

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
(Τ.Ε.Ι.) ΛΑΜΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ**

ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

**ΜΑΘΗΜΑ: «*ΚΙΝΗΤΕΣ ΚΑΙ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ*»
(ΘΕΩΡΙΑ)**

**Δρ. ΒΑΡΖΑΚΑΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΛΑΜΙΑ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΤΜΗΜΑ Α: ΚΙΝΗΤΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Κεφάλαιο 1^ο ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ-ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

- 1.1 Γενικά
- 1.2 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών κινητών
- 1.3 Βασικά μέρη κυψελωτού συστήματος επικοινωνιών κινητών
- 1.4 Κυψελωτή δομή
- 1.5 Παράμετροι σχεδίασης κυψελωτών συστημάτων
- 1.6 Τηλεφωνική κίνηση
- 1.7 Συσχέτιση παραμέτρων σχεδίασης κυψελωτών συστημάτων
- 1.8 Ομαδοποίηση κυψελών
- 1.9 Ζευξιμότητα
- 1.10 Εντοπισμός
- 1.11 Μεταπομπή
- 1.12 Λόγος επαναχρησιμοποίησης καναλιού

Κεφάλαιο 2^ο ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

- 2.1 Γενικά
- 2.2 Μοντέλα πολυδιάδεσης διακριτού αριθμού κυμάτων
- 2.3 Στατιστική περιγραφή καναλιού πολλαπλών διαδρομών
- 2.4 Στατιστική περιγραφή της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος
- 2.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη καναλιού πολλαπλών διαδρομών

Κεφάλαιο 3^ο ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΥΨΕΛΩΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

- 3.1 Φασματική απόδοση κυψελωτών συστημάτων
- 3.2 Ραδιοχωρητικότητα
- 3.3 Χρησιμοποίηση καναλιών διαφορετικού εύρους ζώνης συχνοτήτων
- 3.4 Διαίρεση κυψελών
- 3.5 Εκπεμπόμενη ισχύς πριν και μετά τη διαίρεση των κυψελών
- 3.6 Προβλήματα παρεμβολών στα συστήματα επικοινωνιών κινητών
- 3.7 Παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης καναλιών
- 3.8 Υπολογισμός του λόγου C/I για την περίπτωση παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης συχνότητας
- 3.9 Κριτήριο παροχής ποιότητας υπηρεσιών

3.10 Σχεδίαση συστήματος με χρήση ομοιοκατευθυντικών κεραιών σε συνθήκες χειρότερης περίπτωσης

3.11 Σχεδίαση συστήματος με χρήση κατευθυντικών κεραιών

3.12 Χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών σε σύστημα με επτά κυψέλες ανά cluster

3.13 Χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών σε σύστημα με τέσσερις κυψέλες ανά cluster

3.14 Σύγκριση κυψελωτών συστημάτων με $K=7$ και $K=4$

3.15 Συμπεράσματα από τη χρήση κατευθυντικών κεραιών

3.16 Παρεμβολές γειτονικών σε συχνότητα καναλιών

3.17 Διαφωνία

3.18 Παρεμβολή ενδοδιαμόρφωσης

3.19 Αλληλοπαρεμβολή συμβόλων

3.20 Μέθοδοι διαφορικής λήψης

3.21 Διαφορική λήψη συχνότητας

3.22 Τεχνικές συνδυασμού σημάτων διαφορικής λήψης

Κεφάλαιο 4^ο ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΧΩΡΗΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

4.1 Μέθοδος καθορισμένης κατανομής των καναλιών

4.2 Μέθοδος δυναμικής κατανομής των καναλιών

4.3 Συστήματα διάχυτου φάσματος - Τεχνική πολυπλεξίας διαίρεσης κωδίκων

4.4 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών πολλαπλής προσπέλασης FDMA

4.5 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών πολλαπλής προσπέλασης TDMA

4.6 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών πολλαπλής προσπέλασης CDMA

Κεφάλαιο 5^ο ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

5.1 Ψηφιακά κυψελωτά συστήματα

5.2 Το σύστημα GSM και το DCS 1800

5.3 Ασύρματα συστήματα (cordless)

5.4 Σύγκλιση συστημάτων-UMTS-UTRAN

5.5 WCDMA

5.6 Βασικά χαρακτηριστικά του WCDMA

5.7 WLAN

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Π 1. Βιολογική επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Π 2. Θερμικά αποτελέσματα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Π1. Το σύστημα GSM

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Π1. General Packet Radio Service (GPRS)

Π2. Η Αρχιτεκτονική του GPRS

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ UMTS

Π.1. Γενικά

Π2. Η αρχιτεκτονική του UMTS

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε GSM 900-DCS 1800

Π.1. Το σύστημα GSM 900

Π.2. Στόχοι

Π.3. Κωδικοποίηση

Π.4. Διαμόρφωση

Π. 5. Το σύστημα DCS 1800

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΤΜΗΜΑ Β: ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ (ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ)

1. Ανάλυση Ραδιοζεύξεων
2. Ισχύς λαμβανομένου σήματος
3. Υπολογισμός ζεύξης up-link
4. Υπολογισμός ζεύξης down-link

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι παρούσες Συμπληρωματικές Διδακτικές Σημειώσεις έχουν γραφτεί για τις ανάγκες του μαθήματος “**Κινητές και Δορυφορικές Επικοινωνίες**”, του Νέου Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Ηλεκτρονικής του Τ.Ε.Ι. Λαμίας. Τα θέματα που παρουσιάζονται στις σημειώσεις αυτές είναι σύγχρονα και εκτενή γι’ αυτό και αποτελούν μέχρι σήμερα αντικείμενα έρευνας και μελέτης. Συνεπώς οι Σημειώσεις αυτές αποτελούν συνολικά μία εισαγωγή στα θέματα των Κινητών και Δορυφορικών Επικοινωνιών και έτσι μια πιο ειδική μελέτη ενός συγκεκριμένου θέματος, απαιτεί ενημέρωση μέσω της σχετικής βιβλιογραφίας. Η συγγραφή αυτών των Συμπληρωματικών Διδακτικών Σημειώσεων κρίθηκε απαραίτητη διότι σε αυτές παρουσιάζονται επιπλέον στοιχεία της αντίστοιχης θεωρίας και περιγραφή πρακτικών συστημάτων συμπληρώνοντας έτσι το βασικό σύγγραμμα του μαθήματος.

Θα πρέπει να σημειωθεί από το συγγραφέα, ότι η επέκταση, οι τυχόν διορθώσεις και υποδείξεις στις παρούσες Σημειώσεις είναι πάντα ευπρόσδεκτες από τους συναδέλφους και τους φοιτητές του Τμήματός μας.

Δρ. Βαρζάκας Παναγιώτης
Επίκουρος Καθηγητής
Προϊστάμενος Τμήματος Ηλεκτρονικής
Τ.Ε.Ι. Λαμίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ-ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

1.1 Γενικά

Λέγοντας *συστήματα επικοινωνιών κινητών* (mobile communications systems) εννοούμε οποιαδήποτε μορφή οργανωμένης επικοινωνιακής σύνδεσης μεταξύ δυο σημείων που βρίσκονται είτε σε σχετική κίνηση είτε εμφανίζονται ακίνητα σε διαφορετικούς τόπους και σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ο παραπάνω ορισμός περιλαμβάνει οποιαδήποτε από τα παρακάτω σχήματα επικοινωνίας:

- ακίνητο-κινητό
- κινητό-κινητό
- κινητό-ακίνητο
- κινητό-ακίνητο-κινητό.

Στην κατηγορία των κινητών σταθμών μπορούμε να θεωρήσουμε το αυτοκίνητο, το πλοίο, το αεροπλάνο, το δορυφόρο και τον ίδιο τον άνθρωπο. Σ' αυτό το σημείο ας αναφερθούμε λίγο στο παρελθόν. Η ιστορία της κινητής τηλεπικοινωνίας αρχίζει βέβαια με τα πειράματα των πρωτοπόρων της έρευνας για ασύρματη επικοινωνία. Τα πειράματα του Hertz την δεκαετία του 1880 έκαναν φανερό ότι η πραγματοποίηση επικοινωνίας μεταξύ μη σταθερών σημείων (κινουμένων) χωρίς τη χρήση συρμάτων ήταν δυνατή. Ο Markoni υλοποίησε τις ιδέες του Hertz δίνοντας τον ασύρματο που πρωτοχρησιμοποιήθηκε στα πλοία.

Το 1921 η Αστυνομία του Detroit εγκατέστησε το πρώτο επίγειο κινητό ραδιοτηλεφωνικό σύστημα για την επικοινωνία των αστυνομικών αυτοκινήτων. Το ίδιο έκανε και η αστυνομία της Νέας Υόρκης το 1932. Τα παραπάνω συστήματα λειτουργούσαν στην περιοχή συχνοτήτων των 2MHz. Όμως η τεχνολογία εξελισσόταν και η ζήτηση συνεχώς αύξανε γι' αυτό και η αναζήτηση διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων γινόταν σε όλο και υψηλότερες συχνότητες. Έτσι το 1956 φτάνουμε γύρω στα 450MHz. Το 1978 δε με την εξελιγμένη υπηρεσία κινητής τηλεφωνίας AMPS (Advanced Mobile Phone Service) εισήχθησαν συχνότητες στην περιοχή των 850 MHz.

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι τα πρώτα συστήματα κινητής τηλεφωνίας (mobile telephony) όπως αυτό της Νέας Υόρκης το 1970, ήταν φτωχά όσο αφορά την εξυπηρέτηση των χρηστών. Έτσι δυο τέτοια συστήματα κάλυπταν συνολικά μια περιοχή ακτίνας 80 χιλιομέτρων και είχαν τα ονόματα MJ και MK. Το σύστημα MJ διέθετε 6 κανάλια τα οποία εξυπηρετούσαν 320 συνδρομητές (χρήστες) ενώ η λίστα αναμονής αποτελούνταν από 2400 υποψήφιους χρήστες. Το σύστημα MK διέθετε επίσης 6 κανάλια εξυπηρετώντας 225 χρήστες με άλλους 1300 χρήστες στη λίστα αναμονής. Έτσι ο μεγάλος αριθμός συνδρομητών

δημιουργούσε μεγάλη πιθανότητα απόρριψης της κλήσης κατά τις ώρες αιχμής. Μπορεί να υπολογιστεί ότι για μια μέση διάρκεια συνομιλίας 1,76 min, η πιθανότητα "κατειλημμένης γραμμής" B (blocking probability) είναι για το σύστημα MJ 50% ενώ για το σύστημα MK 30%.

Τα κλασικά (συμβατικά) συστήματα κινητής τηλεφωνίας είχαν σαν κύριο χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής τους, το ότι η κεραία του σταθμού βάσης (base station, cell site) ήταν τοποθετημένη όσο το δυνατό σε υψηλότερο σημείο, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη *ραδιοκάλυψη* (coverage) περιοχής χρησιμοποιώντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής από το σταθμό βάσης. Καθώς η ισχύς του πομπού του κινητού σταθμού είναι περιορισμένη, πρόσθετοι σταθμοί βάσης πρέπει να τοποθετηθούν για την επέκταση της ραδιοκάλυψης. Η χωρητικότητα των συστημάτων αυτών είναι περιορισμένη και συνεπώς η συνεχής αύξηση της τηλεφωνικής κίνησης σύντομα κατέστησε τα συστήματα αυτά ανεπαρκή.

Παράλληλα, σημαντικό πρόβλημα ενός συμβατικού συστήματος κινητής ραδιοεπικοινωνίας είναι ότι κάθε κανάλι χρησιμοποιείται ανά τηλεφωνική συνδιάλεξη που σημαίνει ότι δεν πραγματοποιείται αποδοτική διαχείριση των διαθέσιμων συχνοτήτων του συστήματος. Δηλαδή κάθε κανάλι μπορεί να εξυπηρετεί μόνο ένα χρήστη κάθε χρονική στιγμή σ' όλη τη γεωγραφική περιοχή κάλυψης του συστήματος. Η φασματική απόδοση (spectrum efficiency) M_0 ενός συμβατικού συστήματος (spectrum efficiency) αποτελεί το μέτρο της αποδοτικής χρησιμοποίησης των διαθέσιμων καναλιών του συστήματος και για την περίπτωση των συμβατικών συστημάτων ορίζεται ως εξής:

$$M_0 = \frac{\text{αριθμος χρηστων}}{\text{καναλια}}$$

(1.1)

Θα πρέπει να ειπωθεί ότι η φασματική απόδοση του συστήματος σχετίζεται άμεσα με τη *χωρητικότητα* ή *ραδιοχωρητικότητά* του. (radio capacity). Έτσι για το σύστημα MJ έχουμε 6 κανάλια με 320 χρήστες δηλ. $M_0=53$ χρήστες/κανάλι ενώ για το σύστημα MK έχουμε 6 κανάλια με 225 χρήστες δηλ. $M_0=37$ χρήστες/κανάλι.

Όπως είναι προφανές από τα προηγούμενα, οι σκοποί ενός σύγχρονου συστήματος κινητής τηλεφωνίας είναι οι παρακάτω:

- εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού χρηστών (συνδρομητών)
- αποδοτική χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων
- εξυπηρέτηση όλων των περιοχών μιας χώρας
- ποιότητα εξυπηρέτησης όμοια μ' αυτή των ενσύρματων τηλεφωνικών δικτύων
- δυνατότητα λειτουργίας ανεξάρτητα από τον αριθμό των συνδρομητών μιας περιοχής.

Για να ικανοποιηθούν όσο το δυνατό οι προηγούμενες απαιτήσεις προτάθηκαν λύσεις όπως:

- χρησιμοποίηση διαμόρφωσης μονής πλευρικής ζώνης (Single Side Band, SSB) με την οποία πετυχαίνεται διαμέριση του συνολικά διατιθέμενου εύρους ζώνης συχνοτήτων στο μέγιστο αριθμό καναλιών
- δημιουργία κυψελωτής δομής (cellular structure) στην οποία γίνεται χρήση διατάξεων κυψελών, μικρών σχετικά διαστάσεων σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα και επαναχρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές (παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και στην επαναχρησιμοποίηση των καναλιών των FM σε απομακρυσμένες μεταξύ τους γεωγραφικά πόλεις)
- χρησιμοποίηση ενός συστήματος διάχυτου φάσματος (spread spectrum system) στο οποίο επιτρέπεται η ταυτόχρονη χρήση του ίδιου φάσματος συχνοτήτων από όλους τους χρήστες του συστήματος αλλά με εφαρμογή διαφορετικής κωδικοποίησης (coding) των σημάτων των διαφορετικών χρηστών πριν την κοινή εκπομπή των σημάτων τους στο κανάλι επικοινωνίας.

Παρατηρώντας τα επιμέρους προηγούμενα προτεινόμενα συστήματα, σημειώνονται παρακάτω εν συντομία τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα τους. Η διαμόρφωση SSB λύνει το πρόβλημα αλλά προσωρινά. Οποιαδήποτε αποδοτική διαμέριση του διαθέσιμου φάσματος σε κανάλια και να πραγματοποιηθεί πάντα θα υπάρχει ένας μέγιστος αριθμός καναλιών ο οποίος κάποια στιγμή θα κορεσθεί λόγω της αυξημένης τηλεφωνικής ζήτησης. Τέλος, τα συστήματα διάχυτου φάσματος μπορούν να αντεπεξέλθουν στις μελλοντικές απαιτήσεις του δικτύου, μέσω της αύξησης του μήκους και του πλήθους των κωδικών που χρησιμοποιούνται σ' αυτά.

1.2 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών κινητών

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων συχνοτήτων, σε συνδυασμό με τη δραματική αύξηση των συνδρομητών, οδήγησαν στην ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων, που δίνει τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης (frequency re-use) των διαθέσιμων συχνοτήτων (καναλιών). Σ' ένα κυψελωτό σύστημα, η συνολική περιοχή κάλυψης του δικτύου χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές οι οποίες ονομάζονται *κυψέλες* (cells), κάθε μια από τις οποίες καλύπτεται από ένα σταθερός σταθμός βάσης. Στην πράξη, το ζητούμενο κατά το σχεδιασμό ενός κυψελωτού συστήματος είναι η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ραδιοκάλυψη, με όσο το δυνατό χαμηλότερο ύψος κεραίας σταθμού βάσης και μικρότερη ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης. Στόχος της σχεδίασης είναι η ελαχιστοποίηση των παρεμβολών (interference) και αντίστοιχα η μεγιστοποίηση του *συντελεστή επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων* (frequency-reuse factor). Το σχήμα των κυψελών καθώς

και τα αίτια που οδήγησαν στην εκλογή του σχήματος αυτού, αναπτύσσονται σε επόμενη παράγραφο.

1.3 Βασικά μέρη κυψελωτού συστήματος επικοινωνιών κινητών

Τα βασικά μέρη ενός κυψελωτού συστήματος επικοινωνιών κινητών είναι τα ακόλουθα:

- *κινητή μονάδα* (mobile unit)
- *σταθμός βάσης* (Base Station (BS), cell site)
- *γραφείο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας* (Mobile Telephone Switching Office, MTSO).

Η κινητή μονάδα είναι η κινητή τηλεφωνική συσκευή και αποτελείται από τη μονάδα ελέγχου, τον πομποδέκτη και την κεραία εκπομπής-λήψης. Ο σταθμός βάσης είναι το μέσο διασύνδεσης (interface) μεταξύ των κινητών μονάδων και του Μ.Τ.Σ.Ο. Αποτελείται από τη μονάδα ελέγχου, τον πομπο-δέκτη, την κεραία και από το τερματικό δεδομένων. Το γραφείο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (Μ.Τ.Σ.Ο.) είναι το κέντρο μεταγωγής δηλαδή η κεντρική διαχειριστική μονάδα των σταθμών βάσης των κυψελών του κυψελωτού συστήματος. Αποτελεί τη διασύνδεση με το σταθερό τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN) και είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των χρεώσεων των συνδρομητών. Ας δούμε συνοπτικά καθένα από τα μέρη αυτά:

Η κινητή μονάδα αποτελείται από μια μονάδα ελέγχου, έναν πομποδέκτη και μια κεραία. Ας δώσουμε κάποιες πληροφορίες για την κινητή μονάδα για την περίπτωση του πανευρωπαϊκού συστήματος κινητής τηλεφωνίας GSM (Group Special Mobile). Στο σύστημα GSM η κινητή μονάδα είναι μια συσκευή σχεδιασμένη για τη μετάδοση ψηφιακής πληροφορίας. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη χρησιμοποίηση ολοκληρωμένων ψηφιακών κυκλωμάτων σε μεγάλο ποσοστό (εκτός από το RF τμήμα). Ο κινητός σταθμός είναι πιο πολύπλοκος στην κατασκευή του από αυτόν που είναι εγκατεστημένος σε όχημα γιατί είναι υποχρεωμένος να λειτουργεί σε μικρή ισχύ μέσα σε κτίρια και σε διάφορα ύψη από το έδαφος.

Η ευαισθησία των κινητών σταθμών είναι της τάξης των -102 ως -104 dB. Όσον αφορά την κεραία του κινητού σταθμού πρέπει να είναι *ομοιοκατευθυντική* (πανκατευθυντική) (omnidirectional) και να είναι τοποθετημένη σε όσο το δυνατό υψηλότερο σημείο. Βέβαια ο δεύτερος περιορισμός είναι δύσκολο να ικανοποιηθεί για παράδειγμα στην περίπτωση ενός συνηθισμένου αυτοκινήτου.

Κατά την εκπομπή σήματος φωνής πραγματοποιείται ψηφιακή κωδικοποίηση, πρόσθεση *δυναδικών ψηφίων διορθώσεως σφάλματος* (error correction bits) στο κωδικοποιημένο σήμα και τέλος *κρυπτογράφηση* (encryption). Ακολουθεί η ψηφιακή διαμόρφωση και μετά από ενίσχυση ισχύος σε κατάλληλη στάθμη, το σήμα εκπέμπεται. Κατά τη λήψη, το σήμα διέρχεται πάλι μέσω του πομποδέκτη που διαθέτει και μεταγωγικές ιδιότητες επειδή η κινητή

μονάδα εκπέμπει και λαμβάνει σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Το λαμβανόμενο σήμα διερχόμενο από φίλτρα απομονώνεται από παρασιτικές συνιστώσες συχνότητας που προέρχονται από εκπομπές γειτονικών καναλιών. Οι εισερχόμενοι παλμοί οδηγούνται στον *εξισωτή καναλιού* (equalizer) στον οποίο πραγματοποιείται διόρθωση της μορφής τους, λόγω παραμόρφωσης από τις πολλαπλές ανακλάσεις μέσω του καναλιού, και αποδιαμορφώνεται σε δυαδικά ψηφία. Τέλος, πραγματοποιείται η αποκρυπτογράφηση και το σήμα οδηγείται στην τελική βαθμίδα εξόδου η οποία είναι ακουστικό ή τερματικό δεδομένων.

Ο σταθμός βάσης περιλαμβάνει μια *μονάδα κεντρικού έλεγχου* (Base Station Controller, BSC) και μια ή περισσότερες μονάδες *πομποδεκτών* (Base station Transceivers, TRX), τους *ζεύκτες* (combiners) και τις κεραίες εκπομπής. Σημειώνεται ότι υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της στάθμης ισχύος εξόδου του πομπού. Έτσι μπορεί εύκολα να ρυθμίζεται η περιοχή της ραδιοκάλυψης μέσω της εκπεμπόμενης ισχύος από το σταθμό βάσης.

Όσον αφορά την ευαισθησία των δεκτών του σταθμού βάσης αυτή θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη ώστε να είναι δυνατή η λήψη ακόμη και αν προέρχεται από πομπό μικρής ισχύος (π.χ χειρός). Τυπική τιμή ευαισθησίας για τους σταθμούς βάσης είναι τα -104 dBm.

Οι κεραίες εκπομπής τοποθετούνται συνήθως στο κέντρο των κυψελών. Βέβαια αυτό δεν είναι πάντα δυνατό λόγω φυσικών ή άλλων εμποδίων και η εκπομπή τους στο οριζόντιο επίπεδο γίνεται ισοτροπικά προς όλες τις διευθύνσεις γύρω απ' αυτές. Επειδή όμως η κεραία δεν εκπέμπει μια μονο συχνότητα αλλά μια περιοχή του φάσματος συχνοτήτων (για το σύστημα GSM από 890 ως 915 MHz) κατασκευάζονται συστήματα δίπολων που εκπέμπουν συνολικά με τη βοήθεια των ζευκτών (combiners). Η κεραία εκπομπής προσαρμόζεται μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου στον πομπό του σταθμού βάσης. Κατασκευαστικά, υπάρχουν διάφορα είδη κεραιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους σταθμούς βάσης στην περιοχή των 900 MHz. Τέτοια είναι τα συστήματα των διπόλων, διάφοροι τύποι λογαριθμικών κεραιών κ.λ.π.

Η διεισδυτική ικανότητα του εκπεμπόμενου σήματος μέσα σε κτίρια είναι ανάλογη με την ισχύ εκπομπής της κεραίας. Τα πειράματα πάντως που πραγματοποιήθηκαν στις συχνότητες VHF και UHF μέσα σε σήραγγες, σε υπόγεια και σε κτίρια από σίδηρο οδήγησαν στη χρήση "*καθόδων ακτινοβολίας*" (leaky feeder cables) για τη ραδιοκάλυψη τέτοιων χώρων. Μια "*κάθοδος ακτινοβολίας*" είναι ένα σύρμα που περιβάλλεται από πολυαιθυλένιο και εξωτερικά από περίβλημα χαλκού. Το περίβλημα έχει ειδικές σχισμές ώστε ακτινοβολία να δίνεται μέσω αυτών στο περιβάλλον. Τυπική απόσβεση για μια τέτοια κάθοδο ακτινοβολίας στα 900MHz με διάμετρο 8mm είναι 0.315dB/m. Όταν η ισχύς εκπομπής του σταθμού βάσης είναι μεγάλη (π.χ στην περίπτωση της *τηλεειδοποίησης* (paging)) δεν απαιτείται κάθοδος ακτινοβολίας.

1.4 Κυψελωτή δομή

Κατά τη σχεδίαση των κυψελών ενός κυψελωτού συστήματος, λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- η απαιτούμενη χωρητικότητα και η τηλεφωνική κίνηση της προς κάλυψη περιοχής
- ο αριθμός των διαθέσιμων καναλιών
- τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής που θα καλυφθεί
- τα πολεοδομικά και χωροταξικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

Κάθε κυψέλη του συστήματος οριοθετεί μια περιοχή με αυξημένη πιθανότητα ικανοποιητικής ραδιοκάλυψης. Το σχήμα της κυψέλης που ανταποκρίνεται καλύτερα στην προηγούμενη απαίτηση είναι αυτό του κανονικού πολυγώνου. Η ακανόνιστη τοποθέτηση των επίγειων σταθμών και το τυχαίο σχήμα των κυψελών δημιουργούν αρκετά πρακτικά προβλήματα. Έχει αποδειχθεί ότι όταν όλες οι κυψέλες έχουν το ίδιο σχημα βοηθούμαστε στη συστηματοποίηση της σχεδίασης και της κατασκευής του κυψελωτού συστήματος. Αν χρησιμοποιηθούν παν-κατευθυντικές (omnidirectional) κεραιές, στα αρχικά στάδια του συστήματος, τότε η περιοχή κάθε κυψέλης, ορισμένη από την περιφέρεια ενός σήματος σταθερού επιπέδου ισχύος, θα είναι περίπου κυκλική. Όμως ο κύκλος δεν είναι πρακτικός για τους σκοπούς της σχεδίασης αφού οποιαδήποτε και να είναι η διάταξη των κυψελών δημιουργούνται περιοχές που περιέχονται είτε σε πολλές κυψέλες (επικάλυψη περιοχών) είτε σε καμία κυψέλη (απώλεια ραδιοκάλυψης). Αντίθετα κάθε κανονικό πολύγωνο, προσεγγίζει το σχημα του κύκλου και τρία απ' αυτά, το ισόπλευρο τρίγωνο, το τετράγωνο και το κανονικό εξάγωνο μπορούν να καλύψουν ένα επίπεδο χωρίς να αφήνουν κενά ή να δημιουργούν τμήματα πολλαπλά καλυπτόμενα. Για οικονομικούς κυρίως λόγους, επιλέγεται τελικά το σχήμα του κανονικού εξαγώνου, καθώς αυτό απαιτεί τον μικρότερο αριθμό σταθμών βάσης.

1.5 Παράμετροι σχεδίασης κυψελωτών συστημάτων

Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη, κατά τη σχεδίαση κυψελωτών συστημάτων, είναι οι επόμενοι:

- η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων (καναλιών)
- οι παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης καναλιών (cochannel interference)
- ο απαιτούμενος λόγος ισχύος του φέροντος ως προς τη ισχύ των παρεμβολών (Carrier-to-Interference ratio, CIR)
- η λειτουργία της μεταπομπής (ή διαπομπής) (hand-off ή hand-over)
- η διαδικασία διάσπασης των κυψελών (cell splitting).

1.6 Τηλεφωνική κίνηση

Με δεδομένο τον περιορισμένο αριθμό διαθέσιμων συχνοτήτων, το ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών για δεδομένη ποιότητα επικοινωνίας. Μια

παράμετρος που πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη κατά τη σχεδίαση του συστήματος είναι η *τηλεφωνική κίνηση* (traffic intensity). Η τηλεφωνική κίνηση, που συχνά αναφέρεται απλά ως κίνηση, ορίζεται ως το άθροισμα των τηλεφωνικών κλήσεων, που γίνονται σε μια ομάδα κυκλωμάτων (trunks), λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια των κλήσεων, όπως επίσης και τον αριθμό των κλήσεων. Η κατανόηση της φύσης της τηλεφωνικής κίνησης και της κατανομής της στο χώρο και στο χρόνο είναι απαραίτητη, προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός του ποσού των τηλεφωνικών υπηρεσιών, που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση του συνδρομητή. Γενικά, η τηλεφωνική κίνηση διαφοροποιείται πολύ από τη μία χρονική περίοδο στην άλλη, όχι με κάποιο συγκεκριμένο νόμο, αλλά σύμφωνα με τις ανάγκες του χρήστη. Η τηλεφωνική κίνηση ποικίλει από εποχή σε εποχή, από μήνα σε μήνα, από μέρα σε μέρα και από ώρα σε ώρα. Υπάρχουν επίσης διαφορές από λεπτό σε λεπτό, μέσα στην ίδια ώρα της ημέρας και από χρήστη σε χρήστη. Η τυχαία φύση της κατανομής της κίνησης βασίζεται στην υπόθεση, ότι οι κλήσεις που πραγματοποιούνται από τους συνδρομητές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Άλλες αιτίες, που προκαλούν διακυμάνσεις στην τηλεφωνική κίνηση, είναι η διαφορετική τηλεφωνική συμπεριφορά των κοινωνικών ομάδων, όσον αφορά τη συχνότητα και το χρόνο συνομιλίας. Η τηλεφωνική κίνηση A ορίζεται ως εξής:

$$A = \frac{\text{(μέσος χρόνος συνδιάλεξης)(min) (συνολικός αριθμός χρηστών)}}{60 \text{ min}} \quad (\text{Erlangs}) \quad (1.2)$$

όπου το Erlang (Erl) είναι η μονάδα μέτρησης της τηλεφωνικής κίνησης. Η μέτρηση της τηλεφωνικής κίνησης, εκφρασμένη σε Erlangs, αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το μέσο αριθμό των κλήσεων που βρίσκονται ταυτόχρονα σε εξέλιξη, σε μία ώρα.

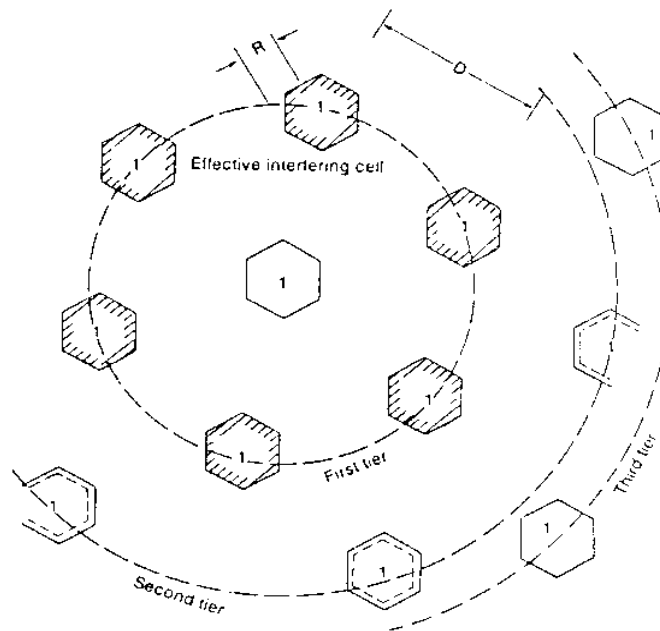
1.7 Συσχέτιση παραμέτρων σχεδίασης κυψελωτών συστημάτων

Κατά τη σχεδίαση ενός κυψελωτού συστήματος λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- για δεδομένη ακτίνα κυψέλης R , ο προβλεπόμενος αριθμός κλήσεων ανά ώρα Q , για τις ώρες αιχμής (busy hours), υπολογίζεται βάσει του αριθμού των κινουμένων χρηστών και του ποσοστού αυτών που κάνει χρήση του συστήματος
- για δεδομένο Q βρίσκεται η κίνηση $\eta = \frac{Q \cdot T}{60}$ (Erlangs), όπου T είναι η μέση διάρκεια των κλήσεων
- για δεδομένη τηλεφωνική κίνηση A και δεδομένη πιθανότητα κατειλημμένης γραμμής B , υπολογίζεται με χρησιμοποίηση δεδομένων πινάκων, ο μέγιστος αριθμός των απαιτούμενων καναλιών N , δηλαδή ο αριθμός των απαιτούμενων καναλιών N καθορίζεται από τον αριθμό των κλήσεων ανά ώρα και όχι από τον αριθμό των συνδρομητών του συστήματος.

1.8 Ομαδοποίηση κυψελών

Για να περιοριστούν στο ελάχιστο οι παρεμβολές μεταξύ των κυψελών του συστήματος, οι κυψέλες οργανώνονται σε ομάδες-συμπλέγματα (clusters) των τεσσάρων, επτά, δώδεκα ή περισσότερων κυψελών, εντός των οποίων παραχωρούνται όλα τα διαθέσιμα κανάλια επικοινωνίας του συστήματος. Για παράδειγμα, μέσα σε ένα cluster των επτά κυψελών διατίθενται σε κάθε κυψέλη το 1/7 του συνολικού διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων. Μια τυπική δομή με clusters των επτά κυψελών εικονίζεται στο σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Ομαδοποίηση επτά κυψελών.

Το σχήμα των ομάδων των κυψελών μιας περιοχής δεν είναι μοναδικό και μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τις μεταβολές των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη κατά τη σχεδίαση κυψελωτών συστημάτων και οι οποίες αναφέρθηκαν προηγούμενα. Για τη δομή του σχήματος 1.1, με εφαρμογή του Πυθαγόρειου θεωρήματος βρίσκεται ότι η κοντινότερη κυψέλη στην οποία μπορεί να γίνει επαναχρησιμοποίηση της ίδιας συχνότητας, βρίσκεται σε απόσταση $D=4.6R$, όπου R είναι η ακτίνα της κάθε κυψέλης. Η απόσταση D ονομάζεται απόσταση επαναχρησιμοποίησης καναλιού (frequency reuse distance).

Ο αριθμός των κυψελών K ενός cluster καθορίζει τον αριθμό των K διαφορετικών συνόλων καναλιών, που μπορούν να προκύψουν σε μια περιοχή. Για παράδειγμα, σε μια

περιοχή με 350 συνολικά διαθέσιμα κανάλια και με clusters των επτά κυψελών ($K=7$), μπορούν να διατεθούν 50 κανάλια σε κάθε κυψέλη.

Είναι γνωστό, ότι όσο πιο πολλά είναι τα διαθέσιμα κανάλια μέσα σε μια κυψέλη του συστήματος, τόσο μεγαλύτερο πλήθος συνδρομητών είναι δυνατόν να εξυπηρετηθεί στη συγκεκριμένη κυψέλη. Κατά συνέπεια, στις αστικές περιοχές (urban area) η κυψέλη πρέπει να περιλαμβάνει περισσότερα κανάλια, ενώ στις ημιαστικές (suburban area) και στις αραιοκατοικημένες περιοχές (open area) λιγότερα. Όταν τα διαθέσιμα κανάλια διπλασιαστούν, τότε μπορούν να εξυπηρετηθούν περισσότεροι από τους διπλάσιους συνδρομητές. Αυτό είναι ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων.

1.9 Ζευξιμότητα

Ζευξιμότητα (trunking) είναι η δυνατότητα συνδυασμού περισσότερων του ενός καναλιών, σε μια ενιαία ομάδα, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να χρησιμοποιεί οποιοδήποτε ελεύθερο κανάλι από τη συγκεκριμένη ομάδα καναλιών για τη συνδιάλεξή του. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται σημαντικά η πιθανότητα κατειλημμένης γραμμής, γεγονός το οποίο σημαίνει αύξηση της χωρητικότητας και επομένως αύξηση της απόδοσης διαχείρισης του φάσματος συχνοτήτων αλλά όμως με ταυτόχρονη δημιουργία παρεμβολών.

1.10 Εντοπισμός

Εντοπισμός (locating) ονομάζεται η διαδικασία αξιολόγησης της ποιότητας της ραδιοεπαφής, σε σχέση με τη θέση ή την κίνηση της κινητής μονάδας σε μια κυψέλη του συστήματος, ώστε αν κριθεί απαραίτητο, μια συνδιάλεξη να μεταφέρεται είτε σε άλλο κανάλι της ίδιας κυψέλης είτε σε κανάλι μιας γειτονικής κυψέλης, για τη βελτίωση της ποιότητας της επικοινωνίας.

1.11 Μεταπομπή

Μεταπομπή ή *διαπομπή* (Hand-off ή Hand-over) ονομάζεται η διαδικασία της αλλαγής συχνότητας (καναλιού) στα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών κινητών, έτσι ώστε να μη διακόπτεται μια συνδιάλεξη που βρίσκεται σε εξέλιξη, καθώς ο κινητός σταθμός μετακινείται μέσα στην ευρύτερη περιοχή κάλυψης του συστήματος. Η διαδικασία της μεταπομπής πραγματοποιείται κυρίως για τους τρεις παρακάτω σκοπούς:

- για να διατηρηθεί η ποιότητα επικοινωνίας σε αποδεκτό επίπεδο
- για να ελαχιστοποιηθούν οι παρατηρούμενες παρεμβολές
- για να κατανεμηθεί σωστά η τηλεφωνική κίνηση που παρατηρείται σε μία συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης του συστήματος.

Η μεταπομπή αφορά την αυτόματη εναλλαγή μεταξύ των διαθέσιμων καναλιών είτε της ίδιας κυψέλης είτε μεταξύ γειτονικών κυψελών. Το αν θα πραγματοποιηθεί ή όχι η διαδικασία της μεταπομπής εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- από τη ισχύ και ποιότητα του σήματος είτε στον κινητό σταθμό είτε στο σταθμό βάσης
- από τη ισχύ του σήματος στα άλλα κανάλια του συστήματος
- από την απόσταση του κινητού σταθμού από το σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί
- από τη ισχύ των παρεμβολών στα ελεύθερα κανάλια του συστήματος
- από την τηλεφωνική κίνηση στην ίδια την κυψέλη και στις γειτονικές προς αυτή κυψέλες.

Αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις που αφορούν τους προηγούμενους παράγοντες, ακολουθεί η ακόλουθη διαδικασία:

- υπολογισμός των μέσων τιμών των συγκεκριμένων παραμέτρων για κάποιο χρονικό διάστημα
- σύγκριση των μέσων τιμών με προκαθορισμένες τιμές στάθμης που είναι οι τιμές κατωφλίου της στάθμης του σήματος. Εάν η απόλυτη τιμή της διαφοράς των μέσων τιμών και των τιμών κατωφλίου, είναι μικρότερη μιας προκαθορισμένης τιμής, τότε αρχίζει η διαδικασία της μεταπομπής. Διαφορετικά, η διαδικασία επαναλαμβάνεται.

Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι η προκαθορισμένη τιμή πρέπει να μεταβάλλεται ανάλογα με την κλίση των απωλειών διάδοσης και του ρυθμού μεταβολής γύρω από τη μέση στάθμη του σήματος στην περιοχή που μας ενδιαφέρει. Τελικά, η αλλαγή καναλιού επικοινωνίας κατά τη διαδικασία της μεταπομπής διαρκεί μερικά χιλιοστά του δευτερολέπτου και ολοκληρώνεται χωρίς ο συνδρομητής του συγκεκριμένου καναλιού να αντιληφθεί διακοπή της επικοινωνίας.

1.12 Λόγος επαναχρησιμοποίησης καναλιού

Ο *λόγος επαναχρησιμοποίησης καναλιού* (cochannel frequency reuse ratio) ή *παράγοντας μείωσης των παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων* q ορίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$q = \frac{D}{R} = \sqrt{3K}$$

(1.3)

όπου D είναι η μέση απόσταση επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων, R είναι η ακτίνα της κυψέλης και K είναι ο *αριθμός των κυψελών ανά cluster* ή *αριθμός ομαδοποίησης των κυψελών*. Εάν στη σχέση (1.3) θέσουμε $K=7$, λαμβάνουμε $q=4.6$. Αύξηση της τιμής του K σημαίνει αύξηση του D και συνεπώς ανάλογη μείωση της ισχύος των παρεμβολών λόγω της επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων στη κυψελωτή δομή του συστήματος. Συνεπώς, η

επιλογή του αριθμού Κ καθορίζεται από το επίπεδο της ισχύος των παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

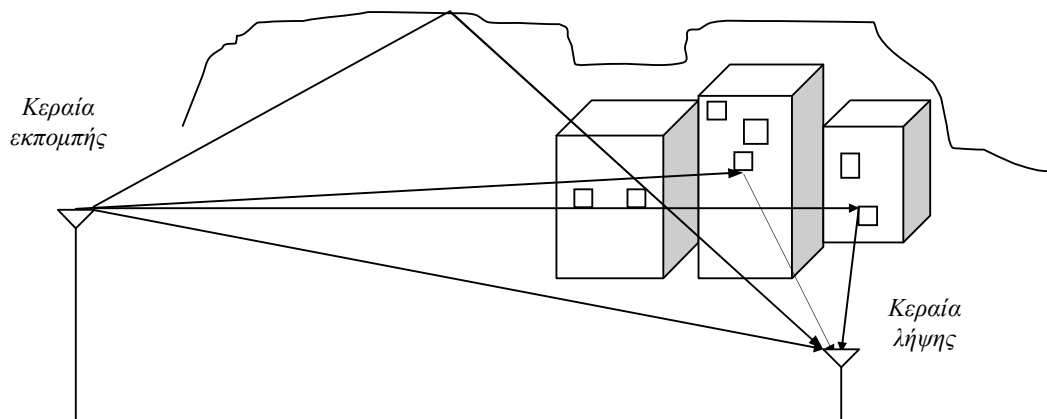
2.1 Γενικά

Οι επικοινωνίες κινητών, χρησιμοποιούν κυρίως ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητες στη περιοχή που εκτείνεται από μερικές εκατοντάδες MHz μέχρι λίγα GHz. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζουν και οι επικοινωνίες με χιλιοστομετρικά κύματα σε εσωτερικούς χώρους αλλά δεν θα γίνει αναφορά σε αυτά. Σημειώνεται ότι η κατανομή της μέσης ηλεκτρομαγνητικής ισχύος σε μία συγκεκριμένη περιοχή ή χώρο είναι κατά κύριο λόγο βασική απαίτηση για αξιόπιστη επικοινωνία. Η ισχύς αυτή θα πρέπει να είναι επαρκής για την εξυπηρέτηση της ζητούμενης ζεύξης αλλά δεν θα πρέπει να είναι τόσο μεγάλη ώστε να προκαλεί παρεμβολή σε άλλο κανάλι με την ίδια συχνότητα που λειτουργεί σε άλλη κυψέλη του συστήματος. Επειδή η ραδιοζεύξη μεταβάλλεται καθώς ο κινητός σταθμός διανύει μικρές αποστάσεις, δεν ενδιαφέρει μόνο η μέση ισχύς της αλλά και η στατιστική συμπεριφορά της.

Οι μηχανισμοί που διέπουν την διάδοση των ραδιοκυμάτων είναι πολύπλοκοι και ποικίλοι και μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις βασικούς μηχανισμούς: την *ανάκλαση* (Reflection), την *περίθλαση* (Diffraction) και τη *σκέδαση* (Scattering). Ανάκλαση εμφανίζεται όταν ένα διαδιδόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε εμπόδιο με διαστάσεις πολύ μεγάλες σε σχέση με το μήκος κύματός του. Ανακλώμενα κύματα παράγονται ύστερα από πρόσπτωση των κυμάτων στην επιφάνεια του εδάφους και στα κτίρια και έτσι μπορούν να συμβάλλουν εποικοδομητικά ή όχι στο τελικό σήμα που λαμβάνεται από το δέκτη. Περίθλαση εμφανίζεται όταν στη διαδρομή του σήματος από το πομπό προς το δέκτη παρεμβάλλεται αδιαπέραστο σώμα.

Γενικά, η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα περιβάλλον επικοινωνιών κινητών χαρακτηρίζεται από τρία επιμέρους φαινόμενα που είναι γνωστά ως: *απώλειες λόγω διαδρομής* (path loss), *σκίαση* (shadowing) και *διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών* (multipath fading).

Σε ένα σύστημα επικοινωνιών κινητών, το οποίο λειτουργεί σε μία αστική (urban), ημιαστική (suburban) ή ανοικτή (open) περιοχή, το σήμα που λαμβάνεται από τον κινητό σταθμό, παρουσιάζει *διακυμάνσεις* (διαλείψεις) του στιγμιαίου πλάτους και της φάσης του. Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι το εκπεμπόμενο σήμα λαμβάνεται από το δέκτη, αφού έχει ακολουθήσει πολλαπλές διαφορετικές διαδρομές, δηλαδή παρατηρείται το φαινόμενο της *πολυδιόδευσης* (ή *πολυδιάδοσης*) (multipath). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται, όπως ήδη αναφέρεται προηγουμένα, στην ανάκλαση, περίθλαση ή διάχυση του εκπεμπόμενου σήματος από ένα ή περισσότερα αντικείμενα ή λόγω της μορφολογίας του περιβάλλοντος χώρου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Έτσι, τελικά, στο δέκτη του συστήματος λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές πολλαπλά κύματα, τα οποία αποτελούν χρονικώς μετατοπισμένα "αντίγραφα" του ίδιου εκπεμπόμενου σήματος. Τα κύματα αυτά, εξαιτίας των διαφορετικών εξασθενήσεων που έχουν υποστεί και λόγω των διαφορετικών διαδρομών που έχουν ακολουθήσει, παρουσιάζουν τυχαία πλάτη και τυχαίες φάσεις. Έτσι, σε άλλες χρονικές στιγμές προστίθενται και σε άλλες αφαιρούνται, με αποτέλεσμα το σήμα, που προκύπτει, να παρουσιάζει *διαλείψεις/βυθίσματα* (fadings). Το κανάλι, στο οποίο παρατηρείται το φαινόμενο της πολυδιόδευσης, ονομάζεται *κανάλι πολλαπλών διαδρομών* (multipath channel) ή *κανάλι με διαλείψεις* (fading channel).



Σχήμα 2.1 Φαινόμενο πολυδιόδευσης που προκαλείται από τη μορφολογία του εδάφους και τεχνητά εμπόδια.

Αν ο πομπός του συστήματος, ο δέκτης και τα αντικείμενα, που προκαλούν την πολυδιόδευση, είναι ακίνητα, τότε τα "αντίγραφα" του εκπεμπόμενου σήματος φτάνουν στο δέκτη σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές και με σταθερή ισχύ. Βέβαια, στο δέκτη εμφανίζεται συνήθως σε ημιαστικές ή ανοικτές περιοχές και ισχύς λόγω απευθείας διάδοσης του σήματος, η οποία ονομάζεται ισχύς λόγω *οπτικής επαφής* (Line-of-Sight, LOS). Όμως, στη γενική περίπτωση, ο πομπός και ο δέκτης δεν είναι ακίνητοι, ενώ το περιβάλλον τους

μεταβάλλεται συνεχώς και γι’ αυτό το κανάλι πολλαπλών διαδρομών περιγράφεται χρησιμοποιώντας *στατιστικά μοντέλα* (statistical models).

2.2 Μοντέλα πολυδιόδευσης διακριτού αριθμού κυμάτων

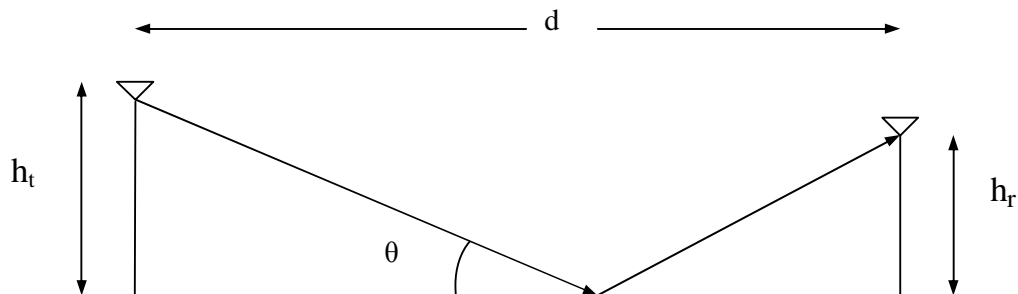
Τα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το φαινόμενο της πολυδιόδευσης και τα οποία υποθέτουν ότι συγκεκριμένος και σταθερός αριθμός κυμάτων φτάνουν στο δέκτη του συστήματος, ονομάζονται *μοντέλα πολυδιόδευσης διακριτού αριθμού κυμάτων* (Ray Tracing Models). Τα σημαντικότερα από αυτά, που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος, είναι:

διάδοση πάνω από επίπεδη γη (μοντέλο δύο λαμβανομένων κυμάτων) (two-path model)
γενικευμένο μοντέλο διάδοσης (general ray tracing).

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά, τα δύο αυτά μοντέλα.

2.2.1 Μοντέλο διάδοσης πάνω από επίπεδη γη

Έστω δύο κεραίες που είναι τοποθετημένες πάνω σε επίπεδη γη και απέχουν απόσταση d , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, και $u(t)$ το εκπεμπόμενο σήμα με εύρος ζώνης B .



Σχήμα 2.2 Μοντέλο διάδοσης πάνω από επίπεδη γη.

Το λαμβανόμενο σήμα $r(t)$ προκύπτει από την υπέρθεση δύο διαφορετικών συνιστωσών: το σήμα από απευθείας διάδοση στον ελεύθερο χώρο και το σήμα μετά από ανάκλαση στην επιφάνεια της γης. Αν η χρονική διαφορά τ μεταξύ του απευθείας σήματος και του σήματος μετά από την ανάκλαση στην επιφάνεια της γης είναι μικρή σε σχέση με το αντίστροφο του εύρους ζώνης B του εκπεμπόμενου σήματος, τότε τα δύο σήματα, που φτάνουν στην κεραία λήψης, είναι πανομοιότυπα. Αν η κεραία εκπομπής έχει ύψος h_t και η κεραία λήψης έχει ύψος h_r , τότε η λαμβανόμενη ισχύς P_r δίνεται από τη σχέση:

$$P_r = P_t \cdot \left[\frac{\lambda}{4\pi d} \right]^2 \cdot g_t \cdot g_r \cdot \left| 1 + R \cdot e^{j\varphi} + (1-R) \cdot A e^{j\varphi} + \dots \right|^2$$

(2.1)

όπου λ είναι το μήκος κύματος στον ελεύθερο χώρο, P_t είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, R είναι ο συντελεστής ανάκλασης, φ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ του απευθείας και του ανακλωμένου κύματος, A είναι ο συντελεστής εξασθένησης λόγω της γης (surface wave attenuation factor) και g_t , g_r είναι τα κέρδη (gain) των κεραιών εκπομπής και λήψης, αντίστοιχα. Ο συντελεστής ανάκλασης R δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{\sin\theta - z}{\sin\theta + z}$$

(2.2)

όπου θ είναι η γωνία πρόσπτωσης και

$$z = \frac{\sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2\theta}}{\varepsilon_0} \quad \text{για κάθετη πόλωση του σήματος}$$

$$z = \sqrt{\varepsilon_0 - \cos^2\theta} \quad \text{για οριζόντια πόλωση του σήματος}$$

ενώ ε_0 είναι η διηλεκτρική σταθερά της γης. Για μεγάλες τιμές της απόστασης d και αγνοώντας το συντελεστή εξασθένησης A , η σχέση (2.1) προσεγγιστικά γράφεται:

$$P_r = 4P_0 \cdot \sin^2\left(\frac{2\pi h_t h_r}{\lambda d}\right)$$

(2.3)

όπου P_0 είναι η λαμβανόμενη ισχύς κατά τη διάδοση στον ελεύθερο χώρο (free space). Όμως ισχύει:

$$P_0 = P_t \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 \cdot g_t \cdot g_r$$

(2.4)

και έτσι τελικά:

$$P_r = P_t \cdot g_t \cdot g_r \cdot \left(\frac{h_t h_r}{d^2}\right)^2$$

(2.5)

Από τη σχέση (2.5) είναι φανερό ότι για μεγάλες τιμές της απόστασης d μεταξύ των κεραιών εκπομπής και λήψης, η λαμβανόμενη ισχύς μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με την τέταρτη δύναμη της απόστασης d . Δηλαδή, η λαμβανόμενη ισχύς παρουσιάζει ρυθμό μείωσης ίσο με 40 dB/dec ή 12 dB/oct. Από την ίδια σχέση συμπεραίνεται ότι το ύψος της κεραιάς εκπομπής προσφέρει κέρδος 6dB/oct. Τέλος, η λαμβανόμενη ισχύς P_r είναι γενικά ανεξάρτητη της συχνότητας εκπομπής f , όμως πειραματικές μετρήσεις έχουν δείξει ότι είναι $P_r \propto f^{-n}$, όπου $2 \leq n \leq 3$.

2.2.2 Γενικευμένο μοντέλο διάδοσης

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για να προβλέψει την ένταση του πεδίου, δηλαδή τη λαμβανόμενη ισχύ για οποιοδήποτε περιβάλλον και οποιαδήποτε διάταξη των κεραιών εκπομπής και λήψης. Στο μοντέλο αυτό πρέπει τα ύψη και οι θέσεις των κεραιών καθώς και η διηλεκτρική σταθερά του μέσου να είναι γνωστές με ακρίβεια. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μεθόδους γεωμετρικής οπτικής για να καθορίσει την ισχύ από την απευθείας διάδοση, από διάδοση μετά από ανάκλαση, διάχυση ή περίθλαση και δεν τίθεται κανένας περιορισμός στον αριθμό των κυμάτων, τα οποία φτάνουν στο δέκτη του συστήματος. Η απευθείας διάδοση και η ανάκλαση του σήματος αντιμετωπίζονται σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης πάνω από επίπεδη γη, ενώ η διάχυση και η περίθλαση του σήματος αντιμετωπίζονται ξεχωριστά.

2.2.3 Στατιστικά μοντέλα διάδοσης

Τα δύο μοντέλα, που περιγράφηκαν προηγούμενα, απαιτούν γνώση του αριθμού των λαμβανόμενων από το δέκτη κυμάτων και της φυσικής διαδικασίας, από την οποία αυτά προκύπτουν. Όμως κάτι τέτοιο είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη, γιατί ο πομπός και ο δέκτης του συστήματος δεν έχουν στη γενική περίπτωση σταθερές θέσεις και το περιβάλλον τους μεταβάλλεται συνεχώς. Συνεπώς, απαιτείται στατιστική περιγραφή για να γίνει πρόβλεψη του λαμβανόμενου σήματος και τα αντίστοιχα μοντέλα ονομάζονται στατιστικά μοντέλα.

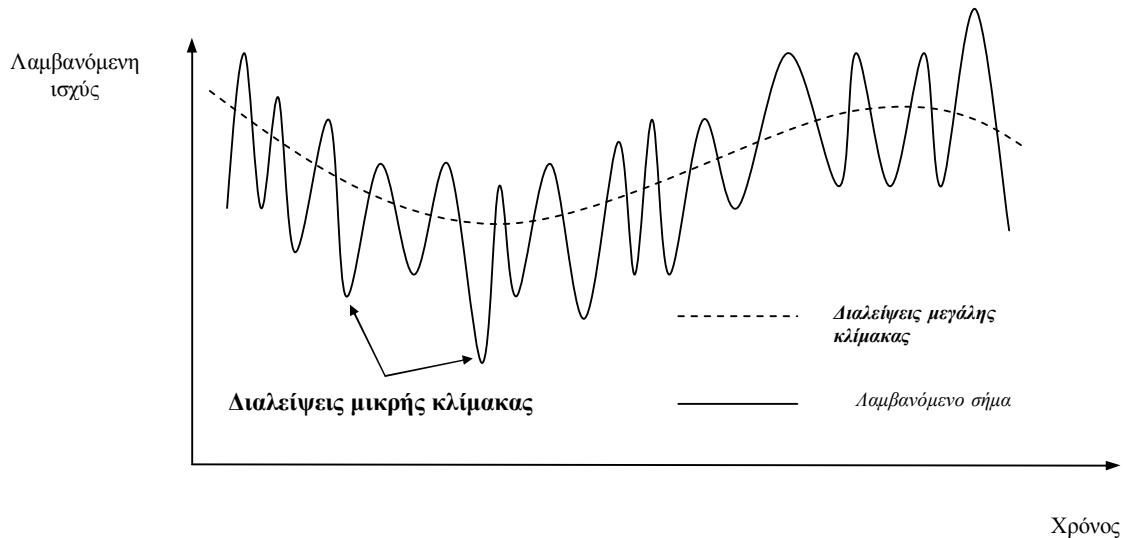
Στο δέκτη η λήψη κυμάτων με τυχαίες φάσεις προκαλεί τις διαλείψεις *μικρής κλίμακας* (fast fading ή short-fading ή multipath fading) της *περιβάλλουσας* (envelope) του λαμβανόμενου σήματος και οφείλεται κυρίως στις πολλαπλές ανακλάσεις του μεταδιδόμενου σήματος από τοπικούς σκεδαστές, κινητούς ή ακίνητους, όπως κτίρια και άλλες ανθρώπινες κατασκευές, ή από φυσικά εμπόδια, όπως δάση που περιστοιχίζουν τον κινητό σταθμό. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαλείψεις μικρής κλίμακας δεν προκαλούνται από φυσικά εμπόδια, όπως ένα βουνό ή ένας λόφος, που τυχόν βρίσκονται ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη, αλλά αντιθέτως οφείλονται στο γειτονικό περιβάλλον του κινητού δέκτη. Οι διαλείψεις αυτού του είδους αναφέρονται και σαν *διαλείψεις πολυδιόδευσης*.

Η *εξασθένιση ή διαλείψεις μεγάλης κλίμακας* (shadowing ή slow fading ή long-term fading) του σήματος οφείλονται στις σχετικά μικρής έκτασης μεταβολές στην τοπογραφία κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης, στη μορφολογία του εδάφους και στο δομημένο περιβάλλον ανάμεσα στον πομπό και στο δέκτη. Τελικά, επειδή τα δύο προηγούμενα φαινόμενα είναι στατιστικά ανεξάρτητα μεταξύ τους, η περιβάλλουσα $r(t)$ του λαμβανόμενου σήματος μπορεί να δοθεί ως το γινόμενο δύο όρων:

$$r(t) = r_f(t) \cdot r_s(t)$$

(2.6)

όπου οι συναρτήσεις $r_f(t)$ και $r_s(t)$ περιγράφουν τις διαλείψεις μικρής και μεγάλης κλίμακας, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η μορφή της λαμβανόμενης ισχύος σε ένα περιβάλλον επικοινωνιών κινητών.



Σχήμα 2.3 Λαμβανόμενο σήμα σε περιβάλλον επικοινωνιών κινητών.

2.3 Στατιστική περιγραφή καναλιού πολλαπλών διαδρομών

Τα στατιστικά μοντέλα, που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις διαλείψεις της περιβάλλουσας ενός σήματος σε ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών, βασίζονται γενικά στην υπόθεση ότι το φυσικό περιβάλλον του δέκτη αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό από ανακλαστήρες με τυχαίες θέσεις και ιδιότητες. Έστω ότι το εκπεμπόμενο σήμα $s(t)$ έχει τη μορφή:

$$s(t) = \text{Re}[u(t) \cdot \exp(j2\pi x_0 t + \varphi_0)]$$

(2.7)

όπου $u(t)$ είναι το σήμα βασικής ζώνης, f_0 είναι η συχνότητα του φέροντος κύματος, φ_0 είναι μία αυθαίρετη αρχική φάση του εκπεμπόμενου σήματος και ο τελεστής $\text{Re} [\cdot]$ δίνει το πραγματικό μέρος. Τότε, το λαμβανόμενο σήμα $r(t)$ μπορεί να βρεθεί ως η υπέρθεση όλων των κυμάτων, που φτάνουν στο δέκτη, δηλαδή να προσεγγιστεί από τη σχέση:

$$r(t) \cong A \cdot \sum_i R_i \cdot u(t - \tau_i) \cdot \exp(j2\pi(f_0 - \delta f_i) t + \theta_i - \delta f_i \cdot \tau_i)$$

(2.8)

όπου i είναι ο αριθμός των κυμάτων που φτάνουν στο δέκτη του συστήματος, R_i είναι ο συντελεστής ανάκλασης, δf_i είναι η μετατόπιση Doppler που παρατηρείται λόγω της κίνησης του δέκτη, τ_i είναι η καθυστέρηση διάδοσης (propagation delay), θ_i είναι η φάση για καθεμία από τις i διαδρομές του σήματος, ενώ τέλος ο συντελεστής A εκφράζει την επίδραση του

κέρδους των κεραιών εκπομπής και λήψης και τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος. Βέβαια, όλα τα προηγούμενα μεγέθη είναι χρονικώς μεταβαλλόμενα σαν αποτέλεσμα των συνεχών αλλαγών στη δομή του περιβάλλοντος. Σημειώνεται ότι στη σχέση (2.8) έχει θεωρηθεί ότι στο δέκτη του συστήματος δεν λαμβάνεται ισχύς από την απευθείας διάδοση του σήματος.

2.4. Στατιστική περιγραφή της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος

2.4.1.1 Διαλείψεις μικρής κλίμακας

Είναι φανερό από τη σχέση (2.8) ότι το λαμβανόμενο σήμα προκύπτει από το άθροισμα ενός αριθμού από χρονικώς μεταβαλλόμενα ανύσματα (φάσορες) με τυχαία πλάτη και φάσεις. Αν θεωρηθεί ότι ο αριθμός των ανυμάτων είναι μεγάλος, οι φάσεις τους ακολουθούν ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, 2\pi]$ και τα ανύσματα έχουν ίσο πλάτος, τότε η περιβάλλουσα (στιγμιαίο πλάτος r) του λαμβανόμενου σήματος αποδεικνύεται ότι ακολουθεί κατανομή Rayleigh, δηλαδή έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density function):

$$p(r) = \frac{2r}{\langle r^2 \rangle} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\langle r^2 \rangle}\right), \quad r \geq 0$$

(2.9)

όπου $\langle r^2 \rangle$ είναι η μέση ισχύς του λαμβανόμενου σήματος και ο συμβολισμός $\langle \cdot \rangle$ δηλώνει τη μέση τιμή (average value). Στην περίπτωση αυτή, ο στιγμιαίος λόγος σήματος-προς-θόρυβο γ στη λήψη ακολουθεί κατανομή Γάμμα (Gamma distribution) με δύο βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p(\gamma) = \frac{1}{\Gamma} \cdot \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right), \quad 0 \leq \gamma \leq \infty \quad (2.10)$$

όπου $\Gamma = \langle \gamma \rangle$ είναι ο μέσος λαμβανόμενος λόγος σήματος-προς-θόρυβο. Αν θεωρηθεί ότι ο δέκτης λαμβάνει και ισχύ σήματος από την απευθείας διάδοση, τότε η περιβάλλουσα του σήματος r ακολουθεί την κατανομή Rice, δηλαδή έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p(r) = \frac{2r}{\langle r^2 \rangle} \cdot \exp\left(-\frac{r^2 + A_0^2}{\langle r^2 \rangle}\right) \cdot I_0\left(\frac{r}{\sqrt{\langle r^2 \rangle/2}} \cdot \frac{A_0}{\sqrt{\langle r^2 \rangle/2}}\right), \quad r \geq 0$$

(2.11)

όπου A_0 είναι το πλάτος του απευθείας σήματος και $I_0(\cdot)$ είναι η τροποποιημένη συνάρτηση Bessel πρώτου είδους (Modified Bessel function of first kind). Θεωρητικά, η κατανομή Rice προκύπτει από το άθροισμα δύο ανυμάτων, από τα οποία το ένα έχει γνωστό πλάτος A_0 και τυχαία φάση και το άλλο έχει στιγμιαίο πλάτος, που ακολουθεί κατανομή Rayleigh και τυχαία φάση.

Στην περίπτωση κατά την οποία τα κύματα, που φτάνουν στο δέκτη του συστήματος, έχουν τυχαία πλάτη και τυχαίες φάσεις, τότε η περιβάλλουσα r του λαμβανόμενου σήματος ακολουθεί την *κατανομή Nakagami* (ή m -κατανομή), δηλαδή η r έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p(r) = \frac{2}{\Gamma(m)} \cdot \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m \cdot r^{2m-1} \cdot \exp\left[-\frac{m}{\Omega} r^2\right], \quad r \geq 0 \quad (2.12)$$

όπου $\Gamma(m)$ είναι η συνάρτηση Γάμμα, $\Omega = \langle r^2 \rangle$ και $m \geq 0.5$ είναι ο λεγόμενος *παράγοντας μορφής* (shape factor), ο οποίος εξάγεται μαθηματικά αλλά και μέσω πειραματικών δεδομένων. Ο παράγοντας μορφής m δίνεται από τη σχέση:

$$m = \frac{\langle r^2 \rangle^2}{\langle (r^2 - \langle r^2 \rangle)^2 \rangle} \quad (2.13)$$

και καθορίζει το βαθμό της απόσβεσης (διάλειψης) που παρατηρείται στο κανάλι πολλαπλών διαδρομών. Από τη σχέση (2.12) για διάφορες τιμές του m προκύπτουν άλλες γνωστές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας, που περιγράφουν συγκεκριμένες κατανομές. Έτσι, για $m=1$ προκύπτει η κατανομή Rayleigh, ενώ για $m=0.5$ λαμβάνεται η *μονόπλευρη κατανομή Gauss* (one-side Gaussian distribution). Τέλος, για $m \rightarrow \infty$ η κατανομή, που προκύπτει, αντιστοιχεί στην περίπτωση που στο κανάλι δεν παρουσιάζεται το φαινόμενο των διαλείψεων. Επίσης, η κατανομή Rice και η *λογαριθμικά κανονική κατανομή* (log-normal distribution) μπορούν να προσεγγιστούν μέσω της κατανομής Nakagami για συγκεκριμένες περιοχές τιμών της παραμέτρου m .

Μία ακόμη κατανομή, που έχει χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τις διαλείψεις μικρής κλίμακας, είναι η *κατανομή Weibull*, η οποία εξάγεται με εμπειρικό τρόπο και στην οποία η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της περιβάλλουσας r δίνεται από τη σχέση:

$$p(r) = \frac{ab}{r_0} \cdot \left(\frac{br}{r_0}\right)^{a-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{br}{r_0}\right)^a\right] \quad (2.14)$$

όπου a είναι μία παράμετρος, που ονομάζεται παράμετρος μορφής, και επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να οδηγεί σε όσο το δυνατό μεγαλύτερη συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα, r_0 είναι η ενεργός τιμή του r και b είναι ένας παράγοντας κανονικοποίησης, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$b = \left[\frac{2}{a} \cdot \Gamma\left(\frac{2}{a}\right)\right]^{1/2} \quad (2.15)$$

Στην ειδική περίπτωση, όπου $a=0.5$, η σχέση (2.14) περιγράφει την κατανομή Rayleigh. Όταν $a=1$, από τη σχέση (2.14) προκύπτει η εκθετική κατανομή. Η κατανομή Weibull είναι εξίσου

χρήσιμη με την κατανομή Nakagami, αλλά στερείται θεωρητικού υποβάθρου. Η κατανομή Weibull χρησιμοποιείται ευρύτατα στη θεωρία διατήρησης και στα μοντέλα μελέτης παρασιτικών σημάτων, που οφείλονται στην παρουσία της θάλασσας και τα οποία εμφανίζονται στην οθόνη των Radar.

2.4.1.2 Διαλείψεις μεγάλης κλίμακας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το σήμα από την απευθείας διάδοση και τα σήματα από ανάκλαση, τα οποία φτάνουν στο δέκτη του συστήματος, υπόκεινται σε εξασθένιση λόγω διάδοσης και εξαιτίας του συνεχώς μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος. Η εξασθένιση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος με την απόσταση περιγράφεται από τη σχέση (2.5), δηλαδή η λαμβανόμενη ισχύς μειώνεται με την τέταρτη δύναμη της απόστασης d μεταξύ πομπού και δέκτη. Παράλληλα με τη μείωση της λαμβανόμενης ισχύος με την απόσταση, παρατηρείται και μία χρονικώς αργή μεταβολή της τοπικής μέσης ισχύος του σήματος (local mean power), η οποία οφείλεται στη μεταβολή του περιβάλλοντος, δηλαδή στην αλλαγή της θέσης και του αριθμού των διαφόρων εμποδίων, που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη. Η χρονικώς αργή μεταβολή της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος αποδεικνύεται από τα πειραματικά δεδομένα ότι ακολουθεί προσεγγιστικά τη λογαριθμικά κανονική κατανομή, δηλαδή η τοπική μέση τιμή P_{av} της ισχύος του σήματος έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$p(P_{av}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma P_{av}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \cdot \ln^2\left(\frac{P_{av}}{\langle P_{av} \rangle}\right)\right]$$

(2.16)

όπου $\langle P_{av} \rangle$ είναι η μέση τιμή της τοπικής μέσης ισχύος ονομαζόμενη και μέση τιμή περιοχής (area mean) και η οποία είναι η στατιστική μέση τιμή της λογαριθμικά κανονικής κατανομής, ενώ σ είναι η τυπική απόκλιση (standard deviation) της λογαριθμικά κανονικής κατανομής. Η τιμή της τυπικής απόκλισης σ εξαρτάται από το συγκεκριμένο περιβάλλον λειτουργίας του συστήματος και συνήθως παίρνει τιμές στο διάστημα μεταξύ 4 και 12 dB. Τελικά, όσον αφορά τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος, η σχέση (2.16) δηλώνει ότι ο λογάριθμος της τοπικής μέσης ισχύος P_{av} , μεταβάλλεται σύμφωνα με την κανονική κατανομή (Normal, Gaussian distribution). Η τοπική μέση ισχύς του σήματος βρίσκεται εξομαλύνοντας (smoothing out) τις διαλείψεις μικρής κλίμακας του σήματος και διατηρώντας έτσι μόνο ένα σήμα, στο οποίο η ισχύς του μεταβάλλεται αργά με το χρόνο σύμφωνα με την κατανομή, που δίνεται από τη σχέση (2.16).

2.5 Χαρακτηριστικά μεγέθη καναλιού πολλαπλών διαδρομών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το κανάλι επικοινωνίας στα συστήματα επικοινωνιών κινητών είναι ένα τυχαίως μεταβαλλόμενο στο χρόνο κανάλι. Για να περιγραφεί συνολικά η συμπεριφορά ενός τέτοιου καναλιού, εκτός από τη στατιστική περιγραφή της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος, απαιτείται να δοθούν και κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μεγέθη του καναλιού χρήσιμα στην περίπτωση ψηφιακής εκπομπής στο κανάλι. Για το λόγο αυτό στη συνέχεια θα αναπτυχθούν μία σειρά από χρήσιμες μαθηματικές συναρτήσεις, που αποσκοπούν στην περαιτέρω περιγραφή της συμπεριφοράς του καναλιού πολλαπλών διαδρομών.

Αρχικά, έστω η ισοδύναμη χρονικώς μεταβαλλόμενη χαμηλοδιαβατή κρουστική απόκριση (baseband impulse response) $h(\tau;t)$ του καναλιού, η οποία είναι μία Gaussian τυχαία διαδικασία με μιγαδικές τιμές και μηδενική μέση τιμή ως προς τον χρόνο t . Η παράμετρος τ αναφέρεται στη χρονική στιγμή άφιξης των σημάτων, που προέρχονται από την πολυδιάδευση. Τότε, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $\Phi_h(\tau_1;\tau_2;\Delta t)$ της $h(\tau;t)$ ορίζεται από τη σχέση:

$$\Phi_h(\tau_1;\tau_2;\Delta t) = \frac{1}{2} \langle h^*(\tau_1;t) h(\tau_2;t + \Delta t) \rangle$$

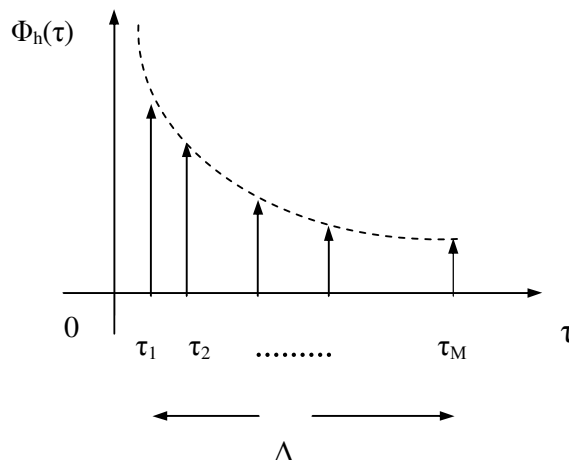
(2.17)

όπου τ_1 και τ_2 είναι αντίστοιχα οι χρονικές στιγμές εμφάνισης στο δέκτη δύο σημάτων προερχόμενα από διαφορετικές διαδρομές στο κανάλι, Δt είναι η χρονική διαφορά μεταξύ των στιγμών παρατήρησης της κρουστικής απόκρισης του καναλιού και $h^*(\tau;t)$ είναι η συζυγής συνάρτηση της κρουστικής απόκρισης $h(\tau;t)$. Γενικά, στα περισσότερα μέσα μετάδοσης ραδιοσημάτων η εξασθένιση και η αλλαγή φάσης, που παρουσιάζονται για καθεμία από τις διαφορετικές διαδρομές του σήματος, είναι ασυσχέτιστες με τα αντίστοιχα μεγέθη μιας άλλης διαδρομής και το φαινόμενο ονομάζεται *ασυσχέτιστη σκέδαση* (Uncorrelated Scattering) ενώ το κανάλι ονομάζεται *κανάλι στατικής ασυσχέτιστης σκέδασης* (Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering Channel, WSSUS). Με βάση τα παραπάνω, η σχέση (2.17) γράφεται:

$$\frac{1}{2} \langle h^*(\tau_1;t) \cdot h(\tau_2;t + \Delta t) \rangle = \Phi_h(\tau_1;\Delta t) \cdot \delta(\tau_1 - \tau_2)$$

(2.18)

όπου $\delta(t)$ είναι η γνωστή *συνάρτηση δέλτα* (Delta function). Πρακτικά, η συνάρτηση $\Phi_h(\tau;\Delta t)$



υπολογίζεται εκπέμποντας στο κανάλι παλμούς πολύ μικρής διάρκειας και συσχετίζοντας το λαμβανόμενο σήμα με τον εαυτό του μετά από συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση Δt . Αν στη σχέση (2.18) τεθεί $\Delta t=0$, τότε η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $\Phi_h(\tau)$, που προκύπτει, δίνει ουσιαστικά τη μέση ισχύ εξόδου από το κανάλι συναρτήσει της χρονικής στιγμής εμφάνισης τ , δηλαδή τη συνάρτηση $P(\tau)$, η οποία ονομάζεται *πυκνότητα ισχύος εξόδου* (Multipath Intensity Profile, MIP) του καναλιού πολλαπλών διαδρομών. Γενικά, η $\Phi_h(\tau)$ τείνει να έχει τη μορφή του Σχήματος 2.4.

Σχήμα 2.4 Πυκνότητα ισχύος εξόδου καναλιού πολλαπλών διαδρομών.

Το εύρος των τιμών του τ , για τις οποίες η $\Phi_h(\tau)$ έχει ουσιαστικά μη μηδενική τιμή, καλείται *συνολική διασπορά καθυστέρησης* (total multipath delay spread) του καναλιού και συμβολίζεται συνήθως με Δ . Ουσιαστικά, η συνολική διασπορά καθυστέρησης Δ είναι η χρονική διαφορά μεταξύ των στιγμών εμφάνισης του πρώτου και του τελευταίου σήματος στην έξοδο του καναλιού, όταν εκπεμφθεί στο κανάλι παλμός μικρής διάρκειας. Πολλές φορές, με δεδομένη τη μορφή της MIP του καναλιού, υπολογίζεται και ο *μέσος χρόνος καθυστέρησης* $\langle \tau \rangle$ (mean delay time) του καναλιού και η *διασπορά καθυστέρησης* σ_d (delay spread) από τις σχέσεις:

$$\langle \tau \rangle = \int_0^{\infty} \tau \cdot P(\tau) d\tau$$

(2.19)

$$\sigma_d = \int_0^{\infty} (\tau - \langle \tau \rangle)^2 \cdot P(\tau) d\tau$$

(2.20)

Πρέπει να σημειωθεί ότι η συνολική διασπορά καθυστέρησης Δ έχει διαφορετική τιμή στις ημιαστικές, αστικές και ανοικτές περιοχές και μάλιστα παίρνει τη μεγαλύτερη της τιμή σε μία αστική περιοχή σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, στις αστικές περιοχές γίνονται πολύ περισσότερες σκεδάσεις του εκπεμπόμενου σήματος λόγω της ύπαρξης πολύ μεγαλύτερου αριθμού ανθρώπινων κατασκευών. Έτσι, η συνολική διασπορά καθυστέρησης Δ έχει τυπική τιμή 0.5 μsec και 3 μsec για ημιαστικές και αστικές περιοχές αντίστοιχα. Πειραματικά αποτελέσματα για την περιοχή τιμών της συνολικής διασποράς καθυστέρησης Δ , του μέσου χρόνου καθυστέρησης $\langle \tau \rangle$ και της διασποράς καθυστέρησης σ_d μετά από μετρήσεις σε διάφορα περιβάλλοντα λειτουργίας ενός συστήματος επικοινωνιών κινητών δίνονται στη βιβλιογραφία .

Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφορα θεωρητικά μοντέλα για την περιγραφή της μορφής της MIP, που προκύπτει από τις μετρήσεις. Έτσι, δίνονται διάφορες κατανομές, τις οποίες θεωρείται ότι ακολουθεί ο χρόνος άφιξης τ των διαφορετικών σημάτων στο δέκτη του συστήματος. Το απλούστερο και περισσότερο χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι εκείνο της

εκθετικής μορφής, δηλαδή το μοντέλο στο οποίο αυτό ο χρόνος άφιξης των διαφόρων κυμάτων τ ακολουθεί την κατανομή:

$$p(\tau) = \frac{1}{\sigma_d} \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\sigma_d}\right)$$

(2.21)

Το μοντέλο αυτό περιγράφει ικανοποιητικά την ΜΙΡ σε αστικές περιοχές με πυκνή δόμηση. Όπως και η συνολική διασπορά καθυστέρησης Δ , έτσι και η διασπορά καθυστέρησης σ_d παίρνει τιμή, που εξαρτάται από το εκάστοτε περιβάλλον λειτουργίας, και όπως είναι αναμενόμενο παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή σε αστικές περιοχές σε σχέση με ημιαστικές ή ανοικτές περιοχές.

Η περιγραφή του τυχαίως μεταβαλλόμενου στο χρόνο καναλιού πολλαπλών διαδρομών, εκτός από το πεδίο του χρόνου t , μπορεί να πραγματοποιηθεί και στο πεδίο της συχνότητας f εισάγοντας τη *συνάρτηση μεταφοράς* (transfer function) του καναλιού $H(f;t)$, η οποία όπως και η κρουστική απόκριση του καναλιού είναι μία συνάρτηση μεταβαλλόμενη με το χρόνο. Έτσι, από το μετασχηματισμό Fourier της κρουστικής απόκρισης $h(\tau;t)$, υπολογίζεται η χρονικώς μεταβαλλόμενη συνάρτηση μεταφοράς $H(f;t)$ του καναλιού, δηλαδή:

$$H(f;t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau;t) \cdot \exp(-j 2\pi f \tau) \cdot d\tau$$

(2.22)

Αφού η $h(\tau;t)$ είναι μία μηδενικής μέσης τιμής Gaussian τυχαία διαδικασία και η συνάρτηση $H(f;t)$ θα έχει την ίδια στατιστική συμπεριφορά. Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της $H(f;t)$ ορίζεται από τη σχέση:

$$\Phi_h(f_1, f_2; \Delta t) = \frac{1}{2} \left\langle H^*(f_1; t) \cdot H(f_2; t + \Delta t) \right\rangle$$

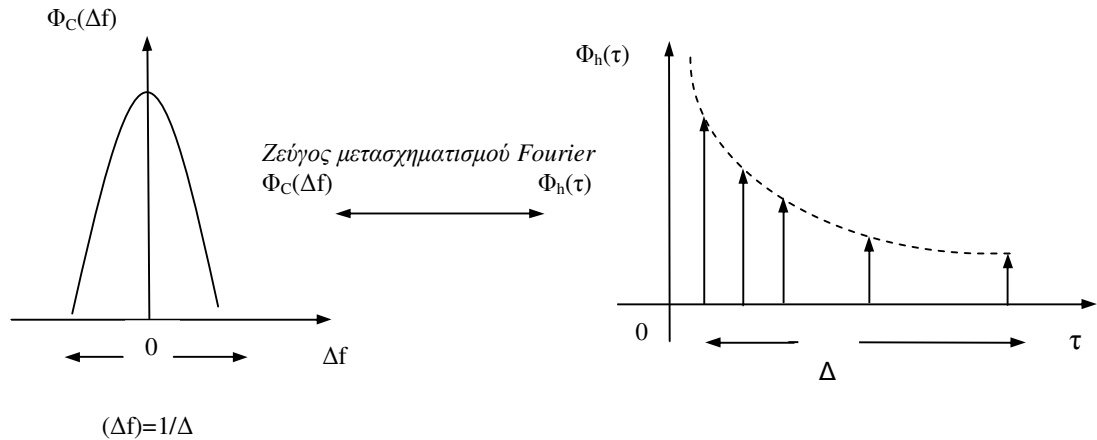
(2.23)

Αφού η $H(f;t)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της $h(\tau;t)$, είναι αναμενόμενο ότι η $\Phi_h(f_1; f_2; \Delta t)$ είναι ο μετασχηματισμός Fourier της $\Phi_h(\tau; \Delta t)$. Εάν μάλιστα τεθεί $\Delta t=0$ και $\Delta f=f_2-f_1$, τότε $\Phi_h(\Delta f; 0)=\Phi_h(\Delta f)$ και $\Phi_h(\tau; 0)=\Phi_h(\tau)$, οπότε η σχέση μετασχηματισμού τους είναι:

$$\Phi_h(\Delta f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_h(\tau) \cdot \exp(-j 2\pi f \tau) \cdot d\tau$$

(2.24)

Η τελευταία σχέση μετασχηματισμού, από το πεδίο του χρόνου σε εκείνο της συχνότητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Μετασχηματισμός μεταξύ $\Phi_h(\Delta f)$ και $\Phi_h(\tau)$.

Με δεδομένο ότι η $\Phi_h(\Delta f)$ είναι η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης της κρουστικής απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας, αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του εύρους ζώνης συμφωνίας του καναλιού πολλαπλών διαδρομών. Αποτέλεσμα του μετασχηματισμού Fourier μεταξύ της $\Phi_h(\Delta f)$ και της $\Phi_h(\tau)$ είναι το ότι μπορεί να οριστεί ένα μέγεθος αντίστοιχο με τη συνολική διασπορά καθυστέρησης Δ που ονομάζεται *εύρος ζώνης συμφωνίας* (coherence bandwidth) B_{coh} του καναλιού και το οποίο δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$B_{\text{coh}} \cong \frac{1}{\Delta}$$

(2.25)

Το εύρος ζώνης συμφωνίας B_{coh} έχει την ακόλουθη φυσική σημασία: αν δύο ημιτονικά σήματα απέχουν φασματικά απόσταση μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης συμφωνίας του καναλιού, τότε επηρεάζονται διαφορετικά από το κανάλι πολλαπλών διαδρομών. Ο ορισμός του εύρους ζώνης συμφωνίας, συχνά διαφέρει από αναφορά σε αναφορά και γενικά εξαρτάται από την τιμή της συνάρτησης συσχέτισης, που παρουσιάζουν τα δύο ημιτονικά σήματα που εκπέμπονται στο κανάλι. Έτσι, το εύρος ζώνης συμφωνίας B_{coh} υπολογίζεται μέσω της συνάρτησης συσχέτισης $R(\Delta f)$ της περιβάλλουσας δύο σημάτων, που εκπέμπονται στο κανάλι και έχουν συχνότητες f_1 και f_2 αντίστοιχα, δηλαδή:

$$R(\Delta f) = \langle r(f_1) \cdot r(f_2) \rangle$$

(2.26)

όπου $r(f_1)$, $r(f_2)$ είναι οι περιβάλλουσες των λαμβανόμενων σημάτων και $\Delta f = |f_1 - f_2|$. Θεωρώντας το συντελεστή συσχέτισης $\rho(\Delta f)$ στο πεδίο της συχνότητας, ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\rho(\Delta f) = \frac{R(\Delta f) - \langle r \rangle^2}{R(0) - \langle r \rangle^2}$$

(2.27)

Έτσι το εύρος ζώνης συμφωνίας $B_{\text{coh}} = \Delta f$ ορίζεται αν τεθεί το παρακάτω κριτήριο για την τιμή της συνάρτησης συσχέτισης $\rho(\Delta f)$ μεταξύ των $r(f_1)$ και $r(f_2)$:

$$\rho(\Delta f) = 0.5$$

(2.28)

Το εύρος ζώνης συμφωνίας B_{coh} , σε αντιστοιχία με τη συνολική διασπορά καθυστέρησης του καναλιού Δ , παίρνει διαφορετική τιμή στις ημιαστικές, αστικές και ανοικτές περιοχές. Τυπικές τιμές του B_{coh} θεωρούνται μεταξύ 0.1 και 3 MHz. Οποσδήποτε, υπάρχουν κανάλια επικοινωνίας, όπως για παράδειγμα το κανάλι των *κινητών-δορυφορικών επικοινωνιών* (mobile-satellite communications), στο οποίο η συνολική διασπορά καθυστέρησης είναι της τάξης των 100 nsec και έτσι το εύρος ζώνης συμφωνίας του καναλιού είναι περίπου ίσο με 10 MHz.

Οι χρονικές μεταβολές του καναλιού περιγράφονται μέσω της παραμέτρου Δt της συνάρτησης $\Phi_h(\Delta f; \Delta t)$ και οφείλονται στην κίνηση του δέκτη ή/και του πομπού του συστήματος, οδηγώντας λόγω του φαινομένου Doppler, σε διεύρυνση, των φασματικών γραμμών του εκπεμπόμενου σήματος στη λήψη. Για τη συσχέτιση του φαινομένου Doppler, με τις χρονικές μεταβολές του καναλιού, λαμβάνεται ο μετασχηματισμός Fourier $S_h(\Delta f; \lambda)$ της $\Phi_h(\Delta f; \Delta t)$, ως προς τη μεταβλητή Δt , δηλαδή:

$$S_h(\Delta f; \lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_h(\Delta f; \Delta t) \cdot e^{-j2\pi\lambda \Delta t} \cdot d(\Delta t)$$

(2.29)

Αν στην προηγούμενη σχέση τεθεί $\Delta f=0$, τότε $S_h(0; \lambda) \equiv S_h(\lambda)$. Η συνάρτηση $S_h(\lambda)$ περιγράφει το φάσμα ισχύος στη λήψη, δηλαδή την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος συναρτήσει του μήκους κύματος λ (ή ισοδύναμα της συχνότητας f). Αν δεν υπάρχουν χρονικές μεταβολές στο κανάλι, τότε δεν θα παρατηρείται διεύρυνση του φάσματος του εκπεμπόμενου σήματος. Το εύρος τιμών του λ , για τις οποίες η $S_h(\lambda)$ είναι ουσιαστικά μη μηδενική, ονομάζεται *διασπορά Doppler* (Doppler spread) B_d του καναλιού πολλαπλών διαδρομών. Αφού η συνάρτηση $S_h(\lambda)$ σχετίζεται με την $\Phi_h(\Delta t)$ μέσω του μετασχηματισμού Fourier, το αντίστοιχο μέγεθος του B_d στο πεδίο του χρόνου, ονομάζεται *χρόνος συμφωνίας* T_{coh} (coherence time) του καναλιού και ορίζεται από τη σχέση:

$$T_{\text{coh}} \cong \frac{1}{B_d}$$

(2.30)

Ο χρόνος συμφωνίας του καναλιού εκφράζει το χρόνο κατά τον οποίο το κανάλι πολλαπλών διαδρομών μπορεί να θεωρηθεί σαν χρονικώς αμετάβλητο. Αν η ταχύτητα του δέκτη είναι u και το μήκος κύματος, που αντιστοιχεί στη φέρουσα συχνότητα, είναι λ_0 , τότε ο χρόνος συμφωνίας T_{coh} του καναλιού δίνεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$T_{\text{coh}} \cong \frac{\lambda_0}{2 \cdot u}$$

(2.31)

Η προηγούμενη έκφραση για το χρόνο συμφωνίας βασίζεται στην υπόθεση ότι η κρουστική απόκριση του καναλιού μεταβάλλεται σημαντικά, όταν ο κινητός δέκτης μετακινείται σε απόσταση ίση με το μισό του μήκους κύματος λ_0 . Αν υποθεθεί ότι το μήκος κύματος λ_0 είναι 0.3 m και η ταχύτητα u έχει τιμή στην περιοχή μεταξύ 5 και 50 km/h, τότε ο χρόνος συμφωνίας T_{coh} του καναλιού παίρνει τιμές στο διάστημα μεταξύ 11 και 110 msec. Για αυτή την περιοχή τιμών του χρόνου συμφωνίας T_{coh} του καναλιού, η διάρκεια του συμβόλου T_a , που εκπέμπεται στο κανάλι ενός συστήματος επικοινωνιών κινητών, είναι στη γενική περίπτωση μικρότερη. Συνεπώς, κατά τη χρονική διάρκεια του εκπεμπόμενου συμβόλου το κανάλι πολλαπλών διαδρομών μπορεί να θεωρηθεί σαν χρονικώς αμετάβλητο και έτσι η εξασθένιση και η μετατόπιση φάσης, που προκαλείται από το κανάλι θεωρούνται σταθερές τουλάχιστον κατά τη διάρκεια ενός εκπεμπόμενου συμβόλου. Τότε το κανάλι ονομάζεται αργά μεταβαλλόμενο με το χρόνο. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι ένα χρονικώς αμετάβλητο κανάλι παρουσιάζει μεγάλη τιμή του χρόνου συμφωνίας ή ισοδύναμα μικρή τιμή της διασποράς Doppler και σε μια τέτοια κατάσταση το κανάλι ονομάζεται επίσης και *στατικό* (static channel). Συνολικά, η συμπεριφορά ενός τυχαίως μεταβαλλόμενου με το χρόνο καναλιού πολλαπλών διαδρομών, μπορεί να περιγραφεί με το λεγόμενο *συντελεστή διάχυσης* L (spread factor), ο οποίος δίνεται από το γινόμενο της συνολικής διασποράς καθυστέρησης Δ του καναλιού και της διασποράς Doppler B_d , δηλαδή:

$$L = \Delta \cdot B_d$$

(2.32)

Όπως είναι αναμενόμενο για ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών, η τιμή του L είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατό μικρότερη.

Σε ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών, η εκπομπή ενός παλμού θα οδηγήσει σε λήψη περισσότερων του ενός παλμών σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και με διάφορα πλάτη, λόγω των πολλαπλών και διαφορετικού μήκους διαδρομών, που το εκπεμπόμενο σήμα ακολουθεί μέχρι να φτάσει στο δέκτη. Αν η εκπομπή επαναληφθεί, τότε θα παρατηρηθούν αλλαγές στο λαμβανόμενο τραίνο παλμών, όπως αλλαγές στα πλάτη των μεμονωμένων

παλμών, αλλαγές σχετικά με τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ των παλμών και πολύ συχνά αλλαγές στον αριθμό των παλμών, που λαμβάνονται. Το προηγούμενο φαινόμενο επηρεάζει τη ψηφιακή εκπομπή σε ένα τέτοιο κανάλι, θέτοντας ένα όριο στο μέγιστο ρυθμό εκπομπής συμβόλων στο κανάλι, διότι διαφορετικά θα παρατηρηθεί το φαινόμενο της *διασυμβολικής παρεμβολής* (Intersymbol Interference, ISI) στο δέκτη του συστήματος. Συνεπώς, αν R_s είναι ο ρυθμός εκπομπής συμβόλων στο κανάλι, τότε για να μην παρατηρείται διασυμβολική παρεμβολή πρέπει να ισχύει $R_s < 1/\Delta$ στην περίπτωση που στο κανάλι δεν παρατηρείται το φαινόμενο των διαλείψεων, ενώ πρέπει να ισχύει $R_s < 1/2\pi\Delta$ για την περίπτωση διαλείψεων. Έτσι, στις μεθόδους πολλαπλής προσπέλασης FDMA και TDMA απαιτείται η χρησιμοποίηση *εξισωτών καναλιού* (equalizers) ικανών να μειώσουν τη διασυμβολική παρεμβολή, που παρατηρείται στη λήψη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΥΨΕΛΩΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

3.1 Φασματική απόδοση κυψελωτών συστημάτων

Για τα περισσότερα συστήματα επικοινωνιών, η *φασματική απόδοση* (spectrum efficiency) δηλαδή ο τρόπος διαχείρισης ή εκμετάλλευσης των διαθέσιμων συχνοτήτων, ταυτίζεται με την *απόδοση καναλιών* (channel efficiency) δηλαδή με το μέγιστο αριθμό καναλιών επικοινωνίας που μπορούν να διατεθούν σε μια δεδομένη περιοχή συχνοτήτων. Αυτό ισχύει για τα συστήματα εκείνα στα οποία δεν μπορεί να υπάρξει επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Στα κυψελωτά συστήματα όμως, η φασματική απόδοση ορίζεται ως ο μέγιστος αριθμός εξυπηρετούμενων κλήσεων σε μια περιοχή και διαφέρει από την απόδοση καναλιών καθώς η χωρητικότητα ενός συστήματος εξαρτάται απ’ ευθείας μόνο από τη φασματική απόδοση του συστήματος.

3.2 Ραδιοχωρητικότητα

Η *ραδιοχωρητικότητα* (radio capacity) m ενός συστήματος επικοινωνιών κινητών είναι μια παράμετρος εκτίμησης της φασματικής απόδοσης του συστήματος αυτού και ορίζεται από τη παρακάτω σχέση:

$$m = \frac{B_s}{B_{ch} \cdot K}$$

(3.1)

όπου B_s είναι το συνολικό εύρος φάσματος των διαθέσιμων συχνοτήτων, B_{ch} είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων κάθε καναλιού και K είναι ο αριθμός ομαδοποίησης των κυψελών. Προφανώς, ενδεχόμενη μείωση του εύρους ζώνης B_{ch} των καναλιών σε ένα σύστημα οδηγεί σε καλύτερη φασματική απόδοση του συστήματος. Χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$q = \sqrt{3K} \Rightarrow K = \frac{q^2}{3}$$

(3.2)

η σχέση (3.1), γίνεται:

$$m = \frac{3B_s}{B_{CH} \cdot q^2}$$

(3.3)

Επίσης, ισχύει η σχέση:

$$q = \left[6 \cdot \frac{C}{I} \right]^{1/\gamma}$$

(3.4)

οπότε η σχέση (3.3) γίνεται:

$$m = \frac{3B_s}{B_{ch} \left[6 \cdot \frac{C}{I} \right]^{2/\gamma}} \quad (3.5)$$

Έτσι, για $\gamma=4$ (τυπική τιμή) από τη σχέση (3.5) λαμβάνουμε:

$$m = \frac{B_s}{B_{ch} \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \left(\frac{C}{I} \right)}} \quad (\text{κανάλια ανά κυψέλη})$$

(3.6)

3.3 Χρησιμοποίηση καναλιών διαφορετικού εύρους ζώνης συχνοτήτων

Στην προηγούμενη παράγραφο, αποδείχθηκε ότι ενδεχόμενη μείωση του εύρους ζώνης συχνοτήτων των καναλιών επικοινωνίας σε ένα σύστημα επικοινωνιών κινητών, οδηγεί σε αύξηση της ραδιοχωρητικότητας του συστήματος. Η απαίτηση όμως, για διατήρηση της ίδιας ποιότητας επικοινωνίας, σημαίνει ότι η μείωση του εύρους ζώνης των καναλιών απαιτεί αντίστοιχη αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος, έτσι ώστε να επιτυγχάνονται μεγαλύτερες τιμές του λόγου C/I στα όρια κάθε κυψέλης του συστήματος. Πράγματι, μετρήσεις έχουν δείξει, ότι για τα αναλογικά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών κινητών απαιτείται να ισχύουν οι παρακάτω περιορισμοί:

$$\frac{C}{I} \geq 18\text{dB} \quad \text{για κανάλια εύρους ζώνης 30 KHz}$$

$$\frac{C}{I} \geq 24\text{dB} \quad \text{για κανάλια εύρους ζώνης 15 KHz}$$

$$\frac{C}{I} \geq 30\text{dB} \quad \text{για κανάλια εύρους ζώνης 7.5 KHz}$$

Συνεπώς, η μείωση του εύρους των καναλιών δεν οδηγεί ευθέως στην αύξηση της φασματικής απόδοσης ενός συστήματος επικοινωνιών κινητών με ταυτόχρονη διατήρηση της ποιότητας επικοινωνίας. Η φασματική απόδοση όμως ενός συστήματος επικοινωνιών κινητών μπορεί να αυξηθεί έμμεσα με τη χρησιμοποίηση καναλιών διαφορετικού εύρους.

3.4 Διαίρεση κυψελών

Η αύξηση της ραδιοχωρητικότητας ενός συστήματος, επομένως και η αύξηση της φασματικής του απόδοσης, μπορεί να επιτευχθεί και με τη διαδικασία της *διαίρεσης των κυψελών* (cell splitting). Η διαδικασία αυτή συνίσταται στη διάσπαση των κυψελών ενός συστήματος σε μικρότερες κυψέλες με το ίδιο όμως πλήθος καναλιών στην κάθε μικρή κυψέλη, όπως και στην αρχική κυψέλη. Η κάθε νέα μικρή κυψέλη έχει τη δυνατότητα να εξυπηρετήσει το ίδιο πλήθος συνδρομητών (χρηστών) όπως και η αρχική μεγάλη κυψέλη, χωρίς να υπάρχει ανάγκη αύξησης του συνολικά διατιθέμενου φάσματος συχνοτήτων. Έτσι, επιτυγχάνεται η αύξηση της φασματικής απόδοσης του συστήματος. Βέβαια, για τη μείωση της εμβέλειας απαιτείται και ελάττωση της ισχύος εκπομπής της κεραίας, ενώ παράλληλα, για την κάλυψη της περιοχής χρειάζεται να εγκατασταθούν περισσότεροι σταθμοί βάσης ή να χρησιμοποιηθούν κατευθυντικές κεραίες από τις παλιές θέσεις. Με τη διάσπαση όμως των κυψελών, αυξάνεται και η απασχόληση (φόρτος επεξεργασίας) των κεντρικών μονάδων επεξεργασίας του συστήματος, λόγω αύξησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης και επίσης εξαιτίας των συχνότερων διαπομπών που είναι στη νέα κατάσταση αναγκαίες.

Καθώς και οι μικρές κυψέλες, με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της περιοχής, φθάνουν κι αυτές με τη σειρά τους σε επίπεδα κόρου της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, είναι δυνατό να διαιρεθούν πάλι, αν οικονομικοί και άλλοι τεχνικοί παράγοντες το επιτρέπουν.

Κατά τη διαίρεση της κυψέλης, η διάμετρος κάθε νέας κυψέλης είναι συνήθως η μισή της αρχικής κυψέλης, οι δε σταθμοί βάσης τοποθετούνται ενδιάμεσα των θέσεων που κατείχαν οι παλιοί σταθμοί βάσης ή χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραίες από κοινές κορυφές, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οι ελάχιστες διάμετροι κυψελών στην αναλογική κυψελωτή τηλεφωνία μέσα σε πόλεις είναι της τάξης των 3 Km έναντι 12 έως 20 Km εντός αραιοκατοικημένων περιοχών. Πρέπει εδώ να τονιστεί, ότι αν σε μια ευρύτερη περιοχή συνυπάρχουν κυψέλες διαφορετικών διαστάσεων, πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα η τιμή του λόγου επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων ($q = D/R$), δεδομένου ότι η τιμή της ακτίνας κάθε κυψέλης διαφέρει από κυψέλη σε κυψέλη.

3.5 Εκπεμπόμενη ισχύς πριν και μετά τη διαίρεση των κυψελών

Έστω μια αρχική κυψέλη ακτίνας R . Αν η εκπεμπόμενη, από το σταθμό βάσης, ισχύς είναι αρχικά P_E τότε η λαμβανόμενη στα όρια της κυψέλης ισχύς P_{OP} , δίνεται από τη σχέση:

$$P_{OP} = \alpha \cdot P_E \cdot R^{-\gamma}$$

(3.7)

Αν τώρα η κυψέλη αυτή διαιρεθεί σε νέες με ακτίνα $R' = R/2$, τότε θα είναι αντίστοιχα:

$$P'_{OP} = \alpha \cdot P'_E \cdot R'^{-\gamma}$$

(3.8)

όπου P'_E είναι η ισχύς που εκπέμπεται από το σταθμό βάσης της νέας κυψέλης. Ζητώντας η ίδια ισχύς να λαμβάνεται στα όρια, τόσο της παλιάς, όσο και των νέων κυψελών, δηλαδή να ισχύει $P_{OP} = P'_{OP}$ τότε από τις (3.7) και (3.8) προκύπτει ότι:

$$P'_E = P_E \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{-\gamma}$$

(3.9)

Έτσι, για $\gamma = 4$ η (3.9) γίνεται:

$$P'_E = \frac{P_E}{16}$$

(3.10)

δηλαδή, η εκπεμπόμενη ισχύς P'_E στη νέα κυψέλη, πρέπει να είναι το 1/16 της αρχικής ισχύος ή διαφορετικά να είναι μικρότερη της αρχικής ισχύος P_E κατά 12 dB.

3.6 Προβλήματα παρεμβολών στα συστήματα επικοινωνιών κινητών

Η βασική ιδέα στην οποία βασίστηκε η κατασκευή, τόσο των αναλογικών, όσο και των ψηφιακών συστημάτων κινητών επικοινωνιών κινητών, είναι η έννοια της κυψέλης, δηλαδή ο χωρισμός της γεωγραφικής περιοχής που πρόκειται να καλυφθεί σε μικρότερες περιοχές. Οι περιοχές αυτές έχουν συνήθως σχήμα κανονικού εξαγώνου, εφάπτονται μεταξύ τους και δημιουργούν μια κυψελωτή δομή. Η δομή αυτή επαναλαμβανόμενη μπορεί να καλύψει μια ολόκληρη χώρα, μια ολόκληρη ήπειρο ή και ακόμα ευρύτερες περιοχές.

Εντός των κυψελών αυτών γίνεται εκπομπή μιας ομάδας συχνοτήτων (καναλιών) με *πολυπλεξία διαίρεσης συχνοτήτων* (Frequency Division Multiple Access, FDMA) και μικρή ισχύ, ώστε το σήμα να περιορίζεται όσο το δυνατόν εντός των ορίων της κάθε κυψέλης. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, είναι δυνατόν η ίδια συχνότητα να ξαναχρησιμοποιηθεί για να καλυφθεί μια άλλη περιοχή (κυψέλη) η οποία βρίσκεται σε ορισμένη απόσταση από την πρώτη δηλαδή να πραγματοποιηθεί *επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων* (frequency reuse). Η επαναχρησιμοποίηση όμως των συχνοτήτων προκαλεί παρεμβολές, οι οποίες ονομάζονται *παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων* (cochannel interference).

Ταυτόχρονα όμως, εμφανίζονται και άλλα είδη παρεμβολών, πολλά από τα οποία είναι κοινά και με άλλα συστήματα επικοινωνιών, κινητά ή μη, όπως το φαινόμενο της διαφωνίας, ενώ άλλα εμφανίζονται μόνο στα συστήματα επικοινωνιών κινητών, όπως το φαινόμενο των παρεμβολών *ner-end-far-end*.

Επιγραμματικά, τα είδη των παρεμβολών στα συστήματα επικοινωνιών κινητών κατατάσσονται ως εξής:

- παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης καναλιών (Cochannel Interference)
- παρεμβολές γειτονικών σε συχνότητα καναλιών (Adjacent Channel Interference, ACI)
- παρεμβολές ενδοδιαμόρφωσης (Intermodulation Interference)
- αλληλοπαρεμβολή συμβόλων (Inter Symbol Interference, ISI)
- παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών συστημάτων
- διαφωνία (Cross talk)
- παρεμβολές τηλεοπτικών συχνοτήτων UHF (UHF TV Interference)
- παρεμβολές μεγάλων αποστάσεων (Long distance interference).

Τα προηγούμενα είδη παρεμβολών αναπτύσσονται στη συνέχεια.

3.7 Παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης καναλιών

Στο αναλογικό σύστημα επικοινωνιών κινητών (όπως π.χ. το AMPS) το συνολικά διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων είναι 20 MHz, το οποίο αν χωριστεί σε κανάλια με εύρος ζώνης 30 KHz προκύπτει ένας περιορισμένος αριθμός καναλιών προς χρησιμοποίηση από τους χρήστες του συστήματος. Το πρόβλημα αυτό αίρεται, εν μέρει, με την τεχνική της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Για το σκοπό αυτό, γίνεται ομαδοποίηση των κυψελών του συστήματος ώστε να επιτευχθεί η επαναχρησιμοποίηση των καναλιών. Έτσι ορίζονται οι ομοκαναλικές κυψέλες, ως οι κυψέλες στις οποίες χρησιμοποιείται το ίδιο υποσύνολο καναλιών του συστήματος. Οι κυψέλες γύρω από κάθε μια από τις ομοκαναλικές κυψέλες, αποτελούν μια ομάδα η οποία ονομάζεται *σύμπλεγμα κυψελών* (cluster). Το σχήμα των clusters μιας περιοχής δεν είναι μοναδικό. Σε ένα cluster περιλαμβάνονται κυψέλες με διαφορετικά υποσύνολα καναλιών. Ο αριθμός των κυψελών K σε ένα cluster καθορίζει τον αριθμό των K διαφορετικών υποσυνόλων καναλιών που μπορούν να προκύψουν σε μια περιοχή.

Η μέθοδος επαναχρησιμοποίησης καναλιών είναι χρήσιμη εάν θέλουμε να επιτύχουμε καλύτερη διαχείριση του φάσματος. Προκαλεί όμως τη δημιουργία παρεμβολών, εξαιτίας του γεγονότος ότι η ίδια συχνότητα χρησιμοποιείται ταυτόχρονα σε διαφορετικές κυψέλες που ανήκουν σε διαφορετικά clusters. Προς αποφυγή ή περιορισμό των παρεμβολών αυτών, χρησιμοποιούνται ορισμένες τεχνικές, οι οποίες αναπτύσσονται στη συνέχεια.

3.8 Υπολογισμός του λόγου C/I για την περίπτωση παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης συχνότητας

Η ισχύς των παρεμβολών λόγω επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων εξαρτάται, τόσο από την ισχύ των εκπεμπόμενων σημάτων όσο και από την απόσταση του δέκτη από τον κύριο πομπό (επιθυμητό πομπό) και τον παρεμβάλλοντα πομπό.

Στα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών, η απόσταση του δέκτη, τόσο από τον κύριο, όσο και από τον παρεμβάλλοντα πομπό εκφράζεται συναρτήσει της ακτίνας R των κυψελών (εάν όλες οι κυψέλες έχουν τις ίδιες διαστάσεις) και της μέσης απόστασης επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων D. Έτσι, εάν οι κυψέλες του συστήματος έχουν τις ίδιες διαστάσεις, η ισχύς των παρεμβολών λόγω επαναχρησιμοποίησης είναι ανεξάρτητη από την ισχύ των εκπεμπόμενων, από κάθε παρεμβάλλουσα κυψέλη, σημάτων και εξαρτάται μόνο από το λόγο

$$q = \frac{D}{R}$$

(3.11)

που ονομάζεται *λόγος επαναχρησιμοποίησης* (cochannel reuse ratio) ή *παράγοντας μείωσης παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης* (cochannel interference reduction factor). Θα πρέπει να τονιστεί, ότι το q δεν μπορεί να αυξηθεί απεριόριστα (δηλαδή, δεν μπορούν να εξαλειφθούν πλήρως οι παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης), επειδή σύμφωνα με την (3.11) αυτό θα σήμαινε πολύ μεγάλη αύξηση της μέσης απόστασης επαναχρησιμοποίησης D, επομένως και αντίστοιχη πολύ μεγάλη μείωση της ραδιοχωρητικότητας m του συστήματος (όπως δείχνει και η σχέση (3.3)), γεγονός το οποίο είναι βεβαίως ανεπιθύμητο. Η μέση απόσταση επαναχρησιμοποίησης D εξαρτάται από:

- τον αριθμό K_1 των ομοκαναλικών κυψελών της πρώτης ζώνης (είναι πάντοτε $K_1=6$) και
- το λόγο ισχύος φέροντος και ισχύος παρεμβολής C/I (Carrier to Interference power Ratio, CIR) στον κινητό δέκτη.

Ο λόγος C/I ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C}{I} = \frac{C}{\sum_{K=1}^{K_1} I_K}$$

(3.12)

όπου I_K είναι η ισχύς του παρεμβάλλοντος σήματος από την K-στή κυψέλη πρώτης ζώνης (first tier). Ας σημειωθεί ότι οι παρεμβολές των ομοκαναλικών κυψελών της δεύτερης ζώνης (second tier), θεωρούνται αμελητέες λόγω της μεγαλύτερης απόστασης στην οποία αυτές βρίσκονται. Για τη γενική περίπτωση όπου η κινητή μονάδα βρίσκεται σε απόσταση R από το σταθμό βάσης της κυψέλης στην οποία ανήκει, τότε σύμφωνα με το νόμο διάδοσης για την λαμβανόμενη ισχύ του φέροντος $C = aR^{-\gamma}$ ισχύει:

$$C_B = \alpha R^{-\gamma} \Rightarrow C_B = \alpha \frac{1}{R^\gamma}$$

(3.13)

$$C_{I_i} = \alpha D^{-\gamma} \Rightarrow C_{I_i} = \alpha \cdot \frac{1}{D^\gamma}$$

(3.14)

όπου C_B είναι η ισχύς του εκπεμπόμενου σήματος σε απόσταση R από το σταθμό βάσης της κυψέλης στην οποία κινείται ο δέκτης και C_{I_i} είναι η ισχύς του παρεμβάλλοντος σήματος από μια από τις ομοκαναλικές κυψέλες σε απόσταση περίπου D . Από τις (3.13), (3.14) έχουμε:

$$\frac{C_B}{C_{I_i}} = \left(\frac{D}{R}\right)^\gamma \Rightarrow$$

$$\Rightarrow q = \frac{D}{R} = \left(\frac{C}{I}\right)_i^{1/\gamma}$$

(3.15)

όπου ο δείκτης i δηλώνει την παρεμβολή από την i -οστή κυψέλη του συστήματος. Από τη σχέση (3.15) συμπεραίνουμε, ότι ο παράγοντας q εξαρτάται και από τις πραγματικές συνθήκες διάδοσης στην περιοχή που εξετάζεται. Έτσι, για την περίπτωση παρεμβολών και από τις $K_0 = 6$ ομοκαναλικές κυψέλες, ο απαιτούμενος λόγος C/I θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-\gamma}}{\sum_{K=1}^{K_0} D_K^{-\gamma}}$$

(3.16)

όπου γ είναι η κλίση της απόσβεσης κατά τη διάδοση η οποία εξαρτάται από τα εδαφολογικά και πολεοδομικά χαρακτηριστικά της περιοχής και παίρνει τιμές $2 \leq \gamma \leq 5$.

Γενικά, οι παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων, εμφανίζονται, τόσο στο σταθμό βάσης μιας κυψέλης από τις εκπομπές των κινητών στις ομοκαναλικές κυψέλες, όσο και στον κινητό δέκτη από τις εκπομπές των σταθμών βάσης στις ομοκαναλικές κυψέλες. Θεωρώντας ότι η στάθμη ισχύος του θορύβου στην εξεταζόμενη περιοχή είναι πολύ χαμηλότερη από τη στάθμη ισχύος των παρεμβολών, τότε οι αντίστοιχοι λόγοι C/I στις δύο παραπάνω περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν περίπου ίσοι, σύμφωνα με το *θεώρημα της αντιστρεψιμότητας*.

3.9 Κριτήριο παροχής ποιότητας υπηρεσιών

Στα αναλογικά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών κινητών συνήθως ορίζεται ως επιθυμητός λόγος C/I, μια ελάχιστη τιμή ίση προς 18 dB, δηλαδή:

$$\left(\frac{C}{I}\right)_{\min} = 18\text{dB}$$

(3.17)

Η τιμή αυτή του λόγου C/I καθορίζεται βάσει υποκειμενικών τεστ, τέτοιων ώστε το 75% των χρηστών να χαρακτηρίζουν την ποιότητα επικοινωνίας από καλή ως άριστη στο 90% της καλυπτόμενης έκτασης, σε επίπεδη περιοχή. Με βάση το κριτήριο αυτό, είναι προφανές ότι τόσο τα προβλήματα αποσβέσεων, όσο και οι παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης-εφόσον ενυπάρχουν κατά τη διενέργεια των ελέγχων - μπορούν να θεωρούνται ανύπαρκτα.

3.10 Σχεδίαση Συστήματος με χρήση ομοιοκατευθυντικών κεραιών σε συνθήκες χειρότερης περίπτωσης

Έχει ήδη αποδειχθεί, ότι η τιμή $q=4.6$, είναι ακριβής για την περίπτωση όπου $K=7$. Στην παράγραφο αυτή θα αποδειχθεί, ότι ο σχεδιασμός κυψελών με $K=7$, δεν παρέχει επαρκή διαχωριστική απόσταση προκειμένου να γίνει σωστή επαναχρησιμοποίηση των διαθέσιμων συχνοτήτων ακόμα και στην ιδανική περίπτωση της επίπεδης επιφάνειας εδάφους. Η χειρότερη περίπτωση λειτουργίας (worst case operation) είναι η περίπτωση στην οποία η κινητή μονάδα λαμβάνει το πλέον αδύνατο σήμα από τον σταθμό βάσης στον οποίο ανήκει ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει ισχυρές παρεμβολές από όλους τους άλλους σταθμούς βάσης του συστήματος. Έτσι, στη χειρότερη περίπτωση λειτουργίας, η κινητή μονάδα βρίσκεται στα όρια της κυψέλης ακτίνας R. Αν θεωρηθεί ότι η μέση απόσταση επαναχρησιμοποίηση D είναι η ίδια για όλες τις ομοκαναλικές κυψέλες, τότε ο λόγος της ισχύος του σήματος (φέροντος) του επιθυμητού σταθμού βάσης προς την ισχύ του παρεμβάλλοντος σήματος (συνολική ισχύ παρεμβολής) υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \frac{C}{I} &= \frac{R^{-4}}{2(D-R)^{-4} + 2(D)^{-4} + 2(D+R)^{-4}} = \\ &= \frac{1}{2(q-1)^{-4} + 2(q)^{-4} + 2(q+1)^{-4}} \end{aligned}$$

(3.18)

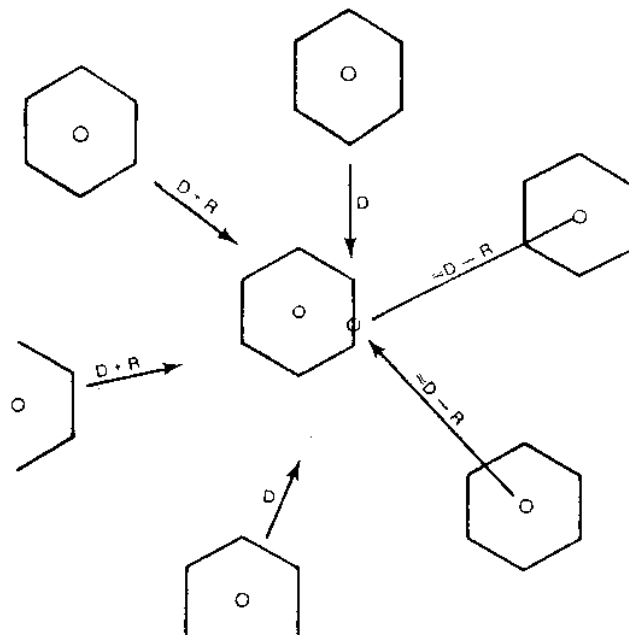
Αντικαθιστώντας την τιμή $q=4.6$ στην (3.18) προκύπτει $C/I=54$ δηλαδή 17 dB, το οποίο είναι μικρότερο από το κατώτατο επιθυμητό όριο των 18 dB το οποίο απαιτείται για να έχω

ικανοποιητική λειτουργία σε ένα αναλογικό σύστημα επικοινωνιών κινητών. Για να είναι συντηρητικοί οι υπολογισμοί, χρησιμοποιείται η μικρότερη απόσταση D-R και για τους έξι παρεμβολείς ως η χειρότερη περίπτωση (η μικρότερη απόσταση κινητού σταθμού και παρεμβολέων). Τότε η (3.18) γίνεται :

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{6(D-R)^{-4}} = \frac{1}{6(q-1)^{-4}} = 28 = 14.47 \text{ dB}$$

(3.19)

Στην πραγματικότητα εξαιτίας των ανωμαλιών της επιφάνειας του εδάφους ο λόγος C/I είναι πάντα μικρότερος από 17dB και μπορεί να φτάσει τα 14 dB ή και ακόμα χαμηλότερα. Η τελευταία περίπτωση μπορεί εύκολα να εμφανιστεί σε συνθήκες αυξημένης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Γι’ αυτό, το σύστημα πρέπει πάντοτε να σχεδιάζεται χρησιμοποιώντας το λόγο C/I για την χειρότερη περίπτωση λειτουργίας. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή που έχει υπολογισθεί για τον παράγοντα μείωσης των παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης (q=4.6) δεν είναι ικανοποιητική.



Σχήμα 3.1 Παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης καναλιών (χειρότερη περίπτωση λειτουργίας).

Ένα σύστημα με πανκατευθυντικές κεραίες και τιμές $K=9$ ή $K=12$, θα ήταν η σωστή επιλογή. Τότε για τον παράγοντα q ισχύει:

$$q=5.2 \text{ για } K=9$$

και

$$q=6.0 \text{ για } K=12$$

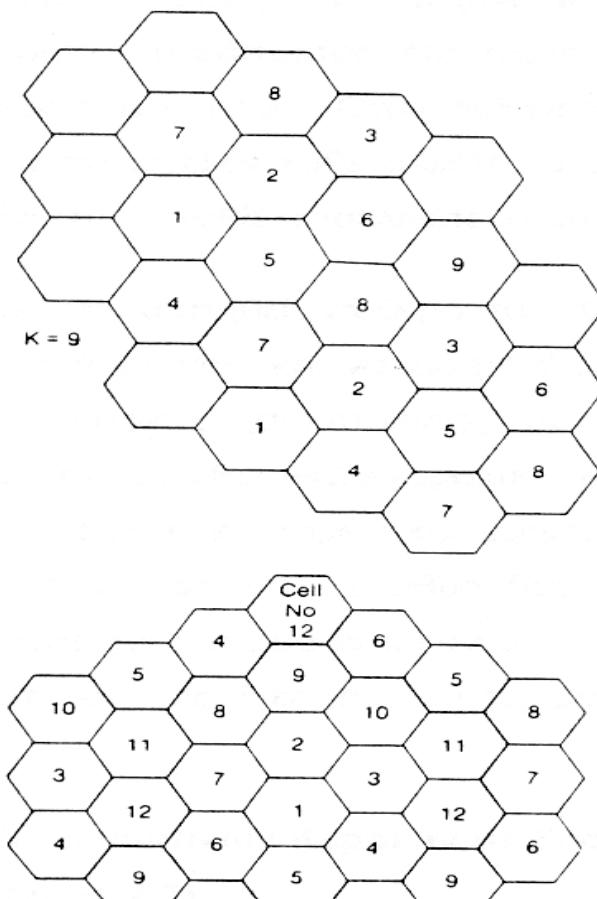
Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην (3.19) προκύπτει:

$$\frac{C}{I} = 84.50 \text{ δηλαδή } 19.25 \text{ dB για } K=9$$

και

$$\frac{C}{I} = 179.33 \text{ δηλαδή } 22.54 \text{ dB για } K=12.$$

Τα συστήματα με $K=9$ και $K=12$ φαίνονται στο σχήμα 3.2.

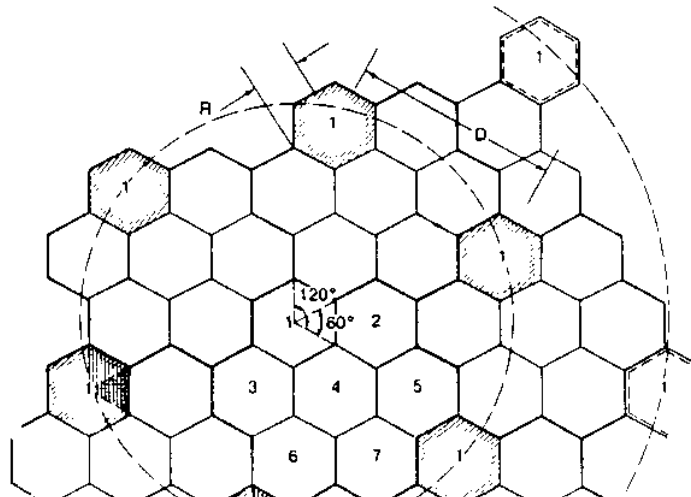


Σχήμα 3.2 Κυψελωτό σύστημα με πανκατευθυντικές κεραιές και με $K=9$ και $K=12$.

Επομένως, η αύξηση του αριθμού ομαδοποίησης K , προκάλεσε ταυτόχρονη αύξηση του λόγου C/I . Όμως, η αύξηση του K προκαλεί τη μείωση του αριθμού των καναλιών ανά κυψέλη, άρα και μείωση της απόδοσης του συστήματος. Μια πιο ικανοποιητική αντιμετώπιση του προβλήματος παρέχει η χρήση κατευθυντικών κεραιών, η οποία αναλύεται στην επόμενη παράγραφο.

3.11 Σχεδίαση συστήματος με χρήση κατευθυντικών κεραιών

Όταν η τηλεφωνική κίνηση αυξηθεί, είναι απαραίτητο να επιτευχθεί καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων, έτσι ώστε να αποφευχθεί αύξηση του αριθμού K των κυψελών ανά σύμπλεγμα κυψελών. Όταν αυξάνεται το K , ελαττώνεται ο αριθμός των καναλιών που αντιστοιχεί σε κάθε κυψέλη και επομένως η τεχνική της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων καθίσταται λιγότερο αποτελεσματική. Έτσι, είναι προτιμότερο να κρατηθεί σταθερό το $K=7$ (αναφερόμενοι σε σύστημα με επτά κυψέλες ανά cluster) και να εισαχθεί η χρήση κατευθυντικών κεραιών. Οι παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων μπορούν να μειωθούν με τη χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών. Αυτό μπορεί να συμβεί, διαιρώντας κάθε κυψέλη σε τρεις ή έξι τομείς (sectors) και χρησιμοποιώντας τρεις ή έξι κατευθυντικές κεραιές αντίστοιχα, σε κάθε σταθμό βάσης. Σε κάθε έναν από αυτούς τους τομείς, χρησιμοποιείται μια ομάδα καναλιών. Οι παρεμβολές μεταξύ δύο κυψελών που χρησιμοποιούν τις ίδιες συχνότητες μειώνεται, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3.



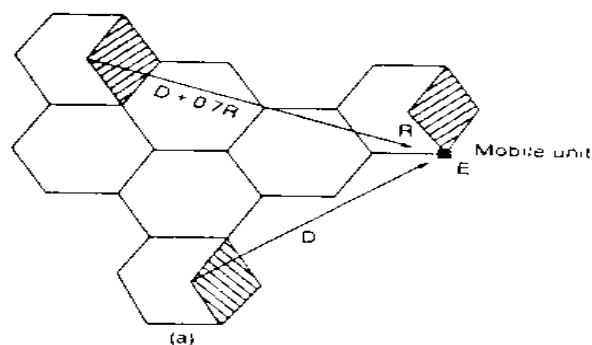
Σχήμα 3.3 Χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών σε κυψελωτό σύστημα.

3.12 Χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών σε σύστημα με επτά κυψέλες ανά cluster

- **Περίπτωση διαίρεσης της κυψέλης σε τρεις τομείς**

Η περίπτωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.4 (α). Η κινητή μονάδα η οποία βρίσκεται στο σημείο E δέχεται μεγαλύτερες παρεμβολές στο χαμηλότερο σημείο του γραμμοσκιασμένου τμήματος της κυψέλης από ότι στο υψηλότερο σημείο. Αυτό συμβαίνει, επειδή ο κινητός δέκτης λαμβάνει το ασθενέστερο δυνατό σήμα από την κυψέλη στην οποία βρίσκεται, ενώ ταυτόχρονα δέχεται ισχυρές παρεμβολές από το σταθμό βάσης της άλλης κυψέλης. Σε ένα τέτοιο σύστημα οι παρεμβολές επιδρούν σε μία μόνο κατεύθυνση, εξαιτίας του γεγονότος ότι ο λόγος front-to-back σε μια κατευθυντική κεραία του σταθμού βάσης, σε περιβάλλον κινητών επικοινωνιών, είναι τουλάχιστον κατά 10 dB μεγαλύτερος.

Εξαιτίας της χρησιμοποίησης κατευθυντικών κεραιών, ο αριθμός των σταθμών βάσης που παρεμβάλλονται ελαττώνεται από έξι σε δύο. Η χειρότερη περίπτωση του λόγου C/I εμφανίζεται όταν η κινητή μονάδα είναι στη θέση E. Ο λόγος C/I, στην περίπτωση αυτή, μπορεί να υπολογισθεί με ικανοποιητική ακρίβεια με τον ακόλουθο τρόπο, υποθέτοντας ότι η χειρότερη περίπτωση είναι στην θέση E στην οποία οι αποστάσεις από τους δύο παρεμβολείς είναι $D+0.7R$ και D αντίστοιχα:



Σχήμα 3.4 Υπολογισμός του λόγου C/I σε κυψελωτό σύστημα με κατευθυντικές κεραιές.

- (a) Συνθήκες χειρότερης περίπτωσης σε σύστημα με κεραιές κατευθυντικότητας 120° και K=7
- (b) Συνθήκες χειρότερης περίπτωσης σε σύστημα με κεραιές κατευθυντικότητας 60° και K=7.

$$\begin{aligned}\frac{C}{I} \text{ (χειρότερη περίπτωση)} &= \frac{R^{-4}}{(D + 0.7R)^{-4} + D^{-4}} = \\ &= \frac{1}{(q + 0.7)^{-4} + q^{-4}}\end{aligned}$$

(3.20)

Αντικαθιστώντας την τιμή $q=4.6$ στην (3.20) προκύπτει:

$$\frac{C}{I} \text{ (χειρότερη περίπτωση)} = 285 \text{ δηλαδή } 24.5 \text{ dB}$$

(3.21)

Ο λόγος C/I για μια κινητή μονάδα με χρήση κεραιών κατευθυντικότητας 120°, που εκφράζεται από την (3.21) υπερβαίνει κατά πολύ τα 18dB στη χειρότερη περίπτωση. Η (3.21) δείχνει ότι η χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών μπορεί να βελτιώσει τον λόγο της ισχύος του σήματος που εκπέμπεται από τον σταθμό βάσης προς την συνολική ισχύ της παρεμβολής, δηλαδή μπορεί να ελαττώσει τις παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης των καναλιών. Εν τούτοις, στην πραγματικότητα ο λόγος C/I μπορεί να είναι κατά 6 dB ασθενέστερος από ό,τι δίνει η (3.21), σε περιοχές με υψηλή κίνηση, ως αποτέλεσμα των

ανωμαλιών της επιφάνειας του εδάφους. Όμως τα εναπομείναντα 18.5 dB εξακολουθούν όμως να είναι επαρκή.

- **Περίπτωση διαίρεσης της κυψέλης σε έξι τομείς**

Η κυψέλη μπορεί επίσης να διαιρεθεί σε έξι τομείς, χρησιμοποιώντας έξι κεραιές κατευθυντικότητας 60^0 , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5 (b). Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να εμφανιστεί παρεμβολή σε κάθε τομέα, από ένα μόνο σταθμό βάσης, Ο λόγος C/I στην περίπτωση αυτή, είναι ίσος με:

$$\frac{C}{I} = \frac{R^{-4}}{(D+0.7R)^{-4}} = (q+0.7)^4$$

(3.22)

Αντικαθιστώντας την τιμή $q=4.6$ στην (3.22) προκύπτει:

$$\frac{C}{I} = 794 \quad \text{δηλαδή} \quad 29 \quad \text{dB}$$

(3.23)

Η προηγούμενη σχέση δηλώνει ακόμα μεγαλύτερη μείωση των παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης καναλιών. Αν ακολουθηθεί ο ίδιος συλλογισμός, όπως στην (3.21) και στη συνέχεια αφαιρεθούν 6 dB από το αποτέλεσμα της (3.23), τα εναπομείναντα 23 dB εξακολουθούν να είναι επαρκή. Σε περίπτωση υψηλής κίνησης μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί αυτού του είδους ο σχεδιασμός, προκειμένου να υπάρξει ελάττωση των παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης καναλιών. Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται λιγότερα κανάλια σε κάθε τομέα της κυψέλης και συνεπώς μειώνεται η απόδοση ζευξιμότητας. Σε συγκεκριμένες μόνο περιπτώσεις μπορεί να γίνει χρήση περισσοτέρων καναλιών σε ένα τομέα 60^0 .

3.13 Χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών σε σύστημα με τέσσερις κυψέλες ανά cluster

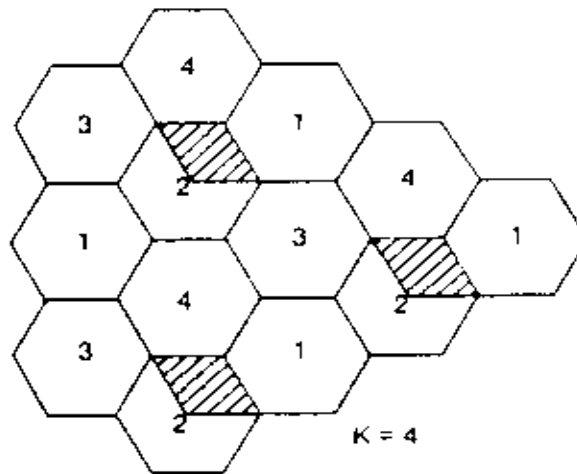
- **Περίπτωση διαίρεσης της κυψέλης σε τρεις τομείς**

Για τον υπολογισμό του λόγου C/I χρησιμοποιείται η ίδια διαδικασία με την περίπτωση όπου $K=7$. Με τη χρησιμοποίηση κεραιών κατευθυντικότητας 120^0 ελαττώνεται ο αριθμός των σταθμών βάσης που παρεμβάλλονται, σε δύο, όπως και στα συστήματα με $K=7$. Η κατάσταση παρουσιάζεται στο σχήμα 3.5. Μπορεί και σε αυτή τη περίπτωση να χρησιμοποιηθεί η (3.20). Για $K=4$ είναι $q = \sqrt{3K} = 3.46$, επομένως ισχύει:

$$\frac{C}{I} \text{ (χειρότερη περίπτωση)} = \frac{1}{(q+0.7)^{-4} + q^{-4}} = 97 \quad \text{δηλαδή} \quad 20\text{dB}$$

(3.24)

Αν χρησιμοποιηθούν οι ίδιοι συλλογισμοί και αφαιρεθούν 6dB από το αποτέλεσμα της (3.24), τα εναπομείναντα 14 dB είναι ανεπαρκή, άρα μη αποδεκτά.



Σχήμα 3.5 Χρησιμοποίηση κατευθυντικών κεραιών σε σύστημα με $K=4$
(Διαίρεση της κυψέλης σε τρεις τομείς).

- **Περίπτωση διαίρεσης της κυψέλης σε έξι τομείς**

Στην περίπτωση αυτή υπάρχει ένας μόνο σταθμός βάσης που παρεμβάλλεται, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση $D+R$. Για $q=3.46$ ισχύει:

$$\frac{C}{I} \text{ (χειρότερη περίπτωση)} = \frac{R^{-4}}{(D+R)^{-4}} = \frac{1}{(q+1)^{-4}} = 359.5 \text{ δηλαδή } 27 \text{ dB}$$

Εάν 6dB αφαιρεθούν από το αποτέλεσμα της προηγούμενης εξίσωσης, τα εναπομείναντα 21dB είναι επαρκή. Κάτω από συνθήκες υψηλής κίνησης υπάρχουν ακόμα αμφιβολίες για την καταλληλότητα της χρησιμοποίησης συστήματος με $K=4$ κυψέλες ανά cluster και τομείς των 60° . Η εξήγηση παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

3.14 Σύγκριση κυψελωτών συστημάτων με $K=7$ και $K=4$

Ένα κυψελωτό σύστημα με $K=7$ είναι ένας λογικός τρόπος για να ξεκινήσει ο κυψελωτός σχεδιασμός μιας περιοχής που πρόκειται να καλυφθεί τηλεφωνικά. Η απόσταση διαχωρισμού που έχει καθορισθεί προκειμένου να έχουμε σωστή επαναχρησιμοποίηση καναλιών είναι περισσότερο ή λιγότερο επαρκής, ανάλογα με τα κριτήρια σχεδιασμού του συστήματος. Όταν η κίνηση αυξάνει, θα ήταν καλό να εφαρμοστεί ένα σύστημα διαχωρισμού της κυψέλης σε τρεις τομείς, με τη χρησιμοποίηση τριών κεραιών κατευθυντικότητας 120° . Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν τοπικά

τομείς των 60^0 , προκειμένου να γίνει καλύτερη διαχείριση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων.

Εάν μία δεδομένη περιοχή καλύπτεται ταυτοχρόνως από δύο διαφορετικά συστήματα, τα οποία έχουν έξι τομείς ανά κυψέλη, αλλά $K=7$ και $K=4$ αντίστοιχα, τότε το σύστημα με $K=7$ έχει συνολικά 42 τομείς, ενώ το σύστημα με $K=4$ έχει συνολικά μόνο 26 τομείς και φυσικά το πρώτο σύστημα έχει λιγότερες παρεμβολές επαναχρησιμοποίησης καναλιών. Ένα πλεονέκτημα του συστήματος με $K=4$ και τομείς των 60^0 , είναι ότι απαιτούνται λιγότεροι σταθμοί βάσης από ότι στα συστήματα με $K=7$ και τομείς των 120^0 . Δύο μειονεκτήματα των τομέων των 60^0 είναι τα εξής:

- περισσότερες κεραίες απαιτείται να συνδεθούν σε κάθε σταθμό βάσης και
- απαιτούν συχνότερες μεταπομπές εξαιτίας της αυξημένης πιθανότητας να κινηθεί η κινητή μονάδα κατά μήκος των διαφορετικών τομέων της κυψέλης.

Επιπλέον, το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης πρέπει να αυξηθεί μέχρι εκείνο το σημείο, ώστε η κινητή μονάδα να μπορεί να εντοπιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ευκολότερα η αντιστοίχιση της κατάλληλης συχνότητας στην κινητή μονάδα. Αυτό γίνεται ακόμα δυσκολότερο, αν ληφθεί υπόψη, ότι στην πραγματικότητα, η επιφάνεια του εδάφους δεν είναι επίπεδη και ως εκ τούτου, η κάλυψη δεν μπορεί ποτέ να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη.

Επιπλέον, ο λόγος front-to-back της ισχύος της κατευθυντικής κεραίας σε επίπεδη επιφάνεια είναι πολύ δύσκολο να προβλεφθεί. Έτσι, σε μικρές κυψέλες οι παρεμβολές μπορεί να γίνουν ανεξέλεγκτες. Ως εκ τούτου, η χρησιμοποίηση σε μικρές κυψέλες ενός συστήματος με $K=4$ και τομείς των 60^0 , είναι κατάλληλη μόνο για ειδικές εφαρμογές, όπως στην περίπτωση ενός *κινούμενου* (portable) κυψελωτού συστήματος ή για εφαρμογές *στενής δέσμης* (narrow-beam). Για μικρές κυψέλες, μια καλύτερη εναλλακτική λύση είναι η χρησιμοποίηση ενός συστήματος με $K=7$ και τομείς των 120^0 , σε συνδυασμό με επιλεκτική αύξηση ή μείωση της ισχύος του σήματος, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί σωστά η μεταπομπή. Η επιλεκτική αυτή αύξηση ή μείωση της ισχύος του σήματος ελέγχεται από το γραφείο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας.

3.15 Συμπεράσματα από τη χρήση κατευθυντικών κεραιών

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε, ότι η χρήση κατευθυντικών κεραιών οδηγεί σε μείωση της συνολικής στάθμης των παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης και μάλιστα, όσο μεγαλύτερη κατευθυντικότητα χρησιμοποιείται, τόσο μεγαλύτερη είναι και η βελτίωση του λόγου C/I. Όμως, η χρήση κατευθυντικών κεραιών παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα:

- μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης, καθώς περισσότερες κεραιές απαιτείται να τοποθετηθούν
- προκαλούνται συχνότερες μεταπομπές
- γίνεται δυσκολότερη η διαχείριση των διαθέσιμων συχνοτήτων
- γίνεται δυσκολότερος ο εντοπισμός (locating) του κινητού σταθμού
- ελαττώνεται η απόδοση ζευξιμότητας του συστήματος, γεγονός το οποίο έχει το μειονέκτημα να μειώνεται η χωρητικότητα του συστήματος.

3.16 Παρεμβολές γειτονικών σε συχνότητα καναλιών

Το θέμα που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα για μείωση των παρεμβολών επαναχρησιμοποίησης των καναλιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των παρεμβολών γειτονικών σε συχνότητα καναλιών (Adjacent Channel Interference, ACI). Οι παρεμβολές γειτονικών σε συχνότητα καναλιών μπορούν να εξαλειφθούν με σωστή κατανομή των συχνοτήτων και με σωστή επιλογή των χαρακτηριστικών του φίλτρου που χρησιμοποιείται. Ο όρος παρεμβολές γειτονικών σε συχνότητα καναλιών είναι πολύ ευρύς. Περιλαμβάνει τις παρεμβολές διπλανών καναλιών δηλαδή παρεμβολές οι οποίες προέρχονται από το κανάλι που βρίσκεται ακριβώς δίπλα φασματικά στο κανάλι που χρησιμοποιείται και τις παρεμβολές γειτονικών καναλιών (δηλαδή των καναλιών που βρίσκονται φασματικά σε μεγαλύτερη απόσταση από το κανάλι που χρησιμοποιείται).

3.16.1 Παρεμβολές διπλανών καναλιών

Οι παρεμβολές διπλανών καναλιών (next channel interference), οι οποίες επηρεάζουν μια συγκεκριμένη κινητή μονάδα, και προέρχονται από διαφορετικούς σταθμούς βάσης του συστήματος και όχι από τον κοινό σταθμό του συστήματος. Οι παρεμβολές διπλανών καναλιών θα φθάσουν στην κινητή μονάδα από άλλους σταθμούς βάσης, αν το σύστημα δεν είναι κατάλληλα σχεδιασμένο. Επίσης, μια κινητή μονάδα που κάνει κλήση στο κανάλι χειρισμού μιας κυψέλης, μπορεί να προκαλέσει παρεμβολές στο διπλανό κανάλι ελέγχου, σε κάποιον άλλο σταθμό βάσης. Οι μέθοδοι μείωσης των παρεμβολών θεωρούν φίλτρα συχνοτήτων τα οποία παρουσιάζουν κλίση 6 dB/oct στη ζώνη ομιλίας (voice band) και 24 dB/oct έξω από την περιοχή της ζώνης ομιλίας. Αν το σήμα του διπλανού καναλιού είναι πιο δυνατό από 24 dB, θα παρεμβληθεί στο επιθυμητό σήμα.

3.17 Διαφωνία

Η διαφωνία (cross talk) είναι ένα χαρακτηριστικό πρόβλημα των καναλιών ομιλίας (voice channels) στην κινητή τηλεφωνία. Όταν πρωτοσχεδιάστηκαν τα κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών, προβλεπόταν να λειτουργήσουν όπως οι ενσύρματες τηλεφωνικές γραμμές. Όπως σε μια συμβατική τηλεφωνική γραμμή, ένα ζεύγος καλωδίων εξυπηρετεί τις δύο κατευθύνσεις εκπομπής, έτσι και σε ένα κυψελωτό σύστημα επικοινωνιών, ένα ζεύγος

διαφορετικών συχνοτήτων χρησιμοποιείται για να εξυπηρετήσει τις δύο αντίστοιχες κατευθύνσεις εκπομπής. Το ζεύγος αυτό των συχνοτήτων καταλαμβάνει ένα συνολικό εύρος ζώνης συχνοτήτων 60 KHz στο οποίο μια ζώνη συχνοτήτων εύρους 30 KHz χρησιμεύει για τη λήψη και τα υπόλοιπα 30 KHz εξυπηρετούν την εκπομπή. Λόγω της σύζευξης των συχνοτήτων δια μέσου *δισύρματων-τετρασύρματων υβριδικών κυκλωμάτων* (two-wire-four-wire hybrid circuitry) στο τηλεφωνικό κέντρο, είναι πιθανό να υπάρχει ακρόαση ομιλίας και στις δύο συχνότητες ταυτόχρονα, ενώ γίνεται εκπομπή σε μία μόνο συχνότητα. Γι’ αυτό, όπως συμβαίνει και σε μία συμβατική τηλεφωνική γραμμή, η συνομιλία μπορεί να ακουστεί σε μια οποιαδήποτε από τις δύο συχνότητες.

3.18 Παρεμβολή ενδοδιαμόρφωσης

Η *παρεμβολή ενδοδιαμόρφωσης* (Intermodulation interference) προκαλείται από τις ακόλουθες αιτίες:

- μετατροπή AM-PM
- μη προσαρμογή μεταξύ της κεραίας και του ακροδέκτη της
- συντοποθέτηση κεραιών εκπομπής

Οι παρεμβολές ενδοδιαμόρφωσης που οφείλονται σε μετατροπή AM-PM αντιμετωπίζονται με ενίσχυση σε *κύκλωμα εμπρόσθιας διάδοσης* (feed-forward circuit). Το πρόβλημα της έλλειψης προσαρμογής μεταξύ της κεραίας και του ακροδέκτη της αντιμετωπίζεται εάν ανάμεσα στην κεραία και στον ακροδέκτη της παρεμβληθεί μια συσκευή που να αυξάνει τη μεταξύ τους συμβατότητα. Τέλος, το πρόβλημα που δημιουργείται με τη συντοποθέτηση κεραιών εκπομπής αντιμετωπίζεται με την εγκατάσταση ενός συστήματος *περιορισμού των παρεμβολών* (Interference-cancellation system).

3.19 Αλληλοπαρεμβολή συμβόλων

Η *αλληλοπαρεμβολή συμβόλων* (intersymbol interference, ISI) οφείλεται στο φυσικό κανάλι επικοινωνίας το οποίο προκαλεί διεύρυνση και αλληλοεπικάλυψη των διαδιδόμενων ψηφιακών παλμών. Εάν ο ρυθμός εκπομπής δεδομένων (σηματοδοσίας) είναι χαμηλός και η χρονική διασπορά καθυστέρησης (delay spread) του καναλιού είναι μικρή, τότε η αλλαγή της κυματομορφής του εκπεμπόμενου σήματος, η χρήση *εξισωτών* (equalizers), καθώς επίσης και η χρησιμοποίηση ειδικών κυκλωμάτων ψηφιακής κωδικοποίησης (encoding) μπορούν να χρησιμοποιηθούν, προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της αλληλοπαρεμβολής συμβόλων.

3.20 Μέθοδοι διαφορικής λήψης

Σκοπός των μεθόδων *διαφορικής λήψης* (ή *διαφοροποίησης στη λήψη*) (diversity methods) είναι η αντιμετώπιση του φαινομένου των διαλείψεων, που παρατηρούνται στο λαμβανόμενο σήμα, όταν αυτό εκπέμπεται σε ένα τυχαίως μεταβαλλόμενο με το χρόνο

κανάλι. Γενικά, μία μέθοδος διαφορικής λήψης απαιτεί να είναι διαθέσιμος στο δέκτη του συστήματος ένας αριθμός από διαφορετικές και διακριτές "διαδρομές διάδοσης" (transmission paths) του εκπεμπόμενου σήματος, μεταφέροντας όλες την ίδια πληροφορία αλλά επηρεαζόμενες με διαφορετικό τρόπο από το κανάλι. Οι διαφορετικές "διαδρομές" του σήματος είναι δυνατό να υλοποιούνται στο πεδίο της συχνότητας ή στο πεδίο του χρόνου. Ο κατάλληλος *συνδυασμός* (combining) των σημάτων, που προέρχονται από τις διαφορετικές "διαδρομές" του σήματος, δίνει τη δυνατότητα να αντιμετωπιστεί σε ορισμένο βαθμό, το φαινόμενο των διαλείψεων και να αυξηθεί η αξιοπιστία του συγκεκριμένου συστήματος εκπομπής, δεδομένου ότι η πιθανότητα ταυτόχρονης παρουσίας διαλείψεων στα σήματα των διαφορετικών διαδρομών είναι γενικά μικρή.

3.21 Διαφορική λήψη συχνότητας

Μία από τις μεθόδους διαφορικής λήψης είναι η χρησιμοποίηση περισσότερων από μία συχνότητες για την εκπομπή του ίδιου σήματος πληροφορίας. Έτσι, αν οι χρησιμοποιούμενες συχνότητες απέχουν φασματικά σε ικανοποιητικό βαθμό, τότε οι διαλείψεις του σήματος, που παρατηρούνται σε καθεμιά από τις συχνότητες είναι στατιστικά ασυσχέτιστες. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται *διαφορική λήψη συχνότητας*. Όπως έχει ήδη ειπωθεί, αν οι δύο εκπεμπόμενες συχνότητες απέχουν φασματικά απόσταση μεγαλύτερη από το εύρος ζώνης συμφωνίας B_{coh} ενός καναλιού πολλαπλών διαδρομών, τότε οι συχνότητες αυτές επηρεάζονται διαφορετικά από το κανάλι. Ανάλογα με τη σχέση μεταξύ του εύρους ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος B και του εύρους ζώνης συμφωνίας του καναλιού B_{coh} , τα συστήματα διακρίνονται σε *συστήματα περιορισμένου φάσματος* (narrow-band systems) και σε *συστήματα ευρέος φάσματος* (broad-band systems) σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$B < B_{coh} \cong 1/\Delta: \text{συστήματα περιορισμένου φάσματος}$$

(3.25)

$$B > B_{coh} \cong 1/\Delta: \text{συστήματα ευρέος φάσματος}$$

Έστω ένα σήμα $u(t)$ εύρους ζώνης B , το οποίο εκπέμπεται σε ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών, για το οποίο το εύρος ζώνης του είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συμφωνίας B_{coh} του καναλιού, δηλαδή:

$$B > B_{coh}$$

(3.26)

Σε μία τέτοια περίπτωση, το κανάλι επιδρά με διαφορετικό τρόπο στις φασματικές συνιστώσες του εκπεμπόμενου σήματος και για το λόγο αυτό ονομάζεται *κανάλι με επιλογή στο πεδίο της συχνότητας* (frequency selective channel). Το λαμβανόμενο σήμα $r(t)$ προκύπτει

από την υπέρθεση M διακριτών χρονικώς καθυστερημένων "αντιγράφων" του αρχικά εκπεμπόμενου σήματος $u(t)$, καθένα από τα οποία παρουσιάζει συγκεκριμένη μετατόπιση φάσης θ_i σε σχέση με το εκπεμπόμενο σήμα και η εξίσωση $u(t-\tau_i) \approx u(t)$, $i=1, \dots, M$, δεν ισχύει. Στα συστήματα διάχυτου φάσματος, που έχουν περιγραφεί στο πρώτο κεφάλαιο, το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος είναι, στη γενική περίπτωση, πολύ μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης συμφωνίας B_{coh} του καναλιού πολλαπλών διαδρομών. Έτσι, τα συστήματα διάχυτου φάσματος δίνουν τη δυνατότητα διαχωρισμού των M διακριτών "αντιγράφων" του εκπεμπόμενου σήματος $u(t)$, χρησιμοποιώντας βέβαια συγκεκριμένης δομής δέκτη ο οποίος ονομάζεται δέκτης RAKE. Βέβαια, τα σήματα αυτά φτάνουν στο δέκτη σε διαφορετικές χρονικές στιγμές τ_i , $i=1, \dots, M$, λόγω των διαφορετικού μήκους διαδρομών, που έχουν ακολουθήσει στη διάδοσή τους. Τελικά, το λαμβανόμενο σήμα $r(t)$ δίνεται προσεγγιστικά από την παρακάτω εξίσωση:

$$r(t) \cong A \cdot \sum_{i=1}^M R_i \cdot u(t - \tau_i) \cdot \exp(j2\pi f_0 t + \theta_i)$$

(3.27)

θεωρώντας ότι η μετατόπιση Doppler δf_i για καθένα από τα λαμβανόμενα σήματα $u(t-\tau_i)$ έχει μικρή τιμή και γι' αυτό μπορεί να παραληφθεί. Η σχέση (3.27) μπορεί να γραφεί ισοδύναμα:

$$r(t) \cong \sum_{i=1}^M \beta_i \cdot u\left(t - \frac{i}{B}\right) \cdot \exp(j2\pi f_0 t + \theta_i)$$

(3.28)

στην οποία ο όρος $A \cdot R_i$ έχει αντικατασταθεί με β_i . Από τη σχέση (3.28) προκύπτει ότι η κρουστική απόκριση $h(\tau)$ ενός καναλιού πολλαπλών διαδρομών, στο οποίο εκπέμπεται ένα σήμα με εύρος ζώνης μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης του καναλιού B_{coh} , μπορεί να δοθεί από τη σχέση:

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^M \beta_i \cdot \delta(\tau - \tau_i)$$

(3.29)

ή ισοδύναμα

$$h(\tau) = \sum_{i=1}^M \beta_i \cdot \delta\left(\tau - \frac{i}{B}\right)$$

(3.30)

Λόγω των διακριτών τιμών της χρονικής καθυστέρησης τ το κανάλι ονομάζεται *διακριτό κανάλι πολλαπλών διαδρομών* (discrete multipath channel). Η σχέση (3.30) δηλώνει ότι το κανάλι μπορεί να περιγραφεί από μία *γραμμή καθυστέρησης* (delay line) οι έξοδοι της οποίας αντιστοιχούν στις χρονικές καθυστερήσεις (χρονικές στιγμές άφιξης) τ_i , $i=1, \dots, M$ ή από μία γραμμή καθυστέρησης με χρονικές καθυστερήσεις $1/B$. Οι έξοδοι της γραμμής καθυστέρησης πρέπει στη συνέχεια, σύμφωνα με τη σχέση (3.30), να πολλαπλασιαστούν με τους συντελεστές β_i και να αθροιστούν. Η προηγούμενη δομή αντιστοιχεί σε ένα φίλτρο

απομαστυεμένης γραμμής καθυστέρησης (εγκάρσιο φίλτρο). Έτσι, η επίδραση του καναλιού στο εκπεμπόμενο σήμα είναι ισοδύναμη με την εκπομπή του σήματος $u(t)$ στην είσοδο της προηγούμενης δομής φίλτρου.

3.22 Τεχνικές συνδυασμού σημάτων διαφορικής λήψης

Η επίδραση του φαινομένου των διαλείψεων, που παρουσιάζεται στο λαμβανόμενο σήμα όταν αυτό εκπέμπεται σε ένα τυχαίως μεταβαλλόμενο κανάλι πολλαπλών διαδρομών, μπορεί να μειωθεί αξιοποιώντας τις μεθόδους διαφορικής λήψης τόσο στην αναλογική εκπομπή σήματος όσο και στη ψηφιακή. Οποσδήποτε, πρέπει να γίνει χρήση τεχνικών, οι οποίες κατά περίπτωση θα συνδυάζουν τα σήματα-συνιστώσες που προκύπτουν από μία μέθοδο διαφορικής λήψης με σκοπό την εξαγωγή βέλτιστου αποτελέσματος όσον αφορά την αντιμετώπιση των διαλείψεων. Οι τεχνικές αυτές, που ολοκληρώνουν ένα σύστημα διαφορικής λήψης, ονομάζονται *τεχνικές συνδυασμού* (combining techniques) των σημάτων διαφορικής λήψης. Οι *τεχνικές γραμμικού συνδυασμού* (linear diversity combining techniques) των σημάτων της διαφορικής λήψης είναι:

- *τεχνική με επιλογή* (selective combining)
- *τεχνική μεγίστου λόγου* (maximal-ratio combining)
- *τεχνική ίσου κέρδους* (equal gain combining)
- *τεχνική με κατώφλι* (switched combining).

Οι τεχνικές συνδυασμού εφαρμόζονται κατά τη *διαφορική λήψη χώρου* (space diversity) και σε κινητούς δέκτες. Υποτίθεται ότι οι περιβάλλουσες των σημάτων που λαμβάνονται από τις κεραιές στην περίπτωση διαφορικής λήψης, είναι στατιστικά ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Η υπόθεση αυτή είναι δύσκολο να ισχύει πάντα στην πράξη και σε μία τέτοια περίπτωση πρέπει να θεωρηθεί ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των σημάτων των διαφόρων κεραιών. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας της περιβάλλουσας του λαμβανόμενου σήματος μπορούν επίσης να αντιμετωπιστούν, με εφαρμογή μιας μεθόδου διαφορικής λήψης κατά την εκπομπή του σήματος προς τον κινητό δέκτη. Δηλαδή, αν για παράδειγμα, σε μία κυψέλη ενός κυψελωτού συστήματος επικοινωνιών κινητών, χρησιμοποιηθούν περισσότεροι του ενός σταθμοί βάσης για να εξυπηρετήσουν τον ίδιο κινητό δέκτη, είναι δυνατό να αποφευχθεί κατά τη λήψη η επίδραση των εμποδίων, που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη, σε μία συγκεκριμένη διαδρομή του σήματος. Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί αναλυτικά μόνο η τεχνική μεγίστου λόγου.

3.22.1 Τεχνική συνδυασμού μεγίστου λόγου

Στη τεχνική αυτή τα σήματα, που λαμβάνονται από τις M διαφορετικές κεραιές, πολλαπλασιάζονται με ένα *συντελεστή βάρους* (weighted factor) α_i , ($i=1,2,\dots,M$) ανάλογα με

το στιγμιαίο λόγο σήματος-προς-θόρυβο (Signal-to-Noise power Ratio, SNR), που αυτά παρουσιάζουν και στη συνέχεια αθροίζονται αφού γίνουν συμφασικά. Η περιβάλλουσα r του τελικού σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$r = \sum_{i=1}^M \alpha_i \cdot r_i$$

(3.31)

όπου r_i ($i=1,2,\dots,M$) είναι η περιβάλλουσα του σήματος σε καθεμία από τις M κεραιές. Ανάλογα, η συνολική μέση ισχύς του θορύβου N_T είναι το άθροισμα των ισχύων θορύβου καθεμιάς από τις M κεραιές, δηλαδή:

$$N_T = N \cdot \sum_{i=1}^M \alpha_i^2$$

(3.32)

υποθέτοντας ότι η μέση ισχύς του θορύβου σε όλες τις κεραιές είναι ίδια δηλαδή $\langle n_i^2 \rangle = N$ ($i=1,2,\dots, M$). Τελικά, ο λόγος σήματος-προς-θόρυβο γ_R του σήματος, που προκύπτει είναι ίσος με:

$$\gamma_R = \frac{r^2}{2N_T}$$

(3.33)

Μπορεί να αποδειχτεί ότι, αν $\alpha_i = \gamma_i / \langle n_i^2 \rangle = r_i / N$, τότε ο λόγος γ_R μεγιστοποιείται και παίρνει την τιμή:

$$\gamma_R = \sum_{i=1}^M \gamma_i$$

(3.34)

Αν οι περιβάλλουσες των σημάτων καθεμιάς από τις M κεραιές ακολουθεί κατανομή Rayleigh, τότε ο τελικός λόγος σήματος-προς-θόρυβο γ_R μετά την εφαρμογή της τεχνικής έχει συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$p(\gamma_R) = \frac{\gamma_R^{M-1}}{\Gamma^M \cdot (M-1)!} \cdot \exp\left(-\frac{\gamma_R}{\Gamma}\right), \quad \gamma_R \geq 0$$

(3.35)

ενώ η μέση τιμή του γ_R είναι ίση με:

$$\langle \gamma_R \rangle = \sum_{i=1}^M \langle \gamma_i \rangle = \sum_{i=1}^M \Gamma = M \cdot \Gamma$$

(3.36)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΧΩΡΗΣΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΙΝΗΤΩΝ

4.1 Μέθοδος καθορισμένης κατανομής των καναλιών

Στη μέθοδο αυτή, σε κάθε κυψέλη του συστήματος, ανήκει *σταθερά* ένα υποσύνολο των διαθέσιμων καναλιών του συστήματος. Τα υποσύνολα αυτά επαναχρησιμοποιούνται σε κυψέλες που απέχουν, όπως ξέρουμε ήδη, απόσταση D . Έτσι όταν πρέπει να εξυπηρετηθεί μια κλήση σε μια ορισμένη κυψέλη τότε μόνο τα κανάλια αυτής της κυψέλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Εάν όλα τα κανάλια που ανήκουν στην κυψέλη είναι απασχολημένα από συνδρομητές, τότε μια καινούργια κλήση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, ακόμα και αν υπάρχουν πολλά ελεύθερα κανάλια σε γειτονικές κυψέλες.

Τις πιο πολλές φορές ο μέσος όρος του παρεχόμενου φορτίου ανά κυψέλη κυμαίνεται μεταξύ μεγάλων τιμών στο κέντρο των πόλεων και μικρών στα προάστια των πόλεων (ημιαστικές περιοχές). Έτσι τα υποσύνολα των καναλιών που διατίθενται στις κυψέλες δεν θα είναι ίσα. Γι' αυτό και η μέθοδος της καθορισμένης κατανομής των καναλιών απαιτεί ένα υπολογισμό του μέσου φορτίου ανά κυψέλη.

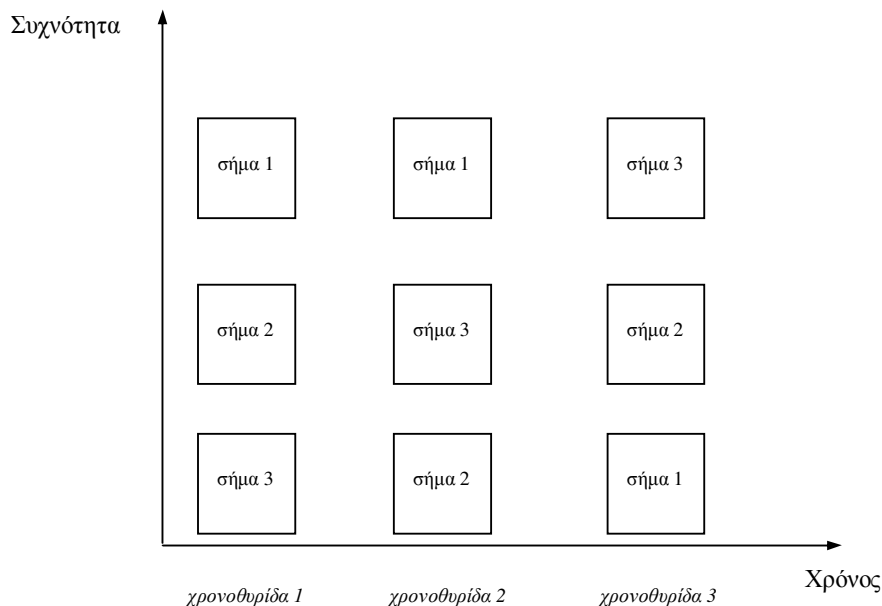
4.2 Μέθοδος δυναμικής κατανομής των καναλιών

Στη μέθοδο αυτή οποιοδήποτε κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιαδήποτε κυψέλη του συστήματος. Βέβαια γίνεται αρχικά μια κατανομή καναλιών. Όμως αυτή η κατανομή είναι μόνο ονομαστική και κάθε κυψέλη χρησιμοποιεί την ομάδα των καναλιών της σαν πρώτη επιλογή. Αν η κλήση δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από την ορισμένη ομάδα καναλιών της κυψέλης τότε η αναζήτηση διαθέσιμου καναλιού επεκτείνεται και σε άλλες γειτονικές κυψέλες. Όταν βρεθεί σ' αυτές διαθέσιμο κανάλι και πραγματοποιηθεί η κλήση με αυτό, το κανάλι ονομάζεται "*δανεισμένο*" (borrowed). Βέβαια το κανάλι αυτό εκπέμπεται πάντα από τον πομπό της κυψέλης που ανήκει ονομαστικά. Σχεδόν πάντοτε υπάρχουν περισσότερα από ένα διαθέσιμα κανάλια στις γειτονικές κυψέλες. Το πιο θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον αλγόριθμο της διαδικασίας που εκλέγεται και η οποία βασίζεται σε ορισμένα κριτήρια.

4.3 Συστήματα διάχυτου φάσματος - Τεχνική πολυπλεξίας διαίρεσης κωδίκων

4.3.1 Πολυπλεξία διαίρεσης κωδίκων

Στην τεχνική αυτή, η πολυπλεξία των εκπεμπόμενων σημάτων πραγματοποιείται στο πεδίο των κωδίκων. Τα διάφορα σήματα αφού κωδικοποιηθούν κατάλληλα, εκπέμπονται ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή συχνοτήτων και διαχωρίζονται μεταξύ τους μόνο στο πεδίο των κωδίκων. Η επιλογή των κωδίκων, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν για την πολυπλεξία των σημάτων, είναι σημαντική για τη σωστή λειτουργία της συγκεκριμένης τεχνικής πολυπλεξίας. Γενικά, η πολυπλεξία διαίρεσης κωδίκων μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας υβριδικός συνδυασμός των τεχνικών πολυπλεξίας διαίρεσης συχνότητας και διαίρεσης χρόνου. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η εφαρμογή της τεχνικής πολυπλεξίας διαίρεσης κωδίκων για τρία διαφορετικά σήματα.



Σχήμα 4.1 Πολυπλεξία διαίρεσης κωδίκων.

Η ανάπτυξη ενός συστήματος πολλαπλής προσπέλασης με διαίρεση κωδίκων βασίζεται στην τεχνική πολυπλεξίας με διαίρεση κωδίκων. Σε ένα τέτοιο σύστημα, ένας αριθμός χρηστών μοιράζεται ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι εκπέμποντας ταυτόχρονα σε αυτό και στην ίδια περιοχή συχνοτήτων. Σε κάθε χρήστη του συστήματος παραχωρείται μία ξεχωριστή ακολουθία κωδικοποίησης, η οποία πρέπει να είναι ιδανικά ασυσχέτιστη με τις ακολουθίες που χρησιμοποιούν όλοι οι υπόλοιποι χρήστες του. Η ακολουθία αυτή χρησιμοποιείται στον πομπό του κάθε χρήστη για τη διεύρυνση του φάσματος του σήματος πληροφορίας του.

Μία σημαντική παράμετρος, η οποία χαρακτηρίζει τη λειτουργία και την απόδοση ενός συστήματος διάχυτου φάσματος, είναι το *κέρδος διεργασίας* (Processing Gain, PG). Γενικά, σε μία τηλεπικοινωνιακή διάταξη, σαν κέρδος διεργασίας G_p ορίζεται το πηλίκο του λόγου σήματος-προς-θόρυβο $(S/N)_o$ (Signal-to-Noise power ratio) στην έξοδο της διάταξης προς το λόγο σήματος-προς-θόρυβο $(S/N)_i$ στην είσοδό της, δηλαδή:

$$G_p = \frac{(S/N)_o}{(S/N)_i}$$

(4.1)

ή σε dB:

$$G_p = (S/N)_o - (S/N)_i$$

(4.2)

Συγκεκριμένα, στα συστήματα διάχυτου φάσματος το κέρδος διεργασίας G_p ορίζεται σαν ο λόγος του εύρους ζώνης B_{ss} του εκπεμπόμενου σήματος προς το εύρος ζώνης B_s του σήματος πληροφορίας στη *βασική ζώνη* (base band), δηλαδή:

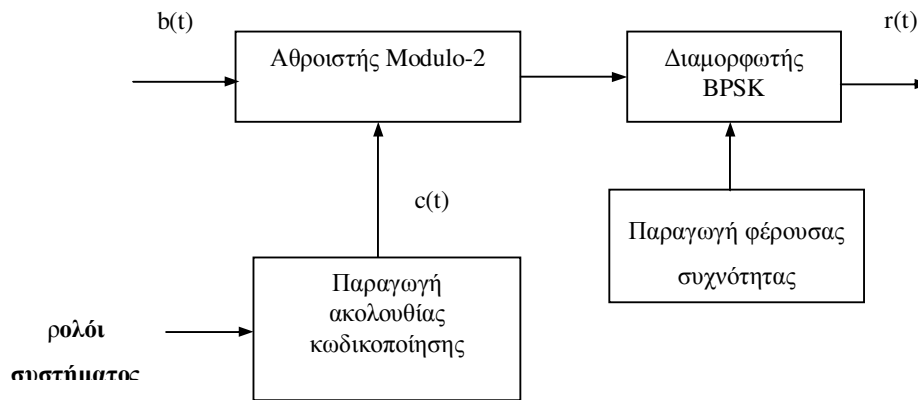
$$G_p = \frac{B_{ss}}{B_s}$$

(4.3)

με τυπικές τιμές μεταξύ 10 και 30dB. Στην πράξη, η διεύρυνση του φάσματος πραγματοποιείται συνήθως με την τεχνική άμεσης διάχυσης από τον κώδικα ή αναπηδήσεων συχνότητας. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι δύο προηγούμενες τεχνικές διεύρυνσης του φάσματος.

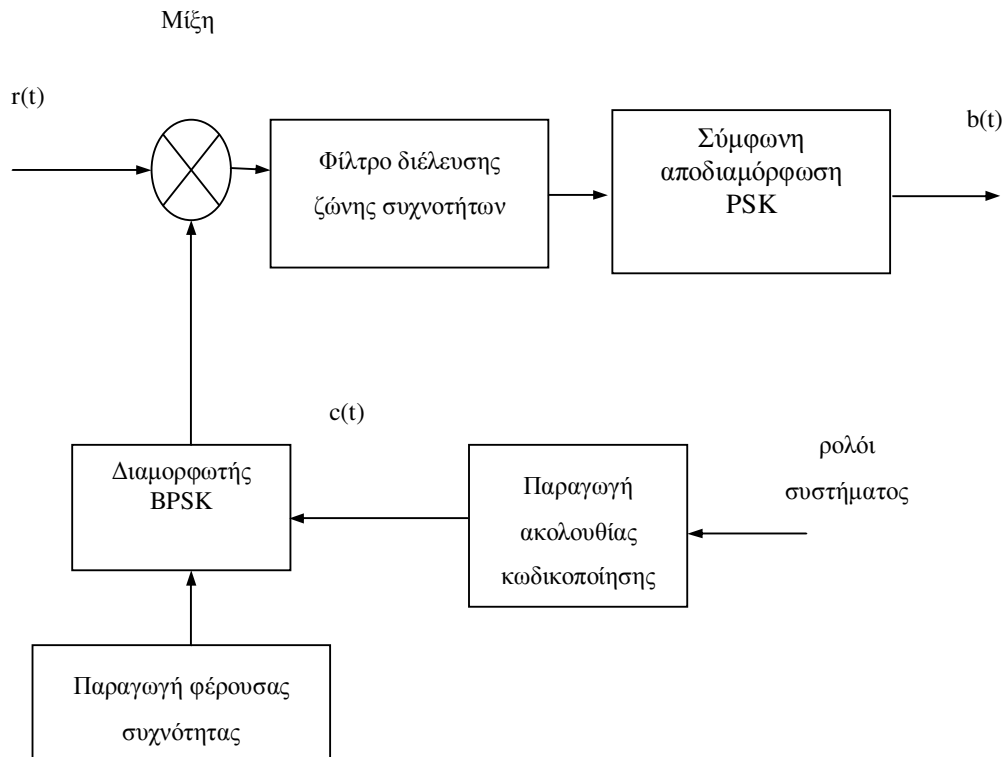
4.3.1.1 Τεχνική άμεσης διάχυσης από τον κώδικα

Στην τεχνική αυτή, η διεύρυνση του εύρους ζώνης του σήματος πληροφορίας πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση μιας ακολουθίας κωδικοποίησης υψηλού ρυθμού. Για παράδειγμα, έστω ότι η εκπομπή του σήματος στο κανάλι γίνεται με δυαδική διαμόρφωση κατά φάση (Binary Phase Shift Keying, BPSK) ενός φέροντος σήματος υψηλής συχνότητας, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Πριν από τη διαμόρφωση του φέροντος σήματος, το σήμα πληροφορίας $b(t)$, το οποίο είναι εκφρασμένο σε ψηφιακή μορφή, προστίθεται Modulo-2 (πολλαπλασιάζεται) με μία κατά πολύ υψηλότερου ρυθμού ακολουθία κωδικοποίησης $c(t)$, η οποία παράγεται στον πομπό. Η προηγούμενη πράξη οδηγεί στη διάχυση της ισχύος του σήματος πληροφορίας $b(t)$ σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων, που καθορίζεται από το ρυθμό της συγκεκριμένης ακολουθίας κωδικοποίησης $c(t)$. Ο πολλαπλασιασμός των $b(t)$ και $c(t)$ ισοδυναμεί στο πεδίο της συχνότητας με *συνέλιξη* (convolution) μεταξύ του εύρους ζώνης του σήματος πληροφορίας και του εύρους ζώνης της ακολουθίας κωδικοποίησης. Έτσι, το αποτέλεσμα της συνέλιξης είναι ένα ψηφιακό σήμα με ρυθμό ίσο με αυτόν της ακολουθίας κωδικοποίησης.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα πομπού στην τεχνική άμεσης διάχυσης από τον κώδικα με διαμόρφωση σύμφωνου PSK.

Η δομή του δέκτη στην τεχνική άμεσης διάχυσης από τον κώδικα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.3. Συγκεκριμένα, στο δέκτη το λαμβανόμενο σήμα $r(t)$ μεγάλου εύρους ζώνης συχνοτήτων υφίσταται πολλαπλασιασμό (μίξη) με ένα φέρον σήμα, το οποίο προηγουμένα έχει διαμορφωθεί από μία *τοπικά παραγόμενη* (local carrier) στο δέκτη ακολουθία κωδικοποίησης, απόλυτα σύγχρονη και πανομοιότυπη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στον πομπό του συστήματος για τη διάχυση του φάσματος συχνοτήτων. Το διαμορφωμένο κατά φάση φέρον σήμα, οδηγείται σε μία διάταξη *σύμφωνης αποδιαμόρφωσης* PSK.



Σχήμα 4.3 Διάγραμμα δέκτη στην τεχνική άμεσης διάχυσης από τον κώδικα με διαμόρφωση σύμφωνου PSK.

Η σχέση (4.3) για την τεχνική άμεσης διάχυσης από τον κώδικα γράφεται:

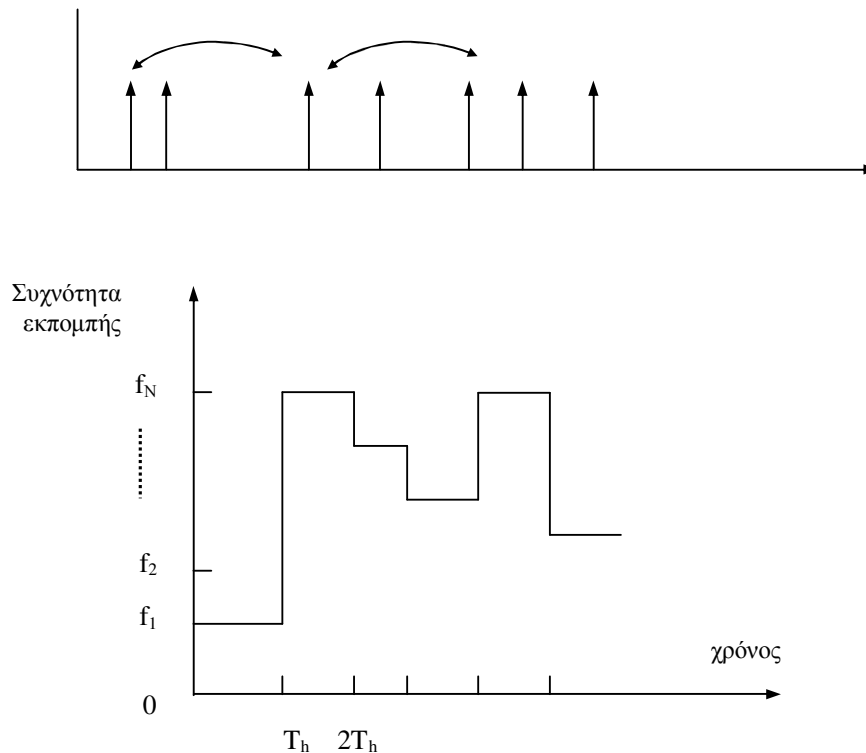
$$G_{p,DS} = \frac{T_b}{T_C}$$

(4.4)

όπου T_b είναι η διάρκεια του bit του σήματος πληροφορίας, T_C η διάρκεια του bit (ή "chip") της ακολουθίας κωδικοποίησης, που χρησιμοποιείται για τη διάχυση του σήματος πληροφορίας, και ο δείκτης "DS" δηλώνει την τεχνική άμεσης από τον κώδικα.

4.3.1.2 Τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας

Η τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας εμφανίζεται ως η λύση για την αντιμετώπιση της εσκεμμένης παρεμβολής ή της λαθραίας ακρόασης. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας από τους τρόπους για να προστατευθεί ένα εκπεμπόμενο σήμα είναι η συνεχής αλλαγή της συχνότητας εκπομπής (δηλαδή της συχνότητας του φέροντος σήματος) μέσα σε μία ευρεία περιοχή συχνοτήτων. Έτσι, ο παρεμβολέας (jammer) ή οι μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες δεν μπορούν να παρακολουθήσουν τη συχνότητα λειτουργίας σε κάθε χρονική στιγμή και συνεπώς δεν μπορούν να επιδράσουν στο εκπεμπόμενο σήμα. Η συχνότητα εκπομπής προσδιορίζεται σε κάθε χρονική στιγμή από μία ακολουθία κωδικοποίησης, η οποία είναι γενικά του ίδιου τύπου με αυτές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα άμεσης διάχυσης από τον κώδικα, αλλά ο ρυθμός της είναι συνήθως χαμηλότερος. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η αλλαγή της συχνότητας εκπομπής σε συνάρτηση με το χρόνο για την τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας. Είναι φανερό ότι η συχνότητα εκπομπής μπορεί να πάρει $N=2^m$ διαφορετικές τιμές, οι οποίες απέχουν φασματικά κατά ακέραια πολλαπλάσια μιας συγκεκριμένης τιμής $f_1=1/T_h$, όπου T_h είναι η διάρκεια κάθε αναπήδησης συχνότητας.



Σχήμα 4.4 Συχνότητα εκπομπής στην τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας.

Για N διαφορετικές δυνατές τιμές της συχνότητας εκπομπής, το εύρος ζώνης $B_{ss, FH}$ του σήματος αναπηδήσεων συχνότητας είναι:

$$B_{ss, FH} \cong N \cdot f_1 = \frac{N}{T_h}$$

(4.5)

όπου ο δείκτης "FH" δηλώνει την τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας. Αν η διάρκεια του bit του σήματος πληροφορίας είναι T_b , τότε μία σημαντική παράμετρος στην τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας είναι ο αριθμός M_h των αναπηδήσεων συχνότητας στη διάρκεια ενός bit πληροφορίας (frequency hops/bit), δηλαδή ο λόγος:

$$M_h = \frac{T_b}{T_h}$$

(4.6)

Το κέρδος διεργασίας $G_{p, FH}$ για ένα σύστημα τεχνικής αναπηδήσεων συχνότητας είναι:

$$G_{p, FH} = \frac{B_{ss, FH}}{B_s} \cong N \cdot M_h$$

(4.7)

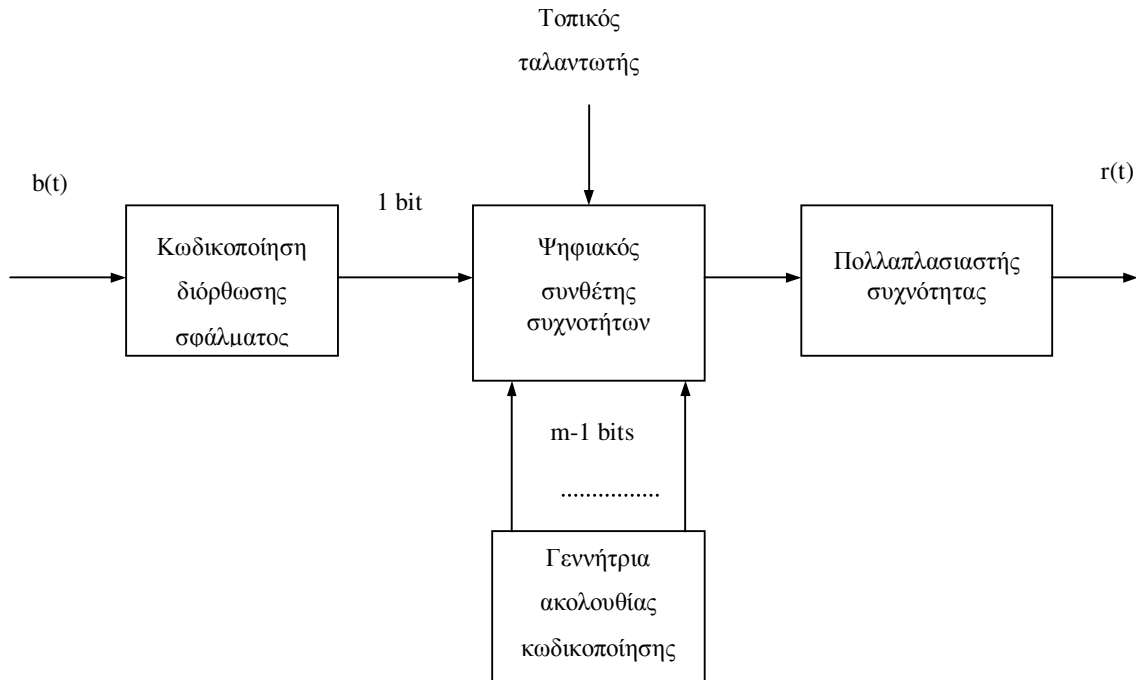
Αν στην τεχνική παρατηρούνται περισσότερες από μία αναπηδήσεις συχνότητας ($M_h > 1$) στη διάρκεια ενός bit πληροφορίας, τότε η τεχνική ονομάζεται τεχνική διάχυσης γρήγορων αναπηδήσεων συχνότητας (Fast Frequency Hopping, FFH). Αντίθετα, όταν μία αναπήδηση πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια περισσοτέρων του ενός bits του σήματος πληροφορίας, τότε ονομάζεται τεχνική διάχυσης αργών αναπηδήσεων συχνότητας (Slow Frequency Hopping, SFH).

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα του πομπού στην τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας, το βασικό τμήμα του οποίου είναι ο ψηφιακός συνθέτης συχνοτήτων (digital frequency synthesizer) που ελέγχεται από μία ακολουθία κωδικοποίησης. Ο έλεγχος γίνεται από m δυαδικά ψηφία και παράγει μια από τις $N=2^m$ συχνότητες για κάθε ξεχωριστό συνδυασμό αυτών των ψηφίων. Ένα από αυτά τα m ψηφία προέρχεται από το σήμα πληροφορίας, ενώ τα υπόλοιπα $m-1$ από τη γεννήτρια της ακολουθίας κωδικοποίησης. Έτσι, η συχνότητα του σήματος, που παράγει κάθε φορά ο συνθέτης συχνοτήτων, καθορίζεται από τη συγκεκριμένη ακολουθία που χρησιμοποιείται. Συνήθως, το bit του σήματος πληροφορίας, πριν οδηγηθεί στο συνθέτη συχνοτήτων, υφίσταται μία κωδικοποίηση διόρθωσης σφάλματος (error correcting coding). Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι το χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης συχνοτήτων καθορίζεται από τις κατασκευαστικές δυνατότητες του συνθέτη συχνοτήτων. Ουσιαστικά, το σήμα πληροφορίας, το οποίο είναι σε ψηφιακή μορφή, διαμορφώνει κατά συχνότητα (Frequency Shift Keying, FSK) το εκάστοτε φέρον σήμα. Σημειώνεται, επίσης, ότι στην έξοδο του συστήματος υπάρχει ένας πολλαπλασιαστής συχνοτήτων (frequency multiplier), ο οποίος έχει σα σκοπό να αυξήσει το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος και κατά συνέπεια το κέρδος διεργασίας. Στην περίπτωση αυτή, το κέρδος διεργασίας $G_{p, FH}$ δίνεται από τη σχέση:

$$G_{p,FH} = \frac{B_{ss,FH}}{B_s} \cong K \cdot M_h \cdot N$$

(4.8)

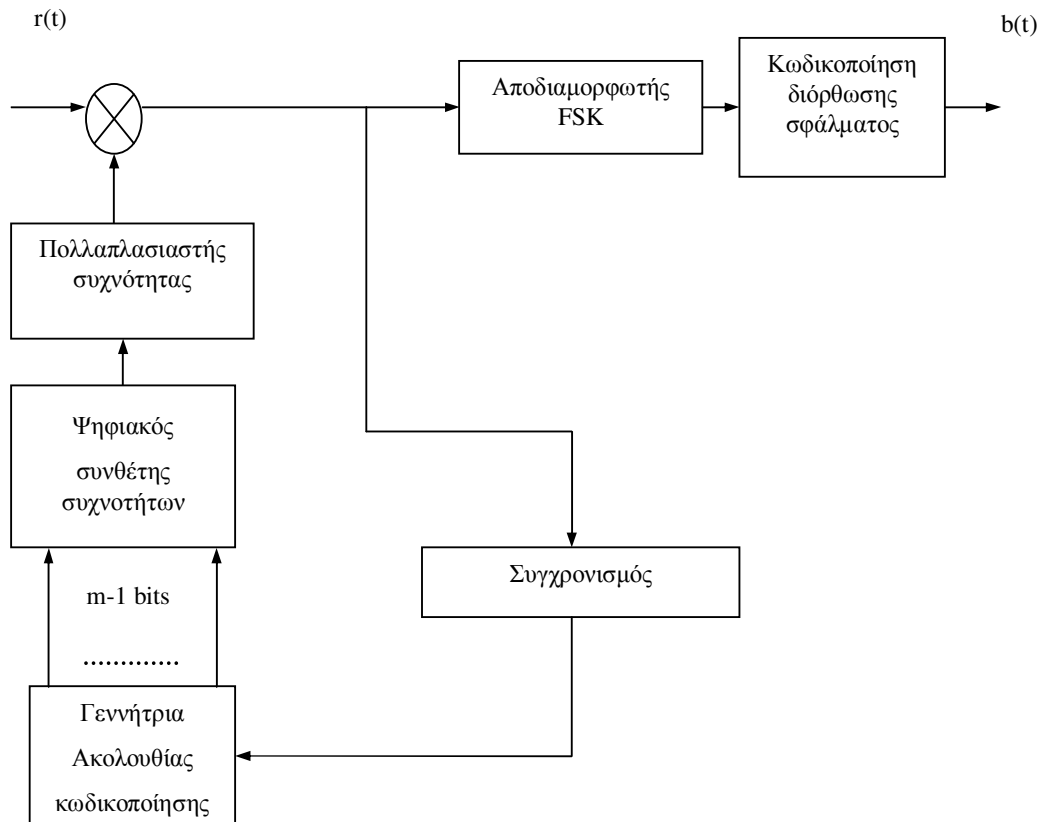
όπου K είναι ο πολλαπλασιαστής συχνότητων.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα πομπού στην τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας.

Ο δέκτης στην τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας είναι συνήθως *ασύμφωνος* (non-coherent detection). Το λαμβανόμενο σήμα υπόκειται σε κατάλληλη μεταβλητή μεταλλαγή στη συχνότητα. Βέβαια, η λήψη με *σύμφωνο δέκτη* (coherent reception) είναι δυνατή, αλλά είναι δυσκολότερη στην υλοποίηση. Η μεταλλαγή καθορίζεται στο δέκτη από μία ακολουθία κωδικοποίησης, η οποία πρέπει να είναι πανομοιότυπη και σύγχρονη με αυτή, που χρησιμοποιήθηκε στον πομπό. Έτσι από την διαδικασία της μίξης προκύπτει ένα σήμα ενδιάμεσης συχνότητας το οποίο είναι βέβαια ψηφιακά διαμορφωμένο από το σήμα πληροφορίας. Το σήμα αυτό αποδιαμορφώνεται από ένα *αποδιαμορφωτή FSK* (FSK demodulator), στην έξοδο του οποίου λαμβάνεται σε ψηφιακή μορφή το σήμα πληροφορίας (Σχήμα 4.6). Μετά την αποδιαμόρφωση, το σήμα αυτό οδηγείται σε μία βαθμίδα *διόρθωσης σφάλματος* (error correction) για να επιτευχθεί μείωση του ρυθμού των σφαλμάτων. Επίσης, η έξοδος του μίκτη εφαρμόζεται και στη βαθμίδα που επιτυγχάνει το συγχρονισμό

παράγοντας ένα διορθωτικό σήμα, το οποίο ελέγχει το ρολόι συχνοτήτων (frequency clock). Έτσι, επιτυγχάνεται ο συγχρονισμός του τοπικά παραγόμενου σήματος αναπηδήσεων συχνότητας με το λαμβανόμενο σήμα.

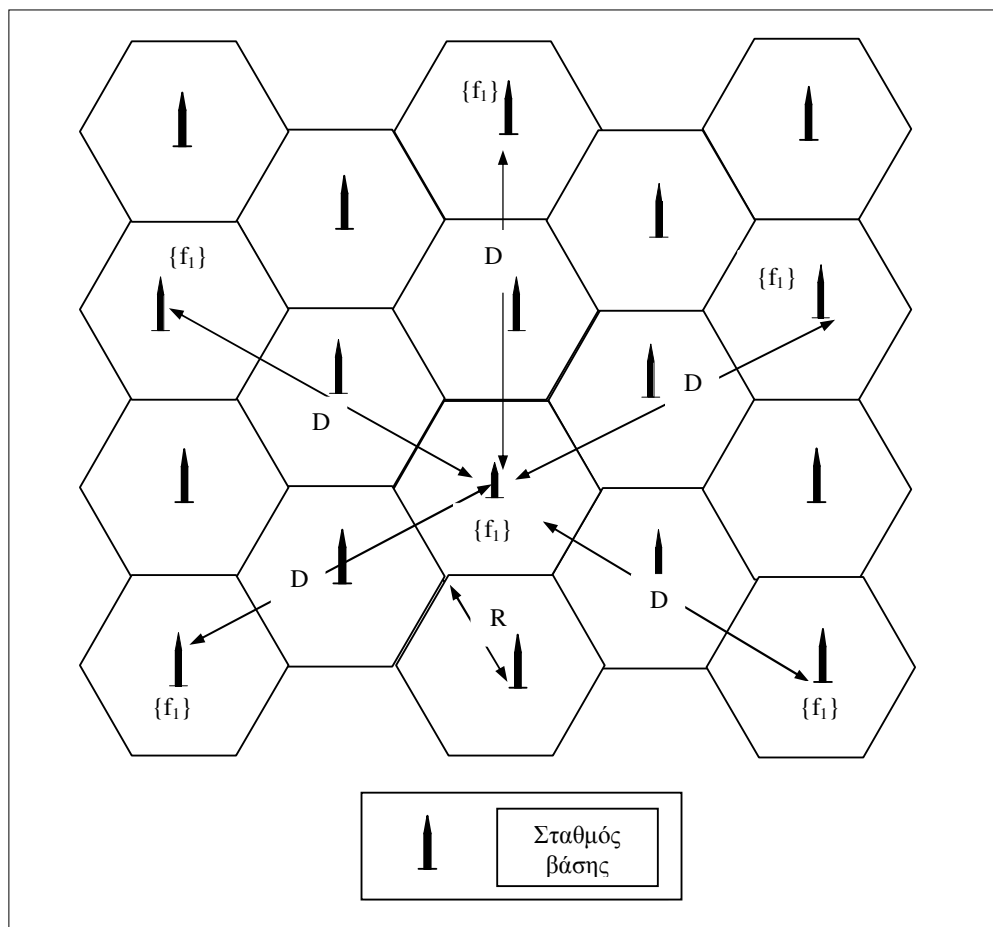


Σχήμα 4.6 Διάγραμμα δέκτη στην τεχνική αναπηδήσεων συχνότητας.

4.4 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών πολλαπλής προσπέλασης FDMA

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, τα συμβατικά συστήματα επικοινωνιών κινητών είχαν σαν κύριο χαρακτηριστικό της αρχιτεκτονικής τους η κεραία του σταθμού βάσης να είναι τοποθετημένη όσο το δυνατόν ψηλότερα, προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη ραδιοκάλυψη χρησιμοποιώντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ εκπομπής. Καθώς η ισχύς του πομπού του κινητού σταθμού (mobile station) είναι περιορισμένη, πρόσθετοι σταθμοί βάσης έπρεπε να τοποθετηθούν για επέκταση της ραδιοκάλυψης. Αντίθετα, σε ένα κυψελωτό

σύστημα επικοινωνιών, η συνολική περιοχή κάλυψης του δικτύου χωρίζεται σε μικρότερες περιοχές, που ονομάζονται *κυψέλες* δημιουργώντας μία *κυψελωτή δομή* η οποία επαναλαμβάνεται με σκοπό την κάλυψη της περιοχής, που πρόκειται να εξυπηρετήσει το σύστημα. Οι σταθμοί βάσης με υψηλή ισχύ εκπομπής αντικαθίστανται από πολλούς σταθμούς βάσης μικρότερης ισχύος εκπομπής. Σε καθεμία από τις κυψέλες διατίθεται ένα διαφορετικό σύνολο συχνοτήτων, που αποτελεί ένα κλάσμα του συνολικού αριθμού των διαθέσιμων καναλιών του συστήματος. Εντός των κυψελών γίνεται εκπομπή μιας ομάδας καναλιών με πολλαπλή προσπέλαση διαίρεσης συχνότητας. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ενός κυψελωτού συστήματος είναι η δυνατότητα το ίδιο κανάλι να ξαναχρησιμοποιηθεί και σε μία άλλη κυψέλη του συστήματος, η οποία βρίσκεται σε ορισμένη απόσταση από την πρώτη, δηλαδή να πραγματοποιηθεί επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων. Στο Σχήμα 4.7 σχεδιάζεται μία κυψελωτή δομή, στην οποία μία ομάδα καναλιών $\{f_1\}$ επαναχρησιμοποιείται σε ορισμένη απόσταση D εντός μιας κυψέλης του συστήματος. Για *ομοιοκατευθυντικές* κεραιές (omni-directional antennas) και για διάδοση στον ελεύθερο χώρο, το σχήμα κάθε κυψέλης θεωρητικά είναι κυκλικό, αλλά η *πολυδίοδευση* (multipath) προκαλεί ουσιαστικά αλλαγή του σχήματος της. Στην πράξη, το κυκλικό σχήμα κάθε κυψέλης προσεγγίζεται από εκείνο του κανονικού πολυγώνου. Για οικονομικούς κυρίως λόγους επιλέγεται τελικά το σχήμα του κανονικού εξαγώνου, καθώς αυτό απαιτεί τους λιγότερους σταθμούς βάσης στο σύστημα και επιτρέπει την κάλυψη της περιοχής χωρίς επικαλύψεις και χωρίς κενά μεταξύ των κυψελών.



Σχήμα 4.7 Κυψελωτό σύστημα πολλαπλής προσπέλασης διαίρεσης συχνότητας.

Η μέθοδος πολλαπλής προσπέλασης FDMA εφαρμόστηκε σε αναλογικά κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών κινητών στη δεκαετία του 1970, το γνωστότερο από τα οποία είναι το AMPS. Η διαμόρφωση, που εφαρμόζεται στο AMPS είναι FM με εύρος καναλιού 30 KHz, ενώ οι κυψέλες ομαδοποιούνται ανά 12 ή 7, ανάλογα με το αν χρησιμοποιούνται ομοιοκατευθυντικές ή μη κεραιές κατά την εκπομπή.

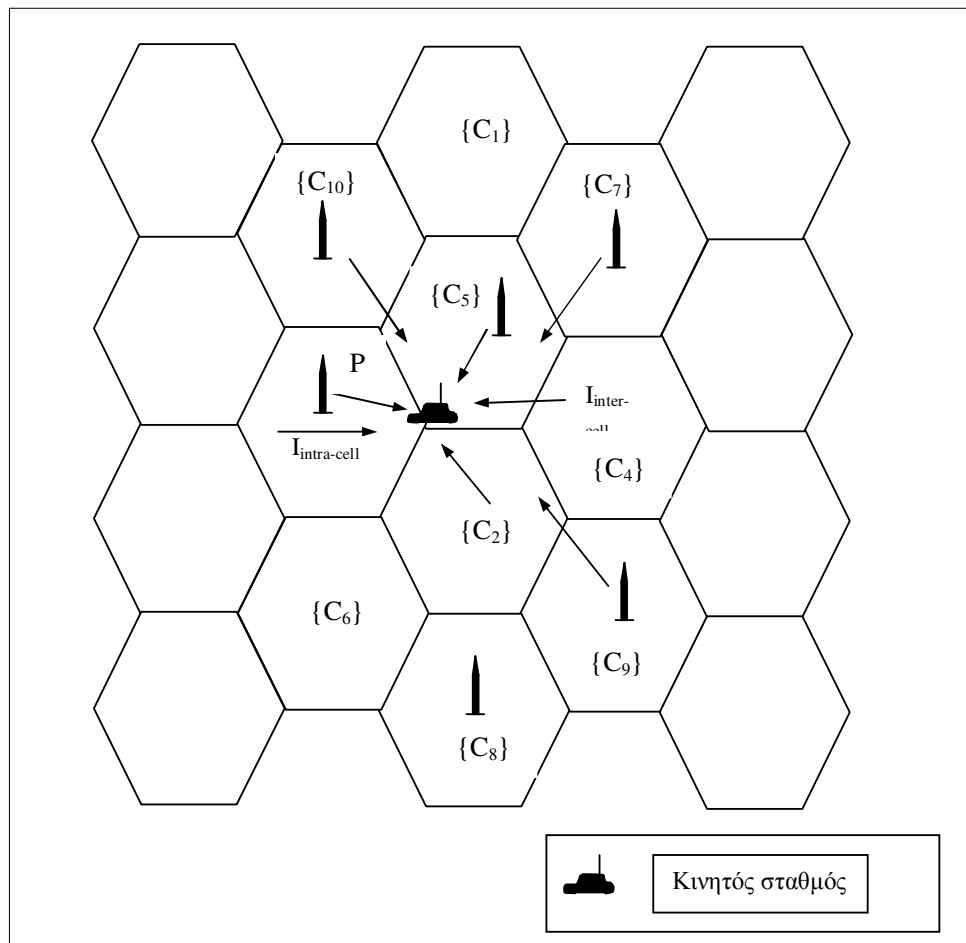
4.5 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών πολλαπλής προσπέλασης TDMA

Στα συστήματα αυτά, οι διαφορετικοί χρήστες χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα, αλλά σε διαφορετικές και σαφώς καθορισμένες χρονικές στιγμές για να επικοινωνήσουν με το σταθμό βάσης. Έτσι, παραχωρείται μία ή περισσότερες χρονοθυρίδες σε ένα συνολικό πλαίσιο (frame) για την εκπομπή από το σταθμό βάσης προς τον κινητό σταθμό (downlink) και για την εκπομπή από τον κινητό σταθμό προς το σταθμό βάσης (uplink). Βέβαια, σε κάθε περίπτωση ο χρήστης, που εκπέμπει στη συγκεκριμένη χρονοθυρίδα, χρησιμοποιεί όλο το εύρος ζώνης συχνοτήτων, που διατίθεται στο σύστημα, αλλά μόνο κατά τη διάρκεια της εκπομπής του, δηλαδή μόνο κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης χρονοθυρίδας που του παραχωρείται. Η μέθοδος πολλαπλής προσπέλασης TDMA επιλέχτηκε και έχει εφαρμοστεί σε διάφορα συστήματα επικοινωνιών κινητών στην Ευρώπη, στην Αμερική και στην Ιαπωνία, όπως το GSM, IS-54, PDC και DECT. Στο σύστημα GSM έχει παραχωρηθεί μια περιοχή 50 MHz στην περιοχή των 900 MHz για εκπομπή. Το εύρος ζώνης του καναλιού είναι 200 KHz, ενώ η τεχνική πολλαπλής προσπέλασης TDMA υποστηρίζει οχτώ χρήστες ανά κανάλι και η διαμόρφωση είναι η *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK). Στο σύστημα IS-54, κάθε κανάλι εύρους ζώνης 30 KHz με την εφαρμογή της μεθόδου πολλαπλής προσπέλασης TDMA εξυπηρετεί ταυτόχρονα τρεις χρήστες, ενώ η διαμόρφωση είναι $\pi/4$ DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying, DQPSK).

4.6 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών πολλαπλής προσπέλασης CDMA

Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση ενός κυψελωτού συστήματος επικοινωνιών κινητών. Σε αντίθεση με την περίπτωση ενός κυψελωτού συστήματος πολλαπλής προσπέλασης FDMA, στο οποίο ένα κανάλι επαναχρησιμοποιείται

σε μία ορισμένη απόσταση για να ελαχιστοποιηθούν οι παρεμβολές λόγω της επαναχρησιμοποίησης των καναλιών, σε ένα κυψελωτό σύστημα, στο οποίο εφαρμόζεται πολλαπλή προσπέλαση CDMA, το ίδιο κανάλι παραχωρείται για εκπομπή σε όλους τους χρήστες του συστήματος και σε όλες τις κυψέλες ανεξάρτητα της θέσης της κυψέλης στην κυψελωτή δομή. Βέβαια, η προσπέλαση του καναλιού από τους διαφορετικούς χρήστες γίνεται μέσω διαφορετικών ομάδων ακολουθιών κωδικοποίησης σε κάθε κυψέλη, με επιπλέον πρόβλεψη οι ακολουθίες κωδικοποίησης, που παραχωρούνται στους χρήστες μιας κυψέλης, να παρουσιάζουν όσο το δυνατό μικρή τιμή ετεροσυσχέτισης. Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός κυψελωτού συστήματος πολλαπλής προσπέλασης CDMA είναι η δυνατότητα ταυτόχρονης εξυπηρέτησης μεγάλου αριθμού χρηστών και η μη απαίτηση σχεδιασμού για την παραχώρηση των συχνοτήτων στις κυψέλες του συστήματος. Στο σχήμα 4.8 σχεδιάζεται ένα τέτοιο σύστημα στο οποίο σε κάθε κυψέλη παραχωρείται μία ομάδα ακολουθιών κωδικοποίησης $\{C_i\}$. Ένας κινητός σταθμός βρισκόμενος στα όρια μιας κυψέλης λαμβάνει, εκτός από το επιθυμητό σήμα P από το σταθμό βάσης, και σήμα παρεμβολής $I_{\text{intra-cell}}$ από τους χρήστες τόσο της κυψέλης στην οποία ανήκει (Intra-cell Interference) όσο και ισχύ παρεμβολής $I_{\text{inter-cell}}$ (Inter-cell Interference) από τους χρήστες των γειτονικών κυψελών, που πραγματοποιούν εκπομπή σήματος στο ίδιο κανάλι.



Σχήμα 4.8 Κυψελωτό σύστημα επικοινωνιών κινητών πολλαπλής προσπέλασης CDMA.

Στο σύστημα παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί λόγοι επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Ο πρώτος λόγος επαναχρησιμοποίησης q_a σχετίζεται με την επαναχρησιμοποίηση του ίδιου καναλιού μεγάλου εύρους ζώνης συχνοτήτων σε κάθε κυψέλη του συστήματος και δίνεται από τη σχέση:

$$q_a = \frac{D}{R} = \frac{2 \cdot R}{R} = 2$$

(4.9)

αφού η απόσταση επαναχρησιμοποίησης D του ίδιου καναλιού, είναι ίση με $2R$. Ο δεύτερος λόγος επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων q_s προέρχεται από τις διαφορετικές ομάδες ακολουθιών κωδικοποίησης, που χρησιμοποιούνται σε κάθε κυψέλη του συστήματος για τις ανάγκες επικοινωνιών των χρηστών της κυψέλης. Βέβαια, η διάχυση του φάσματος του σήματος πληροφορίας κάθε χρήστη μέσω αυτών ακολουθιών κωδικοποίησης γίνεται στο ίδιο συνολικό εύρος ζώνης συχνοτήτων για όλες τις κυψέλες, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Η τιμή του λόγου q_s είναι ίση με 1.

Σε ένα κυψελωτό σύστημα επικοινωνιών κινητών πολλαπλής προσπέλασης CDMA, η διάχυση του φάσματος του σήματος πληροφορίας γίνεται είτε με *άμεση διάχυση από τον κώδικα* (DS-CDMA) είτε με *αναπηδήσεις συχνότητας* (FH-CDMA). Ιδιαίτερα, στην περίπτωση κυψελωτού συστήματος πολλαπλής προσπέλασης FH-CDMA απαιτείται προσεκτική επιλογή του *τρόπου μετάβασης από τη μία συχνότητα στην άλλη* (hopping pattern). Για παράδειγμα, στο σύστημα IS-95 εφαρμόζεται πολλαπλή προσπέλαση CDMA με άμεση διάχυση από τον κώδικα, και σε κάθε χρήστη του συστήματος παραχωρείται μία από τις 64 διαθέσιμες ακολουθίες κωδικοποίησης φροντίζοντας σε κάθε κυψέλη να μην χρησιμοποιούνται οι ίδιες ακολουθίες κωδικοποίησης για τη διάχυση του σήματος πληροφορίας. Στην περίπτωση του συστήματος IS-95, οι ακολουθίες κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται, προκύπτουν από τις συναρτήσεις *Hadamard-Walsh*.

Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, που παρουσιάζουν η εκπομπή από το σταθμό βάσης προς τον κινητό σταθμό και η εκπομπή από το χρήστη προς το σταθμό βάσης σε ένα κυψελωτό σύστημα επικοινωνιών κινητών πολλαπλής προσπέλασης DS-CDMA και FH-CDMA. Πρέπει βέβαια να σημειωθεί ότι όπως και στην περίπτωση πολλαπλής προσπέλασης FDMA, διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων παραχωρούνται για τις δύο ξεχωριστές εκπομπές.

4.6.1 Εκπομπή από το σταθμό βάσης προς τον κινητό σταθμό σε κυψελωτά συστήματα πολλαπλής προσπέλασης DS-CDMA

Η εκπομπή από το σταθμό βάσης προς τους χρήστες μιας κυψέλης είναι ένα παράδειγμα *σύγχρονου τρόπου λειτουργίας* (synchronous ή cooperative operation mode) ενός συστήματος πολλαπλής προσπέλασης DS-CDMA. Δηλαδή, ο κάθε σταθμός βάσης χρησιμοποιώντας εκπομπή ενός κοινού σήματος πιλότου επιτυγχάνει τον αμοιβαίο *συγχρονισμό* (time-synchronization) μεταξύ των χρηστών της κυψέλης του, έτσι ώστε ο κάθε χρήστης της κυψέλης να μην παρεμβάλλεται από το σήμα, που ο σταθμός βάσης εκπέμπει σ' έναν άλλο χρήστη. Εκτός από την εξασφάλιση της "ορθογωνιότητας" μεταξύ των χρηστών της κυψέλης, το σήμα πιλότος χρησιμοποιείται και για την εκτίμηση της κατάστασης του καναλιού επικοινωνίας. Παράλληλα είναι δυνατό οι χρήστες μιας κυψέλης να λαμβάνουν από το σταθμό βάσης της συγκεκριμένης κυψέλης την ίδια μέση ισχύ σήματος με την εφαρμογή μιας *μεθόδου ελέγχου ισχύος* (power control). Στην πράξη, η μέθοδος επιτυγχάνεται συμπεριλαμβάνοντας στην εκπομπή του σταθμού βάσης προς το χρήστη ένα "σήμα-πιλότο" (pilot signal). Ανάλογα με την ισχύ του σήματος-πιλότου, που ο κάθε χρήστης λαμβάνει από το σταθμό βάσης, ο τελευταίος καθορίζει στη συνέχεια και την ισχύ του σήματος που θα εκπέμπει προς το συγκεκριμένο χρήστη. Βέβαια, σημειώνεται ότι ο σταθμός βάσης πρέπει να γνωρίζει σε κάθε χρονική στιγμή και την ισχύ της παρεμβολής, που ο κάθε χρήστης λαμβάνει από τις γειτονικές κυψέλες, και έτσι να αναπροσαρμόζει ανάλογα την ισχύ εκπομπής του σήματος προς το χρήστη. Ιδιαίτερα, όταν ένας χρήστης πλησιάζει το όριο μιας κυψέλης, λαμβάνει σημαντική ισχύ παρεμβολής από τις γειτονικές κυψέλες και έτσι σε αυτή την περίπτωση η ισχύς του σήματος από το σταθμό βάσης προς αυτόν πρέπει να αυξηθεί για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα.

4.6.2 Εκπομπή από κινητό σταθμό προς το σταθμό βάσης σε κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών κινητών πολλαπλής προσπέλασης DS-CDMA

Η εκπομπή από ένα χρήστη μιας κυψέλης προς το σταθμό βάσης, χαρακτηρίζεται σαν *ασύγχρονος τρόπος λειτουργίας* (asynchronous ή non-cooperative operation mode) του συστήματος. Δηλαδή, σε κάθε περίπτωση οι χρήστες μιας κυψέλης παρεμβάλλουν ο ένας στον άλλο, δεδομένου ότι δεν υπάρχει τρόπος να λυθεί το πρόβλημα του αμοιβαίου συγχρονισμού τους, όταν αυτοί εκπέμπουν στο κοινό εύρος ζώνης συχνοτήτων. Επίσης, παρουσιάζεται το πρόβλημα του "κοντινού-απομακρυσμένου" χρήστη δηλαδή το φαινόμενο στην έξοδο του δέκτη ενός χρήστη του συστήματος να εμφανίζεται σημαντική ισχύς ενός ανεπιθύμητου σήματος και μικρή ισχύς του επιθυμητού. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ακολουθίες κωδικοποίησης που παραχωρούνται σε κάθε χρήστη του συστήματος σε μία κυψέλη, έχουν στην πράξη μη μηδενική συνάρτηση ετεροσυσχέτισης. Μία λύση στο πρόβλημα αυτό είναι η εφαρμογή, μιας μεθόδου ελέγχου ισχύος, με την οποία επιτυγχάνεται ο σταθμός βάσης μιας κυψέλης να λαμβάνει από όλους τους χρήστες της κυψέλης του ίση μέση ισχύ σήματος, ανεξάρτητα της θέσης του χρήστη στη κυψέλη.

4.6.3 Κυψελωτά συστήματα επικοινωνιών πολλαπλής προσπέλασης FH-CDMA

Σε ένα τέτοιο σύστημα, οι χρήστες μιας κυψέλης είναι δυνατό να μην παρεμβάλλουν ο ένας τον άλλον, δηλαδή η παρεμβολή εντός κάθε κυψέλης του συστήματος να είναι μηδενική. Στην πράξη, αυτό εξασφαλίζεται επιλέγοντας ορθογώνιες ακολουθίες κωδικοποίησης. Μία τεχνική για την παραγωγή ορθογώνιων ακολουθιών κωδικοποίησης, είναι η χρησιμοποίηση της ίδιας αρχικής ακολουθίας κωδικοποίησης και με *χρονικές μετατοπίσεις* (shifts) να παραχθούν από αυτή οι υπόλοιπες ακολουθίες που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε κυψέλη του συστήματος. Έτσι, η παρεμβολή, που επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος προέρχεται μόνο από τους χρήστες των γειτονικών κυψελών και όχι από τη συγκεκριμένη κυψέλη, στην οποία είναι τοποθετημένος. Συνεπώς, σε ένα τέτοιο σύστημα δεν απαιτείται περιορισμός της παρεμβολής, που οφείλεται στους χρήστες κάθε κυψέλης αλλά μόνο μία μέθοδος ελέγχου της ισχύος, που θα περιορίσει την παρεμβολή την προερχόμενη από τις γειτονικές κυψέλες του συστήματος.

Οι ακολουθίες κωδικοποίησης, που χρησιμοποιούνται σε ένα κυψελωτό σύστημα πολλαπλής προσπέλασης FH-CDMA, εκτός του ότι είναι μεταξύ τους ορθογώνιες παρουσιάζουν και ελάχιστη τιμή της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης. Η τελευταία ιδιότητα έχει σαν αποτέλεσμα δύο οποιοδήποτε χρήστες, που βρίσκονται σε δύο γειτονικές κυψέλες του συστήματος, να παρεμβάλλουν ο ένας τον άλλο μόνο κατά τη διάρκεια μιας αναπήδησης συχνότητας, δηλαδή η παρεμβολή, που προκαλεί η εκπομπή ενός χρήστη στους χρήστες γειτονικών κυψελών του συστήματος, να ελαχιστοποιείται.

Πρακτικά, έχει επιλεγεί η τεχνική *αργών αναπηδήσεων συχνότητας* (SFH), διότι σε σχέση με τη *μέθοδο διάχυσης γρήγορων αναπηδήσεων* (FFH) είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμη και εξασφαλίζει την ορθογωνιότητα μεταξύ των χρηστών μιας κυψέλης τόσο κατά την εκπομπή από το σταθμό βάσης προς τους χρήστες όσο και κατά την εκπομπή από τους χρήστες προς το σταθμό βάσης. Έτσι, η τεχνική SFH έχει βρει εφαρμογή στα κανάλια φωνής του συστήματος GSM.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΕΥΤΕΡΗΣ ΚΑΙ ΤΡΙΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

5.1 Ψηφιακά κυψελωτά συστήματα

Τα συστήματα κινητών επικοινωνιών δεύτερης γενιάς είναι πλήρως ψηφιακά. Η ψηφιοποίηση των δικτύων επιτρέπει τη χρησιμοποίηση τεχνικών TDMA και CDMA, εκτός από την κλασσική FDMA. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν είναι:

- πιο εύκολη σύνδεση με το ενσύρματο δίκτυο
- μεγαλύτερη ευελιξία για εισαγωγή νέων υπηρεσιών όπως επικοινωνίες φωνής και δεδομένων
- μεγαλύτερη ασφάλεια με την εισαγωγή κωδικοποιητών ομιλίας και αλγόριθμων κρυπτογράφησης
- περιορισμένη πολυπλοκότητα του συστήματος.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η κατανομή συχνοτήτων των συστημάτων δεύτερης γενιάς:

Συχνότητα (MHz)	Υπηρεσία	Σύστημα
800	Μετάδοση δεδομένων	ARDIS
824-894	Κυψελωτό σύστημα	IS-54
864-868	Ασύρματο σύστημα	CT-2
810-960	Κυψελωτό σύστημα	GSM, JDC
900	Μετάδοση δεδομένων	RAM
930-931	Τηλεειδοποίηση	Τηλεειδοποίηση δύο κατευθύνσεων
930	Τηλεειδοποίηση	Τηλεειδοποίηση μιας κατεύθυνσης
1400-1500	Κυψελωτό σύστημα	JDC

1700-2000	Διάφορες υπηρεσίες	DECT, PCN, DCS, PHP
-----------	--------------------	------------------------

5.2 Το σύστημα GSM και το DCS 1800

Η μεγάλη διαφοροποίηση των αναλογικών συστημάτων στην Ευρώπη και η ανάγκη εξυπηρέτησης ολοένα και περισσότερων χρηστών οδήγησε την CEPT, το 1982 στη σύσταση της ομάδας Group Special Mobile με σκοπό τη σύνταξη προδιαγραφών για ένα νέο ψηφιακό σύστημα. Το αποτέλεσμα των εργασιών της ομάδας αυτής ήταν το νέο σύστημα GSM (*Global System for Mobile Communications*).

Το νέο σύστημα αναμενόταν να παρέχει καλύτερη ποιότητα, πανευρωπαϊκή περιαγωγή και δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων (π.χ. fax, e-mail κ.λ.π.). Επιλέχτηκε η τεχνική TDMA με 8 *χρονοθυρίδες* (timeslots) σε κάθε δίαυλο (φέρον). Κάθε χρήστης εκπέμπει περιοδικά σε κάθε όγδοη χρονοθυρίδα (διάρκειας 0,57 msec) και λαμβάνει σε μια αντίστοιχη χρονοθυρίδα. Το GSM στην παρούσα του μορφή υποστηρίζει λειτουργία με πλήρη ρυθμό μετάδοσης (22.8 Kbps και 8 χρονοθυρίδες ανά πλαίσιο (frame)) και με μισό ρυθμό μετάδοσης (11.4 Kbps και 16 χρονοθυρίδες ανά πλαίσιο). Όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων, έχουν προδιαγραφεί διάφορες ασύγχρονες υπηρεσίες στα 9.6, 4.8 και 2.4 Kbps για λειτουργία πλήρους και μισού ρυθμού. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην προδιαγραφή εκείνων των υπηρεσιών που χρησιμοποιούν modem ακουστικών συχνοτήτων (V. 22bis ή V. 3) ή ISDN.

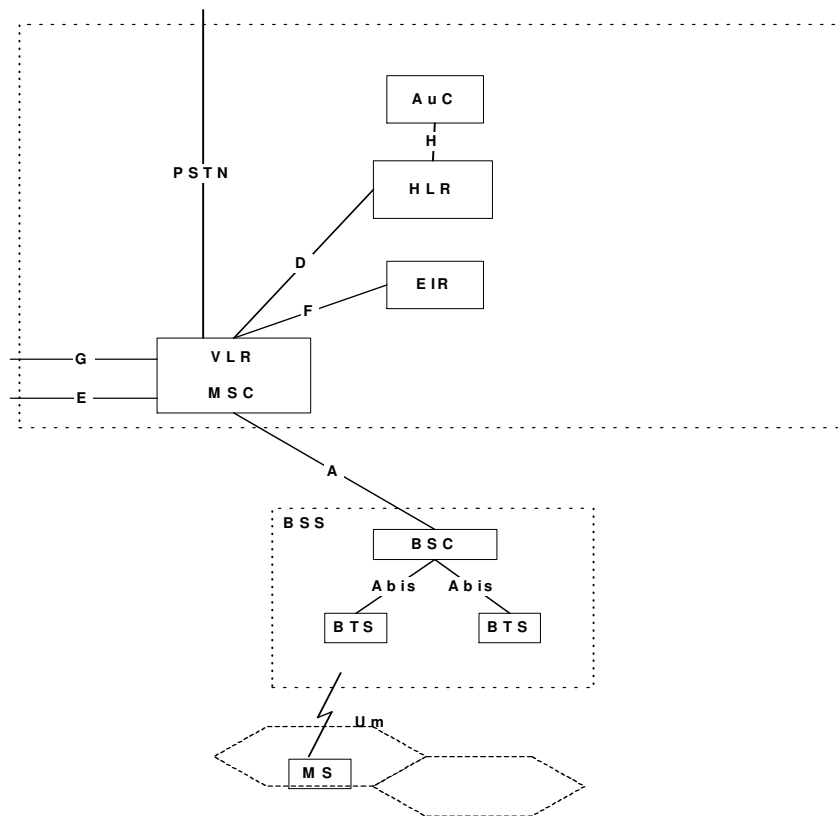
Η χρονική συμπίεση των δεδομένων του χρήστη κατά ένα παράγοντα 8 συνεπάγεται την αύξηση του εύρους ζώνης του σήματος κατά τον αντίστοιχο παράγοντα. Αυτό έχει επίδραση στις διαλείψεις του λαμβανόμενου σήματος. Επίσης η παρουσία σημείων ανάκλασης όπως λόφων, βουνών, κτιρίων κ.λ.π. οδηγεί σε πολλαπλή ηχώ. Οι προκύπτουσες πολλαπλές διαδρομές μπορούν να αντιμετωπιστούν όταν το εύρος ζώνης είναι 200 KHz. Στο σύστημα GSM η μεταβολή του μήκους των διαδρομών λόγω πολλαπλών ανακλάσεων διαπιστώνεται με τη χρησιμοποίηση μιας *ακολουθίας εκπαίδευσης* (training sequence) στο μέσο της χρονοθυρίδας. Η αλληλοπαρεμβολή συμβόλων αντιμετωπίζεται με ένα ισοσταθμιστή Viterbi. Η παρεμβολή λόγω πολλαπλών διαδρομών αντιμετωπίζεται με διαφορική λήψη, η οποία ανάλογα με το περιβάλλον μπορεί να περιορίσει σημαντικά τις διαλείψεις. Σε μερικά περιβάλλοντα όπως π.χ. στις πόλεις, για να λυθεί το πρόβλημα της πολυδιόδευσης (πολλαπλών διαδρομών) χρησιμοποιείται *τεχνική αναπηδήσεων από συχνότητα σε συχνότητα* (frequency hopping).

Το σύστημα GSM από το 1993 που τέθηκε σε λειτουργία, έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη. Αρχικά είχε σαν στόχο να λειτουργεί μόνο σε περιοχές συχνοτήτων γύρω από τα 900MHz. Το 1989, το Υπουργείο Εμπορίου και Βιομηχανίας της Μ. Βρετανίας ανέλαβε μια πρωτοβουλία η οποία τελικά οδήγησε στην διάθεση ζώνης συχνοτήτων 150 MHz κοντά στους 1.8 GHz για *Δίκτυα Προσωπικών Επικοινωνιών* (Personal Communications Networks, PCN). Το σύστημα αυτό ονομάζεται *DCS 1800* (Digital Cellular System 1800).

5.2.1 Αρχιτεκτονική του συστήματος GSM

Το σχήμα 5.1, παρουσιάζει τα στοιχεία του δικτύου GSM. Αν ένας κινητός σταθμός ενεργοποιηθεί κάπου, πρέπει πρώτα να προσδιορίσει αν έχει πρόσβαση στο *Δημόσιο Επίγειο Δίκτυο Κινητών Επικοινωνιών* (Public Land Mobile Network, PLMN). Αρχίζει τότε μία διαδικασία ενημέρωσης θέσης για να πληροφορήσει το οικείο PLMN για την τρέχουσα θέση του, με σκοπό να καταστήσει δυνατή τη δρομολόγηση των εισερχομένων κλήσεων προς το συνδρομητή. Η πληροφορία για την οικεία θέση του συνδρομητή αποθηκεύεται σε μία κεντρική βάση δεδομένων, τον *Οικείο Καταχωρητή Θέσης* (Home Location Register, HLR) του PLMN όπου ο χρήστης είναι συνδρομητής. Επιπλέον με άλλες ειδικές πληροφορίες, ο HLR διατηρεί φυλαγμένο τον αριθμό δρομολόγησης προς ένα *κέντρο μεταγωγής κινητών επικοινωνιών* (Mobile Switching Center, MSC). Το MSC είναι υπεύθυνο για τη μεταγωγή και τη διαχείριση της κινητικότητας. Από τη στιγμή που συνδέεται ένας κινητός σταθμός σε κάποιο MSC, ένα *Υποσύστημα Σταθμών Βάσης* (Base Station Subsystem, BSS) βρίσκεται σε επαφή μαζί του μέσω του ασύρματου interface. Κάθε κινητός σταθμός που βρίσκεται σε μία κυψέλη ενός BSS ενός MSC, εγγράφεται σε μία συγκεκριμένη βάση δεδομένων που αντιστοιχεί στο MSC, τον *Καταχωρητή Θέσης Επισκεπτών* (Visitors Location Register, VLR). Εάν μία κλήση προς ένα συνδρομητή του δικτύου προέρχεται από εξωτερικό δίκτυο, η κλήση δρομολογείται πρώτα σε ένα *Gateway-MSC* (GMSC). Από το GMSC, ρωτά τον HLR του καλούμενου συνδρομητή για να βρει τον αριθμό δρομολόγησης του MSC, στο οποίο ο καλούμενος συνδρομητής είναι επισκέπτης. Το τελευταίο MSC αρχίζει τότε τη μετάδοση ενός μηνύματος αναζήτησης προς όλες τις σχετιζόμενες με αυτό κυψέλες. Αν ο καλούμενος συνδρομητής απαντήσει, το BSS παραχωρεί ένα κανάλι για να χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία και γίνεται εγκατάσταση της σύνδεσης.

Κατά τη διάρκεια της κλήσης, ο κινητός σταθμός επιτρέπεται να κινηθεί από τη μία κυψέλη σε μία άλλη σε όλη την περιοχή εξυπηρέτησης του GSM, και το GSM φροντίζει να διατηρεί τις ζεύξεις χωρίς να διακόπτεται η από άκρη σε άκρη σύνδεση. Η διαδικασία μεταπομπής στο σύστημα υποβοηθείται από τον κινητό σταθμό και εκτελείται από το BSS.



Σχήμα 5.1 Στοιχεία δικτύου GSM.

Στην Ελλάδα λειτουργούν τα δίκτυα της Panafon, της Telestet και της Cosmote (DCS 1800). Άλλα συστήματα είναι το IS-54 στη Βόρεια Αμερική, το PDC στην Ιαπωνία κ.α.

5.3 Ασύρματα συστήματα (cordless)

Το χαρακτηριστικό των συστημάτων cordless είναι ότι προσφέρουν χωρικά περιορισμένη κινητικότητα χρηστών. Το κινητό τηλέφωνο επιτρέπει την ασύρματη πρόσβαση στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN) μέσα σε μία συγκεκριμένη περιοχή γύρω από ένα σταθμό βάσης.

5.3.1 Αναλογικά συστήματα cordless πρώτης γενιάς

Στις ΗΠΑ λειτουργούν από το 1984 ασύρματα αναλογικά τηλέφωνα cordless σε δέκα ζεύγη συχνοτήτων. Το επιτρεπόμενο εύρος ζώνης εκπομπής είναι 20KHz και η ακτινοβολούμενη ισχύς είναι χαμηλή, περίπου 20μW. Χρησιμοποιείται αναλογική διαμόρφωση συχνότητας για τη μετάδοση φωνής και προτείνεται η ψηφιακή κωδικοποίηση των λειτουργιών σηματοδοσίας για λόγους ασφαλείας.

Στην Ευρώπη τα πρώτα τηλέφωνα αυτού του είδους εισήχθησαν από την Άπω Ανατολή και τις ΗΠΑ. Στην Μ. Βρετανία καθιερώθηκε ένα πρότυπο παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιούνταν στις ΗΠΑ πριν το 1984 (το CT0). Στην υπόλοιπη Ευρώπη η ζήτηση οδήγησε στην ανάπτυξη του προτύπου CEPT/CT1.

5.3.2 Ψηφιακά συστήματα cordless πρώτης γενιάς

Τα αναλογικά συστήματα cordless παρουσίαζαν σημαντικά προβλήματα μεταξύ των οποίων ο περιορισμένος αριθμός καναλιών που αύξηνε την πιθανότητα απόρριψης της κλήσης καθώς και η μικρή ασφάλεια λόγω της χρησιμοποιούμενης αναλογικής διαμόρφωσης. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων αναπτύχθηκαν τα ψηφιακά συστήματα cordless:

- **το σύστημα CT2:** τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά αυτού του συστήματος είναι η ψηφιακή μετάδοση και η χρησιμοποίηση *αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου* (TDD). Η φωνή κωδικοποιείται με *προσαρμοστική διαφορική παλμοκωδική διαμόρφωση* (Adaptive Differential Pulse Code Modulation, ADPCM) και στη συνέχεια μεταδίδεται μαζί με δεδομένα σε πλαίσια διάρκειας 2msec. Το φάσμα που διατίθεται αποτελείται από 40 κανάλια FDMA με απόσταση 100KHz στην περιοχή 864-868 MHz.

- **το σύστημα DECT (Digital European Cordless Telecommunications):** σχεδιάστηκε για να παρέχει υπηρεσίες σε περιοχές με μεγάλη πυκνότητα χρηστών σε *πολύ μικρές κυψέλες* (pico-cells). Υποστηρίζει πολλαπλά κανάλια για μετάδοση φωνής και δεδομένων, μεταπομπή, διαγραφή και αναζήτηση κινητού σταθμού. Το σύστημα DECT μοιάζει περισσότερο σ’ ένα κυψελωτό σύστημα παρά σε ένα σύστημα cordless. Το σύστημα χρησιμοποιεί TDMA/TDD σε 12 χρονοθυρίδες ανά φέρον σε κάθε κατεύθυνση εκπομπής. Ένας σταθμός DECT μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα πολλά τερματικά με ένα μόνο πομποδέκτη. Επίσης, μπορεί να αντιστοιχίσει περισσότερες χρονοθυρίδες σε μία μόνο κλήση μετά από αίτηση προκειμένου να παρέχει μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Για την εξυπηρέτηση της κίνησης διατίθενται 10 φέροντα 1880-1900MHz και η φωνή κωδικοποιείται με ADPCM. Άλλα ψηφιακά συστήματα cordless είναι τα CT2+, PHS, PACS.

5.4 Σύγκλιση συστημάτων-UMTS-UTRAN

Ο όρος «Σύγκλιση» όπως αποδίδεται στη πράξη στην τηλεπικοινωνιακή καθομιλουμένη, σχετίζεται με περισσότερες της μιας έννοιες, όπως αυτές έχουν καθιερωθεί διεθνώς. Τέτοιες είναι:

1. Σύγκλιση τεχνολογιών (πχ η τεχνολογία IP, UMTS, WLAN, Bluetooth κλπ.).
2. Σύγκλιση υπηρεσιών για κινητά και σταθερά δίκτυα (Fixed Mobile Convergence, FMC), όπου υπονοούνται ενιαίος αριθμός και τύπος υπηρεσιών και για τους δύο

τύπους δικτύων. Οι όποιες διαφορές, θα είναι εκείνες που υπαγορεύονται από τον διαφορετικό τρόπο πρόσβασης.

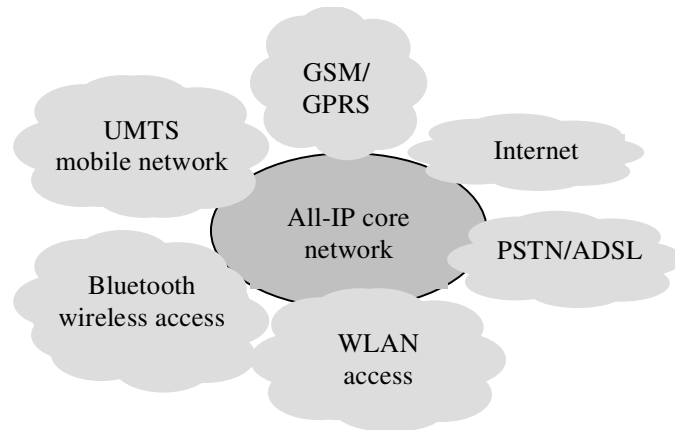
3. Ενοποίηση - Ολοκλήρωση κινητών και σταθερών δικτύων (Fixed Mobile Integration – FMI) όπου το δίκτυο είναι πλέον ενιαίο για όλους τους τύπους των υπηρεσιών και είδη πρόσβασης.

Τα δύο πρώτα είναι προϋπόθεση για το τρίτο και αποτελούν απαραίτητες συνιστώσες του. Η FMI σαν θέμα είναι τεράστιο, είναι από τα πλέον επίκαιρα και περιλαμβάνει και άλλα θέματα όπως σενάρια μετάβασης κλπ. Γίνεται επιλογή τεχνολογιών που εμπλέκονται στην πορεία για ενοποίηση και αναπτύσσονται κατάλληλα επιλεγμένα παραδείγματα υπηρεσιών με ενιαίο τρόπο με εφαρμογή σε όλες τις επιλεγθείσες τεχνολογίες. Εξετάζονται θέματα διαχείρισης και τεχνολογίες πρόσβασης ενσύρματες και ασύρματες, θέματα αυξημένων ρυθμών μετάβασης, πρωτόκολλα σηματοδοσίας κλπ. Όπου δεν επαρκεί η υποδομή, υλοποιούνται προκαταρκτικά δίκτυα και μελετώνται οι προδιαγραφές ενός πειραματικού δικτύου στο οποίο είναι δυνατό να δοκιμασθούν τα παραπάνω. Τέλος, γίνονται προσομοιώσεις σε διάφορα επίπεδα για μελέτη θεμάτων κίνησης, ποιότητας υπηρεσίας, διαχείρισης, συμπεριφοράς και σύνθεσης συσκευών, για προβλέψεις σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας κα.

Ο τρόπος αυτός που εξετάζεται το θέμα, προφανώς δεν το εξαντλεί. Για παράδειγμα, τα σενάρια μετάβασης σε FMI είναι, μεταξύ άλλων, ένα σημαντικότερο θέμα το οποίο δεν θίγεται στο παρόν πρόγραμμα. Για όλα αυτά, υπάρχουν άλλα συμπληρωματικά προγράμματα που έχουν υλοποιηθεί διεθνώς υπό την εποπτεία διαφορετικών φορέων (πχ. IST, Eurescom), ή και του ίδιου του ΟΤΕ (πρόγραμμα με Telcordia) στα οποία γίνεται εκτενής αναφορά.

5.4.1 Μορφή Δικτύου FMI

Τα δίκτυα FMI περιλαμβάνουν γενικά κάθε μορφή σταθερού ή κινητού δικτύου, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ένα κοινό δίκτυο κορμού βασισμένο σε IP. Το “all-IP” δίκτυο κορμού των FMI δικτύων θα ακολουθεί πιθανότατα τις ίδιες αρχές μεταγωγής και μετάδοσης με το “all-IP” δίκτυο κορμού του UMTS. Η γενική μορφή ενός FMI δικτύου είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.2.



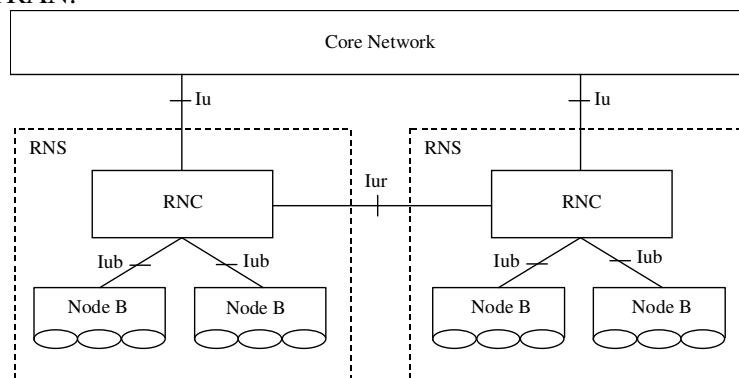
Σχήμα 5.2 Γενική μορφή ενός FMI δικτύου.

5.4.2 UMTS–UTRAN

Το δίκτυο ραδιοπρόσβασης UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network) των δικτύων κινητών τηλεπικοινωνιών 3^{ης} γενιάς, παρεμβάλλεται μεταξύ του κινητού σταθμού UE (user equipment) και του δικτύου κορμού (CN). Το UTRAN χειρίζεται όλες τις λειτουργίες της ραδιοεπαφής.

5.4.2 Αρχιτεκτονική του UTRAN

Το UTRAN αποτελείται από ένα σύνολο υποσυστημάτων ραδιοδικτύου (radio network subsystem – RNS) που είναι τα σημεία πρόσβασης στο δίκτυο UMTS. Το υποσύστημα του ραδιοδικτύου δεσμεύει ή αποδεσμεύει τους συγκεκριμένους εκείνους πόρους του ραδιοδιαύλου που είναι απαραίτητοι για την σύνδεση μεταξύ του τερματικού (UE) και του UTRAN. Κάθε RNS αποτελείται από ένα ελεγκτή ραδιοδικτύου (Radio Network Controller) και έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης (Node B). Το RNS συνδέεται με το UE μέσω της διεπαφής Uu, ενώ με το δίκτυο κορμού μέσω της διεπαφής Iu. Το σχήμα 5.3 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του UTRAN.



Σχήμα 5.3 Αρχιτεκτονική του UTRAN.

5.4.3 Δομικά στοιχεία του UTRAN

- **Node B:** Ο σταθμός βάσης είναι ένας λογικός κόμβος υπεύθυνος για την εκπομπή και λήψη σε μία ή περισσότερες κυψέλες. Ο σταθμός βάσης μπορεί να λαμβάνει και να εκπέμπει σήματα σε διαφορετικά εύρη συχνοτήτων (FDD - frequency division duplex mode) , στο ίδιο εύρος με πολυπλεξία στον χρόνο (TDD - time division duplex mode) , ή τέλος να υποστηρίζει και τους δύο τρόπους λειτουργίας. Ο Node B συνδέεται με τον κινητό σταθμό μέσω της διεπαφής Uu και με τον ελεγκτή RNC με τη ραδιοεπαφή Iub. Η βασική λειτουργικότητα του Node B είναι να εκτελεί την επεξεργασία του σήματος πριν αυτό μεταδοθεί στο ραδιοδιάυλο ή αφού έχει ληφθεί από αυτόν. (π.χ κωδικοποίηση διαύλου, διασπορά, κτλ). Ακόμα υλοποιεί βασικούς αλγόριθμους διαχείρισης πόρων όπως ο έλεγχος της ισχύος .
- **RNC:** Ο ελεγκτής του ραδιοδικτύου είναι ένας λογικός κόμβος στο υποσύστημα ραδιοδικτύου (RNS) που ελέγχει τη χρήση των διαθέσιμων πόρων του ραδιοδιαύλου στο πεδίο της υπευθυνότητας του, δηλαδή στους Node Bs που ανήκουν στο RNS του. Ο RNC είναι το σημείο που το δίκτυο κορμού έχει πρόσβαση στις υπηρεσίες που του παρέχει το δίκτυο ραδιοπρόσβασης. Στην περίπτωση που μία σύνδεση UTRAN-UE χρησιμοποιεί πόρους από περισσότερα από ένα RNS τότε τα RNC των υποσυστημάτων αυτών έχουν δυο διακριτούς λογικούς ρόλους:
 - ελεγκτής-εξυπηρετητής (SRNC, serving RNC) : Ο SRNC για ένα κινητό είναι ο RNC που τερματίζει την διεπαφή Iu αλλά και τη σηματοδότηση με το δίκτυο κορμού
 - ελεγκτής-ολίσθησης (DRNC, drift RNC): είναι κάθε ένας από τους RNC , εκτός του SRNC, που ελέγχουν τις κυψέλες τις οποίες χρησιμοποιεί το κινητό.

5.5 WCDMA

Η μετάβαση από τα κυψελωτά συστήματα 1ης γενιάς σε εκείνα της 2ης γενιάς σηματοδεύτηκε από την εισαγωγή των ψηφιακών τεχνικών, που έδωσαν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών φωνής σε μεγάλους πληθυσμούς και μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις, λόγω της πολύ καλής ποιότητας της φωνητικής υπηρεσίας. Η δυνατότητα όμως υποστήριξης υπηρεσιών δεδομένων είναι περιορισμένη στα 2ης γενιάς συστήματα και η ανάγκη για παροχή υπηρεσιών με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ώστε να μεταδίδονται εικόνες υψηλής ποιότητας και video πραγματικού χρόνου, ή να παρέχεται πρόσβαση στο Διαδίκτυο με υψηλές ταχύτητες, οδήγησε στη σχεδίαση των συστημάτων 3ης γενιάς.

Το βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η υποστήριξη εφαρμογών πολυμέσων και η δυνατότητα πρόσβασης σε πληροφορίες και υπηρεσίες από δημόσια ή ιδιωτικά δίκτυα, με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Οι βασικές απαιτήσεις που τίθενται από τα 3ης γενιάς συστήματα είναι τα εξής :

- Ρυθμοί μετάδοσης μέχρι και 2Mbps

- Μεταβαλλόμενος ρυθμός μετάδοσης για δυνατότητα προσφοράς εύρους ζώνης κατά απαίτηση
- Πολυπλεξία υπηρεσιών, με διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την ποιότητα (π.χ. φωνή, video, πακέτα δεδομένων), στην ίδια σύνδεση
- Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ως προς την καθυστέρηση, ανάλογα με την ευαισθησία της υπηρεσίας ως προς την καθυστέρηση
- Μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ποιότητας ανάλογα με την υπηρεσία, από 10% FER (Frame Error Rate) ως 10^{-6} BER
- Συνύπαρξη 2ης και 3ης γενιάς συστημάτων και υποστήριξη μεταπομπής μεταξύ των συστημάτων για βελτίωση της κάλυψης και εξισορρόπηση του τηλεπικοινωνιακού φορτίου
- Υποστήριξη ασύμμετρης τηλεπικοινωνιακής κίνησης στην ευθεία και την αντίστροφη ζεύξη (π.χ. όπως στο web browsing όπου η κίνηση στην ευθεία ζεύξη είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστροφη)
- Μεγάλη φασματική απόδοση
- Συνύπαρξη FDD και TDD συστημάτων.

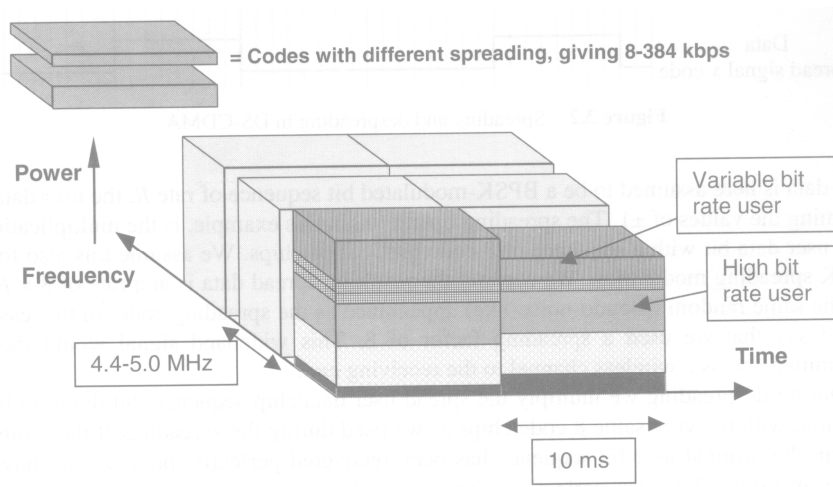
Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των συστημάτων κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς είναι οι μεγάλοι ρυθμοί μετάδοσης. Ρυθμοί μέχρι 384 kbps και 2 Mbps μπορούν να επιτευχθούν σε *συνδέσεις μεταγωγής κυκλώματος* (circuit-switched connections) και *μεταγωγής πακέτου* (packet-switched connections) αντίστοιχα. Σε σύγκριση με τα συστήματα 2^{ης} γενιάς τα συστήματα 3^{ης} γενιάς προσφέρουν ένα πολύ σημαντικό νέο χαρακτηριστικό. Επιτρέπουν τη διαπραγμάτευση των χαρακτηριστικών του radio bearer. Οι παράγοντες που ορίζουν τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης είναι και η *διεκπεραιωτικότητα* (throughput), η καθυστέρηση διάδοσης και ο ρυθμός λανθασμένων δεδομένων.

Το WCDMA είναι ένα DS-CDMA σύστημα ευρείας ζώνης και αποτελεί τη ραδιοεπαφή των συστημάτων 3^{ης} γενιάς. Η διασπορά των bits πληροφορίας του χρήστη σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης γίνεται με τον πολλαπλασιασμό της πληροφορίας με ψευδοτυχαία bits που λέγονται chips και προέρχονται από τους CDMA κώδικες διασποράς. Για την επίτευξη μεγάλων ρυθμών μετάδοσης (έως 2 Mbps), υποστηρίζεται η χρήση ενός μεταβλητού παράγοντα διασποράς καθώς και multicode connections.

Υποστηρίζει μεταβλητούς ρυθμούς δεδομένων και κατά συνέπεια τη χρήση Bandwidth on Demand (BoD). Σε κάθε χρήστη αποδίδονται πλαίσια διάρκειας 10 ms κατά τη διάρκεια της οποίας ο ρυθμός δεδομένων παραμένει σταθερός. Ωστόσο, ο ρυθμός μετάδοσης μεταξύ των χρηστών μπορεί να αλλάζει από πλαίσιο σε πλαίσιο.

Το WCDMA υποστηρίζει επίσης τη λειτουργία ασύγχρονων σταθμών βάσης και χρησιμοποιεί coherent detection στην άνω και στην κάτω ζεύξη, η οποία βασίζεται στη χρήση pilot symbols ή common pilots. Για την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος

και/ή της κάλυψης μπορούν να αναπτυχθούν τεχνικές όπως multiuser detection και έξυπνες προσαρμοστικές κεραιές (smart adaptive antennas).

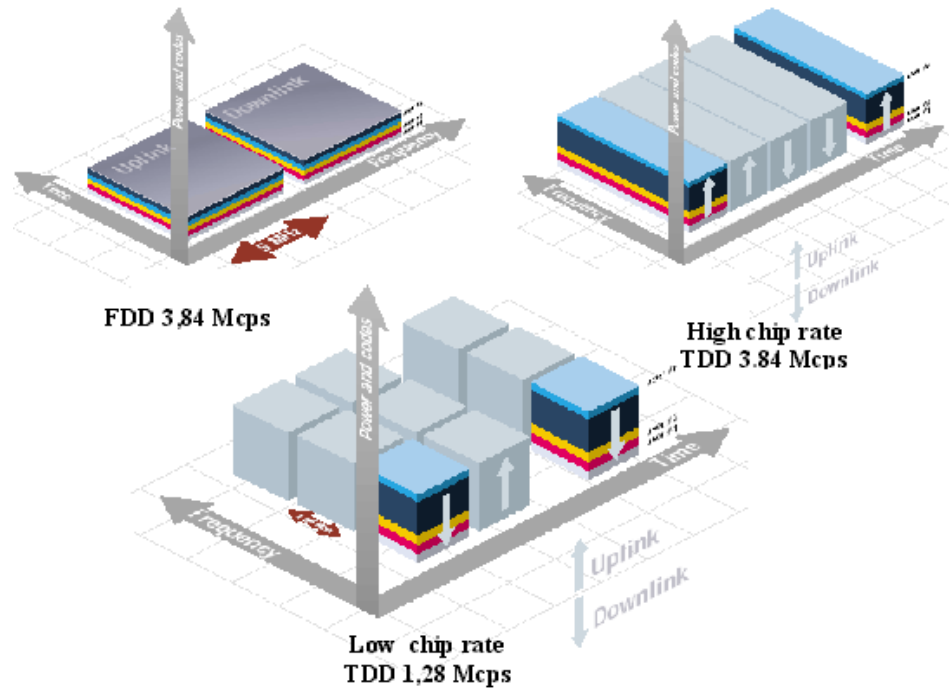


Σχήμα 5.4

Εξ' άλλου το WCDMA είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να υποστηρίζει μεταπομπή μεταξύ GSM και UMTS και γι' αυτό μπορεί να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το GSM και να εκμεταλλεύεται την κάλυψη που το σύστημα αυτό παρέχει.

5.5.1 Τεχνικές Αμφίδρομης Λειτουργίας (FDD, TDD)

Το WCDMA υποστηρίζει δύο βασικές μεθόδους λειτουργίας: Frequency Division Duplex (FDD) και Time Division Duplex (TDD). Η WCDMA FDD χρησιμοποιεί 3,84 Mbps ακολουθία διασποράς, χρησιμοποιώντας εύρος 5 MHz. Για την τεχνική TDD υπάρχουν δύο εναλλακτικές. Η υψηλού ρυθμού TDD με 3,84 Mbps ακολουθία διασποράς και 5 MHz εύρος ζώνης, που καλείται και WCDMA TDD, και η χαμηλού ρυθμού TDD με 1,28 Mcps και 1,66 MHz εύρος ζώνης. Οι διαφορές των δύο εναλλακτικών TDD δεν περιορίζονται στο ρυθμό της ακολουθίας διασποράς και στο αντίστοιχο εύρος ζώνης που καταλαμβάνουν, αλλά οι δύο τεχνικές έχουν και διαφορετική δομή πλαισίου. Το WCDMA TDD έχει εναρμονιστεί με το WCDMA FDD ώστε να διευκολυνθεί η υλοποίηση τερματικών διπλού τρόπου λειτουργίας, αλλά και η ανάπτυξη δικτύων FDD/TDD από τον ίδιο operator. Οι αρχές λειτουργίας των TDD και FDD φαίνονται στο σχήμα 5.5.



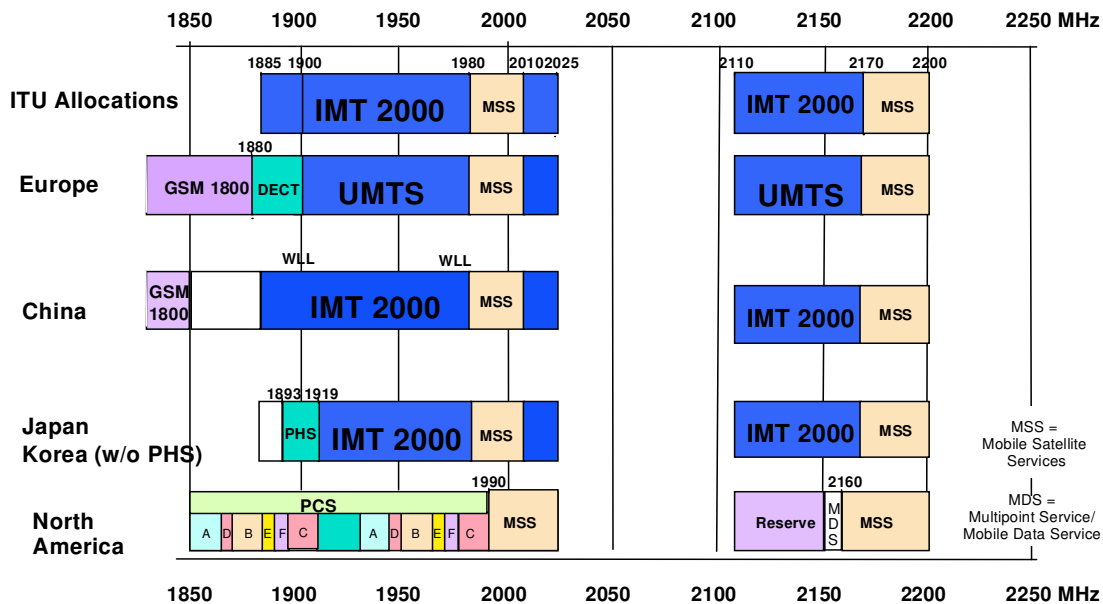
Σχήμα 5.5 Αρχές Λειτουργίας TDD και FDD στο WCDMA.

Με την τεχνική WCDMA FDD, απαιτείται η χρήση διπλέκτη στον κινητό σταθμό. Η απόσταση των συχνοτήτων εκπομπής και λήψης είναι σταθερή σε όλο το σύστημα ανεξαρτήτως του φέροντος που χρησιμοποιείται, και είναι 190 MHz. Χρήστες του ίδιου φέροντος είναι διακριτοί λόγω του διαφορετικού κώδικα CDMA που χρησιμοποιούν. Στην τεχνική TDD, αν το χρονικό διάστημα μεταξύ εκπομπής και λήψης είναι μικρό, τότε ο χρήστης εκλαμβάνει την επικοινωνία ταυτόχρονη. Παρόλα αυτά υπάρχει μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δύο κατευθύνσεων επικοινωνίας. Τα εναρμονισμένα χαρακτηριστικά των δύο τεχνικών WCDMA φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

	UTRA TDD	UTRA FDD
Multiple access method	TDMA, CDMA (inherent FDMA)	CDMA (inherent FDMA)
Duplex method	TDD	FDD
Channel spacing	5 MHz (nominal)	
Carrier chip rate	3.84 Mcps	
Time slot structure	15 slots / frame	
Frame length	10 ms	
Multirate concept	Multicode, multislot and orthogonal variable spreading factor (OVSF)	Multicode and OVSF
Forward error correction (FEC) codes	Convolutional coding $R=1/2$ or $1/3$ constraint length $K=9$, turbo coding (8- state PCCC $R=1/3$) or service specific coding	
Interleaving	Inter- frame interleaving (10, 20, 40 and 80 ms)	
Modulation	QPSK	
Burst types	3 types: traffic bursts, random access and synchronization burst	not applicable (DTX time mask defined)
Detection	Coherent, based on midamble	Coherent, based on pilot symbols
Dedicated channel power control	Uplink: open loop; 100 Hz or 200 Hz Downlink: closed loop; rate ≤ 800 Hz	fast closed loop; rate = 1500 Hz
Intra- frequency handover	Hard handover	Soft handover
Inter- frequency handover	Hard handover	
Channel allocation	Slow and fast DCA supported	No DCA required
Intra- cell interference cancellation	Support for joint detection	Support for advanced receivers at base station
Spreading factor	1,2,4,8, 16	4 ... 512

5.5.2 Απόδοση συχνοτήτων

Οι συχνοτήτες που αποδόθηκαν από το WARC'92 για τα 3ης γενιάς συστήματα είναι διαφορετικές για κάθε περιοχή. Ο λόγος είναι οι ζώνες συχνοτήτων που είχαν καταλάβει τα συστήματα 2ης γενιάς σε κάθε περιοχή. Στο σχήμα 5.7 φαίνονται οι ζώνες συχνοτήτων για τα 3ης γενιάς δίκτυα στις ΗΠΑ, την Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Κορέα. Ιδιαίτερα για την Ευρώπη οι συχνότητες που αποδόθηκαν είναι 2*60 MHz (1920-1980 MHz uplink, 2110-2170 MHz downlink) για WCDMA FDD συστήματα, 25MHz (1900-1920 MHz & 2020-2025 MHz) για TDD συστήματα με υποχρέωση έκδοσης άδειας, και 10 MHz (2010-2020 MHz) για TDD συστήματα χωρίς αδειοδότηση (SPA, Self Provided Applications).



Σχήμα 5.6 Ζώνες συχνοτήτων για τα συστήματα 3^{ης} γενιάς.

5.6 Βασικά χαρακτηριστικά του WCDMA

Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν το WCDMA.

5.6.1 Εύρος ζώνης

Το εύρος ζώνης ενός φέροντος του WCDMA είναι 5 MHz. Οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αυτή για το εύρος ζώνης είναι αρκετοί. Αρχικά, οι ρυθμοί των 144 και 384 kbps, που είναι και οι κύριοι στόχοι των συστημάτων 3^{ης} γενιάς, επιτυγχάνονται εντός του εύρους ζώνης των 5 MHz με ικανοποιητική χωρητικότητα. Ακόμα και ο μέγιστος ρυθμός των 2 Mbps μπορεί να εξασφαλιστεί κάτω από περιορισμένες συνθήκες. Η έλλειψη διαθέσιμου φάσματος έχει σαν αποτέλεσμα την ελάχιστη δυνατή κατανομή φάσματος, ειδικότερα στην περίπτωση που το σύστημα θα αναπτυχθεί με βάση τις ήδη υπάρχουσες ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται από τα συστήματα 2^{ης} γενιάς. Τέλος ένα βασικό

πλεονέκτημα του μεγάλου αυτού εύρους ζώνης έναντι μικρότερων είναι η δυνατότητα διαχωρισμού περισσότερων πολυδιαδρομικών συνιστωσών (multipaths), αυξάνοντας τη *διαφορισιμότητα* (diversity) και βελτιώνοντας έτσι την επίδοση του συστήματος.

5.6.2 Απόσταση μεταξύ διαδοχικών φερόντων

Μεγαλύτερη χωρητικότητα μπορεί να επιτευχθεί από τον κάθε operator αναπτύσσοντας πολλά φέροντα σήματα εύρους 5 MHz, με τη μορφή των ιεραρχικών κυψελωτών επιπέδων (hierarchical cell layers). Η *απόσταση μεταξύ διαδοχικών φερόντων σημάτων* (carrier spacing) μπορεί να είναι από 4.4 έως 5 MHz με βήμα 200 KHz. Η απόσταση επιλέγεται με στόχο την διασφάλιση της κατάλληλης προστασίας γειτονικών καναλιών ανάλογα με τα σενάρια παρεμβολών. Η απόσταση μεταξύ διαδοχικών φερόντων διαφορετικών operators μπορεί να είναι μεγαλύτερη για την αποφυγή inter-operator παρεμβολών.

5.6.3 Διάρκεια Πλαισίου (Frame Length)

Η διάρκεια του πλαισίου εξαρτάται από τις απαιτήσεις των υπηρεσιών (φωνή, δεδομένα κ.τ.λ.) και την επιθυμητή απόδοση. Για την επίτευξη καλής απόδοσης σε ένα κανάλι διαλείψεων (fading channel) πρέπει η διάρκεια του πλαισίου να είναι αρκετά μεγάλη αλλά δεν πρέπει να ξεπερνά την *απαίτηση καθυστέρησης διάδοσης* (transmission delay requirement) κάθε υπηρεσίας. Το μήκος πλαισίου που χρησιμοποιείται στο WCDMA είναι 10 ms.

5.6.4 Ιεραρχικά κυψελωτά επίπεδα

Το WCDMA υποστηρίζει τη δομή των ιεραρχικών κυψελωτών επιπέδων (Hierarchical Cell Layers - HCS).

Η δομή αυτή χαρακτηρίζει ένα σύστημα όπου τουλάχιστον δύο διαφορετικά είδη κυψελών λειτουργούν η μία πάνω στην άλλη. Τα διαφορετικά είδη κυψελών είναι απαραίτητα για διαφορετικές απαιτήσεις: μεγάλες κυψέλες εγγυώνται συνεχή κάλυψη ενώ μικρές κυψέλες είναι απαραίτητες για καλή φασματική απόδοση και μεγάλη χωρητικότητα. Οι μικρές κυψέλες χρησιμοποιούνται από τερματικά μικρής κινητικότητας και μεγάλης χωρητικότητας ενώ οι μεγάλες κυψέλες εξυπηρετούν τερματικά μεγάλης κινητικότητας και μικρής χωρητικότητας. Υπάρχουν διάφορα είδη κυψελών. Οι πικοκυψέλες καλύπτουν περιοχές ακτίνας μερικών δεκάδων μέτρων (εσωτερικοί χώροι), οι μικροκυψέλες μερικών εκατοντάδων μέτρων και οι μακροκυψέλες ενός χιλιομέτρου ή παραπάνω.

5.6.5 Έλεγχος ισχύος (Power Control)

Στο WCDMA η επικοινωνία μεταξύ των χρηστών γίνεται ταυτόχρονα στην ίδια περιοχή συχνότητας και επιπλέον κάθε χρήστης καταλαμβάνει διαρκώς όλο το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Επομένως ένας χρήστης κοντά στο σταθμό βάσης θα δημιουργεί συνεχώς

μεγάλη παρεμβολή στους χρήστες που βρίσκονται μακριά από το σταθμό βάσης, καθιστώντας έτσι τη λήψη τους αδύνατη (near-far problem). Αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στο WCDMA για την αντιμετώπιση του οποίου ακολουθείται η μέθοδος ελέγχου ισχύος (power control). Με τη μέθοδο αυτή επιδιώκεται τα σήματα όλων των κινητών σταθμών, ανεξάρτητα από την απόσταση, να λαμβάνονται από τον σταθμό βάσης με την ίδια μέση ισχύ.

Σε αντίθεση με την άνω ζεύξη (uplink), στην κάτω ζεύξη όλα τα σήματα διαδίδονται μέσω του ίδιου καναλιού και κατά συνέπεια λαμβάνονται με την ίδια ισχύ από τους κινητούς σταθμούς. Επομένως, δεν υφίσταται το near-far πρόβλημα στην κάτω ζεύξη. Ο έλεγχος ισχύος ωστόσο είναι απαραίτητος για την ελαχιστοποίηση της παρεμβολής σε άλλες κυψέλες καθώς και την εξουδετέρωση των παρεμβολών από άλλες κυψέλες. Επιπροσθέτως, ο έλεγχος ισχύος βελτιώνει την επίδοση του συστήματος όσον αφορά τις διαλείψεις.

Υπάρχουν τρία είδη ελέγχου ισχύος: *Ανοικτού Βρόχου* (Open Loop), *Κλειστού Βρόχου* (Closed Loop) και *Εξωτερικού Βρόχου* (Outer Loop).

Με τον έλεγχο ισχύος ανοικτού βρόχου γίνεται μια εκτίμηση των απωλειών διάδοσης μέσω ενός ραδιοφάρου (beacon signal) που εκπέμπεται από το σταθμό βάσης και ανάλογα προσαρμόζεται η ισχύς εκπομπής από τους κινητούς σταθμούς. Η μέθοδος αυτή είναι σχετικά ανακριβής γιατί οι γρήγορες διαλείψεις είναι ουσιαστικά ασυσχέτιστες μεταξύ της άνω και της κάτω ζεύξης λόγω της μεγάλης απόστασης αυτών στο φάσμα των συχνοτήτων (στο WCDMA FDD). Βρίσκει όμως εφαρμογή στην αρχική ρύθμιση της ισχύος, κατά την εκκίνηση της σύνδεσης.

Στον έλεγχο ισχύος κλειστού βρόχου στην άνω ζεύξη, ο σταθμός βάσης κάνει συχνές εκτιμήσεις του λαμβανόμενου λόγου σήματος προς παρεμβολή (SIR) και το συγκρίνει με μια τιμή κατωφλίου SIR. Αν το μετρούμενο SIR είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο από την τιμή κατωφλίου, τότε ο σταθμός βάσης στέλνει εντολή στον κινητό σταθμό να ελαττώσει ή να αυξήσει την ισχύ του αντίστοιχα. Η διαδικασία αυτή εκτελείται με ρυθμό 1500 φορές το δευτερόλεπτο (1.5 kHz - fast closed loop power control) για κάθε κινητό σταθμό και είναι επομένως πιο γρήγορη από οποιαδήποτε σημαντική αλλαγή μπορεί να συμβεί στις απώλειες και ταχύτερη από τον ρυθμό των γρήγορων διαλείψεων Rayleigh για χαμηλές ή και μέτριες ταχύτητες κινητών. Στις μεγάλες ταχύτητες (>100km/h) ο γρήγορος έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου δεν προλαβαίνει να ακολουθήσει τις μεταβολές των γρήγορων διαλείψεων και τότε απαιτείται η χρήση άλλων τεχνικών (π.χ. διαφορική λήψη δέκτη) για την αντιστάθμιση των μεταβολών ισχύος λήψης και την διατήρηση της επιθυμητής ποιότητας επικοινωνίας. Στην κάτω ζεύξη ο σταθμός βάσης μειώνει περιοδικά την ισχύ εκπομπής προς τον κινητό σταθμό. Ο κινητός σταθμός μετράει το ρυθμό σφαλμάτων πλαισίου (FER) και αν αυτός ξεπερνά ένα προκαθορισμένο όριο, τυπικά 1%, ζητά από τον σταθμό βάσης επιπρόσθετη ισχύ. Η διαδικασία αυτή εκτελείται κάθε 15 με 20 ms (slow closed loop power control).

Ο έλεγχος ισχύος εξωτερικού βρόχου ρυθμίζει το SIR που έχει οριστεί σαν τιμή κατωφλίου στον σταθμό βάσης ανάλογα με τις ανάγκες της ραδιοζεύξης και στοχεύει σε σταθερή ποιότητα η οποία ορίζεται από μια συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου BER ή FER. Αν διαπιστωθεί κάποια υποβάθμιση στην ποιότητα εκπομπής τότε ο RNC στέλνει εντολή στον σταθμό βάσης να αυξήσει την τιμή κατωφλίου SIR.

5.6.6 Τεχνικές μεταπομπής

Όταν ένας κινητός σταθμός με κλήση σε εξέλιξη, διασχίζει τα όρια μιας κυψέλης, είναι απαραίτητη η μεταφορά της κλήσης σε γειτονικό σταθμό βάσης κατά τρόπο μη αντιληπτό στο χρήστη, ώστε να διατηρηθεί η απαιτούμενη ποιότητα ζεύξης, χωρίς να προκληθεί ομοδιαυλική ή σε γειτονικούς διαύλους παρεμβολή. Ο τύπος αυτός μεταπομπής ονομάζεται *διακυψελική μεταπομπή* (intercell handover). Πολλές φορές είναι επιθυμητή η μεταπομπή της κλήσης σε διαφορετικό δίαυλο της ίδιας κυψέλης, που παρουσιάζει καλύτερα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Ο τύπος αυτός της μεταπομπής καλείται *ενδοκυψελική μεταπομπή* (intracell handover).

Γενικά η διαδικασία μεταπομπής περιλαμβάνει δύο στάδια: α) την εκτίμηση της ποιότητας της ζεύξης και την έναρξη της διαδικασίας μεταπομπής και β) την απόδοση των πόρων του συστήματος.

Μια επιπλέον διάκριση των αλγορίθμων μεταπομπής είναι σε hard, soft και softer handover. Στους hard αλγόριθμους η ραδιοζεύξη με τον παλιό σταθμό βάσης διακόπτεται ταυτόχρονα με την εγκατάσταση της νέας ραδιοζεύξης. Στους soft αλγόριθμους έχουμε διατήρηση δύο ταυτόχρονων ραδιοζεύξεων και μια ζεύξη διακόπτεται μόνο όταν το επίπεδο σήματος βρίσκεται κάτω από μια τιμή κατωφλίου. Στο WCDMA λόγω της χρήσης του ίδιου διαύλου από όλους τους χρήστες, ο όρος μεταπομπή υπονοεί τη διαχείριση της ζεύξης ενός χρήστη από άλλο σταθμό βάσης. Με την αξιολόγηση της ποιότητας της ζεύξης ενός χρήστη από πολλούς σταθμούς βάσης είναι η δυνατή η επιλογή της καλύτερης εκδοχής του σήματος του χρήστη από το δίκτυο, προσφέροντας έτσι μια μορφή διαφορισμότητας. Είναι εμφανής η ανάγκη για τόσους βρόχους ελέγχου για κάθε σύνδεση, όσοι είναι οι σταθμοί βάσης που συμμετέχουν στη μεταπομπή, κυρίως βέβαια δύο. Οι softer αλγόριθμοι αναφέρονται στην περίπτωση που ο κινητός σταθμός βρίσκεται στην επικαλυπτόμενη περιοχή από δύο γειτονικούς τομείς ενός σταθμού βάσης. Στην κατεύθυνση της κάτω ζεύξης ο κινητός σταθμός λαμβάνει δύο διαφορετικά σήματα, με διαφορετικό κώδικα, και στην κατεύθυνση της άνω ζεύξης οι τομείς λαμβάνουν δύο διαφορετικές εκδοχές του εκπεμπόμενου σήματος από το κινητό, δίνοντας τη δυνατότητα στο δίκτυο να αποφασίσει για τον τομέα που θα εξυπηρετήσει το χρήστη. Είναι προφανές ότι στους softer αλγόριθμους απαιτείται μόνο ένας βρόχος ελέγχου ισχύος.

Στην κάτω ζεύξη, η soft και softer μεταπομπή παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές. Στην άνω ζεύξη όμως υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο τύπων αφού το σήμα από

τον κινητό σταθμό λαμβάνεται και από τους δύο σταθμούς βάσης αλλά διοδεύεται προς το RNC για επεξεργασία.

Επιπλέον, υπάρχουν και άλλοι δύο τύποι μεταπομπών. Οι διασυχνοτικές hard μεταπομπές που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της κλήσης από ένα WCDMA φέρον σε κάποιο άλλο και hard μεταπομπές μεταξύ συστημάτων π.χ. από WCDMA FDD σε WCDMA TDD ή GSM ή DECT. Οι μεταπομπές μεταξύ διαφορετικών συστημάτων χρησιμεύουν κυρίως για την βελτίωση της κάλυψης του δικτύου ενώ οι μεταπομπές μεταξύ διαφορετικών φερόντων εξυπηρετούν πρωτίστως θέματα χωρητικότητας και ρύθμισης φορτίου.

5.6.7 Κωδικοποίηση διαύλου

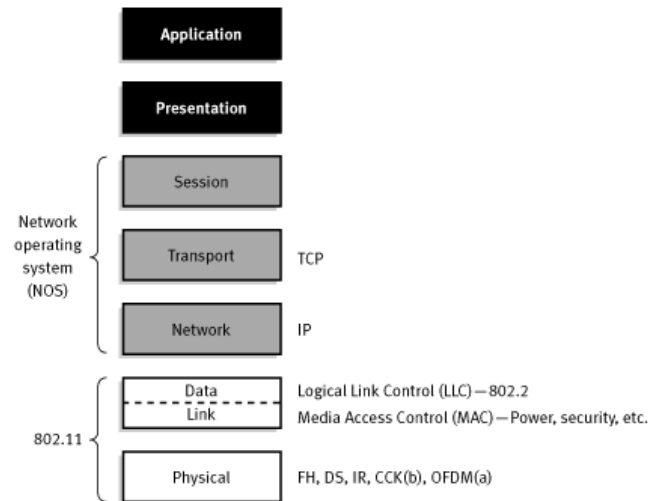
Διαφορετικές τεχνικές κωδικοποίησης μπορούν να εφαρμοστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις καθυστέρησης και ρυθμού σφαλμάτων bits (BER) για διαφορετικές υπηρεσίες. Συνελκτικοί κώδικες με ρυθμό 1/3 και 1/2 και μήκος περιορισμού (constraint length) 9 εφαρμόζονται για υπηρεσίες με απαιτήσεις BER της τάξεως του 10^{-3} . Οι τεχνικές αυτές συνήθως είναι αποδοτικές σε βάρος του εύρους ζώνης ή του ρυθμού μετάδοσης. Για υπηρεσίες με μεγαλύτερες απαιτήσεις BER της τάξεως του 10^{-6} και λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης, χρησιμοποιούνται συνελκτικοί κώδικες σε συνδυασμό με εξωτερικούς (outer) Reed-Solomon κώδικες (ρυθμού της τάξης των 4/5) και outer interleaving. Για μεγαλύτερους ρυθμούς και υπηρεσίες υψηλής ποιότητας (high quality services) μπορούν να εφαρμοστούν turbo κώδικες.

5.7 WLAN

5.7.1 Τεχνικά Χαρακτηριστικά των WLANs

IEEE 802.11 (1997)

Όπως σε όλα τα IEEE 802 πρότυπα, το πρότυπο 802.11 επικεντρώνεται στα δύο χαμηλότερα στρώματα του ISO μοντέλου, δηλαδή στο φυσικό στρώμα (physical layer) και στο στρώμα ζεύξης δεδομένων (Data Link Layer), όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.7.



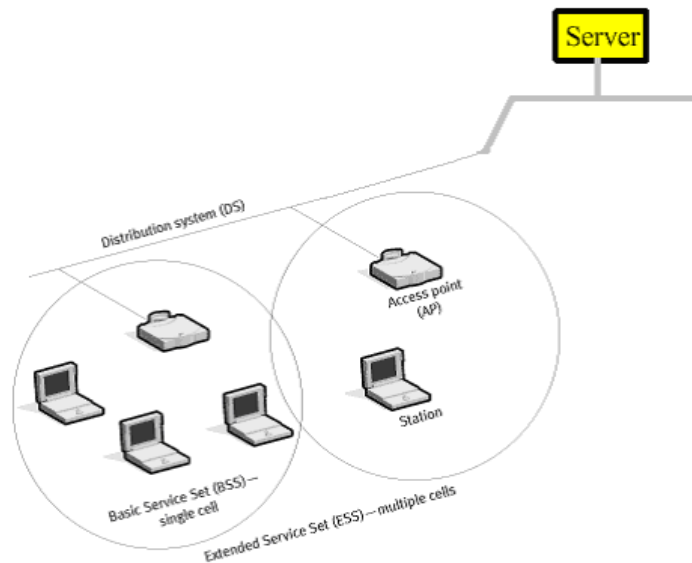
Σχήμα 5.7 Στρώματα μοντέλου ISO.

Το πρότυπο 802.11 της IEEE προδιαγράφει ρυθμούς μετάδοσης 1 και 2 Mbps χρησιμοποιώντας τεχνολογίες FHSS και DSSS στην περιοχή συχνοτήτων 2.4 GHz. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι ζώνες συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται για WLANs σε διάφορα σημεία ανά τον κόσμο:

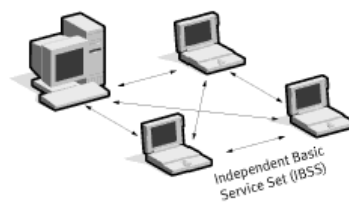
Πίνακας Ζώνες συχνοτήτων ανά περιοχή

Περιοχή	Συχνότητες
ΗΠΑ	2.4000-2.4835 GHz
Ευρώπη	2.4000-2.4835 GHz
Ιαπωνία	2.471-2.497 GHz
Γαλλία	2.4465-2.4835 GHz
Ισπανία	2.445-2.475 GHz

Στο 802.11 διακρίνονται δύο τοπολογίες δικτύου: η τοπολογία με δίκτυο υποδομής (infrastructure network) και η Ad-Hoc τοπολογία. Στα σχήματα 5.9 και 5.10 φαίνονται δύο τυπικές μορφές των τοπολογιών αυτών:



Σχήμα 5.8 Τοπολογία με δίκτυο υποδομής.



Σχήμα 5.9 Τοπολογία Ad-Hoc.

Το 802.11 έχει τυποποιήσει τα δύο βασικά δομικά στοιχεία των παραπάνω τοπολογιών: τον ασύρματο σταθμό (wireless station) που είναι συνήθως ένα PC εφοδιασμένο με μία wireless network interface κάρτα (NIC) και το access point (AP), το οποίο λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στο ασύρματο και στο ενσύρματο δίκτυο.

Σε τοπολογία infrastructure το WLAN αποτελείται από ένα τουλάχιστον access point και μία ομάδα τερματικών σταθμών. Η πρόσβαση κάθε σταθμού στο δίκτυο γίνεται μέσω του access point. Κάθε στιγμή ένας σταθμός μπορεί να είναι συνδεδεμένος μόνο με ένα access point. Ένα access point και μερικοί σταθμοί που επικοινωνούν μεταξύ τους σχηματίζουν ένα Basic Service Set (BSS). Δύο ή περισσότερα BSS διασυνδέονται μέσω ενός Distribution System ή DS και οδηγούν στο επόμενο επίπεδο της ιεραρχίας, το Extended Service Set ή ESS. Το DS είναι συνήθως ένα δίκτυο Ethernet, χωρίς ωστόσο αυτό να προδιαγράφεται από το 802.11. Είσοδος στο DS επιτυγχάνεται με τη χρήση των access points. Η επικοινωνία ανάμεσα σε ένα WLAN, τυποποιημένο κατά IEEE 802.11, με ένα 802.X LAN γίνεται μέσω ενός portal. Μπορεί να θεωρηθεί ότι το portal λειτουργεί ως access

point στο DS. Όλα τα δεδομένα, τα οποία εισέρχονται σε ένα 802.11 LAN προερχόμενα από ένα 802.X LAN περνούν υποχρεωτικά από το portal.

Σε τοπολογία Ad-Hoc (ή αλλιώς τοπολογία IBSS, Independent BSS) μία ομάδα από ασύρματους σταθμούς επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς την παρουσία ενός access point ή κάποια σύνδεση με ένα ενσύρματο δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση μερικές από τις λειτουργίες του AP παρέχονται από κάποιον από τους ασύρματους σταθμούς που επικοινωνούν.

- **Φυσικό Στρώμα**

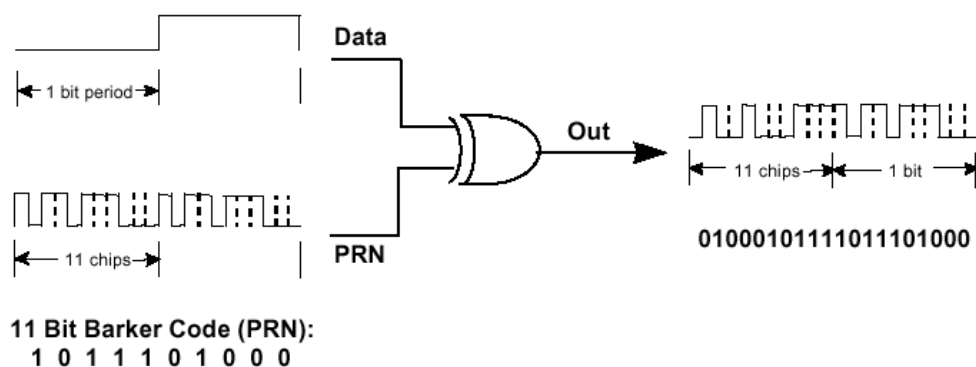
Το πρότυπο 802.11 προβλέπει τη χρησιμοποίηση δύο διαφορετικών τύπων φυσικού στρώματος:

1)Ραδιοδιάλογος στα 2.4 GHz σε τεχνολογία FHSS και DSSS στην περιοχή ISM (Industrial, Scientific, Medical)

2)Υπέρυθρες ακτίνες (850nm έως 950nm)

Όπως αναφέραμε και παραπάνω το πρότυπο υποστηρίζει δύο ρυθμούς μετάδοσης, 1 και 2 Mbps. Αυτό οδηγεί στο μειονέκτημα ότι δύο χρήστες που θέλουν να επικοινωνήσουν πρέπει να καθορίσουν επιπρόσθετα τον τύπο και το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στο WLAN, για να επιτραπεί διαλειτουργικότητα.

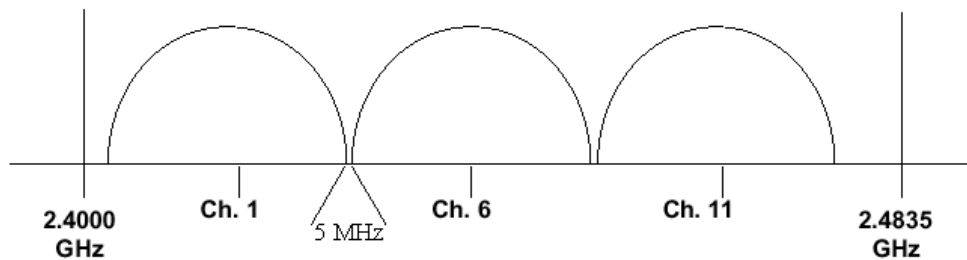
❖ Στα συστήματα DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) το σήμα απλώνεται σε μία συγκεκριμένη ζώνη συχνοτήτων. Μία ψευδοτυχαία ακολουθία bits συνδυάζεται με τα bits πληροφορίας, μέσω μιας πύλης XOR, για να σχηματιστεί το σήμα μετάδοσης, το οποίο στη συνέχεια διαμορφώνεται είτε χρησιμοποιώντας το σχήμα BPSK (ή DBPSK), για μετάδοση 1 Mbps, είτε χρησιμοποιώντας το σχήμα QPSK (ή DQPSK), εάν έχουμε μετάδοση 2 Mbps. Τα παραπάνω φαίνονται στο σχήμα 5.10:



Σχήμα 5.10 Διαδικασία σχηματισμού σήματος μετάδοσης.

Ο δέκτης χρησιμοποιώντας ένα *συσχετιστή* (correlator) αφαιρεί το PRN και ανασύρει τα bits πληροφορίας. Η ψευδοτυχαία ακολουθία ονομάζεται spreading code. Σημειώνουμε ότι σύμφωνα με το πρότυπο 802.11, σε αντίθεση με τα συστήματα CDMA πολλαπλών

κωδικών, χρησιμοποιείται μόνο ένα προκαθορισμένο spreading code. Κάθε bit της ψευδοτυχαίας ακολουθίας ονομάζεται chip. Ο αριθμός των chips που αναπαριστά ένα bit πληροφορίας ονομάζεται spreading ratio. Όσο πιο μεγάλο είναι το spreading ratio τόσο το σήμα είναι πιο ανθεκτικό στην παρεμβολή. Όσο πιο μικρό είναι το spreading ratio τόσο περισσότερο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο στο χρήστη. Το FCC ορίζει ότι το spreading ratio πρέπει να είναι μεγαλύτερο του 10, ενώ το IEEE 802.11 απαιτεί spreading ratio 11 για ρυθμούς 1 και 2 Mbps, με μέγιστη τιμή το 100. Το διατιθέμενο εύρος ζώνης διαιρείται σε 14 επικαλυπτόμενους διαύλους (στις ΗΠΑ 11) με εύρος ζώνης ο καθένας 22 MHz. Ωστόσο επειδή απαιτείται, για να μην έχουμε παρεμβολή, τα κανάλια να απέχουν μεταξύ τους απόσταση 25 MHz, στον ίδιο χώρο μπορούν να συνυπάρχουν 3 κανάλια σε μια μορφή, όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11

❖ Στα συστήματα FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) το διαθέσιμο εύρος ζώνης χωρίζεται σε 75 τουλάχιστον υποκανάλια (1MHz). Η συχνότητα με την οποία μεταδίδονται τα δεδομένα λαμβάνει διάφορες τιμές, σύμφωνα με μία συγκεκριμένη frequency sequence. Το πρότυπο 802.11 ορίζει 79 συχνότητες για Αμερική-Ευρώπη και 23 συχνότητες για Ιαπωνία. Το σήμα μεταπηδά από κανάλι σε κανάλι μεταδίδοντας μικρές ριπές δεδομένων σε κάθε κανάλι, για ένα συγκεκριμένο χρόνο, ο οποίος καλείται dwell time. Η hopping sequence πρέπει να είναι προφανώς γνωστή στον πομπό και τον δέκτη. Το FCC ορίζει ότι το dwell time δεν πρέπει να ξεπερνά τα 400msec. Το 802.11 ορίζει τρεις διαφορετικές ομάδες σχεδίων μεταπήδησης, κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από 26 μονοπάτια άρα 26 λογικούς διαύλους. Οι διαδοχικές συχνότητες σε κάθε μονοπάτι απέχουν τουλάχιστον 6 MHz, ώστε να αποφεύγεται η παρεμβολή στενής ζώνης.

Σημειώνουμε ότι και στις δύο τεχνολογίες ορίζεται ως μέγιστη στάθμη ισχύος τα 100mW (20dBm) στην Ευρώπη (ETSI) και το 1W (30dBm) στις ΗΠΑ. Από την άλλη πλευρά, το 802.11 ορίζει ως ελάχιστη μεταδιδόμενη ισχύ το 1mW.

❖ Για τις υπέρυθρες ακτίνες το 802.11 καθορίζει μήκη κύματος στην περιοχή 850 έως 950 nm. Για ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps χρησιμοποιείται διαμόρφωση 16-PPM, όπου τα 4 bits δεδομένων αντιστοιχούνται σε 16 κωδικοποιημένα bits προς μετάδοση. Για ρυθμό

μετάδοσης 2 Mbps χρησιμοποιείται διαμόρφωση 4-PPM, όπου 2 bits δεδομένων αντιστοιχούνται σε 4 κωδικοποιημένα bits προς μετάδοση.

Στρώμα ζεύξης δεδομένων

Το στρώμα ζεύξης δεδομένων στο 802.11 αποτελείται από δύο υποστρώματα: το *Logical Link Control* (LLC) και το *Media Access Control* (MAC). Το 802.11 χρησιμοποιεί το ίδιο 802.2 LLC και την ίδια 48-bit διεθυνσιοδότηση όπως τα άλλα 802 LANs, ωστόσο το MAC είναι μοναδικό στα WLANs. Το υπόστρωμα MAC είναι υπεύθυνο για:

- τις διαδικασίες εκχώρησης διαύλων
- τη διεθυνσιοδότηση των PDUs (Protocol Data Units)
- το σχηματισμό των πλαισίων
- τον έλεγχο λαθών
- τον τεμαχισμό και την επανασύνδεση των πακέτων
- Το πρότυπο IEEE 802.11 υποστηρίζει τρεις διαφορετικούς τύπους πλαισίων:
- διαχείρισης => χρησιμοποιούνται για τη συσχέτιση και την αποσυσχέτιση των σταθμών με το AP, για χρονισμό, συγχρονισμό και έλεγχο αυθεντικότητας
- ελέγχου => χρησιμοποιούνται για επαληθεύσεις κατά την διάρκεια της CP και τη λήξη της CFP
- δεδομένων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Π 1. Βιολογική επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Η πρόοδος στην ανάπτυξη πηγών που εκπέμπουν *ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία* (ΗΜ) κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, επέβαλε την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας (ιατρική, βιομηχανία, έρευνα κ.ά.). Η ραγδαία αύξηση τέτοιων πηγών προκάλεσε έντονο ενδιαφέρον για την πιθανή επίδραση της ΗΜ ακτινοβολίας στον άνθρωπο. Όταν τα ΗΜ κύματα συναντούν εμπόδιο τότε μπορούμε να έχουμε ανάκλαση, διάθλαση, διάδοση μέσω του αντικειμένου ή απορρόφηση απ’ αυτό. Ποια από αυτές τις διαδικασίες θα κυριαρχήσει και σε τι ποσοστό εξαρτάται από τη συχνότητα του ΗΜ κύματος, τη γωνία πρόσπτωσης, από το πόσο καλός αγωγός του ηλεκτρισμού είναι το αντικείμενο και τέλος από το σχήμα του αντικειμένου. Το σώμα του ανθρώπου έχει μέτρια αγωγιμότητα και μπορούν να συμβούν όλα τα παραπάνω.

Τα αποτελέσματα από την επίδραση της ενέργειας που μεταφέρεται από τα ραδιοκύματα μπορούν να είναι άνευ σημασίας, επιβλαβή σε διαφορετικό βαθμό ή ακόμα και ευεργετικά. Οι *συνθήκες έκθεσης* (συχνότητα, πυκνότητα ισχύος, είδος κυματομορφής, διάρκεια έκθεσης κ.λ.π) καθώς και ορισμένοι βιολογικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες καθορίζουν κατά πόσο θα προκύψουν επιβλαβή βιολογικά αποτελέσματα για την υγεία μας.

Η δράση των ΗΜ κυμάτων με το ανθρώπινο σώμα ή με βιολογικά συστήματα πραγματοποιείται δια μέσου φυσικών μηχανισμών που προκαλούν, ανάλογα με τη συχνότητα, διέγερση κυττάρων του νευρικού και μυϊκού ιστού ή προκαλούν θέρμανση του σώματος ή επιμέρους οργάνων. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν σχέση με την επαγωγή ηλεκτρικών ρευμάτων στο σώμα του ανθρώπινου οργανισμού που βρίσκεται εκτεθειμένο σε ΗΜ ακτινοβολία αλλά και με την απορρόφηση ενέργειας γενικότερα.

Η ένταση του ΗΜ πεδίου και χρόνος έκθεσης είναι τα δύο βασικά μεγέθη από τα οποία εξαρτάται το βιολογικό αποτέλεσμα. Το μέγεθος που εκφράζει την ένταση του ΗΜ πεδίου σ’ ένα σημείο ή περιοχή καλείται *πυκνότητα ισχύος* και μετριέται σε mW/cm^2 . Μας πληροφορεί έμμεσα μόνο για την ποσότητα ενέργειας που θα απορροφήσει το σώμα στη συγκεκριμένη θέση και μάλιστα όχι απαραίτητα κατ’ ομοιόμορφο τρόπο. Μια μέση τιμή της ενέργειας που απορροφάται απ’ όλο το σώμα εκφράζεται από το δοσιμετρικό όρο *ρυθμός της ειδικής απορρόφησης ισχύος* (“*Specific Absorption Rate*”) (SAR) και σημαίνει την ισχύ που απορροφάται ανά μονάδα βάρους του σώματος (W/Kg). Ο SAR εξαρτάται εκτός από τη συχνότητα ακτινοβολίας και την αγωγιμότητα των ιστών, και από την ένταση του πεδίου, το προσανατολισμό του ατόμου σε σχέση με την κατεύθυνση του κύματος, το μέγεθος του σώματος κ.α.

Η παρουσία νερού και ιόντων είναι το βασικό αίτιο στο οποίο οφείλεται η απορρόφηση ενέργειας από τους ιστούς. Το μόριο του νερού αποτελεί ένα ηλεκτρικό δίπολο με θετικό φορτίο μεταξύ των δύο ατόμων υδρογόνου και με αρνητικό στην άλλη άκρη του που

βρίσκεται το άτομο οξυγόνου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ανθρώπινο σώμα αποτελείται κατά 70% περίπου από νερό.

Όταν το σώμα βρεθεί μέσα σε ΗΜ πεδίο παρατηρούμε να περιστρέφονται ή να πάλλονται τα μόρια του νερού στο ρυθμό της συχνότητας του κύματος. Τα ποσά θερμότητας που παράγονται είναι ανάλογα της διάρκειας του φαινομένου και των παλμών.

Η θερμοκρασία του σώματος κυμαίνεται μεταξύ 36 και 37 βαθμών Κελσίου εξαιτίας των θερμορυθμιστικών μηχανισμών του οργανισμού. Όταν τα ποσά θερμότητας, παραγόμενα κατά την παραπάνω περιγραφή, είναι περιορισμένα επεμβαίνουν οι μηχανισμοί για να παραμείνει η θερμοκρασία μεταξύ 36 και 37 βαθμών Κελσίου. Αν έχουμε υπέρβαση κάποιας τιμής τότε οι μηχανισμοί δεν μπορούν να ανταποκριθούν πλήρως στα καθήκοντά τους. Παρατηρούμε τότε αύξηση της θερμοκρασίας σε ιστούς ή σε όργανα του σώματος.

Οι θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί δρουν αποτελεσματικότερα κάτω από ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες (όχι υψηλή θερμοκρασία και υγρασία, ελαφρά ενδυμασία κλπ). Υπό αυτές τις συνθήκες ένα υγιές άτομο που εκτίθεται σε ΗΜ ακτινοβολία είναι σε θέση να αντιμετωπίσει απορροφούμενη ισχύ μέχρι 4 W/Kg (κατά μέσο όρο σε όλο το σώμα) χωρίς να παρατηρηθεί αύξηση θερμοκρασίας πάνω από ένα βαθμό. Η τιμή SAR=4W/Kg επομένως θεωρείται ως βάση για να προσδιορίσουμε τα επιτρεπτά όρια έκθεσης. Η παραπάνω μπορεί να προκύψει υπό τις κατάλληλες συνθήκες από πεδίο πυκνότητας ισχύος περίπου 10mW/cm². Επειδή η απορρόφηση της ΗΜ ακτινοβολίας δεν γίνεται ομοιόμορφα είναι ευνόητο ότι σε ορισμένες περιοχές του σώματος οι τιμές SAR θα είναι μεγαλύτερες (hot spots). Για τη συχνότητα που λειτουργεί η κινητή τηλεφωνία ο ρυθμός της ειδικής απορρόφησης ισχύος συνδέεται άμεσα με μια κατηγορία αποτελεσμάτων που χαρακτηρίζονται ως θερμικά.

Π 2. Θερμικά αποτελέσματα

Όταν ο ρυθμός απορρόφησης της θερμικής ενέργειας συμβαίνει να ξεπερνάει το ρυθμό αποβολής της, τότε βεβαίως η θερμοκρασία του σώματος ανεβαίνει. Στην περίπτωση εκπομπής του σταθμού βάσεως, όλο το ανθρώπινο σώμα βρίσκεται εκτεθειμένο, αλλά βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το σταθμό βάσης. Προκειμένου για τον κινητό σταθμό, που εκπέμπει πιο κοντά στο ανθρώπινο σώμα, τα όργανα που κυρίως ενδιαφέρουν είναι φυσικά το μάτι και μερικά άλλα τμήματα του εγκεφάλου που θεωρούνται ευαίσθητα σε θερμοκρασιακές μεταβολές όπως είναι για παράδειγμα ο υποθάλαμος και η υπόφυση.

Εάν η θερμοκρασία των φακών των ματιών από 37 βαθμούς Κελσίου ανέλθει στους 42 βαθμούς Κελσίου, μπορεί να προκύψει μη αναστρέψιμη μετουσίωση της πρωτεΐνης των φακών με συνέπεια τη δημιουργία καταρράκτη. Αυτό βέβαια για να συμβεί πρέπει η *προσπίπτουσα πυκνότητα ισχύος* δηλ. η ένταση του ΗΜ πεδίου να είναι αρκετά υψηλή. Έρευνες που έχουν γίνει σε πειραματόζωα έχουν καταλήξει στο σαφές συμπέρασμα ότι για να προκληθεί καταρράκτης από ΗΜ πεδία πρέπει να έχουμε ένα πεδίο με πυκνότητα ισχύος τουλάχιστον 120mW/cm² και έκθεση μεγαλύτερη των 20min. Προς το παρόν δεν υπάρχουν

επιδημιολογικές μελέτες που να υποστηρίζουν την άποψη ότι χρόνιες εκθέσεις σε χαμηλής εντάσεως ΗΜ πεδία, μπορούν να προκαλέσουν καταρράκτη στον άνθρωπο. Στην περίπτωση των οφθαλμών, η απαγωγή της παραγόμενης θερμότητας μέσω των θερμορρυθμιστικών μηχανισμών είναι πολύ μικρή.

Οι απόλυτα ασφαλείς οριακές τιμές σε ένα σημείο του χώρου, σύμφωνα με το Σουηδικό Ινστιτούτο βιομηχανικής ασφάλειας Arbetskyddsstyrelsen, για μεν το ηλεκτρικό πεδίο E είναι περίπου τα 60V/m, για δε το μαγνητικό πεδίο B είναι 0.16A/m. Είναι γεγονός πάντως, ότι μια *παρατεταμένη τοπική θέρμανση* είναι δυνατό να προκαλέσει δυσμενή βιολογικά αποτελέσματα σε ευαίσθητα ανθρώπινα όργανα. Τόσο υψηλές και συνεχείς θερμάνσεις δεν παράγονται όμως από τον τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό που εξετάζουμε, αλλά αφορούν πολύ πιο μεγάλης τάξεως μεγέθη. Άνθρωποι που εργάζονται για χρόνια δίπλα σε φούρνους, και άλλες πηγές έντονης θερμικής εκπομπής, δέχονται ασυγκρίτως μεγαλύτερα ποσά ενέργειας υπό μορφή *ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας* (ΗΜΓ).

Στο σημείο αυτό θα αναφερθούμε στη διαδικασία αύξησης της θερμοκρασίας σ' ένα σημείο του σώματος από την εκπομπή κινητού τηλεφώνου που βρίσκεται κοντά στο ανθρώπινο σώμα. Υπενθυμίζεται ότι τι ανθρώπινο σώμα αποτελείται κατά 70% από νερό, του οποίου τα μόρια είναι μικρά δίπολα, όπως δίπολα είναι και η κεραία ενός κινητού σταθμού η σταθμού βάσεως. Το υδάτινο μόριο αποτελείται ως γνωστό, από ένα άτομο οξυγόνου και δύο άτομα υδρογόνου. Το ένα εξ αυτών συγκεντρώνει το θετικό φορτίο του ατόμου και το άλλο σχηματίζει με το οξυγόνο μια ρίζα που ονομάζεται υδροξύλιο (OH) και μεταφέρει το αρνητικό φορτίο. Υπό την επίδραση του ΗΜ πεδίου της κεραίας, τα μόρια αρχίζουν να ταλαντώνονται με αυξημένη ταχύτητα. Η αύξηση της μοριακής ταχύτητας, όπως είναι γνωστό στη φυσική, ισοδυναμεί με θέρμανση του μορίου η οποία μεγαλώνει καθώς περνάει ο χρόνος. Για το λόγο αυτό, ο χρόνος που διαρκεί η έκθεση αποτελεί ένα κρίσιμο παράγοντα.

Το κλάσμα του μήκους κύματος λ στο οποίο αντιστοιχεί το μήκος της κεραίας, είναι επίσης μία από τις παραμέτρους που ασκούν επίδραση, λιγότερο ή περισσότερο, στην απορρόφηση. Μια κεραία μήκους $\lambda/4$, παρουσιάζει έντονη απορρόφηση στις 40⁰ περίπου που η διαδρομή μέσα στο κρανίο γίνεται μέγιστη. Εν τούτης, η απορρόφηση αυτή σαν γεγονός δεν θα μπορούσε να αξιολογηθεί μεμονωμένα και μόνο απ' το αποτέλεσμα θα μπορούσε να ενοχοποιηθεί. Αντίθετα για τη κεραία $\lambda/2$, η απορρόφηση είναι σχεδόν αμελητέα. Σχετικές μετρήσεις έγιναν το 1987 στο εργαστήριο Carant Antenn AB και επιβεβαιώθηκαν στη συνέχεια από το Δανικό Πανεπιστήμιο του Aalborg.

Μία εκτεταμένη έρευνα επί των συνεπειών στην υγεία, των ΗΜ πεδίων έχει γίνει και αφορά στο προσωπικό της Αμερικάνικης Πρεσβείας στη Μόσχα, που υπηρέτησε εκεί από το 1943 έως το 1976. Ο λόγος για τον οποίο έγινε η έρευνα αυτή, ήταν διότι το 1953 διαπιστώθηκε η ύπαρξη ΗΜ πεδίων στους χώρους της πρεσβείας. Η υψηλότερη ένταση πεδίου που μετρήθηκε τα επόμενα χρόνια ήταν 0.018mW/cm² και η συχνότητα κυμαινόταν

από 600MHz έως 9.5 GHz. Κατά την έρευνα αυτή εξετάστηκε η κατάσταση της υγείας και οι περιπτώσεις θανάτων που αφορούσαν περίπου 5000 άτομα και έγινε σύγκριση με προσωπικό που υπηρετούσε σε πρεσβείες άλλων χωρών. Από την έρευνα αυτή δεν προέκυψε κάποια πειστική μαρτυρία ότι η κατά τον ανωτέρω τρόπο ακτινοβολήσει των ατόμων αυτών είχε κάποια δυσμενή συνέπεια στην υγεία τους.

Όσον αφορά το βασικό αποτέλεσμα του μεταβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου B στην περιοχή των 900 MHz , είναι να σχηματίζει πολύ μικρά δακτυλιοειδή ρεύματα στο εσωτερικό του σώματος, υποδερμικά και όχι σε μεγάλο βάθος. Μαγνητικά ρεύματα δεν παράγει όμως μόνο ο τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός αλλά και άλλες πηγές, πρωτίστως όμως ο ίδιος ο οργανισμός μας. Τα ρεύματα του οργανισμού χρησιμεύουν μεταξύ άλλων, στον έλεγχο της δραστηριότητας διαφόρων οργάνων όπως του μυϊκού συστήματος και της καρδιάς.

Οι πυκνότητες των υποδερμικών ρευμάτων που οφείλονται στους σταθμούς βάσης ή σε κινητούς σταθμούς είναι της τάξεως του $1\mu\text{A}/\text{m}^2$ μόνο, μέγεθος που είναι χιλιάδες φορές πιο μικρό από τα ρεύματα του οργανισμού, οι τιμές των οποίων κυμαίνονται μεταξύ 0.1 και $1\text{A}/\text{m}^2$. Είναι σαφές ότι λόγω του ιδιαίτερα χαμηλού μεγέθους τους είναι πολύ δύσκολο να καταλογιστούν βλαπτικές βιολογικές συνέπειες στο μαγνητικό πεδίο που οφείλεται σε τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό. Αφήνουμε για λίγο την περιοχή των 900 MHz που είναι το άμεσο ενδιαφέρον μας, για να αναφέρουμε ότι στην περιοχή από 1Hz μέχρι 300Hz, οι *εξακριβωμένες βιολογικές συνέπειες* από το επαγόμενο ρεύμα είναι οι εξής, σε μονάδες πυκνότητας ρεύματος:

- από $1\text{mA}/\text{m}^2$ έως $10\text{mA}/\text{m}^2$ τα αποτελέσματα δεν αξιολογούνται καθόλου
- από $10\text{mA}/\text{m}^2$ έως $100\text{mA}/\text{m}^2$ αλληλεπίδραση εξωτερικού πεδίου με τους νευρικούς μύες
- από $100\text{mA}/\text{m}^2$ έως $1\text{A}/\text{m}^2$ παρατηρείται έντονη νευρική
- από $1\text{A}/\text{m}^2$ και άνω, παρατηρείται καρδιακή κολπική υπερσυστολή και προξενούνται σίγουρα βλάβες στην υγεία.

Για συχνότητες άνω των 400Hz, η πυκνότητα ρεύματος που θα επέφερε βιολογικές συνέπειες αυξάνεται γραμμικά και ανάλογα με τη συχνότητα. Προκειμένου να οριστούν όρια ασφαλείας, στις παραπάνω τιμές εφαρμόζονται συντελεστές ασφαλείας, 100 για επαγγελματικό περιβάλλον και 250 για χώρους μη ελεγχόμενους. Εντός ελεγχόμενου περιβάλλοντος, η πυκνότητα ρεύματος συναρτήσει της συχνότητας για συνεχή έκθεση, ακολουθεί το νόμο $N/100\text{ A}/\text{m}^2$, όπου N είναι η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε KHz .Σε μη ελεγχόμενους χώρους ο αντίστοιχος νόμος είναι $N/250\text{ A}/\text{m}^2$. Οι δύο αυτές σχέσεις αποδίδουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα στη περιοχή συχνοτήτων από 10KHz μέχρι 100MHz περίπου. Σε ότι αφορά τα ανώτατα όρια ασφαλείας για τη μαγνητική επαγωγή

Β που τίθενται από τον παγκόσμιο οργανισμό υγείας, αυτά προσεγγίζουν τα 1000μTesla. Συνήθεις τιμές στο καθημερινό οικιακό περιβάλλον είναι της τάξεως του 0.1μTesla. Σύμφωνα με το παραπάνω όριο που θέτει ο παγκόσμιος οργανισμός υγείας, ακόμη και η επίδραση από το μαγνητικό πεδίο μιας γραμμής μεταφοράς ηλεκτρικής υπερυψηλής τάσεως 400 KVolt θα μπορούσε να θεωρηθεί αμελητέα, δεδομένου ότι δεν ξεπερνάει τα 100μTesla.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Π1. Το σύστημα GSM

Το σύστημα GSM (Group Special Mobile ή Global System for Mobile communications) αποτελεί την έκβαση της κοινής προσπάθειας πολλών οργανισμών για την υιοθέτηση ενός κοινού προτύπου για κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών. Η ιδέα της κυψελωτής κάλυψης εισήχθη από τα Bell Labs στις Ηνωμένες Πολιτείες στα μέσα της δεκαετίας του '70, με την πρόταση και λειτουργία του προτύπου AMPS (Advanced Mobile Phone Service). Στην Ευρώπη τη δεκαετία του '80 εξαπλώθηκαν αντίστοιχα αναλογικά συστήματα, με παραδείγματα το NMT (Nordic Mobile Telephony) και το TACS (Total Access Communications System). Βασικός στόχος όλων των συστημάτων πρώτης γενιάς ήταν η παροχή υπηρεσιών φωνητικής τηλεφωνίας σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη κάλυψη. Όλα τα συστήματα μετέδιδαν τη φωνή αναλογικά, χρησιμοποιώντας πολλαπλή προσπέλαση με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access – FDMA).

Τα συστήματα αυτά υπόκειντο σε ποικίλους περιορισμούς:

- η ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας εμφάνιζε μεγάλες διακυμάνσεις,
- η ασφάλεια των συνδιαλέξεων ήταν περιορισμένη,
- η χωρητικότητά τους περιοριζόνταν σε μερικούς εκατοντάδες χιλιάδες συνδρομητές, πολύ μικρότερη της ζήτησης και των επιχειρηματικών σχεδίων των πάροχων,
- τα συστήματα ήταν ασύμβατα, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η δυνατότητα περιαγωγής των χρηστών.

Οι άνωθι περιορισμοί οδήγησαν το 1982 στη δημιουργία μιας ομάδας εργασίας στο CEPT (Conference on European Posts and Telegraphs), με στόχο την προτυποποίηση ενός κοινού στάνταρντ για τις ψηφιακές επικοινωνίες κινητών στην Ευρώπη. Το πρώτο βήμα είχε γίνει μερικά χρόνια νωρίτερα, όταν είχε αποφασιστεί η δέσμευση ενός συγκεκριμένου εύρους ζώνης συχνοτήτων, γύρω από την περιοχή των 900MHz, για κινητές επικοινωνίες στην Ευρώπη. Το 1990, μετά από παράκληση της Μ.Βρετανίας, καθορίστηκε μία παραλλαγή του συστήματος GSM-900, γνωστού και ως DCS-1800 (Digital Cellular System 1800) ή GSM-1800, προσθέτοντας μία ακόμη ζώνη συχνοτήτων στην περιοχή των 1800MHz.

Οι βασικοί στόχοι του GSM συνίστανται:

- στην παροχή δυνατότητας περιαγωγής (roaming) οπουδήποτε στην Ευρώπη,
- στην εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας τουλάχιστον εφάμιλλη αυτής των συστημάτων πρώτης γενιάς,
- στη μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του φάσματος, με δυνατότητες κλιμάκωσης του συστήματος,

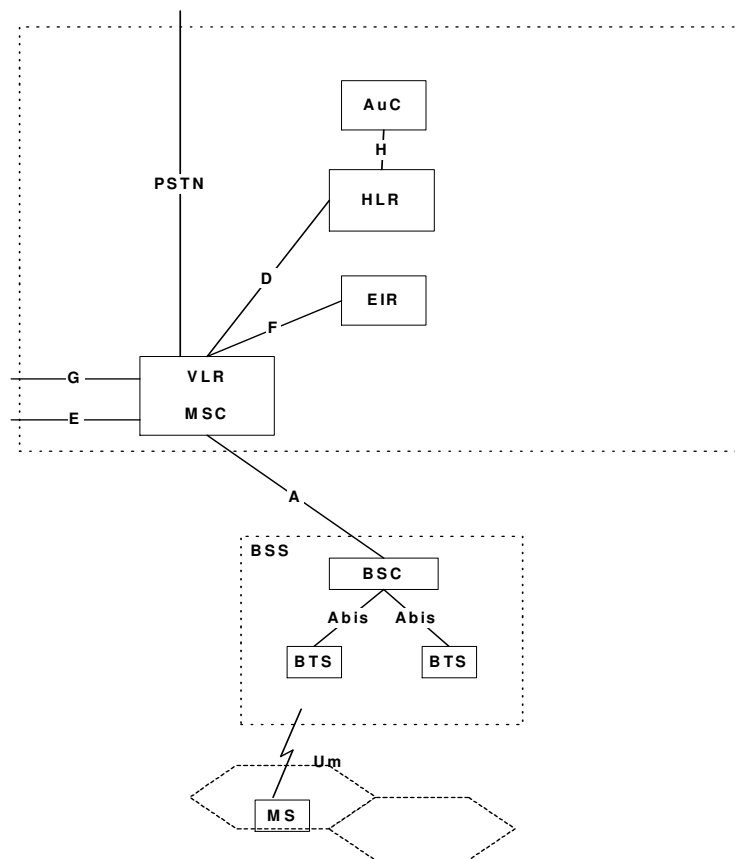
- στην κρυπτογράφηση της μεταδιδόμενης πληροφορίας του χρήστη,
- στην ευελιξία κλιμάκωσης των ρυθμών μετάδοσης, άρα και των παρεχόμενων υπηρεσιών,
- στη δυνατότητα εφαρμογής ευέλικτων συστημάτων χρέωσης.

Σήμερα, το GSM είναι ένα συνεχώς εξελισσόμενο πρότυπο μέσα στο Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τυποποίησης Τηλεπικοινωνιών (ETSI – European Telecommunications Standards Institute), επιδεικνύοντας μια διαρκή πορεία εξέλιξης προς υπηρεσίες πολυμέσων 3^{ης} γενιάς. Από τον Ιούνιο του 2000, οι εργασίες εξέλιξης της τεχνολογίας στη ραδιο-επαφή έχουν μεταφερθεί στο 3GPP (3rd Generation Partnership Project).

Το σύστημα GSM αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα:

- τον κινητό σταθμό (Mobile Station – MS),
- το υποσύστημα διαχείρισης και λειτουργίας (OSS – Operation Subsystem),
- το υποσύστημα σταθμού βάσης (BSS – Base Station Subsystem),
- το υποσύστημα μεταγωγής δικτύου (NSS – Network Switching Subsystem)

Στο Σχήμα Π. 0. απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική ενός GSM δικτύου.



Σχήμα Π. 0. Βασικές οντότητες της αρχιτεκτονικής GSM.

Ο κινητός σταθμός αποτελείται από:

- το κινητό τερματικό (Mobile Termination – MT), που αναλαμβάνει τις λειτουργίες της ραδιο-επαφής,
- την τερματική συσκευή (Terminal Equipment – TE), η οποία περιλαμβάνει ειδικές διαδικασίες για την υπηρεσία της τηλεφωνίας,
- τον τερματικό προσαρμογέα (Terminal Adapter – TA), ο οποίος διασυνδέει το κινητό τερματικό με την τερματική συσκευή,
- την κάρτα SIM (Subscriber Identity Module), μία έξυπνη κάρτα στην οποία καταχωρείται, μεταξύ άλλων, ο προσωπικός αριθμός αναγνώρισης του συνδρομητή (International Mobile Subscriber Identity - IMSI).

Το υποσύστημα σταθμού βάσης (BSS) αποτελείται από:

- τον πομποδέκτη σταθμού βάσης (Base Transceiver Station – BTS), ο οποίος περιλαμβάνει το μηχανολογικό εξοπλισμό και την κεραία για εκπομπή και λήψη του σήματος,
- τον ελεγκτή σταθμού βάσης (Base Station Controller– BSC), υπεύθυνο για την εκχώρηση και απελευθέρωση καναλιών και για λειτουργίες μεταπομπής (handover).

Το υποσύστημα δικτύου μεταγωγής (NSS) αποτελείται από:

- το κέντρο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (Mobile Switching Centre – MSC), επιφορτισμένο με τις διαδικασίες εγκαθίδρυσης και μεταγωγής κλήσης,
- τον καταχωρητή οικείας θέσης (Home Location Register – HLR), μία βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει το προφίλ του χρήστη και κάποιες πληροφορίες για την τρέχουσα θέση,
- τον καταχωρητή θέσης επισκέπτη (Visitor Location Register – VLR), μία βάση δεδομένων η οποία συγκρατεί προσωρινά διάφορα δεδομένα του συνδρομητή ο οποίος βρίσκεται έξω από την περιοχή της HLR καθώς και την ακριβή του θέση σε επίπεδο BTS,
- το κέντρο πιστοποίησης (Authentication Centre – AuC), ο ρόλος του οποίου έγκειται στη διαχείριση δεδομένων για την πιστοποίηση της ταυτότητας του χρήστη,
- το διαβιβαστικό κέντρο μεταγωγής κινητής τηλεφωνίας (Gateway Mobile Switching Centre – GMSC), το οποίο αναλαμβάνει τη δρομολόγηση εισερχομένων κλήσεων προς το κατάλληλο MSC.

Τέλος, το υποσύστημα διαχείρισης (OSS) δεν είναι πλήρως τυποποιημένο, επιτρέποντας στους κατασκευαστές και τους πάροχους να υιοθετήσουν διάφορες στρατηγικές διαχείρισης, υλοποιώντας το κατάλληλο Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο Διαχείρισης (Telecommunications Management Network – TMN). Η διαχείριση της συνδρομής γίνεται από την HLR και το

AuC, η δε διαχείριση του κινητού τερματικού πραγματοποιείται από τον καταχωρητή ταυτότητας συσκευής (Equipment Identity Register - EIR), μία βάση δεδομένων υπεύθυνη για την αποθήκευση δεδομένων που αφορούν τον κινητό σταθμό.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Π1. General Packet Radio Service (GPRS)

Η υπηρεσία GPRS αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια ως μια προσπάθεια ενίσχυσης του συστήματος κινητής τηλεφωνίας GSM, ώστε το τελευταίο να μπορεί να χειριστεί αποδοτικά κίνηση δεδομένων (data traffic) ανάμεσα σε υπολογιστικά συστήματα. Ως εκ τούτου η τεχνολογία GPRS δεν είναι αυτόνομη αλλά επικουρική στην υπάρχουσα υποδομή του GSM. Πιο αναλυτικά :

- Προσφέρει παγκόσμια κάλυψη, όπως ακριβώς και το GSM.
- Η πρόσβαση στις GPRS υπηρεσίες είναι τυποποιημένη, μέσω του GSM προτύπου.
- Είναι ένα δίκτυο μεταγωγής πακέτου (packet-switched).
- Υλοποιεί μια σαφή διάκριση μεταξύ του δικτυακού συστήματος (NSS- Network Switching System) και του συστήματος ράδιο-επαφής (BSS – Base Station System) με δυνατότητα χρήσης διαφορετικών τεχνολογιών σε καθένα από αυτά.
- Υποστηρίζει ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από λίγα bps έως 171.2 kbps.
- Προσφέρει χρέωση βάσει του ανταλλασσόμενου όγκου της πληροφορίας, επιτρέποντας έτσι σε ένα χρήστη να είναι ενεργός (active) για μεγάλες χρονικές περιόδους χωρίς να απαιτείται η αποσύνδεση του από το δίκτυο κάθε φορά που δεν έχει κάτι να μεταδώσει.
- Παρέχει βέλτιστη χρήση των πόρων της ράδιο-επαφής με παραχώρηση χρονοθυρίδων σε κάθε χρήστη μόνο εφόσον έχει κάτι να μεταδώσει.
- Υποστηρίζει τόσο Point-to-Point (PTP) επικοινωνία με ή χωρίς σύνδεση (connection oriented ή connectionless) όσο και Point-to-Multipoint (PTM). Συγκεκριμένα υποστηρίζει PTM-Multicast (PTM-M) και PTM-Groupcast (PTM-G) επικοινωνία. Στη πρώτη φάση της υλοποίησης θα υποστηριχθούν μόνο PTP υπηρεσίες, ενώ οι PTM υπηρεσίες θα υλοποιηθούν σε επόμενο στάδιο.
- Υποστηρίζει διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα δεδομένων (Packet Data Networks- PDNs) ανεξαρτήτως της τεχνολογίας τους : IP δίκτυα (π.χ. Internet), δίκτυα X.25, άλλα και δημόσια δίκτυα κινητών υπηρεσιών (Public Land Mobile Networks – PLMNs)

Οι εφαρμογές του GPRS περιλαμβάνουν από απλό «σερφάρισμα» στο Internet, μέχρι μετάδοση φωνής και video. Ο Πίνακας Π.1. παρουσιάζει τα πιθανά πεδία εφαρμογής του GPRS.

Εφαρμογή	Παράδειγμα εφαρμογής
WWW	Ανάκτηση σελίδων
FTP	Μεταφορά αρχείων
E-mail	Αποστολή μηνυμάτων
Telnet	Πρόσβαση σε απομακρυσμένα τερματικά
Video	Τηλεσυνδιάσκεψη
Εφαρμογές RTTI (Real Time Traffic Information)	Διοίκηση στόλου, Καθοδήγηση πορείας
Εφαρμογές τηλεματικής	Μεταφορά χρημάτων

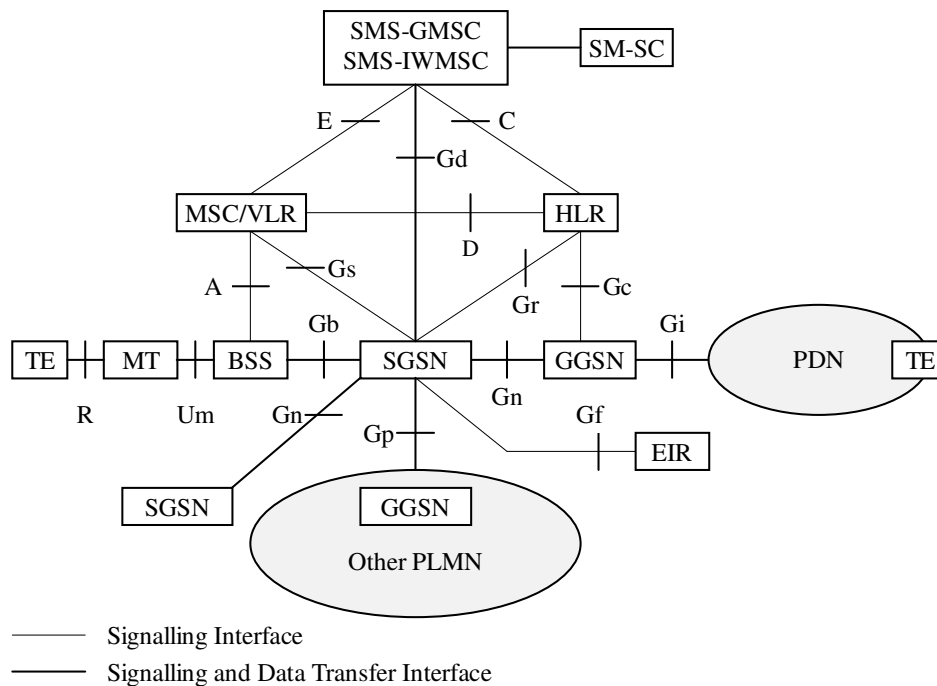
Πίνακας Π.1. Πιθανές εφαρμογές του GPRS.

Π2. Η Αρχιτεκτονική του GPRS

Η υλοποίηση της υπηρεσίας GPRS γίνεται με την προσθήκη δύο νέου τύπου κόμβων στην υπάρχουσα GSM υποδομή. Οι κόμβοι αυτοί, γνωστοί ως GSNs (GPRS Support Nodes) είναι υπεύθυνοι για την παροχή GPRS υπηρεσιών στους συνδρομητές του δικτύου και διακρίνονται σε :

- SGSN (Serving GPRS Support Node) ο οποίος είναι υπεύθυνος για την εξυπηρέτηση των κινητών σταθμών (Mobile Stations –MSs) που βρίσκονται στη δικαιοδοσία του. Οι λειτουργίες του SGSN περιλαμβάνουν:
 1. Authentication, ciphering.
 2. Διαχείριση Κινητικότητας (Mobility Management –MM).
 3. Διαχείριση των λογικών συνδέσεων (Logical Link Management) στη διεύθυνση SGSN→MS.
 4. Δρομολόγηση και μετάδοση πακέτων.
 5. Χρέωση συνδρομητών.
 6. Διασύνδεση με τις βάσεις δεδομένων του GPRS (HLR, VLR, EIR).
- GGSN (Gateway GPRS Support Node) ο οποίος αποτελεί και τη πύλη επικοινωνίας με εξωτερικά δίκτυα μεταγωγής πακέτων. Οι βασικές του λειτουργίες περιλαμβάνουν:
 1. Διαχείριση Κινητικότητας (Mobility Management –MM).

2. Διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα δεδομένων. Στο παρών στάδιο υποστηρίζονται τα 2 ευρύτερα διαδεδομένα δίκτυα μεταγωγής πακέτου : IP και X.25.
 3. Διασύνδεση με άλλα PLMNs.
 4. Δρομολόγηση και μετάδοση πακέτων.
- SGSNs και GGSNs συνδέονται μεταξύ τους, είτε απευθείας είτε μέσω ενδιάμεσων κόμβων, συνιστώντας έτσι ένα IP δίκτυο. Το δίκτυο αυτό είναι το δίκτυο κορμού του GPRS (GPRS backbone ή GPRS core).



Σχήμα Π.2. Οντότητες και διεπαφές της αρχιτεκτονικής GPRS.

Εποπτικά κοιτώντας κανείς, θα μπορούσε να πει ότι τα SGSN και GGSN στο GPRS αντιστοιχούν στα MSC και GMSC του GSM. Η λειτουργικότητά τους είναι παρεμφερής τα μεν πρώτα (SGSN και GGSN) για τη μεταγωγή πακέτων τα δε δεύτερα (MSC και GMSC) για την μεταγωγή κυκλώματος.

Στο σχήμα Π.2. απεικονίζεται η λογική αρχιτεκτονική και οι διεπαφές (interfaces) ενός τυπικού GPRS δικτύου. Από το σχήμα αυτό καθίσταται σαφές ότι το GPRS αποτελεί επέκταση του GSM και όχι κάτι ανεξάρτητο. Ως εκ τούτου ολόκληρο το υποσύστημα του σταθμού βάσης (BSS) επαναχρησιμοποιείται στο GPRS με τις απαραίτητες αλλαγές-προσθήκες που απαιτούνται για την υποστήριξη των νέων υπηρεσιών. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με όλες τις βάσεις δεδομένων (HLR, VLR, EIR) που είχαν οριστεί στο GSM οι οποίες απλά ενισχύονται ώστε να κρατάνε πρόσθετες πληροφορίες που αφορούν την GPRS επικοινωνία. Το GPRS έχει ήδη τυποποιηθεί από το ETSI (European Telecommunication Standardization Institute) (<http://www.etsi.org/>).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

UMTS

Π.1. Γενικά

Οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών για προηγμένες υπηρεσίες και μεγαλύτερες ταχύτητες πρόσβασης οδήγησαν τους σημαντικότερους διεθνείς τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς τυποποίησης (ITU – International Telecommunications Union <http://www.itu.int/home/>-και ETSI- European Telecommunications Standards Institute <http://www.etsi.org>) στις αρχές της δεκαετίας του 1990, στην έναρξη του σχεδιασμού των δικτύων τρίτης γενιάς (3G). Η ITU αναφέρεται στα δίκτυα αυτά με την ονομασία IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000), ενώ η ETSI με την ονομασία UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) (<http://www.umts-forum.org/>). Βασικός στόχος των δικτύων αυτών είναι να προσφέρουν στο χρήστη ταχύτητες μέχρι 2Mbps ώστε να του δώσουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει εφαρμογές που μέχρι τώρα, λόγω κυρίως της περιορισμένης ταχύτητας, ήταν αδύνατο να προσφερθούν (π.χ., γρήγορη πρόσβαση στο διαδίκτυο, τηλεδιάσκεψη, κ.α.).

Η τεράστια ανάπτυξη του Internet, και ειδικότερα του πρωτοκόλλου IP (<http://www.IETF.org/>), έχει οδηγήσει τους βασικούς οργανισμούς τυποποίησης τηλεπικοινωνιών (ITU και ETSI), να υιοθετήσουν τη χρήση του ως βασικού μέσου για τη διακίνηση δεδομένων στα κινητά δίκτυα τρίτης γενιάς. Η τάση αυτή αναφέρεται συχνά και σαν IP-based ή All-IP λύση. Με τη χρήση της τεχνολογίας IP στην τηλεφωνία θα μπορεί κανείς να συνδεθεί γρήγορα σε δίκτυα IP, οποιαδήποτε στιγμή το θελήσει. Το IP θεωρείται ότι θα μπορέσει να υποστηρίξει όλους τους τύπους δεδομένων, αλλά και πολλές εφαρμογές πραγματικού χρόνου, συμπεριλαμβανομένης και της φωνής. Η εφαρμογή φωνής πάνω από IP (Voice over IP—VoIP) έχει ποικίλα πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή τηλεφωνία. Για τους διαχειριστές δικτύου σημαίνει μικρότερο κόστος στον εξοπλισμό και στη διαχείριση του δικτύου. Επίσης, το VoIP, σε συνδυασμό με τεχνικές για την καταστολή των διαστημάτων σιωπής, μπορεί να οδηγήσει σε ένα μεγάλο κέρδος στο εύρος ζώνης, σε σχέση με αυτό που καταλαμβάνεται για μία συνδιάλεξη με τις υπάρχουσες συνδέσεις PCM στα 64 Kbps. Αυτό θα οδηγήσει με τη σειρά του σε χαμηλότερο κόστος τηλεπικοινωνιών για τους τελικούς χρήστες. Τέλος, η χρήση συνόδων IP από άκρο-σε-άκρο, με το μεγάλο διαθέσιμο εύρος ζώνης που θα παρέχεται από το UMTS, ανοίγει το δρόμο στους κινούμενους τελικούς χρήστες για ένα εντελώς καινούργιο σύνολο από υπηρεσίες πολυμέσων, όπως η τηλεδιάσκεψη, τα συστήματα ατομικής καθοδήγησης, και τα δικτυακά παιχνίδια. Προβλέπεται έτσι ότι οι κινητές τηλεπικοινωνίες θα εμπλουτιστούν με ενοποιημένες υπηρεσίες πολυμέσων, οι οποίες θα συνδυάζουν όλα ή κάποια από τα παρακάτω πολυμέσα:

- *Ηχο*: ομιλία, μουσική, κλπ.

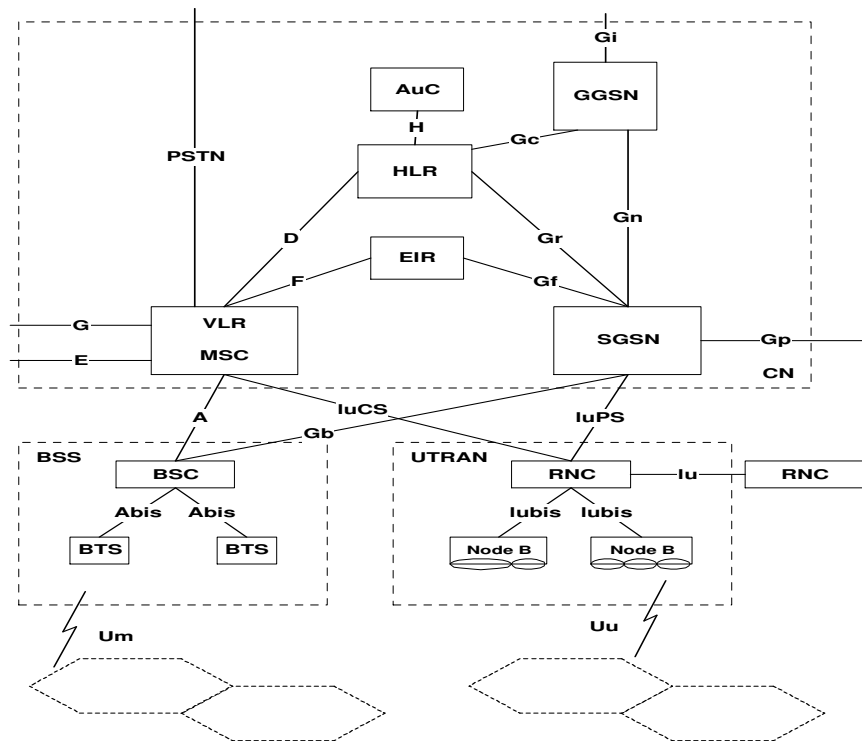
- *Γραφικά*: στατικά ή κινούμενα (animation).
- *Εικόνες*: φωτογραφίες ή video.
- *Κείμενο*
- *Δεδομένα*: αρχεία ηλεκτρονικών υπολογιστών

Αυτές οι υπηρεσίες πιστεύεται ότι θα αποτελέσουν κίνητρα για τη χρήση του συστήματος UMTS. Η χρήση της ίδιας τεχνολογίας (δηλ. των υπηρεσιών IP) σε δίκτυα σταθερών και σε κινητών τηλεπικοινωνιών, διευκολύνει τη συνεργασία καθώς και τη διαδικασία ενοποίησης αυτών των τύπων δικτύου παράλληλα, η διαδικασία ανάπτυξης και δημιουργίας καινούργιων υπηρεσιών παρέχεται με έναν συνεπή και αμετάβλητο τρόπο, ανεξάρτητο από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου δικτύου.

Π2. Η αρχιτεκτονική του UMTS

Σήμερα η κυρίαρχη προτεινόμενη αρχιτεκτονική για το UMTS είναι αυτή που προτείνεται από τη 3GPP (<http://www.3gpp.org>) για IP-based δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Το γενικό σχήμα της αρχιτεκτονικής κατά 3GPP φαίνεται στο Σχήμα . Οι βασικές λειτουργικές οντότητες είναι δανεισμένες από το GPRS, ενώ υπάρχουν και οι απαραίτητες πύλες (gateways) προς άλλα δίκτυα, όπως το κλασσικό δίκτυο Internet, το τηλεφωνικό δίκτυο (PSTN-- Public Switched Telephone Network) και τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς.

Η αρχιτεκτονική αυτή, η οποία είναι η επέκταση της προσέγγισης General Packet Radio Service (GPRS), προσφέρει καλύτερο έλεγχο στην ποιότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας, τόσο από τη μεριά του UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN), όσο και από τη μεριά του δικτύου κορμού. Η εγγραφή και πιστοποίηση του χρήστη γίνεται μέσω του SGSN, χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα σχήματα του GSM, ώστε να επαληθεύσει την ταυτότητα ενός χρήστη ενώ και η HLR είναι αναβαθμισμένη για να υποστηρίξει IP υπηρεσίες. Εν γένει, η λύση της 3GPP μπορεί να χαρακτηριστεί περισσότερο σαν IP-over-GPRS, με την προσθήκη αναβαθμισμένου συστήματος ραδιοεπαφής (του UTRAN) ώστε να προσφέρει μεγαλύτερες ταχύτητες.



Σχήμα Π.1. Η κατά 3GPP αρχιτεκτονική του UMTS.

Σε γενικές γραμμές, οι απαιτήσεις από το βασισμένο στην τεχνολογία IP δίκτυο κορμού του UMTS συνοψίζονται στα εξής:

- Υποστήριξη περιαγωγής και μεταπομπής σε δίκτυα δεύτερης γενιάς (π.χ. GSM, GPRS).
- Υποστήριξη τερματικών τρίτης γενιάς που χρησιμοποιούν μεταγωγή κυκλώματος, σε ένα δίκτυο κορμού UMTS εξολοκλήρου βασισμένο σε IP.
- Υποστήριξη καινούργιων (π.χ. IP και πολυμέσα) αλλά και υπαρχόντων υπηρεσιών, όπως η ομιλία, τα μηνύματα SMS και κάποιες συμπληρωματικές υπηρεσίες ευφών δικτύων.

Η υποστήριξη των υπηρεσιών δεύτερης γενιάς αποτελεί σοβαρή απαίτηση, αφού οι συνδρομητές που έχουν συνηθίσει να χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες του GSM, ίσως να μην είναι διατεθειμένοι να τις εγκαταλείψουν όταν θα κάνουν χρήση του καινούργιου συστήματος UMTS ή όταν θα περιαχθούν σ'ένα τέτοιο σύστημα.

Από τη δεύτερη απαίτηση συνεπάγεται ότι θα συνυπάρχουν τρεις τύποι κινητών τερματικών τρίτης γενιάς: αυτά που θα υποστηρίζουν τη μεταγωγή κυκλώματος, αυτά που θα υποστηρίζουν τη μεταγωγή πακέτου, και αυτά που θα υποστηρίζουν και τα δύο είδη μεταγωγής. Στη ραδιοδιεπαφή θα πρέπει να υποστηρίζεται τόσο η μεταγωγή κυκλώματος όσο και η μεταγωγή πακέτου. Η μεταγωγή κυκλώματος θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τα παραδοσιακά τερματικά μεταγωγής κυκλώματος, κάνοντας βέλτιστη χρήση των ραδιοπόρων για τις υπηρεσίες φωνής. Η μεταγωγή πακέτου θα πρέπει να είναι περισσότερο ευέλικτη ώστε

να επιτρέπει την παροχή διαφόρων ειδών υπηρεσιών και θα πρέπει να διευκολύνει τη δημιουργία εφαρμογών πολυμέσων, θα είναι όμως λιγότερο αποδοτική ως προς την κατανάλωση φάσματος, εξαιτίας της κεφαλίδας IP που θα περιέχει κάθε πακέτο.

Ένα βασικό πλεονέκτημα του UMTS είναι οι τέσσερις κλάσεις που έχουν οριστεί για την ποιότητα των παρεχομένων υπηρεσιών.

- *Conversational:*
για εφαρμογές πραγματικού χρόνου (π.χ. ομιλία ή τηλεδιάσκεψη).
- *Streaming:*
για ελεγχόμενη μεταβλητότητα στην καθυστέρηση (π.χ. εφαρμογές Video, RealAudio).
- *Interactive:* για μικρό ποσοστό απωλειών με ύπαρξη μεγίστου επιτρεπόμενου χρόνου διεκπεραίωσης (π.χ. ανάγνωση ιστοσελίδων).
- *Background:* για μικρό ποσοστό απωλειών, χωρίς ύπαρξη εγγύησης για το συνολικό χρόνο διεκπεραίωσης (π.χ. ανάκτηση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου).

Εντούτοις, μεγάλη τεχνολογική πρόκληση για το UMTS, είναι το αν θα μπορέσει τελικά να παράσχει επαρκή ποιότητα υπηρεσιών (QoS-- Quality of Service), ιδιαίτερα όσον αφορά το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης, στις υπηρεσίες πραγματικού χρόνου που πρεσβεύει προκειμένου να ελέγχονται οι καθυστερήσεις εξαιτίας της μεταπομπής, να πραγματοποιείται η διαχείριση των λιγοστών ραδιοπόρων, και να ελέγχεται η εισαγωγή των χρηστών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

GSM 900-DCS 1800

Π.1. Το σύστημα GSM 900

Το μειονέκτημα της ύπαρξης μεγάλου αριθμού αναλογικών συστημάτων στην Ευρώπη μαζί με την ανάγκη εξυπηρέτησης του διαρκών αυξανόμενου αριθμού χρηστών και την καθιέρωση συμβατότητας των δικτύων κινητών επικοινωνιών με το σταθερό δίκτυο οδήγησαν τη CEPT¹ το 1982 στη σύσταση της ομάδας “Group Special Mobile” με σκοπό τη σύνταξη προδιαγραφών για ένα σύστημα το οποίο κατέληξε στο GSM (Global System for Mobile communications).

Το GSM στην παρούσα μορφή του υποστηρίζει λειτουργία με πλήρη ρυθμό μετάδοσης (22.8 kbps και 8 θυρίδες ανά πλαίσιο) και με μισό ρυθμό μετάδοσης (11.4 kbps και 16 θυρίδες ανά πλαίσιο). Οι κωδικοποιητές φωνής έχουν προδιαγραφεί και για τους δύο ρυθμούς όπως επίσης μπορούν να χρησιμοποιούνται βελτιωμένοι κωδικοποιητές πλήρους ρυθμού στον ασύρματο τοπικό βρόχο για εφαρμογές. Όσο αφορά τα δεδομένα έχουν προδιαγραφεί διάφορες ασύγχρονες υπηρεσίες στα 9.6, 4.8 και 2.4 kbps για λειτουργία πλήρους και μισού ρυθμού.

Π.2. Στόχοι

Η λειτουργία του GSM είχε δύο κύριους στόχους :

- Ο πρώτος ήταν η πλήρης συμβατότητα μεταξύ κινητών σταθμών διαφόρων κατασκευαστικών εταιρειών και δικτύων διαφορετικών χωρών, καθώς και συνεργασία με το επίγειο καλωδιακό τηλεφωνικό σύστημα.
- Ο δεύτερος ήταν η οικονομία του φάσματος που επιτυγχάνεται με το κυψελωτό σύστημα. Αυτή η οικονομία επιτυγχάνεται με τον όσο το δυνατό μικρότερο αριθμό κυψελών που απαιτούνται για την κάλυψη μιας περιοχής με ένα δεδομένο φάσμα συχνοτήτων. Η φασματική απόδοση εξαρτάται από τον αριθμό των ταυτόχρονων κλήσεων, οι οποίες μπορούν να εξυπηρετηθούν στο διαθέσιμο φάσμα.

Π.3. Κωδικοποίηση

¹¹ CEPT (Conférence Européenne des Postes et Télécommunications): Συνεργασία τηλεπικοινωνιακών φορέων από διάφορα κράτη για την παραγωγή προτύπων (standards).

Για την εκπομπή και λήψη του σήματος GSM επιλέχθηκε ένας συνδυασμός TDMA (Time Division Multiple Access) και FDMA (Frequency Division Multiple Access) με μεταπήδηση συχνότητας (Frequency Hopping)

Η βασική μορφή της εκπομπής GSM είναι μια σειρά από 100 περίπου bits, η οποία ονομάζεται ριπή (burst). Οι ριπές έχουν μια πεπερασμένη διάρκεια και καταλαμβάνουν ένα πεπερασμένο μέρος του ραδιοφάσματος. Εκπέμπονται σε χρονικά παράθυρα, τα οποία λέγονται θυρίδες (slots). Οι κεντρικές συχνότητες των θυρίδων τοποθετούνται κάθε 200 kHz μέσα στο εύρος συχνοτήτων (FDMA) και επαναλαμβάνονται κάθε 0.577 ms (TDMA). Έτσι υπάρχουν συγκεκριμένα κανάλια με τις ίδιες συχνότητες για κάθε χρονοθυρίδα και επίσης κανάλια με μεταπήδηση συχνότητας, όπου οι χρονοθυρίδες έχουν διαφορετικές συχνότητες.

Η σχέση μεταξύ της ζεύξης κινητού τερματικού – σταθμού βάσης (uplink) και της ζεύξης σταθμού βάσης – κινητού τερματικού (downlink) είναι ότι η αρίθμηση των χρονοθυρίδων του uplink εξάγεται από αυτή των χρονοθυρίδων του downlink με μετατόπιση κατά 3 περιόδους ριπών (Burst Periods, BP = 0.577 ms).

Π.4. Διαμόρφωση

Η διαμόρφωση που έχει επιλεγεί για το GSM είναι η GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) με BT=0.3. Κατά την αποδιαμόρφωση έχει υιοθετηθεί από τα περισσότερα συστήματα GSM η τεχνική Viterbi, η οποία βάση αλγόριθμου κάνει αποδιαμόρφωση με μέγιστη πιθανότητα, δηλαδή βρίσκει την πιο κατάλληλη εκπεμπόμενη ακολουθία λαμβάνοντας υπόψη κάποια πιθανά υποθετικά σήματα, καθώς και το στατιστικό θόρυβο.

Π. 5. Το σύστημα DCS 1800

Π.5.1 Εκπομπή και λήψη

Τα διαμορφωμένα σήματα εκπέμπονται γύρω από μία κεντρική φέρουσα συχνότητα. Το εύρος συχνοτήτων για το DCS 1800 είναι το εξής:

1710 – 1785 MHz : εκπομπή κινητού - λήψη σταθμού βάσης (uplink)

1805 – 1880 MHz : εκπομπή σταθμού βάσης - λήψη κινητού (downlink)

Η RF απόσταση των καναλιών είναι 200 kHz.

Οι συχνότητες των φερόντων κάθε καναλιού προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$F_{\text{uplink}}(n) = 1710.2 + 0.2 \cdot (n-512) \text{ MHz} \quad 512 \leq n \leq 885 \quad (1)$$

$$F_{\text{downlink}}(n) = F_{\text{uplink}}(n) + 95 \text{ MHz} \quad (2)$$

Το η ονομάζεται Absolute Radio Frequency Channel Number (ARFCN). Τα κανάλια 512 και 885 γενικά δεν χρησιμοποιούνται για να αποφευχθούν οι παρεμβολές με άλλα συστήματα.

Το ψηφιακό σύστημα DCS 1800 είναι ένα σύστημα το οποίο ανήκει στην κατηγορία των προσωπικών επικοινωνιακών δικτύων και βασίζεται στη θεμελιώδη τεχνολογία του GSM. Οι ολοκληρωμένες προδιαγραφές του συστήματος εκδόθηκαν το 1993. Το σύστημα DCS 1800 είναι μικροκυματικής μορφής, παρέχει υψηλή ποιότητα επικοινωνίας σε συνδρομητές που κινούνται σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και προσφέρει υψηλή χωρητικότητα από πλευράς εξυπηρέτησης χρηστών. Το κόστος της ολοκληρωμένης τεχνικής του υποδομής είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο, από το αντίστοιχο κόστος του GSM.

Μια από τις βασικές διαφορές των δύο ανταγωνιστικών συστημάτων είναι η περιοχή των συχνοτήτων λειτουργίας, οι οποίες επηρεάζουν σε τελική φάση τα χαρακτηριστικά λήψης του ραδιοσήματος, λόγω των ιδιοτήτων της αντίστοιχης ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης (ολίσθηση Doppler, χαρακτηριστικά διαλείψεων). Ο κορεσμός του φάσματος του GSM οδήγησε σε ένα νέο σύστημα επικοινωνιών, το DCS 1800, εύρους ζώνης 75 MHz (1710 – 1785 MHz, 1805 – 1885 MHz) έναντι των μόλις 25 MHz του GSM. Επίσης η ελάχιστη απόσταση των διαδοχικών ραδιοδιαύλων είναι 200 kHz και υπάρχει μια απόσταση ασφαλείας εύρους 200 KHz στο κατώτερο όριο της κάθε υποζώνης.

Οι τροποποιήσεις έναντι του GSM αναφέρονται στις παρακάτω λειτουργικές κατηγορίες:

- Περιγραφή ραδιοδιαύλου σε συγκεκριμένο κύτταρο
- Περιγραφή γειτονικού κυττάρου
- Εντολή καταχώρησης ραδιοδιαύλων
- Πληροφορία συστήματος 2
- Πληροφορία συστήματος 5

Οι παραπάνω τροποποιήσεις δημιουργούν τις παρακάτω μεταβολές:

- το κινητό οφείλει να διαχειρίζεται όλα τα είδη των κωδικοποιήσεων ακόμη κι εάν το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα υποσύνολο αυτών
- πραγματοποιείται επέκταση των μηνυμάτων bis και υπάρχουν δείκτες εντός του κυρίως μηνύματος, οι οποίοι δείχνουν ότι τα μηνύματα αυτά βρίσκονται σε χρήση.
- στην τεχνική μεταπήδησης συχνότητας, η οποία υιοθετείται από ένα σύστημα DCS, εισάγεται ένα “στοιχείο καταλόγου συχνότητας” και ένα “στοιχείο μικρού καταλόγου συχνότητας” τα οποία δίδουν άμεσα το εύρος της μεταπήδησης.

Π. 5.2 Ισχύς εκπομπής των κινητών μονάδων και των σταθμών βάσης

Η ισχύς εκπομπής των κινητών μονάδων (Mobile Station, MS) στο DCS 1800 είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του συστήματος GSM. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κινητές

μονάδες μπορούν να μειώσουν την ισχύ εξόδου των πομπών των με βήματα των 2dB κατόπιν εντολής του οικείου σταθμού βάσης.

Class	GSM 900		DCS 1800	
1	20 W	43 dBm	1 W	30 dBm
2	8 W	39 dBm	0.25 W	24 dBm
3	5 W	37 dBm		
4	2 W	33 dBm		
5	0.8 W	29 dBm		

Οι κατηγορίες της ισχύος εκπομπής του σταθμού βάσης (Base Tranceiver Station, BTS) του συστήματος DCS 1800 ανήκουν στις κατώτερες κατηγορίες των ισχύων εκπομπής του συστήματος GSM. Συγκεκριμένα ανάλογα με το μέγεθος του κυττάρου κάλυψης, η διαβάθμιση των μεγίστων ισχύων εκπομπής είναι αυτές που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα. Επίσης υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της ισχύος εκπομπής, ώστε να επιτρέπεται η μείωση αυτής από τη μέγιστη στάθμη με 6 στάθμες των 2dB και δυνατότητα μικρομετρικής ρύθμισης για κάλυψη του χώρου.

GSM 900	DCS 1800
320 W	20 W
160 W	10 W
80 W	5 W
40 W	2.5 W

Π 5.3 Επίπεδα αναφοράς ευαισθησίας

Ο προσδιορισμός των επιπέδων αναφοράς της ευαισθησίας, όσον αφορά το bit error και residual bit error rate ή και απώλεια ολόκληρου πλαισίου (frame) καθορίζονται με βάση τον τύπο του καναλιού και τις συνθήκες διάδοσης [ETSI, TS 100 910, V6.2.0, 1998-07, Table 1]. Η ευαισθησία (sensitivity) ορίζεται ως το επίπεδο τάσης εισόδου, με το οποίο ικανοποιούνται οι αποδόσεις του συστήματος. Το πραγματικό επίπεδο ευαισθησίας πρέπει να είναι μικρότερο από ένα συγκεκριμένο όριο, το οποίο ονομάζεται επίπεδο αναφοράς

ευαισθησίας και οι τιμές που λαμβάνει, ανάλογα με τον τύπο του κινητού τερματικού ή του σταθμού βάσης, αναγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

για DCS 1800 class 1 ή class 2 MS	-100 / -102 dBm
για DCS 1800 class 3 MS	-102 dBm
για GSM 900 small MS	-102 dBm
για άλλα GSM 900 MS και normal BTS	-104 dBm
για GSM 900 micro BTS M1	-97 dBm
για GSM 900 micro BTS M2	-92 dBm
για GSM 900 micro BTS M3	-87 dBm
για DCS 1800 micro BTS M1	-102 dBm
για DCS 1800 micro BTS M2	-97 dBm
για DCS 1800 micro BTS M3	-92 dBm

Π. 5.4 Επίπεδα αναφοράς παρεμβολών

Τα επίπεδα αναφοράς παρεμβολών (για ομοδιαυλική παρεμβολή C/I_C ή γειτονική παρεμβολή C/I_A), όσον αφορά το bit error και residual bit error rate ή και απώλεια ολόκληρου πλαισίου (frame) καθορίζονται με βάση τον τύπο του καναλιού και τις συνθήκες διάδοσης [ETSI, TS 100 910, V6.2.0, 1998-07, Table 2]. Ο πραγματικός λόγος σήματος προς παρεμβολή ορίζεται ως ο λόγος σήματος προς παρεμβολή, για τον οποίο ικανοποιούνται οι αποδόσεις του συστήματος. Ο πραγματικός λόγος σήματος προς παρεμβολή θα πρέπει να είναι μικρότερος από ένα συγκεκριμένο όριο, που ονομάζεται λόγος αναφοράς σήματος προς παρεμβολή. Ο λόγος αναφοράς, για BTS και όλα τα είδη των MS, είναι:

Για ομοδιαυλική παρεμβολή	$C/I_C = 9 \text{ dB}$
Για γειτονική (200 KHz) παρεμβολή	$C/I_{A1} = -9 \text{ dB}$
Για γειτονική (400 KHz) παρεμβολή	$C/I_{A2} = -41 \text{ dB}$
Για γειτονική (600 KHz) παρεμβολή	$C/I_{A3} = -49 \text{ dB}$

Τα προηγούμενα επίπεδα εφαρμόστηκαν για ένα επιθυμητό σήμα 20 dB πάνω από το επίπεδο αναφοράς ευαισθησίας και για τυχαίο, συνεχές παρεμβάλλον σήμα με διαμόρφωση GSM. Το οφέλιμο σήμα και η παρεμβολή πρέπει να έχουν την ίδια ακολουθία στη μεταπήδηση συχνότητας και να υπόκεινται στις ίδιες συνθήκες διάδοσης.

Π. 5.6 Διαπομπή (Handover)

Διαπομπή (handover) είναι η διαδικασία αλλαγής συχνότητας που γίνεται αυτόματα από το σύστημα χωρίς τη μεσολάβηση του χρήστη και είναι χαρακτηριστική διαδικασία των κυψελωτών συστημάτων. Είναι μια διαδικασία μεταγωγής όπου η επικοινωνία ενός κινητού τερματικού μεταφέρεται από ένα σταθμό βάσης σε ένα γειτονικό, όταν η στάθμη του λαμβανόμενου σήματος πέσει κάτω από μια στάθμη κατωφλίου του συστήματος.

Κατά τη σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διαπομπή. Οι επιτυχείς διαπομπές, ο περιορισμός όλων των μη αναγκαίων διαπομπών και ο έλεγχος της κίνησης στην κυψέλη με την αλλαγή του αλγόριθμου διαπομπής είναι βασικά στοιχεία στη σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων. Οι παρακάτω προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται για την επιτυχία της διαπομπής και την παράλειψη κάθε μη αναγκαίας διαπομπής. Έστω για παράδειγμα ότι η στάθμη κατωφλίου στα όρια της κυψέλης όπου πραγματοποιείται η διαπομπή είναι -100 dBm. Με αυτή την προϋπόθεση θα πρέπει να ορίσουμε μια στάθμη υψηλότερη από -100 dBm, έστω $-100 \text{ dBm} + \Delta \text{ dB}$ και όταν το λαμβανόμενο σήμα φθάσει αυτή τη στάθμη να ξεκινά μια αίτηση διαπομπής. Αν η τιμή του Δ

είναι μικρή τότε δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για να γίνει η διαπομπή της κλήσης έγκαιρα, και μπορεί να χάνονται πολλές κλήσεις της ώρα της διαπομπής. Επίσης η τιμή του Δ είναι σταθερή και μεγάλη, τότε ο χρόνος που μεσολαβεί για να κατέβει η στάθμη από $-100 \text{ dBm} + \Delta \text{ dB}$ σε -100 dBm είναι σχετικά μεγάλος, και κατά τη διάρκεια αυτού του χρόνου μπορεί να συμβούν πολλά γεγονότα όπως π.χ να κάνει στροφή το κινητό και να κινείται πλέον προς το σταθμό βάσης ή να σταματήσει το κινητό, οπότε η στάθμη του σήματος δεν θα πέσει κάτω από -100 dBm . Τούτο σημαίνει ότι μπορεί να λάβουν χώρα πολλές μη αναγκαίες διαπομπές, διότι η μέριμνα για αυτές λαμβάνεται πολύ νωρίς. Συνεπώς το Δ πρέπει να μεταβάλλεται σύμφωνα με τον εκθέτη απωλειών λόγω διαδρομής n και το ρυθμό υπέρβασης στάθμης του λαμβανόμενου σήματος $N(R)$.

Το n και το $N(R)$ δίνονται αντίστοιχα από:

$$L(d) \propto L_f \left(\frac{d}{d_0}\right)^n \quad (3)$$

όπου:

n : Εκθέτης των απωλειών λόγω διαδρομής, τυπικές τιμές $3,5 \leq n \leq 5$

d : Απόσταση μεταξύ κεραιών εκπομπής και λήψης

d_0 : Απόσταση αναφοράς

L_f : Απώλεια διάδοσης λόγω διαδρομής σε απόσταση d_0 και διάδοση LOS (Line Of Sight)

L : Απώλειες διάδοσης για συνδιασμένη διάδοση του σήματος, LOS και NLOS (Non-Line Of Sight)

$$N(R) \approx \sqrt{2\pi} f_m \rho \quad (4)$$

όπου:

f_m : η συχνότητα Doppler

ρ : R/R_{rms} , R είναι μία προκαθορισμένη στάθμη του σήματος και R_{rms} είναι η ενεργός τιμή της στάθμης αυτής

Π. 5.7 Μεταπήδηση Συχνότητας (Frequency Hopping)

Το GSM έχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης της αργής μεταπήδησης συχνότητας (Slow Frequency Hopping, SFH), δηλαδή της αλλαγής της συχνότητας που χρησιμοποιείται από ένα κανάλι ανά χρονικά διαστήματα. Η αρχή αυτής της τεχνικής βρίσκεται σε στρατιωτικά συστήματα μετάδοσης, όπου χρησιμοποιήθηκε για τη διασφάλιση της μυστικότητας των επικοινωνιών και στον παρεμπότισμό των τηλεπικοινωνιών του εχθρού (combat jamming).

Δημοσιεύσεις πάνω σε αυτό το θέμα διαχωρίζουν τη γρήγορη μεταπήδηση συχνότητας (Fast Frequency Hopping, FFH όπου η συχνότητα αλλάζει πιο γρήγορα από το ρυθμό διαμόρφωσης) από την αργή μεταπήδηση συχνότητας SFH. Στο GSM η συχνότητα παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της ριπής (burst) γι’ αυτό και ανήκει στο SFH.

Η ικανότητα του συστήματος για μεταπήδηση συχνότητας (frequency hopping) είναι προαιρετική και εξαρτάται από τον χειριστή και το λειτουργικό της εταιρείας. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του χαρακτηριστικού είναι ότι παρέχει διαφορεική λήψη συχνότητας (frequency diversity) σε μία ζεύξη (ειδικότερα για αύξηση της αποδοτικότητας κωδικοποίησης και περιορισμό των διαλείψεων Rayleigh, ιδιαίτερα για αργά κινούμενους σταθμούς MS).

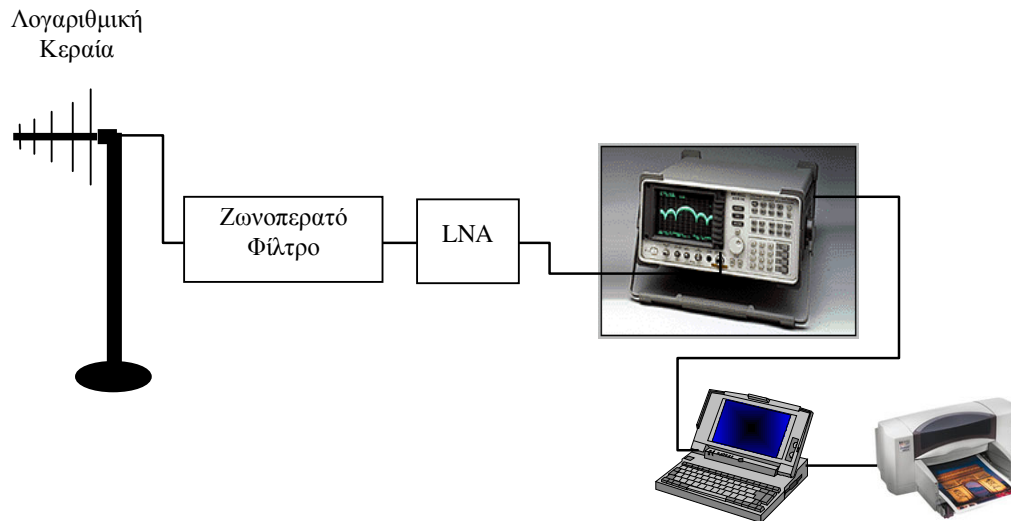
Η αρχή της αργής μεταπήδησης συχνότητας SFH είναι ότι κάθε κινητό εκπέμπει στις χρονοθυρίδες σύμφωνα με μια ακολουθία συχνοτήτων η οποία εξάγεται από έναν αλγόριθμο. Η μεταπήδηση συχνότητας συμβαίνει μεταξύ των χρονοθυρίδων και, γι’ αυτό, ένας κινητός σταθμός εκπέμπει (ή λαμβάνει) σε μια συγκεκριμένη συχνότητα κατά τη διάρκεια μίας χρονοθυρίδας ($\cong 577 \mu\text{s}$) και μετά πρέπει να αλλάξει σε μία άλλη συχνότητα πριν την χρονοθυρίδα του επόμενου πλαισίου TDMA. Λόγω του χρόνου που χρειάζεται για τον έλεγχο άλλων σταθμών βάσεων ο χρόνος μεταπήδησης συχνότητας είναι περίπου 1 ms σύμφωνα με την εφαρμογή του δέκτη.

Συμπερασματικά, σε περιβάλλοντα όπως π.χ στις πόλεις (καθυστερήσεις 1 έως 2 μs) τα 200 kHz του εύρους ζώνης δεν αρκούν πλέον για την επίλυση του θέματος των πολλαπλών διαδρομών, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω στη διαφορεική λήψη, οπότε και τα αργά κινούμενα τερματικά αντιμετωπίζουν μεγάλης διάρκειας ριπές σφαλμάτων. Η κατάσταση αυτή μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά πηδώντας συχνότητα από θυρίδα σε θυρίδα με τη χρησιμοποίηση διαφορετικών σχημάτων πηδήματος σε διαφορετικούς σταθμούς βάσης. Επίσης η τεχνική αυτή εφαρμόζεται ακόμα πιο αποτελεσματικά λόγω των παύσεων που συμβαίνουν κατά τη διάρκεια μιας συνομιλίας.

Π.5.8 Διάταξη Μετρήσεων

Πειραματική Διάταξη

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα.



Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ακόλουθα:

1. Φορητός υπολογιστής 486 για αυτόματη μέτρηση και καταγραφή των δεδομένων
2. Αναλυτής φάσματος HP 8594E
3. Ζωνοπερατό φίλτρο (BPF: 1600-1900 MHz)
(Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του όπως αυτά μετρήθηκαν στο εργαστήριο πριν από τις μετρήσεις)
4. Κατευθυντική κεραία Log Periodic της EMCO-USA Model 3104C
(Το διάγραμμα ακτινοβολίας της κεραίας καθώς και το πιστοποιητικό βαθμονόμησης αυτής δίνονται στο παράρτημα Β)
5. Γεννήτρια παροχής τάσης AC 220 Volts
6. Τροφοδοτικό DC τάσης (0-25Volts) ESCORT EPS 3250.

Περιγραφή οργάνων – μηχανημάτων

Κεραία

Η επιλογή της κεραίας είναι ιδιαίτερα σημαντική στην πραγματοποίηση των μετρήσεων. Τα τρία κριτήρια που καθόρισαν το είδος της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε είναι το μεγάλο κέρδος, η υψηλή κατευθυντικότητα και το γεγονός ότι τα δύο προηγούμενα δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Τα σήματα που φτάνουν στη κεραία είναι της τάξεως των +37 dBμV/m και γι' αυτό είναι αναγκαία η χρήση μιας κεραίας που να έχει μεγάλο κέρδος. Επίσης λόγω του ότι είναι επιθυμητή η εύρεση της προέλευσης του σήματος δεν βολεύει η χρήση μιας ομοιοκατευθυντικής κεραίας αλλά μιας κεραίας με υψηλή κατευθυντικότητα.. Έτσι μπορεί να ευρεθεί μια μικρή γωνία μέσα στην οποία προσπίπτει το σήμα της παρεμβολής και επομένως να προσδιοριστεί η διεύθυνση προέλευσης του σήματος.

Μία τέτοια κεραία είναι η λογαριθμική, η οποία παρουσιάζει αξιοσημείωτη σταθερότητα στα χαρακτηριστικά της σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Έχει σταθερή αντίσταση ακτινοβολίας (και συνεπώς ίδιο λόγο στάσιμων κυμάτων) και περίπου σταθερές τιμές κέρδους και front-to-back ratio. Εξαιτίας αυτών των πλεονεκτημάτων, χρησιμοποιήθηκε η κατευθυντική κεραία Log Periodic της EMCO – USA Model 3104C. Η συγκεκριμένη κεραία έχει μέσο κέρδος 9 dBi και παράγοντα κεραίας 25 dB (μεγέθη μετρημένα στα 10 μέτρα από την κεραία) στο εύρος συχνοτήτων 1500 – 2000 MHz που μας ενδιαφέρει.

Ζωνοπερατό Φίλτρο

Γενικά τα κύρια χαρακτηριστικά ενός οποιοδήποτε φίλτρου που ενδιαφέρουν σε μια εφαρμογή είναι:

- Η κεντρική συχνότητα (CF center frequency)
- Το εύρος ζώνης 3 dB (3 dB – BW)
- Η εξασθένηση που συμβάλλει στα σήματα που εισέρχονται από αυτό (Insertion Loss)

Το ζωνοπερατό φίλτρο χρησιμοποιείται για να επιτρέπει τη διέλευση από αυτό σημάτων που ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ενδιαφέρον παρουσιάζουν όσα σήματα εκπέμπονται στη ζώνη συχνοτήτων 1700– 1900 MHz. Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε ζωνοπερατό φίλτρο BPF: 1600–900 MHz κατασκευής E.M.Π (coupled lines), καθώς η μάσκα του χαρακτηρίζεται από χαμηλή εξασθένηση και flatness στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων.

Τα σήματα θα πρέπει να μην παραμορφώνονται κατά τη διέλευσή τους από το φίλτρο. Το φίλτρο επομένως είναι απαραίτητο να χαρακτηρίζεται από flatness στο απαιτούμενο εύρος συχνοτήτων, ενώ θα πρέπει να είναι γνωστή και η εξασθένηση συναρτήσει της συχνότητας.

Ενισχυτής Χαμηλού Θορύβου

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός ενισχυτή χαμηλού θορύβου (Low Noise Amplifier, LNA) για μετρήσεις αυτού του είδους είναι:

- το εύρος 3 dB των συχνοτήτων που ενισχύει
- ο συντελεστής θορύβου (Noise Figure)
- το κέρδος
- ο λόγος στάσιμων κυμάτων VSWR (Voltage Stationary Wave Ratio)

Το πιο σημαντικό από τα παραπάνω είναι ο εγγενής θόρυβος του ενισχυτή, ο οποίος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερος. Δηλαδή η συνεισφορά του ενισχυτή στο θόρυβο πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή. Το κέρδος τέτοιου είδους ενισχυτών δεν είναι πολύ μεγάλο, αλλά θεωρείται ικανοποιητικό για τις μετρήσεις. Ο ενισχυτής θα πρέπει να παρέχει σταθερή ενίσχυση του σήματος σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, ώστε σήματα διαφορετικών συχνοτήτων να ενισχύονται το ίδιο και να μην εξάγονται λανθασμένα συμπεράσματα. Ο λόγος VSWR θα πρέπει να είναι πολύ μικρός (ιδανικά 1), ώστε να μη δημιουργούνται ανακλώμενα σήματα, τα οποία επιστρέφουν στην κεραία.

Με βάση τα παραπάνω απαιτούμενα χαρακτηριστικά του ενισχυτή έγινε μελέτη των διαφόρων εταιρειών κατασκευής LNA και καταλήξαμε στον ενισχυτή που ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας με το ελάχιστο κόστος. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ZHL-1724 HLN της Mini Circuits.

Αναλυτής Φάσματος

Αναλυτής φάσματος είναι το όργανο το οποίο απεικονίζει σήματα στο πεδίο της συχνότητας, (συχνότητες στον οριζόντιο άξονα και πλάτος σε dBm στον κατακόρυφο άξονα). Ο συγκεκριμένος αναλυτής φάσματος που χρησιμοποιήθηκε (μοντέλο HP 8594) είναι ψηφιακός, υπερετερόδυνος^[8] και έχει εύρος συχνοτήτων από 30 kHz έως 2,9 GHz, ενώ απεικονίζει πλάτος από -115 dBm έως +30 dBm. Η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου κρίθηκε κατάλληλη, διότι το εύρος συχνοτήτων που μελετάται βρίσκεται μέσα στο εύρος λειτουργίας του και όχι κοντά στο όριο του. Επίσης, περιλαμβάνει πλήθος λειτουργιών, οι οποίες συμβάλλουν στην καλύτερη απεικόνιση των σημάτων και βοηθούν το χρήστη στη διάκριση και επεξεργασία αυτών.

Ο αναλυτής φάσματος κρίνεται απαραίτητος, γιατί ενδιαφέρει η απεικόνιση των σημάτων ως προς τη συχνότητα. Δεν ενδιαφέρει η χρονική εξέλιξη του σήματος, αλλά το φάσμα του και ποιο μέρος αυτού εισέρχεται ως παρεμβολή στο εύρος λειτουργίας του DCS

1800. Γι' αυτό άλλωστε δεν χρησιμοποιείται παλμογράφος. Μια άλλη συσκευή που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί είναι το πεδιόμετρο, το οποίο παρέχει μεν ένδειξη της έντασης του πεδίου ως προς τη συχνότητα, αλλά δε διαθέτει τις λειτουργίες και ευκολίες απεικόνισης, επεξεργασίας και επικοινωνίας με το PC που απαιτούνται.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δεν κρίνεται σκόπιμη η πλήρης περιγραφή της λειτουργίας του αναλυτή φάσματος. Όμως αξίζει να τονίσουμε κάποιες ιδιαίτερες λειτουργίες που συμβάλλουν στην καλύτερη απεικόνιση και καταγραφή των σημάτων. Αυτές είναι:

- **SPAN:** Η λειτουργία αυτή αλλάζει το εύρος συχνοτήτων συμμετρικά εκατέρωθεν μιας κεντρικής συχνότητας. Δηλαδή εκφράζει το συνολικό εύρος συχνοτήτων που απεικονίζεται στην οθόνη του αναλυτή φάσματος.
- **MAX HOLD:** Η λειτουργία αυτή κάνει καταγραφή του σήματος για ένα επιθυμητό χρονικό διάστημα, διατηρώντας πάντα την μέγιστη τιμή του σήματος σε κάθε συχνότητα. Έτσι προκύπτει ένα ίχνος στην οθόνη του αναλυτή φάσματος, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί τόσο στον αναλυτή φάσματος (λειτουργίες TRACE και SAVE), όσο και σε υπολογιστή.
- **SWEEP TIME:** Η λειτουργία προσδιορίζει το χρονικό διάστημα στο οποίο ο αναλυτής φάσματος σαρώνει το απεικονιζόμενο εύρος συχνοτήτων (χρόνος σάρωσης). Μειώνοντας το χρόνο σάρωσης αυξάνεται η συχνότητα των σαρώσεων. Ο χρόνος σάρωσης έχει άμεση σχέση με το εύρος συχνοτήτων SPAN που έχουμε ορίσει πιο πάνω. Δηλαδή αυξάνοντας το SPAN αυξάνεται και ο ελάχιστος χρόνος σάρωσης.
- **RESOLUTION BANDWIDTH:** Η λειτουργία αυτή αλλάζει το IF (Intermediate Frequency) εύρος 3 dB της εισόδου του αναλυτή φάσματος σε 1 kHz, 3kHz, 10kHz, 30kHz, 100kHz, 300kHz, 1MHz ή 3MHz. Καθώς το RES BW μειώνεται, ο χρόνος σάρωσης (SWEEP TIME) αυξάνεται, ώστε να διατηρηθεί η ρύθμιση του πλάτους (amplitude calibration).
- **DEMODULATION:** Η λειτουργία αυτή κάνει αποδιαμόρφωση σε σήματα FM και AM, τα οποία μπορούν να ακουστούν από το μεγάφωνο που είναι ενσωματωμένο στον αναλυτή φάσματος.

Π. 5.9 Μεθοδολογία Μετρήσεων

Εισαγωγή

Η ανάπτυξη μεθοδολογίας πριν την πραγματοποίηση των μετρήσεων ενδείκνυται, καθώς συστηματοποιεί τη διαδικασία και περιορίζει τις λαθεμένες ενέργειες και βήματα που μπορεί να γίνουν in situ. Εκτός από την προτυποποίηση των βημάτων και των ενεργειών που αφορούν την εκτέλεση των μετρήσεων, είναι απαραίτητη η λήψη μέτρων για την προστασία της μετρητικής διάταξης, αλλά και του προσωπικού.

Προστασία Προσωπικού

Κατά την εγκατάσταση του μετρητικού συστήματος στο χώρο διεξαγωγής των μετρήσεων πρέπει να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα για την προστασία του προσωπικού. Το πρώτο μέλημα κάθε εργασίας είναι η προστασία του προσωπικού αλλά και όλων των ανθρώπων γενικά, που βρίσκονται κοντά στο χώρο αυτό. Δηλαδή θα πρέπει ο εκάστοτε μηχανικός που είναι υπεύθυνος για την πραγματοποίηση κάποιων μετρήσεων να προβλέψει την προστασία τόσο των ανθρώπων που δουλεύουν, όσο και αυτών που δεν έχουν σχέση με τις μετρήσεις, αλλά που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από τον χώρο που διεξάγονται αυτές. Έτσι παρατίθενται τα πιο σημαντικά στοιχεία που πρέπει κανείς να προσέχει όταν κάνει μετρήσεις σε δημόσιο ή ιδιωτικό χώρο προκειμένου να εξασφαλίσει την προστασία όλων των ανθρώπων που κινούνται γύρω από αυτό.

- Κατάλληλη ένδυση προσωπικού ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες.
- Επιλογή θέσης μέτρησης μακριά από απότομες πλαγιές ή απο άκρα ταράτσας.
- Χρήση προστατευτικού κράνους από το προσωπικό, σε περίπτωση μετρήσεων σε χώρους εργοταξίου όπου εκτελούνται οικοδομικές εργασίες.
- Για την περίπτωση μετρήσεων κατά τη διάρκεια της νύκτας, χρήση φακού από το προσωπικό. Επίσης θα πρέπει να γίνεται φωτισμός της μετρητικής διάταξης κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.
- Σε περίπτωση που η κεραία πρέπει να τοποθετηθεί σε ιστό μεγάλου ύψους, η τοποθέτηση θα πρέπει να γίνεται από ειδικά εκπαιδευμένο προσωπικό και με χρήση ειδικών ζωνών ασφαλείας.

Εγκατάσταση Μετρητικής Διάταξης

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία εκτέλεσης μετρήσεων είναι η εγκατάσταση της μετρητικής διάταξης. Η ακριβής θέση εγκατάστασης παίζει κυρίαρχο ρόλο στην ανίχνευση σημάτων παρεμβολής και κυρίως στον προσδιορισμό της κατεύθυνσης των υπο ανίχνευση σημάτων. Συνεπώς, βασιζόμενοι αρχικά στη θεωρητική μελέτη και προέλευση των σημάτων επιλέγονται πιθανά σημεία εγκατάστασης της μετρητικής διάταξης. Στη συνέχεια, κατόπιν αυτοψίας στα πιθανά αυτά σημεία (πιθανή ύπαρξη προσωρινών εμποδίων, περιφράξεων, κλπ), γίνεται επιλογή ενός ή περισσότερων σημείων εγκατάστασης των συσκευών μέτρησης. Το πλήθος των σημείων μέτρησης καθορίζεται τόσο με βάση τις απαιτήσεις του προβλήματος (ακρίβεια μέτρησης της κατεύθυνσης και της θέσης του πομπού του παρεμβάλλοντος σήματος), όσο και με τη μορφολογία του εδάφους.

Πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε εξωτερική μέτρηση θα πρέπει να δούμε αν ικανοποιούνται οι συνθήκες ελεύθερου χώρου. Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να είμαστε μακριά από σκεδαστές και ανακλαστήρες, οι οποίοι θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τις μετρήσεις. Μεγάλοι όγκοι όπως κτήρια, λόφοι, βράχοι και μεταλλικά αντικείμενα όπως συρματοπλέγματα, πυλώνες (ΔΕΗ, ΟΤΕ κλπ) επηρεάζουν το αποτέλεσμα των μετρήσεων. Επίσης, όταν στρέφεται η κεραία προς το μέρος που βρίσκεται κάποια πηγή ισχυρού θορύβου ή Η/Μ πεδίου (όπως κλιματιστικές μονάδες, ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις κλπ) ενδέχεται να μετρηθούν κρουστικές, γεγονός που πρέπει να αποφεύγεται. Τέλος, σε καμία περίπτωση δε θα πρέπει το σήμα στην είσοδο του αναλυτή φάσματος να υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό σήμα εισόδου, διότι υπάρχει κίνδυνος να καεί. Επίσης θα πρέπει να προφυλάσσονται τα όργανα μετρήσεων από σκόνη και ήλιο χρησιμοποιώντας ειδικά καλύμματα και ομπρέλες προστασίας κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους στην ύπαιθρο. Ο ενισχυτής LNA και το κουτί τροφοδοσίας, μαζί με το φίλτρο, θα πρέπει να είναι καλά θωρακισμένα απέναντι στην Η/Μ ακτινοβολία και φυσικά να μη στρέφεται η κεραία προς το μέρος τους, λόγω του φαινομένου των κρουστικών που ενδέχεται να εκπέμπουν. Η κεραία δηλαδή θα πρέπει να βρίσκεται στο χώρο μετρήσεων μακριά από οποιοδήποτε αντικείμενο, ακόμα και από ανθρώπους, ώστε να μην επηρεάζεται η λήψη της.

Επίσης, επιλέγουμε υψηλό σημείο για την τοποθέτηση της κεραίας (επιθυμούμε μεγάλο ενεργό ύψος κεραίας), ώστε να προσεγγίσουμε τις απώλειες ελεύθερου χώρου. Τούτο γίνεται με την επιλογή της ταράτσας ενός ψηλού κτηρίου, το οποίο βέβαια να μην περιβάλλεται από υψηλότερα κτήρια στη γύρω περιοχή, αλλά και με την αύξηση του πραγματικού ύψους της κεραίας. Έτσι, τα ανακλώμενα κύματα από το έδαφος και τους σκεδαστές εξασθενούν αρκετά και μπορούν να αμεληθούν. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται ώστε μετρητική διάταξη και άνθρωποι, να βρίσκονται μακριά από τα άκρα ταρατσών χωρίς κάγκελα και από γκρεμούς.

Σε περίπτωση χρήσης ηλεκτρογεννήτριας για παροχή ρεύματος θα πρέπει να τοποθετείται σε αρκετή απόσταση από τη μετρητική διάταξη με σκοπό την αποφυγή των

πιθανών παρεμβολών στο σύστημα μέτρησης. Η ύπαρξη πυροσβεστήρα θεωρείται απαραίτητη καθώς και η προφύλαξη της γεννήτριας και του δοχείου μεταφοράς βενζίνης από ήλιο και βροχή. Αν οι μετρήσεις γίνονται σε δημόσιο χώρο, θα πρέπει να εξασφαλίζεται η προφύλαξη της μετρητικής διάταξης με ενδεικτικά σήματα ώστε να αποκλείεται η πρόσβαση του κοινού.

Έτσι αφού ικανοποιηθούν οι παραπάνω απαιτήσεις γίνεται η εγκατάσταση της διάταξης όπως φαίνεται και στο σχήμα του κεφαλαίου 3. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να γίνει calibration (βαθμονόμηση) στον αναλυτή φάσματος, η οποία διαρκεί μερικά λεπτά. Ο σχολαστικός έλεγχος των ενώσεων των καλωδίων είναι απαραίτητος, ώστε να μην τσακίζουν και δημιουργούνται ορθές γωνίες. Τα καλώδια σύνδεσης θα πρέπει να μην ακουμπούν στο έδαφος ή σε μεταλλικές επιφάνειες, να μην εμποδίζουν την πρόσβαση προσωπικού και να μη μπερδεύονται μεταξύ τους. Επίσης, πραγματοποιείται έλεγχος της τροφοδοσίας του LNA και του ανεμιστήρα αερισμού, η οποία γίνεται από σταθεροποιημένο τροφοδοτικό με δύο ανεξάρτητες εξόδους. Το επόμενο βήμα είναι η διεξαγωγή των μετρήσεων.

Κριτήρια χαρακτηρισμού παρεμβολών

Πριν αναφερθούν τα βήματα διεξαγωγής των μετρήσεων τα οποία είναι γενικά και ισχύουν για κάθε παρόμοια περίπτωση μετρήσεων κρίνεται απαραίτητο να αναφερθούν τα κριτήρια με τα οποία χαρακτηρίστηκαν κάποια σήματα ως παρεμβολές για το συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων που μελετήθηκε (DSC 1800).

Χρονική σταθερότητα του σήματος έναντι των κινητών

Στο εύρος συχνοτήτων που αντιστοιχεί το uplink (1760-1785 MHz) της εταιρείας κινητής τηλεφωνίας τα σήματα των κινητών τερματικών δεν ήταν σταθερά, αλλά μεταβάλλονταν με τον χρόνο, όπως και αναμενόταν. Δηλαδή στην οθόνη του αναλυτή φάσματος εμφανίζονταν κάποιες αιχμές μικρής χρονικής διάρκειας που υποδήλωναν εκπομπές κινητών. Ωστόσο πολλές φορές υπήρχαν και σήματα (ισχυρά ή μη), τα οποία ήταν σταθερά μέσα στο φάσμα του DCS 1800. Τα τελευταία ήταν υποψήφιος παρεμβολές που έπρεπε να εξεταστούν με μεγαλύτερη προσοχή αν είναι όντως παρεμβολές, οπότε προχωρούσαμε στην εξέταση και των υπολοίπων κριτηρίων.

Μορφή του φάσματος

Σε αυτή την περίπτωση, οδηγός είναι η εμπειρία και η προηγούμενη γνώση που έχει αποκτήσει ο ερευνητής σχετικά με τη μορφή του φάσματος DCS 1800 και την κριτική του ικανότητα να το ξεχωρίζει από άλλα φάσματα.. Εδώ είναι σημαντικό να αναφερθεί πως πέρα από τα βιβλία και την γνώση που αυτά μπορούν να δώσουν έγινε εξομοίωση και απεικόνιση στον αναλυτή φάσματος ενός σήματος DCS 1800, από ψηφιακή γεννήτρια του εργαστηρίου, τα αποτελέσματα της οποίας φαίνονται στο παράρτημα Α.

Διαμόρφωση AM, FM

Στη συνέχεια, στις υποψήφιες παρεμβολές γίνεται αποδιαμόρφωση. Είναι μία λειτουργία την οποία παρέχει ο αναλυτής φάσματος, ώστε να διαπιστωθεί αν ένα σήμα έχει διαμόρφωση κατά πλάτος ή κατά συχνότητα. Το πλεονέκτημα αυτής της λειτουργίας είναι ότι επιτρέπει την αναγνώριση του σταθμού που εκπέμπει, αφού είναι δυνατή η ακρόαση από το μεγάφωνο του αναλυτή φάσματος του αποδιαμορφωμένου σήματος. Έτσι είναι δυνατή η αναγνώριση ραδιοφωνικών ή τηλεοπτικών (φέρουσα ήχου) μικροκυματικών ζεύξεων. Επιπλέον, αν εφαρμοστεί η λειτουργία της αποδιαμόρφωσης AM/FM σε άλλα αναλογικά ή ψηφιακά σήματα μπορεί να βοηθήσει στο χαρακτηρισμό ενός σήματος ως παρεμβολή. Πέρα από τη γνώση της μορφής του σήματος DCS 1800 κάνοντας αποδιαμόρφωση AM (κυρίως), γνωρίζουμε και ακουστικά το σήμα DCS 1800. Έτσι, αν κατά την αποδιαμόρφωση ενός αγνώστου σήματος (πιθανή παρεμβολή) ακούσουμε κάποιο διαφορετικό ήχο, τότε αποκτούμε ένα επιπλέον στοιχείο στο χαρακτηρισμό του αγνώστου σήματος ως παρεμβολή. Τέλος, αν υπάρχει η δυνατότητα να συγκρίνουμε ακουστικά το σήμα αυτό με όμοια, αλλά γνωστά σήματα, τότε είναι δυνατό να προχωρήσουμε και σε αναγνώριση της μορφής του (σήμα data κλπ).

Επίπεδα ισχύος

Πολλές φορές στην αναγνώριση μιας παρεμβολής βοηθά αν γνωρίζουμε τα επίπεδα ισχύος των σταθμών βάσεων. Με βάση τις προδιαγραφές ETSI οι σταθμοί βάσης και τα κινητά τερματικά πρέπει να εκπέμπουν σε συγκεκριμένα επίπεδα ισχύος. Υπάρχουν περιπτώσεις, όπου πολύ δυνατά χρονικά σταθερά σήματα παρεμβάλλονταν μέσα στο φάσμα λειτουργίας του DCS 1800. Έτσι σήματα που ξεχωρίζουν από το σύνολο των υπολοίπων και που φαίνονται με την πρώτη ματιά στην οθόνη του αναλυτή φάσματος είναι υποψήφια ως παρεμβολές και φυσικά εξετάζονται με λεπτομέρεια.

Διεξαγωγή Μετρήσεων

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω και με βάση τα θεωρητικά συμπεράσματα για τα χαρακτηριστικά και τις θέσεις των γνωστών σταθμών (θεωρητική μελέτη), καθώς και με τη γνώση των χαρακτηριστικών των RF σημάτων (AM, FM, PM, ψηφιακά, RADAR σήματα) και έχοντας αρχικοποιήσει τον αναλυτή φάσματος ως προς τη συχνότητα και το πλάτος (Frequency and Amplitude Calibration) (σύμφωνα με το εγχειρίδιο της κατασκευάστριας εταιρίας), εκτελείται η ακόλουθη διαδικασία στην ανίχνευση των παρεμβολών (η οποία επαναλαμβάνεται για κάθε υπό εξέταση ζώνη συχνοτήτων, αλλάζοντας αν είναι απαραίτητο την κεραία μέτρησης):

1. Ενεργοποίηση αρχικά του ενισχυτή χαμηλού θορύβου (LNA) (μέσω τροφοδοτικού στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας) που πιθανώς υπάρχει στη μετρητική διάταξη και στη συνέχεια των συσκευών μέτρησης (αναλυτής φάσματος) και καταγραφής (ηλεκτρονικός υπολογιστής).
2. Ενεργοποίηση της διαδικασίας καταγραφής μόνο των θετικών ακμών (positive peak detection), η οποία παραμένει ενεργή για όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.
3. Εισαγωγή στον αναλυτή φάσματος ('SP') της αρχικής και της τελικής συχνότητας της υπο εξέταση ζώνης συχνοτήτων. Οι υπόλοιπες λειτουργίες του SP είναι στην αυτόματη λειτουργία ('auto').
4. Επισκόπηση όλου του υπό εξέταση φάσματος με συνεχή περιστροφή της κεραίας κατά 360° και με τον αναλυτή φάσματος να καταγράφει σε λειτουργία max hold. Εκτύπωση των αποτελεσμάτων της επισκόπησης φάσματος μέσω της λειτουργίας 'copy' που διαθέτει ο αναλυτής φάσματος.
5. Αλλαγή της πόλωσης της κεραίας και επανάληψη του βήματος 4.
6. Αλλαγή του resolution bandwidth του SP σε χειροκίνητη λειτουργία και ρύθμιση της παραμέτρου αυτής σε διαφορετικές τιμές από αυτή της λειτουργίας 'auto'. Επανάληψη των βημάτων 4 και 5.
7. Αλλαγή του sweep time του SP στη χειροκίνητη λειτουργία και ρύθμιση της παραμέτρου αυτής σε διαφορετικές τιμές από αυτή της λειτουργίας 'auto'. Επανάληψη των βημάτων 4, 5 και 6.
8. Οι καταγραφές και εκτυπώσεις των αποτελεσμάτων από τα βήματα 4,5,6 και 7 αποτελούν μια επισκόπηση όλων των RF σημάτων παρεμβολής ανεξάρτητα από τη γωνία άφιξης, την πόλωση που χρησιμοποιείται και τα άλλα δευτερεύοντα χαρακτηριστικά των εκπομπών. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά γίνεται ακριβής καταγραφή όλων των RF σημάτων (συχνότητες αυτών), καθώς επίσης και μια πρώτη εκτίμηση για τις παραμέτρους του SP (resolution bandwidth, sweep time) οι οποίες απαιτούνται για την αξιόπιστη καταγραφή των RF σημάτων παρεμβολής.
9. Για κάθε ένα από τα σήματα παρεμβολής που καταγράφηκαν στο προηγούμενο βήμα, εισάγεται στην κεντρική συχνότητα (center frequency) του SP η κεντρική συχνότητα ανίχνευσης του σήματος με το span να ρυθμίζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να απεικονίζεται στην οθόνη του SP όλο το εύρος του σήματος.
10. Με τον SP να καταγράφει σε max hold (οι υπόλοιπες παράμετροι αρχικά τίθενται στην αυτόματη λειτουργία) γίνεται περιστροφή της κεραίας και παρατήρηση στην οθόνη του SP της έντασης του σήματος με σκοπό την εύρεση της κατεύθυνσης μεγιστοποίησης του παρεμβάλλοντος σήματος.
11. Καταγραφή της κατεύθυνσης μεγιστοποίησης του σήματος.
12. Αλλαγή της πόλωσης της κεραίας και επανάληψη των βημάτων 10 και 11.

13. Τοποθέτηση της κεραίας στη θέση μέγιστης λήψης του σήματος, με βάση τα αποτελέσματα των βημάτων 10, 11, 12 για την πόλωση του σήματος και την κατεύθυνση άφιξης αυτού.
14. Παρατηρώντας το φάσμα του παρεμβάλλοντος σήματος, γίνεται αλλαγή του resolution bandwidth και του sweep time του SP, με σκοπό την επίτευξη καλύτερης φασματικής ανάλυσης του μετρούμενου σήματος παρεμβολής.
15. Καταγραφή της πόλωσης και της έντασης του σήματος, καθώς και εκτύπωση του φάσματος με σκοπό την μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών του σήματος (εύρος φάσματος, φασματικές συνιστώσες, μορφή (σήμα radar, ψηφιακό, αναλογικό)).
16. Ρύθμιση κατά ένα μικρό ποσοστό την κατεύθυνση κύριας λήψεως της κεραίας τόσο ως προς το άζιμουθιο όσο και ως προς τη γωνία ανύψωσης με σκοπό τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης της πηγής εκπομπής με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια (Fine Tuning).
17. Για τον χαρακτηρισμό του παρεμβάλλοντος σήματος με τον πληρέστερο δυνατό τρόπο, επιχειρείται αποδιαμόρφωση του σήματος (AM, FM) μέσω της λειτουργίας 'analog mod/demod' που διαθέτει ο αναλυτής φάσματος.
18. Για την περίπτωση που το παρεμβάλλον σήμα είναι τηλεοπτικό ή ραδιοφωνικό γίνεται καταγραφή του ονόματος του σταθμού, καθώς επίσης και η ακριβής ώρα και ημερομηνία καταγραφής του.
19. Επανάληψη των βημάτων 9 έως 18 για όλα τα σήματα παρεμβολής που καταγράφηκαν στο βήμα 8.
20. Για την περίπτωση ανίχνευσης παρεμβολών σε συστήματα κινητής τηλεφωνίας επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις με διαφορετικά max hold duration, προκειμένου να διαπιστωθεί η μονιμότητα ή όχι του σήματος και συνεπώς να γίνει διάκριση μεταξύ των σημάτων που προέρχονται από το σύστημα της κινητής τηλεφωνίας και όλων των υπόλοιπων τα οποία και χαρακτηρίζονται ως παρεμβολές.
21. Για την περίπτωση σημάτων radar η διάρκεια καταγραφής (max hold) θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη (εξαρτάται από την συχνότητα επανάληψης παλμών (RPF) και τη γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του radar), προκειμένου να πετύχουμε πλήρη και αξιόπιστη καταγραφή του φάσματος συχνοτήτων αυτού.

Όλοι οι παραπάνω χειρισμοί των παραμέτρων του αναλυτή φάσματος (Start Frequency, Stop Frequency, Span, Resolution Bandwidth, Sweep Time, Max Hold) γίνονται είτε χειροκίνητα μέσω του χειριστηρίου του αναλυτή φάσματος, είτε μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η επικοινωνία μεταξύ αναλυτή φάσματος και υπολογιστή γίνεται με τη χρήση GPIB PCI κάρτας (IEEE-488 πρωτόκολλο επικοινωνίας) μέσω κατάλληλου προγράμματος το οποίο έχει αναπτυχθεί από το εργαστήριο και η αξιοπιστία του οποίου ελέγχεται με παρατήρηση της οθόνης του αναλυτή φάσματος ως προς την ενεργοποίηση ή όχι των παραμέτρων που εισάγονται από τον υπολογιστή. Ο σκοπός του ελέγχου του αναλυτή

φάσματος μέσω υπολογιστή είναι η καταγραφή των αποτελεσμάτων των μετρήσεων να γίνεται εκτός από την απ' ευθείας εκτύπωση και στο σκληρό δίσκο του H/Y προκειμένου να είναι δυνατή η επεξεργασία τους στο εργαστήριο.

Το αρχείο μέτρησης που δημιουργείται στον υπολογιστή είναι σε ASCII format και περιέχει δύο στήλες. Η πρώτη αντιστοιχεί στη συχνότητα μέτρησης σε Hz και η δεύτερη στην αντίστοιχη τιμή ισχύος πεδίου (dBm) στην είσοδο του αναλυτή φάσματος. Οι αποθηκευμένοι αριθμοί είναι είτε σε μορφή κινητής υποδιαστολής (1.2345E+2), είτε σε μορφή σταθερής υποδιαστολής χωρίς περιορισμό στο μήκος ακεραίου και δεκαδικού μέρους. Η υποδιαστολή είναι ο χαρακτήρας της τελείας ".". Οι στήλες διαχωρίζονται μεταξύ τους με κενά, χωρίς να είναι απαραίτητη η κατακόρυφη στοίχιση των στοιχείων.

Σε ξεχωριστό αρχείο κειμένου αποθηκεύονται τα δεδομένα σχετικά με τα αρχεία των μετρήσεων. Το αρχείο αυτό περιέχει τόσες γραμμές, όσα είναι και τα αρχεία των μετρήσεων. Σε κάθε γραμμή δίνεται το όνομα του αρχείου μετρήσεων, η ημερομηνία μέτρησης, η ώρα μέτρησης, η τοποθεσία και σχετικό σχόλιο για την κατεύθυνση της κεραίας. Καθένα από αυτά τα 5 πεδία χωρίζεται από το επόμενο με τον χαρακτήρα "#".

Διαδικασία Backup

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων τα αρχεία μετρήσεων και δεδομένων μεταφέρονται μέσω δισκέτας από τον φορητό υπολογιστή μετρήσεων (Laptop) σε υπολογιστή του εργαστηρίου τόσο για επεξεργασία των δεδομένων (στάδια 5.1, 5.2, 5.3) όσο και για ασφάλεια (backup). Επιπρόσθετα, τα αρχεία αυτά καταγράφονται και σε CD-ROM με σκοπό την διατήρηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων στα αρχεία του εργαστηρίου.

Παρατήρηση 1

Τα παραπάνω κριτήρια παρεμβολών αφορούν κυρίως τις παρεμβολές από σήματα που εκπέμπουν μέσα στο φάσμα της εταιρείας κινητής τηλεφωνίας (1760–785 MHz, 1855–1880 MHz). Αυτό είναι φυσικό αφού στο συγκεκριμένο φάσμα συχνοτήτων έπρεπε να διαχωριστεί το χρήσιμο σήμα από τυχόν άλλα σήματα που παρεμβάλλουν. Στο υπόλοιπο φάσμα του DCS 1800 (1710-1760 MHz και 1805-1855 MHz) λόγω του ότι έπρεπε να είναι κενό από πλευράς εκμετάλλευσης από άλλες εταιρείες πέραν των τηλεπικοινωνιών οποιοδήποτε σήμα βρισκόταν χαρακτηριζόταν ως παρεμβολή. Φυσικά δεν υπήρχε η πρόσθετη δυσκολία του διαχωρισμού αφού υπήρχαν μόνο τους στο φάσμα.

Παρατήρηση 2

Ο έλεγχος για παρεμβολές από radar γίνεται θέτοντας μεγάλο χρόνο αναζήτησης στο MAX HOLD (μερικά λεπτά), ώστε να μπορεί να καταγραφεί η μεγάλη περίοδος περιστροφής

του (περίπου 6 στροφές το λεπτό), και το PRF (Pulse Repetition Frequency) του radar που είναι ο αριθμός των παλμών ανά μονάδα χρόνου, συνήθως ανά δευτερόλεπτο. Επίσης απαιτείται RES BW μεγαλύτερο από 300 KHz.

Παρατήρηση 3

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή οι μετρήσεις ξεκινάγανε το πρωί και τελειώνανε το βράδυ μπορούσε να διαπιστωθεί αν κάποιες παρεμβολές ήταν συνεχείς (24^h λειτουργία) ή περιοδικές (κάποιες ώρες της ημέρας μόνο). Επίσης σε ολόκληρο το εύρος ζώνης του downlink της εταιρείας κινητής τηλεφωνίας ήταν δύσκολη η εύρεση παρεμβολών λόγω του πολύ δυνατού σήματος των σταθμών βάσης. Η συγκεκριμένη μάλιστα θα μπορούσε να διερευνηθεί πιο σωστά μόνο εάν κλείνανε οι σταθμοί βάσης πράγμα που ήταν αδύνατον.

Παρατήρηση 4

Λόγω του γεγονότος ότι η επεξεργασία των μετρήσεων θα γινόταν πολλές μέρες μετά το πέρας των μετρήσεων στην ύπαιθρο και λόγω του μεγάλου αριθμού αρχείων είχε διαπιστωθεί πως ήταν εξαιρετικά δύσκολο να θυμόμαστε λεπτομέρειες για την κάθε καταγραφή σήματος που κάναμε. Για τον λόγο αυτό πέρα των στοιχείων που περνάγαμε στο PC πριν την καταγραφή ενός σήματος είχαμε φτιάξει πίνακες, όπου γράφαμε και εκεί τα στοιχεία αυτά, καθώς και διάφορα σχόλια. Τα σχόλια αυτά αποδείχτηκαν αργότερα στην επεξεργασία των μετρήσεων ιδιαίτερα χρήσιμα, αφού μας βοηθούσαν να θυμηθούμε και να καταλάβουμε τα σήματα που απεικονίζονταν. Έτσι λοιπόν σχόλια και παρατηρήσεις όπως γενική κατεύθυνση του σήματος (π.χ προς Πάρνηθα), αναγνώριση σταθμού, χαρακτηρισμός (π.χ ψηφιακός, ραδιοφωνικός), ισχύς και πολλές άλλες λεπτομέρειες σημειώνονταν για μελλοντική χρήση.

Π. 5.10 Επεξεργασία Μετρήσεων

Εισαγωγή

Οι μετρήσεις της έντασης πεδίου είναι απαραίτητες στον υπολογισμό της ποσότητας της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Αν μία ηλεκτρική συσκευή παράγει τυχαία σήματα που μπορεί να παρεμβάλλουν σε μία άλλη κοντινή συσκευή, τότε είναι απαραίτητη η μέτρηση της έντασης του πεδίου.

Ένταση Πεδίου

Μία μέτρηση της έντασης πεδίου είναι μία μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε volts/μέτρο, όπως δίδεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$E = \sqrt{120\pi P} \quad (5)$$

όπου:

E : rms τιμή της έντασης πεδίου σε volts/μέτρο

P : πυκνότητα ισχύος σε watt/ μέτρο²

120π : αντίσταση του κενού χώρου σε ohms

Πυκνότητα Ισχύος

Η ένταση πεδίου είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της πυκνότητας ισχύος. Η πυκνότητα ισχύος, που συχνά αποκαλείται και πυκνότητα φάσματος, είναι μία μέτρηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο στο χώρο. Η μονάδα μέτρησης της πυκνότητας ισχύος είναι το watt/ m² όπως φαίνεται στη ακόλουθη σχέση:

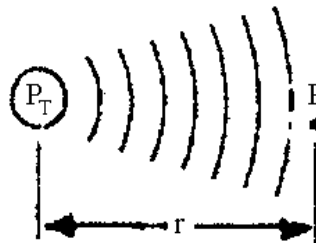
$$P = \frac{P_T}{4\pi r^2} \quad (6)$$

όπου:

P : πυκνότητα ισχύος σε watt/m²

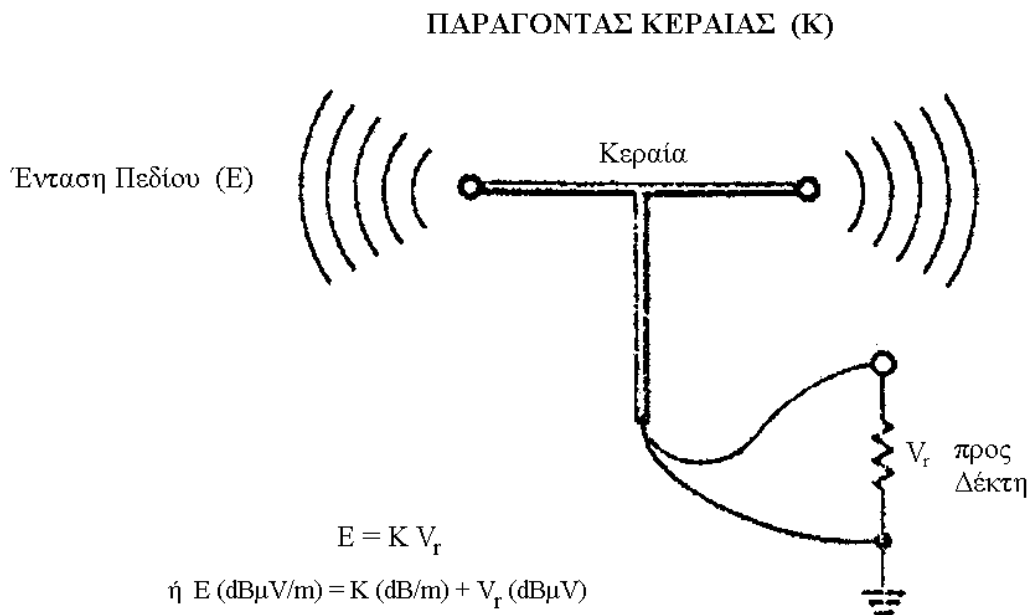
P_T : μεταδιδόμενη ισχύς σε watt

r : απόσταση σε μέτρα



Παράγοντας Κεραίας

Η μετατροπή της ένδειξης τάσης στο δέκτη σε ένταση πεδίου (volts/m) απαιτεί την πρόσθεση ενός παράγοντα μετατροπής (σε dB) στην ένδειξη του δέκτη. Αυτός ο αριθμός ονομάζεται παράγοντας κεραίας και συνήθως παρέχεται από τον κατασκευαστή της κεραίας. Στο ακόλουθο σχήμα επεξηγείται η μαθηματική σχέση του παράγοντα κεραίας σε γραμμική και λογαριθμική μορφή.



Όπου E: Ένταση Πεδίου σε Volts/m (ή dBμV/m)
K: Παράγοντας Κεραίας σε 1/m (ή dB/m)
V_r: Τάση Δέκτη σε Volt (ή dBμV)

Τεχνική Μετρήσεων

Προκειμένου να μετρήσουμε ένταση πεδίου, απαιτείται μία βαθμονομημένη (calibrated) κεραία και ένας συντονισμένος δέκτης. Η κεραία χρησιμοποιείται στη μετατροπή του εκπεμπόμενου ηλεκτρικού πεδίου από volts/m σε volts, ώστε να καταστεί δυνατή η μέτρηση από το δέκτη. Ο αναλυτής φάσματος είναι ένας δέκτης συντονισμού σάρωσης που απεικονίζει την τάση εξόδου της κεραίας στον κατακόρυφο άξονα της οθόνης του και τη συχνότητα στον οριζόντιο άξονα. Επιπλέον, είναι δυνατό να μετρηθούν πολλές διαφορετικές συχνότητες, από τη στιγμή που ο αναλυτής φάσματος είναι συνήθως ένα όργανο ευρείας ζώνης.

Κέρδος Κεραίας

Αν είναι γνωστό το κέρδος της κεραίας και όχι ο παράγοντας κεραίας, τότε η ακόλουθη εξίσωση επιτρέπει τη μετατροπή από το κέρδος της κεραίας στον παράγοντα της κεραίας:

$$K = 20 \cdot \log f - G_{dB} - 29,8 \text{ dB} \quad (\text{για σύστημα } 50 \Omega) \quad (7)$$

όπου:

- K : παράγοντας κεραίας σε dB/m
f : συχνότητα μέτρησης σε MHz
G : κέρδος κεραίας σε dB (λόγος ισχύος)

Ο προσδιορισμός της ισχύος που λαμβάνει μία κεραία γίνεται με πολλαπλασιασμό της πυκνότητας ισχύος με την ενεργό επιφάνεια της κεραίας, η οποία ορίζεται ως:

$$A_r = \frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi} \quad (\text{m}^2) \quad (8)$$

Ακόλουθα, η ισχύς που λαμβάνεται από την κεραία προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$P_r = P \cdot A_r = \frac{P \cdot G \cdot \lambda^2}{4\pi} \quad (\text{watts}) \quad (9)$$

όπου:

- P : πυκνότητα ισχύος σε watts/μέτρο²
G : κέρδος κεραίας
λ : μήκος κύματος σε μέτρα

Συνδυάζοντας τη τελευταία εξίσωση και τη σχέση (5) προκύπτει:

$$P_r = \frac{E^2 \cdot G \cdot \lambda^2}{480\pi^2} \quad (10)$$

Επίσης, επειδή:

$$P_r = \frac{V_r^2}{Z_0} \quad (11)$$

όπου:

V_r : λαμβανόμενη τάση

Z_0 : αντίσταση εισόδου δέκτη

προκύπτει τελικά ότι:

$$\frac{V_r^2}{Z_0} = \frac{E^2 \cdot G \cdot \lambda}{480\pi^2} \quad (12)$$

Γνωρίζοντας ότι:

$$\lambda(\text{m}) = \frac{300}{f(\text{MHz})} \quad (13)$$

μπορούμε να απλοποιήσουμε και με κατάλληλη μετατροπή προκύπτει ότι:

$$E = \frac{V_r \cdot f \cdot \pi}{75} \sqrt{\frac{30}{Z_0 \cdot G}} \quad (14)$$

Από τον ορισμό του παράγοντα κεραίας:

$$K = \frac{E}{V_r} \quad (15)$$

προκύπτει:

$$K = \frac{f \cdot \pi}{75} \sqrt{\frac{30}{Z_0 \cdot G}} \quad (16)$$

ή, σε λογαριθμική μορφή:

$$K = 20\log f(\text{MHz}) - G_{\text{dB}} - 29,78 \text{ dB} (Z_0 = 50 \Omega) \quad (17)$$

Παρόμοια υπολογίζεται ο παράγοντας κεραίας K για σύστημα 75Ω , οπότε είναι:

$$K = 20\log f(\text{MHz}) - G_{\text{dB}} - 31,54 \text{ dB} (Z_0 = 75 \Omega) \quad (18)$$

Ρύθμιση Αναλυτή Φάσματος

Οι αναλυτές φάσματος συνήθως ρυθμίζονται σε dBm. Επομένως απαιτείται μετατροπή σε τάση. Για να είναι δυνατή η ένδειξη σε dBμV (dB ανηγμένα σε 1 μV) απλά προστίθενται 107 dB στην ένδειξη που είναι σε dBm. Είναι δηλαδή:

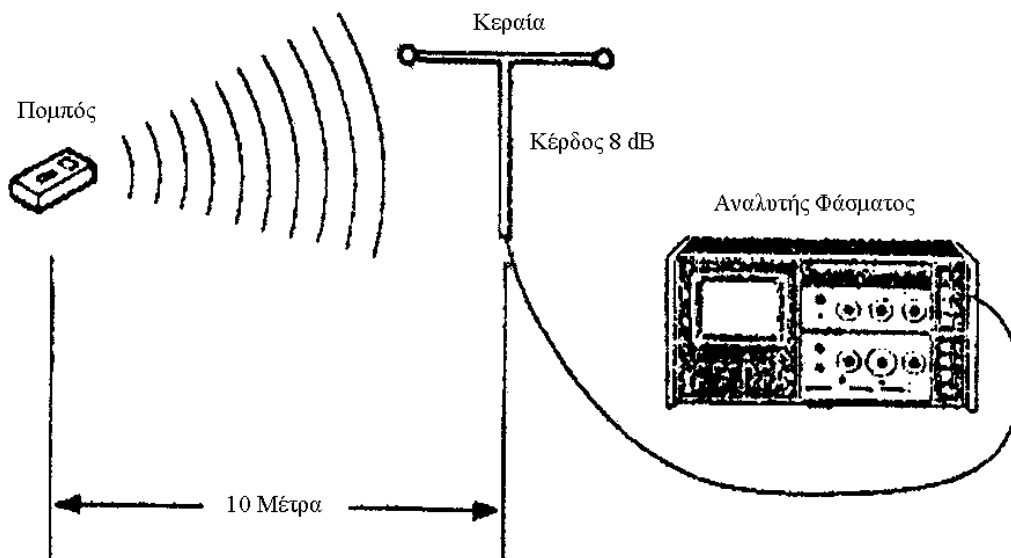
$$\text{dB}\mu\text{V} = \text{dBm} + 107\text{dB} \quad (\text{για σύστημα } 50\ \Omega) \quad (19)$$

Παράγοντες Μετατροπής Μονάδων

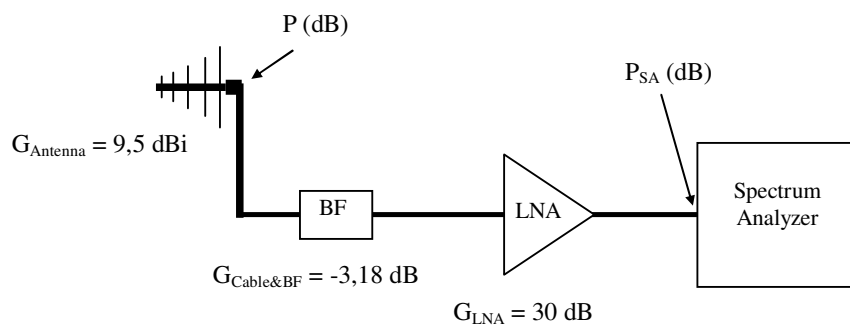
Z_0	dBm	=	dBmV	=	dBμV
50 Ω	0	=	47	=	107
75 Ω	0	=	48,75	=	108,75

Παράδειγμα

Έστω ότι απαιτείται η μέτρηση της έντασης του πεδίου για να προσδιοριστεί η ποσότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο πομπός μιας γκαραζόπορτας. Ο πομπός βρίσκεται 10 μέτρα μακριά από τη διάταξη μέτρησης. Έστω ότι η κεραία έχει κέρδος 8 dB και το σήμα που μετρήθηκε από τον αναλυτή φάσματος είναι -80 dBm στα 320 MHz.



Επειδή δίδεται μόνο το κέρδος της κεραίας απαιτείται η χρήση της εξίσωσης (17) για τη



μετατροπή του κέρδους σε παράγοντα κεραίας:

$$\begin{aligned}
 K &= 20 \cdot \log f - G_{dB} - 29,8 \text{ dB} \\
 K &= 20 \cdot \log(320) - 8 - 29,8 \\
 K &= 12,3 \text{ dB/μέτρο}
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Με πρόσθεση 107 dB μετατρέπεται η ένδειξη του αναλυτή φάσματος σε dBμV:

$$-80 \text{ dBm} + 107 \text{ dB} = 27 \text{ dBμV}
 \tag{21}$$

Η ένταση πεδίου E είναι το άθροισμα της τροποποιημένης ένδειξης του αναλυτή φάσματος και του παράγοντα διάταξης:

$$E = \underbrace{27 \text{ dBμV}}_{\text{Ένδειξη Αναλυτή}} + \underbrace{12,3 \text{ dB/μέτρο}}_{\text{Παράγοντας Κεραίας}} = 39,3 \text{ dBμV/μέτρο}
 \tag{22}$$

Η μετρούμενη ποσότητα που καταγράφηκε στον υπολογιστή (σε αρχεία μορφής *.dat) ήταν η ισχύς στην είσοδο του αναλυτή φάσματος P_{SA} (dBm) συναρτήσει της συχνότητας. Η ισχύς στην είσοδο της κεραίας P (dBm) υπολογίζεται από την ισχύ στην είσοδο του αναλυτή φάσματος P_{SA} (dBm) αφαιρώντας το συνολικό κέρδος της διάταξης, με βάση το ακόλουθο σχήμα.

$$P \text{ (dBm)} = P_{SA} \text{ (dBm)} - G_{LNA} \text{ (dB)} - G_{cable\&BF} \text{ (dB)} - G_{Antenna} \text{ (dbi)} \Rightarrow$$

$$P \text{ (dBm)} = P_{SA} \text{ (dBm)} - 30 - (-3,18) - 9,5 \Rightarrow$$

$$P \text{ (dBm)} = P_{SA} \text{ (dBm)} - 40,88 \text{ (dB)}
 \tag{23}$$

Η τιμή P (dBm) μετατρέπεται σε ένταση ηλεκτρικού πεδίου (dBμV/m) (στην είσοδο της κεραίας του δέκτη). Αυτό γίνεται διότι απαιτείται η μετρούμενη ποσότητα της λαμβανόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας να είναι ανεξάρτητη της κεραίας (και κατά επέκταση της μετρητικής διάταξης). Έτσι είναι εύκολη η επαλήθευση των μετρήσεων αφού πλέον είναι ανεξάρτητες των χαρακτηριστικών της κεραίας.

Με βάση τις προδιαγραφές του ETSI, GSM 05.05 version 6.2.0, 7/1998 και GSM 05.05-ETS300577 version 4.23.0, για την μετατροπή της τιμής από dBm σε dBμV/m και τις σχέσεις (5.3) και (5.15) καταλήγουμε στον ακόλουθο τύπο:

$$E\left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}\right) = P(\text{dBm}) + 107(\text{dB}) + 20\log f_{\text{MHz}} - 29,8(\text{dB}) \quad (24)$$

Με βάση τις σχέσεις (23) και (24) προκύπτει η ακόλουθη σχέση, η οποία χρησιμοποιείται στις γραφικές παραστάσεις:

$$E\left(\frac{\text{dB}\mu\text{V}}{\text{m}}\right) = P_{\text{SA}}(\text{dBm}) + 20\log f_{\text{MHz}} + 40,88(\text{dB}) \quad (25)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στους παραπάνω υπολογισμούς έχει ληφθεί υπόψη ως χαρακτηριστική αντίσταση του συστήματος τα 50Ω.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Proakis, *Digital Communications*, 3rd Edit., McGraw-Hill, 1995.
- [2] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, IEEE Press Classic Reissue, 1974.
- [3] V. H. MacDonald, "The cellular concept", Bell System Tech. J. vol. 58, pp. 15-43, Jan. 1979.
- [4] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Design Fundamentals*, New York: Howard W. Sams, 1986.
- [5] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, New York: McGraw-Hill, 1982.
- [6] J-P. Linnartz, *Narrowband Land-Mobile Radio Networks*, Artech House, 1993.
- [7] "Δορυφορικές τηλεπικοινωνίες", Χρ. Καψάλης, Παν. Κωτής, Ε.Μ.Π. Αθήνα 1988.
- [8] "Το πανευρωπαϊκό σύστημα κινητής τηλεφωνίας GSM και η εφαρμογή του στην Ελλάδα", Δ. Σούλης, Αθήνα, Μάρτιος 1992.
- [9] Σημειώσεις μαθήματος "Κινητή Τηλεφωνία", Παν. Βαρζάκας, Τ.Ε.Ι. ΛΑΜΙΑΣ, Τμήμα Ηλεκτρονικής, 1995.
- [10] "Επικοινωνίες Κινητών", Γ. Τόμπρας, Πανεπ. Αθηνών, Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Ηλεκτρονικής, Μάιος 1997.
- [11] Διδακτορική διατριβή Παν. Βαρζάκα, "Μέθοδος εκτίμησης φασματικής απόδοσης συστημάτων επικοινωνιών κινητών", Αθήνα 1999.
- [12] W. C. Y. Lee, "Overview of Cellular CDMA", IEEE Trans. on Veh. Technology, vol. 40, no. 2, pp. 291-302, May 1991.
- [13] K. S. Gilhousen et al. "On the capacity of a cellular CDMA system", IEEE Trans. on Veh. Technology, VT-40, no. 5, pp. 303-312, May 1991.
- [14] W. C. Y. Lee, "Elements of Cellular Mobile Radio Systems", IEEE Trans. on Veh. Technology, VT-35, no. 2, pp. 48-56, May 1986.
- [15] V. H. MacDonald, "The cellular concept", Bell System Tech. J. vol. 58, pp. 15-43, Jan. 1979.
- [16] On-C. Yue, "Design trade-offs in cellular/PCS systems", IEEE Commun. Magazine, pp. 146-152, Sept. 1996.
- [17] F. Adachi, M. Sawahashi and H. Suda, "Wideband DS-CDMA for Next-Generation Mobile Communications Systems", IEEE Communications Magazine, pp. 56-69, Sept. 1998.

- [18] G. R. Cooper and C. D. McGillem, *Modern Communications and Spread Spectrum*, McGraw-Hill, New York, 1986.
- [19] R. C. Dixon, *Spread Spectrum Systems*, J. Wiley & Sons, New York, 1976.
- [20] R. L. Pickholtz, D. L. Scilling and L. B. Milstein, "Theory of Spread Spectrum Communications-A Tutorial", *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-30, no. 5, pp. 855-884, May 1982.
- [21] Α. Αλεξανδρίδης, "Χρήση ορθογωνίων ακολουθιών μικρού μήκους σε συστήματα πολύπλεξης με διαίρεση κωδίκων (CDM)-Εφαρμογή σε τοπικό τηλεπικοινωνιακό δίκτυο", Διδακτορική διατριβή, Πάτρα 1992.
- [22] R. L. Pickholtz, L. B. Milstein and D. L. Scilling, "Spread Spectrum for Mobile Communications", *IEEE Trans. on Veh. Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 313-322, May 1991.
- [23] B. Sklar, *Digital Communications, Fundamentals and Applications*, Prentice Hall International Editions, 1988.
- [24] A. Papoulis, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 3rd Edit, McGraw-Hill, 1991.
- [25] F. Adachi, M. Sawahashi and H. Suda, "Wideband DS-CDMA for Next-Generation Mobile Communications Systems", *IEEE Communications Magazine*, pp. 56-69, Sept. 1998.
- [26] [TS25401] 3G TS 25.401, "UTRAN Overall Description", (v4.0.0, 2001-03).
- [27] K. Singh, and H. Schulzrinne, "Unified Messaging using SIP and RTSP", October 2000.
- [28] H. Holma, A. Toskala, "WCDMA for UMTS", Wiley, 2000.
- [29] T. Ojanperä, R. Prasad, "Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications", Artech House Publisher, 1988.
- [30] Joseph Shapira, "Microcell Engineering in CDMA Cellular Networks", *Trans. On Vehicular Technology*, Vol. 43, No 4, November 1994
- [31] UMTS/IMT-2000 Spectrum, No 6 Report from the UMTS Forum, 1999.
- [32] Ad Kamerman, "Coexistence between Bluetooth and IEEE 802.11 CCK Solutions to avoid mutual interference".
- [33] IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11b-1999.
- [34] ETSI TS 101 475 V1.1.1 (2000-04) Technical Specification, Broadband Radio Access Networks, (BRAN); HIPERLAN Type 2; Physical (PHY) layer

ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ

ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ