

# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ



ΤΜΗΜΑ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΜΣ-ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΨΗΦΙΑΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ & ΔΙΚΤΥΑ

Μελέτη συστήματος πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα σε  
ασύρματο κανάλι επικοινωνίας

Σάββας Μακρής

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Πειραιάς 2011

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάμε την επίδοση συστήματος πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (code division multiple access, CDMA) σε ένα ασύρματο κανάλι επικοινωνίας το οποίο μοντελοποιείται με Rayleigh διάλειαση. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα διάφορα ψηφιακά συστήματα για ασύρματα κυψελωτά συστήματα τα οποία έχουν υλοποιηθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Ιδιαίτερα αναφερόμαστε στα συστήματα τρίτης γενιάς (3<sup>rd</sup> generation, 3G) τα οποία χρησιμοποιούν τεχνολογία ευρέως φάσματος (spread spectrum, SS) με CDMA. Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται σε αυτή τη τεχνολογία ασύρματης μετάδοσης με πολλαπλή πρόσβαση και αναφέρει αναλυτικά τους κώδικες που χρησιμοποιούνται και τα χαρακτηριστικά τους. Επίσης γίνεται αναφορά στα πρότυπα κινητών επικοινωνιών που βασίζονται στη τεχνολογία CDMA, όπως IS-95, CDMA2000, WCDMA, κτλ. Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάμε τα πλεονεκτήματα της χρήσης τεχνολογίας SS-CDMA και τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη χωρητικότητα ενός τέτοιου συστήματος. Στο τέταρτο κεφάλαιο υλοποιούμε στο λογισμικό Matlab τους κώδικες που χρησιμοποιούν τα συστήματα CDMA και επαληθεύουμε τις ιδιότητες τους ως προς τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης. Στο πέμπτο κεφάλαιο παράγουμε Gold codes από προτεινόμενα ζεύγη των m-sequences και μελετάμε τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης που έχουν. Τέλος εισάγουμε τον orthogonal Gold code. Στο έκτο κεφάλαιο δημιουργούμε το σύστημα προσομοίωσης για εύρεση της επίδοσης bit error rate (BER) σε ασύρματο κανάλι Rayleigh με πολλαπλούς χρήστες. Με τη βοήθεια της προσομοίωσης υπολογίζουμε την επίδοση του συστήματος όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνει και συγκρίνουμε το BER για διαφορετικούς κώδικες CDMA.

## Περιεχόμενα

<b>1. Εξέλιξη Των Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων .....</b>	<b>5</b>
1.1. Ανάπτυξη κυψελωτών δικτύων .....	6
1.2. Κυψελωτά συστήματα 1 <sup>ης</sup> γενιάς – 1G .....	10
1.3. Κυψελωτά συστήματα 2 <sup>ης</sup> γενιάς – 2G .....	14
1.4. Κυψελωτά συστήματα πέραν της 2 <sup>ης</sup> γενιάς – 2.5G .....	19
1.5. Κυψελωτά συστήματα 3 <sup>ης</sup> γενιάς – 3G .....	20
1.6. Κυψελωτά συστήματα 4 <sup>ης</sup> γενιάς – 4G .....	25
1.6.1. Κινητά συστήματα 4G .....	26
1.6.2. Απαιτήσεις συστημάτων 4G .....	26
<b>2. Συστήματα κινητών επικοινωνιών με χρήση της τεχνικής CDMA .....</b>	<b>28</b>
2.1. Multiple Access Interference (MAI) .....	29
2.2. Κώδικες CDMA .....	30
2.2.1. Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (ACF) .....	32
2.2.2. Συνάρτηση ετεροσυσχέτισης (CCF) .....	33
2.3. Ημιορθογώνιες ακολουθίες .....	34
2.3.1. M-Ακολουθίες .....	34
2.3.2. Ακολουθίες Gold .....	34
2.3.3. Ακολουθίες Kasami .....	35
2.4. Ορθογώνιες Ακολουθίες .....	36
2.4.1. Ακολουθίες Walsh-Hadamard (WH) .....	36
2.5. Πρότυπα κινητών επικοινωνιών βασισμένα στη Τεχνική CDMA .....	37
2.5.1. Το πρότυπο IS-95 .....	37
2.5.2. Το πρότυπο UMTS ή IMT-2000 .....	39
2.5.3. Τεχνική Wideband CDMA .....	39
2.5.4. WCDMA .....	40
2.5.5. CDMA2000 .....	42
<b>3. Πλεονεκτήματα Χρήσης Της Τεχνικής CDMA .....</b>	<b>43</b>
3.1. Ανίχνευση δραστηριότητας φωνής (VAD) .....	43
3.2. Μειωμένη χωρητικότητα .....	43
3.3. Πολλαπλές διαδρομές .....	44
3.4. Χρήση Sectorization για την αύξηση της χωρητικότητας .....	44
3.5. Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων .....	44
3.6. Χωρητικότητα του CDMA .....	45
3.6.1. Εφαρμογή Τομεοποίησης .....	46
3.6.2. Ανίχνευση δραστηριότητας φωνής .....	47
<b>4. Ιδιότητες Κωδικών CDMA .....</b>	<b>48</b>
<b>5. Παραγωγή Κωδικών CDMA .....</b>	<b>56</b>
5.1. M-sequence .....	56

5.2. Gold Sequence .....	61
5.3. Orthogonal Gold Sequence .....	65
<b>6. Υπολογισμός BER με Matlab .....</b>	<b>66</b>
6.1. Υπολογισμός BER σε περιβάλλον AWGN με πολλαπλούς χρήστες .....	73
6.2. Υπολογισμός BER σε περιβάλλον Rayleigh Fading .....	75
<b>7. Βιβλιογραφία .....</b>	<b>78</b>

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΑΙΑ

# 1. ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Η ασύρματη κινητή βιομηχανία ξεκίνησε πολλές δεκαετίες πριν με συστήματα τα οποία η επικρατούσα τεχνολογία εκείνων των ημερών μπορούσε να υποστηρίξει. Τα πρώτα συστήματα βρήκαν περιορισμένη χρήση σε τομείς όπως η δημόσια ασφάλεια, μεταφορές, κυβερνητικές κρατικές υπηρεσίες και άλλες παρόμοιες υπηρεσίες. Η έλλειψη ραδιοσυχνοτήτων, οι αναποτελεσματικές τεχνικές μεταδόσης για τον ασύρματο δίαυλο αλλά και η ανώριμη τότε τεχνολογία υλικού και λογισμικού έκανε αυτά τα συστήματα αρκετά ακριβά και δύσκολα προσβάσιμα από την εμπορική αγορά. Όσο περνούσε ο χρόνος τεχνολογικές καινοτομίες επέτρεψαν το σχεδιασμό καινούργιων κινητών συστημάτων που ήταν ικανά να αξιοποιήσουν το διαθέσιμο ραδιοφάσμα και επίσης να επιτρέψουν βελτιωμένη λειτουργικότητα και αξιοπιστία. Τελικά η πρόσβαση στο δημόσιο τηλεφωνικό σύστημα έγινε διαθέσιμη με κινητά ραδιοσυστήματα που όμως είχαν περιορισμένη χωρητικότητα. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν νέα και πιο αποτελεσματικά κυψελωτά τηλεφωνικά συστήματα. Από το ξεκίνημα των κυψελωτών υπηρεσιών στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, περίπου είκοσι χρόνια πριν, υπήρχε μία φοβερή επέκταση των κυψελωτών υπηρεσιών η οποία είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πανεθνικών δικτύων που προσφέρουν υπηρεσίες φωνής αλλά και δεδομένων. Αυτά τα συστήματα έχουν υποβληθεί σε ριζικές αλλαγές που βελτίωσαν την επίδοσή τους και τις παρεχόμενες υπηρεσίες τους και επομένως κέρδισαν την αποδοχή τους από το ευρύ κοινό. Σήμερα, τα κινητά κυψελωτά συστήματα έχουν πάνω από ένα δισεκατομμύριο συνδρομητές παγκοσμίως.

Τα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών στις αναπτυσσόμενες χώρες αλλά και σε όλο το κόσμο επιτρέπουν την παροχή άμεσης τηλεφωνικής υπηρεσίας στους νέους συνδρομητές, που σε διαφορετική περίπτωση θα χρειαζόταν να περιμένουν πολλά χρόνια για την πρόσβαση των καλωδιώσεων. Οι ασύρματοι χρήστες έχουν ξεπεράσει αριθμητικώς τους περίπου 700 εκατομμύρια ενσύρματους τηλεφωνικούς χρήστες παγκοσμίως. Ο αριθμός των νέων ασύρματων συνδρομητών αυξάνεται 15 φορές γρηγορότερα από ότι οι ενσύρματοι συνδρομητές, και αυτός ο ρυθμός αναμένεται για να μεγαλώσει κατά τα ερχόμενα έτη [1].

Τα ασύρματα συστήματα κινητών τηλεφώνων μπορούν να διακριθούν σε τρεις γενιές [2]-[12]:

1. Η πρώτη γενιά, που εισάγεται στη δεκαετία του '80 και νωρίς τη δεκαετία του '90, χρησιμοποιεί την αναλογική κυψελοειδή και ασύρματη τηλεφωνική τεχνολογία.
2. Τα δεύτερης γενιάς συστήματα διαβιβάζουν την ομιλία σε ψηφιακή μορφή. Παρέχουν προηγμένες υπηρεσίες που συμπεριλαμβάνουν και μερικές μη φωνητικές υπηρεσίες. Υπάρχουν δύο κατηγορίες δεύτερης γενιάς συστημάτων.
  - ⇒ Οι υψηλής ισχύος συσκευές αποστολής σημάτων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων high-tier systems με χρήση σταθμών βάσης με κάλυψη να κυμαίνεται σε τάξη μεγέθους χιλιομέτρων, και
  - ⇒ Τα συστήματα low-tier, εξυπηρετώντας συνδρομητές που κινούνται με ταχύτητα πεζών, έχουν τις χαμηλής ισχύος συσκευές αποστολής σημάτων σε τάξη μεγέθους 100 μέτρων. Μερικά από αυτά τα συστήματα σχεδιάζονται πρώτιστα για χρήση σε εσωτερικούς χώρους.
3. Τα συστήματα τρίτης-γενιάς, που εισήχθησαν μετά από το 2002, ενσωμάτωσαν ποικίλες υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων των ευρυζωνικών υπηρεσιών, που δεν μπορούσαν να υποστηριχτούν από τη τεχνολογία δεύτερης γενιάς [13].

Πολλοί χρήστες αναμένουν με ενδιαφέρον την αυξανόμενη ευκολία που υπόσχεται η ολοκλήρωση ή η συμβατότητα όλων των συστημάτων. Εκτός από τα επίγεια συστήματα κινητών τηλεφώνων, άλλα εμπορικά ασύρματα συστήματα περιλαμβάνουν τις δορυφορικές επικοινωνίες, τα κινητά συστήματα δεδομένων, και τα ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής (LANs).

### **1.1. Ανάπτυξη κυψελωτών δικτύων**

Πέρα από τη χρήση σε στρατιωτικές και μεταφορικές βιομηχανίες μερικά από τα πρώτα συστήματα (τα οποία ήταν αυστηρά επίγεια και δύο κατευθύνσεων) άρχισαν τη λειτουργία τους στις αρχές του 1930 στις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτά τα συστήματα τυπικά χρησιμοποιούσαν από διάφορους τομείς δημόσιων υπηρεσιών

όπως αστυνομικά και πυροσβεστικά τμήματα. Λειτουργώντας με χαρακτηριστικά διαίρεσης χρόνου και αμφίδρομης επικοινωνίας ένας χρήστης ραδιοκινητού τη φορά μπορούσε να μιλήσει και έπειτα να χρησιμοποιήσει μία ειδική φρασεολογία του κινητού για να υποδείξει αν θα συνεχίσει ο συνομιλητής του ή αν τελείωσε η συνομιλία. Το 1946 η *AT&T* και η *Southwestern Bell* ξεκίνησαν τη λειτουργία μίας κινητής ραδιοτηλεφωνικής υπηρεσίας σε ιδιωτικούς πελάτες στο St. Louis του Missouri. Το σύστημα λειτουργούσε βασισμένο σε έναν μικρό αριθμό καναλιών για τα οποία εκδόθηκε άδεια από την *FCC* στην μπάντα των 150 MHz. Το 1947 η *AT&T* εκ μέρους της *Bell Operating Companies* έκανε αίτηση στην *FCC* για ένα επιπλέον φάσμα ραδιοσυχνοτήτων που θα χρησιμοποιούνταν από ένα κινητό ραδιοσύστημα το οποίο θα μπορούσε να συνδέσει τον χρήστη με το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο. Η *FCC* παραχώρησε ένα περιορισμένου αριθμού καναλιών για αυτή την εφαρμογή το 1949. Εκείνη τη περίοδο, η *FCC* ένιωθε ότι το ενδιαφέρον του κοινού εξυπηρετούνταν καλύτερα από τις δημόσιες επίγειες ραδιο-υπηρεσίες παρά από τη δημόσια χρήση της υπηρεσίας που πρότεινε η *AT&T*. Όμως, έτσι όπως εξελίχθηκε αυτή η νέα τεχνολογία, γνωστή και ως κινητή τηλεφωνική υπηρεσία (MTS), ήταν υπερβολικά γνωστή σε μεγάλες μητροπολιτικές περιοχές και η χωρητικότητα της έγινε παντελώς «ξοδομένη» στα μέσα του 1950. Τεχνολογικές βελτιώσεις όπως αυτόματη κλήση προστέθηκε γρήγορα στο MTS σύστημα κάνοντας πιο εύκολο στη χρήση και πιο «διάφανο» στο χρήστη.

Η ιδέα για τη κυψελωτή τηλεφωνία, για την οποία η πρώτη ιδέα ήταν στα τέλη της δεκαετίας του 40, αναπτύχθηκε με ελάχιστη προσπάθεια για έρευνα και ανάπτυξη στα μέσα της δεκαετίας του 50. Παρόλα αυτά η ιδέα της κυψελωτής τηλεφωνίας αλλά και πιθανά μοντέλα υλοποίησής της ήταν αντικείμενο αρκετών εσωτερικών τεχνικών μελετών των *Bell Labs* στα τέλη της δεκαετίας του 50. Παρά το γεγονός ότι τα *Bell Labs* έκανε αίτηση στη *FCC* για επιπλέον φάσμα για το σύστημα MTS το 1958, η *FCC* δεν ανταποκρίθηκε. Το 1964, το σύστημα της *Bell* λάνσαρε νέα και πιο ανεπτυγμένη υπηρεσία με το όνομα IMTS (Improved Mobile Telephone Service). Αυτή η νέα υπηρεσία επέτρεπε πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία (και οι δύο χρήστες μπορούσαν να μιλήσουν ταυτόχρονα) και παρείχε αυτόματη επιλογή καναλιών και πιο αποτελεσματική χρήση του φάσματος μειώνοντας την απόσταση των καναλιών μεταξύ τους. Ωστόσο, η IMTS δεν αύξησε τη χωρητικότητα του συστήματος αρκετά ώστε να ανταπεξέλθει στην ανάγκη του κοινού. Σε αυτό το σημείο αξίζει να

αναφερθεί ότι οι άλλοι πάροχοι κινητών υπηρεσιών, οι οποίοι κατείχαν τις μισές από τις διαθέσιμες συχνότητες εναντιώθηκαν αδιάκοπα στα αιτήματα του συστήματος της Bell προς τη FCC που είχε τελικά ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση οποιασδήποτε υλοποίησης νέων υψηλής χωρητικότητας τεχνολογιών. Εν τέλει μετά από 10 χρόνια, σε απάντηση των εκκρεμοτήτων που υπήρχαν και ανέφεραν τα αιτήματα των υπηρεσιών MTS και IMTS, η FCC ζήτησε τεχνικές προτάσεις και εισηγήσεις για ένα υψηλής χωρητικότητας και αποτελεσματικό κινητό τηλεφωνικό σύστημα για να βελτιώσει ή να αντικαταστήσει το υπάρχον σύστημα.

Η AT&T πρότεινε ένα νέο κινητό τηλεφωνικό σύστημα που βασιζόταν στην ιδέα των κυψελών. Μέσα από τη χρήση μικρών περιοχών κάλυψης που αλλιώς ονομάζονται κυψέλες (σχήμα οκταγώνου), μπορούν να χρησιμοποιηθούν πομποί χαμηλής ισχύος για να παρέχουν κάλυψη σε μία μητροπολιτική περιοχή. Επίσης η χρήση πομπών χαμηλής ισχύος και το περιορισμένο εύρος που καλύπτουν επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση των λιγοστών ραδιοσυχνοτήτων ή καναλιών που είναι διαθέσιμα σε ολόκληρο το σύστημα. Επιπλέον, το σύστημα μπορούσε να υλοποιήσει μία διαδικασία σύμφωνα με την οποία ο συνδρομητής μπορούσε να μετακινηθεί σε μία άλλη κυψέλη με διαδικασία handover χωρίς να υπάρξει κανένα ουσιαστικό πρόβλημα.

Το 1970, η Bell Laboratories με εξουσιοδότηση της FCC, δοκίμασε την ιδέα των κυψελών με διάφορα πρωτότυπα συστήματα που λειτούργησαν στις περιοχές Newark, New Jersey, Baltimore, Maryland. Το 1971 η Bell Laboratories έγραψε στις αναφορές της ότι οι δοκιμές απέδειξαν τη χρήση κυψελών με διάμετρο τόσο μικρή όσο τα 2.8 μίλια. Το 1974, η FCC διάθεσε κάτι περισσότερο από 40MHz φάσματος συχνοτήτων για την ανάπτυξη των πρώτων κυψελωτών συστημάτων βασισμένα στην αναλογική διαμόρφωση. Υπάρχουν αναφορές ότι το 1976, 545 πελάτες στη πόλη της Νέας Υόρκης είχαν κινητά τηλέφωνα του συστήματος της Bell και η λίστα αναμονής για αυτήν την υπηρεσία είχε πάνω από 3700 ονόματα γραμμένα σε αυτήν. Μετά και από άλλες καθυστερήσεις, το 1978, ένα δοκιμαστικό κυψελωτό τηλεφωνικό σύστημα γνωστό και ως Advanced Mobile Telephone System (**AMPS**), λειτούργησε για πρώτη φορά στη περιοχή του Σικάγο από την Illinois Bell και την AT&T χρησιμοποιώντας τη μπάντα των 800MHz που πρόσφατα ανατέθηκε σε αυτές. Σύντομα πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή υπηρεσιών με πραγματικούς πελάτες και τελικά απέδειξε ότι ένα αρκετά μεγάλο κυψελωτό σύστημα μπορούσε να δουλέψει χωρίς



κανένα πρόβλημα. Ακολούθησε η ανάπτυξη ενός παγκόσμια εμπορικού AMPS αλλά όχι στις Ηνωμένες Πολιτείες που λειτούργησε τελικά το 1983.

Τον Ιούλιο του ίδιου χρόνου η FCC ανακοίνωσε ένα δελτίο υπ' αριθμόν 53 από το γραφείο Τέχνης και τεχνολογίας (OST). Αυτό το δελτίο, με τίτλο «Κινητός σταθμός κυψελωτού συστήματος – Προδιαγραφές συμβατότητας με επίγειο σταθμό», παρέχει τις ουσιώδεις προδιαγραφές και έπειτα έγινε πρότυπο για το σύστημα AMPS. Αυτό το έγγραφο αναπτύχθηκε για να βεβαιώσει τη συμβατότητα των κινητών σταθμών με οποιοδήποτε κυψελωτό σύστημα λειτουργούσε εκείνη τη στιγμή στις Ηνωμένες Πολιτείες. Για να πετύχει το σκοπό του, έπρεπε το εν λόγω έγγραφο να καθορίσει και τις παραμέτρους του ραδιοσυστήματος αλλά και τις διαδικασίες επεξεργασίας των κλήσεων. Η ανακοίνωση αυτή του εγγράφου σήμανε τη χρήση τεχνικών προδιαγραφών και τεχνολογιών βασισμένων σε πρότυπα για την ανάπτυξη των μοντέρνων κυψελωτών συστημάτων.

Νωρίτερα, στο Τόκιο ένα σύστημα AMPS με 88 κυψέλες άρχισε να λειτουργεί, όπως επίσης και στις Σκανδιναβικές χώρες ένα ανάλογο αναλογικό, προσανατολισμένο στη φωνή, AMPS σύστημα λειτούργησε το 1981. Επίσης αυτά τα συστήματα αναφέρονταν και ως κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς. Αυτό το πρώτο πολυεθνικό σύστημα που αναφέρθηκε, γνωστό και ως Nordic Mobile Telephone (NMT) system, χρησιμοποίησε τη μπάντα των 450MHz και αμέσως έγινε ευρέως γνωστό.

Αρκετά διαφορετικά συστήματα εξελίχθηκαν σε διάφορες τεχνολογικά ανεπτυγμένες περιοχές στο κόσμο αφού καμία από αυτές δε περίμενε από τις Ηνωμένες Πολιτείες να δημιουργήσουν ένα παγκόσμιο πρότυπο. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούσαν ελαφρώς διαφορετικές τεχνολογικές υλοποιήσεις και πολλές φορές και διαφορετικό εύρος στο φάσμα των συχνοτήτων. Αυτή η ποικιλία στις μπάντες συχνοτήτων που χρησιμοποιούσε το κάθε σύστημα οφειλόταν στο γεγονός ότι κάθε χώρα έχει το δικό της γραφείο διεύθυνσης συχνοτήτων και συνεπώς έχει κάνει διαφορετικές ανακατατάξεις ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε χώρας. Οι αποφάσεις αυτές έχουν να κάνουν με υπηρεσίες που αφορούν μόνο τη χώρα αυτή. Μόνο τα τελευταία χρόνια όπου το World Administrative Radio Conference συνεδρίασε, άρχισαν να υπάρχουν αποτελέσματα για τη αρμονική χρήση διάφορων εύρων συχνοτήτων για την ίδια κινητή υπηρεσία.

Η κληρονομιά αυτής της πραγματικότητας υπάρχει ακόμα και σήμερα σε αρκετά κυψελωτά συστήματα πρώτης και δεύτερης γενιάς. Τα συστήματα τρίτης γενιάς θεωρητικά θα φέρουν το κόσμο πιο κοντά σε ένα παγκόσμιο στάνταρ αν και αρκετοί πιστεύουν ότι αυτή η μέρα είναι ακόμα πολύ μακριά.

Αν και καινούργια τεχνολογία αναπτύσσεται έτσι ώστε να αναβαθμίσει τη χωρητικότητα αλλά και τη λειτουργικότητα των κυψελωτών συστημάτων, εκτενής τεχνολογικά αλλαγές έχουν σχεδιαστεί για τα συστήματα των επόμενων γενεών. Πλάνα που έχουν να κάνουν με τη ψηφιακή διαμόρφωση αναφέρονται ως τεχνολογία δεύτερης γενιάς. Το σύστημα GSM που αναπτύχθηκε πρώτα στις Ευρωπαϊκές χώρες, θεωρείται τώρα παγκόσμια ως τεχνολογία δεύτερης γενιάς. Στα όρια μίας τεχνολογικής γενιάς, υπάρχουν αρκετές ενημερώσεις και αναβαθμίσεις για να μπορούν τα συστήματα να ανταπεξέλθουν στην εξελισσόμενη τεχνολογία, στις νέες κατανομές του φάσματος συχνοτήτων αλλά και στις καινούργιες εφαρμογές με τις οποίες εμπλουτιζόταν το σύστημα. Η ικανότητα στο να παρέχεται πρόσβαση δεδομένων με μεσαίες αλλά και υψηλές ταχύτητες από και προς το δημόσιο δίκτυο δεδομένων μέσω ενός κυψελωτού συστήματος οδήγησε σε ένα ενδιαμέσο σκαλοπάτι για την επόμενη γενιά κυψελωτών συστημάτων που αναφέρεται ως 2.5G. Η επόμενη γενιά κυψελωτών τηλεφώνων με λειτουργικότητα που πλησιάζει το πρόσφατα υιοθετημένο IMT-2000 πρότυπο αναφέρονται ως τεχνολογία τρίτης γενιάς.

## 1.2. Κυψελωτά συστήματα 1<sup>ης</sup> γενιάς – 1G

Από τα αρχικά ασύρματα συστήματα επικοινωνιών που επεκτάθηκαν στη δεκαετία του '80, το δημοφιλέστερο ήταν το αναλογικό ασύρματο τηλέφωνο, το οποίο χρησιμοποιεί το ραδιόφωνο για να συνδέσει ένα φορητό μικροτηλέφωνο με μια μονάδα που συνδέεται με καλώδιο στο δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγών. Εκατοντάδες εκατομμυρίων τέτοιων συσκευών έχουν παραχθεί, και η τεχνολογία έχει τυποποιηθεί στην Ευρώπη κάτω από τα ασύρματα τηλεφωνικά πρώτης γενιάς (CT0, CT1, και CT1+) πρότυπα. Δεν υπάρχει ούτε ένα αμερικάνικο πρότυπο. Τα αναλογικά ασύρματα τηλέφωνα περιορίζουν τις διατάξεις στις δεκάδες των μετρητών και απαιτούν μια αφιερωμένη τηλεφωνική γραμμή. Τα κυψελοειδή συστήματα έχουν επιτρέψει πολύ μεγαλύτερη κινητικότητα.

Στην καθιέρωση της κυψελοειδούς υπηρεσίας το 1983 η FCC διαίρεσε τις Ηνωμένες Πολιτείες σε 734 κυψελοειδείς αγορές (αποκαλούμενες ως μητροπολιτικές

στατιστικές περιοχές και αγροτικές περιοχές υπηρεσιών), κάθεμια με "A-side" και "B-side" κυψελοειδή φορέα παροχής υπηρεσιών. Ιστορικά, ο προσδιορισμός του A ή το B έδειξε την προέλευση του κυψελοειδούς προμηθευτή: Ένας προμηθευτής A δεν δημιουργήθηκε στην παραδοσιακή τηλεφωνική επιχείρηση και κλήθηκε μεταφορέας *nonwireline*, ενώ ένας B προμηθευτής είχε τις ρίζες στις παραδοσιακές υπηρεσίες και κλήθηκε μεταφορέας καλωδιώσεων. Κάθε κυψελοειδής μεταφορέας είναι χορηγημένος με άδεια για να χρησιμοποιήσει 25 MHz του ραδιοφάσματος στη ζώνη 800 MHz για να παρέχει τις διπλής κατεύθυνσης μεταδόσεις τηλεφωνίας και δεδομένων για την ιδιαίτερη αγορά του. Επειδή το αμερικάνικο αναλογικό κυψελοειδές σύστημα είναι τυποποιημένο με *AMPS*, οποιοδήποτε κυψελοειδές τηλέφωνο είναι σε θέση σε οποιοδήποτε μέρος της χώρας.

Οι *AMPS* είναι κυψελοειδείς τυποποιημένες χρήσεις αναλογικού *FM* και full-duplex ραδιοκαναλιών. Η πολλαπλή τεχνική πρόσβασης τμήματος συχνότητας (*FDMA*) επιτρέπει στους πολλαπλούς χρήστες να μοιραστούν την ίδια περιοχή φάσματος. Αυτά τα πρότυπα υποστηρίζουν την απευθείας επικοινωνία με τη χρήση απλών κινητών τηλεφώνων, αλλά οι μεταδόσεις είναι εύκολο να παρεμποδιστούν σε έναν τυποποιημένο ραδιοδέκτη και επομένως είναι ευαίσθητες σε υποκλοπές. Από τα τέλη του 1996, 88% των κυψελοειδών τηλεφώνων στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποίησαν τα πρότυπα *AMPS* (τα ψηφιακά κυψελοειδή πρότυπα μόνο πρόσφατα έχουν διατεθεί). Έξω από τις Ηνωμένες Πολιτείες και τον Καναδά έχει επεκταθεί μια ευρεία ποικιλία αναλογικών κυψελοειδών συστημάτων. Η ευρωπαϊκή κυψελοειδής υπηρεσία, που προηγήθηκε χρονικώς του συστήματος *AMPS*, χρησιμοποίησε τη σκανδιναβική κινητή τηλεφωνική (*NMT*) τυποποιημένη αρχή το 1982. Άλλα ευρωπαϊκά έθνη και η Ιαπωνία ανέπτυξαν επίσης τα αναλογικά πρότυπα. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα πρώτα αναλογικά, προσανατολισμένα σε φωνή, κυψελωτά τηλεφωνικά συστήματα, τα οποία έγιναν διαθέσιμα στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά τη διάρκεια του 1983 και στις υπόλοιπες χώρες στα τέλη της δεκαετίας του 70 με τις αρχές της δεκαετίας του 80, αναφέρονται ως τεχνολογία πρώτης γενιάς ή 1G.

Όλα τα κυψελωτά συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούν αναλογική διαμόρφωση συχνότητας για την μετάδοση των φωνητικών μηνυμάτων σε δύο διαφορετικές ζώνες. Μία για την επικοινωνία από τον σταθμό βάσης προς το κινητό (downlink) και η άλλη για την επικοινωνία από το κινητό προς το σταθμό βάσης (uplink). Αυτός ο

τύπος του συστήματος είναι γνωστός ως frequency division duplex (FDD). Επίσης μέσα στα όρια αυτών των δύο περιοχών συχνοτήτων που αναφέρθηκαν χρησιμοποιείται πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου (Frequency Division Multiplexing – FDM) για να αυξηθεί η χωρητικότητα του συστήματος. Τα ακριβή χαρακτηριστικά των καναλιών ήχου, άλλες λεπτομέρειες επεξεργασίας ήχου αλλά και η επιτρεπόμενη παρέκκλιση συχνοτήτων, ορίζονται από το συγκεκριμένο πρότυπο του συστήματος. Την απόσταση των καναλιών θέτει το κατάλληλο ρυθμιστικό γραφείο, όπως το FCC για τις Ηνωμένες Πολιτείες.

Αναγνωριστικοί αριθμοί (ID) ανατίθενται τόσο στο κυψελωτό σύστημα όσο και στη συσκευή του συνδρομητή. Αυτοί οι αριθμοί χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τη κατάσταση του κινητού (μέσα στη περιοχή του δικτύου ή σε κατάσταση roaming), για να εκτελεσθεί η αυθεντικοποίηση του κινητού και για να οριστεί ο τηλεφωνικός αριθμός της συσκευής για τη σωστή λειτουργία του δικτύου.

Το πρότυπο του συστήματος ορίζει παραπέρα και τεχνικές παραμέτρους του φυσικού στρώματος όπως το μέγιστο επιτρεπόμενο επίπεδο ισχύος, πρότυπα του ήχου αλλά και το μέγιστο επίπεδο out-of-band εκπομπής. Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι το πρότυπο θέτει τις απαιτούμενες διαδικασίες για τις λειτουργίες ανάμεσα στη κινητή συσκευή του συνδρομητή και τον σταθμό βάσης που εξυπηρετεί τη κυψέλη. Το πρότυπο επίσης περιγράφει τα απαιτούμενα πρωτόκολλα και σήματα που είναι απαραίτητα για την επιτυχή ανταλλαγή μηνυμάτων ανάμεσα στο κινητό και στο σταθμό βάσης που υλοποιούν αυτές τις λειτουργίες.

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως το σύστημα **AMPS** αναφέρεται ως σύστημα πρώτης γενιάς. Αυτό άρχισε τη λειτουργία του στη μπάντα των 800-MHz με τις επακόλουθες τελικά εκχωρήσεις συχνοτήτων. Το εύρος συχνοτήτων για την μετάδοση από τον σταθμό βάσης προς το κινητό τηλέφωνο είναι από 824 έως 849 MHz. Αντίθετα για τη μετάδοση από τη συσκευή του συνδρομητή μέχρι και τον σταθμό βάσης έχουμε από 869 έως 894 MHz. Η απόσταση των καναλιών έχει οριστεί στα 30 KHz και κάθε συχνότητα μετάδοσης και λήψης του σταθμού βάσης χωρίζεται ανά 45 MHz. Η FCC εισήγαγε ένα διαγωνισμό στην «αρένα» των κινητών τηλεφώνων χωρίζοντας το καταμερισμένο φάσμα συχνοτήτων σε «A» και «B» ζώνες. Η ανάθεση των δύο αυτών ζωνών έγινε σε δύο διαφορετικούς παρόχους υπηρεσιών.

Εκτός όμως από το AMPS, αρκετά άλλα αναλογικά συστήματα πρώτης γενιάς άρχισαν να αναπτύσσονται παγκοσμίως στις αρχές της δεκαετίας του 80. Εξετάζοντας τη πρόσφατη ραγδαία ανάπτυξη των προηγμένων ψηφιακών κυβελωτών συστημάτων, η σπουδαιότητα αυτών των συστημάτων είναι περιορισμένη στη παρούσα φάση. Παρόλα αυτά είναι πιθανόν αρκετά από αυτά τα συστήματα πρώτης γενιάς να συνεχίσουν να υποστηρίζονται σε λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες του κόσμου και για πολύ καιρό ακόμα. Μία σύντομη αναφορά σε αυτά με τη χρήση ενός πίνακα αρκεί για μία καλύτερη κατανόηση της σημερινής μορφής της κυβελωτής βιομηχανίας.

<i>Cellular Standard</i>	<i>Downlink Frequency Band</i>	<i>Uplink Frequency Band</i>	<i>Channel Spacing</i>	<i>Region</i>
<b>AMPS</b>	824-849 MHz	869-894 MHz	30 KHz	United States
<b>TACS</b>	890-915 MHz	935-960 MHz	25 KHz	European Union
<b>E-TACS</b>	872-905 MHz	917-950 MHz	25 KHz	United Kingdom
<b>NMT 450</b>	453-457.5 MHz	463-467.5 MHz	25 KHz	European Union
<b>NMT 900</b>	890-915 MHz	935-960 MHz	12.5 KHz	European Union
<b>C-450</b>	450-455.7 MHz	460-465.74 MHz	10 KHz	Germany & Portugal
<b>RMTS</b>	450-455 MHz	460-465 MHz	25 KHz	Italy

<b>Radiocom 2000</b>	165.2-168.4 MHz	169.8-173 MHz			
	192.5-199.5 MHz	200.5-207.5 MHz		12.5 KHz	France
	215.5-233.5 MHz	207.5-215.5 MHz			
	414.8-418 MHz	424.8-428 MHz			
<b>NTT</b>	915-918.5 MHz	860-863.5 MHz	6.25 KHz		
	922-925 MHz	867-870 MHz	6.25 KHz		Japan
	925-940 MHz	870-885 MHz	6.25/25 KHz		
<b>JTACS/NTACS</b>	898-901 MHz	843-846 MHz	12.5/25 KHz		
	915-925 MHz	860-870 MHz	12.5/25 KHz		Japan
	918.5-922 MHz	863.5-867 MHz	12.5 KHz		

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 – Παγκόσμια αναλογικά συστήματα 1G

### 1.3. Κυψελωτά συστήματα 2<sup>ης</sup> γενιάς – 2G

Επικεντρωμένες στην ανάπτυξη της καταναλωτικής ζήτησης για τις ασύρματες υπηρεσίες, οι οργανώσεις προτύπων στη Βόρεια Αμερική, την Ευρώπη, και την Ιαπωνία έχουν διευκρινίσει τις νέες τεχνολογίες που θα ικανοποιήσουν τις καταναλωτικές προσδοκίες και θα κάνουν την αποδοτική χρήση των διατιθέμενων ζωνών φάσματος. Η χρήση αυτών των συστημάτων δεύτερης γενιάς προώθησε:

- την επεξεργασία ψηφιακού σήματος,
- τη συμπίεση,
- την κωδικοποίηση, και
- τις τεχνικές ελέγχου του δικτύου.

Με αυτό τον τρόπο γίνεται συντήρηση του ραδιοεύρους ζώνης, αποτροπή στο να κρυφακούσει ο οποιοσδήποτε και να γίνει αναρμόδια χρήση των δικτύων, και υποστηρίζει επίσης τις πρόσθετες υπηρεσίες (π.χ. φωνητικό ταχυδρομείο, τριπλή κλήση, και ανάκτηση μετάδοσης κειμένων).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, οι δεύτερης γενιάς τεχνολογίες έχουν επεκταθεί στις αρχικές κυψελοειδείς ζώνες των 800MHz και στις προσωπικές ζώνες επικοινωνιών περίπου 1900 MHz που διατίθενται από τη FCC μεταξύ 1995 και 1997. Στην Ευρώπη και μεγαλύτερα άλλα μέρη του κόσμου, οι δεύτερης γενιάς τεχνολογίες επεκτείνονται

στις κυβελοειδείς ζώνες 900-MHz και στις προσωπικές ζώνες επικοινωνιών 1800-MHz. Η Ιαπωνία ενεργοποιεί τα ψηφιακά κυβελοειδή συστήματα στις διάφορες ζώνες μεταξύ 800 MHz και 1500 MHz καθώς επίσης και μια προσωπική ζώνη επικοινωνιών κοντά στο 1900 MHz [14].

Οι πιο διαδεδομένες δεύτερης γενεάς τεχνικές περιλαμβάνουν τρία πρότυπα υψηλής-διάταξης:

1. Τα ευρωπαϊκά πρότυπα,
2. Το GSM και
3. Δύο βορειοαμερικανικά πρότυπα:
  - ⇒ μια πολλαπλή τεχνική πρόσβασης χρονικής διαίρεσης (TDMA), και
  - ⇒ μια πολλαπλή τεχνική πρόσβασης διαίρεσης κώδικα (CDMA).

Τα πρότυπα GSM, που έχουν υιοθετηθεί σε περισσότερες από 100 χώρες, αποτελούν ένα πλήρες σύστημα επικοινωνιών. Τα άλλα δύο πρότυπα διευκρινίζουν μόνο τις επικοινωνίες μεταξύ των κινητών τηλεφώνων και των σταθμών βάσεων. Χωριστά πρότυπα, κυβερνούν τις επικοινωνίες μεταξύ των κινητών κέντρων μετατροπής και άλλα στοιχείο υποδομής στις Ηνωμένες Πολιτείες.

Μεταξύ των προτύπων χαμηλής-διάταξης, το προσωπικό σύστημα *handyphone* (PHS) παρέχει τις υπηρεσίες κινητών τηλεφώνων σε αρκετά εκατομμύρια συνδρομητές. Δύο άλλα πρότυπα:

α) οι ψηφιακές ευρωπαϊκές τηλεπικοινωνίες (DECT) με ασύρματα τηλέφωνα και

β) η τηλεφωνική δεύτερη γενεά (CT2) με ασύρματα τηλέφωνα, αποτελούν τη βάση διάφορων ασύρματων προϊόντων επιχειρησιακών τηλεφώνων (δηλ., ανταλλαγή ιδιωτικών κλάδων, ή PBX). Ένα τέταρτο σύστημα χαμηλής-διάταξης είναι το προσωπικό σύστημα επικοινωνιών πρόσβασης (PACS). Αν και το PACS έχει προσελκύσει το ιδιαίτερο ενδιαφέρον βιομηχανίας, δεν έχει επεκταθεί ευρέως μέχρι σήμερα.

Εκτός από τις εξουσιοδοτημένες 1900-MHz προσωπικές ζώνες επικοινωνιών, η FCC έχει διαθέσει τη ζώνη των 1910-1930 MHz για τα χωρίς άδεια συστήματα χαμηλής-διάταξης. Τα εμπορικά προϊόντα βασισμένα στις DECT, PHS, και μια τροποποιημένη έκδοση PACS είναι υπό εξέταση για την επέκταση στη ζώνη των 1910-1930 MHz [14].

Κάθε ένα από τα δεύτερης γενιάς συστήματα έχει χαρακτηριστικά γνωρίσματα και τους περιορισμούς, αλλά κανένα δεν σχεδιάστηκε συγκεκριμένα με

τα προβλήματα των μεγάλων σύνθετων οργανώσεων όπως για παράδειγμα στρατιωτικοί σκοποί. Εντούτοις, είναι δυνατό να συνδυαστούν οι ανόμοιες προσεγγίσεις σε ένα προσαρμοσμένο δίκτυο που χτίζεται για να ικανοποιήσει τις μοναδικές ανάγκες μετάδοσης φωνής και δεδομένων μιας οργάνωσης με εθνικούς περιορισμούς.

Η εμπορική επιτυχία των δεύτερης γενιάς ασύρματων τηλεφωνικών συστημάτων έχει υποκινήσει το διαδεδομένο ενδιαφέρον για την ενίσχυση των ικανοτήτων τους να ικανοποιήσουν τις δημόσιες προσδοκίες για τις προηγμένες υπηρεσίες πληροφοριών. Παραδείγματος χάριν, οι νέες τεχνικές ομιλίας-κωδικοποίησης που προσφέρουν τη βελτιωμένη ποιότητα φωνής έχουν εισαχθεί και στα τρία συστήματα υψηλής-διάταξης. Οι προσπάθειες είναι επίσης εν εξελίξει για να καταστήσουν αυτά τα συστήματα ελκυστικότερα για τις υπηρεσίες δεδομένων. Συνεπώς, τα πρότυπα για τη μετάδοση fax-σημάτων έχουν καθιερωθεί, και τα πρότυπα για την *circuit-switched* μετάδοση στοιχείων στα ποσοστά μέχρι 64 *kbits* ανά δευτερόλεπτο (*kbps*) είναι υπό ανάπτυξη για το GSM και CDMA. Επιπλέον, η τεχνολογία για την *packet-switched* μετάδοση δεδομένων, κατάλληλη για την ασύρματη πρόσβαση διαδικτύου, αναπτύσσεται για όλα τα δεύτερης γενιάς συστήματα. Η βάση τεχνολογίας θα συνεχίσει να αυξάνεται καθώς οργανώσεις R&D σχεδιάζουν παγκόσμιες καινοτομίες για μια τρίτη γενιά των ασύρματων συστημάτων επικοινωνιών.

Υπάρχουν αρκετές χαρακτηριστικές διαφορές ανάμεσα στα συστήματα πρώτης και δεύτερης γενιάς. Η βασικότερη από αυτές είναι ότι τα συστήματα πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν τεχνικές αναλογικής διαμόρφωσης για τη μετάδοση της φωνής του συνδρομητή μέσα από το κανάλι μεταφοράς δεδομένων (*traffic channel*). Όλες οι μεταγενέστερες γενεές κυψελωτών συστημάτων μετατρέπουν τη φωνή του χρήστη από αναλογικό σήμα σε ψηφιακή μορφή και κατόπι χρησιμοποιούν κάποιο είδος ψηφιακής διαμόρφωσης για να μεταδώσουν το ψηφιακά κωδικοποιημένο μήνυμα φωνής. Αυτή η μετατροπή του σήματος σε ψηφιακό είχε ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα για ένα κανάλι να φιλοξενεί περισσότερους από έναν χρήστη τη φορά. Αυτή η ιδιότητα αναφέρεται ως πολυπλεξία και θα παίξει σημαντικό παράγοντα ως τη βάση για την μετέπειτα ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων. Οι δύο πιο γνωστές μορφές πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται από τα κυψελωτά συστήματα δεύτερης γενιάς είναι η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (*Time Division*



Multiple Access – TDMA) και η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (Code Division Multiple Access – CDMA).

Τα σήματα ελέγχου των συστημάτων πρώτης γενιάς χρησιμοποιούσαν ψηφιακή διαμόρφωση για να στέλνουν τα ψηφιακά μηνύματα ελέγχου μέσα από τα κατάλληλα κανάλια. Αυτό βέβαια δεν άλλαξε για τα συστήματα δεύτερης γενιάς. Εκείνο όμως που διαφοροποιήθηκε είναι η μη χρήση πλέον από τα συστήματα δεύτερης γενιάς ακουστικών τόνων για επίβλεψη και τόνων σηματοδότησης για να διευκολύνει τις λειτουργίες του συστήματος.

Μία συνέπεια χρήσης της ψηφιακής κωδικοποίησης για τη κίνηση των χρηστών είναι η ψηφιακή κρυπτογράφηση, η οποία παρέχει ασφάλεια και μυστικότητα για τον συνδρομητή. Αυτή δεν ήταν εφικτή για τα συστήματα πρώτης γενιάς τα οποία βασιζόταν σε άλλες τεχνικές. Επιπρόσθετα, η χρήση ψηφιακής κωδικοποίησης και διαμόρφωσης επιτρέπει τη χρήση μεθόδων (κωδικών) για την ανίχνευση και διόρθωση λαθών όπου σε κάποιο βαθμό αντιμετωπίζει τη χαρακτηριστική επίδραση θορύβου και εξασθένισης στο κανάλι.

Το σύστημα AMPS δούλεψε αρκετά καλά όταν για πρώτη φορά αναπτύχθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες. Οι συνδρομητές μπορούσαν να μετακινούνται από χώρα σε χώρα και μέσα από διαφορετικά συστήματα παρόχων υπηρεσιών και όσο αυτοί βρίσκονταν σε περιοχή κάλυψης, δέχονταν υπηρεσίες. Έτσι λοιπόν η περιαγωγή (roaming) δεν ήταν πρόβλημα στις Ηνωμένες Πολιτείες από τη στιγμή που όλα τα συστήματα έπρεπε να ήταν συμβατά. Η κατάσταση όμως αυτήν δεν αντικατόπτριζε τον υπόλοιπο κόσμο όπου πολλά διαφορετικά συστήματα είχαν αναπτυχθεί σε πολλές διαφορετικές περιοχές του κόσμου. Το πρόβλημα αυτό ήταν εντονότερο ανάμεσα στις χώρες της Ευρώπης.

Κατά συνέπεια, στις αρχές της δεκαετίας του 80, οι Ευρωπαϊκές χώρες άρχισαν να δουλεύουν μαζί με σκοπό να αναπτύξουν ένα πανευρωπαϊκό κυψελωτό σύστημα. Την κίνηση αυτή ανέλαβε μία ομάδα μελέτης με το όνομα Groupe Speciale Mobile η οποία σχηματίστηκε το 1982 από το Conference of European Posts and Telegraphs με σκοπό να κάνει έρευνα και μετά να αναπτύξει αυτό το σύστημα. Το 1987 η συγκεκριμένη ομάδα μελέτης πρότεινε το νέο σύστημα που ακούει στο όνομα Global Systems for Mobile Communications το οποίο άρχισε τη λειτουργία του επίσημα από την Ευρωπαϊκή Κομισιόν υπό τη μορφή αυστηρών οδηγιών. Το 1989, η ευθύνη για τη

συνεχή αναβάθμιση του νέου αυτού συστήματος μεταφέρθηκε στο European Telecommunication Standards Institute (ETSI). Το 1990, η πρώτη φάση των προτύπων GSM δημοσιεύτηκαν και η εμπορική του λειτουργία ξεκίνησε αργότερα το 1992. Το σύστημα που τελικά επιλέχθηκε χρησιμοποιούσε ψηφιακή τεχνολογία και έγινε γνωστό ως το κυψελωτό σύστημα GSM [15].

Η ικανότητα των συστημάτων δεύτερης γενιάς να μπορούν να υποστηρίξουν περισσότερους του ενός χρήστη ανά κανάλι επιτυγχάνεται με τη χρήση διάφορων προηγμένων τεχνικών ψηφιακής πολυπλεξίας. Τα συστήματα βασισμένα στο TDMA (GSM, North American TDMA και PDC) χρησιμοποιούν χρονοθυρίδες (timeslots) για να προορίσουν ένα σταθερό και περιοδικά επαναλαμβανόμενο χρονικό σημείο σε κάθε χρήστη που θα έχει την αποκλειστική χρήση του καναλιού. Το σύστημα GSM είναι «στημένο» ώστε να χρησιμοποιεί οκτώ χρονοθυρίδες συνεπώς μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα οκτώ χρήστες ανά κανάλι. Εν αντίθεση τα κυψελωτά συστήματα CDMA χρησιμοποιούν μια τεχνική ψηφιακής διαμόρφωσης που βασίζεται στα σήματα ευρέου φάσματος. Σε αυτά τα συστήματα, κάθε ψηφιακό διαμορφωμένο σήμα του χρήστη που είναι προς μετάδοση, κωδικοποιείται περαιτέρω με έναν ειδικό κώδικα (δυναμική ακολουθία από bit) όπου η όλη διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού bit του σήματος. Στον δέκτη ο ίδιος ειδικός κώδικας χρησιμοποιείται για την αποδιαμόρφωση και κατά συνέπεια ανάκτηση του σήματος από τα σήματα των υπολοίπων χρηστών που ο δέκτης τα αντιλαμβάνεται ως θόρυβο. Αυτή είναι μία σημαντική ιδιότητα των κωδικών που χρησιμοποιούνται για κάθε χρήστη ξεχωριστά. Επομένως σε ένα σύστημα CDMA πολλά διαφορετικά σήματα μπορούν να μεταδοθούν από το ίδιο κανάλι χωρίς να κάνει παρεμβολές το ένα με το άλλο. Το μόνο αρνητικό σημείο για αυτή τη μέθοδο πολλαπλής προσπέλασης είναι ότι το φάσμα των CDMA σημάτων είναι πολύ πιο ευρύ από αυτό των άλλων τεχνικών. Πιο αναλυτικά στοιχεία θα αναφερθούν στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο όπου θα μελετηθούν εκτενέστερα τα σήματα ευρέου φάσματος και το σύστημα CDMA αντίστοιχα.

Η νέα αυτή τεχνολογία που ακούει στο όνομα CDMA αναπτύχθηκε από την Qualcomm Corporation σε απάντηση των απαιτήσεων που έθεσε ο Cellular Telecommunications Industry Association's (CTIA) για τα κυψελωτά συστήματα της επόμενης γενιάς. Το 1993, υιοθετήθηκε η CDMA διεπαφή μέσω αέρα, IS-95 και το πρώτο εμπορικό δίκτυο CDMA λειτούργησε στο Χονκ Κονγκ το 1995. Από εκείνο το

χρονικό σημείο τα συστήματα CDMA χρησιμοποιήθηκαν και στις κυψελωτές αλλά και στις λεγόμενες PCS ζώνες συχνοτήτων εκτεταμένα στις Ηνωμένες πολιτείες αλλά και σε ολόκληρο το κόσμο. Η εν λόγω τεχνολογία γνώρισε απότομη ανάπτυξη και αυτή τη στιγμή το 13% το τηλεφώνων παγκοσμίως χρησιμοποιούν αυτήν τη τεχνολογία.

#### 1.4. Κυψελωτά συστήματα πέραν της 2<sup>ης</sup> γενιάς – 2.5G

Μετά την έναρξη λειτουργίας των κυψελωτών συστημάτων δεύτερης γενιάς, υπήρχε μία αυξανόμενη επιθυμία για «παράδοση» δεδομένων στη κινητή συσκευή του χρήστη. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 90, ο προσωπικός υπολογιστής υπήρχε σε κάθε σπίτι και το Ίντερνετ είχε ξεκινήσει τη θεαματική του εξάπλωση. Παγκοσμίως, όλο και περισσότερες τηλεπικοινωνίες προσανατολιζόταν στην επικοινωνία υπολογιστή με υπολογιστή και η κοινωνία έγινε εξαιρετικά κινητή μέσα από την ανάπτυξη και αποτελεσματικότητα των μοντέρνων μεταφορικών μέσων. Πολλά ιδιωτικά συστήματα αναπτύχθηκαν χρονικά γρήγορα, μέσα στο κύκλο ζωής των συστημάτων πρώτης γενιάς, αλλά το 1993, η εταιρία IBM καθώς και άλλες που ασχολούνται με το αντικείμενο δημοσίευσαν προδιαγραφές για ένα τέτοιο σύστημα που το ονόμασαν cellular digital packet data (CDPD) το οποίο θα έχει επικάλυψη με το σύστημα AMPS. Παρόλο που αυτή η βελτίωση επέτρεπε στους χρήστες πρόσβαση στους λογαριασμούς e-mail τους και δυνατότητες μεταφοράς αρχείων, η υπηρεσία CDPD μπορούσε να λειτουργήσει σε περιορισμένους ρυθμούς δεδομένων (τυπικά, 9.6 kbps).

Με την έλευση όλων των ψηφιακών κυψελωτών δικτύων δεύτερης γενιάς, έκανε και την εμφάνιση της η πιθανότητα αύξησης του ρυθμού δεδομένων μέσα από αυτά τα συστήματα. Δεν ήταν πολύ πριν από αυτό όταν οι πάροχοι υπηρεσιών αλλά και οι οργανισμοί που θεσπούσαν τα διάφορα πρότυπα έβλεπαν ως κύριο χαρακτηριστικό για τα συστήματα επόμενης γενιάς τη χρήση υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Ωστόσο πριν τη κατάλληλη τεχνολογία αλλά και το φάσμα των συχνοτήτων που θα χρειαζόντουσαν για να χτιστούν αυτά τα συστήματα εμφανίστηκε μία επαναστατική προσέγγιση για βελτίωση των ήδη υπάρχοντων συστημάτων. Σε εκείνο το σημείο εμφανίζονται τα λεγόμενα συστήματα δυόμισης γενιάς. Ο κύριος αντιπρόσωπος αυτών των συστημάτων ήταν το GPRS [15]. Το πλήρες όνομα είναι General Packet Radio Service. Αυτό ορίστηκε από το ETSI ως μέσο για τη παροχή υπηρεσιών

δεδομένων μεταγωγής πακέτου και επέτρεπε πλήρες κινητικότητα και κάλυψη ευρείας περιοχής από δίκτυα GSM. Τα πρότυπα δημοσιεύτηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 90 και η υπηρεσία εισήχθηκε στην αρχή της νέας χιλιετίας. Η υπηρεσία GSM GPRS σχεδιάστηκε για να προσφέρει ρυθμούς δεδομένων μεταφοράς ως και 160 kbps. Αυτή η τεχνολογία αναπτύχθηκε επίσης και από NA-TDMA συστήματα με ρυθμούς δεδομένων μέχρι και 45 kbps. Άξιο ενδιαφέροντος είναι ότι η χρήση της τεχνολογίας αυτής τόσο από GSM όσο και από NA-TDMA συστήματα θα οδηγήσει αυτές τις δύο παρόμοιες τεχνολογίες έναντι ενός ενιαίου συστήματος όσο πλησιάζει η Τρίτη γενιά.

### 1.5. Κυβελωτά συστήματα 3<sup>ης</sup> γενιάς – 3G

Η αρχική έννοια για τα ασύρματα συστήματα τρίτης-γενεάς προέκυψε από μια διεθνή πρωτοβουλία ένωσης τηλεπικοινωνιών (ITU) γνωστή ως μελλοντικό δημόσιο σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών εδάφους (*FPLMTS*). Κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας η ITU προώθησε την έννοια ενός ασύρματου συστήματος που θα κάλυπτε τις τεχνικές ικανότητες ένα βήμα επάνω από εκείνους των δεύτερης γενεάς κυβελωειδών συστημάτων. Το τρέχον όνομα για το σύστημα τρίτης-γενεάς είναι International Mobile Telecommunications-2000 (IMT 2000). Ο αριθμός αναφέρεται σε μια πρόωρη προβλεπόμενη ημερομηνία για την εφαρμογή της νέας τεχνολογίας και επίσης των ζωνών συχνότητας (περίπου 2000 MHz) στις οποίες θα επεκτεινόταν [16]-[20].

Όπως προβλέπεται στο IMT 2000 πρόγραμμα, το ασύρματο σύστημα τρίτης-γενιάς θα είχε μία παγκόσμια κοινή διεπαφή και δίκτυο. Θα υποστήριζε τα υψηλότερα ποσοστά στοιχείων από τα δεύτερης γενεάς συστήματα παρόλο που είναι λιγότερο ακριβά. Θα προωθούσε επίσης άλλες πτυχές των ασύρματων επικοινωνιών με τη μείωση του μεγέθους εξοπλισμού, την επέκταση της ζωής μπαταριών, και τη βελτίωση της ευκολίας της λειτουργίας. Επιπλέον, το σύστημα θα υποστήριζε τις υπηρεσίες που απαιτούνται να αναπτυχθεί καθώς επίσης και τα αναπτυγμένα έθνη.

Από το 1990 οι IMT 2000 συστάσεις έχουν εγκριθεί έτσι ώστε να επιμεληθεί σχετικά με τους αρχικούς στόχους, να καθιερώσει τις αρχές ασφάλειας, να προδιαγράψει μια δικτυακή αρχιτεκτονική, να παρουσιάσει ένα σχέδιο για τα αναπτυσσόμενα έθνη, να καθιερώσει τις απαιτήσεις ραδιοεπαφών, και να διευκρινίσει ένα πλαίσιο για ένα δορυφορικό συστατικό. Η ITU προσδοκούσε έναν διεθνή ανταγωνισμό που οδήγησε σε μια ραδιοδιεπαφή που μπόρεσε να αναπτυχθεί και να

επεκταθεί μέχρι το έτος 2000. Οι ανταγωνιστικές ραδιοεπαφές παρείχαν τα ελάχιστα ποσοστά στοιχείων 384 *kbps* και ένα εσωτερικό ποσοστό 2 *Mbps*. Εκτός από την παροχή ενός forum για τη συζήτηση των προτάσεων προτύπων, η ITU δεν έχει υιοθετήσει σαφή σχέδια για το πώς να προχωρήσει πέρα από το σημείο της αναθεώρησης των προτάσεων.

Η παγκόσμια ραδιοδιάσκεψη του 1995 έθεσε κατά μέρος το φάσμα για τα έθνη που εξετάζουν την επέκταση IMT 2000. Οι ζώνες είναι 1920-1980 *MHz* , 2110-2170 *MHz* για τις επίγειες επικοινωνίες, 1980-2010 *MHz* και 2170-2200 *MHz* για τους δορυφόρους. Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν διαθέσει ήδη τις ζώνες φάσματος στις προσωπικές επικοινωνίες που περιλαμβάνουν μέρος της χαμηλότερης IMT 2000 ζώνης, που καθιστά το απίθανο ότι οι αμερικανικοί φορείς παροχής υπηρεσιών θα μπορούσαν να επεκτείνουν κάπως το IMT 2000. Αρχικά, η προσοχή στην εργασία ITU περιορίστηκε και στην Ευρώπη και στις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου η αύξηση των δεύτερης γενεάς ψηφιακών κυψελοειδών και προσωπικών αγορών επικοινωνιών είναι ισχυρή. Ήταν η Ιαπωνία, ουσιαστικά το μόνο μεταξύ όλων των εθνών, που επέμεινε ότι το πρόγραμμα ITU προχωρά όσο το δυνατόν γρηγορότερα επειδή έτρεχε εκτός του φάσματος για τα κυψελοειδή και προσωπικά συστήματα επικοινωνιών τους. Οι Ιάπωνες ήταν σε θέση να κρατήσουν το IMT 2000 για το πρόγραμμα, με συνέπεια μια πρόσκληση ITU για τις προτάσεις ραδιοδιεπαφών, τώρα που οφείλονται στα μέσα του 1998. Υπέρ αυτής της προσπάθειας, η ιαπωνική ραδιομάδα προτύπων αναπτύσσει ένα ή περισσότερα ιαπωνικά πρότυπα για τη χρήση στο ITU-2000 φάσμα. Πιθανώς τα πρότυπα θα υποβληθούν στην ITU για την πιθανή παγκόσμια χρήση.

Εν τω μεταξύ, η ευρωπαϊκή βιομηχανία τηλεπικοινωνιών θέσπισε πλαίσιο για την κινητή ασύρματη τεχνολογία τρίτης-γενιάς. Το καθολικό σύστημα κινητών τηλεφώνων (UMTS) προορίζεται να αναδιπλώσει την εμπορική επιτυχία που επιτυγχάνεται μια δεκαετία νωρίτερα με το GSM. Το πρόγραμμα UMTS απαίτησε την καθιέρωση της βάσης τεχνολογίας μέχρι τον Δεκέμβριο του 1997, την ανάπτυξη ενός ελάχιστου συστήματος το 2002, και την επίτευξη ενός πλήρους συστήματος το 2005. Οι τεχνικοί στόχοι του UMTS πολύ μοιάζουν με πολλούς από τους IMT 2000 στόχους. Οι Ευρωπαίοι προγραμματίζουν να προτείνουν τις τεχνολογίες που υιοθετούνται για το UMTS ως υποψήφιοι για το IMT 2000 [17].

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, δράση σε αυτό το ζήτημα δεν πραγματοποιήθηκε έως τα μέσα του 1997, όταν τέσσερις αμερικανικοί κατασκευαστές *CDMA*

κυψελοειδής υποδομής - *Lucent Technologies, Motorola, Nortel*, και *QUALCOMM*-ανάγγειλαν ένα πρόγραμμα τρίτης-γενιάς ευρείας ζώνης, ονομαζόμενο *cdmaOne*. Όπως πολλά υποψήφια συστήματα υπό εξέταση στην Ευρώπη και την Ιαπωνία, το αμερικάνικο σύστημα χρησιμοποιεί ένα εύρος σήματος 5 MHz για CDMA, αν και οι λειτουργούσες παράμετροι και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού διαφέρουν από εκείνους των ξένων αντίστοιχων. Οι πρόσθετες αμερικάνικες προτάσεις για το IMT 2000 θα μπορούσαν να προκύψουν από άλλες κοινότητες επιχειρήσεων που υποστηρίζουν άλλα ψηφιακά πρότυπα ραδιοεπαφών [18].

Μεταξύ των σχετικών εξελίξεων, το ενδιαφέρον για το "nomadicity" αυξάνεται εντός της κοινότητας του Internet στις Ηνωμένες Πολιτείες. Όπως αρχικά συλλαμβάνεται, η εθνική υποδομή πληροφοριών (NII) έδωσε λίγη έμφαση στην ασύρματη παράδοση των πληροφοριών στους κινητούς χρήστες (πίνακας πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, 1994). Αλλά με την αύξηση σε ζήτηση για τις υπηρεσίες Internet, που απεικονίζονται από τη μετάβαση στους ιδιωτικούς προμηθευτές, οι προμηθευτές επιδιώκουν στην τεχνολογία Internet δύναμης είτε άμεσα είτε ως τμήμα των ετερογενών δικτύων. Τα σχέδια γίνονται για να φιλοξενήσουν τους νομάδες (δηλαδή κινητοί χρήστες) που επισύρουν την προσοχή σε ποικίλες επικοινωνίες, υπολογισμό, και συστήματα πληροφοριών ταυτόχρονα, μια έννοια που θα απαιτήσει την προσοχή από τις πολλαπλές βιομηχανίες στα ζητήματα όπως [13]:

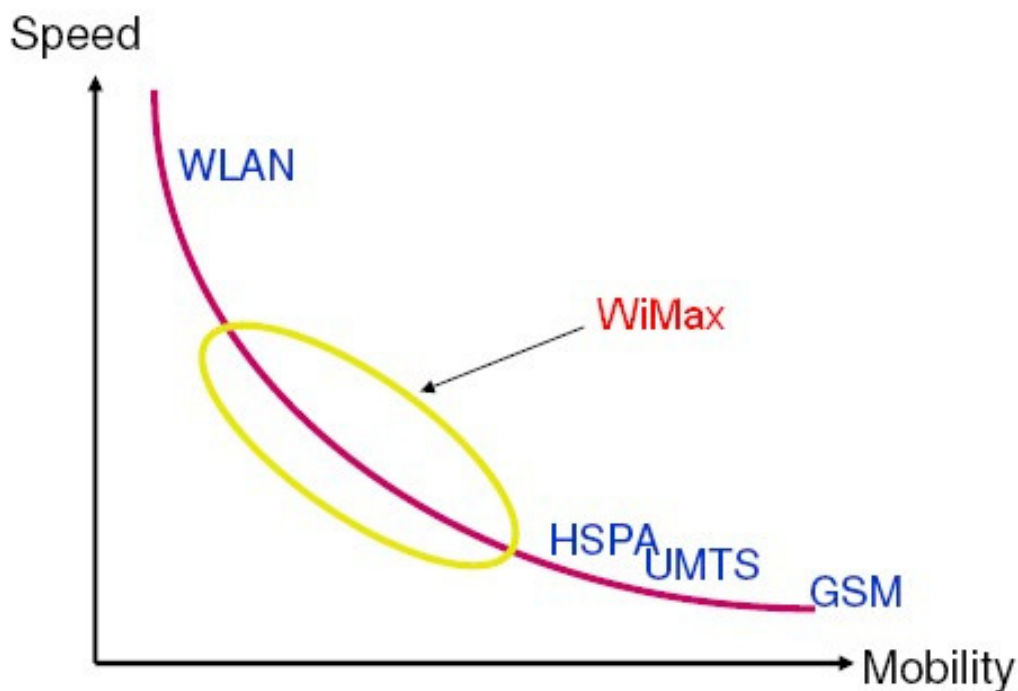
- η ασφάλεια,
- η διαλειτουργικότητα, και
- ο συγχρονισμός ανάμεσα στα συστήματα.

Άλλες δραστηριότητες της ITU εξετάζουν τις πτυχές δικτύων IMT 2000. Εδώ πάλι οι Ιάπωνες έχουν σημαντικές συνεισφορές ως προς την καθιέρωση ενός ενιαίου παγκόσμιου δικτύου για να υποστηρίξουν τα ασύρματα συστήματα. Μόνο στα μέσα του 1997 οι ΗΠΑ και οι ευρωπαϊκές αντιπροσωπείες αρχίζουν να έχουν τις σημαντικές συνεισφορές, ενδιαφερόμενες για τις τρέχουσες επενδύσεις τους στα κυψελοειδή και προσωπικά δίκτυα επικοινωνιών και τα πιθανά αποτελέσματα της καθιέρωσης ενός παγκόσμιου δικτύου που ήταν ασυμβίβαστο με τα συστήματά τους.

Οι τελευταίες προτάσεις της Ευρώπης και των ΗΠΑ υπογραμμίζουν την ιδέα μιας οικογένειας δικτύων, που υποστηρίζουν μια οικογένεια ραδιοεπαφών μέσω της

χρήσης των κατάλληλων πυλών για να επιτύχουν παγκοσμίως τη περιπλάνηση και τη διαλειτουργικότητα.

Αν και είναι σαφές ότι πολλές νέες ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνιών προέκυψαν στο διάστημα 2002-2005, αυτό δεν είναι σαφές όταν και πως θα εμπορευματοποιηθούν. Η εξέλιξη των δεύτερης γενιάς συστημάτων περιόρισε τα εμπορικά κίνητρα και εισήγαγε μια νέα γενιά συστημάτων. Είναι δυνατό ότι οι πρόοδοι στα δεύτερης γενιάς συστήματα ικανοποιούν τη μελλοντική απαίτηση για τις υπηρεσίες κινητών τηλεφώνων και ότι μια καταδεδειγμένη απαίτηση για τις υπηρεσίες στοιχείων high-bit-rate θα είναι απαραίτητη για να υποκινήσει την εμπορική επέκταση της τεχνολογίας τρίτης γενιάς.



**Σχήμα 1.1** Σύγκριση μεταξύ ασύρματων τεχνολογιών [14]

Ο όρος «τρίτης γενιάς κυψελωτά συστήματα» χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον αριθμό εκείνο των συστημάτων που έχουν την ικανότητα να υποστηρίζουν υπηρεσίες υψηλού ρυθμού δεδομένων, υπηρεσίες προηγμένων πολυμέσων (φωνή, δεδομένα και βίντεο) και παγκόσμια περιαγωγή. Για αυτά τα πρότυπα συνέβαλαν στη ανάπτυξή τους η International Telecommunications Union (ITU) σε συνεργασία με άλλους περιφερειακούς οργανισμούς ανά το κόσμο. Στα τέλη της δεκαετίας του 90, η ITU

δημιούργησε ένα φόρουμ με την ονομασία International Mobile Telecommunication-2000 (IMT-2000) για να κατευθύνονται όλες οι ανάγκες κινητών τηλεπικοινωνιών του εικοστού πρώτου αιώνα. Η παγκόσμια ανάπτυξη κυψελωτών συστημάτων τρίτης γενιάς έχει ξεκινήσει και θα βρίσκεται σε εξέλιξη ως νέες επαναστατικές φάσεις του προτύπου 3G που θα χρησιμοποιηθεί για να χτιστούν αυτά τα νέα συστήματα.

Η ανάπτυξη των κυψελωτών συστημάτων δεύτερης γενιάς εξυπηρετεί την αυξανόμενη απαίτηση για περισσότερη χωρητικότητα μέσα στο σύστημα αλλά και για νέες υπηρεσίες. Τα συστήματα της προηγούμενης γενιάς αρχικά παρείχαν υπηρεσίες φωνής παρόλο που μπορούσαν επίσης να υποστηρίξουν και υπηρεσίες δεδομένων χαμηλού ρυθμού. Η έλευση του Ίντερνετ εξέλιξε αρκετά την αγορά. Πλέον η ανάγκη για δεδομένα μέσα από το δίκτυο PSTN αυξήθηκε δραματικά και μεγάλωσε την ανάπτυξη νέων ενσύρματων τεχνολογιών όπως τα ευρυζωνικά καλωδιακά μόντεμ, τη ψηφιακή γραμμή συνδρομητή (DSL) για πρόσβαση στο Ίντερνετ με υψηλές ταχύτητες. Την ίδια χρονική στιγμή, η απαίτηση των συνδρομητών ασύρματων συσκευών για πρόσβαση στο Ίντερνετ και σε υπηρεσίες φωνής μεγάλωσε, αλλά τα συστήματα δεύτερης γενιάς δεν μπορούσαν να την ικανοποιήσουν.

Τα συστήματα 2G είναι περιορισμένα ως προς το εύρος ζώνης αλλά και την ικανότητα περιαγωγής. Εφόσον οι πρώτες γενιές κυψελωτών συστημάτων είχαν σχεδιαστεί αρχικά για υπηρεσίες φωνής και όχι δεδομένων, δεν είχαν αρκετό εύρος ζώνης για τους υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς που είναι επιθυμία του σήμερα. Επίσης, αφού πολλαπλά πρότυπα χρησιμοποιούνται για τα πολλά διαφορετικά κυψελωτά συστήματα που έχουν ήδη αναπτυχθεί σε ολόκληρο το κόσμο, τα συστήματα δεν είναι συμβατά μεταξύ τους και συνεπώς δεν υποστηρίζεται η παγκόσμια περιαγωγή. Επίσης τα συστήματα 2G έχουν περιορισμούς στις υπηρεσίες δεδομένων λόγω έλλειψης υποστήριξης για δίκτυα πακέτων δεδομένων αλλά και έλλειψη υποστήριξης για υπηρεσίες πολυμέσων.

Οι απαιτήσεις του IMT-2000 για ασύρματη τεχνολογία μετάδοσης (RTT) οδηγούνται από τις βασικές απαιτήσεις της τρίτης γενιάς. Η τεράστια πλειονότητα των συνδρομητών στις κυψελωτές υπηρεσίες χρησιμοποιούν ή GSM, CDMA ή NA-TDMA τεχνολογία. Πολλές διαφορετικές προτάσεις υποβλήθηκαν στο IMT-2000, αλλά μόνο πέντε από αυτές αποδέχθηκε το ITU. Αυτή τη στιγμή υπάρχουν μόνο δύο



κύριες τεχνολογικές προτάσεις για 3G τεχνολογία που προωθούνται. Είναι η τεχνολογία cdma2000 και η UMTS Terrestrial Radio Access ή αλλιώς UTRA. Το σύστημα που βασίζεται στη τελευταία από αυτές προτάθηκε από την ETSI και υποστηρίζεται από το UMTS φόρουμ. Αυτό το 3G σύστημα χρησιμοποιεί τις προυπάρχουσες αναθέσεις φάσματος, νέες στη ζώνη των 2-GHz και επίσης χρησιμοποιεί συνδυασμούς τεχνολογιών όπως W-CDMA με TDD ή FDD.

Η τεχνολογία cdma2000 είναι η βελτιωμένη ευρυζωνική έκδοση του CDMA. Υποστηρίζεται από την TTA, το CDMA Development Group (CDG) και πολλούς άλλους μεγάλους κατασκευαστές. Τα κύρια χαρακτηριστικά του cdma2000 είναι η συμβατότητα που έχει με το σύστημα CDMA IS-95B (τεχνολογία 2.5G), υποστήριξη για υπηρεσίες δεδομένων (ρυθμοί μεταφοράς έως και 2 Mbps), υποστήριξη για υπηρεσίες πολυμέσων (QoS) και υποστήριξη για ανεπτυγμένες ασύρματες τεχνολογίες. Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του cdma2000 είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιεί πολλά διαφορετικά εύρη ζώνης ανάλογα με τον απαιτούμενο ρυθμό δεδομένων.

## 1.6. Κυβελωτά συστήματα 4<sup>ης</sup> γενιάς – 4G

Πριν ακόμα εξελιχθούν πλήρως οι τεχνολογίες που αφορούν τα συστήματα τρίτης γενιάς έκανα δειλά την εμφάνιση τους μελέτες από ακαδημίες και από την ασύρματη βιομηχανία που αφορούν πρωτοβουλίες και τεχνολογίες για τις επικοινωνίες τέταρτης γενιάς. Η νέα αυτή γενιά περιλαμβάνει ουσιαστικά ένα μίγμα από καινούργιες ιδέες και τεχνολογίες. Ο στόχος των 4G συστημάτων είναι η σύγκλιση των τεχνολογιών που έχουν να κάνουν με τις ασύρματες κινητές επικοινωνίες και την ασύρματη πρόσβαση στις τηλεπικοινωνίες. Ένα ευρυζωνικό ασύρματο σύστημα φαντάζεται να είναι η νέα τάση της μόδας στην ασύρματη βιομηχανία. Αυτό το σύστημα θα εξελιχθεί με βάση τη δυναμική κατανομή εύρους ζώνης, ποιότητα υπηρεσιών (QoS), ασφάλεια, ψηφιακές τεχνολογίες αναμετάδοσης επόμενης γενιάς, αυτορυθμιζόμενα δίκτυα και μελλοντικά ζητήματα που δεν έχουν ακόμα αναγνωριστεί.

Για τη δικτύωση των 4G συστημάτων θα χρειαστεί μία αρχιτεκτονική βασισμένη πλήρως στο πρωτόκολλο του Ίντερνετ (Internet Protocol – IP) και συνδεσιμότητα για κάθε χρήστη όπου και αν βρίσκεται ότι ώρα και αν τη χρειαστεί. Οι πρώτοι ρυθμοί

δεδομένων που θα προσφέρονται από τα 4G δίκτυα πλησιάζουν και ξεπερνούν τον αριθμό των 20 Mbps και τελικά θα προσφέρει ασύρματη συνδεσιμότητα με ταχύτητες ATM. Πολλοί στην ασύρματη βιομηχανία αισθάνονται ότι πλέον το ασύρματο ATM θα εφοδιάσει με ένα νέο πλαίσιο πάνω στο οποίο θα βασιστούν τα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών της επόμενης γενιάς [19].

### 1.6.1. Κινητά συστήματα 4G

Σε μια άλλη εξέλιξη αν και στα αρχικά στάδια τα κύρια πρότυπα κινητής τηλεφωνίας έχουν ήδη αναπτυχθεί και αποτελούν την τεχνολογία 4G. Χαρακτηριστικά της είναι το υψηλό εύρος ζώνης (bandwidth), η μικρή καθυστέρηση και το γεγονός ότι όλα τα IP- δίκτυα με υπηρεσίες ομιλίας θα ενσωματωθούν στην παραπάνω τεχνολογία. Με τις εξελίξεις των διάφορων προτύπων και συστημάτων του χώρου αυτού, όπως το GSM/UMTS για να “εισέλθει“ στο 4G χρησιμοποίησε το 3GPP, έτσι και το CDMA 2000 αναπτύχθηκε σε Ultra Mobile Broadband (το οποίο είναι υπό κατασκευή ακόμη). Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα η διαδικτυακή ταχύτητα να συγκρίνεται και να ξεπερνά ορισμένες φορές αυτή του WiMax [19].

### 1.6.2. Απαιτήσεις συστημάτων 4G

- Υψηλός ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας.

Η ελάχιστη ταχύτητα που έχει τεθεί ως στόχος για τα 4G συστήματα θα είναι 10-20 Mbits/sec για ακίνητα περιβάλλοντα και 2 Mbits/sec για κινούμενα οχήματα.

- Μεγαλύτερη χωρητικότητα και μικρότερο κόστος ανά bit. Η χωρητικότητα των συστημάτων 3G δεν θα είναι αρκετή για να εξυπηρετήσει την εκρηκτικά αυξανόμενη κίνηση των πολυμέσων το 2010. Η χωρητικότητα για τα 4G συστήματα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές υψηλότερη από την αντίστοιχη των 3G, ενώ το κόστος ανά bit πρέπει να μειωθεί δραματικά ώστε η χρέωση να μην είναι απαγορευτική

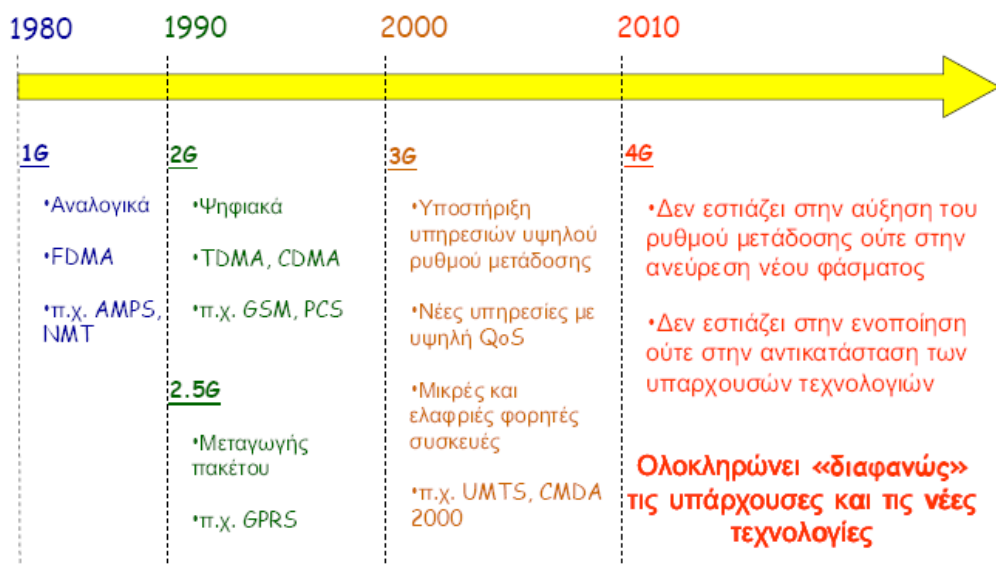
- Εξαιρετική ποιότητα παροχής υπηρεσιών (Quality of Service-QoS). Τα ασύρματα συστήματα χρησιμοποιούν περιορισμένο εύρος συχνοτήτων και μεταδιδόμενης ισχύος και υποφέρουν από συμφόρηση. Επομένως εξαιρετική QoS είναι αναγκαία για την υποστήριξη διαφορετικών εφαρμογών, ιδιαίτερα αυτών που απαιτούν επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

- Καλή χωρική κάλυψη με μεταβλητή ταχύτητα μετάδοσης. Καθώς οι ταχύτητες μετάδοσης αυξάνονται, το απαιτούμενο επίπεδο λαμβανομένου σήματος θα αυξηθεί ανάλογα. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η επιδιωκόμενη ταχύτητα των συστημάτων 4G

είναι μεγαλύτερη κατά δύο τάξεις μεγέθους σε σχέση με τα υπάρχοντα συστήματα, η ακτίνα της κυψέλης θα μειωθεί και η κάλυψη στο εσωτερικό των κτιρίων θα υποβαθμιστεί αν δεν προστεθεί ένας μεγάλος αριθμός σταθμών βάσης. Η χρήση συστημάτων μετάδοσης μεταβλητής απόστασης και ταχύτητας (wide-range variable-speed) είναι αναγκαία για ικανοποιητική κάλυψη εσωτερικών χώρων και μετάβαση σε διαφορετική κυψέλη χωρίς προβλήματα ανεξαρτήτως της τεχνολογίας των συστημάτων (3G, 4G).

- Υποστήριξη Internet νέας γενιάς. Η υποστήριξη πρωτοκόλλων Internet νέας γενιάς (IPv6) και πολυμετάδοσης (multicasting) είναι σημαντική ιδιαίτερα για εφαρμογές ηλεκτρονικού εμπορίου.
- Ομαλή διασύνδεση με συστήματα 3G, ασύρματα δίκτυα υπολογιστών (WLAN) και σταθερά δίκτυα. Με τη χρήση τεχνολογίας βασισμένης σε πρωτόκολλα Internet (IP) θα είναι δυνατή ομαλή διασύνδεση διαφορετικών τεχνολογιών. Ως αποτέλεσμα ο κάθε χρήστης θα μπορεί να διαλέγει το καλύτερο δίκτυο ανά περίπτωση (ανάλογα με το χρόνο, χώρο και κόστος) [20].

## Εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών



Σχήμα 1.2. Εξέλιξη κινητών επικοινωνιών [20]

## 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ CDMA

Η τεχνική CDMA επιτρέπει σε πολλαπλούς χρήστες να μεταδίδουν ταυτόχρονα το σήμα πληροφορίας τους στο ίδιο εύρος ζώνης εκμεταλλευόμενη την τεχνολογία απλωμένου φάσματος.

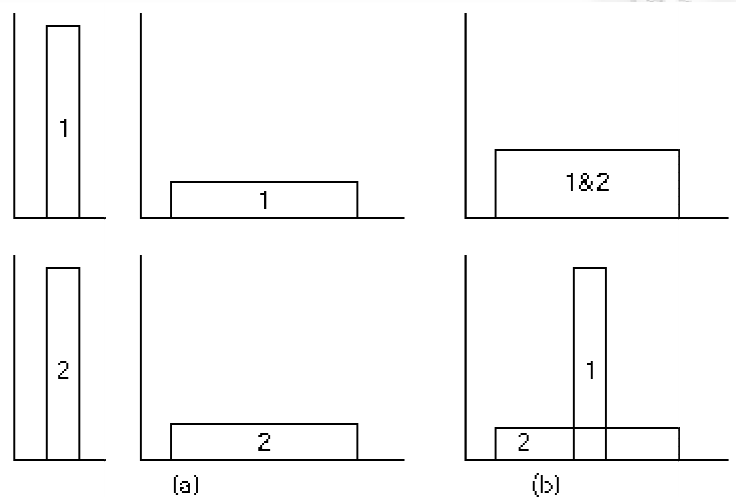
Το βασικό χαρακτηριστικό των τεχνολογιών αυτών είναι ότι το εύρος ζώνης του μεταδιδόμενου σήματος (εύρος ζώνης ραδιοσυχνοτήτων –RF-) είναι πολλαπλάσιο από αυτό που απαιτείται για την μετάδοση του σήματος πληροφορίας συγκριτικά με τα υπόλοιπα σχήματα μετάδοσης που δεν υιοθετούν την τεχνική αυτή. Για την εξάπλωση του φάσματος χρησιμοποιούνται ομάδες ή σύνολα ακολουθιών κώδικα (code sequences) που χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένες στατιστικές ιδιότητες.

Σύμφωνα με την τεχνική CDMA, σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία συγκεκριμένη ακολουθία από ένα σύνολο ακολουθιών. Απώτερος σκοπός της χρήσης ακολουθιών κώδικα είναι η ελαχιστοποίηση της παρεμβολής που εμφανίζεται από τους υπόλοιπους χρήστες του συστήματος (multiple access interference, MAI). Η ακολουθία αυτή κωδικοποιεί το σήμα της πληροφορίας κάθε χρήστη και ακριβώς επειδή το εύρος ζώνης της είναι πολλαπλάσιο του εύρους ζώνης του σήματος πληροφορίας, το τελικό σήμα διαθέτει απλωμένο φάσμα.

Μέσω της διαδικασίας αυτής, ο δέκτης αποκωδικοποιεί μόνο το επιθυμητό από το συνολικό λαμβανόμενο σήμα, έχοντας στη διάθεσή του ένα αντίγραφο της ακολουθίας χρήστη προκειμένου να εξάγει το επιθυμητό σήμα με αντίτιμο την εμφάνιση παρεμβολής από τους υπόλοιπους χρήστες (inter-user interference). Για τους υπόλοιπους χρήστες του συστήματος το σήμα αυτό εμφανίζεται ως θόρυβος.

Στο Σχήμα 2.1 αναπαρίσταται σχηματικά η διαδικασία που μόλις περιγράφηκε. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 2.1a, δύο χρήστες παράγουν ένα σήμα απλωμένου φάσματος από το αρχικό σήμα πληροφορίας στενής ζώνης. Στο άνω τμήμα του Σχήματος 2.1b, δείχνεται το άθροισμα των απλωμένων σημάτων, το οποίο μεταδίδουν οι δύο χρήστες προς το δίαυλο. Η διαδικασία καταλήγει –βλ. κάτω τμήμα

του Σχήματος 2.1b- στο δέκτη 1, όπου γίνεται η ανάκτηση αποκλειστικά του σήματος από τον αντίστοιχο πομπό 1, ενώ, παράλληλα, το σήμα από τον πομπό 2 γίνεται αντιληπτό ως παρεμβολή αυξάνοντας ελαφρώς τη στάθμη θορύβου.



**Σχήμα 2.1** Πολλαπλή πρόσβαση με εξάπλωση φάσματος [2]

## 2.1. Multiple Access Interference (MAI)

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων 3<sup>ης</sup> γενιάς είναι η αλληλεπίδραση της χωρητικότητας με την κάλυψη, γεγονός που οφείλεται ουσιαστικά στην παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Interference - MAI). Όταν ο αριθμός των ενεργών χρηστών αυξάνεται, τότε αυξάνεται και η παρεμβολή περιορίζοντας την χωρητικότητα του συστήματος. Όταν δηλαδή ο αριθμός των χρηστών μεγαλώνει αρκετά, η ποιότητα υπηρεσίας αυτών που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης υποβαθμίζεται σημαντικά με αποτέλεσμα την απόρριψη της κλίσης και κατά συνέπεια τη μείωση της περιοχής κάλυψης. Στη συνέχεια όμως, μετά την απόρριψη των κλήσεων, η παρεμβολή για τους εναπομείναντες χρήστες μειώνεται και η περιοχή κάλυψης μεγαλώνει ξανά. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην αυξομειώση της περιοχής κάλυψης μιας κυψέλης και περιγράφεται από τον όρο “**cell breathing**”. Η αλληλεξάρτηση μεταξύ χωρητικότητας και κάλυψης οδηγεί στην από κοινού αντιμετώπιση των απαιτήσεων για κάλυψη και χωρητικότητα κατά τη σχεδίαση [18].

Για παράδειγμα, στο σύστημα UMTS, που είναι ένα βασισμένο στο CDMA σύστημα, οι χρήστες διαχωρίζονται από τον κώδικα. Λόγω της μη-ορθογωνικότητας

μεταξύ των κωδίκων στο δέκτη, οι διαφορετικοί χρήστες θα παρέμβουν ο ένας στον άλλο δηλαδή αυτό που είπαμε πιο πάνω πολλαπλάσια παρεμβολή πρόσβασης (Multiple Access Interference-MAI), και η επίδρασή της είναι μείωση της χωρητικότητας στο δίκτυο CDMA. Μια μείωση παρεμβολής παρεχόμενη για ευφυής κεραίες μεταφράζει άμεσα σε μια αύξηση χωρητικότητας ή ποιότητας στα δίκτυα CDMA.

Το CDMA δεν είναι ένα σκληρά περιορισμένο σύστημα στο θέμα του αριθμού χρηστών λόγω της παρεμβολής πολλαπλής πρόσβασης που οφείλεται στη μη ορθογωνικότητα των κωδίκων καναλιών που περιορίζει τον αριθμό χρηστών. Αυτή η ευελιξία στα συστήματα CDMA επιτρέπει στη μείωση της παρεμβολής να μεταφράζεται είτε σε

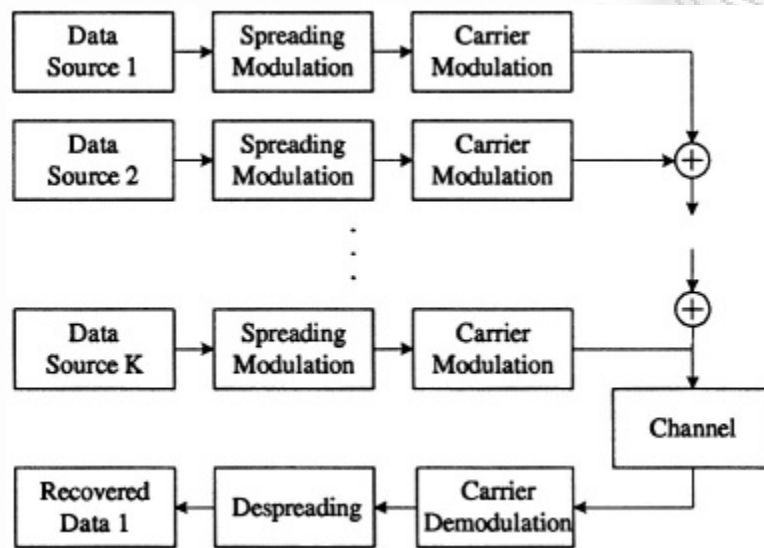
- περισσότερους χρήστες στο σύστημα,
- υψηλότερο ρυθμό εκπομπής για τους υπάρχοντες χρήστες,
- βελτιωμένη ποιότητα για τους υπάρχοντες χρήστες στον ίδιο ρυθμό εκπομπής
- μια εκτεταμένη διάταξη κυψελών για τον ίδιο αριθμό χρηστών ή
- οποιοδήποτε αυθαίρετο συνδυασμό τους [9].

## 2.2. Κώδικες CDMA

Στην παρούσα ενότητα περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των ακολουθιών που χρησιμοποιούνται στα συστήματα CDMA. Παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα των διαφορετικών κατηγοριών ακολουθιών που εφαρμόζονται στην πράξη και γίνεται περιγραφή του τρόπου δημιουργίας τους. Οι ακολουθίες που χρησιμοποιούνται στα συστήματα CDMA διακρίνονται σε ακολουθίες ημιορθογώνιες ή ψευδοθορύβου (PN) και σε ορθογώνιες (orthogonal) ακολουθίες. Ένα γενικό πρότυπο συστημάτων DS-SS-CDMA K-χρηστών, μόνο για up-link κανάλια του συστήματος φαίνεται στο σχήμα 2.2 [4]

Όπως υποδηλώνει και το όνομα, οι κώδικες CDMA, των οποίων τα χαρακτηριστικά θα καθορίσουν την απόδοση και τους διάφορους περιορισμούς ή απαιτήσεις ενός CDMA συστήματος, παίζουν τον πιο ουσιαστικό ρόλο σε μια αρχιτεκτονική συστήματος CDMA. Για παράδειγμα, η χρήση ορθογώνιας μεταβλητής spreading factor (OVSF) σε UMTS-UTRA και W-CDMA πρότυπα

απαιτεί ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο υπολογισμού ποσοστού ταυτοποίησης που πρέπει να εκτελείται στους σχετικούς πομποδέκτες έτσι ώστε όταν αλλάζει το ποσοστό μετάδοσης δεδομένων των χρηστών να ταιριάζουν και να ταυτοποιούνται με τον ειδικό παράγοντα διάδοσης (spreading factor) ή το σύστημα θέλοντας να αναγνωριστούν όσο το δυνατό περισσότεροι χρήστες σε μια κυψέλη.



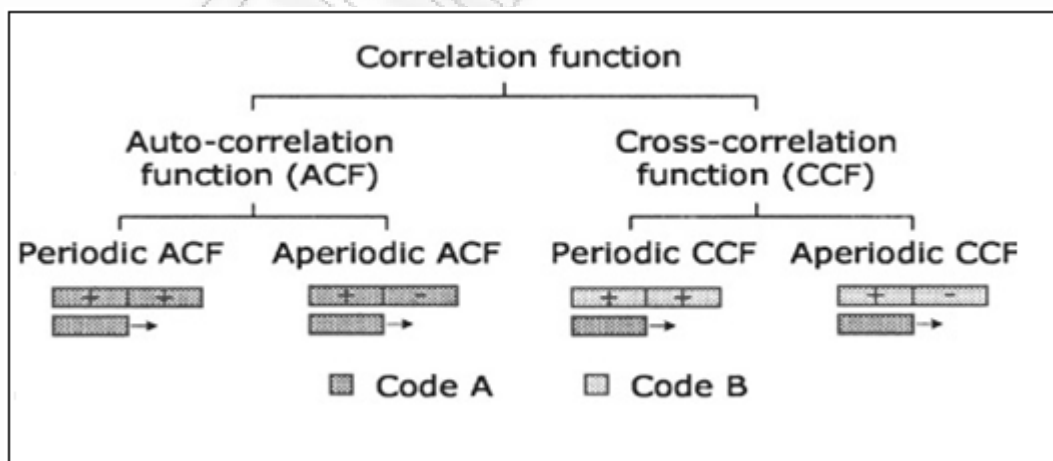
**Σχήμα 2.2** Ένα γενικό πρότυπο συστημάτων DS-SSMA K-χρηστών, μόνο για up-link κανάλια του συστήματος [4]

Επιπρόσθετα η αλλαγή ποσοστού στο UMTS-UTRA και W-CDMA μπορεί να γίνει μονό στα πολλαπλάσια του δύο, που σημαίνει ότι η συνεχής αλλαγή ποσοστού είναι αδύνατη. Αυτή η απαίτηση είναι μια άμεση συνεπεία της δένδροειδούς δομής του OVSF κώδικα, όπου οι κώδικες στα ανώτερα στρώματα παράγουν ένα χαμηλότερο διαδιδόμενο παράγοντα, δεδομένου ότι εκείνοι στα χαμηλότερα στρώματα προσφέρουν ένα υψηλότερο διαδιδόμενο παράγοντα. Επομένως, η κατοχή ενός κόμβου στα ανώτερα στρώματα εμποδίζει αποτελεσματικά όλους τους κόμβους στα χαμηλότερα στρώματα και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα λιγότεροι χρήστες να φιλοξενηθούν σε μια κυψέλη. Οι αλγόριθμοι ποσοστού ταυτοποίησης πράγματι καταναλώνουν ένα μεγάλο ποσό υλικού και λογισμικού πόρου και επιδρούν στη γενική τους απόδοση, όπως στην αυξανόμενη δύναμη υπολογισμού και την λανθάνουσα κατάσταση επεξεργασίας. Επομένως, η επιλογή του κώδικα CDMA είναι εξαιρετικά σημαντική και θα πρέπει ελέγχεται στο αρχικό στάδιο σχεδίασης ενός συστήματος CDMA. Υπάρχουν πολλοί τρόποι να χαρακτηριστούν οι κώδικες CDMA αλλά κανένας δεν είναι πιο αποτελεσματικός και διαισθητικός από τη

συνάρτηση Αυτοσυσχέτισης (ACF) και τη συνάρτηση Ετεροσυσχέτισης (CCF) οι οποίες θα αναλυθούν πιο κάτω [17].

### 2.2.1. Συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (ACF)

Η ACF ορίζεται ως το αποτέλεσμα της chip-wise συνέλιξης ή απλής λειτουργίας συσχετισμού μεταξύ δυο χρόνο-μετατοπισμένων εκδόσεων του ίδιου κώδικα ο οποίος μπορεί να ταξινομηθεί περαιτέρω σε δυο υποκατηγορίες: το περιοδικό ACF και το απεριοδικό ACF, ανάλογα με τα ίδια και διαφορετικά bit μοτίβα, αντίστοιχα, σε δυο διαδοχικά bits του λαμβανόμενου bit stream κατά την διάρκεια της διαδικασίας συσχετισμού σε ένα δέκτη CDMA όπως φαίνεται και στο σχήμα. Σε ένα πρακτικό σύστημα CDMA, συνήθως τα περιοδικά και απεριοδικά ACFs εμφανίζονται ισοπίθανα και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι  $\langle\langle +1 \rangle\rangle$  και  $\langle\langle -1 \rangle\rangle$  εμφανίζονται ισοπίθανα στο δυαδικό bit stream. Η in-phase ACF, η οποία είναι συχνά ίση με το μήκος της ή ίση με τη τιμή  $PG(N)$  επιδρά στην αποδοτικότητα ανίχνευσης του επιθυμητού σήματος σε ένα δέκτη CDMA όπου και χρησιμοποιείται αντιστοιχημένο φίλτρο. Από την άλλη, η out-of-phase ACFs ενός κώδικα CDMA θα είναι αβλαβής εάν δεν είναι παρούσα καμιά επίδραση πολλαπλών διαδρόμων. Εντούτοις θα συμβάλουν στη παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης (MAI) και θα έχουν σοβαρές επιπτώσεις στην επίδοση συστημάτων λόγω παρεμβολής πολλαπλών διαδρόμων (MI) [2]

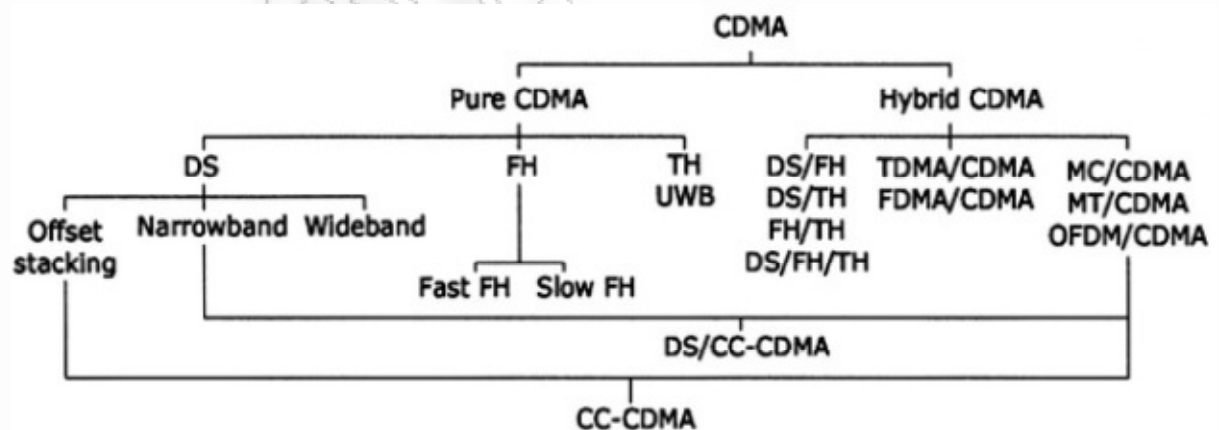


Σχήμα 2.3 Συναρτήσεις συσχετισμού των κωδίκων CDMA [2].



### 2.2.2. Συνάρτηση ετεροσυσχέτισης (CCF)

Η CCF ορίζεται ως το αποτέλεσμα της λειτουργίας chip-wise συνελίξεων μεταξύ δυο διαφορετικών κωδικών διάδοσης σε μια οικογένεια κωδικών. Λόγω του ίδιου λόγου που αναφέραμε πιο πάνω υπάρχουν επίσης δυο διαφορετικοί τύποι των CCF: το περιοδικό CCF και το απεριοδικό CCF. Το πρώτο βρίσκεται κατά κύριο λόγο στα κανάλια σύγχρονης μετάδοσης όπως τα down-link κανάλια σε ένα ασύρματο σύστημα. Ο δεύτερος τύπος μπορεί να εμφανιστεί σε σύγχρονα και ασύγχρονα κανάλια. Σε αντίθεση με την out-of-phase ACF αυτό θα συμβάλει στη MAI μόνο κάτω από κανάλια πολλαπλών διαδρομών, το CCF πάντα συμβάλει στη MAI, δεν έχει σημασία όταν η επίδραση πολλαπλών διαδρομών είναι παρούσα ή όχι. Αφενός η out-of-phase ACF θα γίνει επιβλαβές εάν και μονό ένα κανάλι πολλαπλών διαδρομών είναι ενδιαφερόμενο διαφορετικά ποτέ δεν θα αποδώσει τη MAI στον δέκτη συσχέτισης. Προφανώς η MAI είναι μια από τις σοβαρότερες απειλές για να διακινδυνέψει η αποδοτικότητα ενός δέκτη CDMA με χρησιμοποίηση είτε συσχετιστή είτε RAKE και γι' αυτό πρέπει να κρατηθεί κάτω από ένα αρκετά χαμηλό επίπεδο για να εξασφαλίσει ικανοποιητική απόδοση. Οι πίνακες πιο κάτω απορυθμίζουν όλες τις λειτουργίες συσχετισμού ενός κώδικα CDMA και την αξία της συμπεριφοράς τους σε ένα σύστημα CDMA.



Σχήμα 2.3 Οικογένειες δέντρων διάφορων τεχνολογιών CDMA [2]

## 2.3. Ημιορθογώνιες ακολουθίες

Η έρευνα για την προοπτική και την εξέλιξη των κωδικών CDMA ή των ακολουθιών είναι ένα πολύ ενεργό ερευνητικό θέμα. Πιο κάτω αναφέρονται μερικοί από τους παραδοσιακούς κώδικες όπως οι ημιορθογώνιοι κώδικες η ψευδοθυρόβου (M-ακολουθίας, οι χρυσοί κώδικες, κώδικες Kasami) Εκτός από αυτούς τους κώδικες που αναφέρονται πιο πάνω υπάρχουν πολλοί άλλοι λιγότερο ευρέως διαδεδομένοι όπως GMW κώδικες , No codes, Bent κώδικες

### 2.3.1. M-Ακολουθίες

Οι ακολουθίες  $m$  ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των δυαδικών ακολουθιών μεγίστου μήκους. Παράγονται από ένα γραμμικό πολυώνυμο  $g(x)$  βαθμού  $m$ , δηλαδή  $g(x) = g_m x^m + g_{m-1} x^{m-1} + \dots + g_1 x + g_0$ . Το πολυώνυμο  $g(x)$  ονομάζεται πολυώνυμο γεννήτορας και ανήκει στην κατηγορία των αρχέγονων (primitive) πολυωνύμων δηλαδή εκείνων που δεν παραγοντοποιούνται. Η παραγόμενη ακολουθία  $m$  έχει περίοδο  $Q = 2^m - 1$ ,  $R_{kk}(0) = Q$  και  $R_{kk}(q) = -1$  για  $q \neq 0$ . Είναι φανερό ότι οι ακολουθίες αυτές έχουν καλές ιδιότητες αυτοσυσχέτισης που βοηθούν στην επίτευξη συγχρονισμού στο δέκτη, σε αντίθεση με τις ιδιότητες ετεροσυσχέτισης που δεν πληρούν τις επιθυμητές προϋποθέσεις [2].

### 2.3.2. Ακολουθίες Gold

Οι ακολουθίες Gold είναι από τις γνωστότερες δυαδικές ακολουθίες καθώς χαρακτηρίζονται από αρκετά καλές ιδιότητες συσχέτισης, μελετήθηκαν αρχικά από τον P. Gold το 1968 και έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε πολλά εμπορικά συστήματα CDMA συμπεριλαμβανομένου του IS-93 και των προτύπων W-CDMA. Ανήκουν στην υποκατηγορία των σχεδόν ορθογωνίων ακολουθιών (quasi orthogonal, QO). Ένα σύνολο από ακολουθίες Gold παράγεται από ζεύγη ακολουθιών  $m$ ,  $\underline{x}$  και  $\underline{y}$ , που έχουν μήκος και περίοδο  $Q$ . Κάθε ακολουθία Gold του συνόλου παράγεται από τη modulo-2 άθροιση της ακολουθίας  $\underline{x}$  με μια εκδοχή της  $\underline{y}$  που προκύπτει από την κυκλική της ολίσθηση. Ως αποτέλεσμα, η οικογένεια τέτοιων ακολουθιών μπορεί να περιγραφεί ως εξής [2], [4]

$$S_g = \{\underline{x}, \underline{y}, \underline{x} \oplus \underline{y}, \underline{x} \oplus T^{-1} \underline{y}, \underline{x} \oplus T^{-2} \underline{y}, \dots, \underline{x} \oplus T^{-(Q-1)} \underline{y}\}$$

όπου  $T^{-q}$  για  $q=1, \dots, Q-1$  αναπαριστά την κυκλική ολίσθηση της  $\underline{y}$  κατά  $q$  chips. Στην οικογένεια των ακολουθιών Gold, κάθε σύνολο χαρακτηρίζεται από  $K = Q + 2$  ακολουθίες. Μία επιπλέον σπουδαία ιδιότητα των ακολουθιών αυτών είναι ότι η αυτοσυσχέτιση και η ετεροσυσχέτιση λαμβάνουν μόνο συγκεκριμένες τιμές και ειδικότερα

$$R_{kk}(q) = \begin{cases} Q, & q = 0 \\ \{-1, -t(m), t(m) - 2\}, & q \neq 0 \end{cases}$$

$$R_{jk}(q) = \{-1, -t(m), t(m) - 2\}, j \neq k$$

όπου  $t(m) = 2^{(m+1)/2} + 1$ , όταν  $m$  περιττός ή  $t(m) = 2^{(m+2)/2} + 1$ , όταν  $m$  άρτιος.

### 2.3.3. Ακολουθίες Kasami

Οι ακολουθίες Kasami είναι δυαδικές ακολουθίες που προσεγγίζουν καλύτερα το όριο Welsh συγκριτικά με όλες τις προηγούμενες. Κάθε ακολουθία του συνόλου παράγεται από μία ακολουθία  $m$ ,  $\underline{x}$ , με περίοδο  $Q$ . Η ακολουθία  $\underline{x}$  υπόκειται σε περιοδική δειγματοληψία μέχρι να προκύψει μία νέα ακολουθία  $\underline{y}$  μήκους  $Q$ , η οποία αποτελείται, ουσιαστικά, τη από την αλληλουχία πολλών ακολουθιών  $\underline{x}$  μέχρι να προκύψει μια ακολουθία μήκους  $Q$ . Το σύνολο των ακολουθιών Kasami παράγεται από τη modulo-2 άθροιση της ακολουθίας  $\underline{x}$  και της κυκλικής ολίσθησης της  $\underline{y}$ .

Αν το πολυώνυμο γεννήτορας της ακολουθίας  $\underline{x}$  είναι βαθμού  $m$ , τότε η ακολουθία έχει περίοδο  $Q = 2^m - 1$ . Οι ακολουθίες Kasami παράγονται μόνο για άρτιους αριθμούς  $m$ . Η δειγματοληψία της  $\underline{x}$  πραγματοποιείται μέσω της συνάρτησης  $s(m) = 2^{m/2} + 1$  και, άρα, η ακολουθία  $\underline{y}$  έχει μικρότερη περίοδο ίση με  $(2^m - 1)/s(m) = 2^{m/2} - 1$ . Η οικογένεια ακολουθιών που προκύπτει είναι:

$$S_k = \{\underline{x}, \underline{y}, \underline{x} \oplus \underline{y}, \underline{x} \oplus T^{-1} \underline{y}, \underline{x} \oplus T^{-2} \underline{y}, \dots, \underline{x} \oplus T^{-(2^{m/2}-2)} \underline{y}\}$$

Όπως συμβαίνει στις ακολουθίες Gold, έτσι και στις ακολουθίες Kasami, η αυτοσυσχέτιση και η ετεροσυσχέτιση μπορούν να πάρουν μόνο συγκεκριμένες τιμές και, μάλιστα, μικρότερες από τις αντίστοιχες των ακολουθιών Gold. Οι σχέσεις για τις συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης είναι

$$R_{kk}(q) = \begin{cases} Q, & q = 0 \\ \{-1, -s(m), s(m) - 2\}, & q \neq 0 \end{cases}$$

$$R_{jk}(q) = \{-1, -s(m), s(m) - 2\}, j \neq k$$

Το πλήθος των ακολουθιών στην οικογένεια Kasami μειώνεται στην τιμή  $K = 2^{m/2}$  συγκριτικά με το πλήθος ακολουθιών στις ακολουθίες m. Παρόλα αυτά, επειδή είναι δυνατό να περικοπούν από την οικογένεια Kasami όσες ακολουθίες έχουν υψηλές τιμές ετεροσυσχέτισης, οι εναπομένουσες διαθέτουν χαμηλές τιμές [4].

## 2.4. Ορθογώνιες Ακολουθίες

Οι ορθογώνιες ακολουθίες χαρακτηρίζονται από μηδενική τιμή ετεροσυσχέτισης όταν οι χρονικές καθυστερήσεις μεταξύ των σημάτων είναι μηδέν, δηλαδή όταν υπάρχει συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη. Σε αντίθετη περίπτωση, εμφανίζουν δυσμενείς ιδιότητες αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης. Για το λόγο αυτό, οι συγκεκριμένες ακολουθίες είναι χρησιμότερες για τη ζεύξη downlink, όπου ο συγχρονισμός είναι σε μεγάλο βαθμό εφικτός. Ακολουθεί η περιγραφή των ακολουθιών Walsh-Hadamard (WH) [2].

### 2.4.1. Ακολουθίες Walsh-Hadamard (WH)

Οι ακολουθίες WH χρησιμοποιούνται από το πρότυπο IS-95. Διαθέτουν άρτιο αριθμό chips και ο αριθμός των ακολουθιών στο ίδιο σύνολο ισούται με τον αριθμό των chips. Όταν το σύστημα CDMA λειτουργεί με μεταβλητό παράγοντα εξάπλωσης (variable spreading factor) με άλλα λόγια, όταν οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα εκπομπής σε διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων, οι ακολουθίες WH προσφέρουν τις ακόλουθες χρήσιμες ιδιότητες:

- Μία ακολουθία WH μήκους  $n$  μπορεί να διαιρεθεί σε δύο ακολουθίες μήκους  $n/2$

- Όλες οι ακολουθίες WH μήκους  $n/2$  που παράγονται από ακολουθίες μήκους  $n$  είναι ορθογώνιες μεταξύ τους
- Δύο ακολουθίες μήκους  $n/2$  και  $n$  είναι ορθογώνιες εκτός αν η μία από τις δύο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία της δεύτερης

Οι ακολουθίες WH δημιουργούνται με τη βοήθεια των πινάκων Hadamard ως εξής

$$H_1 = [1], H_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \text{ και } H_{2N} = \begin{pmatrix} H_N & H_N \\ H_N & -H_N \end{pmatrix}$$

## 2.5. Πρότυπα κινητών επικοινωνιών βασισμένα στη Τεχνική CDMA

Το 1985, και ενώ διεζάγονταν έρευνες για το σχήμα πολλαπλής πρόσβασης που πρέπει να υιοθετηθεί για το GSM προέκυψε το συμπέρασμα ότι “Τα συστήματα DS-CDMA δεν έχουν καμία ελπίδα να υιοθετηθούν από το ευρωπαϊκό πρότυπο”. Το κλίμα σχετικά με την τεχνική CDMA στενής ζώνης άρχισε να αντιστρέφεται το 1993 με αφορμή της ενσωμάτωσης της τεχνικής στο πρότυπο IS-95, το οποίο καθιερώθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες, την Ιαπωνία και την Κορέα. Στην αρχή της δεκαετίας του 2000, έγινε εμπορικά διαθέσιμη η τεχνική της ευρυζωνικής CDMA ως το κυρίαρχο σχήμα πολλαπλής πρόσβασης για τηλεπικοινωνιακά πρότυπα τρίτης γενιάς (3G).

### 2.5.1. Το πρότυπο IS-95

Το πρότυπο IS-95 ολοκληρώθηκε το 1993 και το 1995 εμπλουτίστηκε με μία νέα έκδοχή που αφορούσε την περιοχή συχνοτήτων PCS (Personal Communication Services) περί τα 1.9 GHz. Αποτελεί ένα από τα πλέον δημοφιλή ψηφιακά συστήματα δεύτερης γενιάς (2G). Καθώς ξεκίνησε από τις Ηνωμένες Πολιτείες είναι λογικό να είναι συμβατό με το παλαιότερης γενιάς αναλογικό πρότυπο AMPS που αναπτύχθηκε στην ίδια χώρα. Για την υποστήριξη υπηρεσιών υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης, αναπτύχθηκε το 1998 η έκδοση IS-95B του προτύπου. Οι δύο εκδοχές διαφέρουν ως προς το ότι, ενώ το IS-95A χρησιμοποιεί μία ακολουθία ανά κανάλι, το IS-95B υποστηρίζει τη χρήση έως και οκτώ ακολουθιών WH που προσφέρουν ρυθμούς μέχρι και 115.2Kb/s. Έτσι, λοιπόν, υποστηρίζονται υπηρεσίες μεταβλητού ρυθμού (multirate) και ο ρυθμός μετάδοσης χρήστη προσαρμόζεται στον όγκο δεδομένων που

πρέπει να μεταδοθούν (S-ART, Adaptive Rate Transmission-services). Οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Ιαπωνία και η Κορέα είναι οι χώρες που υιοθέτησαν πρώτες το πρότυπο. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά του προτύπου. Το εύρος ζώνης είναι 1.25 MHz. Το δίκτυο (σταθμός βάσης και κινητά τερματικά) επιτυγχάνει συγχρονισμό με αποκλίσεις της τάξης των μικροδευτερολέπτων. Αυτό επιτρέπει τη χρήση των ίδιων ακολουθιών με διαφορετικές ολισθήσεις ως πιλοτικά σήματα, εφόσον οι ακολουθίες αυτές διαρκούν περισσότερο από ένα σύμβολο δεδομένων [9]

Εύρος Ζώνης Συχνοτήτων	1.25 MHz
Ρυθμός chip	1.2288 Mc/s
Εύρος Συχνοτήτων για τη ζεύξη uplink	869-894 MHz 1930-1980 MHz
Εύρος Συχνοτήτων για τη ζεύξη downlink	824-849 MHz 1850-1910 MHz
Διάρκεια Πλαισίου	20 ms
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	set 1: 9.6 Kb/s set 2: 14.4 Kb/s IS-95B: 115.2 Kb/s
Κωδικοποίηση Ομιλίας	QCELP (Qualcomm code excited linear prediction) 8 Kb/s ACELP (Algebraic Code Excited Linear Prediction) 13 Kb/s EVRC (Enhanced Variable Rate CODEC) 8Kb/s
Έλεγχος Ισχύος	ζεύξη uplink: ανοικτού βρόχου και γρήγορου κλειστού βρόχου ζεύξη downlink: βρόχος χαμηλής ποιότητας
Ήπια Διαπομπή	Ναι
Πλήθος Κλάδων του Δέκτη RAKE	4
Είδη Ακολουθιών	Ακολουθίες WH και Long m

**Πίνακας 2.1** Παράμετροι φυσικού στρώματος του IS-95

### 2.5.2. Το πρότυπο UMTS ή IMT-2000

Οι απαιτήσεις για υπηρεσίες υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων όπως και η ανάγκη για αυξημένη φασματική απόδοση οδήγησε στην ανάπτυξη της τρίτης γενιάς κινητών επικοινωνιών. Η ITU (International Telecommunication Union) ονόμασε το πρότυπο αυτό IMT-2000 (International Mobile Telecommunications) ενώ στην Ευρώπη είναι γνωστό ως UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Η ανάπτυξη του προτύπου αυτού από την ITU είχε αφετηρία το 1985 με την αρχική ονομασία FPLMTS (Future Public Land Mobile Telephone System) και ολοκληρώθηκε το 2000 με τη νέα ονομασία. Συνοπτικά οι βασικοί στόχοι του IMT-2000 είναι

- Πλήρης κάλυψη και κινητικότητα για κινητά τερματικά με ρυθμό έως 144 Kb/s και κατά προτίμηση για κινητά τερματικά με ρυθμό έως 384 Kb/s
- Περιορισμένη κάλυψη και κινητικότητα για κινητά τερματικά με ρυθμό έως 2 Mb/s
- Υψηλή φασματική απόδοση σε σύγκριση με τα υπάρχοντα συστήματα
- Υψηλός βαθμός ελαστικότητας όσον αφορά την εισαγωγή νέων υπηρεσιών

Ως βασική τεχνική πολλαπλής πρόσβασης επιλέχθηκε η ευρυζωνική CDMA και αποτέλεσε την καθολική επιλογή για τα δίκτυα 3G κινητών επικοινωνιών που αναπτύχθηκαν στην Ευρώπη, στην Αμερική, στην Ιαπωνία και την Κορέα.

### 2.5.3. Τεχνική Wideband CDMA

Το ευρυζωνικό CDMA έχει εύρος ζώνης 5 MHz ή και περισσότερο. Άλλωστε το εύρος ζώνης που καθιερώθηκε για όλα τα τρίτης γενιάς συστήματα είναι 5 MHz. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την επιλογή του συγκεκριμένου εύρους. Αφενός, οι ρυθμοί δεδομένων της τάξης των 144 και 384 Kbps -βασικοί στόχοι του IMT-2000- είναι εφικτοί με το συγκεκριμένο εύρος ζώνης προσφέροντας σημαντική χωρητικότητα. Ακόμη και ρυθμοί μετάδοσης της τάξης των 2 Mbps μπορούν να εξυπηρετηθούν υπό ορισμένες συνθήκες. Ένας ακόμη λόγος είναι το περιορισμένο φάσμα, ιδιαίτερα αν τα τρίτης γενιάς συστήματα εφαρμοστούν επιπλέον των ήδη υπάρχοντων συστημάτων δεύτερης γενιάς που έχουν καταλάβει τμήμα του

διαθέσιμου φάσματος. Τέλος, με διαθέσιμο εύρος ζώνης 5 MHz αντιμετωπίζεται αποδοτικότερα η παρεμβολή λόγω πολύοδης διάδοσης, συγκριτικά με τα συστήματα στενού εύρους ζώνης.

Δύο σχήματα ευρυζωνικής CDMA είναι διαθέσιμα για τα τρίτης γενιάς συστήματα:

- Το WCDMA που αποτέλεσε την επιλογή της Ευρώπης και της Ιαπωνίας για το UMTS και IMT-2000, αντίστοιχα.
- Το cdma2000 το οποίο αποτέλεσε επιλογή των Ηνωμένων Πολιτειών για να διαδεχθεί το πρότυπο στενής ζώνης CDMA IS-95 και να αποτελέσει την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης του IMT-2000.

#### 2.5.4. WCDMA

Το WCDMA επιλέχθηκε για την υλοποίηση του προτύπου UMTS και IMT-2000 στην Ευρώπη και την Ιαπωνία, αντίστοιχα. Είναι ασύγχρονο, γεγονός που σημαίνει ότι οι σταθμοί βάσης δεν είναι συγχρονισμένοι (SIC). Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται διαφορετικές ακολουθίες *long* για το διαχωρισμό μεταξύ των κυψελών και των χρηστών. Υποστηρίζονται υπηρεσίες υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων μέσω της χρήσης μικρότερων παραγόντων εξάπλωσης, χωρίς παράλληλη αύξηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης. Για παράδειγμα, για παράγοντες εξάπλωσης (spreading factors) 4, 8, 16, 32, 64, 128 και 256 επιτυγχάνονται, αντίστοιχα, ρυθμοί μετάδοσης 1024, 512, 256, 128, 64, 32, και 16 Kbps (S-ART). Υπηρεσίες υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης δεδομένων μπορούν επίσης να υποστηριχθούν με εκχώρηση στο χρήστη δύο ζωνών των 5 MHz. Επιπλέον, το πρότυπο εκμεταλλεύεται τις μεταβολές στο διάυλο προκειμένου να αυξηθεί ο ρυθμός μετάδοσης. Για παράδειγμα, όταν ο λόγος SIR αυξηθεί, το σύστημα οδηγείται σε μειωμένο παράγοντα εξάπλωσης άρα σε αυξημένους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων για τους χρήστες (C-ART, Adaptive Rate Transmission-channel). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης σύμφωνα με τις απαιτήσεις του IMT-2000 (2 Mb/s) αν ο παράγοντας εξάπλωσης είναι 4 ( $1024\text{Kbps} \times 2 = 2\text{Mbps}$ )

Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά του WCDMA [9]



Εύρος Ζώνης Συχνοτήτων	5 MHz
Είδη Διπλεξίας (Duplexing)	FDD και TDD
Δίαυλος για τη ζεύξη downlink	Απευθείας Εξάπλωση (DS)
Ρυθμός chip	3.84 Mbps
Διαμόρφωση δεδομένων	QPSK (ζεύξη downlink) BPSK (ζεύξη uplink)
Κωδικοποίηση καναλιού	Συνελικτικοί και turbo κώδικες
Διάρκεια Πλαισίου	10 ms
Πολλαπλοί Ρυθμοί δεδομένων	Μεταβλητή εξάπλωση και πολλαπλοί κώδικες (Multicode)
Παράγοντες Εξάπλωσης	4-256 (ζεύξη uplink), 4-512 (ζεύξη downlink)
Έλεγχος Ισχύος	Ανοικτού και γρήγορου κλειστού βρόχου
Διαπομπή	Ήπια Ενδοσυχνοτική
Πολυπλεξία καναλιού (ζεύξη downlink)	Κανάλια δεδομένων και ελέγχου πολυπλεγμένα στον χρόνο
Πολυπλεξία καναλιού (ζεύξη uplink)	Κανάλια ελέγχου και πιλοτικά κανάλια πολυπλεγμένα στον χρόνο I&Q πολυπλεξία στα κανάλια δεδομένων και ελέγχου
Ακολουθίες (ζεύξη downlink)	Ακολουθίες OVVSF (Orthogonal Variable Spreading Factor), ακολουθίες Gold $2^{18} - 1$ για διαχωρισμό κυψέλης και χρηστών
Ακολουθίες (ζεύξη uplink)	ακολουθίες OVVSF, ακολουθίες Gold $2^{41} - 1$ για διαχωρισμό κυψέλης και χρηστών Διαφορετικές χρονικές ολισθήσεις στα I και Q κανάλια

**Πίνακας 2.2** Παράμετροι φυσικού στρώματος του WCDMA

## 2.5.5. CDMA2000

Το πρότυπο cdma2000 επιλέχθηκε για την υλοποίηση του προτύπου IMT-2000 στις Ηνωμένες Πολιτείες με σκοπό να διαδεχθεί το στενής ζώνης CDMA του προτύπου IS-95. Ο βασικός ρυθμός chip είναι 1.2288 Mc/s και το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι 1.25MHz. Αυτό το μοντέλο αποτελεί την 1× έκδοση του cdma2000. Υπάρχει και η 3× που είναι γνωστή ως πολλαπλού φέροντος (MC, Multi Carrier) με εύρος ζώνης που δημιουργείται από τρία συνεχή φέροντα των 1.25MHz. Η προσέγγιση MC του cdma2000 χρησιμοποιεί τα ίδια φέροντα με το πρότυπο IS-95.

Σε αντίθεση με το WCDMA, το cdma2000 είναι σύγχρονο. Εξαιτίας αυτού του συγχρονισμού χρησιμοποιούνται ίδιες ακολουθίες m με διαφορετικές όμως ολισθήσεις για το διαχωρισμό κυψελών και χρηστών.

Στον Πίνακα 2.3 φαίνονται ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά του cdma2000 [9]

Cdma2000	cdma2000 1×	cdma2000 3×
Εύρος Ζώνης Συχνοτήτων	1.25 MHz	3.75 MHz
Roll-off factor	Όπως το πρότυπο IS-95	
Δίαυλος για τη ζεύξη downlink	Απευθείας Εξάπλωση (DS)	Πολλαπλού φέροντος (MC)
Ρυθμός chip	1.2288 Mcps	1.2288 Mcps (ζεύξη downlink) 3.6864 Mcps (ζεύξη uplink)
Διαμόρφωση δεδομένων	QPSK (ζεύξη downlink)	BPSK (ζεύξη uplink)
Διάρκεια Πλαισίου	20 ή 5 ms	
Πολλαπλοί ρυθμοί δεδομένων	Μεταβλητή εξάπλωση και πολλαπλοί κώδικες	
Παράγοντες εξάπλωσης	4-256	
Έλεγχος Ισχύος	Ανοικτού και γρήγορου κλειστού βρόχου	
Διαπομπή	Ήπια Ενδοσυχνολική	
Είδη ακολουθιών (ζεύξη downlink)	Μεταβλητού μήκους ακολουθίες WH για διαχωρισμό καναλιών, ακολουθίες m $2^{15}$ (ίδια ακολουθία αλλιώς	

	ολισθημένη για διαφορετικές κυψέλες, διαφορετικές ακολουθίες για I&Q κανάλι)
Είδη ακολουθιών (ζεύξη uplink)	Μεταβλητού μήκους ορθογώνιες ακολουθίες για διαχωρισμό καναλιών, ακολουθίες $m \cdot 2^{15}$ (ίδιες για όλους τους χρήστες, διαφορετικές για I&Q κανάλια) , ακολουθίες $m \cdot 2^{41} - 1$ για διαχωρισμό χρηστών (διαφορετικές ολισθήσεις για διαφορετικούς χρήστες)

**Πίνακας 2.3** Παράμετροι φυσικού στρώματος του cdma2000

### 3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ CDMA

Το CDMA κατέχει μερικές φυσικές ιδιότητες που είναι κατάλληλες στο κινητό ράδιο περιβάλλον.

#### 3.1. Ανίχνευση δραστηριότητας φωνής (VAD)

Ο ανθρώπινος κύκλος δραστηριότητας φωνής είναι 35 %. Όταν οι χρήστες που διορίζονται σε ένα κύτταρο δεν μιλούν, το VAD θα επιτρέψει σε όλους τους άλλους χρήστες να μιλήσουν λόγω της μειωμένης αμοιβαίας παρέμβασης. Κατά συνέπεια η παρέμβαση μειώνεται από έναν παράγοντα κατά 65 %. Το CDMA είναι η μόνη τεχνολογία που εκμεταλλεύεται αυτό το φαινόμενο. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η χωρητικότητα CDMA αυξάνεται περίπου 3 φορές λόγω VAD [17].

#### 3.2. Μειωμένη χωρητικότητα

Η χωρητικότητα CDMA είναι παρέμβαση που περιορίζει το εύρος ζώνης, ενώ οι χωρητικότητες TDMA και FDMA είναι που περιορίζονται. Η χωρητικότητα του CDMA έχει ένα μειωμένο όριο υπό την έννοια ότι μπορούμε να προσθέσουμε έναν επιπρόσθετο χρήστη και να ανεχτούμε μια υποβάθμιση προσβολών της ποιότητας σημάτων. Αφ' ενός, οι χωρητικότητες TDMA και FDMA είναι σκληρό-

περιορισμένες. Ένα άλλο συμπέρασμα που μπορεί να προέλθει από αυτό το γεγονός είναι ότι οποιαδήποτε μείωση της παρεμβολής πολλαπλής πρόσβασης (MAI) μετατρέπεται άμεσα και γραμμικά σε μια αύξηση της χωρητικότητας. Περαιτέρω, παρουσιάζεται ακόμη και το φράξιμο που βιώνεται από τους χρήστες σε ένα σύστημα CDMA που έχει ένα μαλακό-όριο, το οποίο μπορεί να χαλαρώσουν κατά τη διάρκεια της βαριάς φόρτωσης για να επιτρέψει μια πρόσθετη αύξηση 13 DB στην παρέμβαση στην αναλογία θορύβου.

### 3.3. Πολλαπλές διαδρομές

Δεδομένου ότι CDMA διαδίδει το εύρος ζώνης πέρα από ένα ευρύ φάσμα συχνότητας, το κινητό κανάλι διάδοσης εμφανίζεται να είναι συχνότικά επιλεκτικό και αυτό επιτρέπει το συνδυασμό πολλαπλών διαδρομών με τη χρήση του δέκτη RAKE. Αυτή η αξιοποίηση των πολλαπλών διαδρομών είναι μια από τις μεγαλύτερες συνεισφορές στην αύξηση της επίδοσης και της χωρητικότητας του CDMA συστήματος. Περαιτέρω, ο correlator (σε CDMA) είναι πολύ απλούστερο να εφαρμοστεί από ότι ένας εξισωτής (σε TDMA ή FDMA).

### 3.4. Χρήση Sectorization για την αύξηση της χωρητικότητας

Στα συστήματα FDMA και TDMA, ο τεμαχισμός γίνεται για να μειώσει τη co-channel παρεμβολή. Ο τεμαχισμός γίνεται απλά με το να εισάγουμε τρεις (παρόμοιους) ράδιο εξοπλισμούς σε τρεις τομείς και η μείωση της αμοιβαίας παρεμβολής λόγω αυτής της ρύθμισης μεταφράζει σε μια αύξηση στην χωρητικότητα. Γενικά, οποιαδήποτε χωρική απομόνωση μέσω της χρήσης ή οι των κεραιών παρέχει μια αύξηση στη χωρητικότητα του CDMA [17].

### 3.5. Επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων

Οι προηγούμενες συγκρίσεις της χωρητικότητας CDMA με εκείνους των συμβατικών συστημάτων ισχύουν πρώτιστα για τα κινητά δορυφορικά συστήματα. Στην περίπτωση των επίγειων κυψελοειδών συστημάτων, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του CDMA σε σχέση με τα άλλα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης είναι ότι μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει ολόκληρο το φάσμα σε όλες τις κυψέλες δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία έννοια της κατανομής συχνότητας στο CDMA.

Αυτό αυξάνει την χωρητικότητα του συστήματος CDMA από ένα μεγάλο ποσοστό (σχετικό με την αύξηση στον παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας).

### 3.6. Χωρητικότητα του CDMA

Η χωρητικότητα του CDMA εξετάζει μία ενιαία κυψέλη σύστημα με  $N$  χρήστες. Υποτίθεται ότι ο κατάλληλος έλεγχος ισχύος εφαρμόζεται έτσι ώστε όλα τα αντίστροφα σήματα συνδέσεων παραλαμβάνονται με παρόμοιο επίπεδο ισχύος. Κάθε αποδιαμορφωτής σε μία κυψέλη επεξεργάζεται ένα επιθυμητό σήμα με ισχύ  $S$  και  $N-1$  σήματα με την ίδια ισχύ λήψης. Ο λόγος ισχύος σήματος προς την ισχύ του θορύβου είναι:

$$SNR = \frac{1}{N-1} \quad (1)$$

Περαιτέρω, όταν εξετάζεται η ενέργεια ανά bit ως προς την φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου, έχουμε:

$$\frac{E_B}{N_0} = \frac{\frac{W}{R}}{(N-1) + (n+S)} \quad (2)$$

όπου το  $R$  είναι ο ρυθμός bit πληροφορίας και το  $W$  είναι το σύνολο εύρος ζώνης. Ο όρος  $W/R$  είναι το κέρδος επεξεργασίας (processing gain) του συστήματος CDMA. Εάν εξετάσουμε το συνολικό θόρυβο, λόγω της ΜΑΙ και του θερμικού θορύβου, η παραπάνω σχέση γίνεται,

$$\frac{E_B}{N_0} = \frac{\frac{W}{R}}{(N-1) + (n+S)} \quad (3)$$

Η σχέση αυτή δίνει τη χωρητικότητα ως προς τον αριθμό των χρηστών ως

$$N = 1 + \frac{\frac{W}{R}}{\frac{E_B}{N_0}} - \frac{n}{S} \quad (4)$$

$E_B/N_0$  είναι το απαιτούμενο SNR για την ικανοποιητική επίδοση του αποδιαμορφωτή σε BER (π.χ. για την μετάδοση φωνής χρειάζεται BER  $10^{-3}$  ή καλύτερα). Σε αυτή τη φάση, χρησιμοποιώντας την παραπάνω σχέση, μπορούμε να κάνουμε μια απλή

σύγκριση του συστήματος CDMA με τα άλλα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης. Εξετάστε ένα εύρος ζώνης 1.25 MHz και ένα ποσοστό δυαδικών ψηφίων 8 kbps χρησιμοποιώντας τους κωδικοποιητές φωνής. Υποθέστε ότι ένα ελάχιστο  $E_b/N_0=5$  (7dB) πρέπει για να επιτύχει την επαρκή απόδοση BER  $10^{-3}$ ). Αγνοώντας την επίπτωση της πλαστικής παρέμβασης και του θερμικού θορύβου, ο αριθμός χρηστών στο σύστημα CDMA (στο εύρος ζώνης 1.25 MHz) επιλύει για να είναι,

$$N=32 \text{ χρήστες}$$

Αφ' ενός για ένα (σύστημα μίας κυψέλης) AMPS που λειτουργεί πέρα από το ίδιο εύρος ζώνης, ο αριθμός χρηστών δίνονται από το kHz  $1.25 \text{ MHz}/30 = 42$  χρήστες. Γιατί το ψηφιακό σύστημα TDMA 3 χρονοθυρίδων θα είναι 126 χρήστες. Μέχρι τώρα, η χωρητικότητα CDMA είναι πολύ λιγότερη από αυτή άλλων συμβατικών συστημάτων (δεδομένου ότι ο αριθμός χρηστών είναι μικρότερος από το κέρδος επεξεργασίας (W/R) του συστήματος). Σημειώστε όμως ότι σε ένα πολύ-κυψελωτό σύστημα AMPS (με έναν παράγοντα επαναχρησιμοποίησης συχνότητας 7), ο αριθμός χρηστών ανά κύτταρο μειώνεται από 42 σε 6 (και μια μείωση από 126 έως 18.3 στην περίπτωση TDMA) και έτσι το CDMA θα παρουσιάσει αύξηση χωρητικότητας όταν συγκρίνεται με αυτά τα συστήματα. Μονόδρομος της βελτίωσης της χωρητικότητας CDMA είναι η χρήση των περίπλοκων σχεδίων κωδικοποίησης διαμόρφωσης και καναλιών που μειώνουν την ικανότητα απαίτησης  $E_b/N_0$  και αύξησης όπως παρουσιάζεται από την εξίσωση (4).

Ο άλλος τρόπος για είναι να μειωθεί η παρεμβολή, η οποία μεταφράζεται σε μια αύξηση της χωρητικότητας σύμφωνα με τις εξισώσεις (2) και (3) είναι να έχουμε voice activation detection αλλά και sectorization σε ένα σύστημα CDMA [17].

### 3.6.1. Εφαρμογή Τομεοποίησης

Οποιαδήποτε χωρική απομόνωση των χρηστών σε ένα σύστημα CDMA μεταφράζεται άμεσα σε μια αύξηση στη χωρητικότητα του συστήματος. Ας εξετάσουμε ένα παράδειγμα όπου χρησιμοποιούνται τρεις κατευθυντικές κεραιές που έχουν  $120^\circ$  εύρος η καθεμία. Τώρα, οι πηγές παρεμβολής που βλέπει οποιαδήποτε από αυτές τις κεραιές είναι περίπου το ένα τρίτο εκείνου που βλέπει μία πανκατευθυντική κεραιά. Αυτό μειώνει τον όρο παρεμβολής στον παρονομαστή της εξίσωσης (3) κατά ένα παράγοντα 3 και ο αριθμός χρηστών (N) αυξάνει περίπου με τον ίδιο παράγοντα, δηλαδή  $N_s = 3N$ .

### 3.6.2. Ανίχνευση δραστηριότητας φωνής

Ο έλεγχος δραστηριότητας φωνής είναι ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα παρόν στα περισσότερα ψηφιακά vocoders όπου η μετάδοση καταστέλλεται για εκείνο τον χρήστη όταν καμία φωνή δεν είναι παρούσα. Θεωρήστε τον όρο, παράγοντας δραστηριότητας φωνής  $A = 3/8$  (που αντιστοιχεί στον ανθρώπινο κύκλο δραστηριότητας φωνής 35-40%). Ο όρος της παρεμβολής στον παρονομαστή της εξίσωσης (3) μειώνεται έτσι από  $(N-1)$  σε  $(N-1)A$ . Στην πραγματικότητα, η καθαρή βελτίωση στην χωρητικότητα θα μειωθεί από το  $8/3$  έως 2 εξαιτίας του γεγονότος ότι με έναν περιορισμένο αριθμό κλήσεων ανά τομέα, υπάρχει μια μη-αμελητέα πιθανότητα που ένας ανωτέρω μέσος αριθμός χρηστών μιλά αμέσως. Κατά συνέπεια, με VAD και Sectorization, το  $E_b/N_0$  γίνεται τώρα,

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{W/R}{[(N-1)A + (n+S)]} \quad (5)$$

ο αριθμός χρηστών ανά κυψέλη γίνεται,

$$N = 3Ns$$

για τους ίδιους όρους και την υπόθεση που συζητούνται προηγουμένως, η χωρητικότητα του συστήματος CDMA είναι τώρα,

$$N = 253 \text{ χρήστες !!}$$

Αυτό δίνει μια αύξηση χωρητικότητας 8 φορές όταν συγκρίνεται με την προηγούμενη περίπτωση (χωρίς VAD και τεμαχισμό). Στην πραγματικότητα, λόγω της μεταβλητότητας του  $E_b/N_0$ , η αύξηση χωρητικότητας πρέπει να είναι υποστηριγμένο 5 ή 6 φορές. Ακόμη και αυτή η αύξηση χωρητικότητας είναι αρκετή να φέρει τον αριθμό χρηστών πολύ πιο κοντά στο κέρδος επεξεργασίας ( $W/R$ ) του συστήματος. Αυτό καθιστά την χωρητικότητα CDMA συγκρίσιμη με την χωρητικότητα TDMA και FDMA. Πάλι, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι αυτοί οι υπολογισμοί είναι για ένα σύστημα με μία κυψέλη, όπου οι εκτιμήσεις επαναχρησιμοποίησης συχνότητας δεν λαμβάνονται υπόψη καθόλου. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του CDMA προέρχεται από το γεγονός ότι μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει τις ίδιες συχνότητες σε όλα τα κύτταρα (αντίθετα από TDMA και FDMA). Για να λάβει αυτό υπόψη, η

χωρητικότητα CDMA πρέπει να υπολογιστεί για την περίπτωση multicell, όπου η πρόσθετη παρεμβολή προκαλείται από τους χρήστες στις γειτονικές κυψέλες.

## 4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΩΔΙΚΩΝ CDMA

Στα συστήματα CDMA η επιλογή του κώδικα με τον οποίο θα γίνεται η εξάπλωση του φάσματος είναι σημαντική γιατί πρέπει να εξυπηρετούνται πολλοί χρήστες στην ίδια συχνότητα κατά τον ίδιο χρόνο. Για να επιτυγχάνεται αυτό θα πρέπει να ικανοποιούνται οι εξής απαιτήσεις [2]

1. Κάθε ακολουθία κωδικού που παράγεται πρέπει να είναι περιοδική με ένα σταθερό μήκος.
2. Κάθε ακολουθία κωδικού που παράγεται πρέπει να είναι εύκολο να διακριθεί από τον μετατοπισμένο στον χρόνο κωδικό.
3. Κάθε ακολουθία κωδικού που παράγεται πρέπει να είναι εύκολο να διακριθεί από άλλες ακολουθίες κωδικών.

Η πρώτη και η δεύτερη απαίτηση είναι σημαντικές όσον αφορά τα αποτελέσματα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών που εμφανίζονται στα εσωτερικά και εξωτερικά ασύρματα περιβάλλοντα διάδοσης. Η Τρίτη απαίτηση είναι σημαντική όσον αφορά την δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης. Για να μετρηθεί το επίπεδο διάκρισης των κωδικών για τις απαιτήσεις (1) και (2), χρησιμοποιείται μια συνάρτηση αυτοσυσχέτισης και μια συνάρτηση ετεροσυσχέτισης, αντίστοιχα. Με τη χρησιμοποίηση της λειτουργίας αυτοσυσχέτισης και της λειτουργίας ετεροσυσχέτισης αξιολογείται ο κώδικας διάδοσης.

Η συνάρτηση της αυτοσυσχέτισης χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του επιπέδου διάκρισης μιας ακολουθίας κώδικα και ορίζεται ως εξής:

$$r_{xx}(\tau) = 1/T \int X(t)X(t+\tau)dt$$



Η συνάρτηση Matlab που εκτελεί τη λειτουργία της αυτοσυσχέτισης είναι η εξής:

```
% autocorr.m

% Autocorrelation function of a sequence

function [out] = autocorr(indata, tn)

% indata : input sequence

% tn      : number of a period

% out     : autocorrelation data

if nargin < 2

    tn =1;

end

ln = length(indata);

out = zeros(1,ln*tn);

for ii=0:ln*tn-1

    out (ii+1) = sum(indata.*shift(indata,ii,0));

end
```

Η συνάρτηση shift που χρησιμοποιείται μέσα στην συνάρτηση της αυτοσυσχέτισης είναι η εξής:

```
% shift.m

% Shift the contents of the register

function [outregi] = shift( inregi,shiftr,shiftu)

% inregi   : Vector or matrix

% shiftr   : The amount of shift to the right.

% shiftu   : The amount of shift to the top.

% outregi  : Register output
```

```

[h, v] = size (inregi);

outregi = inregi;

shiftr = rem(shiftr,v);

shifto = rem(shifto,h);

if shifto >0

    outregi (:, 1 :shiftr) = inregi (:, v-shiftr+1 : v );

    outregi (:, 1+shiftr:v ) = inregi (:, 1 : v-shiftr);

elseif shiftr <0

    outregi (:, 1 : v+shiftr) = inregi (:, 1-shiftr:v );

    outregi (:, v+shiftr+1:v ) = inregi (:, 1 :-shiftr);

end

inregi = outregi;

if shifto > 0

    outregi(1 :h-shifto,:) = inregi (1+shifto:h, :);

    outregi(h-shifto+1:h, :) = inregi (1 :shifto,:);

elseif shifto<0

    outregi(1 :-shifto, :) = inregi (h+shifto+1, :);

    outregi(1-shifto:h, :) = inregi (1 : h+shifto,:);

end

```

Τα στοιχεία που χρειάζεται η λειτουργία της αυτοσυσχέτισης είναι το όνομα της ακολουθίας και ο αριθμός των περιόδων κώδικα για τον οποίο η λειτουργία πρόκειται να ληφθεί. Στην συνέχεια ακολουθούν παραδείγματα μέτρησης (με MATLAB) της αυτοσυσχέτισης για συγκεκριμένες ακολουθίες κωδικών.

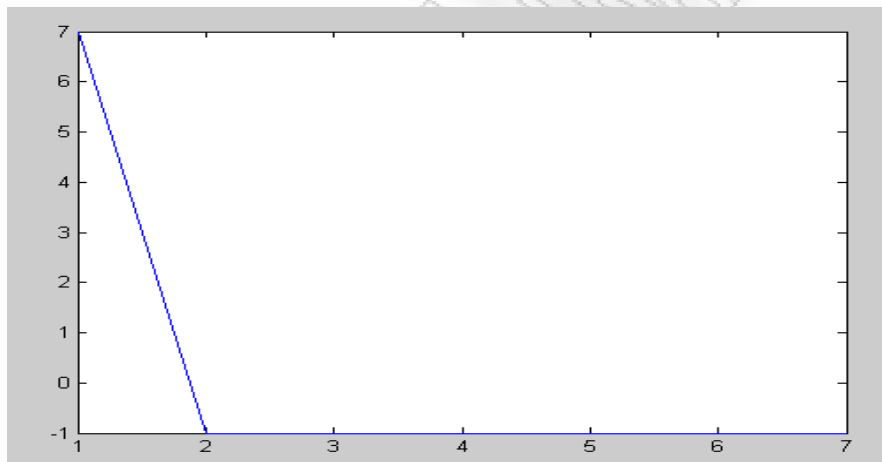
### 1° Παράδειγμα

Για την ακολουθία  $X = [1,1,1,-1,-1,1,-1]$  η τιμή της αυτοσυσχέτισης είναι:

$R_{xx} = \text{autocorr}(X);$

$R_{xx} = [7,-1,-1,-1,-1,-1,-1]$

Και το διάγραμμα που προκύπτει είναι το εξής:



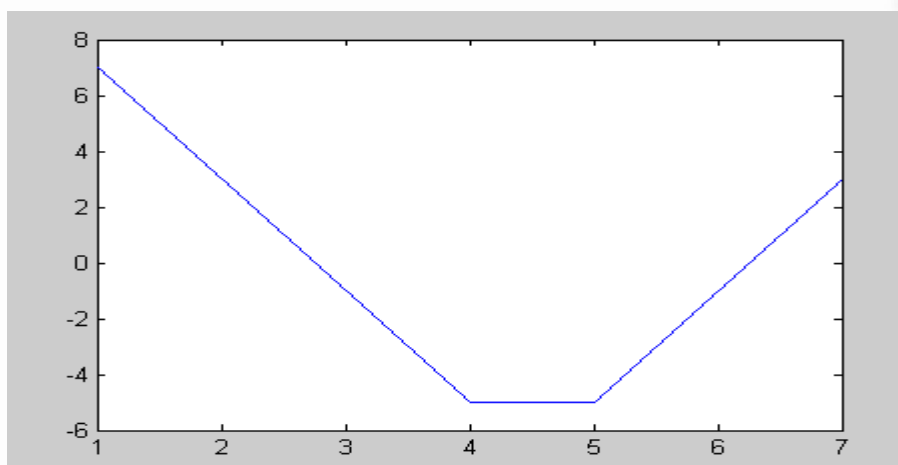
### 2° Παράδειγμα

Για την ακολουθία  $X = [-1,-1,1,1,1,1,-1]$  η τιμή της αυτοσυσχέτισης είναι:

$R_{xx} = \text{autocorr}(X);$

$R_{xx} = [7,3,-1,-5,-5,-1,3]$

Και το διάγραμμα που προκύπτει είναι το εξής:



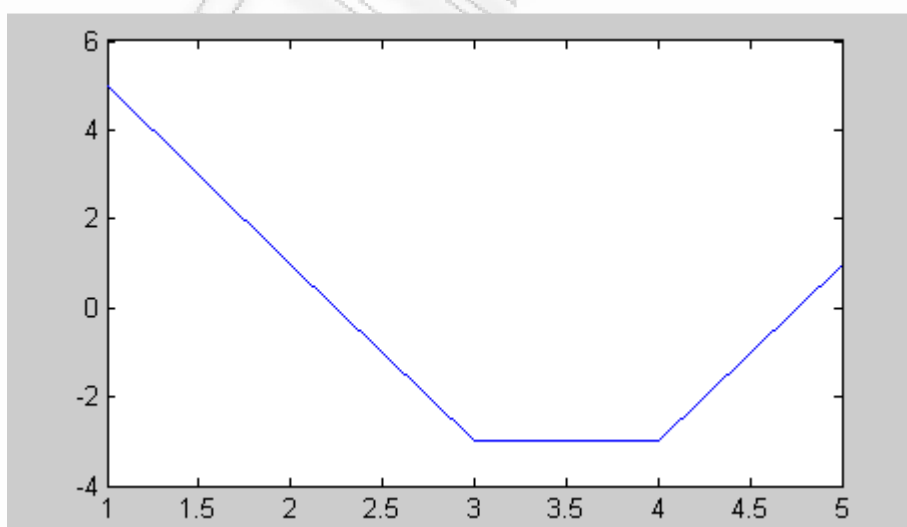
### 3<sup>ο</sup> Παράδειγμα

Για την ακολουθία  $X = [-1, 1, 1, 1, -1]$  η τιμή της αυτοσυσχέτισης είναι:

$R_{xx} = \text{autocorr}(X);$

$R_{xx} = [5, 1, -3, -3, 1]$

Και το διάγραμμα που προκύπτει είναι το εξής:



Σε αντίθεση με την αυτοσυσχέτιση η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης είναι το αποτέλεσμα του συσχετισμού μεταξύ δυο διαφορετικών ακολουθιών κώδικα και καθορίζεται ως εξής:

$$r_{xx}(\tau) = 1/T \int X(t)Y(t+\tau)dt$$

Η συνάρτηση Matlab που εκτελεί την λειτουργία της ετεροσυσχέτισης είναι η εξής:

```
% crosscorr.m  
  
% Crosscorrelation function of a sequence  
  
function [out] = crosscorr(indata1, indata2, tn)  
  
% indata1 : input sequence1  
% indata2 : input sequence2  
% tn      : number of period  
% out     : crosscorrelation data  
  
if nargin < 3  
    tn = 1;  
end  
  
ln = length(indata1);  
out = zeros(1,ln*tn);  
  
for ii=0:ln*tn-1  
    out(ii+1) = sum(indata1.*shift(indata2,ii,0));  
end
```

Τα στοιχεία που χρειάζεται η λειτουργία της ετεροσυσχέτισης είναι το όνομα της ακολουθίας και ο αριθμός των περιόδων κώδικα για τον οποίο η λειτουργία πρόκειται να ληφθεί. Στην συνέχεια ακολουθούν παραδείγματα μέτρησης (με το λογισμικό MATLAB) της ετεροσυσχέτισης για συγκεκριμένες ακολουθίες κωδικών.

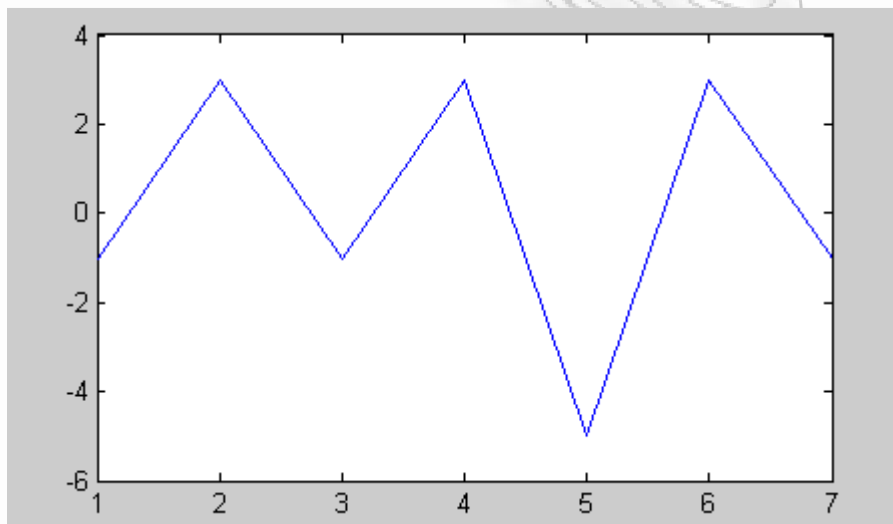
### 1° Παράδειγμα

Για τις ακολουθίες  $X=[1,1,1,-1,-1,1,-1]$  και  $Y=[1,-1,1,-1,1,-1,1]$  η τιμή της ετεροσυσχέτισης είναι:

$R_{xy} = \text{crosscorr}(X,Y);$

$R_{xy} = [-1,3,-1,3,-5,3,-1]$

Και το διάγραμμα είναι το εξής:



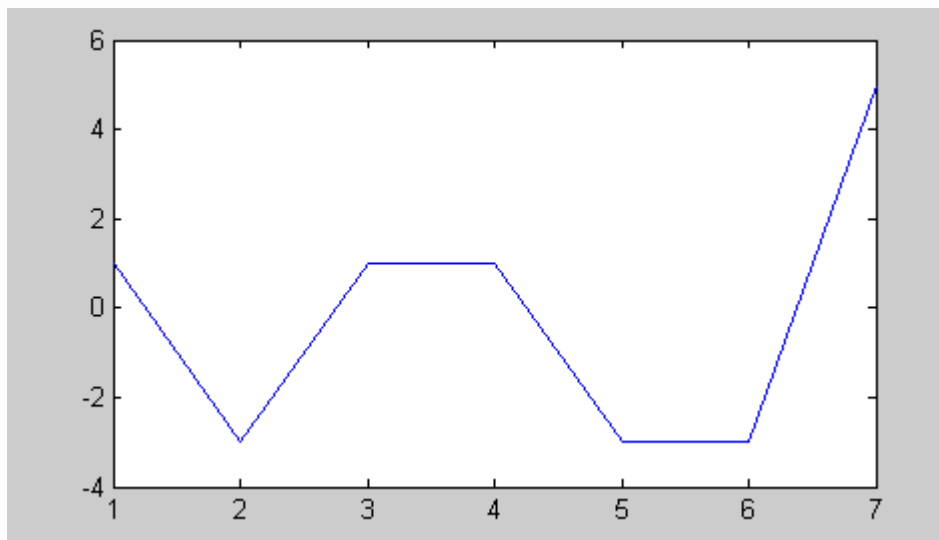
### 2° Παράδειγμα

Για τις ακολουθίες  $X=[-1,-1,1,1,1,-1,1]$  και  $Y=[1,-1,-1,1,1,-1,-1]$  η τιμή της ετεροσυσχέτισης είναι:

$R_{xy} = \text{crosscorr}(X,Y);$

$R_{xy} = [1,-3,1,1,-3,-3,5]$

Και το διάγραμμα είναι το εξής:



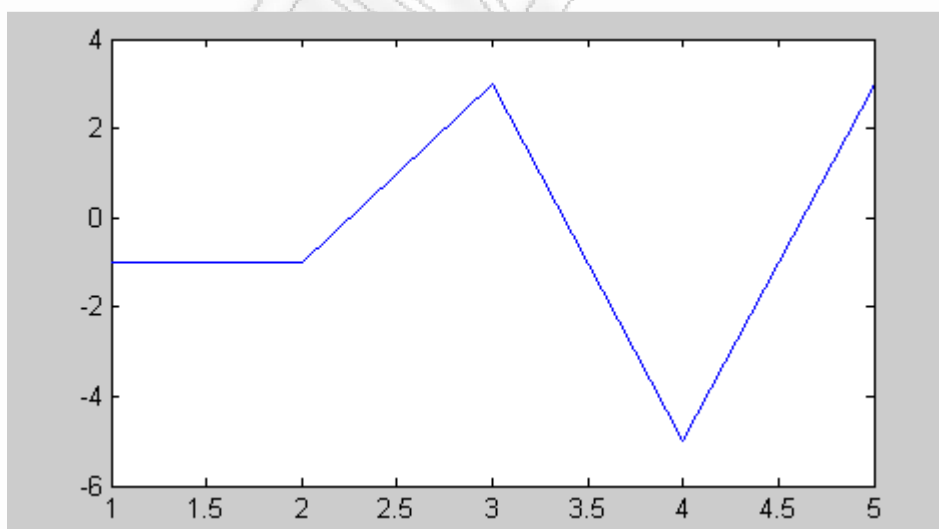
### 3° Παράδειγμα

Για τις ακολουθίες  $X=[-1,1,1,-1,1]$  και  $Y=[1,-1,1,-1,-1]$  η τιμή της ετεροσυσχέτισης είναι:

$R_{xy} = \text{crosscorr}(X,Y);$

$R_{xy} = [-1,-1,3,-5,3]$

Και το διάγραμμα είναι το εξής:



Με τη χρησιμοποίηση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης και της λειτουργίας ετεροσυσχέτισης αξιολογείται ο κώδικας που παράγεται.

## 5. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΩΔΙΚΩΝ CDMA

### 5.1. M-sequence

Οι M-sequence παράγονται από απλά LSR (linear shift register). Ειδικότερα, μια ακολουθία με τη μέγιστη δυνατή περίοδο, ( $N_c=2^n-1$ ), παράγεται από ένα n-βαθμού κατάλογο δυαδικής μετατόπισης με γραμμική ανατροφοδότηση. Το πολυώνυμο από το οποίο μπορούμε να παράγουμε μια M-sequence πρέπει να είναι πολυώνυμο n βαθμού. Κατά συνέπεια, η περιοδική λειτουργία αυτοσυσχέτισης μιας M-sequence δίνεται από τον εξής τύπο [2]:

$$R_{xx}(t)=\begin{cases} 1 & t = 0 \text{ mod } N_c \\ -1/N_c & \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

Εάν  $n \neq 0 \text{ mod } 4$ , υπάρχουν τα ζευγάρια μεγίστου μήκους ακολουθιών με τρεις εκτιμώμενες τιμές ετεροσυσχέτισης, οι δυο τιμές είναι  $\{-t(n), t(n)-2\}$  όπου:

$$t(n)=\begin{cases} 1+2^{(n+1)/2} & n:\text{odd} \\ 1+2^{(n+2)/2} & n:\text{even} \end{cases}$$

Η συνάρτηση Matlab που δημιουργεί M-sequences είναι η εξής:



```

% mseq.m

% The generation function of M-sequence

function [mout] = mseq(stg, taps, inidata, n)

% stg      : Number of stages

% taps     : Position of register feedback

% inidata  : Initial sequence

% n        : Number of output sequence (It can be omitted)

% mout     : output M sequence

if nargin < 4
    n = 1;
end

mout = zeros(n,2^stg-1);

fpos = zeros(stg,1);
fpos (taps) = 1;

for ii=1:2^stg-1
    mout(1,ii) = inidata(stg); %storage of the output data
    num = mod(inidata*fpos,2); %calculation of the feedback data
    inidata (2:stg) = inidata(1:stg-1); %one shifts the register
    inidata(1) = num;          %return feedback data
end

```

```

if n > 1
    for ii=2:n
        mout(ii,:) = shift(mout(ii-1,:),1,0);
    end
end
end

```

Ο αριθμός των registers, η αρχική τους τιμή και τα σημεία ανατροφοδότησης δίνονται ως δεδομένα στην συνάρτηση. Χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες της αυτοσυσχέτισης και της ετεροσυσχέτισης μπορούμε να αξιολογήσουμε τα χαρακτηριστικά των M-sequence. Ο αριθμός των M-sequence που μπορούν να δημιουργηθούν είναι πολύ μικρός. Στη συνέχεια ακολουθούν κάποια παραδείγματα παραγωγής M-sequence και υπολογισμού των τιμών αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης [2].

### 1° Παράδειγμα

Αν έχουμε 4 register και οι αρχικές τιμές των register είναι [1,0,1,1] και οι κόμβοι ανατροφοδότησης είναι ο 1<sup>ος</sup> και ο 3<sup>ος</sup> τότε η M-sequence παράγεται ως εξής:

```
m1=mseq(4,[1,3],[1,0,1,1])
```

Αποτέλεσμα:

```
m1=( 1,1,0,1,0,0,1,1,1,0,1,0,0,1,1)
```

Για τον υπολογισμό της αυτοσυσχέτισης και της ετεροσυσχέτισης πρέπει να μετατρέψουμε την M-sequence που αποτελείται από 0 και 1, σε ακολουθίες που αποτελούνται από -1 και 1 αυτό επιτυγχάνεται με την εξής εντολή (στο Matlab):

```
m1 =m1*2-1;
```

Οπότε η τιμή της αυτοσυσχέτισης είναι:

```
autocorr(m1)=( 15,-1,-1,-1,-5,-1,-1,7,7,-1,-1,-5,-1,-1,-1)
```

## 2° Παράδειγμα

Αν έχουμε 3 register, οι αρχικές τιμές των register είναι [1,0,1] και οι κόμβοι ανατροφοδότησης είναι ο  $1^{ος}$  και ο  $3^{ος}$  και θέλουμε 4 εξόδους (έχουμε την δυνατότητα να επιλέγουμε τον αριθμό των M-sequence θέλουμε στην έξοδο) τότε η M-sequence παράγεται ως εξής:

$m1 = \text{mseq}(3, [1,3], [1,0,1], 4)$

Αποτέλεσμα:

```
m1 = 1  0  1  0  0  1  1
      1  1  0  1  0  0  1
      1  1  1  0  1  0  0
      0  1  1  1  0  1  0
```

Αν έχουμε 3 register, οι αρχικές τιμές των register είναι [1,1,1] και οι κόμβοι ανατροφοδότησης είναι ο  $2^{ος}$  και ο  $3^{ος}$  τότε η M-sequence παράγεται ως η εξής:

$m2 = \text{mseq}(3, [2,3], [1,1,1])$

Αποτέλεσμα:

$m2 = (1,1,1,0,0,1,0)$

Οι τιμές αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης είναι οι εξής:

$\text{autocorr}(m1) = (7, -1, -1, -1, -1, -1, -1)$

$\text{autocorr}(m2) = (7, -1, -1, -1, -1, -1, -1)$

Βλέπουμε ότι οι τιμές της αυτοσυσχέτισης είναι και οι ζητούμενες.

$\text{crosscorr}(m1(1,:), m2) = (3, -1, -1, -5, 3, 3, -1)$

$\text{crosscorr}(m1(2,:), m2) = (-1, 3, -1, -1, -5, 3, 3)$

Και οι τιμές της ετεροσυσχέτισης είναι οι ζητούμενες, γιατί  $t(n)=5$  οπότε οι τιμές που πρέπει να παίρνει είναι [-1,-5,3], οπότε αυτό το ζεύγος M-sequence είναι προτιμώμενο γιατί έχει τις ζητούμενες τιμές αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης.





$$1+2^{(n+1)/2} \quad n:\text{odd}$$

$$t(n)=\{$$

$$1+2^{(n+2)/2} \quad n:\text{even}$$

Για την παραγωγή μιας Gold sequence χρησιμοποιείται ένα προτιμώμενο ζευγάρι M-sequence. Χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις autocorr και crosscorr μπορούμε να υπολογίσουμε τις τιμές της αυτοσυσχέτισης και της ετεροσυσχέτισης ώστε να αξιολογήσουμε τα χαρακτηριστικά της Gold sequence. Η συνάρτηση Matlab που παράγει τις Gold sequence (goldseq) είναι η εξής:

```
% goldseq.m

% The generation function of Gold sequence

function [gout] = goldseq(m1, m2, n)

% m1 : M-sequence 1

% m2 : M-sequence 2

% n : Number of output sequence(It can be omitted)

% gout : output Gold sequence

if nargin < 3

    n = 1;

end

gout = zeros(n,length(m1));

for ii=1:n

    gout(ii,:) = xor(m1,m2);

    m2 = shift(m2,1,0);

end
```

Στη συνέχεια ακολουθούν κάποια παραδείγματα παραγωγής Gold sequence και υπολογισμού των τιμών αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης.

### 1° Παράδειγμα

Έστω ότι έχουμε το εξής προτιμώμενο ζευγάρι M-sequence

```
m1=mseq(3,[1,3],[1,1,1]);
```

```
m2=mseq(3,[2,3],[1,1,1]);
```

Τότε η Gold Sequence που θα παραχθεί είναι η εξής (έχουμε την δυνατότητα να επιλέγουμε τον αριθμό των Gold sequence που θέλουμε στην έξοδο):

```
g1=goldseq(m1,m2,3)
```

Αποτέλεσμα:

```
g1= 0  0  0  0  1  1  0
     1  0  0  1  1  0  1
     0  1  0  1  0  0  0
```

Για τον υπολογισμό της αυτοσυσχέτισης και της ετεροσυσχέτισης πρέπει να μετατρέψουμε της Gold sequence ,που αποτελούνται από 0 και 1, σε ακολουθίες που αποτελούνται από -1 και 1 αυτό επιτυγχάνεται με την εξής εντολή (στο Matlab):

```
m1 =m1*2-1;
```

Και οι τιμές της αυτοσυσχέτισης και της ετεροσυσχέτισης είναι οι εξής:

```
autocorr(g1(1,:))=(7,3,-1,-1,-1,-1,3)
```

```
autocorr(g1(2,:))=(7,-1,-5,3,3,-5,-1)
```

```
autocorr(g1(3,:))=(7,-1,3,-1,-1,3,-1)
```





$\text{crosscorr}(g1(1,:),g1(2,:))=(-1,-1,-1,7,-1,7,-1,-1,7,7,-1,-1,7,7,-1,7,-1,-1,-1,-1,-1,-1,-1,$   
 $7,7,7,7,-1,-9,-1)$

Η Gold Sequence λοιπόν είναι δεκτή επειδή οι τιμές που πρέπει να παίρνει η ετεροσυσχέτιση είναι οι  $(-1,-9,7)$  γιατί  $t(n)=9$ .

### 5.3. Orthogonal Gold Sequence

Η Gold sequence έχει πολλούς διαφορετικούς κώδικες έναντι εκείνων της M-sequence. Εντούτοις υπάρχουν διάφορα προβλήματα με την Gold sequence [8]

- Το ποσοστό 0 έως 1 δεν είναι πάντα ισορροπημένο.
- Η τιμή της ετεροσυσχέτισης δεν είναι 0 σε ένα συγχρονισμένο περιβάλλον.
- Το μήκος του κωδικού είναι μονός αριθμός. Κατά συνέπεια ένα ειδικό ρολόι απαιτείται για την παραγωγή Gold sequence.

Για να λυθούν τα ανωτέρω προβλήματα προστίθεται ένα chip στην Gold sequence για να ισορροπηθεί το ποσοστό 0 έως 1. Αυτή η sequence ονομάζεται orthogonal Gold sequence. Η τιμή της ετεροσυσχέτισης της orthogonal Gold sequence είναι 0 στο σημείο συγχρονισμού. Στα άλλα σημεία τα χαρακτηριστικά είναι τα ίδια με αυτά της Gold sequence.

## 6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ BER ΜΕ MATLAB

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία που πραγματοποιείται για τον υπολογισμό του BER ενός σύγχρονου DS-CDMA. Σε ένα σύγχρονο DS-CDMA, οι χρήστες έχουν τις δικές τους sequence για να απλώσουν (spread) τα δεδομένα. Σε κάθε χρήστη, τα δεδομένα διαμορφώνονται με βάση κάποιο είδος διαμόρφωσης (π.χ. BPSK). Κατόπιν, τα πρώτα bit των διαμορφωμένων δεδομένων μετασχηματίζονται από μια ακολουθία κώδικα, όπως η M-sequence ή η Gold-sequence. Τα μετασχηματισμένα δεδομένα από όλους τους χρήστες εκπέμπονται στον κεντρικό σταθμό την ίδια στιγμή. Ο κεντρικός σταθμός διακρίνει τα δεδομένα κάθε χρήστη συσχετίζοντας το λαμβανόμενο σήμα με την ακολουθία κωδικού που αντιστοιχεί σε κάθε χρήστη. Στην προσομοίωση που ακολουθεί, ως είδος διαμόρφωσης χρησιμοποιείται η QPSK.

Στο κεντρικό πρόγραμμα της προσομοίωσης αρχικά καθορίζονται οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν. Στην συνέχεια καθορίζεται ο συντελεστής του φίλτρου ο οποίος αξιολογεί την απόδοση του QPSK. Σ' αυτήν την προσομοίωση, έχουμε τη δυνατότητα χρησιμοποίησης τριών ακολουθιών μετασχηματισμού (sequence), την M-sequence, την Gold-sequence και την orthogonal Gold-sequence. Με την επιλογή της μεταβλητής  $seq=\{1,2 \text{ ή } 3\}$  επιλέγεται ποια sequence θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε κάθε φορά.. Το μήκος της sequence πρέπει να είναι μεγαλύτερο από τον αριθμό των χρηστών. Γιατί στο σύγχρονο DS-CDMA ο αριθμός των ακολουθιών κωδικού (code sequence) που μπορεί να διατεθεί σε διαφορετικούς χρήστες είναι ανάλογος του μεγέθους του κωδικού. Για να παράγουμε μια code sequence πρέπει να καθορίσουμε τον αριθμό των registers, το σημείο της ανατροφοδότησης και τις αρχικές τιμές των register. Για να παράγουμε μια Gold-sequence ή μια orthogonal Gold-sequence χρειάζονται δυο M-sequence. Αφού επιλέξουμε το είδος sequence δημιουργείται ένας κωδικός μετασχηματισμού, αυτός ο κωδικός αποθηκεύεται ως μεταβλητή code. Η M-sequence δημιουργείται από την λειτουργία `mseq.m`, και η Gold-sequence δημιουργείται από την ακολουθία `goldseq.m`. Μια orthogonal Gold-sequence δημιουργείται θέτοντας ένα 0 bit δεδομένων στην αρχή ή στο τέλος μιας Gold-sequence. Επειδή η ακολουθία κωδικού που δημιουργείται αποτελείται από 0 και 1, το πρόγραμμα την μετατρέπει σε μια ακολουθία αποτελούμενη από -1 και 1. Έπειτα, καθορίζονται οι παράμετροι για την προσομοίωση με εξασθένιση. Όταν `rfade` είναι 0, η προσομοίωση υπολογίζει το BER σε περιβάλλον AGWN. Όταν `rfade` είναι 1, η προσομοίωση υπολογίζει το BER σε Rayleigh fading περιβάλλον. Στη συνέχεια, καθορίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων

της προσομοίωσης και οι μεταβλητές που μετρούν τον αριθμό των εκπεμπόμενων δεδομένων και τον αριθμό των λαθών που πραγματοποιούνται. Τα εκπεμπόμενα δεδομένα στην πρώτη φάση μετασχηματίζονται με την QPSK και πολλαπλασιάζονται με την ακολουθία κωδικού που χρησιμοποιήθηκε για να τα διαμορφώσει. Στη συνέχεια τα εκπεμπόμενα σήματα από όλους τους χρήστες συνενώνονται. Έπειτα, αυτό το σήμα αλλοιώνεται σε ένα κανάλι εξασθένησης Rayleigh. Στην πραγματικότητα, τα εκπεμπόμενα σήματα από όλους τους χρήστες αλλοιώνονται από την διακριτική εξασθένηση Rayleigh. Στα λαμβανόμενα στοιχεία προστίθεται AWGN θόρυβος. Τα νέα δεδομένα είναι τα συνενωμένα δεδομένα από όλους τους χρήστες. Συσχετίζοντας τα συνενωμένα δεδομένα με τον κωδικό μετασχηματισμού που χρησιμοποιήθηκε στην εκπομπή ανιχνεύουμε τα εκπεμπόμενα δεδομένα από όλους τους χρήστες. Τα συσχετισμένα δεδομένα αποδιαμορφώνονται με QPSK. Και υπολογίζεται ο αριθμός των λαθών από όλους τους χρήστες. Τέλος υπολογίζεται το BER. Το κεντρικό πρόγραμμα σε Matlab είναι το εξής:

```
% ***** Preparation part *****

sr = 256000.0;    % symbol rate

ml = 2;          % number of modulation levels

br = sr * ml;    % bit rate

nd = 100;        % number of symbol

ebn0 = 3;        % Eb/NO

% ***** Filter initialization *****

irfn = 21;       % number of filter taps

IPOINT = 8;      % number of oversample

alfs = 0.5;      % rool off factor

[xh] = hrollfcoef(irfn,IPOINT,sr,alfs,1); % T FILTER FUNCTION

[xh2] = hrollfcoef(irfn,IPOINT,sr,alfs,0); % R FILTER FUNCTION
```

```

% ***** Spreading code initialization *****

user = 1;      % number of users

seq = 1;      % 1:M-sequence 2:Gold  % 3:Orthogonal Gold

stage = 3;    % number of stages

ptap1 = [1 3]; % position of taps for 1st

ptap2 = [2 3]; % position of taps for 2nd

regi1 = [1 1 1]; % initial value of register for 1st

regi2 = [1 1 1]; % initial value of register for 2nd

% ***** Generation of the spreading code *****

switch seq

    case 1          % M-sequence

        code = mseq(stage,ptap1,regi1,user);

    case 2          % Gold sequence

        m1 = mseq(stage,ptap1,regi1);

        m2 = mseq(stage,ptap1,regi2);

        code = goldseq(m1,m2,user);

    case 3          % Orthogonal Gold sequence

        m1 = mseq(stage,ptap1,regi1);

        m2 = mseq(stage,ptap1,regi2);

        code = [goldseq(m1,m2,user),zeros(user,1)];

end

code = code * 2 - 1;

```

```

clen = length(code);

% ***** Fading initialization *****

rfade = 0; % Rayleigh fading 0:nothing 1:consider

itau = [0,8]; % delay time

dlvl1 = [0.0,40.0]; % attenuation level

n0 = [6,7]; % number of waves to generate fading

th1 = [0.0,0.0]; % initial phase of delayed wave

itnd1 = [3001,4004]; % set fading counter

now1 = 2; % number of direct wave + delayed wave

tstp = 1 / sr / IPOINT / clen; % time resolution

fd = 160; % doppler frequency [Hz]

flat = 1; % flat Rayleigh enviroment

itndel = nd * IPOINT * clen * 30; % number of fading
% counter to skip

% ***** START CALCULATION *****

nloop = 1000; % simulation number of times

noe = 0;

nod = 0;

```

```
for ii=1:nloop
```

```
% ***** Transmitter *****
```

```
data = rand(user,nd*ml) > 0.5;
```

```
[ich, qch] = qpskmod(data,user,nd,ml); % QPSK modulation
```

```
[ich1,qch1] = spread(ich,qch,code); % spreading
```

```
[ich2,qch2] = compoversamp2(ich1,qch1,IPOINT); % over sampling
```

```
[ich3,qch3] = compconv2(ich2,qch2,xh); % filter
```

```
if user == 1 % transmission
```

```
    ich4 = ich3;
```

```
    qch4 = qch3;
```

```
else
```

```
    ich4 = sum(ich3);
```

```
    qch4 = sum(qch3);
```

```
end
```

```
% ***** Fading channel *****
```

```
if rfade == 0
```

```
    ich5 = ich4;
```

```

qch5 = qch4;

else

    [ich5,qch5] = ... % fading channel

        sefade(ich4,qch4,itau,dvl1,th1,n0,itnd1, ...

            now1,length(ich4),tstp,fd,flat);

    itnd1 = itnd1 + itndel;

end

% ***** Receiver *****

spow = sum(rot90(ich3.^2 + qch3.^2)) / nd;

% attenuation Calculation

attn = sqrt(0.5 * spow * sr / br * 10^(-ebn0/10));

[ich6,qch6] = comb2(ich5,qch5,attn);

% Add White Gaussian Noise (AWGN)

[ich7,qch7] = compconv2(ich6,qch6,xh2);

% filter

sampl = irfn * IPOINT +1;

ich8 = ich7(:,sampl:IPOINT:IPOINT*nd*clen+sampl-1);

qch8 = qch7(:,sampl:IPOINT:IPOINT*nd*clen+sampl-1);

[ich9 qch9] = despread(ich8,qch8,code);

```

```

% despreading

demodata = qpskdemod(ich9,qch9,user,nd,ml);

% QPSK demodulation

% ***** Bit Error Rate (BER) *****

noe2 = sum(sum(abs(data-demodata)));

nod2 = user * nd * ml;

noe = noe + noe2;

nod = nod + nod2;

fprintf('%d\t%e\n',ii,noe2/nod2);

end

% ***** Data file *****

ber = noe / nod;

fprintf('%d\t%d\t%d\t%e\n',ebn0,noe,nod,noe/nod);

% fprintf: built in function

fid = fopen('BER.dat','a');

fprintf(fid,'%d\t%e\t%f\t%f\n',ebn0,noe/nod,noe,nod);

% fprintf: built in function

fclose(fid);

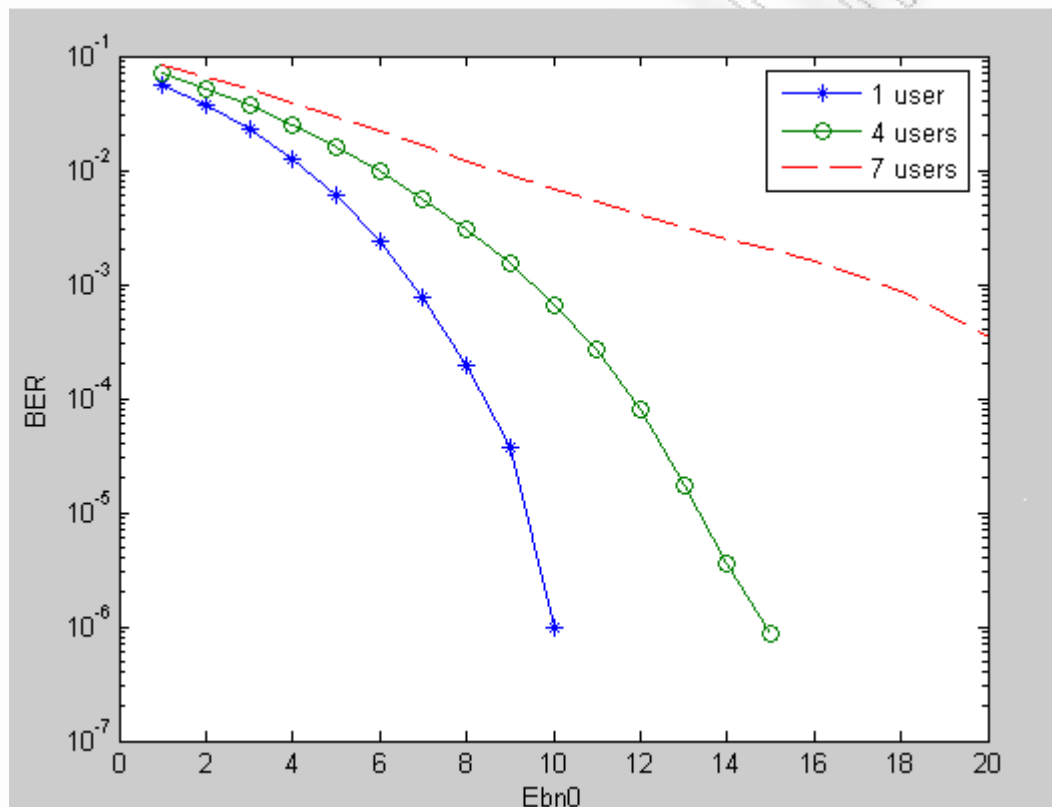
% ***** end of file *****

```

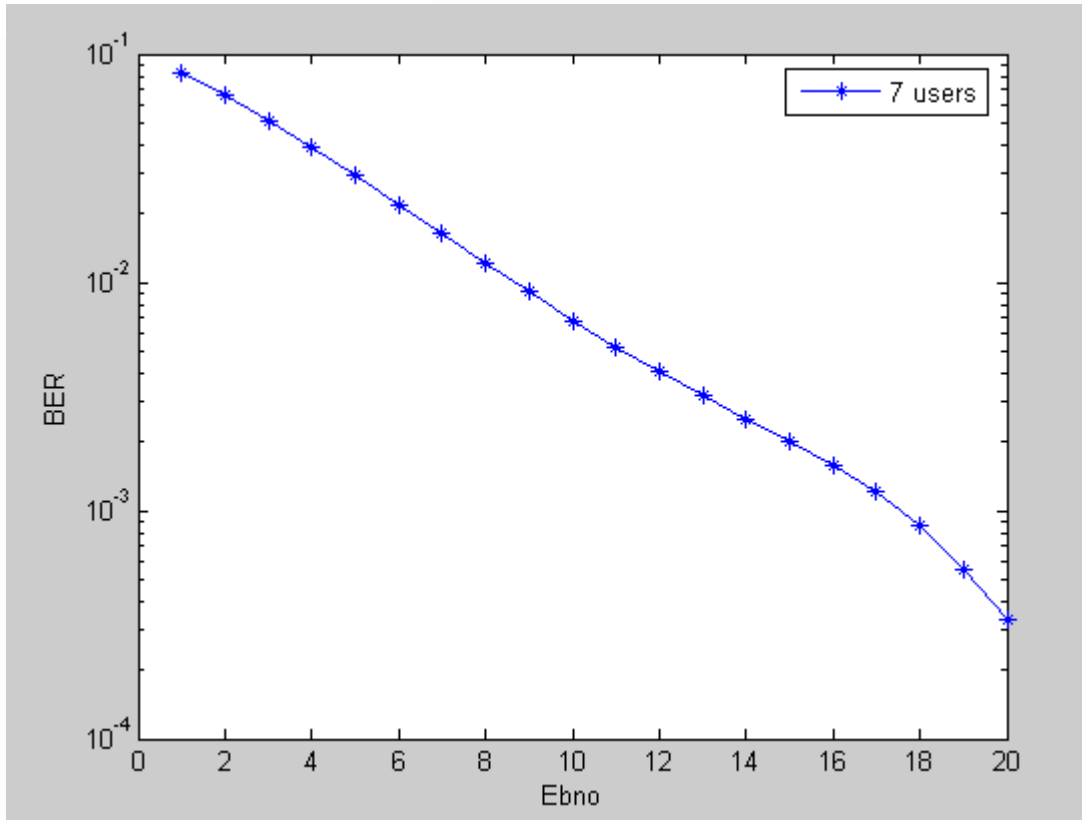


## 6.1. Υπολογισμός BER σε περιβάλλον AWGN με πολλαπλούς χρήστες

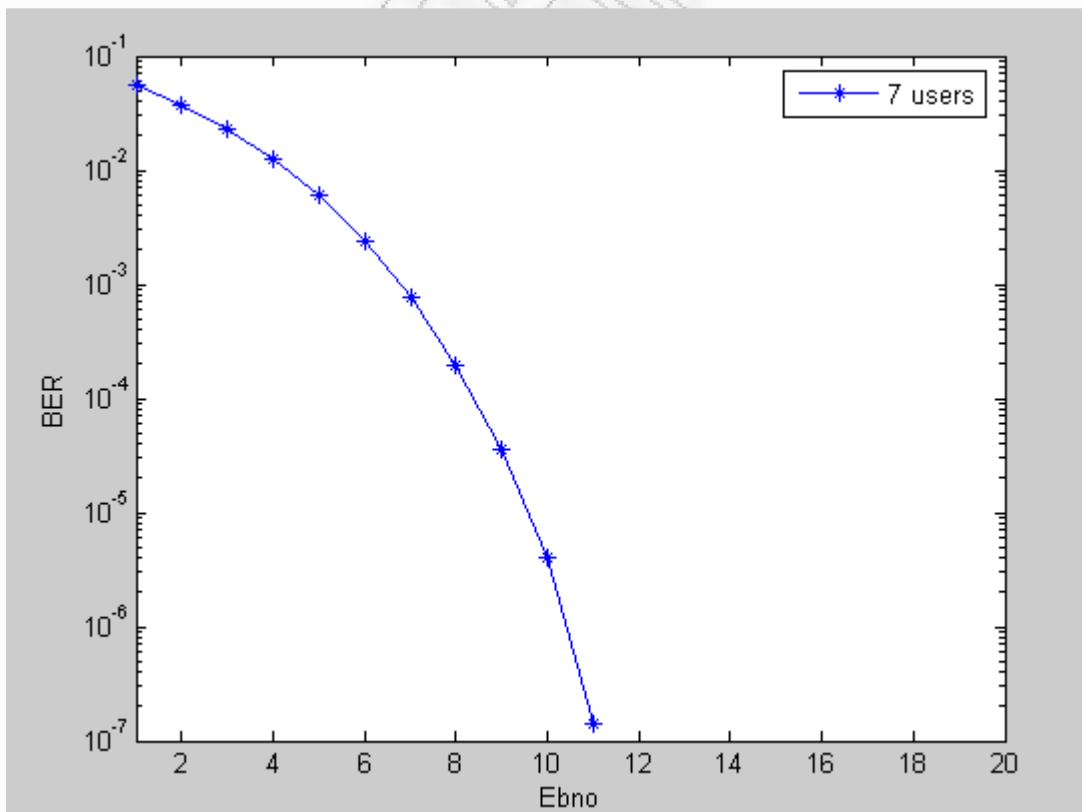
Τρέχοντας το κύριο πρόγραμμα για τον υπολογισμό του BER σε περιβάλλον AWGN ενός σύγχρονου DS-CDMA παίρνουμε τα παρακάτω διαγράμματα. Στην M-sequence η τιμή της ετεροσυσχέτισης δεν είναι 0 στο σημείο συγχρονισμού. Αυτή η διαφορετική τιμή της ετεροσυσχέτισης οφείλεται στην παρεμβολή των άλλων χρηστών. Επομένως, όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται το BER αυξάνεται. Σε αντίθεση, στην **orthogonal** Gold-sequence, η τιμή της ετεροσυσχέτισης μεταξύ των χρηστών είναι 0 στο σημείο συγχρονισμού. Αυτό σημαίνει ότι όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται η τιμή του BER προσεγγίζει την θεωρητική τιμή για AWGN.



Διάγραμμα 5.1: Επίδοση BER με χρήση M-sequence σε περιβάλλον AWGN



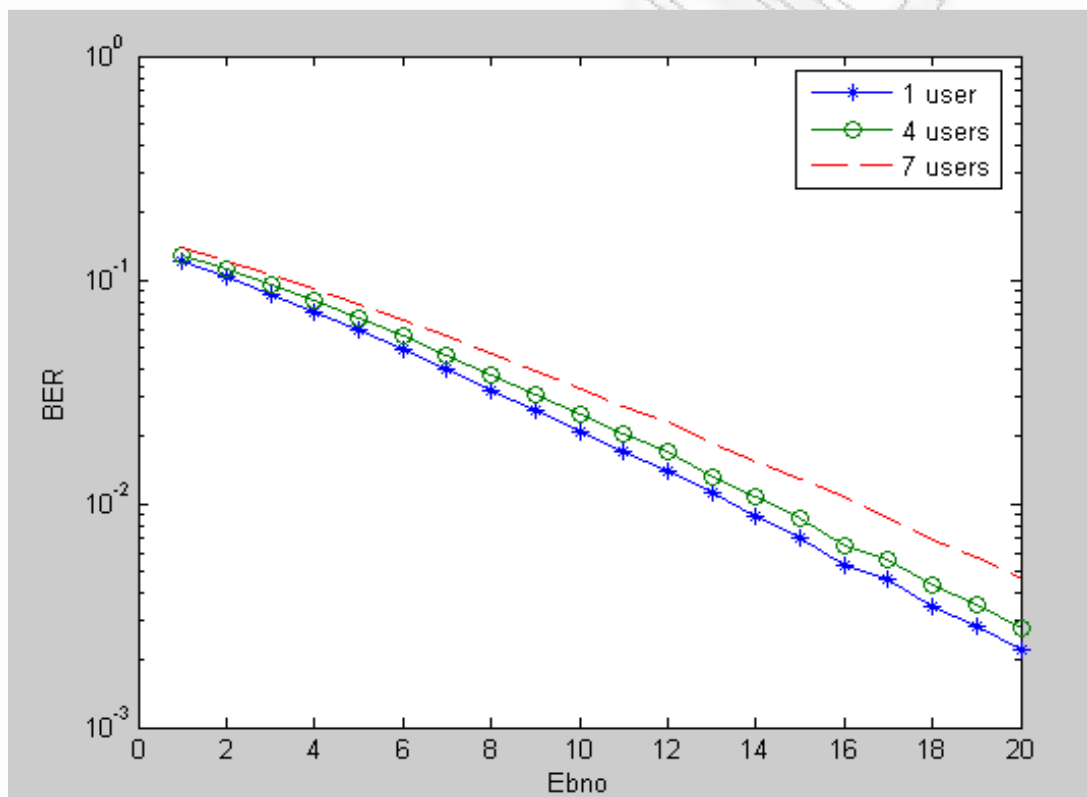
Διάγραμμα 5.2: Επίδοση BER με χρήση Gold-sequence σε περιβάλλον AWGN



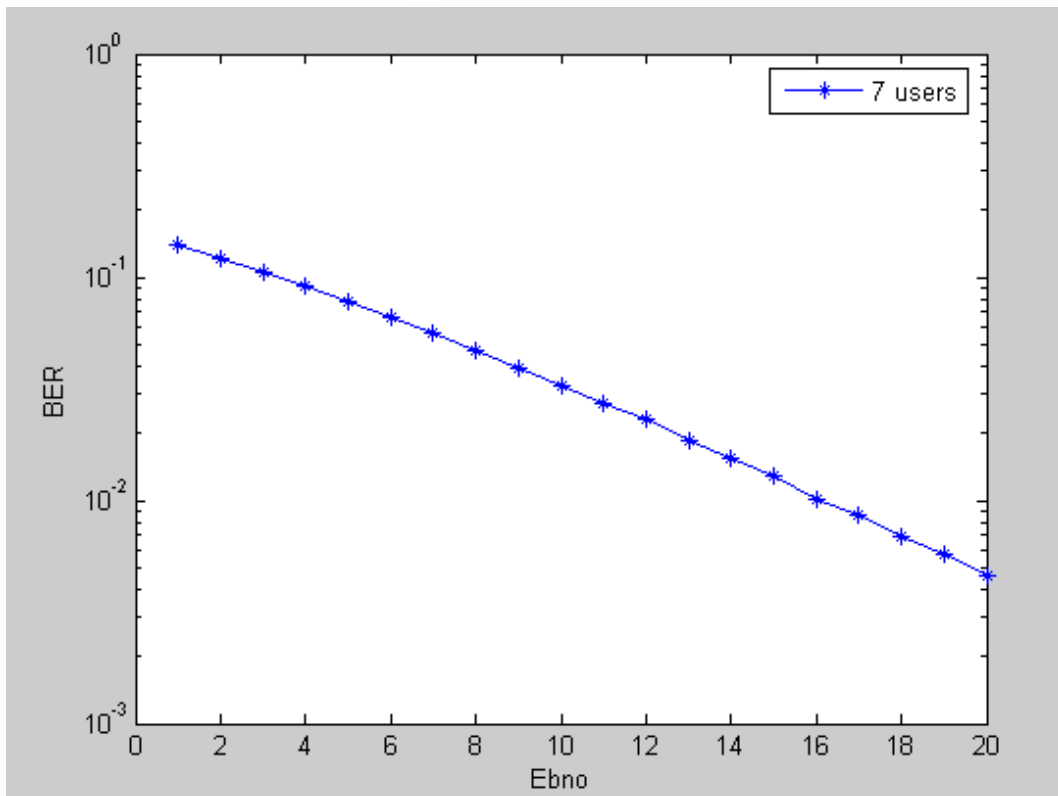
Διάγραμμα 5.3: Επίδοση BER με χρήση orthogonal Gold-sequence περιβάλλον AWGN

## 6.2. Υπολογισμός BER σε περιβάλλον Rayleigh Fading

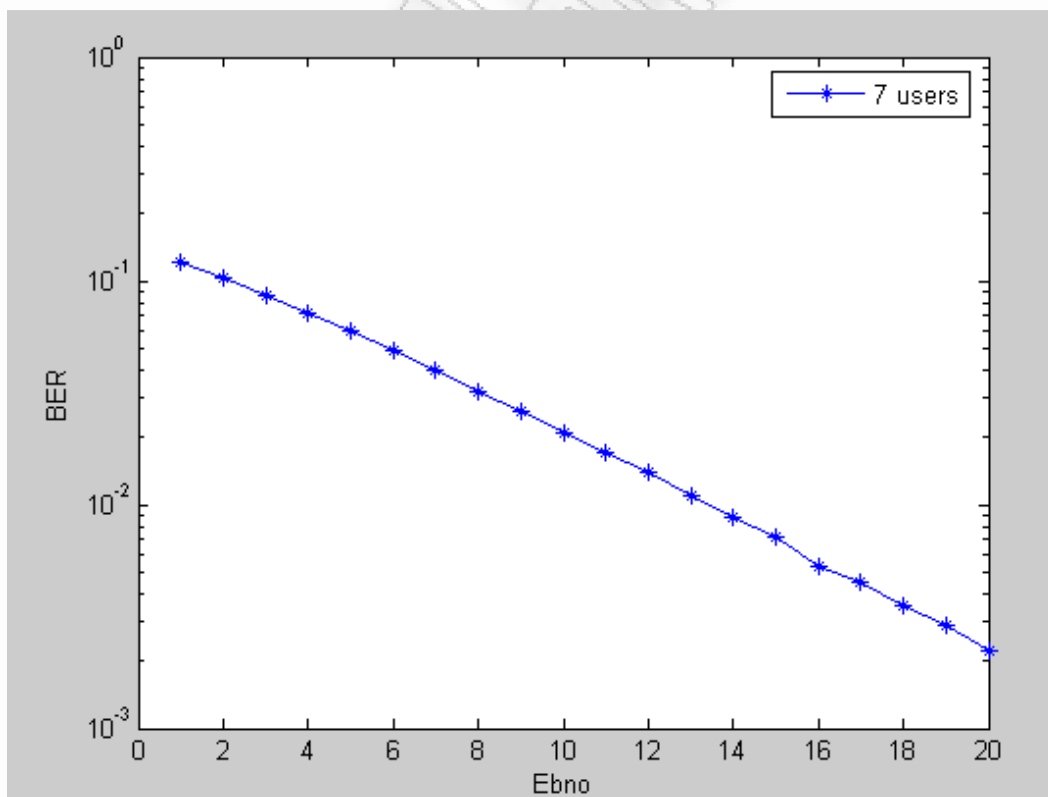
Η BER επίδοση ενός σύγχρονου DS-CDMA σε περιβάλλον Rayleigh εξασθένησης φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα. Στην M-sequence όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται το BER αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι η τιμή της ετεροσυσχέτισης μεταξύ των κωδικών δεν είναι 0. Σε αντίθεση στην **orthogonal** Gold-sequence η ορθογωνιότητα των κωδικών κρατάει την τιμή της ετεροσυσχέτισης στο σημείο συγχρονισμού, με αποτέλεσμα όσο ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται η τιμή του BER προσεγγίζει την θεωρητική τιμή για δίαυλο Rayleigh με AWGN.



Διάγραμμα 5.4: Επίδοση BER με χρήση M-sequence σε περιβάλλον Rayleigh fading

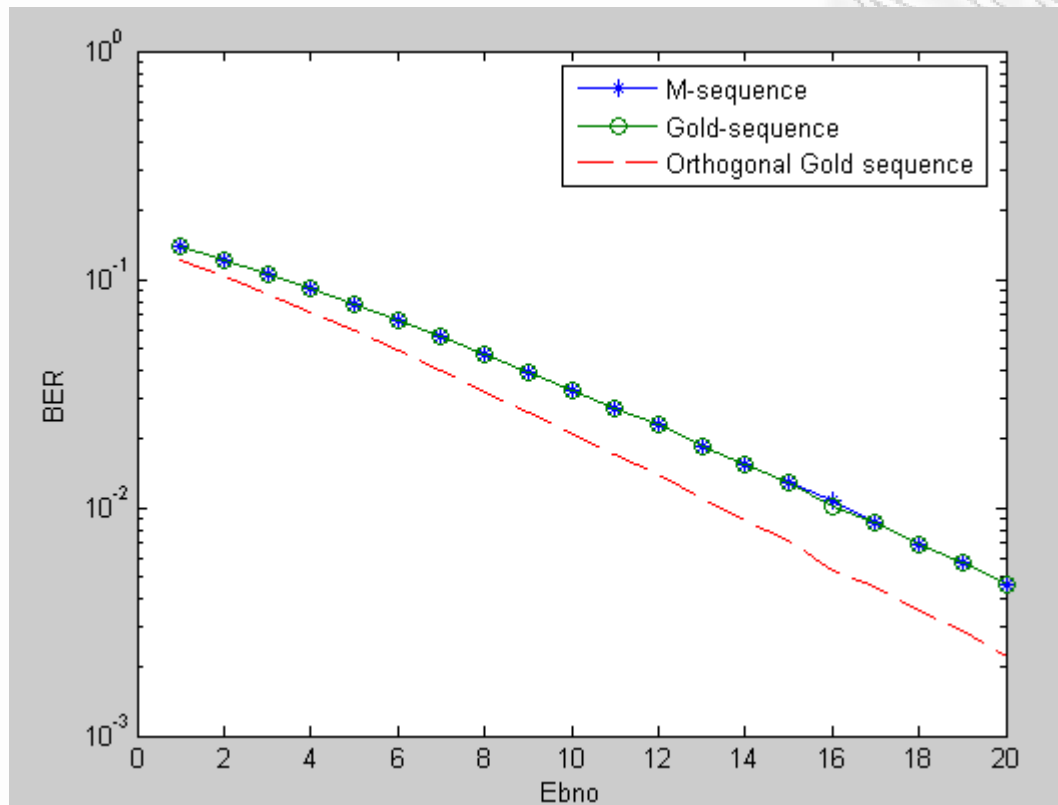


Διάγραμμα 5.5: Επίδοση BER με χρήση Gold-sequence σε περιβάλλον Rayleigh fading



Διάγραμμα 5.6: Επίδοση BER με χρήση orthogonal Gold-sequence σε περιβάλλον Rayleigh.

Τέλος για να δείξουμε την επίπτωση της μη μηδενικής συνάρτησης ετεροσυσχέτισης για την M-sequence και την gold sequence παρουσιάζουμε το παρακάτω διάγραμμα με το BER σε περιβάλλον με διάλειαση Rayleigh και 7 χρήστες.



Διάγραμμα 5.7: Επίδοση BER με 7 χρήστες σε περιβάλλον Rayleigh fading

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://www.tiaonline.org/> (TIA-Telecommunications Industry Association official web site)
- [2] CDMA: principles of spread spectrum communication, Andrew J. Viterbi, Addison Wesley, 1995
- [3] Simulation and Software Radio for Mobile Communications (IPF®) Hiroshi Harada and Ramjee Prasad, 2002
- [4] Spread spectrum CDMA systems for wireless communications, Savo Glisic, Artech House, 1997
- [5] Βιβλίο «Δορυφορικές Επικοινωνίες», 3η Έκδοση, G.Maral & M.Bousquet, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
- [6] Βιβλίο «Συστήματα κινητών Επικοινωνιών», Αθανάσιος Κανάτας, Φίλιππος Κωνσταντίνου & Γεώργιος Πάντος, Εκδόσεις ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ, Αθήνα 2008.
- [7] Βιβλίο «Τηλεπικοινωνιακά Πρωτόκολλα», 2η Έκδοση, Travis Russell, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη.
- [8] Βιβλίο «Ψηφιακές Επικοινωνίες», Andy Bateman, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ 2000, Θεσσαλονίκη.
- [9] [www.msc.ds.unipi.gr](http://www.msc.ds.unipi.gr) , Μεταπτυχιακό τμήμα, διαφάνειες CDMA κ. Ευθύμογλου
- [10] Αρχιτεκτονικές CDMA σε δορυφορικά συστήματα Τομέας Συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών ΕΜΠ
- [11] THIRD GENERATION WCDMA RADIO EVOLUTION (Harri Holma and Antti Toskala Nokia Networks System Technologies)
- [12] EVOLUTION OF CDMA FROM INTERFERENCE-LIMITED TO NOISELIMITED (Hsiao-Hwa Chen Institute of Communications Engineering National Sun Yat-Sen University 70 Lien Hai Road, Kaohsiung, Taiwan, ROC)
- [13] Διπλωματική εργασία « Συχνотικός σχεδιασμός δικτύου WCDMA Αστικής περιοχής-Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών Τομέας Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών ΕΜΠ
- [14] Ασύρματα Συστήματα 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> γενεάς: Προκλήσεις του Μέλλοντος. Δρ. Μάνος Μ. Τεντζέρης Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
- [15] The GSM System for Mobile Communications, Michel Mouly, Marie-Bernadette Pautet, Telecom Publishing (June 1992)

[16] UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services, Heikki Kaaranen, Siamak Naghian, Lauri Laitinen, Ari Ahtiainen, Valtteri Niemi, John Wiley & Sons; 1st edition (August 14, 2001)

[17] CDMA Systems Engineering Handbook, Jhong Sam Lee, Leonard E. Miller, Artech House Publishers (January 1998)

[18] Advanced Wireless Networks: 4G Technologies, Savo G. Glisic, Wiley (June 5, 2006)

[19] LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance, Farooq Khan, Cambridge University Press 2009

[20] Fundamentals of Cellular Network Planning and Optimisation: 2G 2.5G 3G... Evolution to 4G, Ajay R. Mishra, Wiley-Interscience 2004