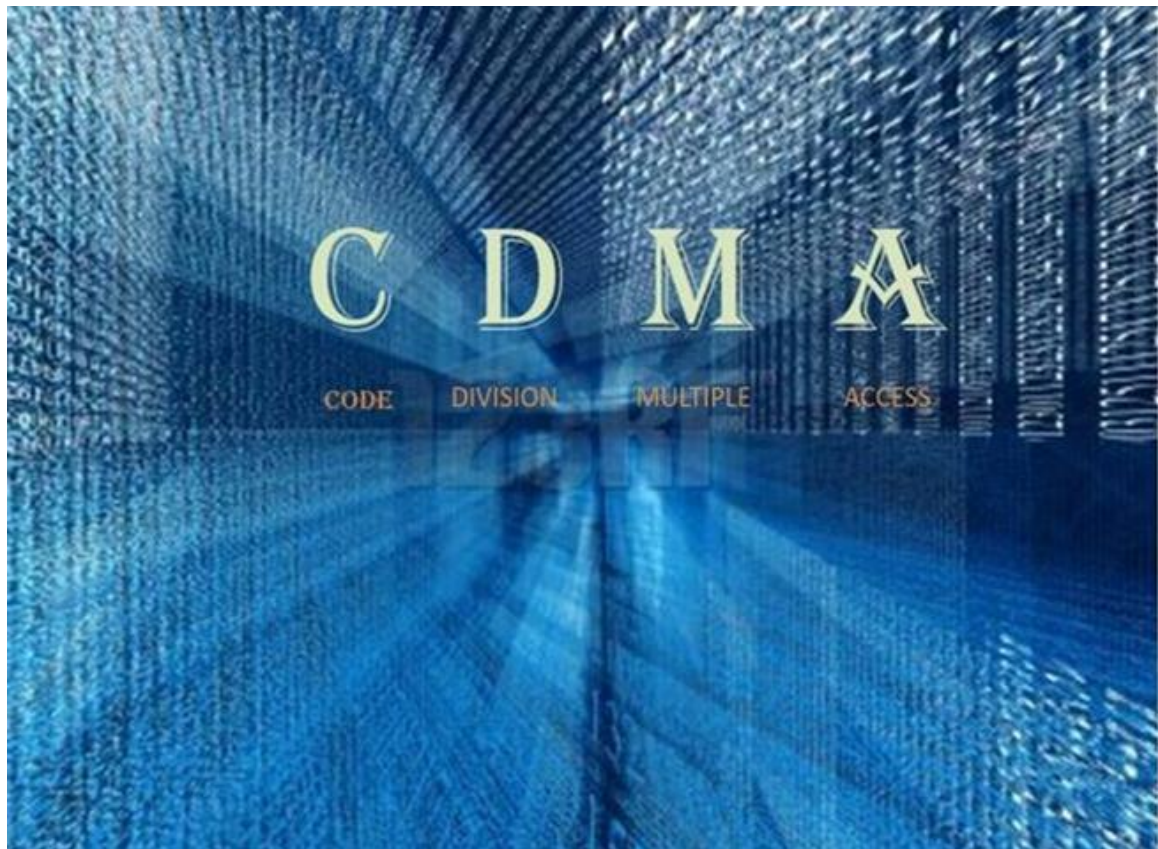


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΗΠΕΙΡΟΥ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΧΡΟΝΟΥ(TDMA)-  
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ(FDMA) ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΑ(CDMA).**



Ζηκοβέλης Βασίλειος - Α.Μ. 8260

Επιβλέπων καθηγητής  
Νικόλαος Γιαννακάς





ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ  
ΙΔΡΥΜΑ  
—■—  
ΤΕΙ ΗΠΕΙΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΧΡΟΝΟΥ(TDMA)-  
ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ(FDMA) ΚΑΙ ΚΩΔΙΚΑ(CDMA)**

Ζηκοβέλης Βασίλειος - Α.Μ. 8260

Επιβλέπων Καθηγητής  
Νικόλαος Γιαννακάς

-Άρτα 2014-



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Σ' αυτό το σημείο επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της πτυχιακής κ. Γιαννακέα Νικόλαο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντας το συγκεκριμένο θέμα και για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξή όποτε αυτή του ζητήθηκε.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία σύγκριση των ποιοτικών χαρακτηριστικών μεθόδων πολλαπλής πρόσβασης χρηστών. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία εντοπίζεται στις τεχνικές διευρυμένου φάσματος όπως η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA), η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας και τέλος η πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (CDMA). Στο κείμενο παρατίθενται όλα τα πλεονεκτήματα των τεχνικών αυτών σχετικά με τα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Τέλος πραγματοποιήθηκε μία προσομοίωση του πομπού και του δέκτη της τεχνικής πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα κάνοντας χρήση του πακέτου Simulink της Matlab.

## Abstract

This work presents a qualitative comparative study between the already known multiple access methods. More specifically, the current thesis focuses on the spread spectrum techniques, such as Time Division Multiple Access (TDMA), Frequency Division Multiple Access and Code Division Multiple Access (CDMA). The advantages and disadvantages of these techniques regarding wireless communication systems are presented. Finally, a simulation of the CDMA technique in Simulink package of Matlab for two users is implemented

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
---------------	---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### **ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΕΥΡΥΜΕΝΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ**

1.1 Εισαγωγή στα συστήματα διευρυμένου φάσματος.....	11
1.2 Κατηγορίες Συστημάτων Διευρυμένου Φάσματος.....	13
1.3 Συστήματα Άμεσης διεύρυνσης (Direct Sequence / DS).....	14
1.4 Συστήματα Αλμάτων στη συχνότητα (Frequency Hopping / FH).....	15
1.5 Συστήματα Αλμάτων στο Χρόνο (Time Hopping / TH).....	16

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### **Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου (TDMA)**

2.1 Βασική αρχή λειτουργίας της TDMA.....	19
2.2 Η TDMA σε ασύρματο περιβάλλον.....	20
2.3 Πλεονεκτήματα της TDMA.....	21
2.4 Μειονεκτήματα της TDMA.....	23

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### **Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση Συχνότητας (FDMA)**

3.1 Βασική αρχή λειτουργίας της FDMA.....	25
3.2 Ασύρματη λειτουργία FDMA.....	26
3.3 Έλεγχος ισχύος στα ασύρματα συστήματα FDMA.....	27
3.4 Πλεονεκτήματα της FDMA.....	29



3.5 Μειονεκτήματα της FDMA.....	30
3.6 Πολύπλεξη Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM).....	31

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### **Πολλαπλή Πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (CDMA)**

4.1 Συστήματα CDMA.....	33
4.2 CDMA με άλματα συχνότητας.....	34
4.3 CDMA ευθείας ακολουθίας .....	35
4.4 Παραγωγή ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας.....	37
4.5 Πλεονεκτήματα της CDMA.....	42
4.6 Μειονεκτήματα της CDMA.....	43
4.7 Chip rate.....	44
4.8 Κώδικες Διεύρυνσης .....	45
4.9 Διαμόρφωση διεύρυνσης .....	46
4.10 Διεύρυνση πολλαπλών χρηστών .....	47
4.11 Από-διαμόρφωση πολλών χρηστών.....	49
4.12 Ορθογωνικότητα.....	51
4.13 Δέντρο ορθογώνιων μεταβλητών του παράγοντα.....	53
4.14 Ιδιότητες των OVSF κωδικών.....	54

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### **Προσομοίωση πομπού και δέκτη πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (CDMA)**

5.1 Περιβάλλον προσομοίωσης.....	56
----------------------------------	----

5.2 Υλοποίηση του κυκλώματος πομπού/δέκτη.....	60
5.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	63

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>71</b>
--------------------------	-----------

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>72</b>
--------------------------	-----------

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια από τις βασικότερες προκλήσεις των τηλεπικοινωνιών αποτελεί η ταυτόχρονη επικοινωνία χρηστών διαμέσου του ίδιου μέσου μετάδοσης. Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων καθιστά απαραίτητη την εξέλιξη τους σε αυτό το επίπεδο. Η απαρχή ήταν η εφαρμογή τεχνικών πολυπλεξίας σε ενσύρματα συστήματα επικοινωνίας με σκοπό την χρήση του ίδιου μέσου από πολλούς χρήστες, ενώ η εξέλιξη συνεχίζεται μέχρι σήμερα με την υλοποίηση πολλών τεχνικών πολλαπλής πρόσβασης χρηστών σε ασύρματα συστήματα επικοινωνίας.

Πολυπλεξία (multiplexing) ονομάζεται η τεχνική που επιτρέπει δεδομένα από πολλές πηγές να μεταδίδονται μέσα από την ίδια γραμμή επικοινωνίας. Η πολυπλεξία επιτρέπει σε ψηφιακά δεδομένα ή αναλογικά σήματα από διαφορετικές πηγές, τα οποία εκφράζουν διαφορετικές δικτυακές συνδέσεις, να διέλθουν μέσα από το ίδιο φυσικό μέσο. Με αυτόν τον τρόπο κάποιος πόρος διαμοιράζεται σε πολλαπλούς χρήστες. Εμφανίστηκε αρχικά στο τηλεφωνικό δίκτυο η ανάγκη για πολυπλεξία. Στην πορεία το τηλεφωνικό δίκτυο μεγάλωνε και οι συνδρομητές διαρκώς αυξάνονταν οπότε χρειάστηκαν επιπλέον κυκλώματα. Αμέσως έγινε αντιληπτό, ότι υπήρχε όριο στον αριθμό καλωδίων, που μπορούσαν να τοποθετηθούν τόσο μέσα στα τηλεφωνικά κέντρα όσο και μεταξύ των υπόγειων φρεατίων.

Στην πολυπλεξία έχουμε έναν πολυπλέκτη που συνθέτει (πολυπλέκει) τα δεδομένα από τις  $n$  γραμμές εισόδου και τα μεταδίδει μέσα από γραμμή μεγαλύτερης χωρητικότητας και έναν αποπολυπλέκτη που λαμβάνει την πολυπλεγμένη ροή δεδομένων, χωρίζει τα δεδομένα ανάλογα με το κανάλι, στο οποίο ανήκουν και τα οδηγεί στις αντίστοιχες γραμμές εξόδου.

Τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης χρηστών έχουν αναπτυχθεί για τα ασύρματα δίκτυα. Το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο το οποίο χρησιμοποιεί ραδιοκύματα ως φορείς πληροφορίας χαρακτηρίζεται ασύρματο δίκτυο π.χ τηλεφωνικό ή δίκτυο υπολογιστών. Τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η ασύρματη επικοινωνία δεν χρησιμοποιεί ως μέσο μετάδοσης κάποιον τύπο καλωδίου. Τα τηλεφωνικά δίκτυα σε παλαιότερες εποχές ήταν αναλογικά, αλλά σήμερα όλα τα ασύρματα δίκτυα είναι ψηφιακά.

Στα ασύρματα δίκτυα εντάσσονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής, τα μητροπολιτικά δίκτυα, τα τοπικά δίκτυα και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα. Η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, αν και ως τηλεπικοινωνιακά μέσα είναι ασύρματα στις περισσότερες περιπτώσεις, δεν συμπεριλαμβάνονται στα ασύρματα δίκτυα, καθώς η μετάδοση γίνεται προς πάσα κατεύθυνση χωρίς να υπάρχει κάποιο δομημένο δίκτυο τηλεπικοινωνιακών κόμβων. Δεν είναι δίκτυα υπολογιστών γιατί τα μεταφερόμενα δεδομένα συνήθως είναι αναλογικά. Ακόμα και τα κινητά τηλέφωνα ουσιαστικά δεν είναι παρά ηλεκτρονικοί υπολογιστές σε μικρογραφία.

Για τη μετάδοση του σήματος υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι: η *εκπομπή στενής ζώνης* (narrow band) και η *διασπορά φάσματος* (spread spectrum). Υπάρχουν τρία κύρια σχήματα πολλαπλής πρόσβασης τα οποία και επιτρέπουν στους χρήστες να στείλουν τις πληροφορίες μέσω του καναλιού επικοινωνίας στο δέκτη. Η τεχνική FDMA βρήκε εφαρμογή κυρίως στα παλιά αναλογικά συστήματα κινητής τηλεφωνίας, και σε κάθε χρήστη ανατίθεται μία διαφορετική συχνότητα. Οι χρήστες δηλαδή, χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το κοινό μέσο, αλλά διαχωρίζονται μεταξύ τους στο πεδίο της συχνότητας.

Η τεχνική TDMA χρησιμοποιείται ευρέως στα ψηφιακά συστήματα κινητών επικοινωνιών. Με την τεχνική αυτή, κάθε χρήστης καταλαμβάνει μία συγκεκριμένη χρονοθυρίδα (*time-slot*) στην οποία μπορεί να εκπέμψει. Η τεχνική Διαμοιρασμού Κώδικα (CDMA) είναι η πιο σύγχρονη από τις άλλες δύο. Σε αυτήν όλοι οι χρήστες χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το κοινό μέσο τόσο στο πεδίο της συχνότητας, όσο και στο πεδίο του χρόνου. Στα ακόλουθα κεφάλαια θα μελετήσουμε αναλυτικότερα τις μεθόδους πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση χρόνου (tdma), συχνότητας (fdma) και κώδικα (cdma).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΔΙΕΥΡΥΜΕΝΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

### 1.1 Εισαγωγή στα συστήματα διευρυμένου φάσματος

Πριν από 50 χρόνια άρχισε η ανάπτυξη των πρώτων συστημάτων Διευρυμένου Φάσματος (ΔΦ) (Spread Spectrum). Για περισσότερο από μισό αιώνα η τεχνολογία επικοινωνίας διευρυμένου φάσματος έχει χρησιμοποιηθεί στις στρατιωτικές επικοινωνίες, πρωτίστως για να εξυπηρετήσει δύο σκοπούς:

- να ξεπεράσει τις συνέπειες των παρεμβολών (jamming),
- να μεταφέρει με ασφάλεια απόρρητα δεδομένα (covertness).

Και οι δύο αυτοί στόχοι μπορούν να υλοποιηθούν με την διεύρυνση του φάσματος του σήματος ώστε να γίνει δυσδιάκριτο από τον θόρυβο του περιβάλλοντος.

Οι τεχνικές των συστημάτων ΔΦ εκτός από τις στρατιωτικές εφαρμογές, έχουν χρήση και σε πολλές εμπορικές εφαρμογές όπως στις δορυφορικές τηλεπικοινωνίες, τις κινητές τηλεπικοινωνίες και τα συστήματα ραδιοπροσδιορισμού θέσης και ταχύτητας (GPS). Στην συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση παγκοσμίως για κινητές επικοινωνίες, για μία δεδομένη κατανομή φάσματος η ψηφιακή τεχνολογία διευρυμένου φάσματος έχει επιτύχει πολύ μεγαλύτερη επάρκεια σε εύρος ζώνης. Ως εκ τούτου, εξυπηρετεί πολύ μεγαλύτερο πληθυσμό χρηστών πολλαπλής πρόσβασης από ότι οι αναλογικές ή άλλες ψηφιακές τεχνολογίες.

Ο τύπος του C.E Shannon(1948) για τη χωρητικότητα του τηλεπικοινωνιακού καναλιού:

$$C = W \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right). \quad (1.1)$$

Όπου  $C$  είναι η χωρητικότητα ενός καναλιού και την μετράμε σε δυαδικά ψηφία ανά δευτερόλεπτο (bits per seconds). Η χωρητικότητα είναι ουσιαστικά ο ρυθμός της πληροφορίας του καναλιού). Όπου  $W$  είναι το εύρος ζώνης συχνοτήτων σε κύκλους

(Hz) και  $N$  είναι η ισχύς του θορύβου. Τέλος με  $S$  αναπαρίσταται η ισχύς του σήματος και η οποία μας δίνει τη σχέση μεταξύ του ρυθμού πληροφορίας που μπορεί να μεταδοθεί χωρίς λάθη μέσα από ένα τηλεπικοινωνιακό κανάλι, του χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης του καναλιού και του λόγου σήματος προς θόρυβο. Παραδείγματος χάριν (όπως ισχύει στα αντιπαραεμβολικά συστήματα), αν στον τύπο του Shannon εισάγουμε  $\frac{S}{N} < 0.1$ , ο τύπος μας δίνει:

$$C = 1.44W \frac{S}{N} \Rightarrow W = \left( \frac{C}{1.44} \right) \left( \frac{N}{S} \right). \quad (1.2)$$

Επομένως για οποιοδήποτε λόγο  $S/N$  μπορούμε να μεταδώσουμε ένα σήμα πληροφορίας, ρυθμού  $C$ , θεωρητικά χωρίς λάθη, αυξάνοντας το εύρος συχνοτήτων  $W$ , που χρησιμοποιείται για την μετάδοση της πληροφορίας.

Το φάσμα του εκπεμπόμενου σήματος είναι πολύ μεγαλύτερο (10 – 106 φορές) από το φάσμα του σήματος της πληροφορίας και ανεξάρτητο από την πληροφορία.

Γενικά για ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα το κέρδος διεργασίας (Process Gain) είναι:

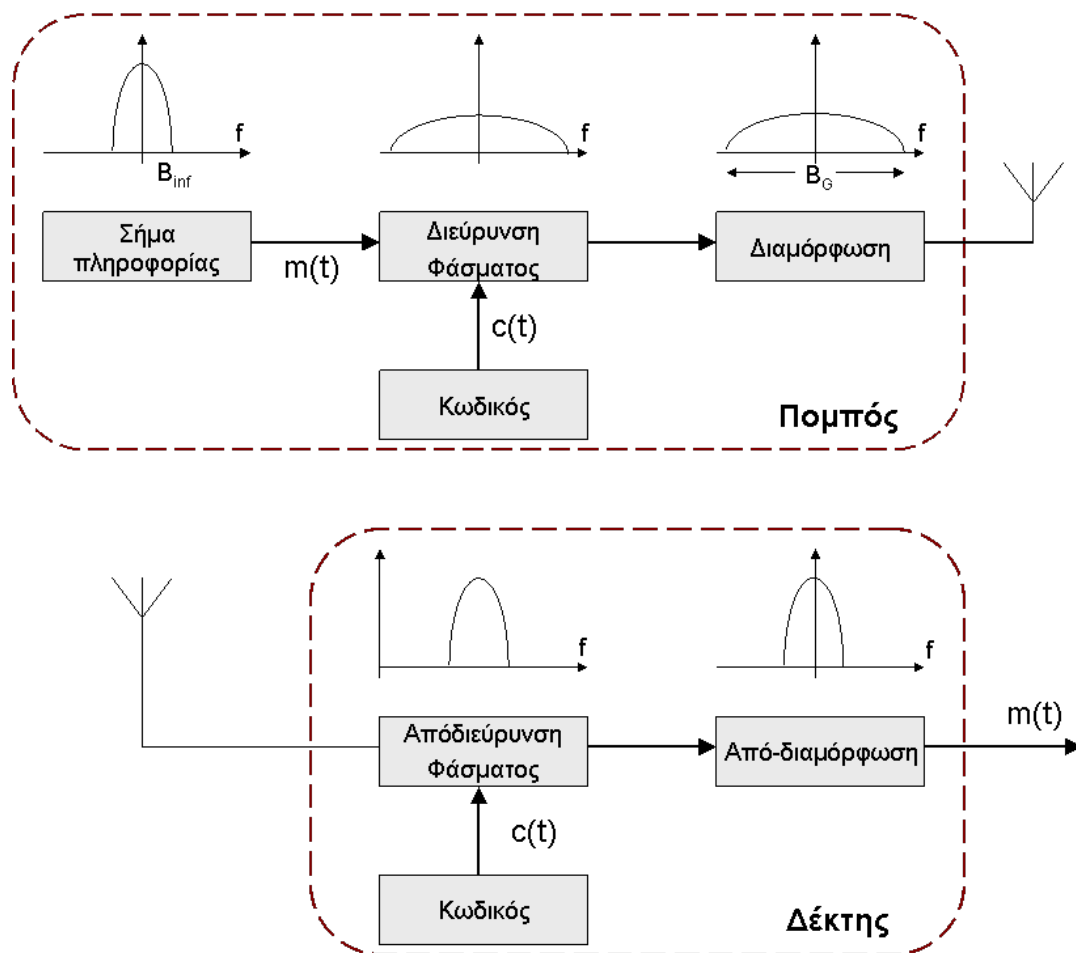
$$GP = \left( \frac{S}{N} \right)_{out} - \left( \frac{S}{N} \right)_{in}. \quad (1.3)$$

Ειδικότερα για ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα  $\Delta\Phi$ :

$$GP = \frac{B_S}{B_{inf}} \quad (1.4)$$

Όπου,  $B_S$  είναι το διευρυμένο φάσμα του σήματος εκπομπής και  $B_{inf}$  είναι το φάσμα του σήματος της πληροφορίας

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η λειτουργία των συστημάτων διευρυμένου φάσματος.



Εικόνα 1.1: Λειτουργία των συστημάτων διευρυμένου φάσματος

## 1.2 Κατηγορίες Συστημάτων Διευρυμένου Φάσματος

Μερικές από τις ιδιότητες των συστημάτων διευρυμένου φάσματος συνοψίζονται παρακάτω:

- Προστασία μηνυμάτων από λαθραία ακρόαση (Security)
- Πολύπλεξη διαίρεσης κωδικών (CDM)
- Πολλαπλή προσπέλαση (CDMA)
- Δυνατότητα επιλογής αποδέκτη (Selective addressing)
- Απόρριψη παρεμβολών (anti-jamming)

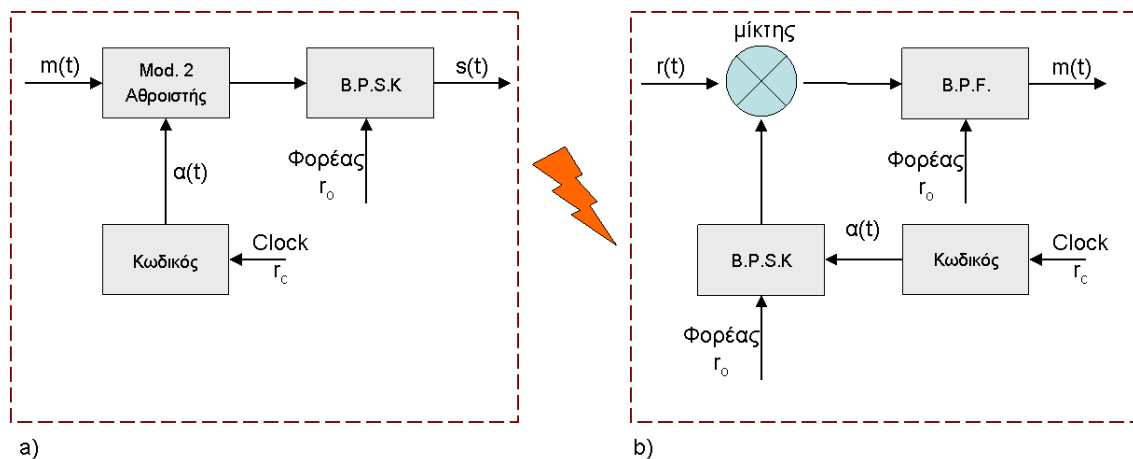
- Μεγάλη ακρίβεια υπολογισμού χρονικής καθυστέρησης (High resolution ranging)
- Μεγάλο εύρος ζώνης συχνοτήτων

Τα συστήματα διευρυμένου φάσματος διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Συστήματα άμεσης διάχυσης από τον κώδικα (Direct Sequence)
- Συστήματα αλμάτων στη συχνότητα (Frequency Hopping)
- Υβριδικά συστήματα (DS/FH, DS/TH, FH/TH, DS/FH/TH)
- Συστήματα αλμάτων στο χρόνο (Time Hopping)

### 1.3 Συστήματα Άμεσης διεύρυνσης (Direct Sequence / DS)

Το φάσμα του σήματος της πληροφορίας στα συστήματα άμεσης διεύρυνσης διευρύνεται (διαχέεται) με άμεση δράση πάνω σε αυτό. Αυτό γίνεται συνήθως με πρόσθεση μίας ψευδοτυχαίας ψηφιακής ακολουθίας (PN: Pseudorandom Noise) μεγάλου μήκους και υψηλού ρυθμού. Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει ένα διάγραμμα του συστήματος DS



Εικόνα 1.2: Σύστημα άμεσης διεύρυνσης

Στην εικόνα 1.2  $m(t)$  είναι το σήμα της πληροφορίας,  $c(t)$  είναι το σήμα της ακολουθίας κωδικοποίησης,  $s(t)$  είναι το σήμα εκπομπής και  $r(t)$  είναι το σήμα λήψης.

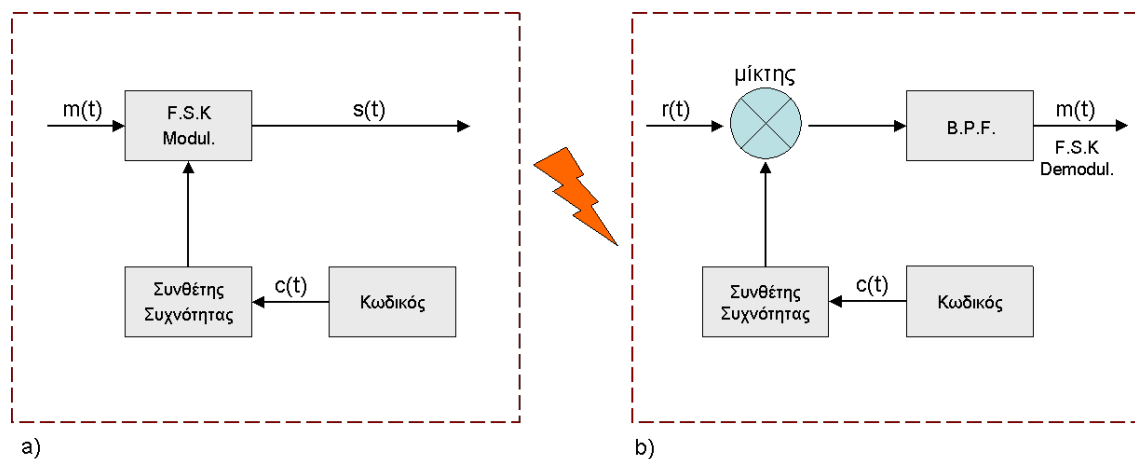


Στα συστήματα DS ο σχεδιασμός του πομποδέκτη είναι απλός. Έχουν πολύ καλή αντιπαρεμβολική δράση και ανιχνεύονται δύσκολα. Απαιτούν όμως συγχρονισμό και γρήγορες γεννήτριες κώδικα.

#### 1.4 Συστήματα Αλμάτων στη συχνότητα (Frequency Hopping / FH)

Η ψευδοτυχαία εναλλαγή της κεντρικής συχνότητας εκπομπής (carrier frequency) είναι η βασική ιδέα των συστημάτων αλμάτων στην συχνότητα σε ένα ευρύ φάσμα, με σκοπό την αποφυγή παρεμβολών σε συγκεκριμένες συχνότητες. Βασικές παράμετροι σε αυτά τα συστήματα είναι ο χρόνος παραμονής σε κάθε συχνότητα (Dwell Time):  $T_H$  (sec), ο ρυθμός εναλλαγής των συχνοτήτων (Hopping Rate) :  $R_H = 1/T_H$  (hops/sec), ο αριθμός των FH συχνοτήτων:  $Q$  και ο ρυθμός της πληροφορίας (symbol rate):  $R_S$ .

Τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: την αργή FH (slow FH) στην οποία το  $R_H \leq R_S$  και την γρήγορη FH (fast FH) στην οποία  $R_H \geq R_S$ . Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει ένα διάγραμμα του συστήματος FH



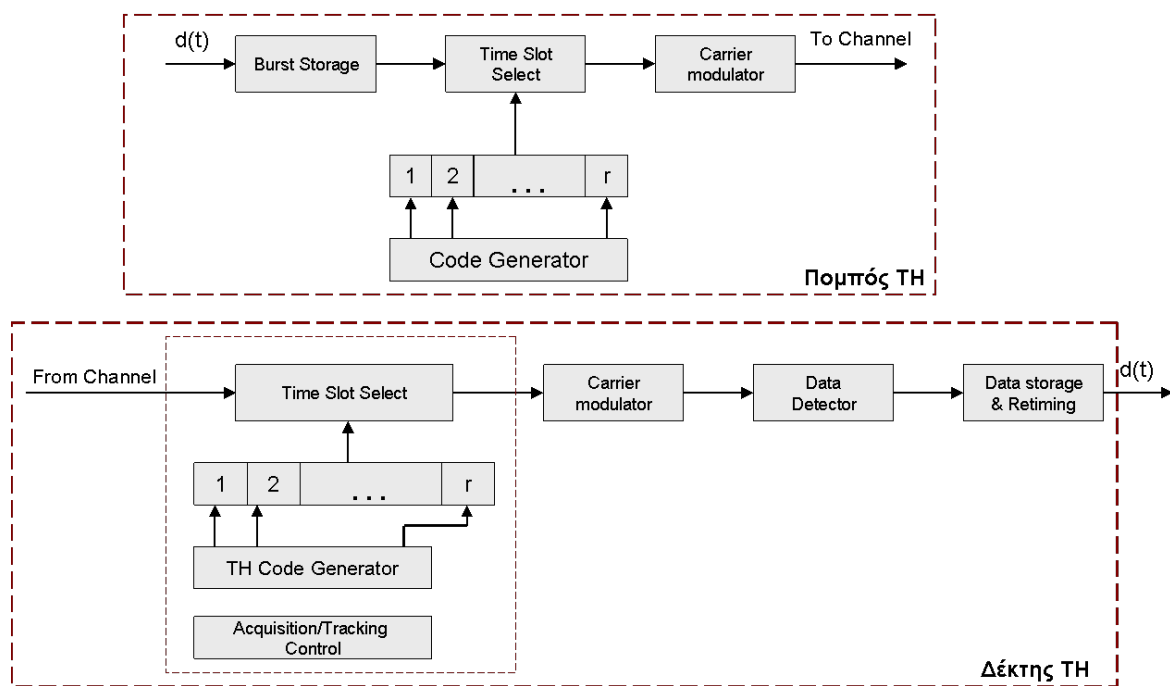
Εικόνα 1.3: Σύστημα αλμάτων στην συχνότητα

Στην εικόνα 1.3  $m(t)$  είναι το σήμα της πληροφορίας,  $c(t)$  είναι το σήμα της ακολουθίας κωδικοποίησης,  $s(t)$  είναι το σήμα εκπομπής και  $r(t)$  είναι το σήμα λήψης.

Το βασικό πλεονέκτημα των συστημάτων FH είναι ο μεγάλος λόγος διεύρυνσης του φάσματος. Για να αποφεύγονται κάποιες περιοχές του φάσματος υπάρχει δυνατότητα προγραμματισμού τους και υπάρχει σχετικά γρήγορος συγχρονισμός. Βέβαια η υλοποίησή τους είναι δύσκολη και δαπανηρή.

## 1.5 Συστήματα Αλμάτων στο Χρόνο (Time Hopping / TH)

Τα συστήματα αλμάτων στον χρόνο χαρακτηρίζονται από την ψευδοτυχαία εναλλαγή του χρόνου μετάδοσης. Βασικές παράμετροι είναι: ο διαθέσιμος χρόνος (Slot time): TS, ο ρυθμός εναλλαγής των χρονικών πλαισίων (Frame rate):  $RF = 1/TF$ , η χρονική διάρκεια Frame Time και ο αριθμός των TH χρόνων  $Q = TF/TS$ . Η παρακάτω εικόνα 1.4 απεικονίζει ένα διάγραμμα του συστήματος TH.



Εικόνα 1.4: Σύστημα αλμάτων στον χρόνο

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των συστημάτων TH είναι ότι έχουν απλούστερη υλοποίηση από τα συστήματα FH. Εκμεταλλεύονται καλά το εύρος ζώνης συχνοτήτων και είναι πολύ χρήσιμα όταν υπάρχει περιορισμός όσον αφορά την μέση εκπεμπόμενη ισχύ. Η απαίτηση συγχρονισμού και αποθήκευσης των δεδομένων είναι το βασικό τους μειονέκτημα.

Στο μεγαλύτερο μέρος των επικοινωνιακών δεδομένων που υπάρχουν σήμερα υπάρχει η απαίτηση να μπορούν περισσότεροι του ενός χρήστες να μοιράζονται ένα κοινό κανάλι επικοινωνίας. Το κανάλι είναι ένας πόρος του συστήματος και θα μπορούσε να είναι μία οπτική ίνα υψηλής ταχύτητας που να συνδέει δύο ηπείρους, το συνεστραμμένο ζεύγος καλωδίων του δικτύου Ethernet ενός γραφείου ή το φάσμα συχνοτήτων ενός κυψελωτού συστήματος τηλεφωνίας.



Εικόνα 1.4: Η πολύπλεξη επιτρέπει τον καταμερισμό ενός καναλιού σε πολλούς χρήστες.

Για να μπορούν πολλοί χρήστες να μοιράζονται έναν κοινόχρηστο πόρο με έναν συγκεκριμένο και αποδοτικό τρόπο θα πρέπει να υπάρχει κάποιο πρωτόκολλο πρόσβασης, το οποίο να ορίζει πότε και πώς θα πραγματοποιείται η κοινή χρήση καθώς και τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα αναγνωρίζει τα μηνύματα που λαμβάνονται από διαφορετικούς χρήστες. Αυτή η διαδικασία καταμερισμού του καναλιού σε πολλούς χρήστες είναι γνωστή με το όνομα πολύπλεξη (multiplexing)

στα ενσύρματα συστήματα επικοινωνίας και με το όνομα πολλαπλή πρόσβαση στις ασύρματες ψηφιακές επικοινωνίες (Εικόνα 1.4).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγραφούν τρεις κατηγορίες μεθόδων πολλαπλής πρόσβασης:

- οι τεχνικές, στις οποίες δίνονται διαφορετικές θυρίδες (slots) συχνότητας στους διαφορετικούς χρήστες
- οι τεχνικές όπου δίνονται διαφορετικές θυρίδες χρόνου στους διαφορετικούς χρήστες
- οι τεχνικές όπου οι θυρίδες χρόνου και συχνότητας είναι κοινές, αλλά αλλάζει ο χρησιμοποιούμενος κωδικός.

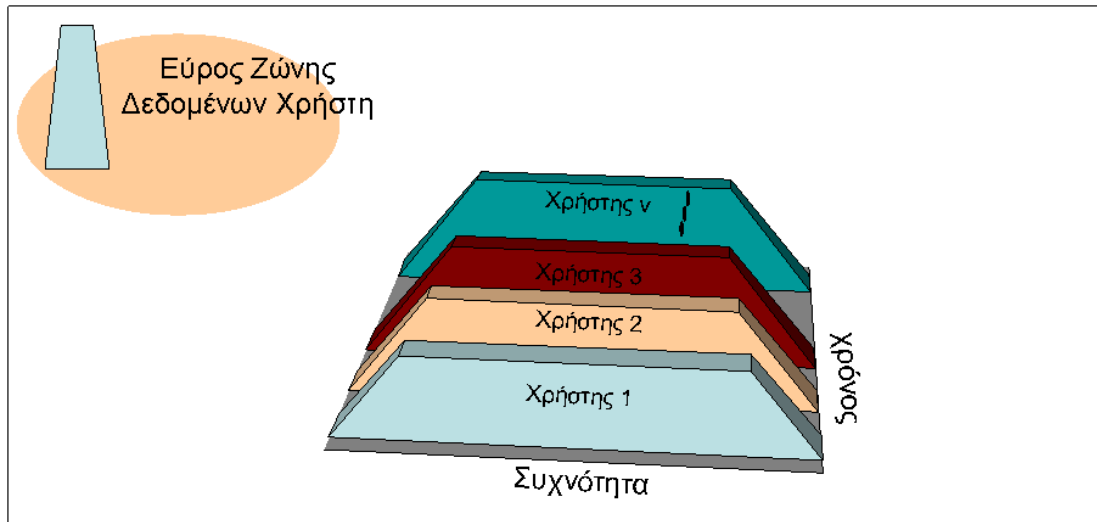
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΟΛΛΑΠΛΗ ΠΡΟΣΒΑΣΗ ΜΕ ΔΙΑΪΡΕΣΗ ΧΡΟΝΟΥ (TDMA)

#### 2.1 Βασική αρχή λειτουργίας της TDMA

Η βασική αρχή λειτουργίας της Πολύπλεξης με Διαίρεση Χρόνου (Time Division Multiple Access, TDMA) είναι ότι ο χρήστης έχει πρόσβαση σε ένα μόντεμ που λειτουργεί με ρυθμό αρκετές φορές πιο γρήγορο από αυτόν που απαιτείται για την αποστολή των δεδομένων του, και έτσι μπορεί να αποστείλει την πληροφορία του σε μία χρονοθυρίδα που είναι μικρότερη από την ελάχιστη διάρκεια του μηνύματος του. Επομένως, στους άλλους χρήστες μπορούν να παραχωρηθούν γειτονικές χρονοθυρίδες στο ίδιο κανάλι, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1. Είναι φανερό ότι εάν ο ρυθμός εκπομπής των δεδομένων στο κανάλι είναι  $w$  bit/sec και εάν ο κάθε χρήστης χρειάζεται  $b$  bit/sec, τότε το σύστημα μπορεί να υποστηρίξει  $w/b$  ταυτόχρονους χρήστες.

Κατά τη διάρκεια της επικοινωνιακής τους ζεύξης σε πολλά συστήματα TDM παραχωρείται μία χρονοθυρίδα στους χρήστες, είτε αυτό απαιτείται είτε όχι. Για παράδειγμα, εάν ο χρήστης ομιλεί ή πληκτρολογεί σε ένα πληκτρολόγιο, θα παραχωρηθεί στο χρήστη μία χρονοθυρίδα είτε αυτός ομιλεί εκείνη τη στιγμή είτε όχι, είτε πατάει ένα πλήκτρο. Έτσι, είναι πολύ πιθανό η διαθέσιμη χωρητικότητα του καναλιού να μένει αναξιοποίητη, αφού για μεγάλα χρονικά διαστήματα μπορεί να μη μεταφέρει πληροφορία. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει και στα συστήματα FDMA.



Εικόνα 2.1: Η τεχνική TDMA διαιρεί τον χρόνο σε κάθε χρήστη

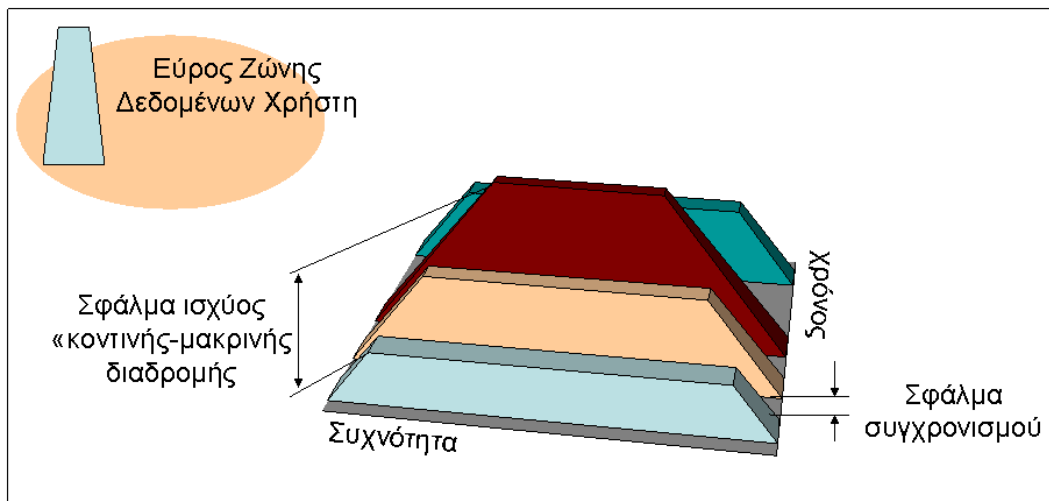
Χρησιμοποιούμε εκπομπές πακέτων στις ενσύρματες ζεύξεις για να μεγιστοποιήσουμε τη χρήση των πόρων, που αποτελούν το κανάλι κάτω από αυτές τις συνθήκες στις οποίες δεν παραχωρείται στο χρήστη μία συγκεκριμένη επαναλαμβανόμενη χρονοθυρίδα για όλη τη διάρκεια της επικοινωνίας, αλλά κάποια διαθέσιμη χρονοθυρίδα εφόσον ζητηθεί. Το σύστημα αυτό δουλεύει αποδοτικά, αρκεί να υπάρχουν διαθέσιμες χρονοθυρίδες για τις εφαρμογές που γίνονται σε πραγματικό χρόνο (εικόνα, φωνή κ.ά.). Η τεχνική TDMA επιβάλλει ένα υψηλό τίμημα όσον αφορά τον πλεονασμό σηματοδοσίας.

## 2.2 Η TDMA σε ασύρματο περιβάλλον

Το ασύρματο περιβάλλον επιβάλλει σημαντικούς περιορισμούς στην τεχνική TDMA, όπως και στην πολύπλεξη FDMA. Και πάλι υπάρχει το φαινόμενο "κοντινής-μακρινής" διαδρομής, καθώς και το φαινόμενο της καθυστέρησης, στο οποίο το σήμα από έναν απομακρυσμένο χρήστη καθυστερεί να φθάσει στο σταθμό βάσης, σε σύγκριση με το σήμα ενός κοντινού χρήστη. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι καθυστερήσεις πρέπει να τοποθετηθούν χρονικές ζώνες προστασίας (guard times) μεταξύ των χρονοθυρίδων (συγκρίνετε με τις ζώνες προστασίας συχνοτήτων της FDMA), ώστε από τη μία πλευρά να φιλοξενηθούν οι μεταβλητές χρονικές καθυ-

στερήσεις των κοντινών και απομακρυσμένων χρηστών και από την άλλη πλευρά να εξομαλυνθούν στην αρχή της χρονοθυρίδας τα σφάλματα συγχρονισμού που τυχόν προκαλούνται σε κάθε χρήστη.

Το πρόβλημα "κοντινής-μακρινής" διαδρομής δημιουργεί επιπλέον διακυμάνσεις της τιμής του σήματος στον ανιχνευτή του σταθμού βάσης, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην πολύπλεξη FDMA, αλλά σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει πρόβλημα παρεμβολής μεταξύ γειτονικών καναλιών, γιατί οι χρήστες δε χρησιμοποιούν ποτέ ταυτόχρονα το κανάλι (Εικόνα 2.2). Παρ' όλα αυτά, στις μεταβαλλόμενες τιμές ισχύος που προέρχονται από χρήστες γειτονικών χρονοθυρίδων ο δέκτης είναι υποχρεωμένος να αντιδρά ακαριαία. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα χρησιμοποιείται η μέθοδος ελέγχου της ισχύος που εκπέμπει ο κάθε χρήστης.



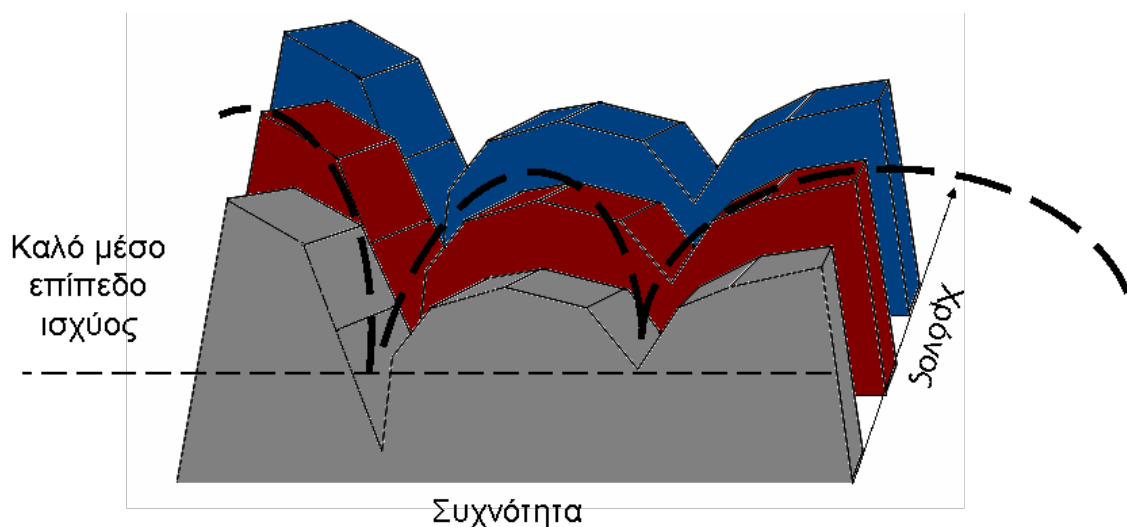
Εικόνα 2.2: Τα βασικά προβλήματα της τεχνικής TDMA

### 2.3 Πλεονεκτήματα της TDMA

Ένα πλεονέκτημα της TDMA που συχνά αναφέρεται, είναι η ευκολία με την οποία μπορεί το σύστημα παραχωρώντας τους απλά περισσότερες από μία χρονοθυρίδες να παρέχει στους χρήστες μεταβαλλόμενους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (Εικόνα 2.3). Για παράδειγμα, ένας χρήστης του συστήματος GSM θα μπορούσε να χρησιμοποιεί και τις οκτώ χρονοθυρίδες ενός πλαισίου, οπότε να έχει στη διάθεση του ένα ρυθμό εκπομπής πλήρως κωδικοποιημένων δεδομένων ίσο με  $8 \times 9600 \text{ bps} = 76800 \text{ bps}$ . Αυτό βέβαια προϋποθέτει ότι η συσκευή του χρήστη θα διαθέτει αρκετή

ισχύ επεξεργασίας, ώστε να επεξεργάζεται ταυτόχρονα και τις οκτώ χρονοθυρίδες. Το αντίστοιχο αυτής της μεθόδου στην πολύπλεξη FDMA είναι η παραχώρηση περισσότερων από μίας θυρίδων συχνοτήτων στο χρήστη, αλλά εδώ απαιτούνται σημαντικά πιο περίπλοκα κυκλώματα για την υλοποίηση.

Ένα δεύτερο πλεονέκτημα της πολύπλεξης TDMA για την εξυπηρέτηση όλων των χρηστών που χρησιμοποιούν τις χρονοθυρίδες είναι η χρήση των ίδιων κυκλωμάτων του σταθμού βάσης. Υπάρχει μόνον ένας ενισχυτής ισχύος αλλά θα πρέπει να έχει μεγαλύτερο εύρος ζώνης για να μπορεί να υποστηρίξει ταυτόχρονα όλους τους χρήστες. Επιπρόσθετα, στην FDMA τα σήματα εξόδου από όλους αυτούς τους ενισχυτές για να διαβιβαστούν στην κοινή κεραία του συστήματος κάθε κανάλι χρήστη πρέπει να έχει στο σταθμό βάσης το δικό του ενισχυτή ισχύος. Η εμφάνιση τα τελευταία χρόνια γραμμικών ενισχυτών ισχύος που μπορούν να εξυπηρετούν πολλούς φορείς έχει αμβλύνει τις προκαταλήψεις ανάμεσα στις μεθόδους FDMA και TDMA.



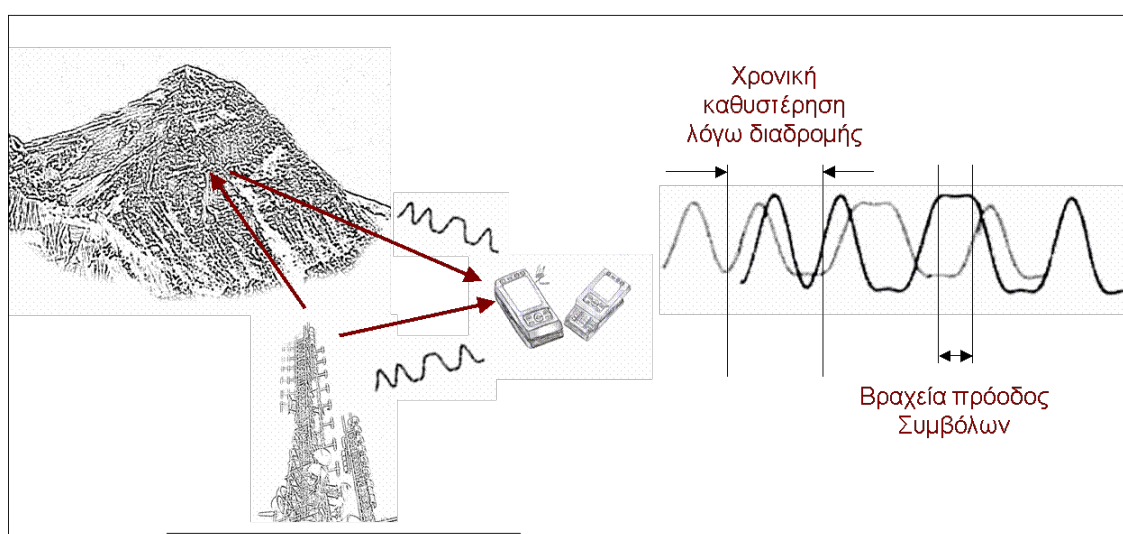
Εικόνα 2.3: Πλεονεκτήματα της TDMA

Συνοψίζοντας η μέθοδος TDM/TDMA είναι κατάλληλη σαφώς για εφαρμογές που στηρίζονται στην αποστολή πακέτων δεδομένων.



## 2.4 Μειονεκτήματα της TDMA

Ένας από τους τομείς της TDM/TDMA με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι το σύστημα χρονισμού, που εξασφαλίζει την εμπρόθεσμη άφιξη των χρονοθυρίδων και των αντίστοιχων πλαισίων επακόλουθα, οπότε να μπορούν να αντιμετωπίζονται τα προβλήματα των χρονικών καθυστερήσεων (Εικόνα 2.4). Αυτές οι απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιηθούν εάν ο σχεδιασμός γίνει μελετημένα, αλλά στην περίπτωση συστημάτων πολλαπλής πρόσβασης που περιλαμβάνουν λίγους χρήστες, το επιπλέον βάρος του χρονισμού ευνοεί τις μεθόδους FDMA.



Εικόνα 2.4: Μειονεκτήματα της TDMA

Απαραίτητη προϋπόθεση στην TDMA είναι, κάθε τερματικός σταθμός να υποστηρίζει ένα ρυθμό μετάδοσης δεδομένων πολύ μεγαλύτερο από το ρυθμό πληροφορίας του χρήστη. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι απαιτείται υψηλότερη ταχύτητα επεξεργασίας κατά τη διαμόρφωση και την αποδιαμόρφωση, μεγαλύτερο εύρος ζώνης πομπού και δέκτη και συγκεκριμένα απαιτεί ενισχυτές ισχύος με υψηλότερη τιμή κορυφής, από ότι στην FDMA. Αυτό συμβαίνει γιατί, αν υποθέσουμε ότι η μέση ενέργεια των συμβόλων είναι η ίδια και στα δύο συστήματα, ώστε να επιτυγχάνεται ίδια εμβέλεια σήματος, η διάρκεια των συμβόλων στην TDMA θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερη από ότι στην FDMA, άρα η ισχύς που εκπέμπει ανά σύμβολο θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη στην TDMA από ότι στην FDMA. Πρέπει

πάντως να σημειωθεί ότι η μέση κατανάλωση από τη μπαταρία στις δύο μεθόδους είναι η ίδια.

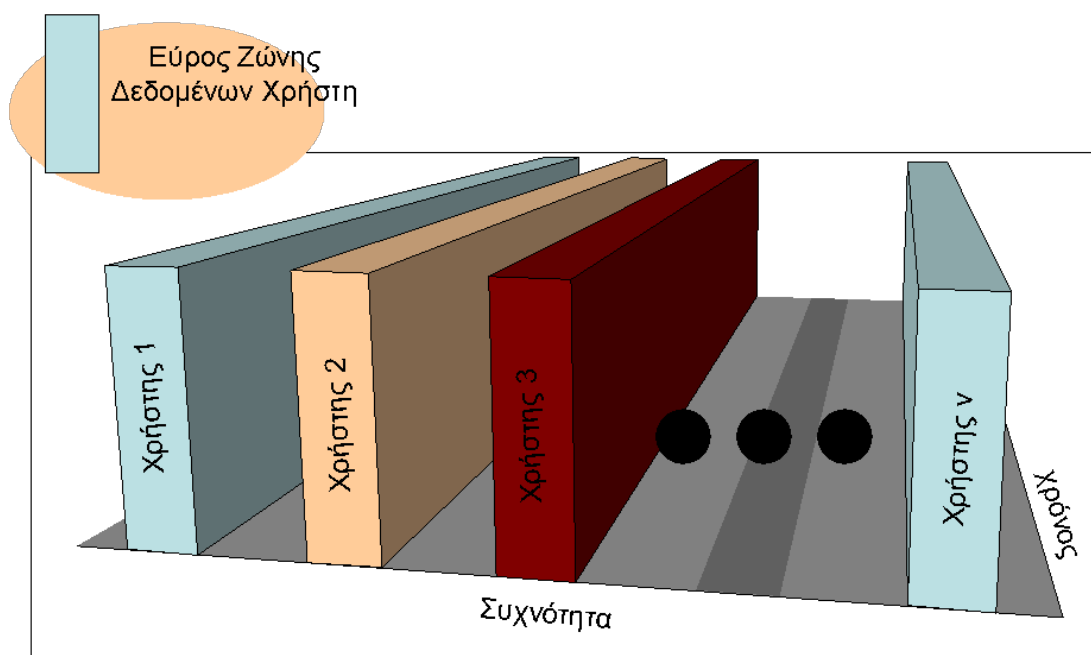
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση Συχνότητας (FDMA)

#### 3.1 Βασική αρχή λειτουργίας της FDMA

Η τεχνική της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (Frequency Division Multiple Access, FDMA) χρησιμοποιήθηκε ευρέως στα παλαιά τηλεφωνικά και ασύρματα συστήματα επικοινωνίας πολλαπλών χρηστών. Σχηματικά θα μπορούσαμε να παραστήσουμε την τεχνική FDMA, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.

Εάν ένα κανάλι, όπως ένα καλώδιο, έχει ένα εύρος ζώνης μετάδοσης  $W$  Hz και ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί εύρος ζώνης  $B$  Hz για τον απαιτούμενο ρυθμό πληροφορίας, τότε το κανάλι θα μπορεί θεωρητικά να υποστηρίξει  $W/B$  χρήστες ταυτόχρονα.



Εικόνα 3.1: Η τεχνική FDMA διαιρεί την συχνότητα στους χρήστες

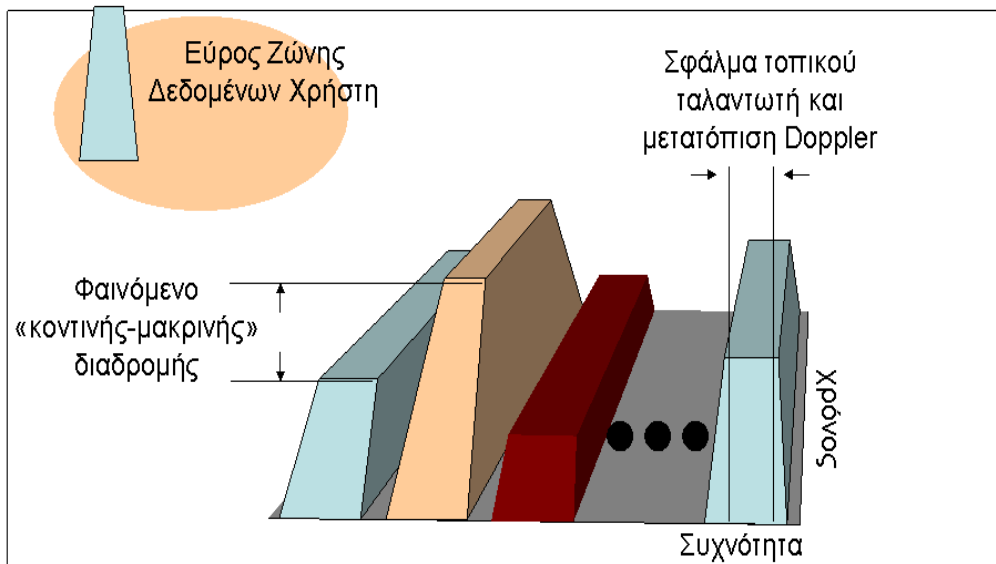
Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας διαμόρφωση διέλευσης ζώνης (bandpass modulation) και τοποθετώντας κάθε χρήστη σε μία από τις διαδοχικές θυρίδες, στις οποίες μπορεί να χωριστεί το συνολικό εύρος ζώνης  $W$ . Εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί ότι η απόδοση της πολύπλεξης με διαίρεση συχνότητας καθορίζεται από το πόσο επιτυχώς περιορίζεται το εύρος ζώνης που διατίθεται σε κάθε χρήστη (για

παράδειγμα, από την τιμή του  $\alpha$  στα φίλτρα ρίζας υψωμένου συνημίτονου). Η απόδοση εξαρτάται επίσης από το βαθμό επιλεκτικότητας του συστήματος από-πολύπλεξης (de-multiplexing), δηλαδή το πόσο καλά φιλτράρεται το τμήμα της διαμόρφωσης του κάθε χρήστη.

Στην πολύπλεξη με διαίρεση συχνότητας ο ρυθμός εκπομπής δεδομένων και επομένως η σχεδίαση του μόντεμ (διαμορφωτής – αποδιαμορφωτής) παραμένουν τα ίδια με την περίπτωση όπου ο χρήστης είναι ένας. Τα μόνα επιπλέον κυκλώματα που απαιτούνται σε αυτήν την περίπτωση είναι αυτά που θα μετατοπίσουν το εύρος ζώνης κάθε χρήστη σε διαφορετική διαθέσιμη θυρίδα. Τυπικά, η θυρίδα που διατίθεται στον κάθε χρήστη παραμένει στη διάθεση του καθ' όλη τη διάρκεια του μηνύματος.

### 3.2 Ασύρματη λειτουργία FDMA

Στις ασύρματες επικοινωνίες, όπου το περιβάλλον του ελεύθερου χώρου αποτελεί πρόκληση για κάθε μέθοδο πολλαπλής πρόσβασης η μέθοδος FDMA χρησιμοποιείται ευρέως λόγω της απρόβλεπτης και χρονικά μεταβαλλόμενης φύσης του καναλιού επικοινωνίας.



Εικόνα 3.2: Τα βασικά προβλήματα της ασύρματης λειτουργίας της FDMA

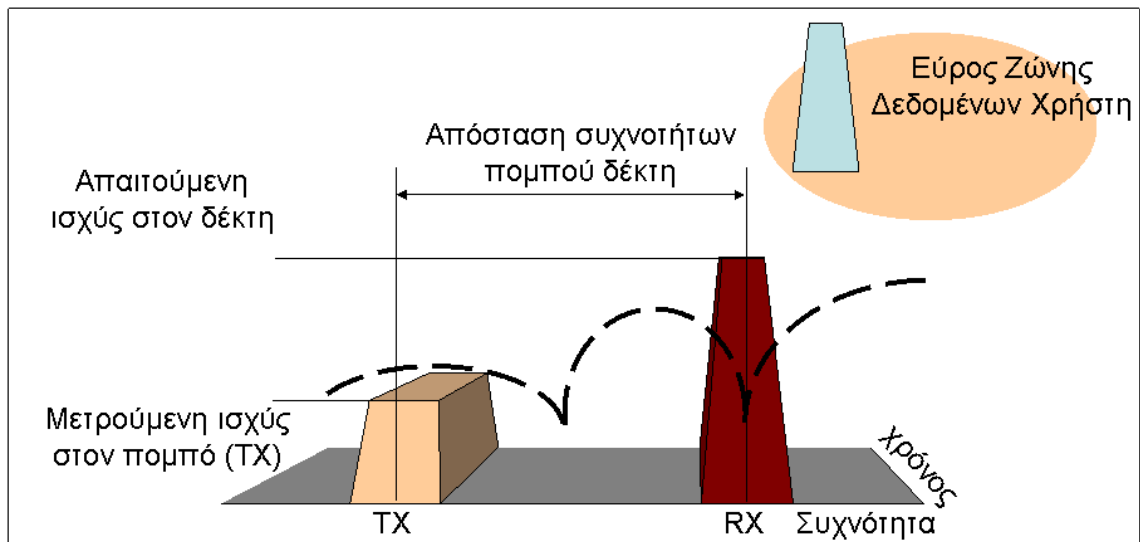
Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα λόγω ενός φαινομένου που ονομάζεται φαινόμενο "κοντινής - μακρινής" διαδρομής (near-far effect) (εικόνα 3.2) είναι οι μεγάλες διακυμάνσεις της ισχύος σήματος που λαμβάνεται από χρήστες σε

διαφορετικές θυρίδες συχνότητας. Εάν ένας χρήστης βρίσκεται πολύ κοντά στο σταθμό βάσης του συστήματος, τότε θα δημιουργήσει ένα σήμα πολύ πιο έντονο από αυτό ενός άλλου χρήστη, που βρίσκεται στα όρια λήψης του σταθμού βάσης. Οι διακυμάνσεις ισχύος που προκύπτουν μπορεί να ανέρχονται στα 100 dB. Εάν το ισχυρό σήμα παράγει έστω και ελάχιστη ακτινοβολία εκτός ζώνης η οποία βρίσκεται στη θυρίδα που διατίθεται στο ασθενές σήμα, τότε μπορεί εύκολα να υπερκαλύψει το τελευταίο και να αλλοιώσει την επικοινωνιακή ζεύξη. Η ύπαρξη αυτού του προβλήματος οδήγησε στην εκτενή ανάλυση για τον έλεγχο του εύρους ζώνης και της ενέργειας των πλευρικών λοβών των ψηφιακών μεθόδων διαμόρφωσης όπως η διαμόρφωση CPFSK και τον σχεδιασμό τεχνικών διαμόρφωσης που να είναι όσο το δυνατόν αναίσθητες στην αλλοίωση που προκαλεί ο ενισχυτής, όπως η διαμόρφωση  $\pi/4$  QPSK.

Την αβεβαιότητα συχνότητας που προκαλείται από τη μετατόπιση Doppler και τα σφάλματα του τοπικού ταλαντωτή περιλαμβάνουν άλλα ανοικτά ζητήματα στο χώρο της ραδιοεπικοινωνίας. Αυτό το αναπόφευκτο σφάλμα κάνει υποχρεωτική την εισαγωγή ζωνών προστασίας (guard bands) μεταξύ των θυρίδων, και επομένως την υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος FDMA (Εικόνα 3.2).

### **3.3 Έλεγχος ισχύος στα ασύρματα συστήματα FDMA**

Το φαινόμενο "κοντινής-μακρινής" διαδρομής είναι σύνηθες στην ασύρματη επικοινωνία FDMA άρα επιβάλλεται να εξετάσουμε συνοπτικά μερικές μεθόδους για την παράκαμψη του προβλήματος. Καταρχήν μέσα στο μόντεμ του κάθε χρήστη απαιτείται προσεκτικό φιλτράρισμα και φασματική μορφοποίηση του σήματος. Επίσης η γραμμικοποίηση των ενισχυτών πομπού και δέκτη είναι απαραίτητη. Αρκετά αναγκαίος είναι και ο έλεγχος της εκπεμπόμενης ισχύος από κάθε χρήστη στη θέση του δέκτη. Εάν ο κάθε χρήστης μπορούσε να ελέγχει πλήρως την ισχύ εξόδου του πομπού του και να γνωρίζει την απώλεια ισχύος κατά τη διαδρομή, τότε θα μπορούσε να ρυθμίζει την εκπεμπόμενη ισχύ του, έτσι ώστε η ισχύς που φθάνει στη θέση του δέκτη να υπερβαίνει μία ελάχιστη αλλά ικανοποιητική τιμή, από όλους τους χρήστες.

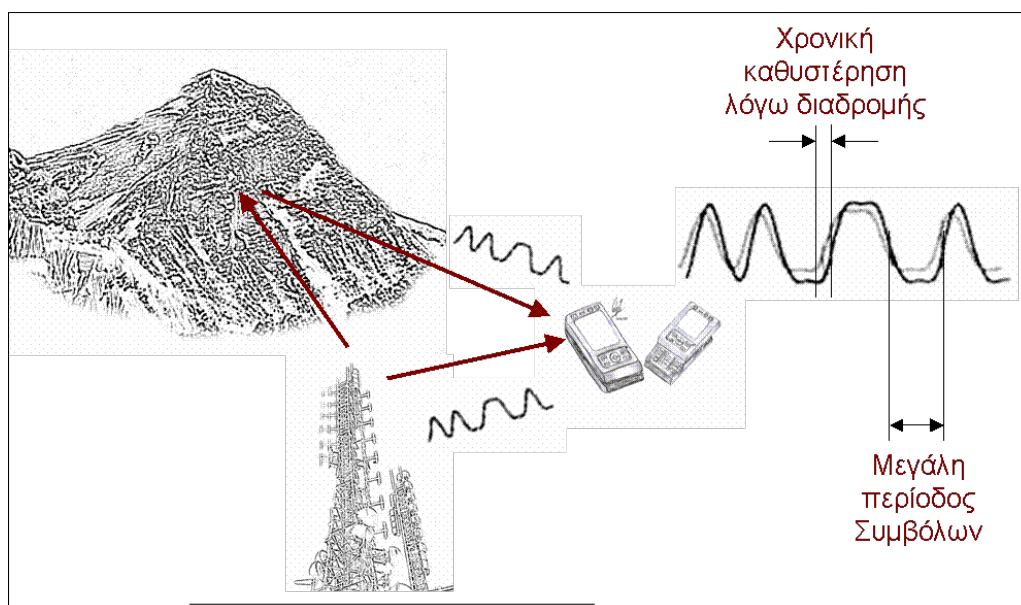


Εικόνα 3.3: Η απώλεια ισχύος στα ασύρματα συστήματα FDMA

Το σημαντικότερο πρόβλημα είναι ο προσδιορισμός της απώλειας ισχύος κατά τη διαδρομή. Εάν η σύνδεση είναι αμφίδρομη (duplex), τότε είναι δυνατόν να μετρήσει ο απομακρυσμένος χρήστης την ισχύ που λαμβάνει από το σταθμό βάσης και να υπολογίσει την απώλεια ισχύος στη συχνότητα του σταθμού βάσης (δέκτη) κατά τη διαδρομή από το σταθμό βάσης στο χρήστη. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι αυτή η απώλεια ισχύος θα είναι ίδια με την απώλεια ισχύος στη συχνότητα που εκπέμπει ο χρήστης προς το σταθμό βάσης, επειδή, όπως γνωρίζουμε, οι δύο αυτές συχνότητες είναι διαφορετικές, και επιπλέον μεταβάλλονται εάν ο χρήστης κινείται. Για παράδειγμα, σε μία περιοχή επιλεκτικής διάλειψης η συχνότητα που εκπέμπει ο σταθμός βάσης μπορεί να εμπίπτει, οπότε ο χρήστης θα υπερεκτιμήσει την απώλεια ισχύος κατά τη διαδρομή. Αντίθετα σε μία περιοχή επιλεκτικής διάλειψης μπορεί η συχνότητα που εκπέμπει ο χρήστης να εμπίπτει, οπότε το σήμα που θα εκπέμψει ο χρήστης να μην είναι αρκετό. Μία λύση σε αυτό το θέμα είναι η λειτουργία ενός συστήματος ελέγχου ισχύος κλειστού βρόχου όπου ο σταθμός βάσης, παρακολουθεί την ισχύ που φθάνει από κάθε απομακρυσμένο χρήστη και να δίδει ανάλογες εντολές για την αύξηση ή μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος. Αυτή η τεχνική βέβαια χρειάζεται συμπληρωματική σηματοδότηση. Τελικά προκύπτει ότι ο έλεγχος ισχύος είναι πολύ χρήσιμος στα συστήματα CDMA και λιγότερο χρήσιμος στα συστήματα TDMA. Έτσι ο έλεγχος ισχύος με κλειστό βρόχο είναι σύνηθες φαινόμενο στα συστήματα CDMA.

### 3.4 Πλεονεκτήματα της FDMA

Παραδοσιακά η μέθοδος FDMA έχει χρησιμοποιηθεί στα συστήματα ραδιοεπικοινωνίας, στα οποία οι καθυστερήσεις λόγω πολύοδης διάδοσης δημιουργούν τα φαινόμενα διασυμβολικής παρεμβολής. Αυτά καθίστανται σημαντικά όταν η διαφορική καθυστέρηση μεταξύ διαδρομών ανέρχεται σε υπολογίσιμο κλάσμα της περιόδου των εκπεμπόμενων συμβόλων (Εικόνα 3.4). Διατηρώντας την διάρκεια των συμβόλων σε υψηλές τιμές, κάτι που απαιτεί M-αδική σηματοδότηση σε στενές θυρίδες συχνότητας, το πρόβλημα της καθυστέρησης μπορεί να αγνοηθεί. Η εφαρμογή των μεθόδων ισοστάθμισης καναλιού, που γίνεται στα σύγχρονα συστήματα επεξεργασίας σήματος, αποτρέπει τον περιορισμό του ρυθμού εκπομπής συμβόλων λόγω αυτής της καθυστέρησης και συνεπώς επιτρέπει υψηλότερους ρυθμούς εκπομπής δεδομένων στον αέρα. Αυτό ανοίγει το δρόμο στη χρησιμοποίηση της TDMA στις ραδιοεπικοινωνίες, σαν εναλλακτική λύση έναντι της FDMA.



Εικόνα 3.4: Πλεονεκτήματα της FDMA

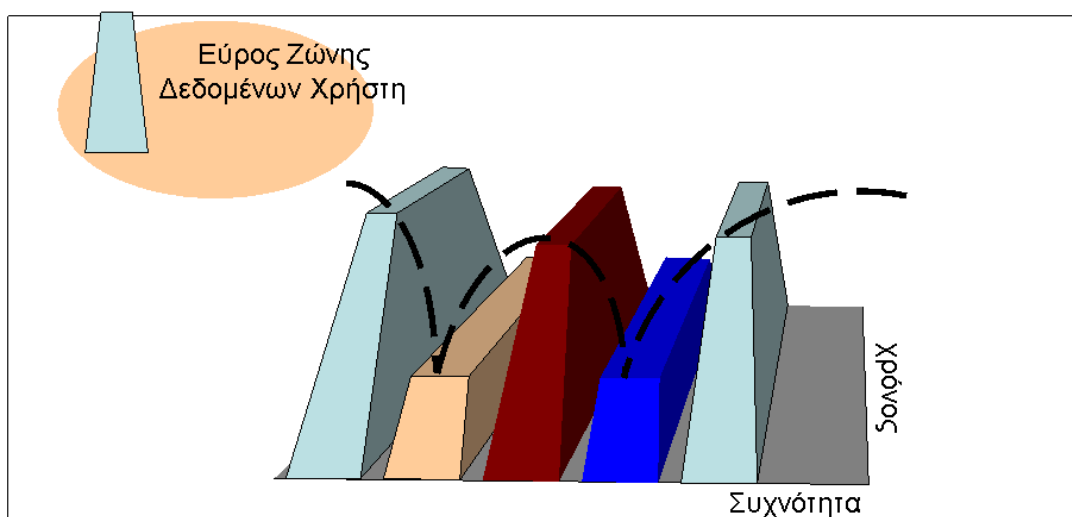
Ένα άλλο πλεονέκτημα της FDMA είναι ότι το εύρος ζώνης πομπού και δέκτη διατηρείται στην ελάχιστη δυνατή τιμή (και ειδικότερα το εύρος ζώνης στο οποίο οι ενισχυτές ισχύος συμπεριφέρονται γραμμικά). Επομένως διατηρείται όσο το δυνατόν πιο απλή η διαδικασία παραγωγής και ανίχνευσης δεδομένων.

Στα παραδείγματα της FDMA περιλαμβάνονται τα κινητά τηλέφωνα πρώτης γενεάς και τα περισσότερα ραδιοσυστήματα αμφίδρομης επικοινωνίας που

χρησιμοποιούνται από εταιρείες ταξί, στόλους φορτηγών, υπηρεσίες άμεσης επέμβασης κ.ά.

### 3.5 Μειονεκτήματα της FDMA

Το μειονέκτημα που συχνά συναντάται στην τεχνική FDM/FDMA είναι η αδυναμία της να διαχειρίζεται μεταβλητούς ρυθμούς εκπομπής δεδομένων στα πλαίσια του εύρους ζώνης μίας συγκεκριμένης θυρίδας συχνοτήτων. Αυτό το μειονέκτημα σήμερα δεν υφίσταται πια για δύο λόγους: Πρώτον, στην πράξη μπορούμε να μεταβάλλουμε το ρυθμό εκπομπής δεδομένων διατηρώντας το εύρος ζώνης σταθερό, εάν αυξήσουμε τον αριθμό των καταστάσεων συμβόλων που χρησιμοποιούμε. Δεύτερον, είναι δυνατόν να παραχωρήσουμε σε έναν χρήστη περισσότερες από μία θυρίδες συχνοτήτων και ακόμα να εισαγάγουμε την ιδέα των θυρίδων μεταβλητού εύρους ζώνης. Και οι δύο αυτές λύσεις βασίζονται στην ύπαρξη ισχυρών ψηφιακών επεξεργαστών σήματος (Digital Signal Processing - DSP) που υλοποιούν μόντεμ πολλαπλής σηματοδότησης και μεταβλητού ρυθμού εκπομπής (οι απαιτήσεις αυτές σήμερα ικανοποιούνται ήδη από τις συνήθεις κάρτες modem του εμπορίου), και να εκτελούν προσαρμοστικό φιλτράρισμα καναλιού σε μεταβλητό εύρος ζώνης, το οποίο στις σημερινές συσκευές DSP ανάγεται σε μία απλή λειτουργία.



Εικόνα 3.5: Επιλεκτική διάλειαση συχνότητας

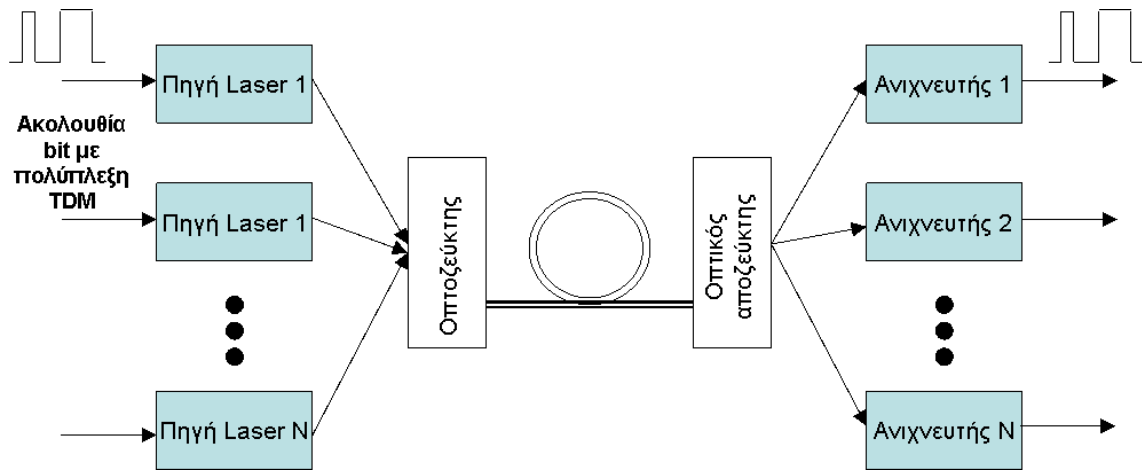
Η σταθερότητα συχνότητας και η ανάγκη ζωνών προστασίας αποτελούσαν παραδοσιακά μειονεκτήματα της FDMA, καθώς απαιτούσαν τοπικούς ταλαντωτές υψηλού



κόστους και σταθερότητας στα modem εάν επρόκειτο οι ζώνες προστασίας να είναι οι μικρότερες δυνατές. Τα τελευταία χρόνια η ταυτόχρονη εκπομπή σημάτων αναφοράς στον ελεύθερο χώρο επιτρέπει στους σχεδιαστές να απαλλαγούν από αυτούς τους δαπανηρούς ταλαντωτές και να επιτύχουν μεγαλύτερη σταθερότητα από όσο ήταν παλαιότερα δυνατό (σήμερα μπορείτε να αγοράσετε ρολόγια χειρός που να λαμβάνουν τέτοιο σήμα αναφοράς και έτσι να έχουν ακρίβεια της τάξης του msec). Το κύριο όμως μειονέκτημα της FDMA σε συνθήκες ασύρματης επικοινωνίας είναι ότι η τεχνική είναι επιρρεπής στην επιλεκτική διάλεια συχνότητας, η οποία μπορεί να επηρεάσει κάποια θυρίδα συχνότητας και έτσι να υπάρξει απώλεια του σήματος του συγκεκριμένου χρήστη, σε παροδική συνήθως βάση.

### **3.6 Πολύπλεξη Διαίρεσης Μήκους Κύματος (WDM)**

Ήταν πολύ δύσκολο έως τώρα στις επικοινωνίες με οπτικές ίνες να δημιουργούνται και να ανιχνεύονται συγκεκριμένες συχνότητες φωτός, οι οποίες να έχουν ικανοποιητική φασματική σταθερότητα και έτσι να μπορούν να περιοριστούν στο συγκεκριμένο εύρος ζώνης που διατίθεται στα μεγάλα μήκη καλωδίων οπτικής ίνας, αλλά και να διακρίνονται στο δέκτη από τις γειτονικές τους συχνότητες. Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, έχει βελτιωθεί η τεχνολογία των πηγών laser, επαναληπτών ενισχυτών και ανιχνευτών, και έτσι είναι δυνατή η αποστολή διάφορων ανεξάρτητα διαμορφωμένων οπτικών φορέων στην ίδια ίνα. Στους κύκλους της Οπτοηλεκτρονικής η τεχνική αυτή αναφέρεται ως Πολύπλεξη με Διαίρεση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing, WDM) και όχι "Πολύπλεξη με Διαίρεση Συχνότητας".



Εικόνα 3.6: Σύστημα πολύπλεξης με διαίρεση μήκους κύματος

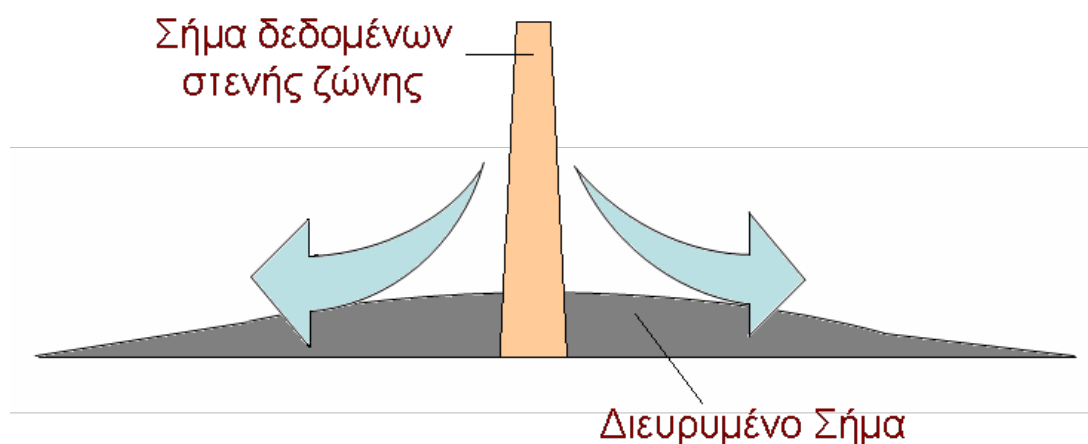
Κάθε επιμέρους φορέας φωτός μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων της τάξης των 10 Gbps, με τους χρήστες να είναι χρονικά πολυπλεγμένοι στο κανάλι. Η τεχνική WDM επομένως προσφέρει τη δυνατότητα εκπομπής αρκετών εκατοντάδων gigabit ανά sec σε κάθε οπτική ίνα καθώς και αμφίδρομη εκπομπή στην ίδια ίνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Πολλαπλή Πρόσβαση με διαίρεση κώδικα (CDMA)

#### 4.1 Συστήματα CDMA

Τα συστήματα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (*Code Division Multiple Access, CDMA*) έχουν χρησιμοποιηθεί σχεδόν αποκλειστικά από το στρατό για την υλοποίηση απόρρητων ραδιοεπικοινωνιών σε συνθήκες υψηλών παρεμβολών (Εικόνα 4.1).



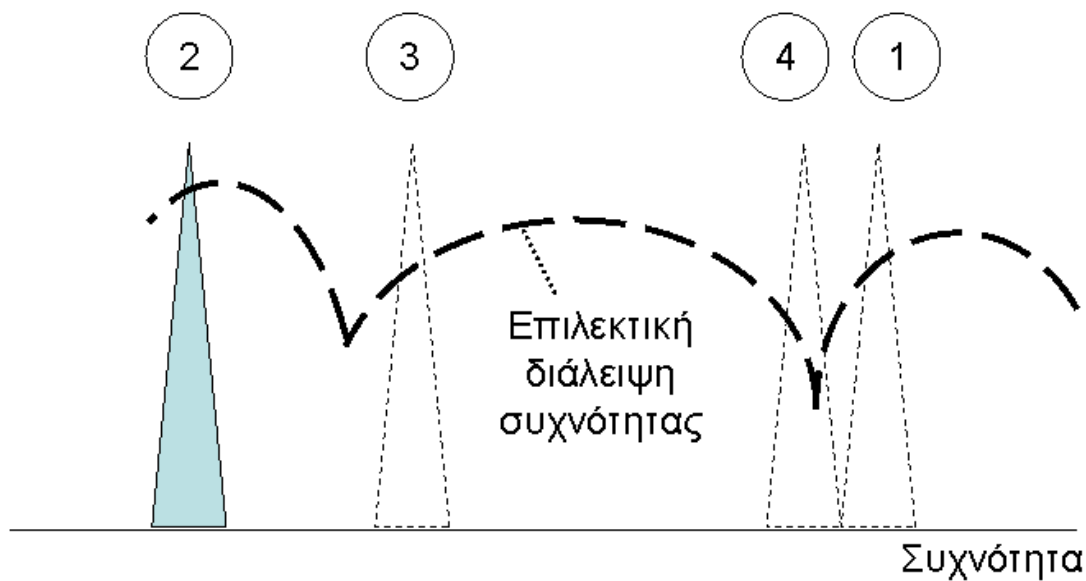
Εικόνα 4.1: Διευρυμένο φάσμα συστήματος CDMA

Τα τελευταία χρόνια η καλή φασματική τους απόδοση και η ανοχή που εμφανίζουν τα συστήματα CDMA σε εφαρμογές πολλαπλών χρηστών τα έχουν καταστήσει άριστες επιλογές για επικοινωνίες κυψελωτής μορφής.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά συστήματα CDMA, που ονομάζονται CDMA Ευθείας Ακολουθίας (Direct Sequence CDMA) και CDMA με Άλματα Συχνοτήτων (Frequency Hopping -FH- CDMA). Βασική προϋπόθεση και για τα δύο συστήματα είναι εύρος ζώνης εκπομπής πολλαπλάσιο από αυτό που απαιτείται από ένα χρήστη, και την ενέργεια του σήματος του κάθε χρήστη να είναι διάσπαρτη στο ευρύ κανάλι. Γι' αυτό το λόγο οι παραπάνω τεχνικές φέρουν την ονομασία συχνά συστήματα διευρυμένου φάσματος (spread spectrum systems).

## 4.2 CDMA με άλματα συχνότητας

Η μέθοδος των αλμάτων συχνότητας εφαρμόζεται στη μετακίνηση των σημάτων στενής ζώνης των διαφόρων χρηστών και τη συχνή αλλαγή της θέσης της συχνότητας ως προς το χρόνο. Σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχει επιλεκτική διάλεια συχνότητας, το πλεονέκτημα της αλλαγής συχνότητας μπορεί να εξασφαλίσει ότι ποτέ δεν πρόκειται το σήμα κάποιου χρήστη να παραμένει σε κατάσταση επιλεκτικής διάλειψης για εκτεταμένο διάστημα. Είναι προφανές ότι για να είναι λειτουργικά τα άλματα συχνότητας, θα πρέπει τα σήματα των χρηστών να πραγματοποιούν άλματα σε ένα εύρος ζώνης αρκετά μεγαλύτερο από τα βυθίσματα που προκαλούνται από την επιλεκτική διάλεια. Για να εξασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει περίπτωση να μεταπηδήσουν δύο χρήστες στην ίδια περιοχή συχνοτήτων ταυτόχρονα, οπότε τα σήματα τους παρεμβάλλονται παράλληλα θα πρέπει οι συχνότητες των διαθέσιμων φορέων να είναι κατανεμημένες με βάση κάποια προκαθορισμένη σειρά, ή κώδικα.



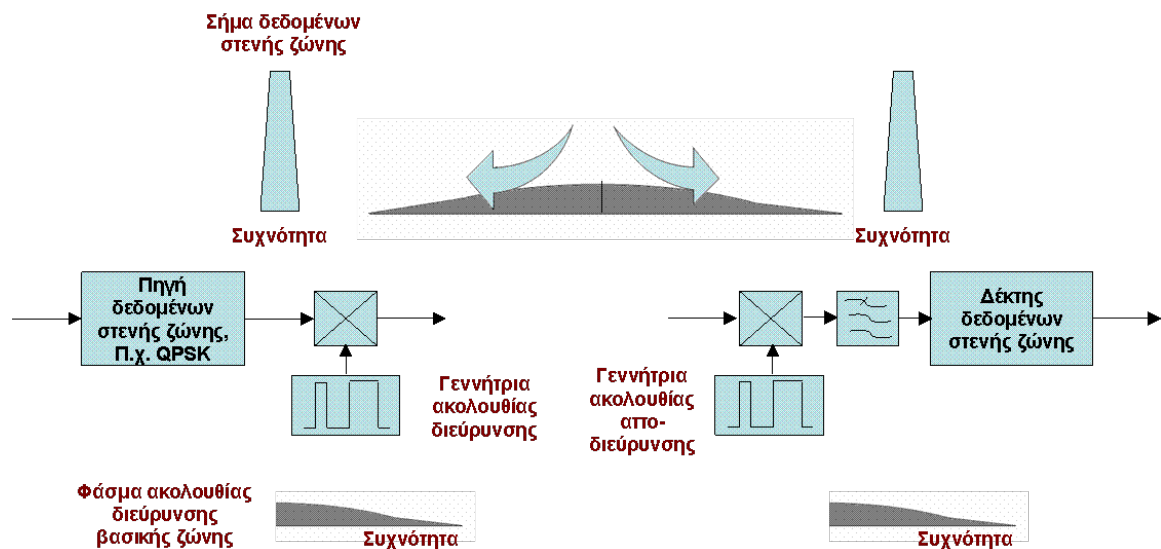
Εικόνα 4.2: CDMA με άλματα συχνότητας

Τα άλματα συχνότητας είναι πιο αποτελεσματικά και η επικοινωνία δε θα αλλοιώνεται λόγω εξασθένησης ή αμοιβαίας παρεμβολής σε κανένα χρονικό διάστημα εάν χρησιμοποιηθεί ένας ταχύς ρυθμός πραγματοποίησης αλμάτων (αρκετές χιλιάδες φορές το δευτερόλεπτο). Αυτό, όμως δημιουργεί προβλήματα στη σχεδίαση των συνθετών ταχείας μεταγωγής και των ενισχυτών ισχύος ευρείας ζώνης που απαιτούνται, οι οποίοι θέτουν στην πράξη ένα άνω όριο στο ρυθμό πραγματοποίησης αλμάτων. Επιπλέον, τα κανάλια στενής ζώνης είναι ευάλωτα στη μετατόπιση

Doppler, τα σφάλματα συχνότητας των τοπικών ταλαντωτών κ.ά. και οι τεχνικές αντιστάθμισης αυτών των σφαλμάτων δυσκολεύονται όταν ο ρυθμός αλμάτων είναι μεγάλος. Πάντως, τα άλματα καθιστούν το σύστημα λιγότερο ευάλωτο στη διακριτή παρεμβολή στενής ζώνης και το φαινόμενο "κοντινής-μακρινής" διαδρομής.

### 4.3 CDMA ευθείας ακολουθίας

Τα σήματα στενής ζώνης που προέρχονται από τους επιμέρους χρήστες στην πολύπλεξη CDMA Ευθείας Ακολουθίας (Direct Sequence CDMA, DS-SS) διευρύνονται με συνεχή και ομαλό τρόπο ώστε να καταλάβουν ένα μεγάλο εύρος ζώνης, με τη χρήση μίας ακολουθίας διεύρυνσης. Εάν το σήμα δεδομένων στενής ζώνης ενός χρήστη εισέλθει σε ένα μίκτη μαζί με ένα τοπικά δημιουργημένο, αυστηρά καθορισμένο σήμα ευρείας ζώνης, τότε η ενέργεια του σήματος του χρήστη θα διασπείρεται ώστε να καταλάβει περίπου το ίδιο εύρος της πηγής του σήματος ευρείας ζώνης. Το σήμα ευρείας ζώνης που χρησιμοποιείται για τη διεύρυνση του σήματος του χρήστη δημιουργείται από μία γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας, που λειτουργεί με πολύ μεγάλη συχνότητα ωρολογίου, η οποία ονομάζεται ρυθμός τεμαχισμού (chipping rate).



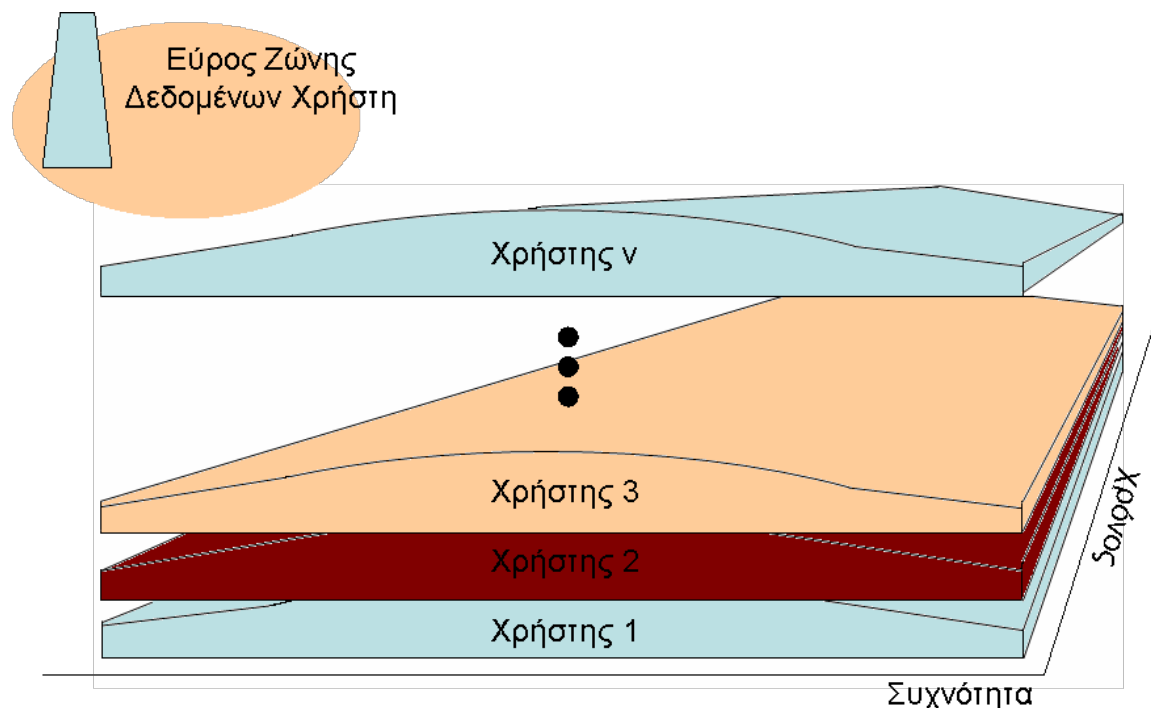
Εικόνα 4.3: Υλοποίηση CDMA ευθείας ακολουθίας

Στο δέκτη είναι αναγκαίο να γίνει απο-διεύρυνση (de-spreading) του σήματος, έτσι ώστε να ανακτηθεί η αρχική διαμόρφωση δεδομένων στενής ζώνης του χρήστη και

αυτό γίνεται διαβιβάζοντας το λαμβανόμενο σήμα σε ένα μίκτη, μαζί με την ίδια, ακριβώς συγχρονισμένη, ψευδοτυχαία ακολουθία. Αυτή η διαδικασία συσχέτισης προκαλεί την εξουδετέρωση της διεύρυνσης που έγινε στον πομπό. Η απο-διεύρυνση θα συμβεί όμως, μόνον εάν χρησιμοποιηθεί η σωστή ακολουθία διεύρυνσης στα δύο άκρα της ζεύξης και οι δύο ακολουθίες είναι χρονικά ευθυγραμμισμένες .

Η πρόσβαση από πολλούς χρήστες επιτυγχάνεται στην CDMA ευθείας ακολουθίας εκχωρώντας στον κάθε χρήστη έναν ξεχωριστό κώδικα διεύρυνσης ή διαφορετικό χρονισμό με τον ίδιο κώδικα διεύρυνσης. Στο δέκτη θα ανιχνευτεί μόνον η ενέργεια που έχει διασπαρθεί από το συγκεκριμένο κώδικα διεύρυνσης που χρησιμοποιήθηκε και στον πομπό. Τελικά οι χρήστες μπορούν να συνυπάρχουν ταυτόχρονα και στο ίδιο εύρος ζώνης μέσα στο κανάλι.

Το διευρυμένο φάσμα της CDMA περνά κατά πολύ το πρόβλημα της επιλεκτικής διάλειψης συχνότητας όπως και στα άλματα συχνότητας, εξασφαλίζοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος της διευρυμένης ενέργειας του σήματος θα πέφτει έξω από τα βυθίσματα διάλειψης (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα

Εάν υπάρχει κάποια συσχέτιση ανάμεσα, τότε θα υπάρχει μία μικρή συμμετοχή από τα άλλα διευρυμένα σήματα στο απο-διευρυμένο σήμα κάθε χρήστη, όπως συνήθως συμβαίνει στους κώδικες διεύρυνσης,

Αυτό το φαινόμενο θέτει τελικά ένα άνω όριο, για τον αριθμό των χρηστών που μπορούν να συνυπάρχουν ταυτόχρονα στο ίδιο τμήμα του σφάλματος, ώστε να μην δημιουργηθούν σφάλματα από την ανεπιθύμητη απο-διευρυμένη ενέργεια των σημάτων των γειτονικών χρηστών. Αυτός ο παράγοντας παρεμβολής δημιουργεί την πιο αυστηρή απαίτηση, σε σύγκριση με όλα τα υπόλοιπα συστήματα που έχουμε εξετάσει για έλεγχο ισχύος, καθώς είναι φανερό ότι αυτή η αμοιβαία παρεμβολή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί για κάθε χρήστη μόνον εάν οι χρήστες λειτουργούν έτσι, ώστε ο σταθμός βάσης να λαμβάνει από όλους την ίδια ισχύ.

#### 4.4 Παραγωγή ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας

Κάποιες κυκλικές ακολουθίες από τα δυαδικά ψηφία (0 και 1) χαρακτηρίζονται από την στατιστική ιδιότητα της «τυχειότητας» (randomness). Παρόλα αυτά, αυτές οι ακολουθίες, εφόσον είναι κυκλικές, έχουν κάποια καθορισμένη περιοδικότητα. Το όνομα που δόθηκε σε αυτές τις ακολουθίες είναι ψευδό-τυχαίες δυαδικές ακολουθίες (Pseudo-Random Binary Sequence – P.R.B.S), για τους προφανείς λόγους.

Στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, στην τεχνολογία των ραντάρ, στην κωδικοποίηση σήματος, στα συστήματα ελέγχου, στην βιοϊατρική και σε πολλές άλλες εφαρμογές, η χρήση αυτών των ψευδοτυχαίων ακολουθιών γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη. Παρακάτω αναφέρονται οι ψηφιακές τεχνικές για την παραγωγή τέτοιων ακολουθιών καθώς και η μαθηματική περιγραφή τους.

Η μέθοδος στην οποία βασίζεται η παραγωγή των τυχαίων ψηφίων (bits) βασίζεται στην θεωρία των modulo 2 πρώτων πολυωνύμων (modulo 2 primitive polynomials).

Γενικά ένα πολυώνυμο βαθμού  $n$  έχει τη μορφή:

$$a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + a_{n-2} x^{n-2} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0, \quad (4.1)$$

ή

$$\sum_{k=0}^n a_k x^k, \quad (4.2)$$

Όπου  $a_k$  είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου. Ένα modulo 2 πολυώνυμο είναι απλά ένα πολυώνυμο του οποίου οι συντελεστές περιορίζονται σε δύο δυνατές τιμές: 0 και 1. Ένα παράδειγμα ενός modulo 2 πολυωνύμου (4ου βαθμού) φαίνεται παρακάτω:

$$x^4 + x^3 + x^1 + 1. \quad (4.3)$$

Ας σημειώσουμε εδώ ότι δεν είναι απαραίτητο να δηλώσουμε ρητά τους συντελεστές. Εφόσον οι τιμές των συντελεστών περιορίζονται σε 0 ή 1, ένας όρος του πολυωνύμου είτε υπάρχει (συντελεστής 1) είτε απουσιάζει (συντελεστής 0). Στο παραπάνω παράδειγμα, όλοι οι συντελεστές είναι 1 εκτός από τον συντελεστή του  $x^2$ : ως εκ τούτου απουσιάζει.

Στην αρχή έγινε αναφορά στα πρώτα πολυώνυμα. Ένα modulo 2 πολυώνυμο είναι πρώτο όταν δεν μπορεί να παραγοντοποιηθεί. Το πολυώνυμο στο παραπάνω παράδειγμα δεν είναι πρώτο. Μπορεί να παραγοντοποιηθεί ως εξής:

$$x^4 + x^3 + x^1 + 1 = (x^3 + 1)(x + 1). \quad (4.4)$$

Ένα παράδειγμα πρώτου πολυωνύμου 4ου βαθμού φαίνεται παρακάτω. Σημειώστε ότι δεν μπορεί να παραγοντοποιηθεί.

$$x^4 + x^1 + 1. \quad (4.5)$$

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι ο συντελεστής του όρου με βαθμό 0 είναι πάντα 1. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα modulo 2 στοιχειώδες πολυώνυμο πάντα θα τελειώνει σε «... + 1». Ο λόγος είναι ότι αν ένα πολυώνυμο δεν τελειώνει σε 1, τότε θα πρέπει να τελειώνει σε έναν όρο κάποιου βαθμού  $k$  ( $k < 1$ ). Εφόσον ο όρος βαθμού  $k$  είναι ο μικρότερος όρος του πολυωνύμου, το  $x_k$  μπορεί να βγει κοινός παράγοντας. Αυτό κάνει το πολυώνυμο παραγοντοποιήσιμο, καθιστώντας το έτσι μη-πρώτο .

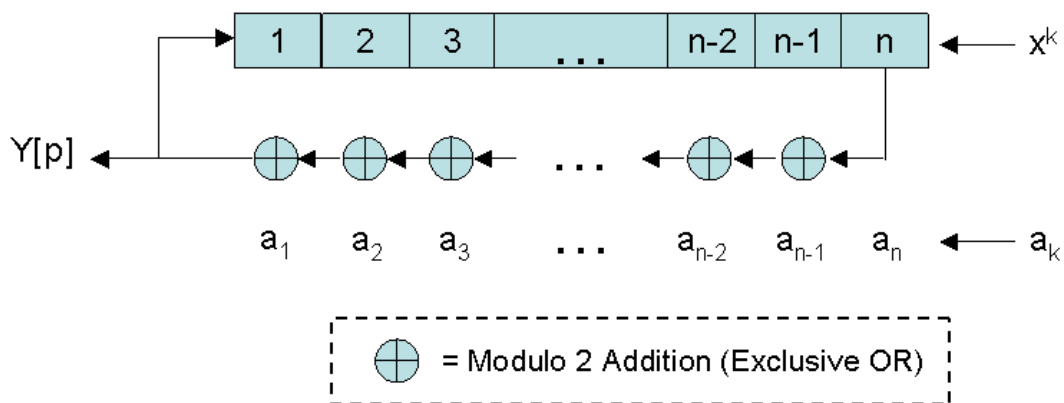
Μία από τις ιδιότητες της γεννήτριας ψευδοτυχαίων ακολουθιών είναι ότι η «τυχαία» ακολουθία τελικά επαναλαμβάνεται. Αυτός είναι και ο λόγος που τις ονομάζουμε «ψευδοτυχαίες». Ο αριθμός των bits που μπορεί μία ψευδοτυχαία ακολουθία να παράγει πριν επαναληφθεί καθορίζει και το μήκος  $L$  της γεννήτριας. Προκύπτει ότι υπάρχει μία σχέση μεταξύ του μήκους  $L$  της γεννήτριας ψευδοτυχαίας ακολουθίας και του βαθμού  $n$  του πρώτου πολυωνύμου. Αυτή η σχέση φαίνεται παρακάτω:



$$L = 2^n - 1. \quad (4.6)$$

Το πρώτο βήμα για το σχεδιασμό μίας γεννήτριας ψευδοτυχαίας ακολουθίας είναι να καθορίσουμε το μήκος  $L$ . Αυτό θα μας δείξει τον ελάχιστο βαθμό του πολυωνύμου που θα χρησιμοποιηθεί στη σχεδίαση.

Το δεύτερο βήμα είναι να διαλέξουμε ένα πολυώνυμο κατάλληλου βαθμού. Ο τύπος του πολυωνύμου σχετίζεται άμεσα με τη σχεδίαση ενός γραμμικού καταχωρητή ολίσθησης με ανάδραση (LFSR : linear feedback shift register). Η γενική μορφή ενός LFSR φαίνεται παρακάτω. Η έξοδος,  $y[p]$ , είναι η ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία.



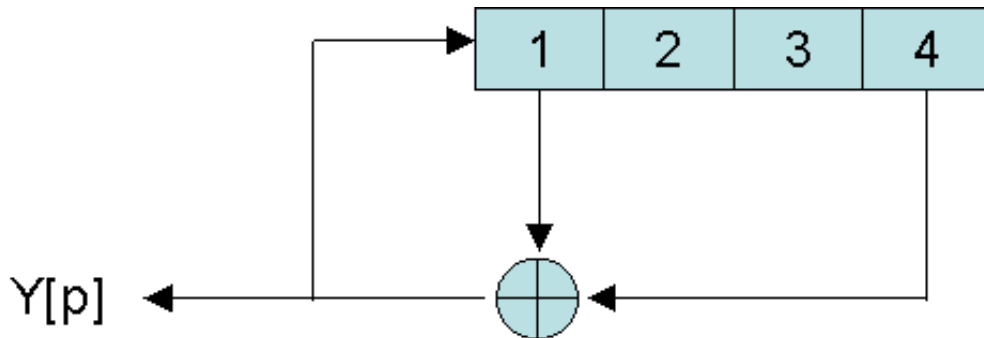
Εικόνα 4.5: Γραμμικός καταχωρητής ολίσθησης με ανάδραση (LFSR)

Σημειώνεται εδώ ότι κάθε βαθμίδα του καταχωρητή ολίσθησης αντιπροσωπεύει έναν όρο  $x_k$  του πολυωνύμου και η αντίστοιχη πράξη XOR αντιπροσωπεύει έναν από τους συντελεστές  $a_k$ . Οι συντελεστές λειτουργούν ως στοιχεία ανάδρασης. Αυτό μας επιτρέπει τον άμεσο συσχετισμό μεταξύ του πολυωνύμου και του LFSR. Για κάθε συντελεστή 0 του πολυωνύμου, η αντίστοιχη XOR στην ανάδραση μπορεί να παραλειφθεί. Ο λόγος είναι ότι σε μία modulo 2 πρόσθεση έχουμε:

$$q \oplus 0 = q. \quad (4.7)$$

Το συμπέρασμα είναι ότι μία πράξη XOR του 0 με μία τιμή παράγει την ίδια αυτή τιμή, καθιστώντας έτσι την πράξη περιττή.

Γνωρίζοντας λοιπόν πως ένα πολυώνυμο συνδέεται με έναν LFSR, είναι εύκολο να σχεδιάσουμε μία γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας οποιουδήποτε βαθμού. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας ένα πολυώνυμο 4ου βαθμού, η αντίστοιχη γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 4.6: PRBS 4<sup>ης</sup> τάξης

Η παραπάνω γεννήτρια παράγει ψευδοτυχαία ακολουθία μήκους,  $L = 2^4 - 1 = 15$ . Πρέπει να αναφέρουμε εδώ ότι σε μία PRBS σχεδιασμένη με αυτόν τον τρόπο, πρέπει να δώσουμε μία μη-μηδενική τιμή για να αρχίσει να παράγει την ακολουθία. Αυτό γιατί ο καταχωρητής ολίσθησης πρέπει να έχει για πρώτη τιμή το 1. Εάν του δώσουμε στην αρχή 0 τότε η έξοδος  $y[p]$  θα είναι πάντα 0. Συνεπώς, κάθε υλική (hardware) εφαρμογή θα πρέπει να εξασφαλίζει πως ο καταχωρητής ξεκινάει με μη-μηδενική τιμή. Ας αναφέρουμε εδώ ότι η αρχική τιμή θα επαναληφθεί τελικά, όταν  $L$  ψηφία (bits) παραχθούν στην έξοδο  $y[p]$ .

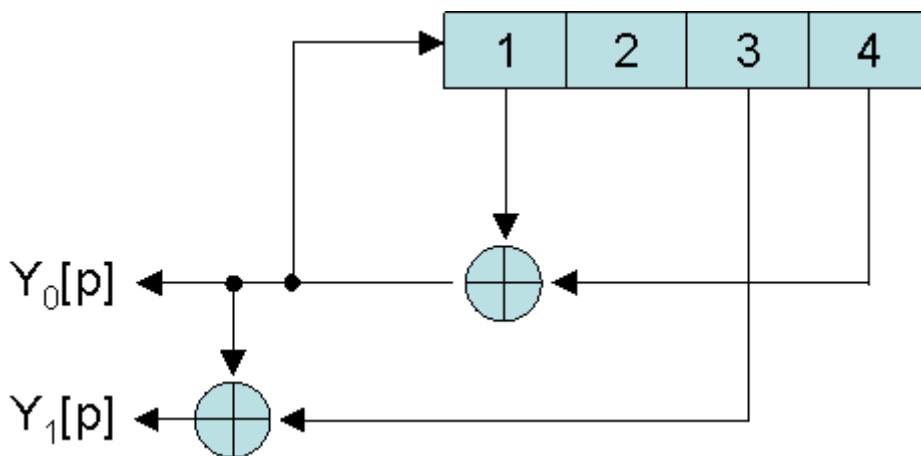
Μία δυαδική ψευδοτυχαία ακολουθία παραγόμενη με τον τρόπο που περιγράψαμε παραπάνω, έχει κάποιες ενδιαφέρουσες ιδιότητες. Κάποιες από αυτές αναφέρονται παρακάτω:

1. Κάθε ομάδα  $L$  διαδοχικών bits της εξόδου  $y[p]$  θα περιέχει  $2n-1$  μονάδες και  $2n-1-1$  μηδενικά.
2. Σε κάθε ομάδα  $L$  διαδοχικών bits της εξόδου  $y[p]$ , εάν μετατοπίσουμε ένα  $n$ -bit κατά μήκος της ακολουθίας, κάθε  $n$ -bit λέξη που λαμβάνουμε έτσι θα

εμφανιστεί ακριβώς μία φορά (εκτός των μηδενικών λέξεων, οι οποίες δεν εμφανίζονται καθόλου).

3. Η modulo 2 πρόσθεση μίας PRBS με μία οποιαδήποτε μετατοπισμένη ακολουθία της ίδιας, παράγει μία άλλη μετατοπισμένη μορφή της.
4. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι μία PRBS μας είναι χρήσιμη μόνο όταν θέλουμε να παράγουμε μία τυχαία ακολουθία από ξεχωριστά bits. Δεν χρησιμεύει για παραγωγή τυχαίων  $M$ -bits λέξεων. Είναι λάθος δηλαδή να πάρουμε ομάδες των τεσσάρων bits της ψευδοτυχαίας ακολουθίας και να τα θεωρήσουμε τυχαίες ακολουθίες των τεσσάρων bits. Η λύση είναι να παράγουμε τέσσερις διαφορετικές συνεχείς ακολουθίες και να συνδέσουμε τις εξόδους τους έτσι ώστε να παράγουμε τυχαίους αριθμούς των τεσσάρων bits. Μάλιστα είναι προτιμότερο κάθε PRBS γεννήτρια που χρησιμοποιείται σε μία multi-bit γεννήτρια τυχαίων αριθμών, να είναι διαφορετικής τάξης.

Προκύπτει ότι η ιδιότητα που αναφέρθηκε παραπάνω μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγουμε multi-bit τυχαίους αριθμούς χρησιμοποιώντας έναν μόνο LFSR. Το σχήμα παρακάτω είναι μία γεννήτρια αριθμών 2-bit χρησιμοποιώντας την τροποποίηση της PRBS 4ης τάξης που σχεδιάστηκε νωρίτερα.

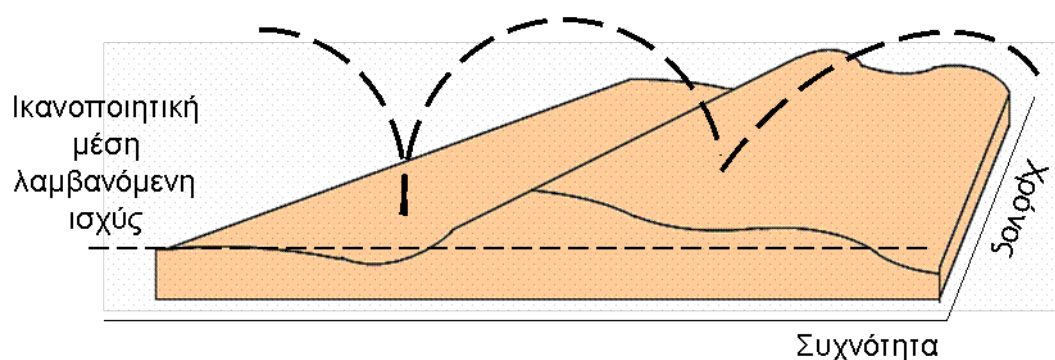


Εικόνα 4.7: Γεννήτρια ψευδοτυχαίου αριθμού 2 ψηφίων  $4^{th}$  τάξης

Εδώ, η έξοδος  $y_0[p]$  είναι η πραγματική ψευδοτυχαία ακολουθία. Η  $y_1[p]$  είναι η modulo 2 πρόσθεση της  $y_0[p]$  και της εξόδου από το 3ο στάδιο του καταχωρητή. Όμως το 3ο στάδιο του καταχωρητή είναι απλά ένα αντίγραφο της  $y_0[p]$  καθυστερημένο κατά 3. Ως συνέπεια, η ιδιότητα 3 υπαγορεύει ότι η  $y_1[p]$  είναι μία μετατοπισμένη παραλλαγή της  $y_0[p]$ . Άρα μπορούμε να θεωρούμε την  $y_0[p]$  και την  $y_1[p]$  σαν δύο ξεχωριστές ψευδοτυχαίες ακολουθίες 4ης τάξης με διαφορετικές αρχικές τιμές. Αυτό καθιστά τις δύο αυτές ακολουθίες χρήσιμες για την παραγωγή των μεμονωμένων bits του αριθμού των 2 ψηφίων. Εφόσον λοιπόν γνωρίζουμε πώς να κατασκευάζουμε μία γεννήτρια τυχαίου αριθμού 2-bit, μπορούμε να επεκτείνουμε αυτή τη λογική για να παράγουμε ψευδοτυχαίους αριθμούς με όποιο πλάτος επιθυμούμε.

#### 4.5 Πλεονεκτήματα της CDMA

Η διεύρυνση του σήματος του χρήστη πέρα από το εύρος ζώνης όπου τυχόν εμφανίζεται επιλεκτική διάλεια συχνότητας είναι ένα προφανές πλεονέκτημα της μεθόδου σε συνθήκες ασύρματης επικοινωνίας. Η μέθοδος παρέχει επίσης ασφάλεια από τυχόν σήματα παρεμβολής στενής ζώνης, τα οποία τελικά διευρύνονται από τη διαδικασία απο-διεύρυνσης που εκτελεί ο δέκτης CDMA ευθείας ακολουθίας.



Εικόνα 4.8: CDMA σε συνθήκες επιλεκτικής διάλειψης

Η ευελιξία παροχής μεταβαλλόμενων ρυθμών εκπομπής δεδομένων στον κάθε χρήστη είναι ίσως το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου CDMA σε ένα σύστημα με πολλούς χρήστες. Το ρυθμό διαμόρφωσης και το τοπικό εύρος διαμόρφωσης στενής ζώνης χωρίς να επηρεάσει άλλους χρήστες κατά τη διεύρυνση του μπορεί να αυξήσει κάθε χρήστη του συστήματος CDMA διευρυμένου φάσματος. Αυτό μπορεί να γίνει εφόσον ο χρήστης δεν αυξάνει τη συνολική ενέργεια ευρείας ζώνης του σύνθετου σήματος που εκπέμπεται από το σύνολο των χρηστών, κάτι που θα προκαλούσε αύξηση της πιθανότητας αμοιβαίας παρεμβολής κατά την απο-διεύρυνση σε επίπεδα μη επιτρεπτά.

Με την αύξηση πάνω από το μέγιστο των χρηστών, ένα σύστημα διευρυμένου φάσματος CDMA είναι δυνατό να "υπερφορτωθεί" ελαφρώς, αυξάνοντας έτσι και το μερίδιο του καθενός στη διευρυμένη ενέργεια. Αυτό είναι δυνατό να επιτευχθεί αν ο χειριστής (operator) του συστήματος εκμεταλλευθεί το γεγονός ότι ο κάθε χρήστης δεν χρησιμοποιεί συνεχώς το "κοινόχρηστο" κανάλι, οπότε μπορεί να "σβήνει" ο πομπός όταν ο χρήστης δεν ομιλεί. Τότε διατηρείται σε μια στάθμη ανάλογη της λειτουργίας με συνδρομητές λιγότερους από το μέγιστο δυνατό η ολική μέση ενέργεια .

#### **4.6 Μειονεκτήματα της CDMA**

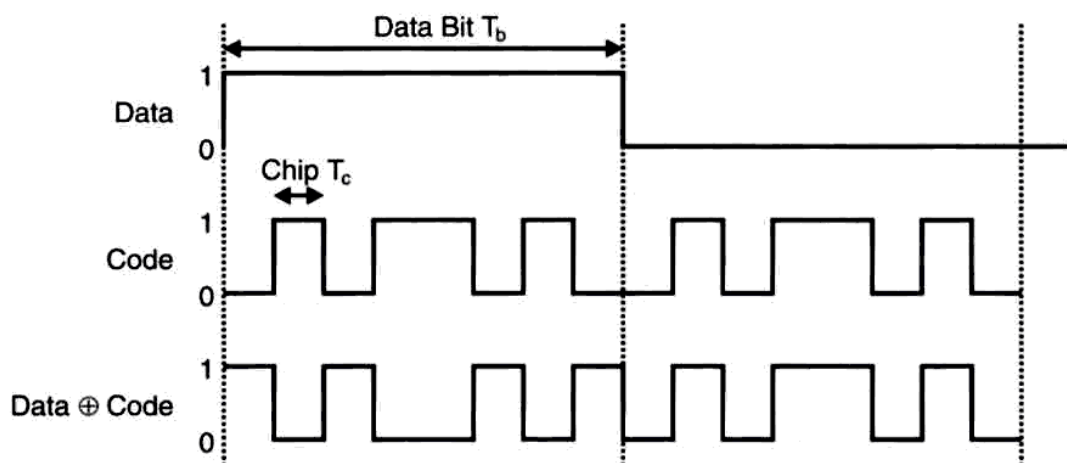
Είτε γίνεται με άλματα συχνότητας είτε με ευθεία ακολουθία η διεύρυνση σημάτων έχει το τίμημα ότι προσθέτει σημαντικές επιπρόσθετες επεξεργασίες σήματος. Επιπλέον, αποδείχθηκε ότι είναι μεγάλης σημασίας ο έλεγχος ισχύος για τη μεγιστοποίηση του αριθμού χρηστών που μπορούν να φιλοξενηθούν σε ένα κοινό κανάλι συχνοτήτων επικοινωνίας

Για να διασφαλιστεί ότι θα μπορεί να πραγματοποιηθεί ικανοποιητική διεύρυνση, ώστε να ξεπεραστεί η επιλεκτική διάλειαση συχνότητας και ότι το σύστημα θα έχει ικανοποιητικό κέρδος κωδικοποίησης η CDMA απαιτεί επίσης την ύπαρξη μεγάλου εύρους ζώνης και χωρίς ασυνέχειες (στην τεχνική διευρυμένου φάσματος μόνο). Αναζητούνται τιμές εύρους ζώνης μεγαλύτερες από 5 MHz στα συστήματα κυβελωτής τηλεφωνίας στην πράξη, ώστε η ζεύξη να παρέχει τη βέλτιστη απόδοση,

παρότι οι διεθνείς κανονισμοί έχουν επιβάλλει μικρότερες τιμές εύρους ζώνης (1.25 MHz στο πρότυπο IS-95) σε κάποιες περιπτώσεις.

## 4.7 Chip rate

Πριν εξετάσουμε τις λεπτομέρειες που αφορούν τους κώδικες, είναι χρήσιμο να αναφέρουμε μια ποσότητα που είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό του συστήματος - το chip rate.



Εικόνα 4.9: Σχέση μεταξύ των chips και των bits

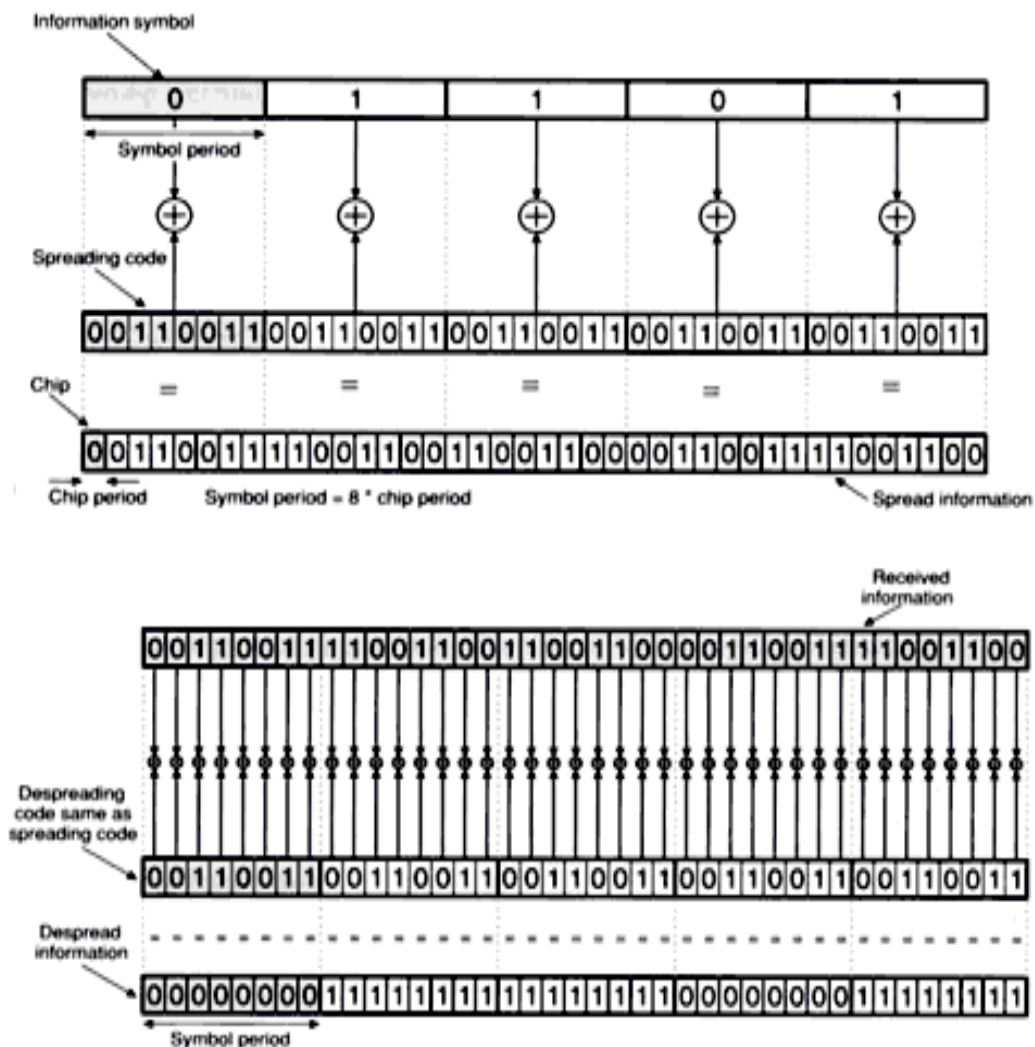
Τα δεδομένα των χρηστών δεν διαβιβάζονται άμεσα σε ένα σύστημα CDMA του τύπου που εξετάζουμε εδώ, όπως θα συνέβαινε σε ένα σύστημα όπως το GSM, αντιθέτως στο σύστημα CDMA τα στοιχεία χρηστών διαβιβάζονται σε κομμάτια, με κάθε κομμάτι που διαβιβάζεται να καλείται chip. Η έννοια ενός chip ως μέρος ενός bit διευκρινίζεται στην εικόνα 4.9 μαζί με μερικές αριθμητικές τιμές. Στο CDMA, ένα chip είναι η θεμελιώδης μονάδα της μετάδοσης.

Θα δούμε παρακάτω ότι το chip rate (ρυθμός μετάδοσης των chips) και το bit rate (ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων) συσχετίζονται μέσω μιας ποσότητας που αναφέρεται συνήθως ως παράγοντας διεύρυνσης (spreading factor -SF).

## 4.8 Κώδικες Διεύρυνσης

### Παράδειγμα ενός χρήστη – δυαδική διαμόρφωση

Οι κώδικες είναι ακολουθίες τσιπ που εφαρμόζονται στα δεδομένα που πρόκειται να διαβιβαστούν. Οι κώδικες αυτοί είναι ενός καθορισμένου μήκους που μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων. Ας εξετάσουμε το παράδειγμα που παρουσιάζεται στην εικόνα 4.10. Η εικόνα επεξηγεί τι συμβαίνει μέσα στη συσκευή αποστολής σημάτων του απλοϊκού παραδείγματός μας. Υποθέτουμε ότι η συσκευή αποστολής σημάτων έχει λάβει μια ακολουθία δεδομένων εισόδου από κάπου.



Εικόνα 4.10: Εφαρμογή κωδικού διεύρυνσης κατά την εκπομπή και την λήψη των δεδομένων

Στη συνέχεια τα δεδομένα εισέρχονται μαζί με τον κωδικό διεύρυνσης σε μια πύλη XOR (αποκλειστικού OR). Σε αυτό το παράδειγμα ο κωδικός διεύρυνσης έχει μήκος 8 chips. Θα δούμε στην πορεία πως παράγουμε αυτούς τους κωδικούς των οποίων το μήκος δεν περιορίζεται κατ' ανάγκη σε 8 chips.

Ο κώδικας διεύρυνσης περιλαμβάνει μια ακολουθία από 1 και 0. Η διάρκεια αυτών είναι γνωστή και ως περίοδος του chip, και ο αριθμός των chips ανά δευτερόλεπτο είναι το chip rate. Η έξοδος αυτής της διαδικασίας παράγει πάλι μια ακολουθία από chips η οποία είναι μια συγχώνευση των δεδομένων και του κωδικού διεύρυνσης. Ας ονομάσουμε αυτήν την έξοδο διευρυμένα δεδομένα. Γενικά, ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδονται, η ακολουθία των διευρυμένων δεδομένων είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από τον ρυθμό των δεδομένων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος να είναι μεγαλύτερο από αυτό των δεδομένων.

Τα παραπάνω βέβαια προϋποθέτουν ότι ο πομπός πρέπει να είναι αυστηρά συγχρονισμένος με τον δέκτη. Η ληφθείσα ακολουθία προστίθεται χρησιμοποιώντας μία πύλη XOR (ακριβώς όπως και στον πομπό) chip με chip με τον κωδικό διεύρυνσης που χρησιμοποιήθηκε και στον πομπό. Στην έξοδο τελικά λαμβάνουμε τα αρχικά δεδομένα. Αυτό σημαίνει ότι ο δέκτης έχει πετύχει να επανακτήσει τα αρχικά δεδομένα.

#### **4.9 Διαμόρφωση διεύρυνσης**

Μέχρι στιγμής έχουμε αναφερθεί στην χρήση των κωδικών διεύρυνσης και στις λειτουργίες του πομπού με τη βοήθεια δυαδικών πράξεων. Στο επόμενο στάδιο χρειάζεται να αναφερθούμε σε ένα πιο ρεαλιστικό πομπό CDMA και στη συνέχεια πρέπει να απεικονίσουμε τα δυαδικά δεδομένα με μία διαφορετική μορφή η οποία ονομάζεται πολική μορφή. Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε δύο πλεονεκτήματα αυτής της μορφής:

1. Μεταπηδάμε σε μία κατάσταση την οποία μπορούμε να εφαρμόσουμε σε έναν ρεαλιστικό πομπό.

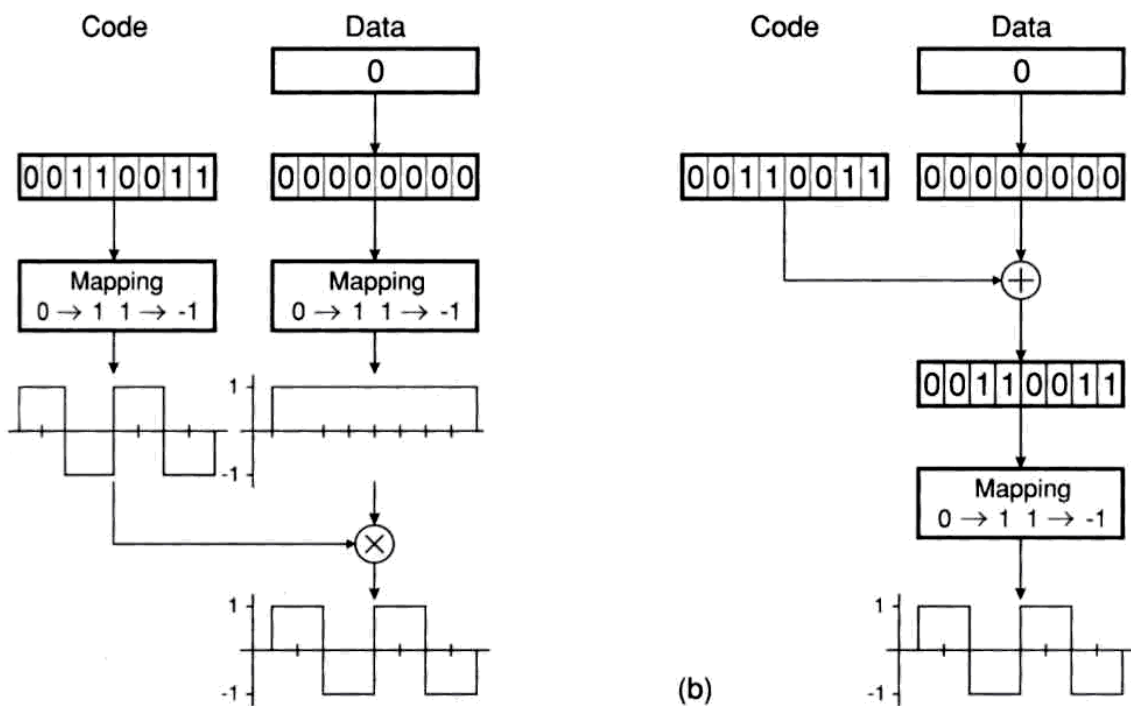


2. Αυτή η εναλλακτική μορφή θα μας επιτρέψει να επεκτείνουμε την εργασία μας ώστε να υπάρχει δυνατότητα πολλαπλών χρηστών, όπως θα δούμε αργότερα.

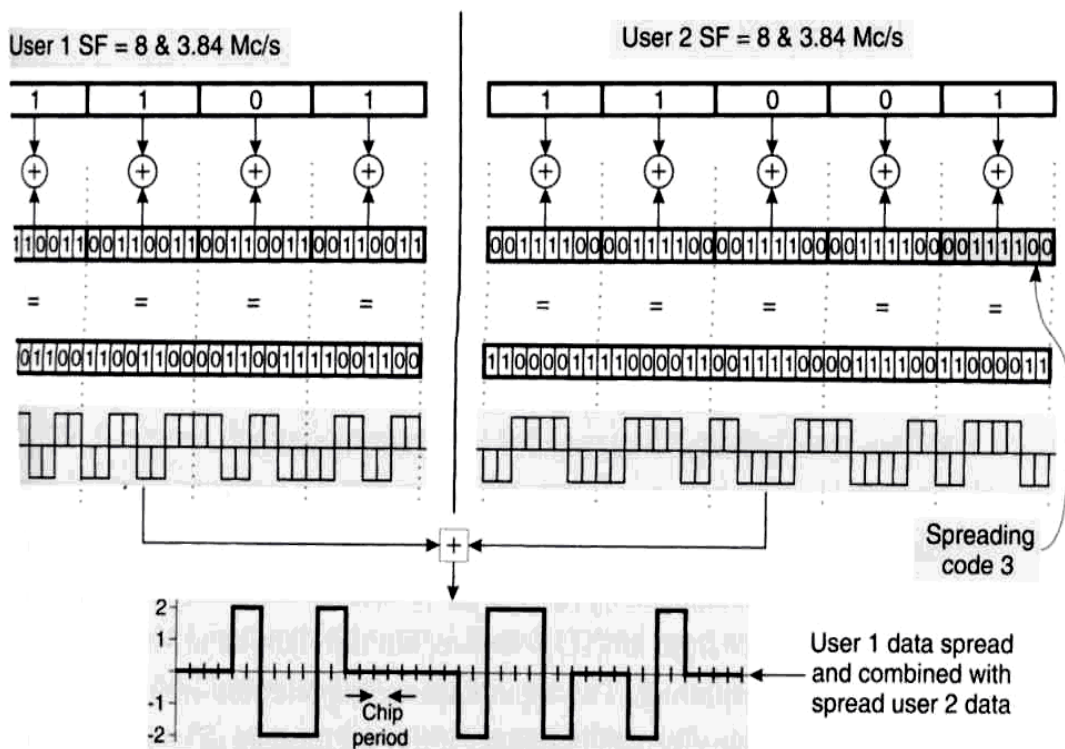
Σύμφωνα με την απεικόνιση της πολικής μορφής το δυαδικό 0 μετατρέπεται σε πολικό +1 και το δυαδικό 1 μετατρέπεται σε πολικό -1. Η απεικόνιση αυτή, μπορεί εξ αρχής να εφαρμοστεί στον κωδικό διεύρυνσης όπως μπορούμε να δούμε στην Εικόνα 4.11(α), Εναλλακτικά, η απεικόνιση μπορεί να εφαρμοστεί μετά τον κωδικό διεύρυνσης όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11(b). Σε αυτό το παράδειγμα έχουμε θεωρήσει έναν κωδικό μήκους 8 chips, αλλά οι ίδιες αρχές διέπουν και οποιονδήποτε άλλον κωδικό οποιουδήποτε μήκους.

#### **4.10 Διεύρυνση πολλαπλών χρηστών**

Μια από τις βασικές αρχές διεύρυνσης φαίνεται στην Εικόνα 4.12. Σύμφωνα με την αρχή αυτή τα μεταφερόμενα δεδομένα χρησιμοποιούν μια μοναδική σύνθετη διευρυμένη κυματομορφή όταν έχουμε πολλαπλούς χρήστες. Στο σχήμα αυτό κάθε ένας χρήστης παίρνει ένα συγκεκριμένο κωδικό διεύρυνσης. Θα δούμε αργότερα με ποιόν τρόπο παράγονται αυτοί οι κωδικοί και ποιες προϋποθέσεις πρέπει να πληρούν. Όπως είδαμε προηγουμένως, τα δεδομένα του χρήστη 1 διευρύνονται και απεικονίζονται με τον τρόπο που αναφέραμε προηγουμένως. Το ίδιο γίνεται και για τον χρήστη 2, με την διαφορά ότι ο δεύτερος χρήστης χρησιμοποιεί άλλον κωδικό διεύρυνσης. Στο σημείο αυτό, είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι οι κωδικοί διεύρυνσης είναι σύγχρονοι, αυτό είναι μία σημαντική προϋπόθεση. Το παραγόμενο σύνθετο σήμα δεν είναι πλέον δυαδικό ή πολικό αλλά αρχίζει να παρουσιάζει μία διακύμανση στο πλάτος του. Το πιο σημαντικό σημείο σχετικά με αυτό το αποτέλεσμα, είναι ο συνδυασμός των δύο εκπεμπόμενων ακολουθιών σε μία ακολουθία. Έτσι οι δύο χρήστες χρησιμοποιούν πλέον ένα κοινό κανάλι προκειμένου να επανακτήσουν τα αρχικά τους δεδομένα.



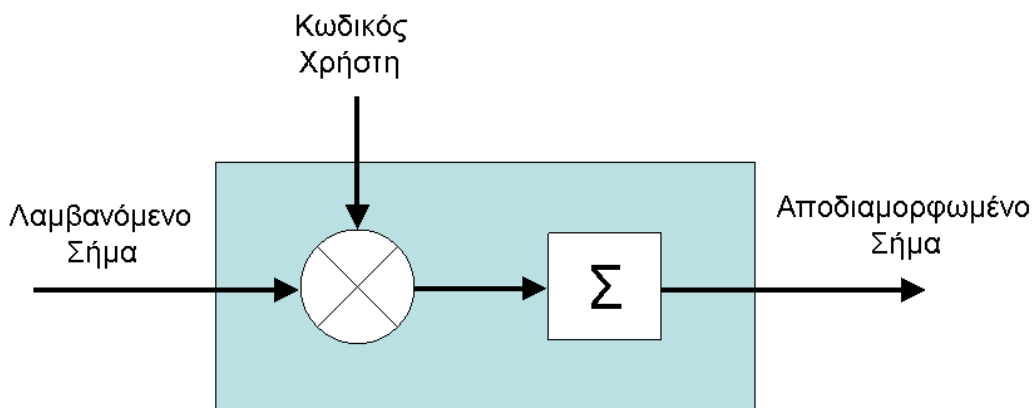
Εικόνα 4.11: Πολική απεικόνιση και εφαρμογή του κωδικού στα δεδομένα



Εικόνα 4.12: Διεύρυνση πολλαπλών χρηστών

<i>Output</i>			<i>Output</i>		
<i>Code</i>	<i>Data</i>	<i>XOR</i>	<i>Code</i>	<i>Data</i>	<i>multiplier</i>
<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>+1</i>	<i>+1</i>	<i>+1</i>
<i>0</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>+1</i>	<i>-1</i>	<i>-1</i>
<i>1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>-1</i>	<i>+1</i>	<i>-1</i>
<i>1</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>-1</i>	<i>-1</i>	<i>+1</i>

Πίνακας 4.1: Πίνακας αληθείας της διαδικασίας διαμόρφωσης



Εικόνα 4.14: Σχηματικό διάγραμμα αποδιαμόρφωσης

## 4.11 Απο-διαμόρφωση πολλών χρηστών

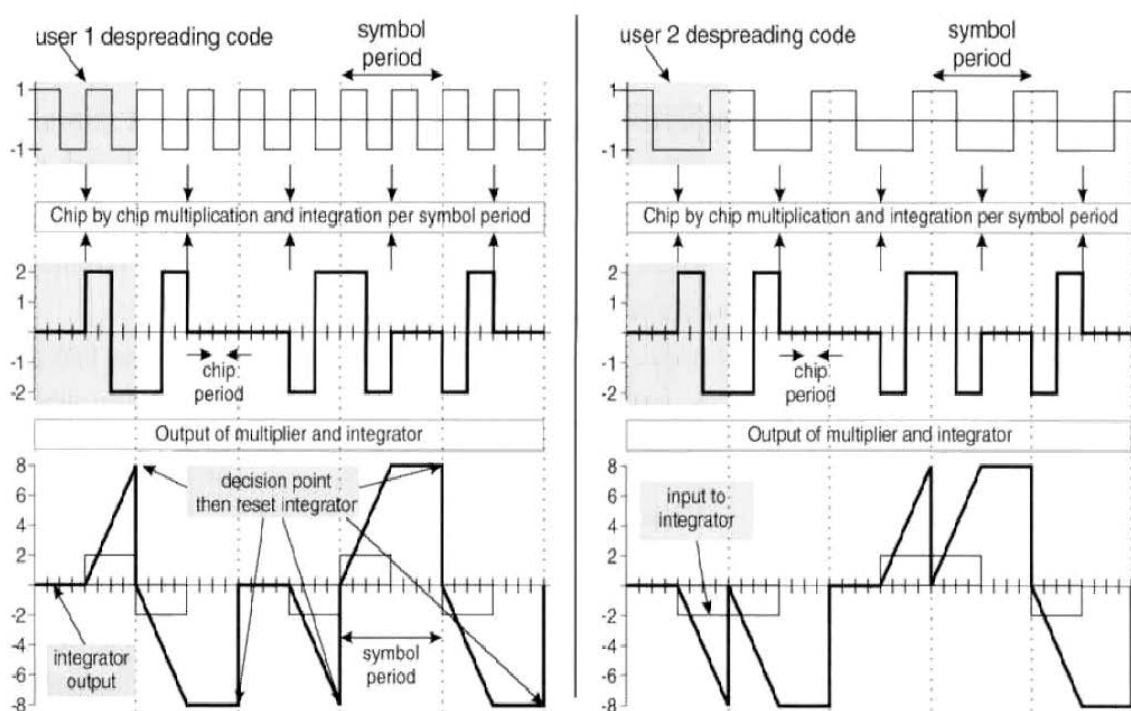
### Δέκτης από-διεύρυνσης

Στην εικόνα 4.14 φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα για τον δέκτη, ο οποίος μπορεί να επανακτήσει τα δεδομένα που στέλνει ο πομπός. Προηγουμένως, χρησιμοποιήσαμε

μία πύλη X-OR προκειμένου να επανακτήσουμε τα δεδομένα. Με την αλλαγή που εφαρμόσαμε στην διαμόρφωση, χρειάζεται να αλλάξουμε και την αποδιαμόρφωση. Για το λόγο αυτό, αντικαταστήσαμε την πύλη X-OR με έναν πολλαπλασιαστή και προσθέσαμε στην έξοδο και έναν αθροιστή ή ολοκληρωτή.

Στον πίνακα 4.1 φαίνεται ο πίνακας αληθείας για την συνάρτηση διαμόρφωσης η οποία προκύπτει όταν εφαρμόζουμε τον κωδικό στην ακολουθία των δεδομένων. Στην αριστερή στήλη του πίνακα βλέπουμε τα αποτελέσματα σε δυαδική μορφή, που είναι ο πίνακας αληθείας της εξόδου της πύλης X-OR. Στην δεξιά πλευρά του πίνακα, βλέπουμε τα αποτελέσματα σε πολική μορφή. Η έξοδος του πολλαπλασιαστή είναι ο πολλαπλασιασμός των δύο εισόδων και στην πρώτη περίπτωση είναι ίσος με +1. Αν ακολουθήσουμε αυτή τη διαδικασία για όλα τα στοιχεία του πίνακα καταλήγουμε στα αποτελέσματα που φαίνονται στην τελευταία στήλη του πίνακα.

Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα που εξάγονται από τον πολλαπλασιαστή χρησιμοποιώντας πολική είσοδο με τα αποτελέσματα της πύλης X-OR με δυαδική είσοδο θα παρατηρήσουμε ότι είναι η ίδια λαμβάνοντας υπόψη την πολική απεικόνιση. Επομένως ένας πολλαπλασιαστής που χρησιμοποιεί πολικά σήματα είναι ισοδύναμος με μία πύλη X-OR η οποία χρησιμοποιεί δυαδικά σήματα.



Εικόνα 4.15: Βασικές διαδικασίες αποδιαμόρφωσης

Σκοπός του δέκτη είναι να λάβει την εκπεμπόμενη ενέργεια με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Σε αυτό το μοντέλο που μελετάμε, δεν λαμβάνουμε υπόψη μας τυχόν επιπτώσεις της φάσης του λαμβανομένου σήματος. Έτσι το μόνο που πρέπει να κάνουμε είναι η πρόσθεση της ενέργειας του λαμβανομένου σήματος. Για να γίνει αυτό, χρησιμοποιούμε έναν ολοκληρωτή, αλλά και οποιαδήποτε συσκευή που αθροίζει την ενέργεια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί.

Οι βασικές διαδικασίες για την αποδιαμόρφωση του σήματος οι οποίες εφαρμόζονται για τα δύο διαμορφωμένα σήματα που λαμβάνονται για τον χρήστη 1 και τον χρήστη 2 φαίνεται στην Εικόνα 4.15. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις το σύνθετο σήμα που λαμβάνεται πολλαπλασιάζεται με τον ίδιο ακριβώς κωδικό που είχε χρησιμοποιηθεί για την κωδικοποίηση των δεδομένων του κάθε χρήστη ξεχωριστά. Η έξοδος του πολλαπλασιασμού φαίνεται στο κάτω μέρος του γραφήματος μαζί με την έξοδο του ολοκληρωτή. Ο ολοκληρωτής λειτουργεί ως εξής: ολοκληρώνει το σήμα που λαμβάνει κατά την διάρκεια της περιόδου του συμβόλου και μετά μηδενίζεται. το από-διαμορφωμένο σήμα ανιχνεύεται την ακριβώς προηγούμενη χρονική στιγμή από τον μηδενισμό του ολοκληρωτή. Και για τους δύο χρήστες η έξοδος είναι +8 ή -8. Αυτό οφείλεται στον παράγοντα διεύρυνσης που στην προκειμένη περίπτωση είναι 8 και κάθε chip έχει πλάτος +1 ή -1.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι και για τους δύο χρήστες τα από-διαμορφωμένα δεδομένα ανταποκρίνονται στα εκπεμπόμενα δεδομένα λαμβάνοντας υπόψη την πολική απεικόνιση. Η σημαντικότητα των αποτελεσμάτων που φαίνεται στο σχήμα αυτό έγκειται στο γεγονός οι δύο χρήστες λαμβάνουν τα σήματα τους ξεχωριστά παρόλο που τα σήματα τους είχαν συνδυαστεί σε ένα. Δηλαδή δεν υπάρχει καμιά παρεμβολή μεταξύ των χρηστών.

## 4.12 Ορθογωνικότητα

Για να πετύχουμε τα αποτελέσματα που είδαμε ανωτέρω, συγκεκριμένες ιδιότητες χρησιμοποιήθηκαν. Η ιδιότητες αυτές έχουν να κάνουν με την ορθογωνικότητα των κωδικών. Όταν δύο κωδικοί είναι ορθογώνιοι, είναι και ανεξάρτητοι μεταξύ τους. Το απλούστερο παράδειγμα ενός ορθογωνικού συστήματος είναι ο τρισδιάστατος χώρος, στον οποίο κάθε διάσταση είναι απολύτως ανεξάρτητη από τις άλλες δύο. Αυτό

σημαίνει ότι μια αλλαγή σε μια διάσταση δεν γίνεται αντιληπτή από τις άλλες διαστάσεις.

Για το σύστημα CDMA η ορθογωνικότητα εκφράζεται ως εξής: Θεωρούμε δύο πολικούς κωδικούς  $C_i$  και  $C_j$  μήκους  $N$  chips οι οποίοι ορίζονται από τις σχέσεις:

$$C_i = (C_{i0}, C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}, \dots, C_{i(N-1)}), \quad (4.8)$$

$$C_j = (C_{j0}, C_{j1}, C_{j2}, C_{j3}, \dots, C_{j(N-1)}), \quad (4.9)$$

όπου

$$C_{in}, \quad 0 < n \leq N-1 \quad \text{και} \quad C_{in} \in \{+1, -1\}, \quad (4.10)$$

ενώ,

$$\sum_{n=0}^{n=N-1} C_{in} C_{jn} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ N, & i = j \end{cases} \quad (4.11)$$

Η ορθογωνικότητα των κωδικών εκφράζεται από την σχέση 4.11. Αν πολλαπλασιάσουμε τους δύο κωδικούς  $C_i$  και  $C_j$  ανά chip και στην συνέχεια αν τους αθροίσουμε κατά μήκος των  $N$  chips, το αποτέλεσμα θα είναι μηδέν. Αυτή η ιδιότητα των κωδικών ονομάζεται ορθογωνιότητα. Η φυσική σημασία αυτού του αποτελέσματος είναι ο εντοπισμός του ενός απορρίπτοντας την πληροφορία του δεύτερου.

Το άλλο ενδιαφέρον σημείο που θα πρέπει να επισημάνουμε είναι το μέγεθος των σημάτων εξόδου. Το μέγεθος αυτό στην έξοδο είναι  $N$  φορές το πλάτος του κάθε chip δεδομένων. Όπου  $N$  είναι ο παράγοντας διεύρυνσης ή το μήκος των κωδικών και συνεπώς αν αυξήσουμε το μήκος των κωδικών αυξάνουμε επίσης και το πλάτος της έξοδο του από-διαμορφωμένου σήματος.

### 4.13 Δέντρο ορθογώνιων μεταβλητών του παράγοντα διεύρυνσης (Orthogonal Variable Spreading Factor (OVSF) tree)

#### Παραγωγή ορθογωνικών κωδικών

Έχοντας εξηγήσει την χρήση των ορθογωνικών κωδικών διεύρυνσης μπορούμε να μελετήσουμε τώρα την προέλευση αυτών των κωδικών.

Υπάρχουν πολύ διαφορετικοί τύποι ορθογωνίων κωδικών (οι Walsh και οι Hadamard είναι οι δύο πιο σημαντικοί). αλλά αυτός που έχει επικρατήσει για την μέθοδο CDMA είναι ο OVSF .



Εικόνα 4.16: Οικογένεια κωδικών διεύρυνσης με παράγοντα διεύρυνσης από 1 έως 16

Αν συγκρίνουμε του κωδικούς OVSF με τους Walsh και τους Hadamard διαπιστώνουμε ότι και τρεις περιλαμβάνουν τις ίδιες ακολουθίες κωδικών. Οι διαφορές τους έχουν να κάνουν με τον τρόπο που τους κατατάσσουμε.

Η εικόνα 4.16 παρουσιάζει μια οικογένεια κωδικών διεύρυνσης η οποία ξεκινά από παράγοντα διεύρυνσης 1 και καταλήγει σε παράγοντα διεύρυνσης 16. Αυτή η οικογένεια κωδικών αναφέρεται ως δέντρο. Ο σχηματισμός του δέντρου κωδικών OVSF μπορεί να οριστεί σύμφωνα με τον παρακάτω απλό επαναληπτικό αλγόριθμο. Χρησιμοποιώντας την εικόνα 4.16 ξεκινάμε από κάτω προς τα πάνω στο δέντρο με μία τιμή δυαδικού μηδέν. Αυτό αντιστοιχεί σε έναν κωδικό με παράγοντα διεύρυνσης

1. Για να παράγουμε τον κωδικό μήκους δύο chip δημιουργούμε δύο νέα κλαδιά στο δέντρο. Ο αλγόριθμος που καθορίζει τους κωδικούς για αυτά τα νέα κλαδιά συνοψίζεται παρακάτω:

1. μετακινούμενοι στο πάνω κλαδί, η ακολουθία του πατέρα κόμβου επαναλαμβάνεται
2. μετακινούμενοι στο κάτω κλαδί, η ακολουθία του πατέρα κόμβου επαναλαμβάνεται αλλά με ανεστραμμένο το δεύτερο μισό.

Ο αλγόριθμος αυτός, αν εφαρμοστεί επαναληπτικά, έχει σαν αποτέλεσμα ξεκινώντας από την αρχή να πάρουμε δύο κωδικούς μήκους 2, στη συνέχεια 4 κωδικούς μήκους 4, 8 κωδικούς μήκους 8 κωκ.

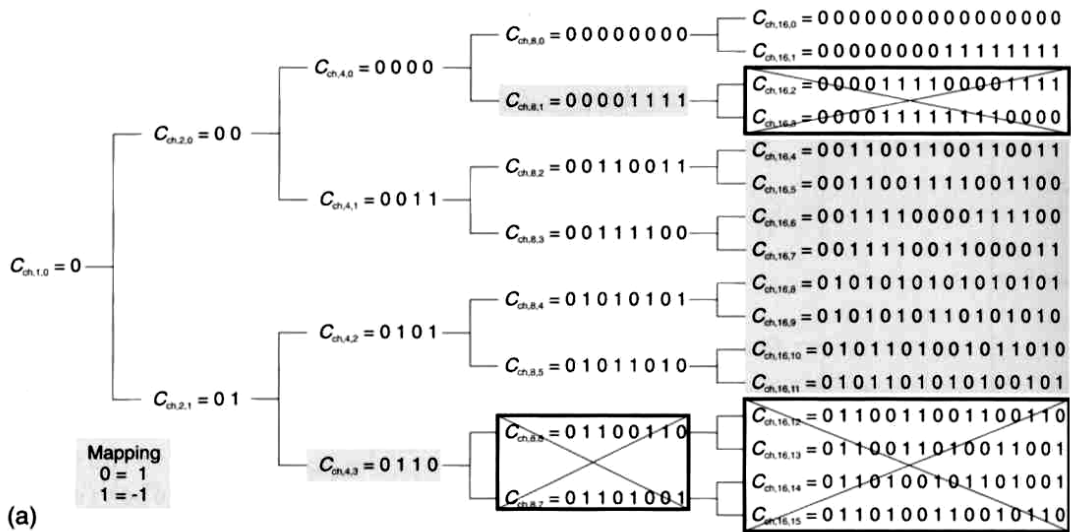
#### 4.14 Ιδιότητες των OVSF κωδικών

Εκτός από την ορθογωνιότητα, την οποία ορίσαμε ανωτέρω, οι OVSF κώδικες έχουν μία σειρά από ενδιαφέρουσες ιδιότητες. Ένας από τους λόγους που έχουμε ορίσει τους OVSF κώδικες είναι το γεγονός ότι μπορούν να υποστηρίξουν κανάλια μεταβλητού ρυθμού δεδομένων ταυτόχρονα.. Οι επιτρεπόμενοι κωδικοί που μπορούν να δοθούν στους χρήστες υπακούουν στον ακόλουθο κανόνα:

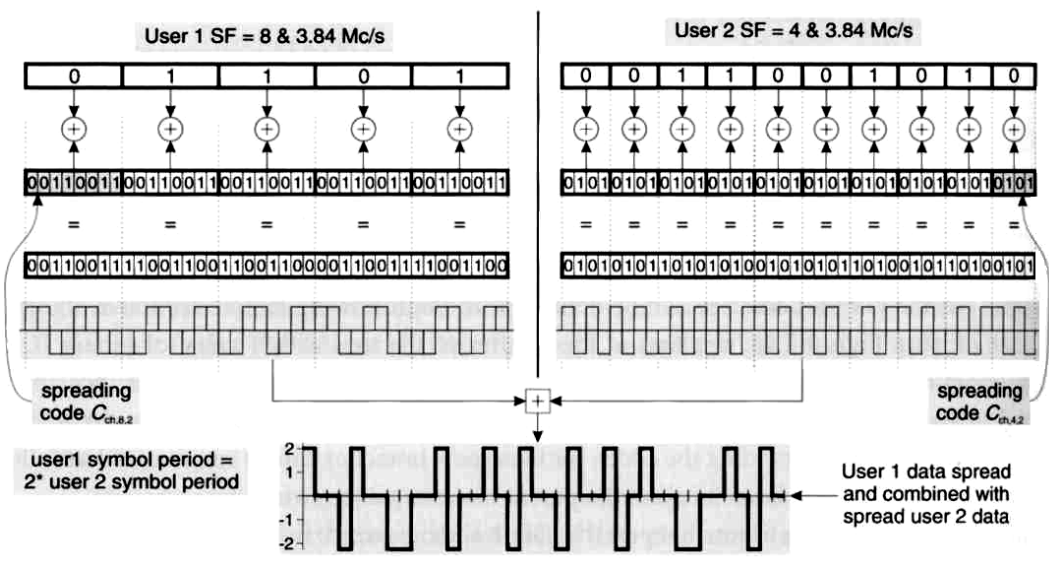
Ένας κωδικός δεν μπορεί να δοθεί ταυτόχρονα με έναν «πατέρα» κωδικό ή με έναν «παππού» κωδικό στο ίδιο κλαδί του δέντρου.

Στην εικόνα 4.17(α) φαίνονται όλοι οι κωδικοί οι οποίοι μπορούν να συνυπάρξουν την ίδια χρονική στιγμή εφόσον αυτοί δεν προέρχονται από το ίδιο κλαδί του δέντρου. Το διάγραμμα OVSF παρουσιάζει ποιοι από τους κωδικούς δεν μπορούν να συνυπάρξουν και ποιοι κωδικοί θα οδηγούσαν σε «ρήξη». Για παράδειγμα εξετάζοντας τις κυματομορφές διεύρυνσης που προκύπτουν χρησιμοποιώντας τον  $C_{Ch,4,3}$  είναι φανερός ο λόγος για τον οποίο η  $C_{Ch,8,6}$  και  $C_{Ch,8,7}$  δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν γιατί αυτό θα είχε σαν αποτέλεσμα να είναι σε χρήση οι ίδιες κωδικές λέξεις. Αντίστοιχα σχόλια μπορούμε να κάνουμε και για τους κωδικούς με παράγοντα διεύρυνσης 16 προερχόμενους από το ίδιο κλαδί.





(a)



(b)

Εικόνα 4.17:

Στην εικόνα 4.17(β) παρουσιάζεται ένας τρόπος με τον οποίο μπορούμε να υλοποιήσουμε τους μεταβλητούς ρυθμούς δεδομένων κάνοντας χρήση των κωδικών OVSF. Σε αυτό το σχήμα, ο χρήστης 1 χρησιμοποιεί έναν παράγοντα διεύρυνσης 8, ενώ ο χρήστης έναν παράγοντα διεύρυνσης 4, με τον ίδιο ρυθμό chip αλλά με διπλάσιο ρυθμό δεδομένων. Οι διαφορετικοί κωδικοί που επιλέγουμε, προέρχονται από διαφορετικά κλαδιά του δέντρου και έτσι δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα «ρήξης» εφόσον διατηρούν την ορθογωνικότητά τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Προσομοίωση πομπού και δέκτη πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα (CDMA)

### 5.1 Περιβάλλον προσομοίωσης

Για την προσομοίωση της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα κάναμε χρήση του πακέτου Simulink του προγράμματος MATLAB. Το Simulink είναι ένα πακέτο λογισμικού που ειδικεύεται στην παραμετροποίηση, προσομοίωση και ανάλυση διαφόρων δυναμικών συστημάτων. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα, αναλυόμενα σε συνεχή χρόνο, σε διακριτούς χρόνους (sample time) ή ταυτόχρονα και στις δύο προαναφερθείσες παραμέτρους. Για την ανάλυση και το σχεδιασμό ενός συστήματος, το Simulink παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον αλληλεπίδρασης με το χρήστη (graphical user interface - GUI) που παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής μοντέλων ως σχηματικά διαγράμματα, χρησιμοποιώντας λειτουργίες “επιλογής και απόθεσης” (click-and drag).

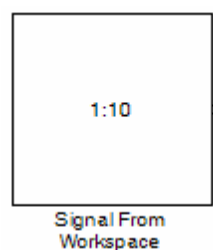
Η δυνατότητες του πακέτου αυτού θεωρούνται πολύ ανώτερες από άλλες εκδόσεις προγραμμάτων προσομοίωσης που απαιτούν την χρησιμοποίηση διαφορικών εξισώσεων και διαφόρων άλλων εξισώσεων μαθηματικής μοντελοποίησης μέσω γλώσσας προγραμματισμού. Το Simulink περιλαμβάνει μια βιβλιοθήκη διακριτών εξαρτημάτων, πηγές, γραμμικά και μη γραμμικά εξαρτήματα, καθώς και βαθμίδες διασύνδεσης. Δίνεται επίσης στο χρήστη και η δυνατότητα δημιουργίας καινούργιων μοντέλων. Τα μοντέλα παρέχονται ιεραρχικά μέσα από διάφορες βιβλιοθήκες ανάλογα με το αντικείμενο λειτουργίας τους. Αυτό διευκολύνει την διαδικασία κατανόησης του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί το κάθε μοντέλο και οι βαθμίδες που το αποτελούν. Αφού επιλεγεί το επιθυμητό μοντέλο, μπορεί να προσομοιωθεί επιλέγοντας μία από τις προϋπάρχουσες μεθόδους ενσωμάτωσής του στο δημιουργημένο φύλλο εργασίας, είτε από τα μενού του Simulink εισάγοντας εντολές στο παράθυρο εντολών του MATLAB.

Τα μενού του MATLAB χαρακτηρίζονται για την ευκολία χρησιμοποίησής τους, καθώς και η λειτουργία της γραμμής εντολών είναι πολύ χρήσιμη για την εκτέλεση ενός πλήθους προσομοιώσεων. Με τη χρησιμοποίηση μετρητικών οργάνων, όπως

παλμογράφοι και άλλες συσκευές απεικόνισης, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να βλέπει τα αποτελέσματα της προσομοίωσής του κατά τη διάρκεια εκτέλεσής της. Παράλληλα, δίνεται η επιλογή αλλαγής των παραμέτρων και η δυνατότητα της άμεσης προβολής των αποτελεσμάτων που επιφέρουν.

Για την υλοποίηση του πομπού και του δέκτη χρησιμοποιήσαμε τυπικές βαθμίδες του Simulink όπως γεννήτριες δυαδικών bit μίκτες και αθροιστές, ενώ για την οπτικοποίηση των κυματομορφών των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν παλμογράφοι. Στη συνέχεια θα αναλυθούν βασικές βαθμίδες (blocks) που θα χρησιμοποιηθούν, προκειμένου να γίνει γνωστή η λειτουργία τους.

Για την παραγωγή των δεδομένων/μηνυμάτων που θέλουν οι χρήστες να μεταδώσουν αλλά και των κωδικών του κάθε χρήστη χρησιμοποιήσαμε μια βαθμίδα που εισάγει ένα σήμα από το χώρο εργασίας του MATLAB στο μοντέλο του Simulink. Η βαθμίδα αυτή ονομάζεται Signal from workspace (Εικόνα 5.1) και παράγει εύκολα και γρήγορα ακολουθίες από δυαδικά bits δεδομένων.



*Εικόνα 5.1: Σήμα από χώρο εργασίας*

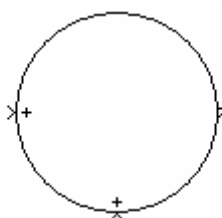
Η παράμετρος Signal καθορίζει το όνομα μίας μεταβλητής του χώρου εργασίας του MATLAB που περιέχει το υπό εισαγωγή σήμα ή κάθε έγκυρη έκφραση του MATLAB η οποία ορίζει έναν πίνακα ή μία διάταξη τρισδιάστατων δεδομένων.

Η περίοδος δειγματοληψίας μπορεί να ρυθμιστεί από την παράμετρο Sample time (TS), επομένως η έξοδος προέρχεται από δειγματοληψία (sample based), διαφορετικά η έξοδος προέρχεται από πλαίσια (frame based). Όταν η βαθμίδα Signal from Workspace έχει εξάγει όλα τα διαθέσιμα δείγματα του σήματος, μπορεί να ξεκινήσει από την αρχή του σήματος την εν λόγω λειτουργία ή να επαναλαμβάνει την τελευταία

του τιμή, ή να παράγει μηδενικά μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. (Η βαθμίδα σταματά να εξάγει το εισαχθέν σήμα μετά το τελευταίο δείγμα). Στην παρούσα εργασία η περίοδος δειγματοληψίας ορίστηκε στο 1 δευτερόλεπτο ώστε να είναι ξεκάθαρα τα bits δεδομένων.

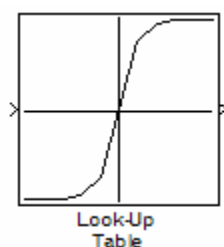
Στις περιπτώσεις που χρειάστηκε να αθροίσουμε δύο σήματα έγινε χρήση της βαθμίδας του αθροιστή (Sum) όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Αυτή η βαθμίδα προσθέτει ή αφαιρεί τις εισόδους της. Για να δηλωθεί το είδος της μαθηματικής πράξης αρκεί να εισαχθούν οι παρακάτω συμβολισμοί (για δύο εισόδους):

- $++$  : Προσθέτει τις δύο εισόδους
- $+-$  : Αφαιρεί τη δεύτερη είσοδο από την πρώτη



Εικόνα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση του Αθροιστή του Simulink

Για την αντιστροφή του σήματος αλλά και για την μετατροπή του δυαδικού σήματος σε διπολική μορφή, χρησιμοποιήθηκε η βαθμίδα του πίνακα αντιστοιχίας. Ο πίνακας αντιστοιχίας (Εικόνα 5.3) υπολογίζει την αντιστοιχία ανάμεσα σε δύο μεγέθη, η οποία βασίζεται στη σχέση της μορφής  $y=f(x)$ .

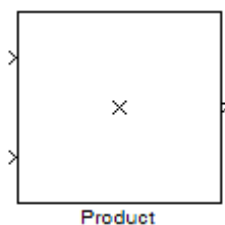


Σχήμα 5.3: Η Βαθμίδα του πίνακα αντιστοιχίας

Ο καθορισμός του πίνακα γίνεται μέσω του προσδιορισμού των τιμών της παραμέτρου εισόδου ως ένα διάνυσμα  $1 \times n$  και των τιμών της παραμέτρου εξόδου ως

ένα διάνυσμα  $n \times 1$ . Συγκεκριμένα για να επιτύχουμε την αντιστροφή μιας ακολουθίας από bits αρκεί να του δηλώσουμε στον πίνακα αντιστοιχίας όταν λαμβάνει είσοδο [0 1] να την μετατρέψει σε έξοδο [1 0]. Δηλαδή, το δυαδικό «1» να το μετατρέψει σε δυαδικό «0» ενώ το δυαδικό «0» σε δυαδικό «1». Κατά αντίστοιχο τρόπο για να μετατρέψουμε ένα δυαδικό σήμα σε διπολική μορφή αρκεί να του δηλώσουμε είσοδο [0 1] σε έξοδο [1 -1]

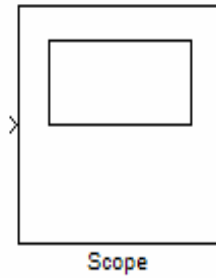
Μια άλλη βαθμίδα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο μίκτης (Εικόνα 5.4) ο οποίος πρακτικά πολλαπλασιάζει τις ακολουθίες από δυαδικά bits. Κοινώς η βαθμίδα εκτελεί πολλαπλασιασμό ή διαίρεση των εισόδων της.



Εικόνα 5.4: Σχηματική αναπαράσταση του Μίκτη

Η βαθμίδα παράγει εξόδους χρησιμοποιώντας τον πολλαπλασιασμό είτε στοιχείου προς στοιχείο (element wise) είτε στοιχείων πίνακα ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου του. Δίνεται η δυνατότητα ορισμού των λειτουργιών (μαθηματικών πράξεων) μέσω του πεδίου Number of Inputs. Ο πολλαπλασιασμός δηλώνεται ως \* ενώ η διαίρεση ως /. Ο αριθμός των χαρακτήρων που υποδηλώνει το είδος των μαθηματικών πράξεων πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των εισόδων της βαθμίδας του μίκτη.

Τέλος ίσως η περισσότερο κοινή βαθμίδα του Simulink είναι ο παλμογράφος (Scope) που φαίνεται στην Εικόνα 5.5. Η βαθμίδα αυτή, η οποία λειτουργεί όπως ένας κανονικός παλμογράφος, απεικονίζει σήματα τα οποία έχουν παραχθεί από άλλες βαθμίδες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.



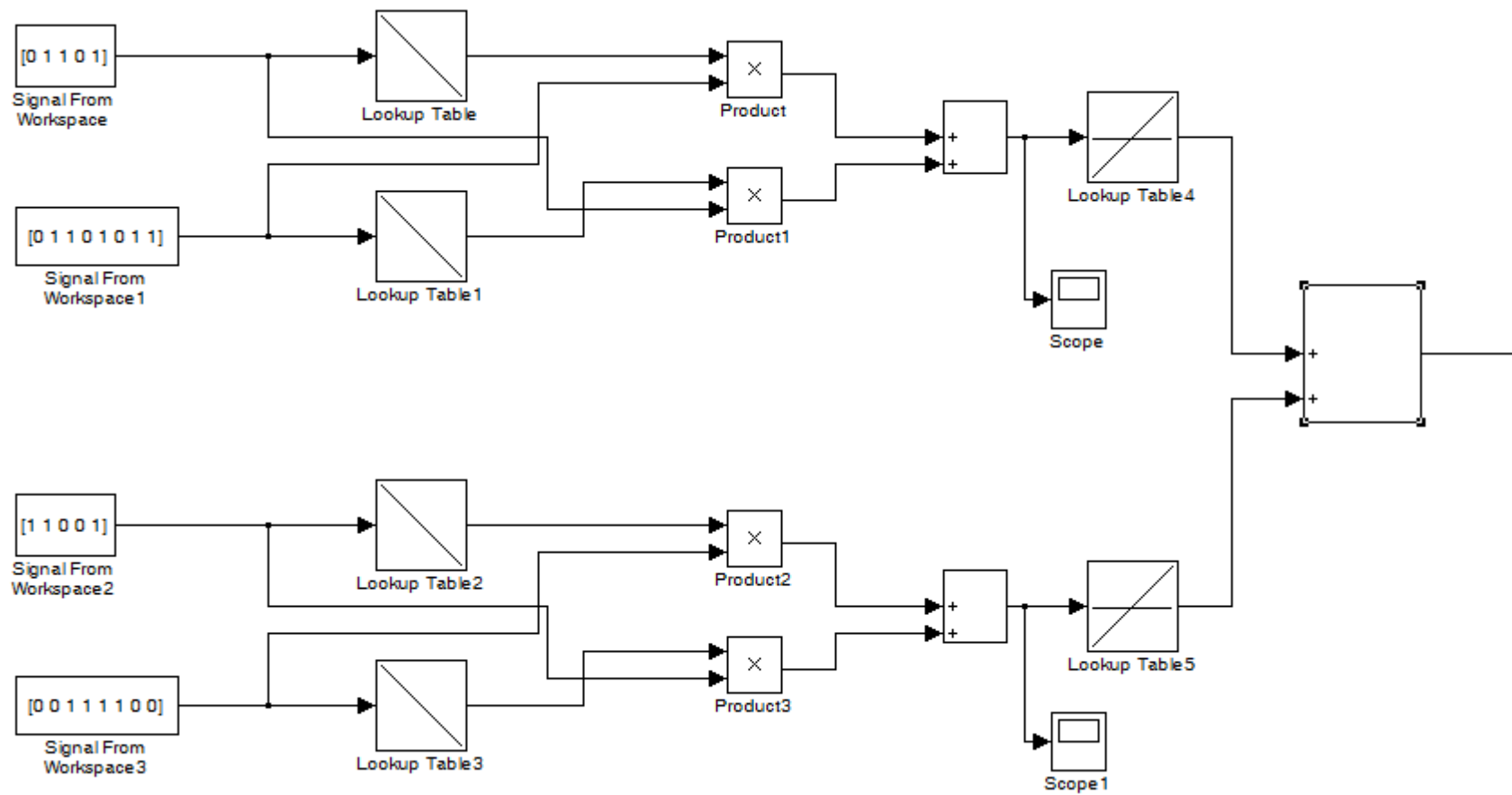
Εικόνα 5.5: Σχηματική αναπαράσταση του παλμογράφου του Simulink

Αυτή η βαθμίδα απεικονίζει το σήμα εισόδου στο πεδίο του χρόνου. Μπορεί να έχει πολλούς άξονες αναφοράς (έναν για κάθε είσοδο). Όλα τα σήματα εισόδου που αναπαρίστανται, έχουν το ίδιο εύρος χρόνου (άξονας  $x$ ) με ανεξάρτητους άξονες  $y$ . Όταν ξεκινά η προσομοίωση, το Simulink δεν ανοίγει το παράθυρο του παλμογράφου, παρόλο που αποθηκεύει τα δεδομένα πληροφορίας των σημάτων σε αυτόν. Επακόλουθα, αν ανοιχθεί ο παλμογράφος μετά το πέρας της προσομοίωσης, το σήμα εισόδου του θα απεικονιστεί στην οθόνη του υπολογιστή. Αν το σήμα είναι συνεχές, ο παλμογράφος παράγει ένα γράφημα από σημείο σε σημείο (point-to-point). Αν το σήμα είναι διακριτό, ο παλμογράφος παράγει ένα γράφημα αποτελούμενο από σκαλοπάτια (stair-step plot).

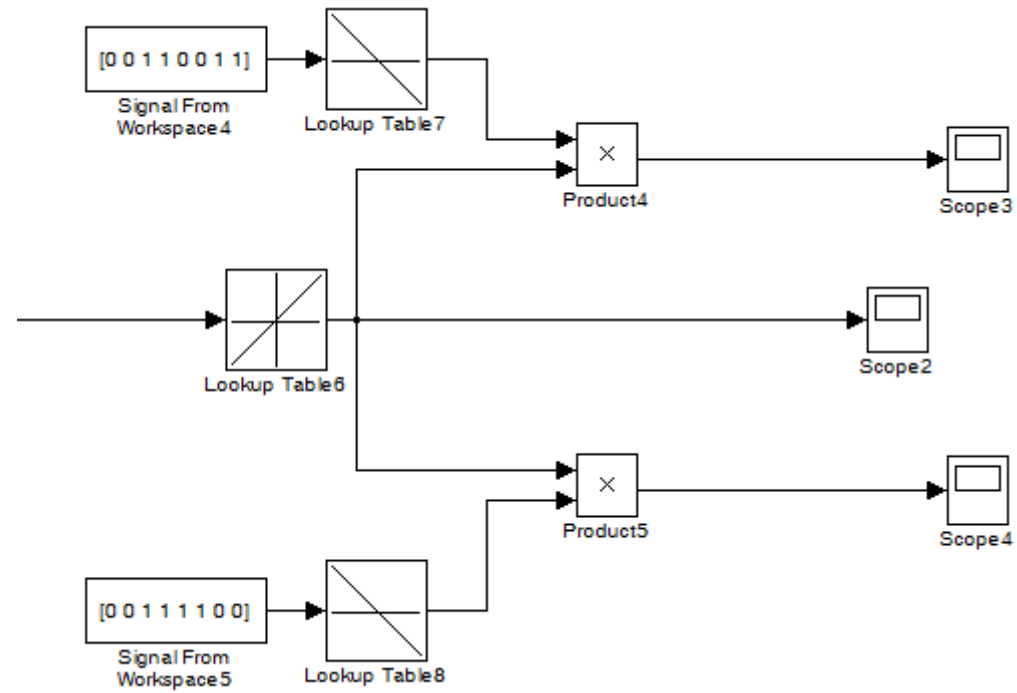
## 5.2. Υλοποίηση του κυκλώματος πομπού/δέκτη

Στην Εικόνα 5.6 φαίνεται το κύκλωμα που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση του πομπού πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση δύο χρήστες με δύο διαφορετικούς 8bit κωδικούς επιχειρούν να μεταδώσουν σε δύο διαφορετικούς αποδέκτες ένα μήνυμα 5 δεκαδικών ψηφίων. Η αποδέκτες έχουν εξαρχής τους κωδικούς των χρηστών των οποίων θέλουν να λάβουν το μήνυμα. Ανάμεσα στο μήνυμα του κάθε χρήστη και του κωδικού πραγματοποιείται η πράξη XOR. Αυτό επιτυγχάνεται με τις βαθμίδες Lookup table που αντιστρέφουν της δύο ακολουθίες και του μίκτη για να πολλαπλασιαστούν. Η διάταξη που φαίνεται στην εικόνα για να υλοποιηθεί η πράξη XOR βασίζεται στην παράσταση που προκύπτει από την Άλγεβρα Boole όπως φαίνεται στην εξίσωση 5.1:

$$c = a \oplus b = a \cdot \bar{b} + \bar{a} \cdot b \quad (5.1)$$



Εικόνα 5.6: Ο πομπός που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα



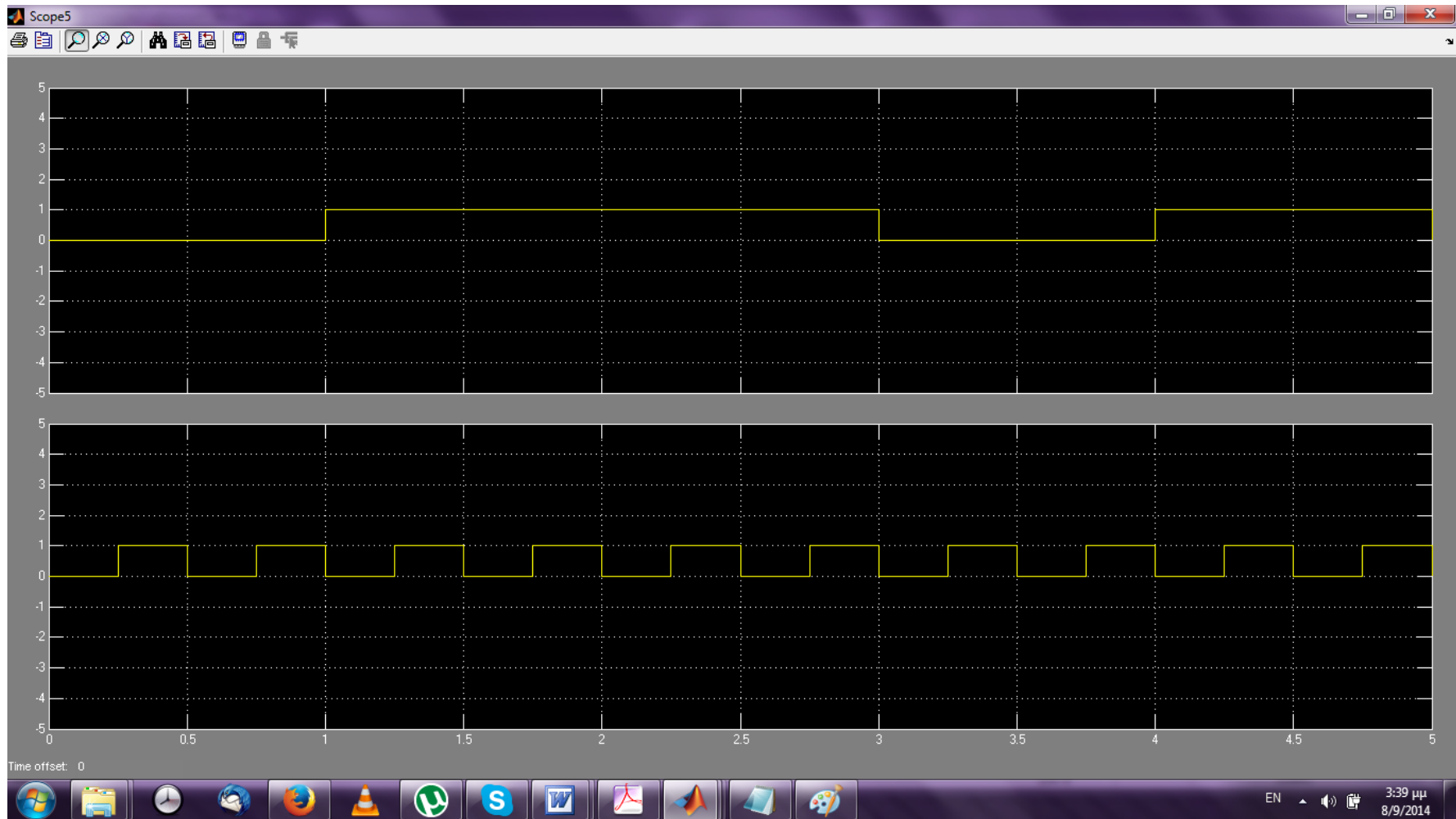
Εικόνα 5.7: Ο δέκτης που υλοποιήθηκε για την προσομοίωση της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα.



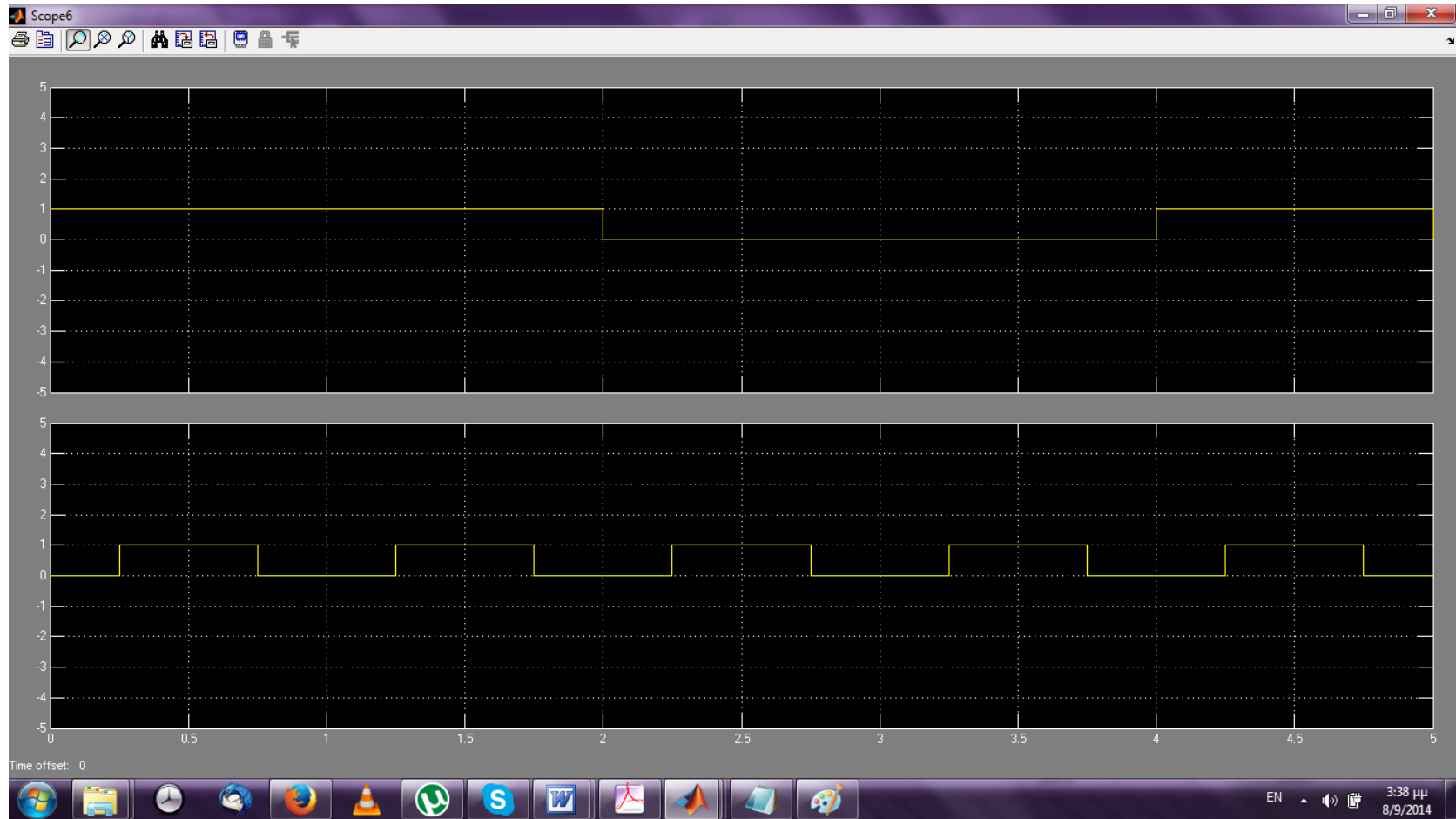
Αφού υλοποιηθούν οι πράξεις XOR μεταξύ των μηνυμάτων και των κωδικών τα δύο παραγόμενα διαμορφωμένα σήματα αθροίζονται και μετατρέπονται σε διπολική μορφή. Στην συνέχεια διοχετεύονται στο κανάλι προς μετάδοση. Οι δύο αποδέκτες όπως φαίνονται στην Εικόνα 5.7 αφού μετατρέψουν τους κωδικούς των χρηστών σε πολική μορφή το πολλαπλασιάζουν με το αθροισμένο σήμα που μεταδόθηκε και τελικά αυτό που λαμβάνουμε είναι το αρχικό μήνυμα που μετέδωσαν οι χρήστες. Στην περίπτωση του δέκτη πραγματοποιήθηκε απλός πολλαπλασιασμός και όχι πράξη XOR διότι και τα δύο σήματα ήταν πλέον σε διπολική μορφή και ακολουθήθηκε ο πίνακας αληθείας 4.1.

### **5.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης**

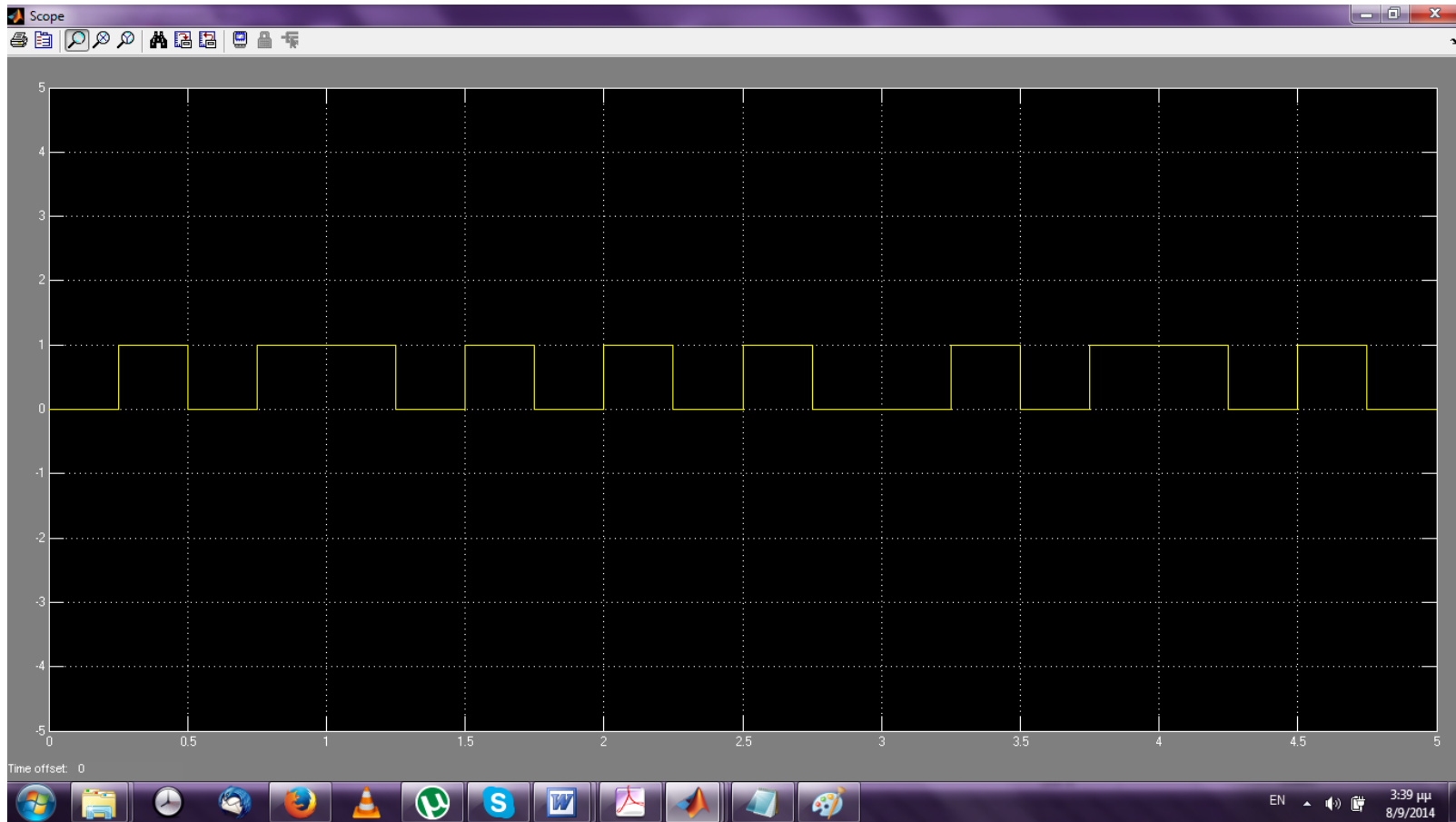
Παρακάτω παρουσιάζονται όλες οι κυματομορφές που παρήχθησαν κατά την υλοποίηση. Στην εικόνα 5.8 φαίνεται το μήνυμα που μετέδωσε ο πρώτος χρήστης αλλά και ο κωδικός του, ενώ στο στην εικόνα 5.9 αντίστοιχα το μήνυμα που μετέδωσε και ο κωδικός του δεύτερου χρήστη. Στις εικόνες 5.10 και 5.11 απεικονίζονται τα σήματα που προέκυψαν μετά την πράξη XOR μεταξύ του μηνύματος και του κωδικού και του πρώτου και του δεύτερου χρήστη αντίστοιχα. Στην εικόνα 5.12 παρουσιάζεται το σήμα που τελικά μεταδίδεται από το μέσο. Το σήμα αυτό είναι το άθροισμα των δύο διαμορφωμένων σημάτων. Τέλος στις εικόνες 5.13 και 5.14 φαίνονται τα δύο αποδιαμορφωμένα σήματα τα οποία προέκυψαν από τον πολλαπλασιασμό του μεταδιδόμενου σήματος και του κάθε ενός κωδικού. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι τα τελικά σήματα έπρεπε με κάποιο τρόπο να ολοκληρωθούν ανά δευτερόλεπτο ώστε να προκύψει ακριβώς το μήνυμα των χρηστών. Ωστόσο το Simulink δεν έδινε αυτήν την δυνατότητα με κάποια βαθμίδα ολοκληρωτή. Είναι όμως φανερό ότι το μήνυμα που λαμβάνει ο πρώτος αποδέκτης είναι το 0 1 1 0 1 ενώ ο δεύτερος το 1 1 0 0 1.



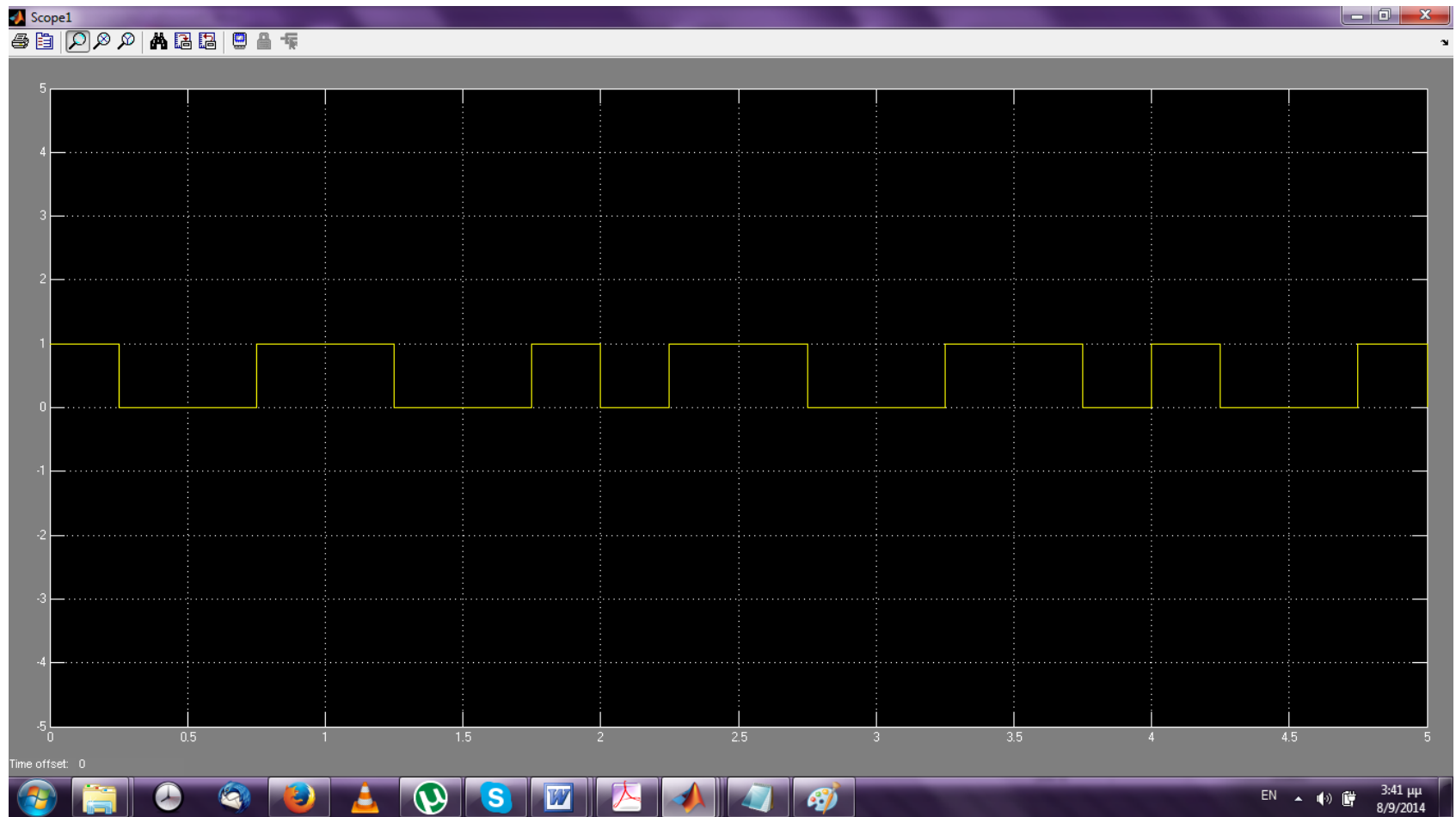
Εικόνα 5.8: Το μήνυμα (επάνω) και ο κωδικός (κάτω) του πρώτου χρήστη



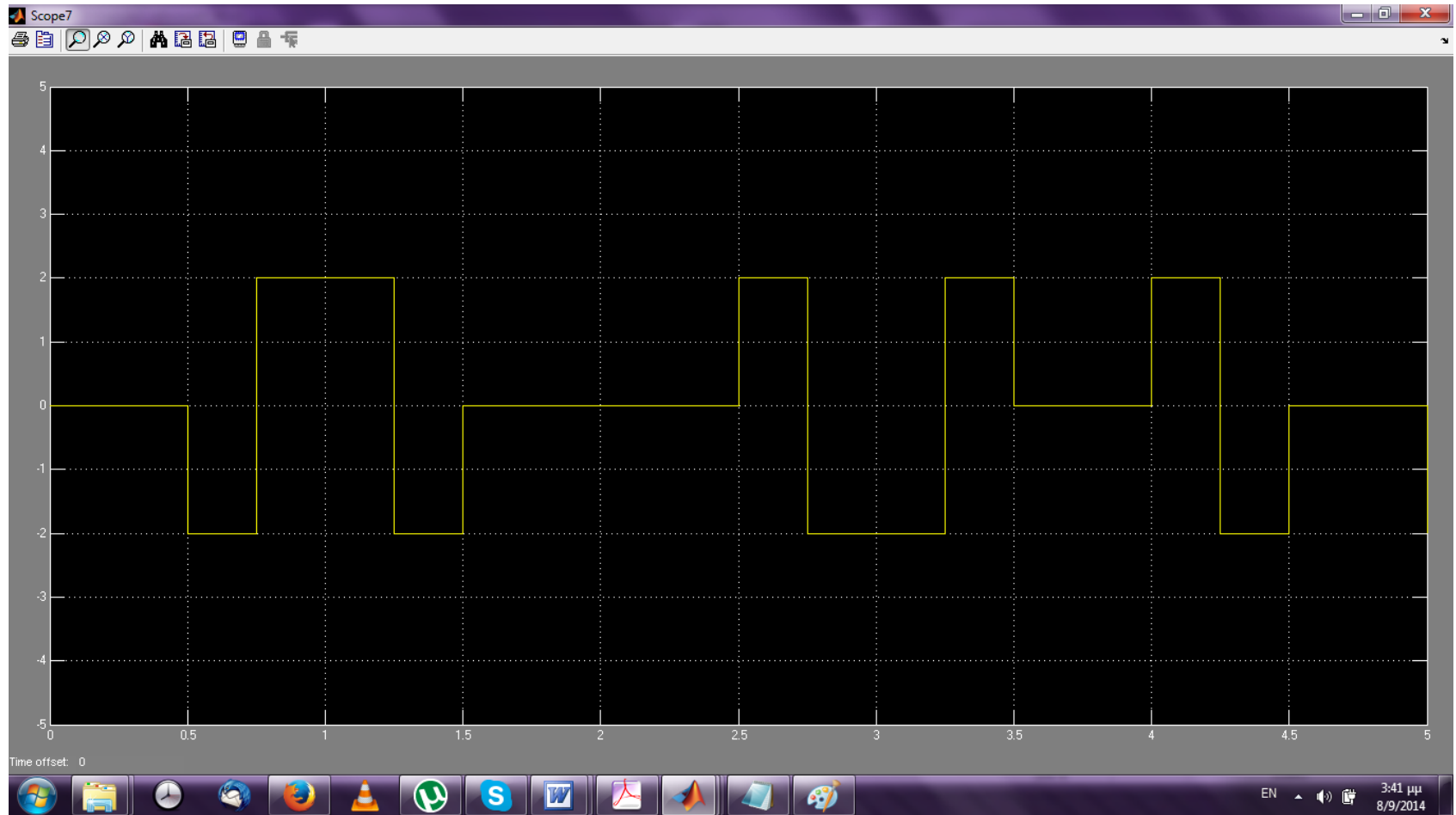
*Εικόνα 5.9: Το μήνυμα (επάνω) και ο κωδικός (κάτω) του δεύτερου χρήστη*



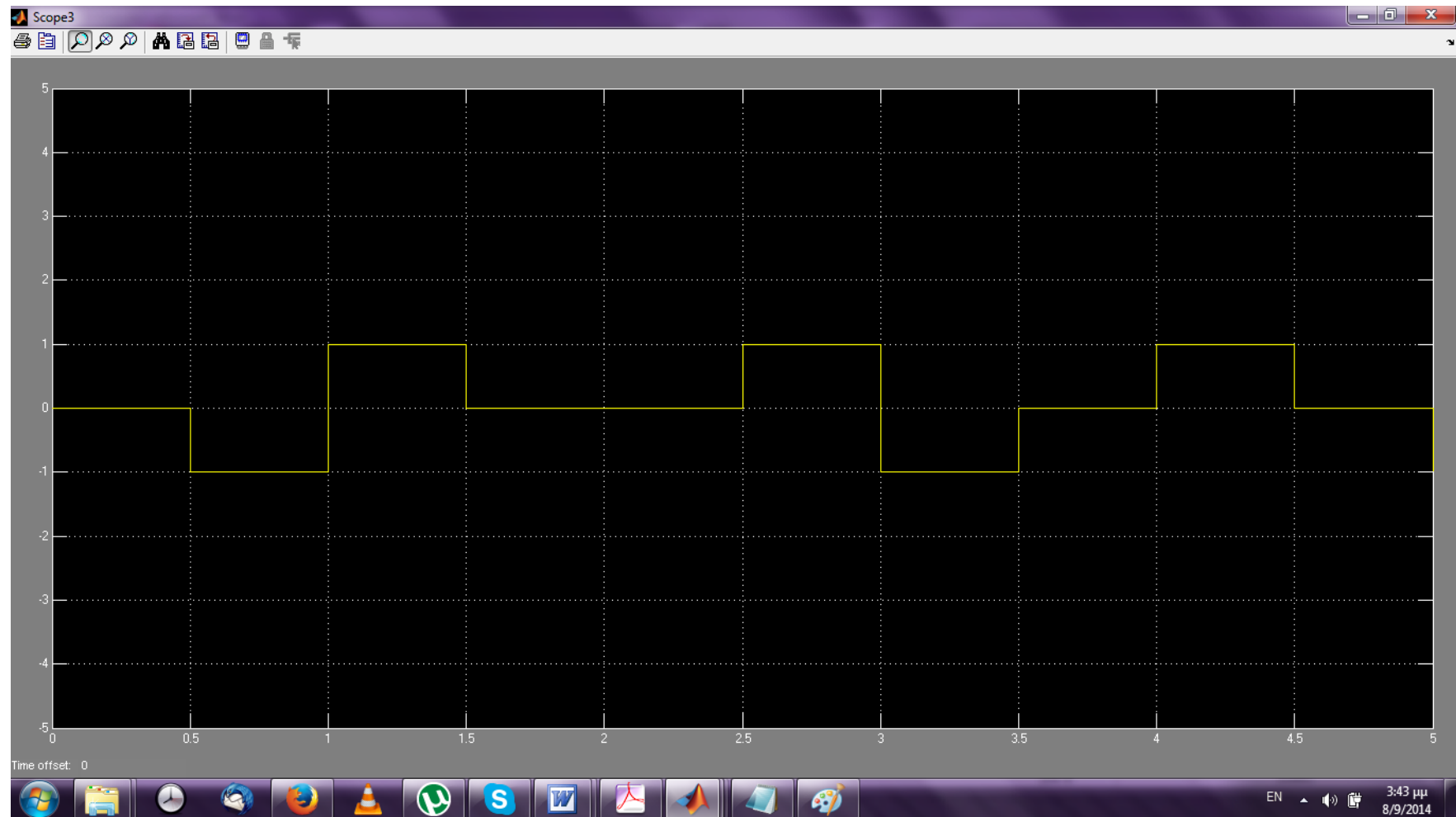
*Εικόνα 5.10: Πράξη XOR μεταξύ του μηνύματος και του κωδικού του πρώτου χρήστη*



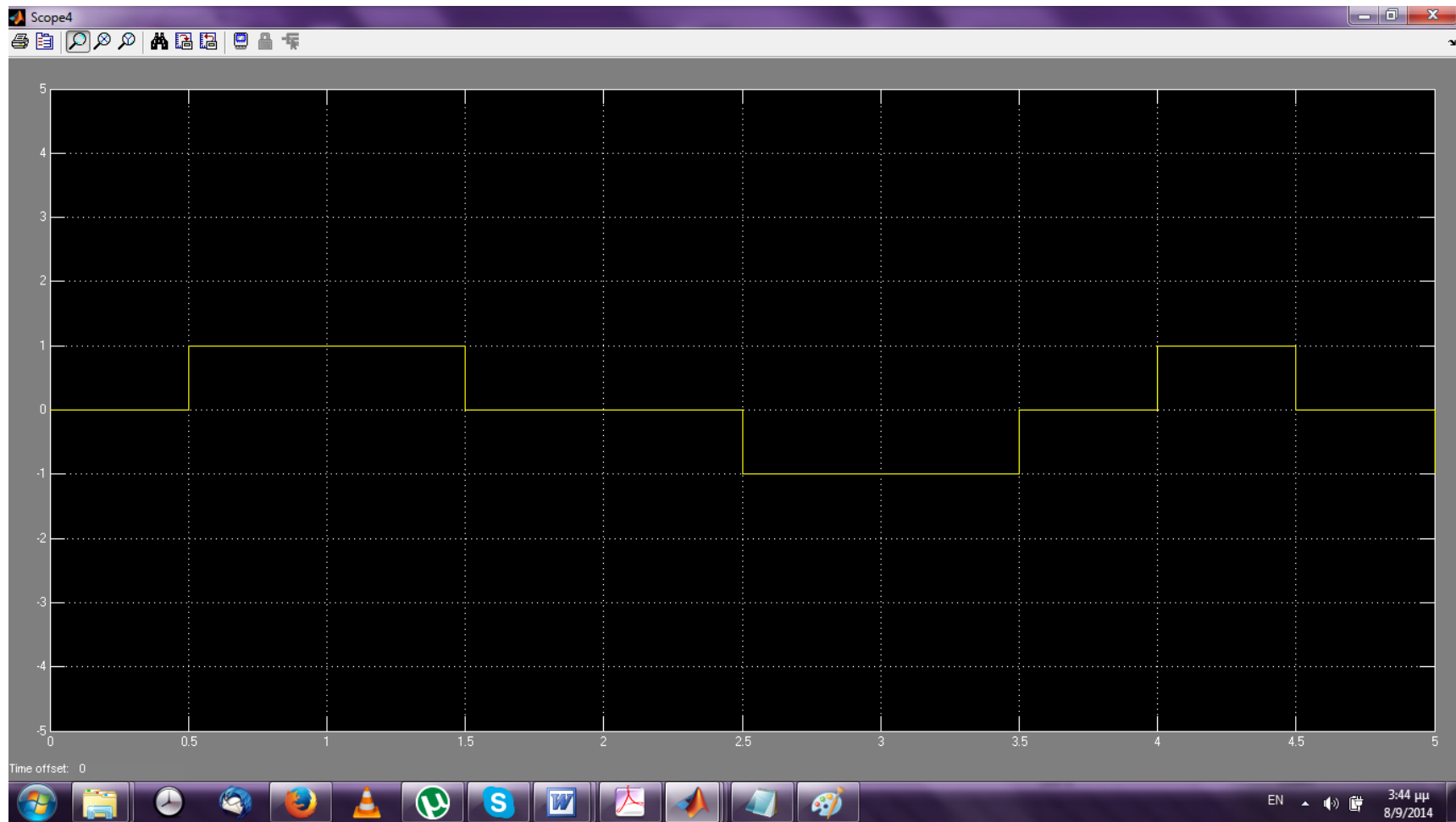
*Εικόνα 5.11: Πράξη XOR μεταξύ του μηνύματος και του κωδικού του πρώτου χρήστη*



*Εικόνα 5.12: Το σήμα που μεταδίδεται μέσω του καναλιού*



*Εικόνα 5.13: Αποδιαμορφωμένο σήμα από τον πρώτο αποδέκτη*



Εικόνα 5.14: Αποδιαμορφωμένο σήμα από τον δεύτερο αποδέκτη



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια ενδελεχής ποιοτική σύγκριση μεταξύ των μεθόδων πολλαπλής πρόσβασης ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας. Η πιο απλή από αυτές λαμβάνει χώρα με διαίρεση του χρόνου σε χρονοθυρίδες και ονομάζεται πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση χρόνου. Η λογική είναι η απόδοση χρονικών διαστημάτων στον χρήστη για να μεταδώσει τα μηνύματά του. Όπως είναι εύκολα αντιληπτό η διαδικασία αυτή παρουσιάζει πολύ μεγάλα προβλήματα και είναι πρακτικά ανέφικτη σε συστήματα όπως για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα. Τα κινητά πρώτης γενιάς έκαναν χρήση της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας. Κάθε ένας από τους χρήστες λάμβανε ένα μικρό εύρος συχνοτήτων και τα μηνύματά τους διοχετεύονταν σε αυτόν κατόπιν της απαραίτητης διαμόρφωσης. Και αυτή η προσέγγιση όμως εισάγει έναν πολύ βασικό περιορισμό. Το εύρος ζώνης που μπορεί να μεταδώσει το μέσο είναι πάντα περιορισμένο και άρα πεπερασμένος είναι και αριθμός των χρηστών που μπορούν ταυτόχρονα να αποστείλουν μηνύματα. Ο περιορισμός αυτός δεν ισχύει στην πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση κώδικα, κατά την οποία κάθε χρήστης κατέχει έναν μοναδικό κωδικό και κάθε μήνυμα διαμορφώνεται με τον κωδικό αυτό.

Επιχειρήθηκε η προσομοίωση της πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα κάνοντας χρήση του πακέτου Simulink του προγράμματος Matlab. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για δύο χρήστες, για τους οποίους επιλέχθηκε ένας 8Bit κωδικός αλλά και διαφορετικά μηνύματα για τον καθένα. Μετά την διαμόρφωση, την μετάδοση και την αποδιαμόρφωση των μηνυμάτων διαπιστώσαμε ότι πράγματι οι αποδέκτες των μηνυμάτων γνωρίζοντας μόνον τους κωδικούς των χρηστών κατάφεραν να ανακτήσουν τα αρχικά μηνύματα με μία απλή πράξη πολλαπλασιασμού των κωδικών αυτών με το μεταδιδόμενο σήμα.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- L. Zheng and D. N. C. Tse, “Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple antenna channels,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 5, pp. 1073–1096
- F. Ramirez-Mireles and R. A. Scholtz, “Multiple-access performance limits with time hopping and pulse position modulation,” In *Proceedings of the IEEE Military Communications Conference, MILCOM 98*, vol. 2, pp. 529 – 533, 1998.
- F. Ananasso, G. Bjornstrom, R. Crescimbeni, G. Gallinaro and E. Saggese, “Satellite applications of spread spectrum frequency hopping techniques,” in *Proceedings of Global Telecommunications Conference, 1989, and Exhibition Communications Technology for the 1990s and Beyond'. GLOBECOM '89*, IEEE, vol. 3, pp. 1738 – 1743, 1989.
- E. Azad and A. H. Aghvami, “Multirate Spread Spectrum Direct Sequence CDMA Techniques,” *IEE Colloquium on Spread Spectrum Techniques for Radio Communication Systems*, 1994.
- C. E. Shannon, “A Mathematical Theory of Communication,” *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 623–656, 1948.
- M. Spellman, “The application of spread spectrum datalinks to GPS-based air traffic navigation, surveillance, and control Position,” in *Proceedings of the Location and Navigation Symposium*, pp. 194 – 198, 1994.
- Y. On-Ching, “Spread spectrum mobile radio, 1977-1982,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 98 – 105, 1983
- R. Nikjah and N. C. Beaulieu, “On Antijamming in General CDMA Systems- Part II: Antijamming Performance of Coded Multicarrier Frequency-Hopping Spread Spectrum Systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 3, pp. 888 – 897, 2008

- R. Nikjah and N. C. Beaulieu, “On antijamming in general CDMA systems-part I: multiuser capacity analysis,” IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 5, pp. 1646-1655, 2008
- R. L. Pickholtz, D. L. Schilling and L. B. Milstein, “Theory of Spread-Spectrum Communications-A Tutorial,” IEEE Transactions on Communications, vol. COM30, no. 5, pp 855-884, 1982
- Wikipedia Encyclopedia  
<http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CF%85%CF%80%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%AF%CE%B1>
- <http://www.teilar.gr/dbData/ProfAnn/profann-4e3a1e4d.pdf>
- Χρονόπουλος Σ., Αγγέλης Κ., Κουμάσης Α. «Ψηφιακές Τηλεπικοινωνίες» ΤΕΙ Ηπείρου, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής, 2012.