπου:

$$Z_i = \sqrt{\frac{j\omega_c \mu_i}{\sigma_i + j\omega_c \varepsilon_i}}$$

η χαρακτηριστική αντίσταση του κάθε μέσου.

- Για τους συντελεστές διάθλασης ισχύει $\tau = 1 + \rho$, ενώ για τις γωνίες ανάκλασης και διάθλασης:

$$\theta_i = \theta_r \quad \sin(\theta_i) \cdot \sqrt{\mu_1 \varepsilon_1} = \sin(\theta_t) \cdot \sqrt{\mu_2 \varepsilon_2}$$



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.

Απώλειες για Εμπόδιο Ευθείας Ακμής

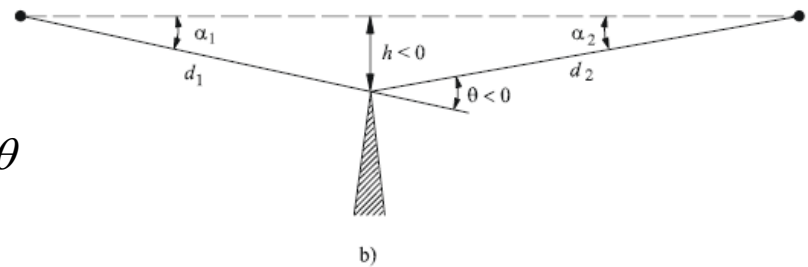
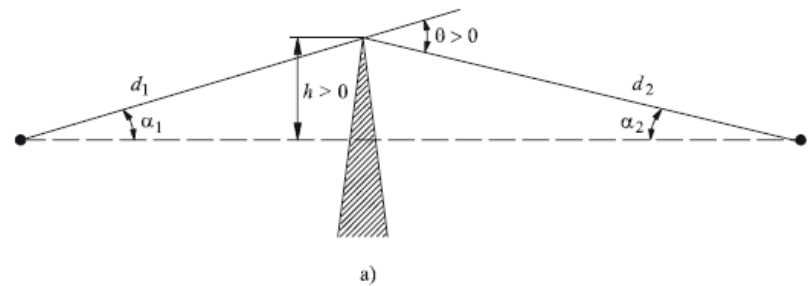
- Ο υπολογισμός των απωλειών γίνεται με τη βοήθεια της παραμέτρου v :

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

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

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

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



Απώλειες για Εμπόδιο Ευθείας Ακμής (Συνέχεια)

- Αφού προσδιοριστεί η παράμετρος v , οι απώλειες περίθλασης $J(v)$ δίδονται από τη σχέση:

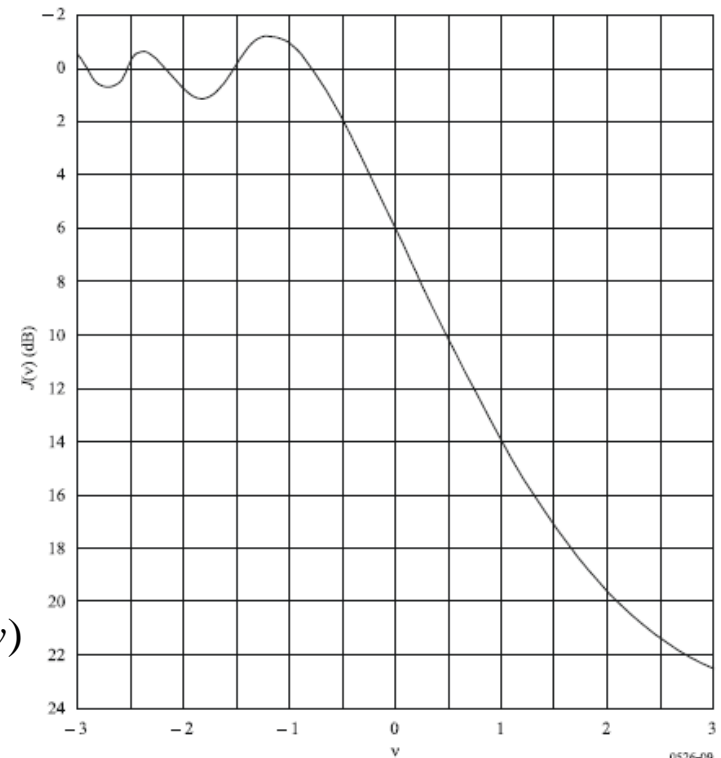
$$J(v) = -20 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{(1 - C(v) - S(v))^2 + (C(v) - S(v))^2}}{2} \right)$$

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

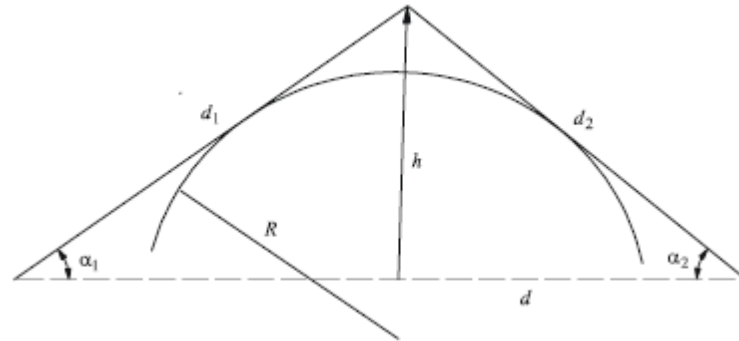
$$F_c(v) = \int_0^v e^{j \frac{\pi s^2}{2}} ds = \int_0^v \cos \frac{\pi s^2}{2} ds + j \int_0^v \sin \frac{\pi s^2}{2} ds = C(v) + jS(v)$$

- Για τιμές του v μεγαλύτερες από -0.78 οι απώλειες περίθλασης $J(v)$ μπορούν να εκτιμηθούν από τη σχέση:

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



Απώλειες για Κυρτό Εμπόδιο



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

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

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

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:

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] / \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} \quad n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} / R$$

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

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

- Η ανάλυση μεγάλου όγκου πειραματικών μετρήσεων καταδεικνύει ότι οι απώλειες διάδοσης σε δεδομένη απόσταση **d** μπορούν να περιγραφούν από σχέση:

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

όπου **$X_\sigma (dB)$** είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την κανονική κατανομή έχοντας μηδενικό μέσο όρο και τυπική απόκλιση **$\sigma (dB)$** .

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

Μακροσκοπικό Μοντέλο Διάδοσης για Κινητές Επικοινωνίες (Συνέχεια)

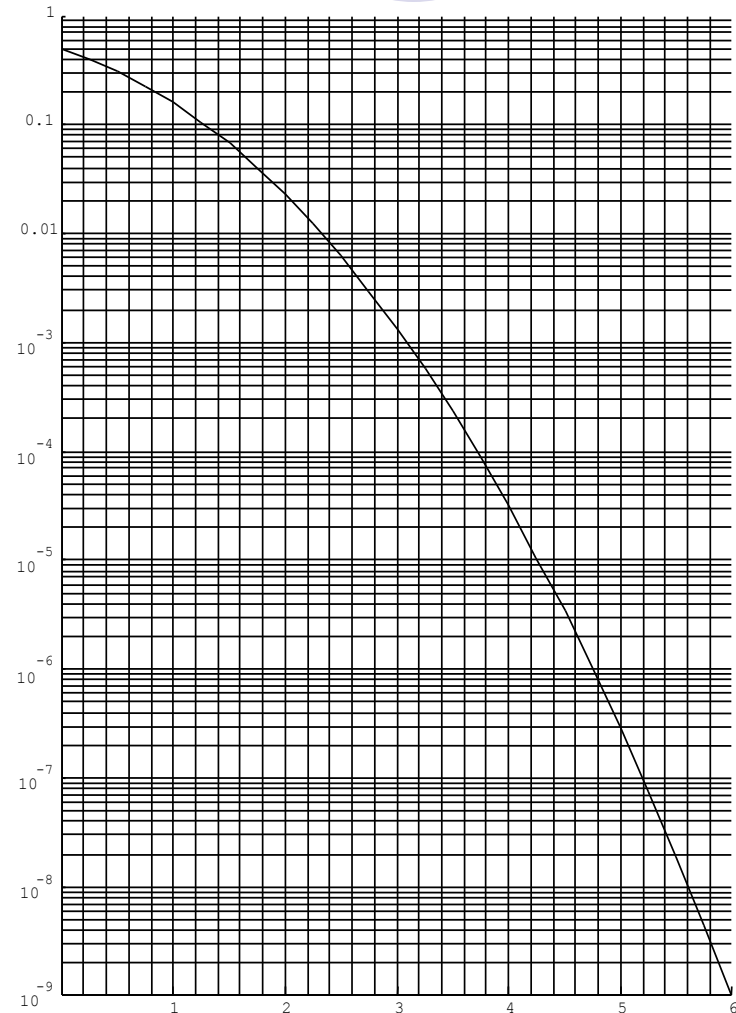
- Εφόσον $PL(d)$ είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την λογαριθμική-κανονική κατανομή, το ίδιο ισχύει και για την ισχύ $P_r(d)$:

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

- 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, δηλαδή:

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

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



Προσδιορισμός Περιοχής Κάλυψης

- 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 U για το οποίο η στάθμη σήματος υπερβαίνει το κατώφλι P_{min} αποδεικνύεται ότι δίδεται από την σχέση:

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

Εμπειρικά Μοντέλα Διάδοσης

- Το μοντέλο των Okumura-Hata χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της στάθμης σήματος σε αστικές και περιαστικές περιοχές.
 - Συχνοτική περιοχή εφαρμογής: 150MHz – 1500 MHz
 - Ύψος κεραίας σταθμού βάσης: 30m – 200m
 - Ύψος κεραίας κινητού τηλεφώνου: 1m – 10m
 - Το μοντέλο αυτό είναι ιδιαίτερα αξιόπιστο για σχετικά μεγάλες κυψέλες ($d > 1km$), αλλά δεν είναι κατάλληλο για την εκτίμηση διάδοσης σε κυψέλες μικρού μεγέθους.
- Το μοντέλο COST-231, επέκταση του μοντέλου Okumura-Hata
 - Συχνοτική περιοχή εφαρμογής: 1.5GHz – 2GHz
 - Ύψος κεραίας σταθμού βάσης: 30m – 200m
 - Ύψος κεραίας κινητού τηλεφώνου: 1m – 10m
 - Απόσταση εφαρμογής $d > 1km$.
- Το μοντέλο των Walfisch και Bertoni
 - Λαμβάνει υπόψη του τα κτίρια και τις κορυφές τους και εκτιμά απώλειες περίθλασης
 - Κατάλληλο για μικρού μεγέθους κυψέλες σε αστικό περιβάλλον

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο 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 **τηλεϋπηρεσίες (teleservices)** και **υπηρεσίες δεδομένων (data services)**.
- Στις τηλεϋπηρεσίες 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.

Διαθέσιμες Υπηρεσίες του GSM

- 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.

Κάρτα SIM

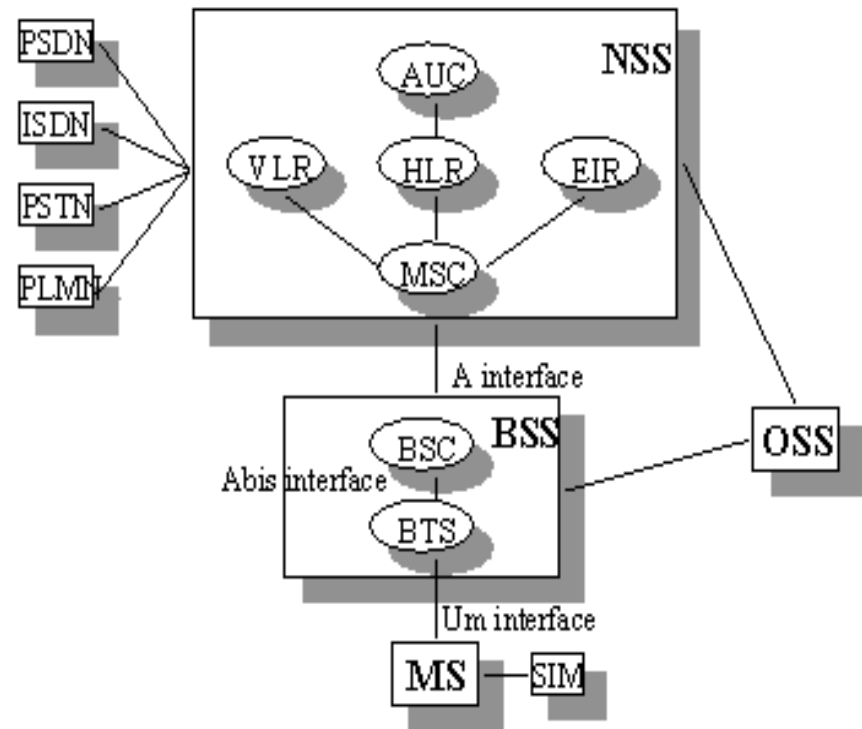
- Ένα ιδιαίτερα σπουδαίο χαρακτηριστικό του προτύπου GSM είναι η κάρτα ταυτότητας συνδρομητή (Subscriber Identity Module – SIM), που είναι ουσιαστικά ένα στοιχείο μνήμης που αποθηκεύει τον αριθμό ταυτότητας του συνδρομητή, τα δίκτυα και τις χώρες όπου ο συνδρομητής έχει την δυνατότητα να εξυπηρετηθεί, 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.

Κρυπτογράφηση στο GSM

- 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.

Αρχιτεκτονική του 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.



Υποσυστήματα του 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.

Διεπαφές στο GSM

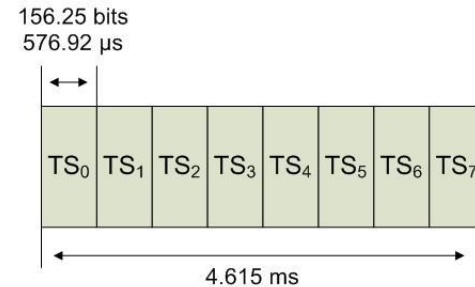
- Η διεπαφή που συνδέει ένα σταθμό βάσης (Base Transceiver Station – BTS) σε ένα BSC ονομάζεται **Abis-διεπαφή**. Η Abis-διεπαφή μεταφέρει τηλεπικοινωνιακή κίνηση και δεδομένα ελέγχου και είναι προτυποποιημένη από το GSM. Έτσι BTS και BSS εξοπλισμός που προέρχεται από διαφορετικούς κατασκευαστές μπορεί 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 BSS, 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 ασύρματο τμήμα του GSM

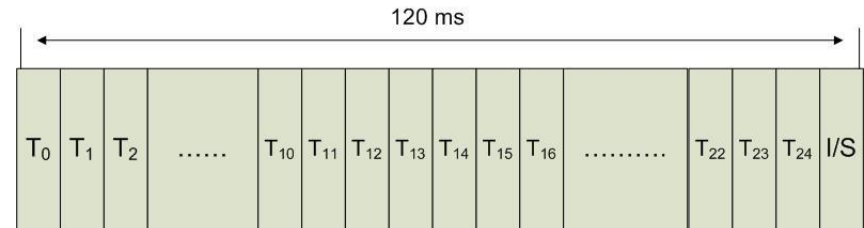
- Το GSM αξιοποιεί δύο ζώνες συχνοτήτων εύρους ζώνης 2x35MHz (GSM) και 2x75MHz (DCS) η καθεμιά για την υλοποίηση δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι ζώνες 880-915MHz και 1710-1785MHz χρησιμοποιούνται για την ανοδική ζεύξη από το χρήστη προς το σταθμό βάσης, και οι ζώνες 925-960MHz και 1805-1880MHz για την 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(GSM) και 95MHz (DCS), αντίστοιχα.
- 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)**.

Δομή Πλαισίου Ομιλίας 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



$TS_n : n^{th}$ Time Slot
(Normal) Speech Multiframe = 26 TDMA frames



$T_n : n^{th}$ TCH frame
S : Slow Associated Control Channel frame
I : Idle frame

Κανάλια στο 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).

Λογικά Κανάλια στο GSM

- 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 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 σηματοδότησης και συγχρονισμού μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού τηλεφώνου.

Λογικά Κανάλια στο GSM (Συνέχεια)

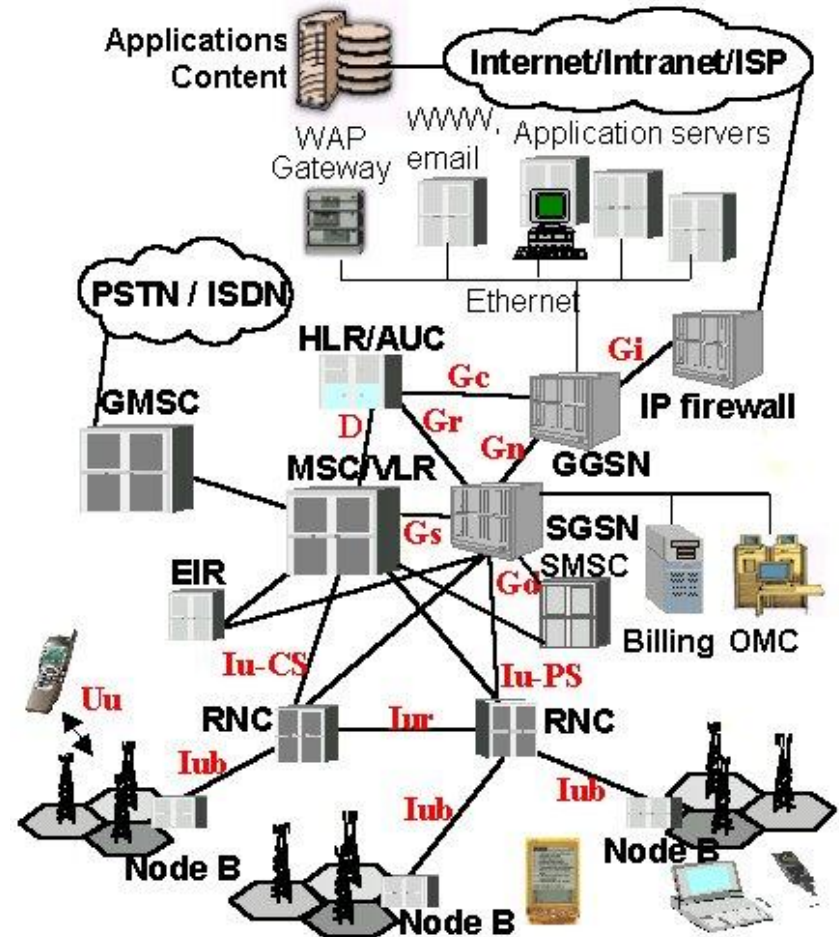
- Διάφοροι τύποι καναλιών ελέγχου προδιαγράφονται ξεχωριστά για την ανοδική ή την καθοδική ζεύξη. Υπάρχουν έξη τύποι καναλιών κίνησης που προδιαγράφονται στο GSM και ακόμη περισσότεροι καναλιών ελέγχου.
- Η αναλυτική περιγραφή των τύπων καναλιών, καθώς και τεχνικές λεπτομέρειες που αφορούν στις διεπαφές, 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 2ης και 3ης γενιάς.

Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο UMTS

- Η ευρωπαϊκή αντίληψη για την υλοποίηση συστημάτων κινητών επικοινωνιών 3ης 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.

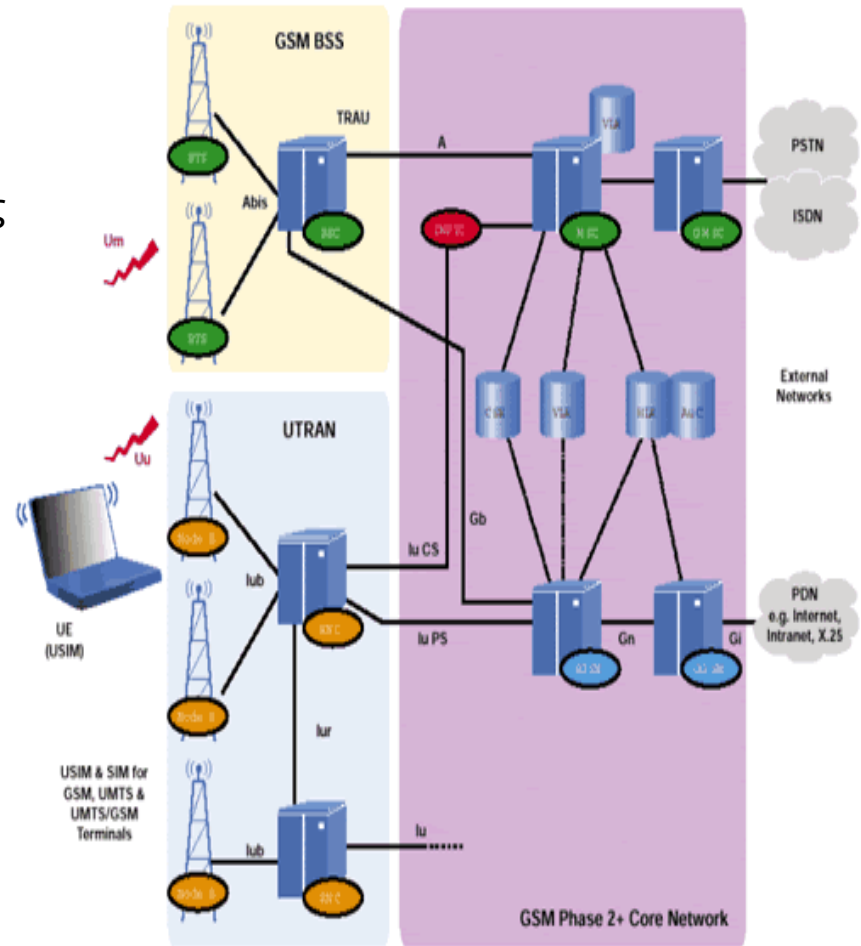
Αρχιτεκτονική του UMTS

- 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).



Αρχιτεκτονική του UMTS (Συνέχεια)

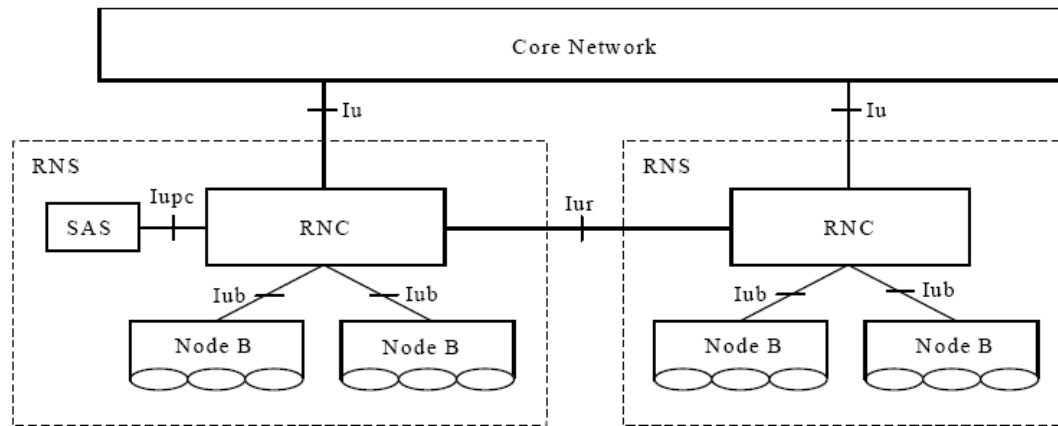
- Η κύρια λειτουργία του Core Network είναι η μεταγωγή, δρομολόγηση και διακίνηση της κίνησης χρηστών. Επίσης το Core network περιέχει βάσεις δεδομένων και λειτουργίες διαχείρισης δικτύου. Η βασική αρχιτεκτονική του UMTS βασίζεται στο δίκτυο GSM με GPRS. Βεβαίως, όλος ο εξοπλισμός πρέπει να τροποποιηθεί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



Επίγειο Ασύρματο Δίκτυο Πρόσβασης (UTRAN)

- 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.

Αρχιτεκτονική του 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 Iu χρησιμοποιείται για την σύνδεση του Node-B με τον κινητό σταθμό (UE).

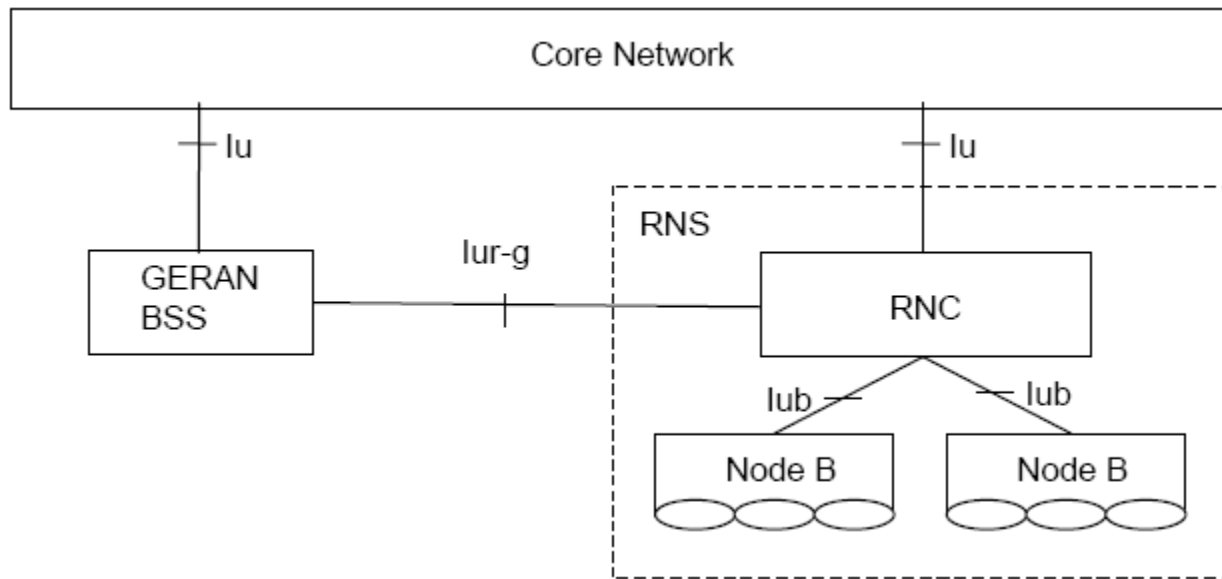
Node-B

- 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.

Radio Network Controller (RNC)

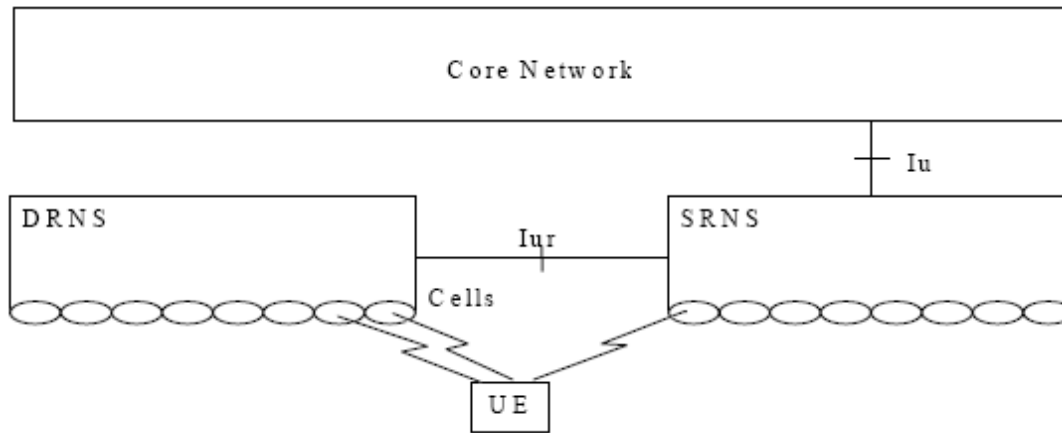
- Ο RNC ο οποίος υποστηρίζει κυψέλες TDD δύναται να υποστηρίζει μόνο μια ή περισσότερες επιλογές ακολουθίας διασποράς.
- Ο RNC χειρίζεται τα ζητήματα περιαγωγής που απαιτούν αποστολή σηματοδοσίας προς τον UE. Ένας RNC μπορεί να έχει την δυνατότητα λειτουργίας συνδυασμού/διαχωρισμού προκειμένου να υποστηρίξει 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.

Διασύνδεση GSM και UTRAN



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

Service και Drift RNS



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

Το φυσικό στρώμα του UTRA

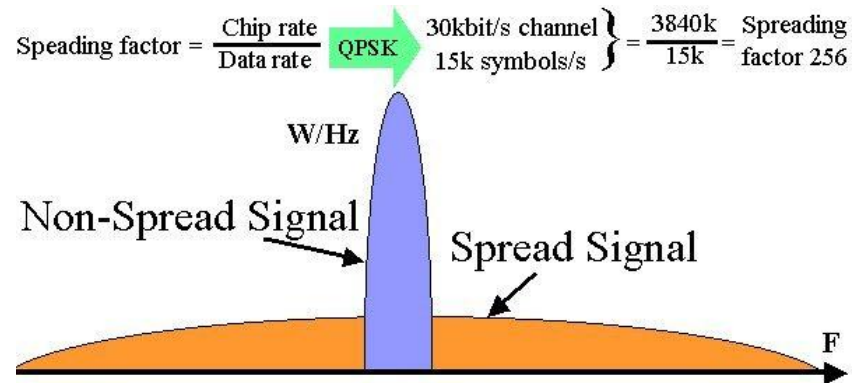
- Η τεχνική της πολλαπλής πρόσβασης με κώδικα (Coded Division Multiple Access – CDMA) αποτελεί την τεχνολογία στην οποία βασίζονται τα συστήματα κινητών επικοινωνιών 3ης γενιάς. Οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί ακολουθίας διασποράς για TDD πρωτόκολλο είναι 7.68Mcps, 3.84Mcps και 1.28Mcps, ενώ για FDD είναι 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.

Συχνότητες για το UMTS

- 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)

Τεχνική 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.
- Στα σήματα διασποράς φάσματος ο παράγοντας διασποράς ή εξάπλωσης φάσματος (spreading factor – SF) δίδεται από τη σχέση **$SF = W/R$** .

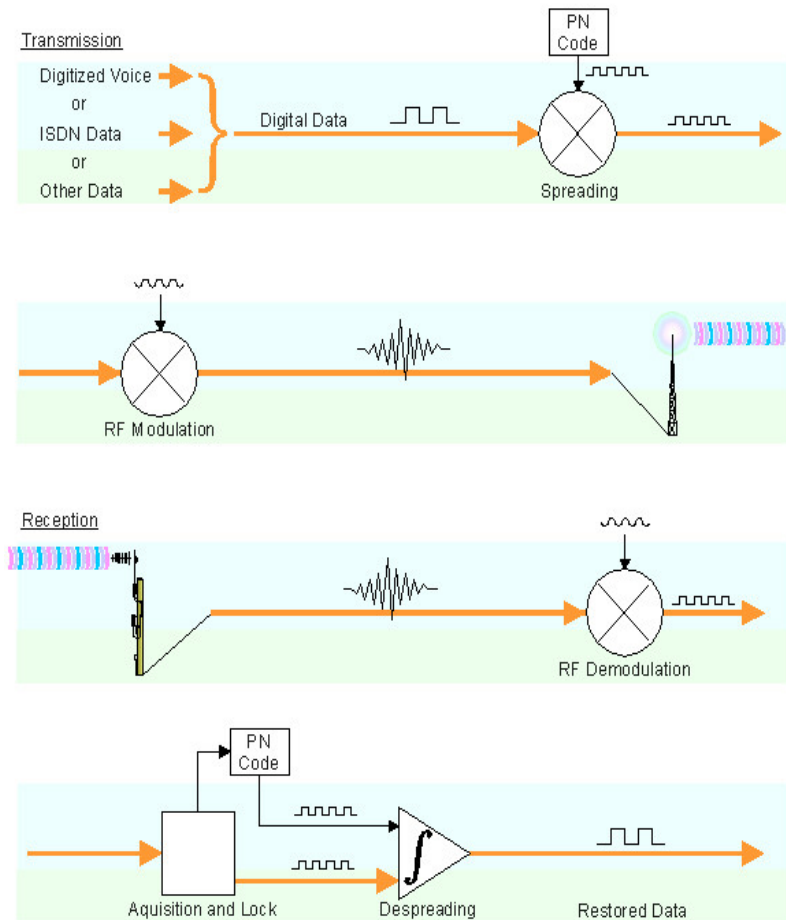


Ιδιότητες συστημάτων επικοινωνιών διασποράς φάσματος

- 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 ψευδο-τυχαίος. Εμφανίζεται ως τυχαίος, αλλά στην ουσία είναι καθορισμένος, έτσι ώστε ο δέκτης να μπορέσει να τον αναπαράγει για σύγχρονη ανίχνευση. Ο ψευδο-τυχαίος κώδικας ονομάζεται επίσης και ψευδο-θόρυβος (**pseudo-noise – PN**).

Μετάδοση και Λήψη με Τεχνική Διασποράς Φάσματος

- 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
- 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 εξάγονται τα δεδομένα της πληροφορίας.

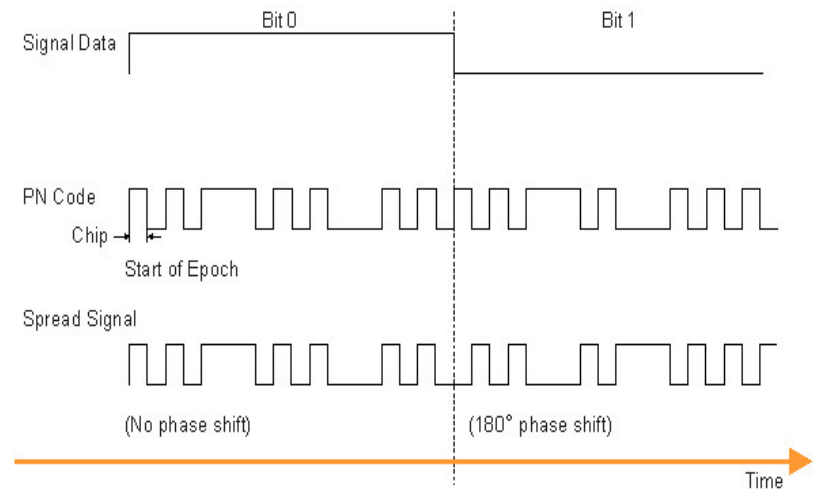


Κέρδος Επεξεργασίας

- Αποδεικνύεται, ότι ο παράγοντας διασποράς φάσματος είναι περίπου ίσος με το επιτυγχανόμενο κέρδος στο λόγο σήματος προς θόρυβο στο δέκτη αναφορικά στην ίδια πιθανότητα εμφάνισης σφάλματος (BER). Το επιτυγχανόμενο 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**).

Διασπορά φάσματος απευθείας ακολουθίας

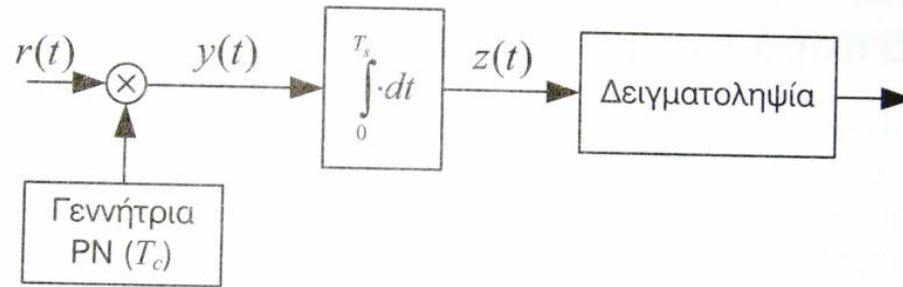
- Σε αυτήν την τεχνική το σήμα της πληροφορίας $s(t)$ πολλαπλασιάζεται με τον κώδικα διασποράς $s_c(t)$, που είναι ανεξάρτητος από το σήμα της πληροφορίας.
- Ο κώδικας διασποράς αποτελείται από διαδοχικούς ορθογωνικούς παλμούς (chips) με πλάτος ± 1 και πολύ μικρή χρονική διάρκεια T_c (chip interval) 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 .



Φάσμα Διασπαρμένου Σήματος

- 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.
- Αυτό καθίσταται δυνατό με τη 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, δηλαδή: $F\{s_c(t) \cdot s(t)\} = S_c(f) * S(f)$. Επομένως, το φάσμα του σήματος διασποράς καθορίζεται ουσιαστικά από το φάσμα του κώδικα διασποράς, δηλαδή $B_{DS} \approx B_c$.

Ανάκτηση Πληροφορίας



- Η αντίστροφη διαδικασία ακολουθείται στο δέκτη προκειμένου να ανακτήσουμε το σήμα της πληροφορίας.

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

- Ο κώδικας διασποράς είναι ψευδο-τυχαίος και έχει επιλεγεί έτσι ώστε να εμφανίζει χαρακτηριστικά λευκού θορύβου, έτσι ο όρος $n_c(t)$ θα παρουσιάζει επίσης χαρακτηριστικά λευκού θορύβου και επομένως:

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

Απόρριψη Παρεμβολής Στενής Ζώνης

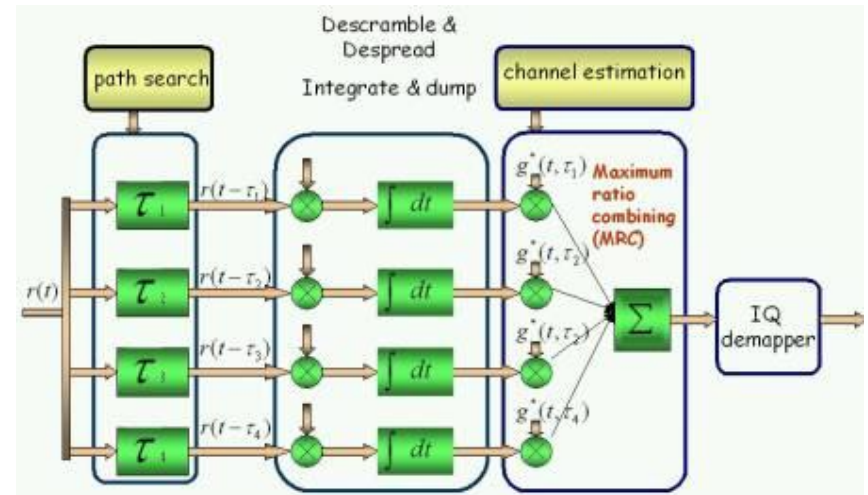
- Εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί ότι ο πολλαπλασιασμός του εισερχόμενου σήματος στο δέκτη με την κώδικα διασποράς δύναται να λειτουργήσει θετικά απορρίπτοντας ενδεχόμενες παρεμβολές στενής ζώνης.
- Πράγματι, αν το σήμα παρεμβολής στενής ζώνης είναι $s_i(t)$ τότε το γινόμενο $s_i(t)s_c(t)=n_i(t)$ παρουσιάζει 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.

Πολυοδευτική Διάδοση & 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.

Τυπική Δομή Δέκτη RAKE

- Στο Σχήμα 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 $g(t, \tau_i)$.



Λειτουργία τυπικού δέκτη RAKE

- 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 οδεύση σήματος, που τελικά θα συνδυαστεί κατάλληλα στον δέκτη RAKE.
- **Αποδιασπορά (despreading):** Τα αποκωδικογραφημένα δεδομένα κάθε οδεύσης 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.
- **Συνδυασμός (combining):** 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).
- **Ανίχνευση (detection):** Τέλος, οι συνδυασμένες έξοδοι στέλνονται σε ένα απλό κύκλωμα ανίχνευσης προκειμένου να εξαχθούν τα bits της πληροφορίας.

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:

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

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

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

- Αν 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 καθόσον $E_b = P_S/R$ και $J_0 = P_J/W$:

$$P_b = Q\left(\sqrt{2\frac{W}{R} \frac{1}{P_J/P_S}}\right)$$

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.

- 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 $G_p = R_c \cdot d_{min}$, όπου R_c είναι ο ρυθμός κωδικοποίησης και d_{min} η ελάχιστη απόσταση Hamming του κώδικα. Τότε:

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

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:

$$\frac{P_s}{P_J} = \frac{P_s}{(N_u - 1) \cdot P_s} = \frac{1}{N_u - 1}$$

- Έτσι, η πιθανότητα σφάλματος θα είναι:

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

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

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

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

Έλεγχος Ισχύος στο DS-CDMA

- 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.

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**)

Έλεγχος Ισχύος Open Loop

- 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).

Έλεγχος Ισχύος Inner Loop στο UE

- 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 $SIR_{est} > SIR_{target}$ τότε η εντολή TPC που μεταδίδεται είναι "0", ενώ εάν $SIR_{est} < SIR_{target}$ 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.

Έλεγχος Ισχύος Inner Loop στο DL

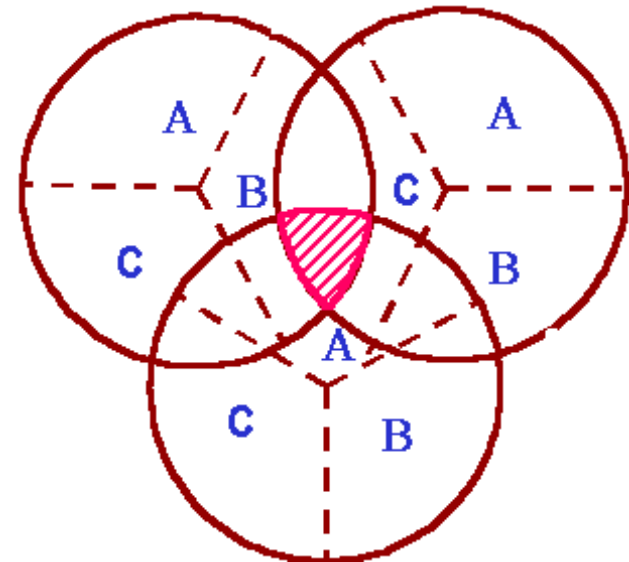
- Η μεταδιδόμενη ισχύς των καθοδικών καναλιών καθορίζεται από το δίκτυο. Το βήμα ελέγχου της ισχύος δύναται να λάβει τις ακόλουθες τέσσερις τιμές: 0.5, 1, 1.5 ή 2 dB. Για το UTRAN είναι υποχρεωτικό να υποστηρίζει βήμα του 1 dB, ενώ για τα άλλα η υποστήριξη είναι προαιρετική. Το UE παράγει TPC εντολές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

Έλεγχος Ισχύος Outer Loop

- 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.

Κλασική και Ήπια Μεταπομπή

- 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**).

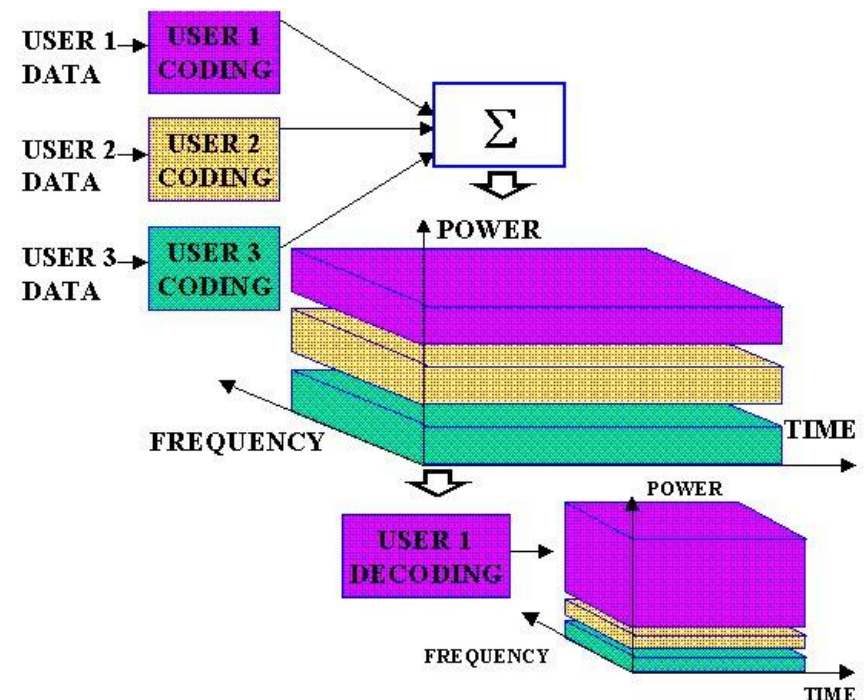


Είδη Μεταπομπής στο UMTS

- 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**).

Διασπορά Φάσματος 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.



Παράδειγμα Διασποράς και Αποδιασποράς σε Σύστημα CDMA (1)

- 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 $d1t[10110]$ και $d2t[11001]$. Οι χρησιμοποιούμενοι ασυσχέτιστοι (ορθογωνικοί) κωδικοί διασποράς είναι $sc1[1100]$ και $sc2[1001]$, 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 $d1t[1-111-1]$, $d2t[11-1-11]$, $sc1[11-1-1]$ και $sc2[1-1-11]$. Το αποτέλεσμα της διασποράς του συρμού πληροφορίας $d1$ είναι $S1[-1-11111-1-1-1-111-1-11111-1-1]$ και του $d2$ 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 $S1+S2$.

Παράδειγμα Διασποράς και Αποδιασποράς σε Σύστημα CDMA (2)

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	-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	-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	
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	

Παράδειγμα Διασποράς και Αποδιασποράς σε Σύστημα CDMA (3)

- 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 $sc1$ στο δέκτη 1 παράγει την ακολουθία $DS1[20200-20-2020202020-20-2]$, ενώ ο πολλαπλασιασμός της $S1+S2$ με τον κώδικα $sc2$ στο δέκτη 2 παράγει την ακολουθία $DS2[202002020-20-20-20-20202]$.
- Ολοκληρώνοντας τις $DS1$ και $DS2$ για χρονική περίοδο T_b ίση με τη διάρκεια του συμβόλου της πληροφορίας, προκύπτουν τελικά οι ακολουθίες δεδομένων $d1r[4-444-4]$ και $d2r[44-4-44]$, οι οποίες αντιστοιχούν ακριβώς στα σύμβολα που απέστειλε ο πομπός.
- 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.

Πλήθος Χρηστών σε Κυψέλη UMTS

- 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:

$$N \approx \frac{G_p}{E_b/N_0}$$

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

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

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 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.

Κώδικες 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 σηματοδότησης 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**).

Κώδικες Διαυλοποίησης

- 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 παράγοντα διασποράς, για τον οποίο ισχύει $SF=2k$, $k=0, \dots, 8$, επιλέγεται και ο κατάλληλος κώδικας 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**).

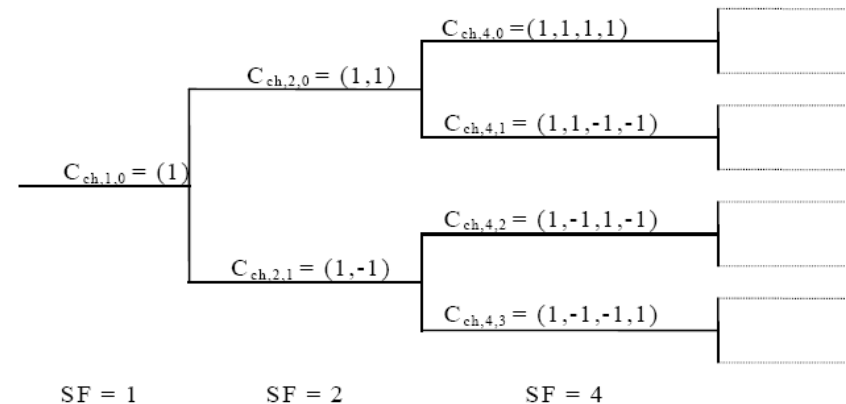
Παραγωγή κωδικών OVVSF

- 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. Η μέθοδος παραγωγής του κώδικα διαυλοποίησης ορίζεται από τη σχέση:

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

$$\begin{bmatrix} C_{ch,2,0} \\ C_{ch,2,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{ch,0,1} & C_{ch,0,1} \\ C_{ch,0,1} & -C_{ch,0,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

- Αν ένας από τους κώδικες OVVSF 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.



Ρυθμός Μετάδοσης Πληροφορίας στο UMTS

- Ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας στο UL και DL συναρτήσεσι του SF μπορεί να προσδιοριστεί από τη γενική σχέση:

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

- 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.

Κώδικες Περίπλεξης στο UMTS

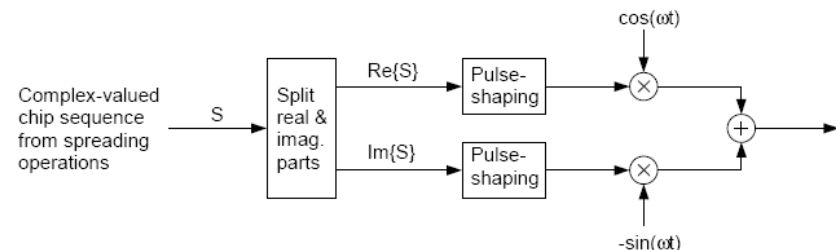
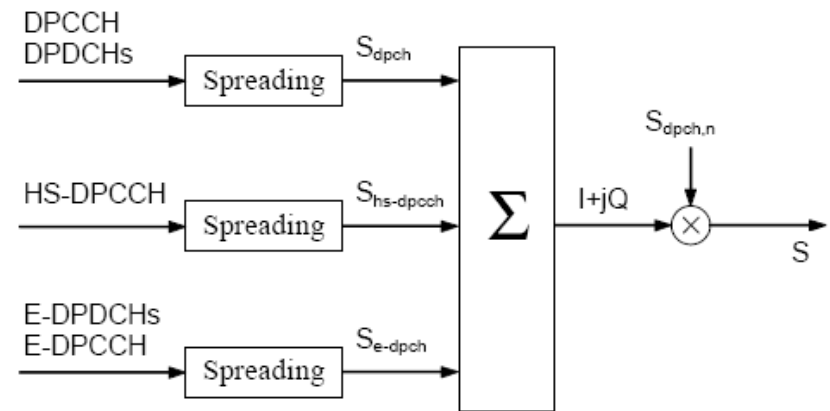
- Προκειμένου να αναγνωρισθεί το Node-B στο DL και το UE στο UL, εισάγεται ένας επιπλέον κώδικας ο οποίος καλείται κώδικας περίπλεξης (scrambling code), ο οποίος πολλαπλασιάζει το διεσπαρμένο σήμα. Με την εφαρμογή αυτού του κώδικα δεν προκαλείται επιπλέον διασπορά του σήματος, απλά χρησιμοποιείται για 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.

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.

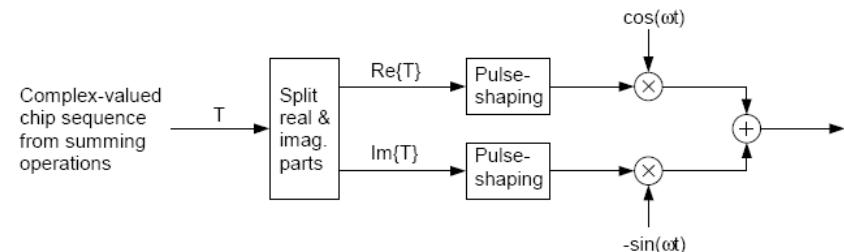
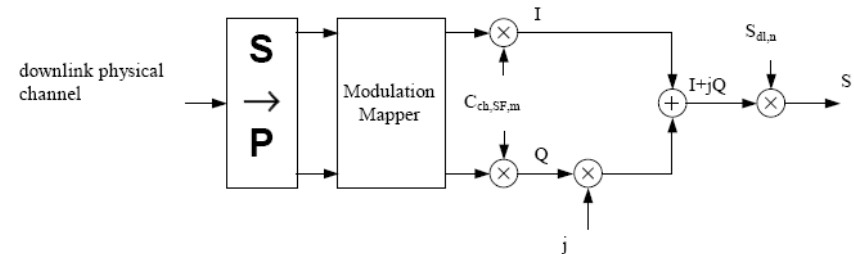
Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση στην Ανοδική Ζεύξη (UL) του UMTS (Συνέχεια)

- Στο πάνω Σχήμα 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.
- 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, οι παραγόμενοι μιγαδικοί συρμοί S_{dpch} , $S_{hs-dpccch}$ και $S_{e-dpccch}$ 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 ραδιοπλάισια, 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 κάτω Σχήμα. Ο ρυθμός διαμόρφωσης chip είναι 3.84Mcps.



Κωδικοποίηση και Διαμόρφωση στην Καθοδική Ζεύξη (DL) του UMTS

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



Σύνοψη Τεχνικών Χαρακτηριστικών στο FDD του UMTS

- **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

Σύνοψη Τεχνικών Χαρακτηριστικών στο FDD του UMTS (Συνέχεια)

- **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

Σύνοψη Τεχνικών Χαρακτηριστικών στο TDD του UMTS

- **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 or 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

Σύνοψη Τεχνικών Χαρακτηριστικών στο TDD του UMTS (Συνέχεια)

- **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

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 Ζεύξης 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 (Erlang/km²) 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.
- Στην ακόλουθη διαφάνεια 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.

TX	
Mobile max power = 0.125W (dBm)	21,0
Body loss - Antenna gain (dB)	2,0
EIRP (dBm)	19,0
RX	
BTS noise density (dBm/Hz) = Thermal noise density + BTS noise figure	-167,8
RX noise power (dBm) = $-167.8 + 10 \cdot \log(3840000)$	-102,0
Interference margin (dB)	3,0
RX interference power (dBm) = $10 \cdot \text{LOG}(10^{(-102+3)/10} - 10^{(-102/10)})$	-102,0
Noise & interference (dBm) = $10 \cdot \text{LOG}(10^{(-102)/10} + 10^{(-102/10)})$	-99,0
Process gain (dB), 12.2k voice = $10 \cdot \log(3840/12.2)$	25,0
Required Eb/No for speech (dB)	5,0
Antenna gain (dBi)	17,0
Cable and connector losses (dB)	3,0
Fast fading margin (dB) = slow moving mobile	4,0
RX sensitivity (dBm)	-129,0
Total available path loss (dB)	148,0
Dimensioning	
Log normal fading margin (dB)	7,00
Indoor / In-vehicle loss (dB)	0,00
Soft handover gain (dB)	3,00
Cell edge target propagation loss (dB)	144,0
Okamura-Hata cell range (km) $L = 137.4 + 35.2 \text{LOG}(R)$	1,54

Χρήσιμες Αναφορές & Ιστοσελίδες

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