



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη παρεμβολών σε δίκτυα M2M εσωτερικού χώρου βασισμένα σε παλμικό UWB

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Απόστολος Ζ. Παπαφραγκάκης

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη παρεμβολών σε δίκτυα M2M εσωτερικού χώρου βασισμένα σε παλμικό UWB

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Απόστολος Ζ. Παπαφραγκάκης

Επιβλέπων: Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2^η Σεπτεμβρίου 2014.

.....
Αθ. Παναγόπουλος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

.....

Απόστολος Ζ. Παπαφραγκάκης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Απόστολος Παπαφραγκάκης, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται στον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Τα δίκτυα μηχανής προς μηχανή (machine-to-machine, M2M) έχουν αποτελέσει αντικείμενο έντονης μελέτης το τελευταίο διάστημα και αναμένεται να αποκτήσουν εκρηκτική ανάπτυξη τα επόμενα χρόνια. Οι εφαρμογές τους για τον άνθρωπο και συνολικά την κοινωνία είναι αμέτρητες, παρέχοντας επιπλέον ασφάλεια, άνεση, πληροφόρηση και εξοικονόμηση πόρων. Δυστυχώς, ακόμη δεν έχει υπάρξει σύγκλιση μεταξύ των διαφορετικών προτεινόμενων αρχιτεκτονικών και τυποποιήσεων. Τα δίκτυα M2M καλούνται να συγκεράσουν διαφορετικές απαιτήσεις και παραμέτρους λειτουργίας, όπως χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλή διαθεσιμότητα και ανθεκτικότητα σε παρεμβολές, συνιστώντας καθοριστική την ορθή επιλογή φυσικού στρώματος. Η παρούσα εργασία εξετάζει κατά πόσο το παλμικό UWB (IR-UWB) μπορεί να αποτελέσει κατάλληλο φυσικό στρώμα (PHY) για την ανάπτυξη δικτύων M2M εσωτερικού χώρου (indoor). Εκτιμώντας ότι βασικό πρόβλημα στα δίκτυα αυτά θα είναι οι παρεμβολές τόσο λόγω πολλαπλής πρόσβασης (Multi-User Interference, MUI) όσο και συνυπάρχοντων φασματικά δικτύων στενής ζώνης (Narrowband Interference, NBI), αναπτύχθηκε προσομοιωτής σε γλώσσα Python με σκοπό την αξιολόγηση της επίδοσής τους για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Για τη ρεαλιστικότερη μελέτη των παρεμβολών, η κίνηση στο ασύρματο μέσο μοντελοποιήθηκε χρησιμοποιώντας στοχαστικές ανελίξεις Poisson, ενώ η τοπολογία των δικτύων χρησιμοποιώντας στοχαστική γεωμετρία (ομογενείς σημειακές ανελίξεις Poisson – Poisson Point Processes, PPP). Στην προσομοίωση λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα διάδοσης (απώλειες διάδοσης, λογαριθμοκανονική σκίαση, πολυδιαδρομική λήψη) και λευκός προσθετικός θόρυβος Gauss (Additive White Gaussian Noise, AWGN) ενώ οι δέκτες είναι τύπου Rake. Η επίδοση καταγράφεται με δείκτες όπως το μέσο Bit Error Rate (BER), ο μέσος λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal-to-Interference-and-Noise Ratio, SINR) και ο μέσος λόγος παρεμβολής προς θόρυβο (Interference-to-Noise Ratio, INR). Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι υπό όρους το IR-UWB συνιστά αποτελεσματικό και ταυτόχρονα αποδοτικό ενεργειακά PHY για επικοινωνία M2M εσωτερικού χώρου (indoor) με υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης δεδομένων (> 10 Mbps).

Λέξεις κλειδιά

Machine-to-Machine, M2M, IR-UWB, indoor, προσομοίωση, παρεμβολές, MUI, NBI, AWGN, multipath, στοχαστική γεωμετρία, PPP, δέκτες Rake, BER, SINR, INR

Abstract

Machine-to-Machine communications (M2M) have recently become a very popular field of study and their development is expected to emerge dramatically in the next few years. Their applications for the person and the society are unimaginable, including increased security, comfort, information and resource conservation. Unfortunately, there is currently a lack of convergence between the different proposed architectures and standards for M2M networks. M2M networks have to meet different demands and goals such as low energy consumption, high availability and resilience to interference; the choice of an appropriate physical layer (PHY) is therefore of profound importance. In the framework of the present thesis, the appropriateness of IR-UWB as PHY in M2M indoor networks is evaluated. Considering that these networks are going to be interference-limited as a result of Multi-User Interference (MUI) and/or Narrowband Interference (NBI), a simulator was developed in "Python" in order to assess their performance for different scenarios. In order to gain a more realistic perspective of the problem caused by interference, the traffic in the wireless medium was modelled using Poisson stochastic processes and the topology of the networks using stochastic geometry (namely Poisson Point Processes, PPP). In the simulation the various effects of propagation (path loss, lognormal shadowing and multipath fading) and Additive White Gaussian Noise (AWGN) are considered; the receivers used are of Rake type. The performance is assessed in terms of average Bit Error Rate (BER), average Signal-to-Interference and Noise Ratio (SINR) and average Interference-to-Noise Ratio (INR). The results suggest that should specific conditions be met, IR-UWB could successfully serve as an effective and energy efficient candidate for the M2M PHY targeting indoor communication at high bit rates (> 10 Mbps).

Keywords

Machine-to-Machine, M2M, IR-UWB, indoor, simulation, interference, MUI, NBI, AWGN, multipath, stochastic geometry, PPP, Rake receivers, BER, SINR, INR

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω δημοσίως τις θερμότερές μου ευχαριστίες στον κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, Επίκ. Καθηγητή Ε.Μ.Π., στον οποίο είμαι ευγνώμων για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία. Η καθοδήγησή του, οι συμβουλές του και η ηθική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλα τα στάδια εκπόνησης της εργασίας αποτέλεσαν παράγοντες καθοριστικούς για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μεταδιδακτορικούς ερευνητές κ.κ. Σταυρούλα Βασσάκη και Γιώργο Πιτσιλαδή για τις χρήσιμες συζητήσεις που είχαμε και το ενδιαφέρον που επέδειξαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη ευγνωμοσύνη μου απέναντι στην οικογένειά μου, η οποία καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου με έχει στηρίξει τόσο ηθικά όσο και οικονομικά και με έχει βοηθήσει να επιτύχω τους στόχους μου.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014
Απόστολος Παπαφραγκάκης

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Λέξεις κλειδιά.....	5
Abstract	7
Keywords.....	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Κατάλογος Σχημάτων	15
Κατάλογος Πινάκων	19
Κεφάλαιο 1:	
Εισαγωγή.....	21
Κεφάλαιο 2:	
Machine-to-Machine επικοινωνίες (M2M).....	23
2.1 Εισαγωγή.....	23
2.2 Περιγραφή των όρων M2M, IoT και «έξυπνα» αντικείμενα.....	23
2.3 Βασικές κατηγορίες εφαρμογών M2M.....	24
2.3.1 Αυτοκίνηση.....	24
2.3.2 Ευφυείς μετρήσεις – τηλεμετρία (smart metering).....	25
2.3.3 Εφαρμογές υγείας.....	27
2.3.4 Οικιακή δικτύωση, κτιριακή αυτοματοποίηση & έξυπνα σπίτια.....	27
2.3.5 Έξυπνες πόλεις (smart cities).....	29
2.3.6 Βιομηχανικές εφαρμογές.....	30
2.4 Διαχείριση δεδομένων και βασική αρχιτεκτονική M2M.....	32
2.5 Προτυποποίηση επικοινωνίας M2M.....	33
2.5.1 Κυψελωτά (cellular) M2M – τυποποίηση 3GPP.....	33
2.5.2 Τριχοειδή (capillary) M2M – προτυποποίηση ETSI.....	34
2.6 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις επικοινωνιών M2M.....	37
2.7 Εκδοθέντα πρότυπα από 3GPP και ETSI για M2M επικοινωνίες.....	38
2.8 Θέματα ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων.....	39
2.8.1 Ζητήματα ασφάλειας.....	39
2.8.2 Ζητήματα προστασίας προσωπικών δεδομένων.....	40
2.9 Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	41
Κεφάλαιο 3:	
Το IR-UWB ως PHY για επικοινωνίες M2M.....	45

3.1 Εισαγωγή.....	45
3.2 Ιστορική αναδρομή.....	45
3.3 Σήματα UWB.....	46
3.3.1 Εισαγωγή.....	46
3.3.2 Κατηγορίες σημάτων UWB.....	47
3.4 Το κανάλι στις επικοινωνίες UWB.....	59
3.4.1 Γενική μοντελοποίηση του ασυρμάτου καναλιού.....	59
3.4.2 Χρησιμοποιούμενα μοντέλα καναλιού για UWB.....	64
3.4.3 Το μοντέλο IEEE 802.15.3a.....	65
3.5 Συστήματα παλμικού UWB.....	68
3.5.1 Επιλογή παλμών.....	69
3.5.2 Σχήματα διαμόρφωσης.....	70
3.5.3 Τεχνικές λεύκανσης του φάσματος – πολλαπλής πρόσβασης.....	74
3.5.4 Δέκτες παλμικού UWB.....	77
3.5.5 Χρήση δεκτών Rake.....	79
3.6 Κεραίες UWB.....	81
3.6.1 Εισαγωγή στις κεραίες UWB.....	81
3.6.2 Κατευθυντικότητα, διαγράμματα ακτινοβολίας και κέρδους.....	82
3.6.3 Καθυστέρηση ομάδας.....	85
3.6.4 Συντελεστής πιστότητας.....	86
3.6.5 Υποψήφια είδη κεραιών.....	86
3.7 Ρυθμιστικό πλαίσιο.....	87
3.7 Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	89

Κεφάλαιο 4:

Το πρόβλημα των παρεμβολών.....	93
4.1 Εισαγωγή.....	93
4.2 Κοινή πρόσβαση στο μέσο – είδη παρεμβολών στις ασύρματες επικοινωνίες.....	93
4.3 Παρεμβολές σε δίκτυα UWB.....	96
4.4 Τρόπος αξιολόγησης παρεμβολής.....	96
4.4.1 Αξιολόγηση με χρονική ευθυγράμμιση των chip δεδομένων.....	96
4.4.2 Αξιολόγηση ανά σύμβολο δεδομένων.....	97
4.4.3 Αξιολόγηση ανά πακέτο δεδομένων.....	98
4.4.4 Στοχαστική προσέγγιση Gauss.....	99
4.4.5 Στοχαστική προσέγγιση της κίνησης.....	99
4.5 Βιβλιογραφία κεφαλαίου.....	102

Κεφάλαιο 5:

Η προσομοίωση.....	105
5.1 Εισαγωγή.....	105

5.2 Εφαρμογή της στοχαστικής γεωμετρίας στην χωροθέτηση των κόμβων	105
5.2.1 Η αναγκαιότητα της μοντελοποίησης της χωρικής κατανομής των κόμβων	105
5.2.2 Σημειακές ανελίξεις	106
5.3 Παράμετροι και μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.....	109
5.3.1 Χωρική κατανομή κόμβων	109
5.3.2 Ο παλμός που χρησιμοποιήθηκε	110
5.3.3 Ρυθμός ανταλλαγής πακέτων – ρυθμοί μετάδοσης.....	111
5.3.4 Το μοντέλο του καναλιού – φαινόμενα διάδοσης.....	111
5.3.5 Μοντελοποίηση του λευκού προσθετικού θορύβου (AWGN).....	113
5.3.6 Μέτρηση επίδοσης συστήματος – δείκτες επίδοσης.....	114
5.3.7 Σύνοψη σεναρίων προσομοίωσης.....	115
5.3.8 Διαγραμματική παρουσίαση εκπεμπόμενων κυματομορφών	116
5.3.9 Ανταλλαγή πακέτων – εξαγωγή μέσω των όρων δεικτών επίδοσης.....	118
5.3.10 Απλό σχήμα ελέγχου ισχύος (power control – PC).....	118
5.4 Βιβλιογραφία κεφαλαίου	123
Κεφάλαιο 6:	
Αποτελέσματα προσομοίωσης	125
6.1 Εισαγωγή.....	125
6.2 Σενάρια χωρίς παρεμβολές.....	126
6.3 Σενάρια με παρεμβολές MUI.....	129
6.4 Σενάρια με παρεμβολές MUI και NBI	138
6.5 Σενάρια με παρεμβολές MUI και έλεγχο ισχύος	139
6.6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων	140
Κεφάλαιο 7:	
Συμπεράσματα - επεκτάσεις.....	143

Κατάλογος Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 2-1: ΤΟ ΝΕΟ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝ ΟΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ M2M.....	24
ΣΧΗΜΑ 2-2: Η ΠΛΗΘΩΡΑ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ M2M ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΣΗ.....	25
ΣΧΗΜΑ 2-3: Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΤΟΥ ΕΥΦΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ	26
ΣΧΗΜΑ 2-4: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ M2M ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ	27
ΣΧΗΜΑ 2-5: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΕΞΥΠΝΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ.....	28
ΣΧΗΜΑ 2-6: ΟΙ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΜΙΑ ΕΞΥΠΝΗΣ ΠΟΛΕΩΣ.....	30
ΣΧΗΜΑ 2-7: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΝΙΚΗΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ M2M.	32
ΣΧΗΜΑ 2-8: ΚΥΨΕΛΩΤΗ ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ M2M	33
ΣΧΗΜΑ 2-9: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ M2M ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ 3GPP	34
ΣΧΗΜΑ 2-10: ΤΡΙΧΟΕΙΔΗ M2M.....	34
ΣΧΗΜΑ 2-11: ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ M2M ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ETSI	35
ΣΧΗΜΑ 2-12: Η ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΑ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΤΟΙΒΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΤΡΙΧΟΕΙΔΩΝ (CAPILLARY) M2M ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	36
ΣΧΗΜΑ 3-1: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΤΩΝ UWB.....	46
ΣΧΗΜΑ 3-2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΗΜΑΤΩΝ UWB ΜΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ.....	47
ΣΧΗΜΑ 3-3: ΦΑΣΜΑΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ UWB (Α) ΜΟΝΗΣ ΖΩΝΗΣ ΧΩΡΙΣ ΦΕΡΟΝ, (Β) ΜΟΝΗΣ ΖΩΝΗΣ ΜΕ ΦΕΡΟΝ, (C) ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΖΩΝΗΣ.....	48
ΣΧΗΜΑ 3-4: ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΥΠΙΚΟΥ ΠΟΜΠΟΥ IR-UWB ΧΩΡΙΣ ΦΕΡΟΝ	49
ΣΧΗΜΑ 3-5: ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΥΠΙΚΟΥ ΠΟΜΠΟΥ IR-UWB ΦΕΡΟΝΤΟΣ	49
ΣΧΗΜΑ 3-6: ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΗ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΓΚΑΟΥΣΙΑΝΩΝ ΠΑΛΜΩΝ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ $T=1.2$ NS ΔΙΑΜΟΡΦΩΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑ $F_c = 3.6, 4, 4.4,$ $4.8, 5.2, 5.6, 6, 6.4, 7.6, 8$ GHz	50
ΣΧΗΜΑ 3-7: ΤΟ ΠΡΟΚΥΠΤΟΝ ΦΑΣΜΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗ OFDM	51
ΣΧΗΜΑ 3-8: ΤΥΠΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΟΜΠΟΥ OFDM	52
ΣΧΗΜΑ 3-9: ΤΥΠΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΕΚΤΗ OFDM	52
ΣΧΗΜΑ 3-10: ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΜΠΟΥ OFDM	53

ΣΧΗΜΑ 3-11: ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΚΤΗ OFDM	53
ΣΧΗΜΑ 3-12: Η ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΤΟΥ ΦΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΥΠΟ-ΖΩΝΕΣ ΚΑΙ ΟΜΑΔΕΣ	54
ΣΧΗΜΑ 3-13: ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΣΥΜΒΟΛΟΥ OFDM ΣΕ ΜΙΑ ΥΠΟ-ΖΩΝΗ.....	54
ΣΧΗΜΑ 3-14: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΩΔΙΚΑ TFC ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ MB-OFDM	55
ΣΧΗΜΑ 3-15: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ ΠΟΜΠΟΥ ΚΑΙ ΔΕΚΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ MB-OFDM	55
ΣΧΗΜΑ 3-16: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ MC-CDMA, (Α) ΠΟΜΠΟΣ, (Β) ΔΕΚΤΗΣ	56
ΣΧΗΜΑ 3-17: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ MC-DS-CDMA, (Α) ΠΟΜΠΟΣ, (Β) ΔΕΚΤΗΣ.....	57
ΣΧΗΜΑ 3-18: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ MT-CDMA, (Α) ΠΟΜΠΟΣ, (Β) ΔΕΚΤΗΣ	59
ΣΧΗΜΑ 3-19: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΑΔΟΣΗΣ	60
ΣΧΗΜΑ 3-20: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΙΣΧΥΟΣ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ	61
ΣΧΗΜΑ 3-21: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΟΛΥΔΙΑΔΡΟΜΙΚΗΣ ΛΗΨΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	62
ΣΧΗΜΑ 3-22: ΔΙΑΦΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ RAYLEIGH ΚΑΙ RICE	63
ΣΧΗΜΑ 3-23: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΡΟΦΙΛ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (PDP)	63
ΣΧΗΜΑ 3-24: ΠΡΟΦΙΛ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ (PDP) ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ S-V	66
ΣΧΗΜΑ 3-25: (Α) ΜΟΡΦΗ ΠΑΛΜΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΞΙ ΠΡΩΤΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ GAUSS (Β) ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΚΑΘΕ ΠΑΛΜΟΥ.....	70
ΣΧΗΜΑ 3-26: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ RPPM: (Α) 2RPPM, (Β) 4RPPM.....	71
ΣΧΗΜΑ 3-27: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ PAM: (Α) BRAM (BPSK) (Β) 4PAM	72
ΣΧΗΜΑ 3-28: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ OOK	72
ΣΧΗΜΑ 3-29: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ 4-BOK.....	73
ΣΧΗΜΑ 3-30: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΟΜΠΟΥ TR-UWB	74
ΣΧΗΜΑ 3-31: ΦΑΣΜΑ ΤΟΥ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ: (Α) ΧΩΡΙΣ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΛΕΥΚΑΝΣΗΣ (Β) ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΗ ΛΕΥΚΑΝΣΗΣ (TH-UWB).....	74
ΣΧΗΜΑ 3-32: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ TH-UWB ΜΕ ΚΩΔΙΚΑ $C=\{1,0,1,0,2\}$	75
ΣΧΗΜΑ 3-33: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ DS-UWB ΜΕ ΚΩΔΙΚΑ $\{1,1,1,-1,1,-1,-1\}$	76
ΣΧΗΜΑ 3-34: ΑΜΙΓΓΩΣ ΨΗΦΙΑΚΟΣ ΔΕΚΤΗΣ	77
ΣΧΗΜΑ 3-35: ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΣ ΔΕΚΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ	78
ΣΧΗΜΑ 3-36: ΔΕΚΤΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (TR).....	78

ΣΧΗΜΑ 3-37: ΔΕΚΤΗΣ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	79
ΣΧΗΜΑ 3-38: ΜΠΛΟΚ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΚΤΗ RAKE	80
ΣΧΗΜΑ 3-39: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΕΚΤΗ A-RAKE	80
ΣΧΗΜΑ 3-40: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΕΚΤΗ S-RAKE	81
ΣΧΗΜΑ 3-41: ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΕΚΤΗ P-RAKE	81
ΣΧΗΜΑ 3-42: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΑΖΙΜΟΥΘΙΑΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΕΡΑΙΩΝ ΣΤΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ: ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ, (B) ΟΜΟΙΟΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ	83
ΣΧΗΜΑ 3-43: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΚΕΡΔΟΥΣ ΓΙΑ ΚΕΡΑΙΕΣ UWB (Θ=ΣΤΑΘ.): (Α) ΚΕΡΑΙΑ VIVALDI, (B) ΚΥΚΛΙΚΟ ΜΟΝΟΠΟΛΟ.....	83
ΣΧΗΜΑ 3-44: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΡΟΥΣΤΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΓΙΑ ΧΟΑΝΟΚΕΡΑΙΑ	84
ΣΧΗΜΑ 3-45: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΟΜΑΔΑΣ: (Α) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΦΑΣΗΣ, (B) ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗ ΟΜΑΔΑΣ.....	85
ΣΧΗΜΑ 3-46: (Α) ΚΕΡΑΙΑ VIVALDI, (B) ΜΟΝΟΚΩΝΙΚΗ ΚΕΡΑΙΑ, (Γ) ΔΙΚΩΝΙΚΗ ΚΕΡΑΙΑ.....	87
ΣΧΗΜΑ 3-47: ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ PCB.	87
ΣΧΗΜΑ 3-48: ΜΑΣΚΕΣ ΤΗΣ FCC ΓΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ UWB ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ (INDOOR) ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ (OUTDOOR) ΧΩΡΟΥ	87
ΣΧΗΜΑ 3-49: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΜΑΣΚΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ECC ΚΑΙ FCC	88
ΣΧΗΜΑ 3-50: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΜΑΣΚΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ ΙΑΠΩΝΙΑΣ ΚΑΙ FCC	88
ΣΧΗΜΑ 4-1: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΧΡΗΣΤΩΝ ΤΗΣ ΙΔΙΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (MUI)	94
ΣΧΗΜΑ 4-2: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΧΡΗΣΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ ΤΟΥ ΙΔΙΟΥ ΤΥΠΟΥ (INTER-NETWORK INTERFERENCE).....	95
ΣΧΗΜΑ 4-3: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΧΡΗΣΤΩΝ ΕΤΕΡΟΚΛΙΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (CROSS-TIER INTERFERENCE)	95
ΣΧΗΜΑ 4-4: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΜΕ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΙΣΗ CHIP	97
ΣΧΗΜΑ 4-5: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΑΝΑ ΣΥΜΒΟΛΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	97
ΣΧΗΜΑ 4-6: ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗΣ ΑΝΑ ΠΑΚΕΤΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	98
ΣΧΗΜΑ 4-7: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΝΝΗΣΗΣ ΠΑΚΕΤΩΝ (ΑΦΙΞΕΩΝ) ΣΤΟ ΧΡΟΝΟ.....	99
ΣΧΗΜΑ 4-8: ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΜΕΣΗΣ ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΝΤΑΣΕΙΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	101
ΣΧΗΜΑ 5-1: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΟΜΟΓΕΝΟΥΣ PPP ΣΕ ΠΑΡΑΘΥΡΟ 20 x 20 Μ ΜΕ ΕΝΤΑΣΗ 0.1 ΣΗΜΕΙΑ/Μ ²	107
ΣΧΗΜΑ 5-2: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΗ ΟΜΟΓΕΝΟΥΣ PPP ΣΕ ΠΑΡΑΘΥΡΟ 1 x 1 Μ ΜΕ ΕΝΤΑΣΗ $\lambda(x,y) = 300(x^2 + y^2)$	107
ΣΧΗΜΑ 5-3: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ PCP ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ 20 x 20 Μ ΜΕ ΜΕΣΟ ΠΛΗΘΟΣ ΣΗΜΕΙΩΝ ΑΝΑ ΣΥΣΤΑΔΑ 2 ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ	

ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΣΕ ΚΥΚΛΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΟΝΑΔΙΑΙΑΣ ΑΚΤΙΝΑΣ	107
ΣΧΗΜΑ 5-4: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΗCΡΡ, ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΣΑ ΑΠΟ ΡΡΡ ΜΕ $\lambda=0.1$ ΣΗΜΕΙΑ/ M^2 ΚΑΙ $R_H = 2$ Μ	108
ΣΧΗΜΑ 5-5: (Α) ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΣΗΜΕΙΑΚΗΣ ΑΝΕΛΙΞΗΣ COX ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ 1 Χ 1 Μ ΠΑΡΑΘΕΙΣΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΤΥΧΑΙΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ (Β) Η ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΙΣΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ	108
ΣΧΗΜΑ 5-6: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΖΕΥΓΟΥΣ ΤΧ-ΡΧ ΣΤΟ ΠΑΡΑΘΥΡΟ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗΣ.	109
ΣΧΗΜΑ 5-7: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΖΕΥΓΩΝ ΤΧ-ΡΧ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΡΡΡ, $\lambda_{ΤΧ} = 0.04/M^2$	110
ΣΧΗΜΑ 5-8: Ο ΠΑΛΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ (ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΓΙΑ ΜΟΝΑΔΙΑΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ).	110
ΣΧΗΜΑ 5-9: ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΔΟΣΗΣ (ΜΑΥΡΗ ΓΡΑΜΜΗ) ΚΑΙ ΣΚΙΑΣΗΣ (ΜΠΛΕ ΓΡΑΜΜΗ) ΩΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ.	112
ΣΧΗΜΑ 5-10: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ UWB ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ (CASE A).....	112
ΣΧΗΜΑ 5-11: ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΟ ΤΟΥ NB ΚΑΝΑΛΙΟΥ (802.11) ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ	113
ΣΧΗΜΑ 5-12: ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΣΤΟ ΛΑΜΒΑΝΟΜΕΝΟ ΣΗΜΑ	113
ΣΧΗΜΑ 5-13: Η ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΕΔΟΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ.....	114
ΣΧΗΜΑ 5-14: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ	117
ΣΧΗΜΑ 5-15: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΩΝ ΣΤΙΣ ΟΠΟΙΕΣ ΚΑΘΙΣΤΑΤΑΙ ΕΜΦΑΝΗΣ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ, ΠΑΡΕΜΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΘΟΡΥΒΟΥ	117
ΣΧΗΜΑ 5-16: ΣΥΝΟΠΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΠΑΡΕΜΒΟΛΗ ΣΤΕΝΗΣ ΖΩΝΗΣ	119
ΣΧΗΜΑ 5-17: Ο ΔΙΑΤΗΡΟΥΜΕΝΟΣ ΣΕ ΚΑΘΕ ΚΟΜΒΟ ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΕ ΤΟΥΣ ΓΕΙΤΟΝΙΚΟΥΣ ΚΟΜΒΟΥΣ ΚΑΙ ΤΙΣ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ.	120
ΣΧΗΜΑ 5-18: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΟΤΑΝ ΔΙΑΠΙΣΤΩΝΕΤΑΙ ΟΤΙ ΧΡΕΙΑΖΕΤΑΙ ΕΚ ΝΕΟΥ PROBING ΚΑΠΟΙΑΣ ΖΕΥΞΗΣ	121
ΣΧΗΜΑ 5-19: ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΖΕΥΞΗ. $A_i = -0.0116886454439$ $B_i = -$ 0.230023789946	122

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1: ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΦΥΣΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ (PHY) ΣΤΑ M2M AREA NETWORKS	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2: ΕΚΔΟΘΕΝΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΤΟ M2M ΑΠΟ ΤΟ 3GPP	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-3: ΕΚΔΟΘΕΝΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΤΟ M2M ΑΠΟ ΤΟ ETSI.....	38
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: ΤΥΠΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ.....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ CDMA ΕΝΟΣ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΥΠΟ-ΦΕΡΟΝΤΩΝ.....	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΚΑΝΑΛΙΟΥ IEEE 802.15.3A.....	68
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-4: ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Δ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΜΕ ΠΑΛΜΟΥΣ GAUSS	71

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η άνθιση που έχουν γνωρίσει τα τελευταία χρόνια οι τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνιών (Information and Communication Technologies, ICT) είναι παροιμιώδης. Νέα προϊόντα και υπηρεσίες γίνονται συνεχώς διαθέσιμα στον καταναλωτή, ο οποίος μπορεί να επικοινωνεί με συνανθρώπους του και να πληροφορείται χρησιμοποιώντας υπηρεσίες φωνής, μετάδοσης εικόνας/video και φυσικά ανταλλαγής δεδομένων (internet), σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη κι αν βρίσκεται.

Πλέον, πέρα από την επικοινωνία ανθρώπου προς άνθρωπο (Human-to-Human, H2H) ή ανθρώπου προς μηχανή (Human-to-Machine, H2M) στις οποίες εδράζονται τα τωρινά δίκτυα, έχει αρχίσει να αποκτά υπόσταση το παράδειγμα επικοινωνίας μηχανής-προς-μηχανή (Machine-to-Machine, M2M), σύμφωνα με το οποίο συμβατικές συσκευές και αντικείμενα του περιβάλλοντος θα μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα και πληροφορίες χωρίς ή με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Σύμφωνα με αναλυτές, πρόκειται για ένα νέο αναδυόμενο κομμάτι της αγοράς ICT το οποίο αναμένεται εντός των επόμενων χρόνων να βιώσει εκρηκτική ανάπτυξη. Θα προκύψει έτσι ένα νέο οικοσύστημα, με πολλά οφέλη για το μέσο πολίτη αλλά και την κοινωνία συνολικά, όπως ασφάλεια, άνεση, πληροφόρηση και εξοικονόμηση πόρων. Οι τεχνολογίες επικοινωνίας M2M βρίσκουν μεταξύ άλλων εφαρμογή στην κτιριακή διαχείριση, στις μεταφορές και διαμετακομιστικές υπηρεσίες, στην υγειονομική περίθαλψη, στις τοπικές κοινότητες και τη δημόσια ασφάλεια, την ενέργεια, τις κατασκευές και τη βιομηχανία.

Φυσικά εγείρονται ενστάσεις σχετικά με την κοινωνικοπολιτική διάσταση που εισάγει η επικοινωνία M2M και πιο συγκεκριμένα αναφορικά με τη διασφάλιση της ιδιωτικότητας και των προσωπικών δεδομένων του ατόμου. Πέρα όμως από αυτά, τα οποία χρήζουν πολιτικής διευθέτησης, δυστυχώς σε τεχνικό επίπεδο δεν υπάρχει ακόμη πλήρης σύγκλιση μεταξύ των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών και τυποποιήσεων για την ανάπτυξη δικτύων M2M. Παρότι είναι ενδεχομένως νωρίς ακόμη, κάτι τέτοιο κρίνεται απαραίτητο για την επιτυχή διάδοση της τεχνολογίας, τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών και την επίτευξη οικονομίας κλίμακος. Μεταξύ άλλων, απαραίτητος είναι ο προσδιορισμός καταλλήλων φυσικών στρωμάτων (PHY) ανάλογα με τις ιδιαίτερες απαιτήσεις κάθε εφαρμογής και το περιβάλλον με το οποίο αυτές καλούνται να αλληλεπιδράσουν.

Στην παρούσα εργασία προτείνεται για επικοινωνίες M2M εσωτερικού χώρου με υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης η χρήση φυσικού στρώματος βασισμένου σε παλμικό UWB (IR-UWB). Αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μιας τέτοιας υλοποίησης, ενώ μελετώνται σενάρια για να διαπιστωθεί κατά πόσο πρόκειται για μια αποτελεσματική και βιώσιμη λύση.

Τα δίκτυα M2M θα χαρακτηρίζονται από μεγάλη πυκνότητα κόμβων ανά μονάδα επιφανείας και ενδεχομένως θα καλούνται να λειτουργήσουν σε μη αδειοδοτούμενες φασματικές ζώνες. Το πρόβλημα των παρεμβολών κρίνεται επομένως ένας από τους κυρίαρχους ανασταλτικούς παράγοντες για την επιτυχή ανάπτυξή τους. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε προσομοιωτής σε γλώσσα Python προκειμένου να μελετηθούν διαφορετικά σενάρια λειτουργίας δικτύων M2M, όπως λειτουργία χωρίς παρεμβολές, λειτουργία με παρεμβολές πολλαπλής

πρόσβασης (Multi-User Interference, MUI) και παρεμβολές από συνυπάρχοντα δίκτυα στενής ζώνης (Narrowband Interference, NBI). Η επίδοση των συστημάτων αξιολογείται σε επίπεδο ρυθμού σφαλμάτων (Bit Error Rate, BER), λόγου σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal-to-Interference and Noise Ratio, SINR) και λόγου παρεμβολής προς θόρυβο (Interference-to-Noise Ratio, INR). Τέλος προτείνεται η χρήση ενός απλού σχήματος ελέγχου ισχύος.

Η διάρθρωση της εργασίας έχει ως εξής:

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι επικοινωνίες M2M. Περιγράφονται βασικοί όροι και αναπτύσσονται οι διάφορες πιθανές εφαρμογές της επικοινωνίας M2M στην καθημερινότητα. Έπεται παρουσίαση της βασικής αρχιτεκτονικής δικτύων M2M και οι διάφορες προσπάθειες τυποποίησης από αρμόδιους φορείς (3GPP και ETSI). Τέλος, γίνεται σύντομη αναφορά στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις που συνδέονται με τις επικοινωνίες M2M ενώ αναλύεται η σημασία ζητημάτων ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα συστήματα M2M που μπορούν να προκύψουν έχοντας ως βάση τεχνολογίες παλμικού UWB. Αφού γίνει μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη του UWB, ακολουθούν οι διάφορες δυνατές προσεγγίσεις για τη μετάδοση της πληροφορίας (single-band ή multi-band). Για την περίπτωση single band στην οποία βασίζεται το παλμικό UWB αναλύονται δυνατά σχήματα διαμόρφωσης και σχεδίασης πομπών και δεκτών. Τέλος, παρουσιάζονται τα διάφορα μοντέλα καναλιού που έχουν κατασκευαστεί με σκοπό την αξιολόγηση συστημάτων UWB, η σχεδίαση κεραιών για χρήση με σήματα UWB και οι προσπάθειες ρύθμισης των επικοινωνιών από διάφορες ρυθμιστικές αρχές (FCC, ETSI κλπ).

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται το πρόβλημα των παρεμβολών στα ασύρματα συστήματα επικοινωνίας. Αφού γίνει μια βασική κατηγοριοποίηση των παρεμβολών ανάλογα με την προέλευσή τους, αναλύονται τρόποι αξιολόγησης της επίδοσης συστημάτων που υποφέρουν από αυτές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στην ανάγκη χρήσης στοχαστικής γεωμετρίας για την διεξαγωγή της προσομοίωσης καθώς και οι διάφορες παράμετροι, μεθοδολογίες και παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης, στο κεφάλαιο αυτό προτείνεται ένα απλό σχήμα ελέγχου ισχύος.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τα διάφορα σενάρια (χωρίς παρεμβολές, με παρεμβολές MUI, με παρεμβολές MUI/ή και NBI, με έλεγχο ισχύος), προκειμένου να διαπιστωθεί η καταλληλότητα του UWB για χρήση ως PHY σε δίκτυα M2M.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται η σύνοψη της εργασίας με κάποια συμπεράσματα και επεκτάσεις.

Κεφάλαιο 2

Machine-to-Machine επικοινωνίες (M2M)

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια η επανάσταση στις τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνιών (Information and Communication Technologies, ICT) έχει δώσει τη δυνατότητα σε δισεκατομμύρια ανθρώπους ανα τον πλανήτη να μπορούν να επικοινωνήσουν ανά πάσα στιγμή σε οποιοδήποτε σημείο κι αν βρίσκονται. Πλέον, καθένας μπορεί να περιηγηθεί στο internet κάνοντας χρήση του προσωπικού του υπολογιστή, του κινητού του τηλεφώνου ή του tablet του. Η εξέλιξη αυτή δεν αναμένεται να σταματήσει – αντιθέτως, έως το 2020 θα υπάρχουν σύμφωνα με εκτιμήσεις περί τα 50 δισεκατομμύρια συσκευές συνδεδεμένες με το internet.

Τα τωρινά δίκτυα είναι εν πολλοίς σχεδιασμένα με γνώμονα την αλληλεπίδραση ανθρώπου με άνθρωπο (Human-to-Human Interaction, H2H). Στόχος τους δηλαδή είναι η εύκολη και αποτελεσματική επικοινωνία και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ανθρώπων. Η λογική αυτή τείνει να ανατραπεί, αφού πλέον, «έξυπνα» αντικείμενα θα μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και με το περιβάλλον τους χωρίς ή με μηδαμινή ανθρώπινη παρέμβαση. Πρόκειται για την επονομαζόμενη εποχή των επικοινωνιών μηχανής προς μηχανή (Machine-to-Machine, M2M), η οποία συνδέεται άρρηκτα με το επονομαζόμενο “Internet of Things” (IoT). Πλέον, οποιοδήποτε αντικείμενο ή συσκευή μπορεί κανείς να φανταστεί θα μπορεί άμεσα ή έμμεσα να αποκτήσει πρόσβαση στο διαδίκτυο και να ανταλλάσσει δεδομένα και πληροφορίες με άλλα αντικείμενα ή συσκευές. Η δημιουργία αυτού του νέου σύνθετου οικοσυστήματος θα ανοίξει νέους ορίζοντες στην αντίληψη που έχει ο άνθρωπος για το περιβάλλον του, αφού αυτό θα μπορεί να προσαρμόζεται στις ανάγκες του παρέχοντάς του επιπλέον ασφάλεια, άνεση και πληροφόρηση.

2.2 Περιγραφή των όρων M2M, IoT και «έξυπνα» αντικείμενα

Ίσως οι όροι M2M, IoT και «έξυπνα» αντικείμενα φαίνονται υπερβολικά γενικοί. Στην πραγματικότητα υπάρχει μεγάλη επικάλυψη στο τι υπονοείται με καθέναν από αυτούς, ωστόσο κανένας δεν αποτελεί υποσύνολο του άλλου. Το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι η ενσύρματη ή ασύρματη επικοινωνία μεταξύ συσκευών οι οποίες δεν συνιστούν υπολογιστές με την ευρεία έννοια και δεν απαιτούν συνήθως αλληλεπίδραση με το χρήστη. Περαιτέρω εξειδίκευση μπορεί να ιδωθεί ως εξής:

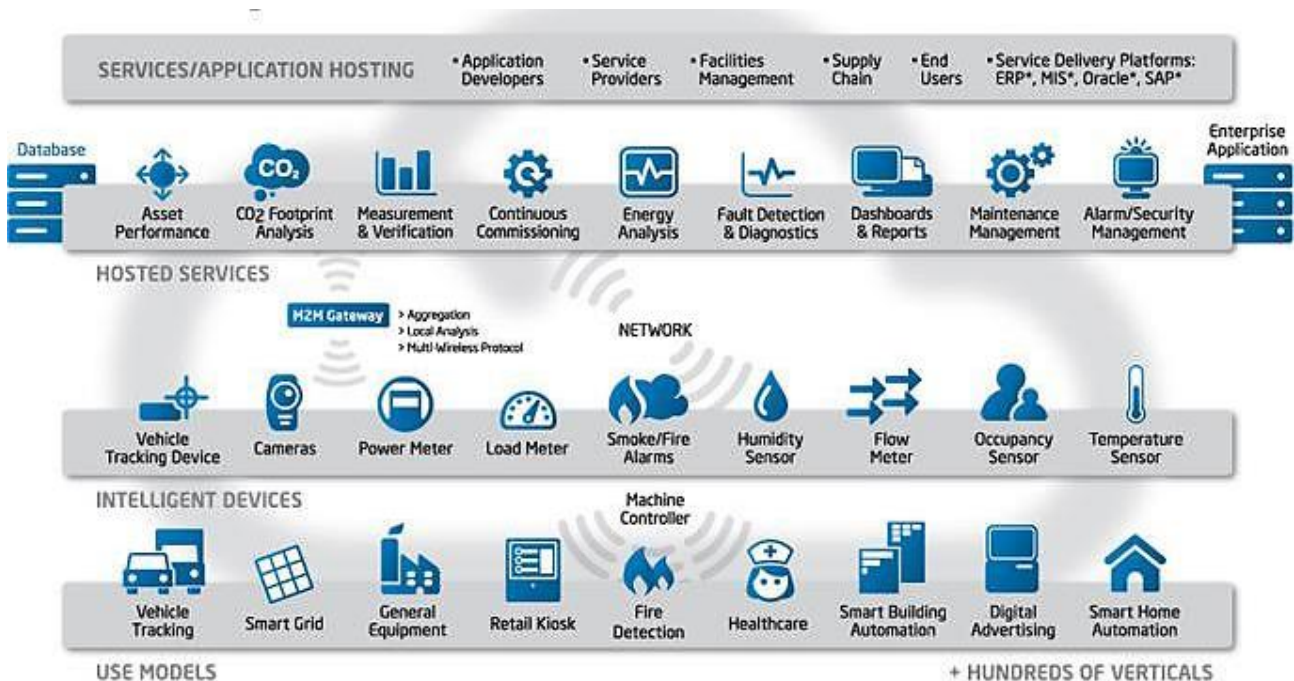
- ο όρος *M2M* περιγράφει ενεργές συσκευές επικοινωνίας οι οποίες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και με το internet κάνοντας χρήση διαφόρων ενσυρμάτων και ασυρμάτων δικτύων επικοινωνιών και οι οποίες αποστέλλουν πληροφορίες σε ένα σύστημα ICT. Μια πρόχειρη κατηγοριοποίηση εφαρμογών βασισμένων σε επικοινωνία M2M θα μπορούσε να αφορά κτιριακή διαχείριση, μεταφορές και διαμετακομιστικές υπηρεσίες, υγειονομική περίθαλψη, τοπικές κοινότητες και δημόσια ασφάλεια, ενέργεια, κατασκευές και βιομηχανικές εφαρμογές

- ο όρος *IoT* σχετίζεται με αντικείμενα ή συσκευές που δεν είναι απαραίτητο να διατηρούν κάποια σχέση με ένα ICT σύστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα αντικείμενα με ετικέτες RFID (Radio Frequency Identification) οι οποίες θεωρούνται συσκευές παθητικής επικοινωνίας. Οι ετικέτες RFID περιέχουν μικροσκοπικά chips και κεραίες οι οποίες ξεκινούν να μεταδίδουν δεδομένα όταν έρθουν σε ηλεκτρομαγνητική σύζευξη με κατάλληλο αναγνώστη RFID και δε διαθέτουν κάποια σταθερή πηγή ενέργειας (π.χ. μπαταρία).
- η λέξη «έξυπνα» (smart) χρησιμοποιείται συνήθως για αντικείμενα τα οποία μέχρι πρότινος δε διέθεταν εγγενή δυνατότητα άντλησης δεδομένων από το περιβάλλον και ανταλλαγής αυτών με άλλες συσκευές.

Μακροπρόθεσμα αναμένεται ακόμη μεγαλύτερη σύγχυση στη χρήση των προαναφερθέντων όρων, καθώς το M2M θα ενσωματώνει όλο και περισσότερα αντικείμενα σε υπάρχοντα συστήματα.

2.3 Βασικές κατηγορίες εφαρμογών M2M

Παρατίθενται μια σειρά από διαφορετικές κατηγορίες στις οποίες έχει ήδη εφαρμοστεί επιτυχώς το μοντέλο επικοινωνίας M2M.

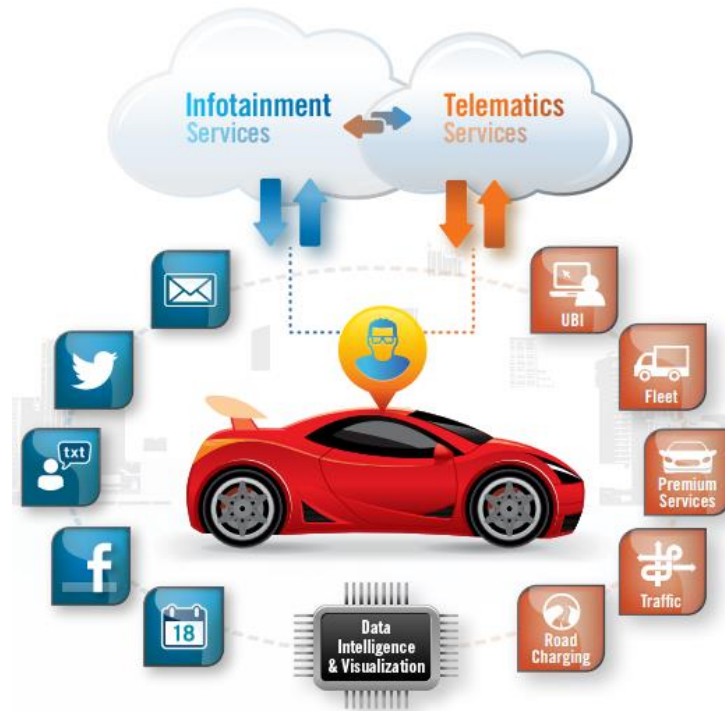


Σχήμα 2-1: Το νέο οικοσύστημα που δημιουργούν οι επικοινωνίες M2M, © Intel

2.3.1 Αυτοκίνηση

Ένας από τους κλάδους στους οποίους έχει βρει ιδιαίτερη άνθιση η επικοινωνία M2M αποτελεί η αυτοκίνηση, όπου εξοπλισμός εγκατεστημένος σε αυτοκίνητα ή μοτοσυκλέτες μπορεί να παρέξει μια πληθώρα υπηρεσιών και ευκολιών. Μιλώντας για M2M στην αυτοκίνηση κανείς αναφέρεται είτε σε επικοινωνία οχήματος προς όχημα (Vehicle-to-Vehicle, V2V) είτε οχήματος προς υποδομή

(Vehicle-to-Infrastructure, V2I).



Σχήμα 2-2: Η πληθώρα υπηρεσιών M2M στην αυτοκίνηση,
© Intelligent Mechatronic Systems

Παρατίθενται ενδεικτικοί τομείς εφαρμογής συστημάτων M2M στην αυτοκίνηση:

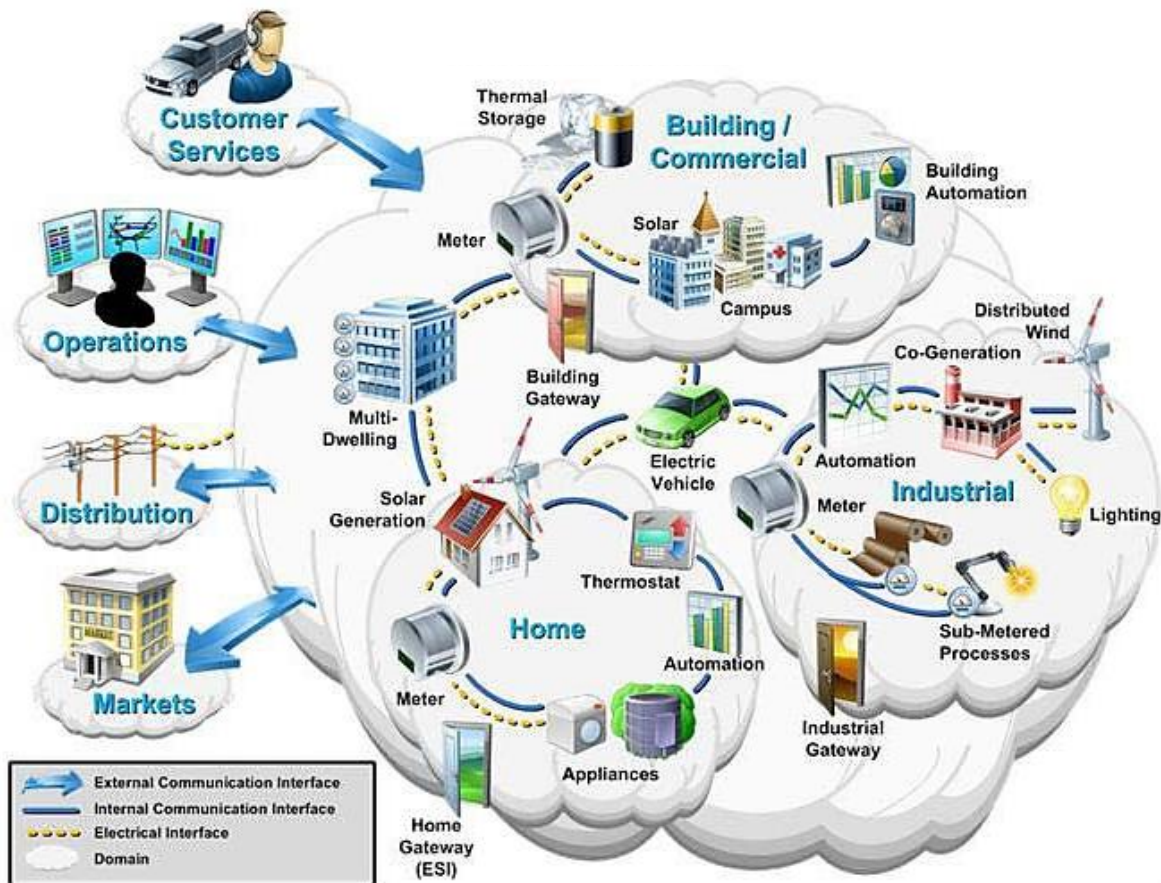
- κλήση βοήθειας σε περίπτωση βλάβης ή ατυχήματος: το όχημα επικοινωνεί αυτόματα με το κέντρο της ασφαλιστικής εταιρείας ή της εταιρείας οδικής βοήθειας προκειμένου να αναφέρει τον τύπο της βλάβης ή του ατυχήματος, τη σοβαρότητα της κατάστασης και το γεωγραφικό στίγμα μέσω GPS.
- απομακρυσμένος εντοπισμός οχήματος - τηλεματική: η θέση καθώς και η χρήση ή όχι του οχήματος μπορούν να παρακολουθούνται απομακρυσμένα. Η δυνατότητα αυτή ανοίγει νέους ορίζοντες στη διαχείριση στόλου οχημάτων, στην ενοικίαση οχημάτων με πληρωμή όσο αυτά χρησιμοποιούνται (pay-as-you-drive), στην πληρωμή διοδίων και ασφάλειας βάσει διανυόμενης χιλιομετρικής απόστασης και στον εντοπισμό κλεμμένων οχημάτων.
- διαδραστικές εφαρμογές πληροφόρησης και ψυχαγωγίας εντός του αυτοκινήτου (πρόσβαση στο ίντερνετ, προβολή video).
- αποδοτική ρύθμιση κυκλοφορίας στους δρόμους: κατάλληλα συστήματα εγκατεστημένα στους δρόμους αντιλαμβανόμενα την ένταση της κίνησης θα μπορούν να δίνουν συμβουλές ή να επιβάλλουν απαγορεύσεις στους οδηγούς προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η κυκλοφοριακή συμφόρηση σε ώρες αιχμής ή στην περίπτωση ατυχήματος.
- οδήγηση χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση (driverless transportation): οχήματα κατάλληλα εξοπλισμένα με αισθητήρες και λογισμικό θα αναλαμβάνουν τη μεταφορά επιβατών χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης στην οδήγησή τους.

2.3.2 Ευφυείς μετρήσεις – τηλεμετρία (smart metering)

Η λογική του M2M βρίσκει ιδιαίτερη χρησιμότητα στις εφαρμογές απομακρυσμένης μέτρησης, όπως αυτές στα πλαίσια υπηρεσιών κοινής ωφέλειας (ηλεκτρικό ρεύμα, νερό, φυσικό αέριο κλπ).

Έξυπνες συσκευές σε συνδυασμό με έξυπνους μετρητές συμβάλλουν στην εκτίμηση της κατανάλωσης, την πρόβλεψή της και την αποδοτικότερη κατανομή της στο χρόνο. Έτσι, επιτυγχάνεται ενημέρωση της τρέχουσας χρέωσης σε πραγματικό χρόνο, αποδοτικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και μικρότερη επιβάρυνση των δικτύων.

Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα χρήσεως smart metering αποτελούν τα λεγόμενα ευφυή ηλεκτρικά δίκτυα (smart grids). Το ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί αναβαθμισμένη εκδοχή του κλασσικού ηλεκτρικού δικτύου στην οποία αυτό συνδυάζεται με ένα δίκτυο ανταλλαγής δεδομένων. Στο ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο οι συσκευές σε κάθε κτίριο παρακολουθούν την κατανάλωσή ενέργειάς τους, συγκεντρώνουν τα δεδομένα και τα αποστέλλουν στην εταιρεία παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Η συγκέντρωση των δεδομένων (data aggregation) γίνεται συνήθως σε πολλαπλά επίπεδα. Αρχικά τα δεδομένα συγκεντρώνονται από τις συσκευές σε κάθε διαμέρισμα ή γραφείο με στόχο την βελτιστοποίηση της κατανάλωσης. Σε επίπεδο κτιρίου, συγκεντρώνονται τα δεδομένα κατανάλωσης από τα επιμέρους διαμερίσματα/γραφεία και κατόπιν, συγκεντρώνονται μαζί τα δεδομένα από κάθε κτίριο της γειτονιάς ή συνοικίας και αποστέλλονται στην εταιρεία παροχής ηλεκτρικού ρεύματος. Η τελευταία, έχοντας πλέον πλήρη εικόνα αναφορικά με τη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος, μπορεί να αυξήσει ή να μειώσει την παραγωγή, να ζητήσει από συσκευές να σβήσουν αν δημιουργούν πρόβλημα στο δίκτυο και να αξιοποιήσει αποδοτικά τους πόρους του δικτύου της. Επιπλέον, καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της κατάστασης όλων των επιμέρους συσκευών και εξοπλισμού που συναποτελεί το δίκτυο μεταφοράς και διανομής και άρα τυχόν βλάβες μπορούν να προληφθούν ή να επιλυθούν άμεσα. Σε επίπεδο καταναλωτή, παρέχεται η δυνατότητα εξοικονόμησης χρημάτων από αποδοτική χρήση του δικτύου, η επιλογή κατανάλωσης όταν είναι διαθέσιμη πράσινη ενέργεια (παραχθείσα από ανανεώσιμες πηγές) και η γνώση του υπολοίπου του λογαριασμού του σε πραγματικό χρόνο.



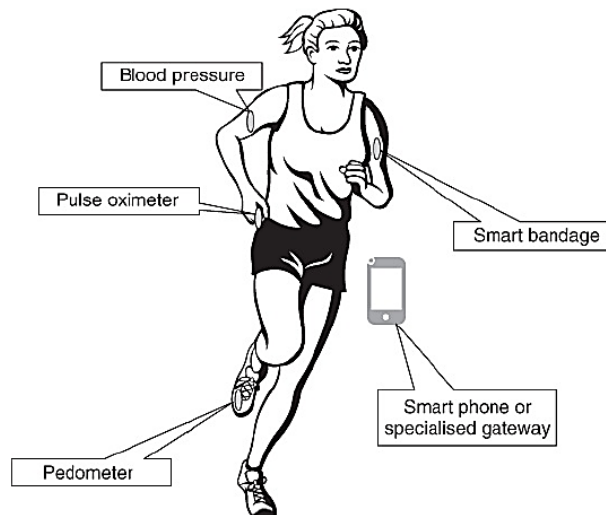
Σχήμα 2-3: Η αρχιτεκτονική του ευφυούς ηλεκτρικού δικτύου, © NIST Framework, V2

2.3.3 Εφαρμογές υγείας

Κάνοντας χρήση επικοινωνίας M2M είναι δυνατή η απομακρυσμένη παρακολούθηση της υγείας ασθενών (Remote Patient Monitoring – RPM) καθώς και η ενημέρωση αρμόδιων φορέων σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Αισθητήρες σώματος μπορούν να παρακολουθούν τους ζωτικούς δείκτες του ατόμου, όπως τον καρδιακού σφυγμό, την αρτηριακή πίεση, τη θερμοκρασία του σώματος, τη τιμή του σακχάρου κλπ. Οι αισθητήρες μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους και από κοινού με έναν κόμβο με πρόσβαση στο internet (π.χ. κινητό τηλέφωνο), ο οποίος και παίζει το ρόλο του συγκεντρωτή δεδομένων (data aggregator). Αυτό είναι απαραίτητο αν ληφθεί υπόψη ότι οι αισθητήρες θα πρέπει να διατηρούν το μέγεθός τους στο ελάχιστο δυνατό και την κατανάλωση ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα. Τα δεδομένα συλλέγονται και επεξεργάζονται από αρμόδιους φορείς (π.χ. νοσοκομεία ή οργανισμούς υγειονομικής περίθαλψης) και έτσι ασθενείς ή ομάδες ευπαθούς πληθυσμού μπορούν να χαίρουν ιατρικής παρακολούθησης από την άνεση του σπιτιού τους. Σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης, οι αισθητήρες το αντιλαμβάνονται και μπορούν αυτόματα να δοθούν συμβουλές στον ασθενή ενώ παράλληλα καλείται ασθενοφόρο.

Άλλη δυνατότητα είναι η παροχή σε ομάδες ευπαθούς πληθυσμού (π.χ. ηλικιωμένους) συσκευής τηλεϊδιοποίησης που φοριέται (συνήθως στον καρπό ή στο λαιμό) και η οποία συνδέεται με ιατρικό κέντρο. Έτσι, με το πάτημα ενός και μόνο κουμπιού καθίσταται γνωστό ότι ο ασθενής δεν αισθάνεται καλά και ιατρικό προσωπικό σπεύδει σε βοήθεια.

Τέλος, αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε έξυπνα ρούχα (παπούτσια, μπλούζες κλπ) προκειμένου να καταγράφουν διάφορους δείκτες κατά τη διάρκεια άσκησης, δίνοντας στο άτομο τη δυνατότητα να παρατηρεί την πρόοδό του και να λαμβάνει εξειδικευμένες συμβουλές ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του.



Σχήμα 2-4: Παράδειγμα εφαρμογής M2M στην υγεία,
D. Boswarthick et al, © John Wiley & Sons

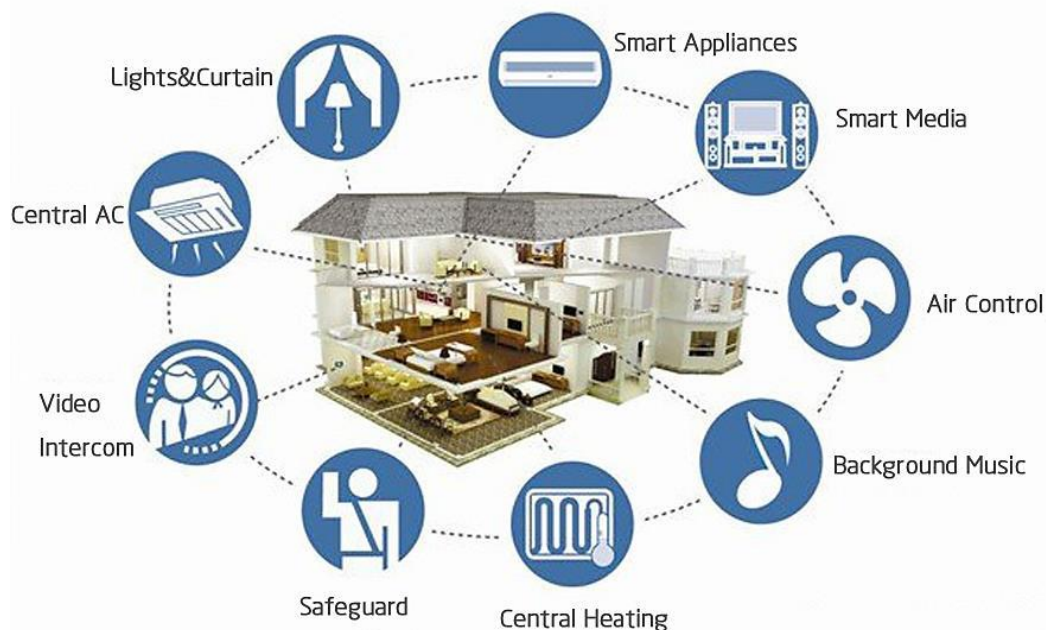
2.3.4 Οικιακή δικτύωση, κτιριακή αυτοματοποίηση & έξυπνα σπίτια

Συνήθως με τον όρο οικιακή δικτύωση κανείς αναφέρεται στη διανομή πολυμεσικού περιεχομένου ή στην παροχή πρόσβασης στο internet σε κλασικές συσκευές όπως υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, tablets, τηλεοράσεις. Κοινός παρονομαστής στις παραπάνω περιπτώσεις είναι η εμπλοκή ανθρώπινου παράγοντα (Human-to-Human ή Human-to-Machine επικοινωνία), ο άνθρωπος δηλαδή αλληλεπιδρά αναγκαστικά με τις συσκευές.

Η εισαγωγή του M2M στο οικιακό περιβάλλον μπορεί να προσδώσει θεαματική βελτίωση στην άνεση, ασφάλεια και οικονομία που οι ένοικοί του απολαμβάνουν. Ήδη τα τελευταία χρόνια έχει γίνει προσπάθεια διασύνδεσης επιμέρους συσκευών και αντικειμένων που βρίσκονται σε ένα σπίτι, όπως των φώτων, των λευκών συσκευών (ψυγεία, κουζίνες, πλυντήρια), συσκευών θέρμανσης/ψύξης (κλιματιστικά, καλοριφέρ), καμερών ασφαλείας, θυρών και παραθύρων, τεντών, μετρητών κατανάλωσης και άλλων. Η διασύνδεση αυτή δίνει τη δυνατότητα στο σπίτι να αντιλαμβάνεται σε πραγματικό χρόνο τις ανάγκες των ενοίκων του και να προσαρμόζεται αυτόματα σε αυτές. Ως αποτέλεσμα, ο άνθρωπος μπορεί να απαλλαγεί από πολλές καθημερινές εργασίες τις οποίες πλέον αναλαμβάνει το δίκτυο συσκευών M2M και να εστιάσει σε αυτά που πραγματικά τον ευχαριστούν.

Ακολουθούν μερικά συνοπτικά παραδείγματα που καταδεικνύουν τα πλεονεκτήματα ανάπτυξης δικτύου M2M εντός οικιακού περιβάλλοντος:

- **ασφάλεια:** το σπίτι θα είναι σε θέση να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή ποιος βρίσκεται στο εσωτερικό του, τι δικαιώματα χρήσης έχει (π.χ. ένοικος, προσωπικό) και να αναλαμβάνει δράσεις όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις που γίνεται αντιληπτή προσπάθεια παραβίασης του χώρου μπορεί να φωτογραφίζει αυτόματα το δράστη μέσω κάμερας, να ειδοποιεί την αστυνομία και τον ιδιοκτήτη, να ηχεί συναγερμό και να κλειδώνει όλες τις πόρτες και τα παράθυρα. Όταν ένοικος πλησιάζει στο σπίτι, αυτό τον αντιλαμβάνεται και μπορεί να ξεκλειδώνει αυτόματα τις κεντρικές εισόδους (πόρτες, γκαράζ κλπ – keyless entry) και να απενεργοποιεί τους συναγερμούς σε αυτές τις ζώνες. Ακόμη, αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν τη θερμοκρασία του χώρου και σε περιπτώσεις που είναι ορατό το ενδεχόμενο πυρκαγιάς να απενεργοποιεί τις ύποπτες συσκευές, να ενεργοποιεί εστιασμένα τα συστήματα πυρόσβεσης, να απομονώνει το χώρο κλείνοντας πόρτες και να διακόπτει την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ή φυσικού αερίου. Τέλος, σε συνδυασμό με τους αισθητήρες σώματος που αναφέρθηκαν προηγουμένως μπορεί να παρέχει συνεχή παρακολούθηση της υγείας των ενοίκων και να καλεί σε βοήθεια όταν παραστεί ανάγκη.



Σχήμα 2-5: Παράδειγμα εφαρμογών έξυπνου σπιτιού,
© China Internet of Things, iotchina.net

- *άνεση*: καθένας από τους ενοίκους μπορεί να ορίσει ένα συγκεκριμένο προφίλ επιθυμητών ενεργειών, όπως αυτόματος κλιματισμός, ενεργοποίηση συσκευών σε συγκεκριμένες ώρες (π.χ. θερμοσίφωνο, μηχανή καφέ), έξυπνη υπενθύμιση υποχρεώσεων (π.χ. υπενθύμιση ραντεβού με ήχηση ξυπνητηριού, υπενθύμιση αγοράς τροφίμων ή αγαθών που εξαντλούνται), περιορισμός ηλιακής ακτινοβολίας εντός του σπιτιού με αυτόματες κουρτίνες/τέντες, πραγματοποίηση διεργασιών με φωνητικές εντολές (άναμμα-σβήσιμο φώτων, ήχηση μουσικής, τηλεόραση), καταγραφή τηλεοπτικών ή ραδιοφωνικών εκπομπών και αποθήκευσή τους στο cloud για απομακρυσμένη πρόσβαση. Οι ένοικοι μπορούν να πραγματοποιούν τηλεφωνικές κλήσεις ή κλήσεις βίντεο από την άνεση του καναπέ τους χωρίς να χρειάζεται να έρθουν σε επαφή με συσκευές αφού όλα τα αναλαμβάνει για λογαριασμό τους το σπίτι χρησιμοποιώντας κατάλληλες κάμερες, μικρόφωνα και ηχεία.
- *οικονομία*: κατάλληλοι αισθητήρες μπορούν να παρακολουθούν την τρέχουσα κατανάλωση ενέργειας ή και να την προβλέπουν και σε συνδυασμό με το ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο (smart grid) να αποτρέπουν ή να επιβάλλουν τη χρήση συγκεκριμένων συσκευών σε δεδομένα χρονικά διαστήματα που είτε το δίκτυο είναι επιβαρυνμένο είτε οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας βρίσκονται εκτός δικτύου. Ακόμη, το απόθεμα καταναλωτικών αγαθών και τροφίμων μπορεί να παρακολουθείται και να ενημερώνεται ο ο ένοικος σε περίπτωση που κάποια από αυτά βρίσκονται κοντά στην ημερομηνία λήξης τους, παύουν να είναι κατάλληλα για χρήση ή προβλέπεται αύξηση στην τιμή πώλησής τους. Επίσης είναι εφικτή η υποβολή αυτομάτων παραγγελιών στα τοπικά καταστήματα (π.χ. supermarkets).

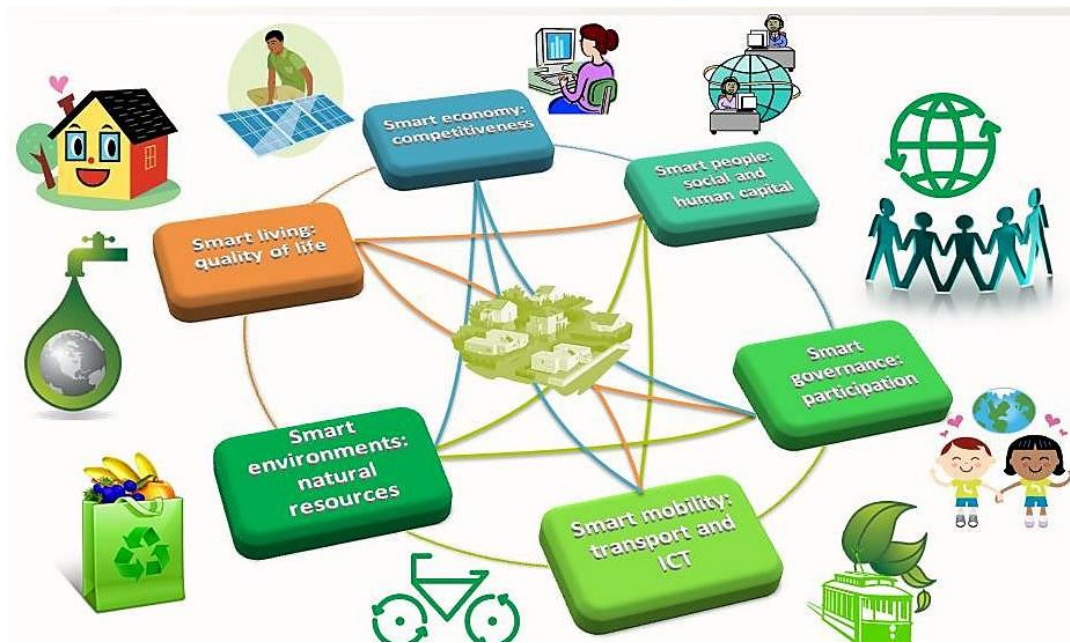
2.3.5 Έξυπνες πόλεις (smart cities)

Καθώς το φαινόμενο του υπερπληθυσμού των πόλεων τείνει να γίνει όλο και εντονότερο, νέες λύσεις καλούνται να βρεθούν για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής, την αύξηση της αποδοτικότητας και της αειφόρου ανάπτυξης. Οι πόλεις θα πρέπει, προς όφελος του πολίτη, να εκσυγχρονιστούν τόσο σε επίπεδο υποδομών, όσο και σε επίπεδο διαδικασιών και λήψης αποφάσεων. Σε αυτά σημαντικό ρόλο καλούνται να παίξουν οι αναδυόμενες τεχνολογίες M2M, εφαρμογή των οποίων θα οδηγήσει στις λεγόμενες έξυπνες πόλεις (smart cities). Πρόκειται για ένα σύμπλεγμα έξυπνων υπηρεσιών κοινής ωφέλειας (όπως αναφέρθηκαν παραπάνω), έξυπνων μεταφορών, υποδομών, κτιρίων και ψηφιακής διακυβέρνησης. Η εφαρμογή επικοινωνίας M2M στην πόλη θα παρέχει στους διοικούντες αλλά και στους πολίτες εξειδικευμένη πληροφόρηση και έλεγχο.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι:

- *ανίχνευση ή πρόγνωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης*: σε περίπτωση που παρατηρηθεί ή αναμένεται έντονη κυκλοφοριακή κίνηση, η σήμανση των δρόμων καθώς και οι φωτεινοί σηματοδότες θα μπορούν να προσαρμόζονται αυτόματα (εξάλειψη ανάγκης χρήσης τροχονόμου). Επίσης υπάρχει η δυνατότητα παροχής συμβουλών μέσω ενημερωτικών πινακίδων-οθονών στους διερχόμενους οδηγούς.
- *εποπτεία και έλεγχος των διαθέσιμων θέσεων στάθμευσης*: γνώση ανά πάσα στιγμή των διαθέσιμων θέσεων στάθμευσης σε κάθε περιοχή, ενημέρωση των οδηγών και ενδεχομένως αυτόματη χρέωση ανάλογα με το μέγεθος του οχήματος, την περιοχή, την ώρα κλπ.

- *αποτελεσματική διαχείριση απορριμάτων*: ανίχνευση κάδων απορριμάτων οι οποίοι είναι γεμάτοι και κλήση απορριματοφόρου. Δυνατή η εφαρμογή σχήματος επιβράβευσης για όσους ανακυκλώνουν συνεπώς τα απορρίματά τους ή χρέωση χρήσης κάδων σε κεντρικά σημεία της πόλης.
- *έξυπνος φωτισμός*: αυτόματη αυξομείωση της φωτεινής έντασης των στηλών ηλεκτροφωτισμού ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι κόσμου (πεζών, οχημάτων) σε κοντινή απόσταση.
- *παρακολούθηση κεντρικών οδών μέσω κάμερας* για την αποτροπή εγκληματικών ενεργειών και παραβάσεων.
- *έλεγχος περιβαλλοντικών συνθηκών* (ατμοσφαιρική ρύπανση, ηχορύπανση, μετεωρολογικές συνθήκες, σεισμική δραστηριότητα) μέσω δικτύου καταλλήλων αισθητήρων.
- *παρακολούθηση υποδομών για βλάβες* (μεγάλα κτίρια, γέφυρες, φράγματα κλπ) και προειδοποίηση όταν φαίνεται ότι επικείται αστοχία.
- *σύγχρονα μέσα μαζικής μεταφοράς* με ενημέρωση για το χρόνο άφιξής τους, την αναμενόμενη καθυστέρηση κατά τη διαδρομή και παροχή πολυμεσικού περιεχομένου κατά τη μεταφορά των επιβατών.
- *παροχή διαδραστικού περιεχομένου* σε κεντρικά αξιοθέατα και πλατείες για το τουριστικό κοινό.



Σχήμα 2-6: Οι συνιστώσες μια έξυπνης πόλεως,
©Vienna University of Technology, <http://ict4green.wordpress.com/>

2.3.6 Βιομηχανικές εφαρμογές

Η συντριπτική πλειοψηφία των σύγχρονων βιομηχανικών μονάδων διαθέτει διασυνδεδεμένα τμήματα της γραμμής παραγωγής προκειμένου να μπορεί να τα ελέγχει κεντρικά. Ωστόσο, τις

περισσότερες φορές τα δίκτυα αυτά έχουν ως αντικείμενο τον απολύτως βασικό έλεγχο των αυτοματισμών του εργοστασίου και σπάνια εκμεταλλεύονται το εύρος των πληροφοριών που γίνονται διαθέσιμες κατά την παραγωγική διαδικασία.

Η μέχρι πρότινος χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ελέγχου διεργασιών, αυτοματοποίησης και παρακολούθησης ονομάζεται SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Τα συστήματα SCADA εκμεταλλεύονται ελεγκτές προγραμματιζόμενης λογικής (Programmable Logic Controllers – PLC), ανάλογα με τα σήματα που λαμβάνουν από εγκατεστημένους αισθητήρες και μορφοτροπείς (transducers) παρέχουν σήματα ελέγχου σε ενεργοποιητές (actuators). Πολλαπλά PLCs, αισθητήρες και μορφοτροπείς συνήθως συνθέτουν ένα δίκτυο το οποίο επιβλέπεται από έναν κεντρικό υπολογιστή ή μια απομακρυσμένη τερματική μονάδα (Remote Terminal Unit – RTU). Υπό ιδανικές συνθήκες τα συστήματα αυτά λειτουργούν πλήρως αυτοματοποιημένα και απαιτούν ανθρώπινη παρέμβαση μόνο στις περιπτώσεις νέας εγκατάστασης, συντήρησης ή αστοχίας. Ουσιαστικά, πρόκειται για ένα είδος πρώιμων δικτύων M2M με περιορισμένες δυνατότητες εξαιτίας της παλαιάς νοοτροπίας στην οποία έχουν βασιστεί.

Τα ήδη υπάρχοντα συστήματα βιομηχανικής δικτύωσης μπορούν να εμπλουτιστούν με νέες δυνατότητες και εφαρμογές οι οποίες προκύπτουν από την ανάπτυξη των επικοινωνιών M2M. Αποκτάται επομένως η δυνατότητα βελτιστοποίησης των επιμέρους συνιστωσών που αποτελούν την παραγωγική διαδικασία, όπως η γραμμή παραγωγής, η αλυσίδα εφοδιασμού πρώτων υλών, η αποθήκευση, και η διαχείριση και μεταφορά του τελικού προϊόντος (logistics). Αποφάσεις μπορούν να λαμβάνονται με γνώμονα δεδομένα τα οποία αντλούνται σε πραγματικό χρόνο, ελαττώνοντας έτσι το λειτουργικό κόστος και βελτιώνοντας τη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Παραδείγματα επιπλέον εφαρμογών που μπορεί να παρέξει το M2M σε βιομηχανικές μονάδες είναι τα ακόλουθα:

- *παρακολούθηση κατάστασης μηχανημάτων και έξυπνη συντήρηση*: τα διάφορα μηχανήματα και εν γένει ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες μπορεί να παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο με χρήση κατάλληλων αισθητήρων. Έτσι βελτιστοποιείται η συντήρησή τους αφού αυτή πραγματοποιείται μόνο όταν υπάρχει ένδειξη φθοράς ή επικείμενης αστοχίας. Η επιχείρηση επομένως αποφεύγει άσκοπο downtime και έξοδα.
- *έξυπνες μετρήσεις και έλεγχος ισχύος*: με χρήση τεχνολογιών M2M καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση στατιστικών στοιχείων κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο. Οι διευθυντές παραγωγής είναι σε θέση να γνωρίζουν ανά πάσα στιγμή τα λειτουργικά έξοδα που προκύπτουν από κάθε διαδικασία και χρήση μηχανήματος στο εργοστάσιο, οπότε και μπορούν να προχωρούν αλλαγές για αποδοτικότερη λειτουργία. Επιπλέον, μπορούν να κάνουν καλύτερη εκτίμηση των μηνιαίων εξόδων και τους παρέχεται η δυνατότητα να απενεργοποιούν αυτόματα μονάδες όταν αυτές δε χρειάζονται (π.χ. κλιματισμό ή φωτισμό τις ώρες που τα γραφεία δε λειτουργούν).
- *έξυπνη απογραφή – διαχείριση αποθήκης*: παρέχεται η δυνατότητα αυτόματης καταγραφής των πρώτων υλών, των αναλωσίμων και του εξοπλισμού που απαιτείται για τη λειτουργία της βιομηχανικής μονάδας. Τα παραπάνω καταγράφονται αυτόματα με το που περνούν το κατώφλι της αποθήκης χρησιμοποιώντας συνήθως ετικέτες RFID. Οι υπεύθυνοι μπορούν να γνωρίζουν ανά πάσα στιγμή το απόθεμα (στοκ) που υπάρχει στις αποθήκες του εργοστασίου και σε ποιο σημείο (χωροταξικά) αυτό βρίσκεται. Τέλος, παραγγελίες μπορούν να υποβάλλονται αυτόματα στους προμηθευτές, όταν

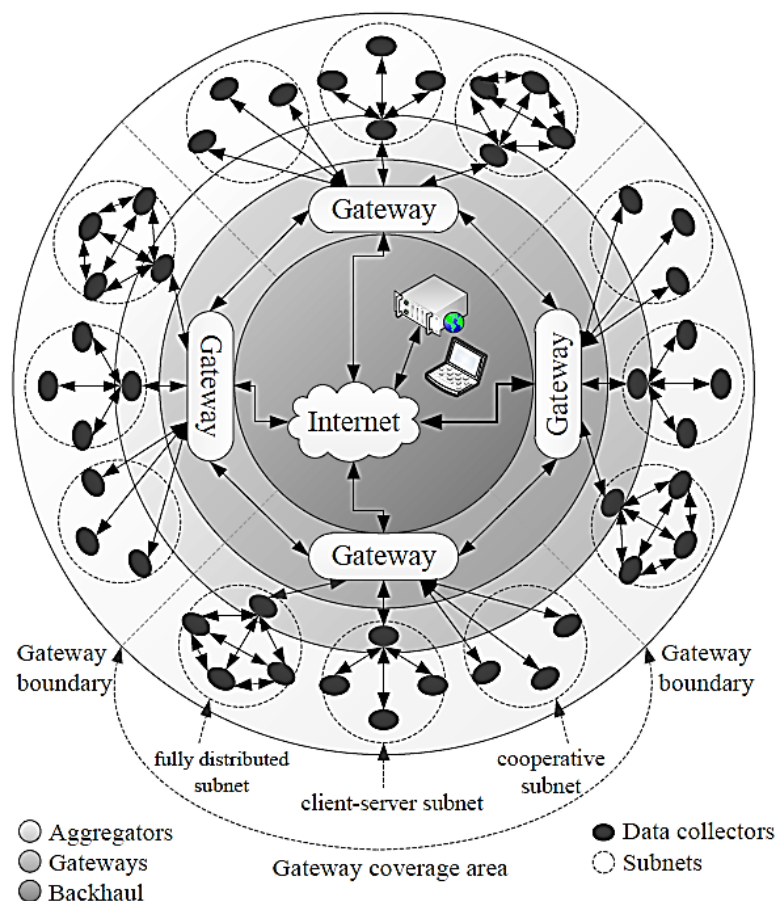
παρατηρείται τάση εξάντλησης των αποθεμάτων.

- *έξυπνος συντονισμός logistics*: ο συνδυασμός των παραπάνω εφαρμογών σε συνδυασμό με την έξυπνη διαχείριση στόλου οχημάτων (βλ. εφαρμογή M2M στην αυτοκίνηση) μπορεί να αυξήσει θεαματικά την αποδοτικότητα στη διαχείριση και μεταφορά του τελικού προϊόντος (έξυπνα logistics). Ο ρυθμός παραγωγής και οι επιμέρους συνιστώσες αυτής παρακολουθούνται και μπορούν να τροποποιούνται σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τις ανάγκες των πελατών, ενώ μπορούν να διαχειρίζονται και να χρονοπρογραμματίζονται δυναμικά οι σχετιζόμενες με τα logistics εργασίες.

2.4 Διαχείριση δεδομένων και βασική αρχιτεκτονική M2M

Παρά το γεγονός ότι κάθε σύστημα M2M εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες και έχει διαφορετική στόχευση υπάρχουν τέσσερα βασικά στάδια που είναι κοινά στις περισσότερες εφαρμογές M2M:

- συλλογή δεδομένων
- μετάδοση των δεδομένων μέσα από δίκτυο(α) επικοινωνιών
- αξιολόγηση των δεδομένων
- αποστολή απόκρισης



Σχήμα 2-7: Παρουσίαση γενικής αρχιτεκτονικής συστημάτων επικοινωνίας M2M, ©M.J. Booysen et al.

Για να υποστηριχθεί ο μεγάλος αριθμός συσκευών οι οποίες αναμένεται να αποτελέσουν μέρος ενός τέτοιου συστήματος, έχουν προταθεί ιεραρχικές δομές επικοινωνίας. Απώτερος στόχος είναι η άντληση δεδομένων από αισθητήρες και η συγκέντρωσή τους (data aggregation) σε κάποιο κεντρικό διακομιστή. Εκεί, θα ληφθεί κάποια απόφαση εφαρμόζοντας κατάλληλη συνάρτηση επί

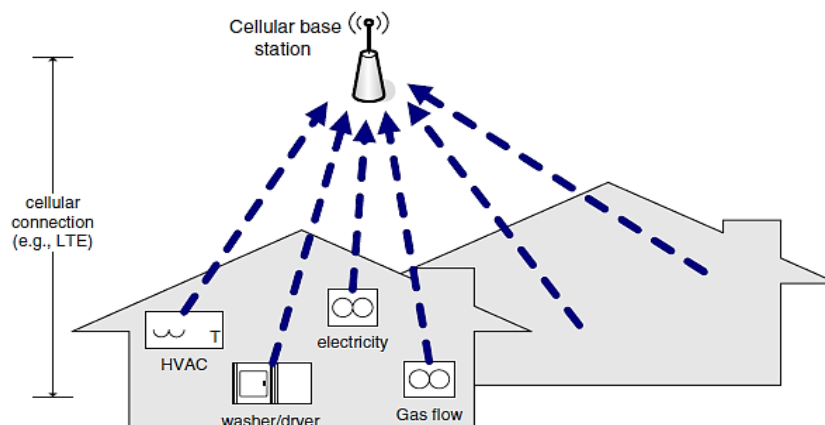
των δεδομένων και η απόφαση αυτή θα πρέπει να αποσταλεί πίσω στα σημεία όπου και θα πρέπει να εκτελεστεί. Πολλαπλοί συλλέκτες πληροφορίας (π.χ. αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες θέσης, κίνησης κλπ.) χρησιμοποιούνται προκειμένου να συλλέξουν πληροφορίες από διαφορετικές τοποθεσίες. Οι συλλέκτες πληροφορίας αντλούν δεδομένα από το περιβάλλον τους το οποίο είναι σχετικά περιορισμένο εν συγκρίσει με τη συνολική έκταση που καλύπτει το δίκτυο M2M. Έτσι, συνήθως ομαδοποιούνται στο χώρο σε μικρότερα δίκτυα (υποδίκτυα) τα οποία χρησιμοποιούν κατάλληλη τεχνολογία δικτύωσης ανάλογα με τον τύπο της πληροφορίας που πρέπει να συλλεχθεί και να μεταδοθεί. Η συλλεχθείσα πληροφορία συγκεντρώνεται σε πολλαπλά σημεία συγκέντρωσης τα οποία δύνανται να ανήκουν σε διαφορετικά ιεραρχικά στρώματα. Το πλήθος των στρωμάτων αυτών εξαρτάται από τον αριθμό των συσκευών M2M καθώς και από το πώς αυτές είναι ομαδοποιημένες. Σε κάθε στρώμα συγκεντρώνονται δεδομένα από πολλαπλούς συλλέκτες κατωτέρων στρωμάτων και στα δεδομένα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν φίλτρα ή επεξεργασία πριν αποσταλούν σε στρώμα ανωτέρου επιπέδου. Έτσι, επιτυγχάνεται ελάττωση της παραγόμενης κίνησης και κατάλληλη μορφοποίησή της. Η εφαρμογή της διαστρωμάτωσης στη συγκέντρωση των δεδομένων επιτρέπει στις συσκευές να έχουν χαμηλό κόστος, χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και μικρό μέγεθος, χαρακτηριστικά απαραίτητα για την επιτυχή ανάπτυξη ενός δικτύου M2M με ενδεχομένως πολλές χιλιάδες κόμβων.

2.5 Προτυποποίηση επικοινωνίας M2M

Οι ανάγκες της αγοράς επιβάλλουν τη σύγκλιση των διαθέσιμων τεχνολογιών, προκειμένου να μπορέσουν να εφαρμοστούν στα δίκτυα M2M υπό κοινά πρότυπα ούτως ώστε να επιτευχθεί διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών και οικονομία κλίμακος. Για το σκοπό αυτό πολλές εταιρείες έχουν συνεργασθεί με οργανισμούς και ομάδες προτυποποίησης ενσύρματης και ασύρματης πρόσβασης, όπως η IEEE, το ETSI και το 3GPP.

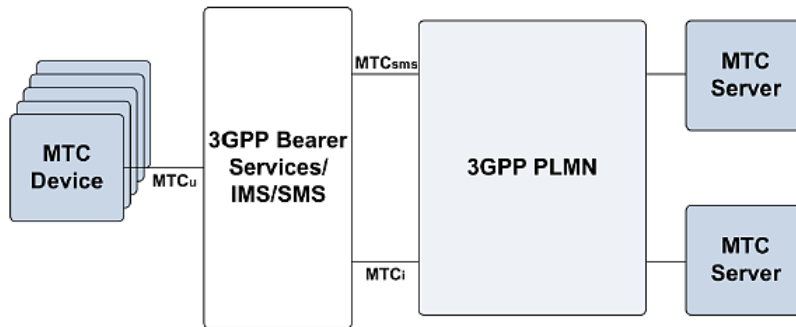
2.5.1 Κυψελωτά (cellular) M2M – τυποποίηση 3GPP

Το 3GPP (3rd Generation Partnership Project) έχει εκδώσει τυποποιήσεις, οι οποίες αφορούν βελτιώσεις των ήδη υπάρχοντων ασυρμάτων δικτύων κυψελωτής πρόσβασης, προκειμένου αυτά να μπορούν να φιλοξενήσουν εφαρμογές M2M (τις οποίες μάλιστα αναφέρει ως Machine-Type Communication – MTC). Ο όρος κυψελωτά M2M (Cellular M2M) αναφέρεται στην αρχιτεκτονική κατά την οποία κάθε τερματικό M2M διαθέτει απευθείας σύνδεση με ένα κυψελωτό δίκτυο (2G/3G/4G) όπως το 3GPP Long Term Evolution (LTE) ή το WiMAX μέσω του οποίου αποκτά πρόσβαση στους αντίστοιχους κεντρικούς διακομιστές της αντίστοιχης υπηρεσίας M2M.



Σχήμα 2-8: Κυψελωτή τοπολογία M2M,
©V. B. Mišić et al.

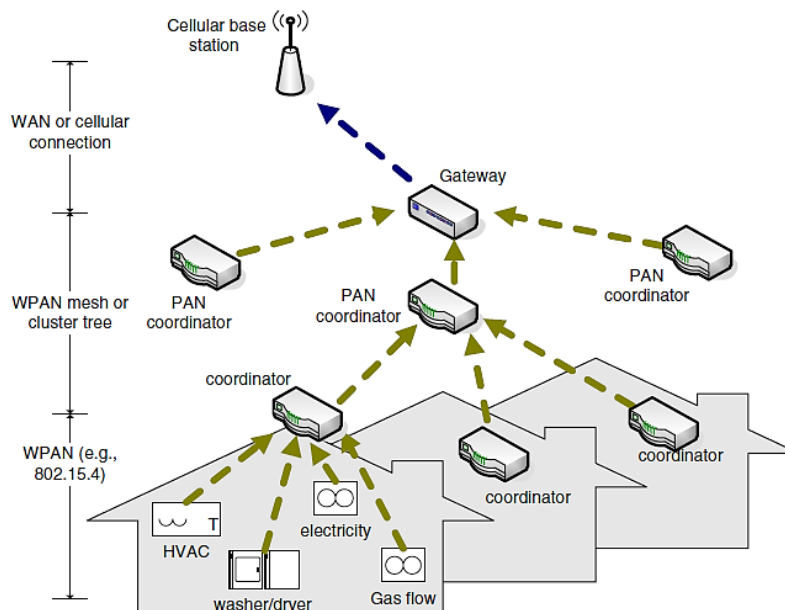
Η κυψελωτή προσέγγιση παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα όπως τεράστια γεωγραφική κάλυψη, παγκόσμια διασύνδεση με παρόχους, κεντρικό έλεγχο, υψηλή ασφάλεια και δυνατότητα διαχείρισης των παρεμβολών. Ωστόσο, οι κυψελωτές υποδομές δεν έχουν σχεδιαστεί με σκοπό τη χρήση τους σε υπηρεσίες M2M. Είναι επομένως αμφίβολο το κατά πόσο θα μπορέσουν να αντεπεξέλθουν στο τεράστιο πλήθος συσκευών M2M οι οποίες αναμένεται να εγκατασταθούν στο επόμενο χρονικό διάστημα, χωρίς ταυτόχρονα να επηρεαστούν οι ήδη παρεχόμενες υπηρεσίες φωνής και δεδομένων. Επιπλέον, το μεγάλο κόστος ανάπτυξης και συντήρησης κυψελωτών δικτύων M2M αποτελεί ισχυρό ανασταλτικό παράγοντα.



Σχήμα 2-9: Αρχιτεκτονική συστήματος M2M σύμφωνα με το 3GPP, ©D. Katusic et al.

2.5.2 Τριχοειδή (capillary) M2M – προτυποποίηση ETSI

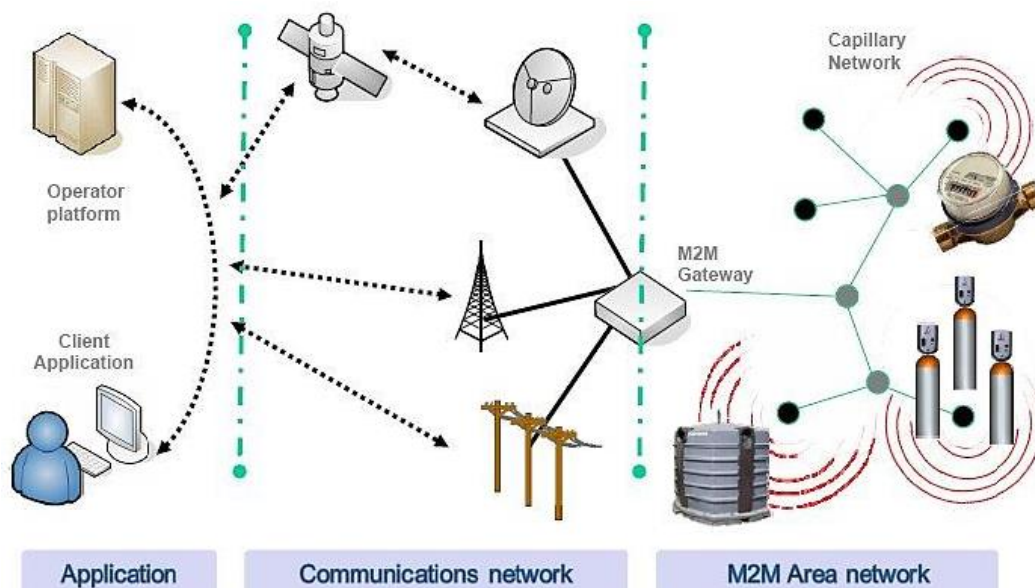
Το ETSI (European Telecommunications Standards Institute) αν και ευρωπαϊκός οργανισμός παράγει διεθνώς αποδεκτά πρότυπα και τυποποιήσεις για τεχνολογίες πληροφορίας και επικοινωνίας (ICT). Μια νέα τεχνική επιτροπή του ETSI για το M2M έχει συσταθεί τα τελευταία χρόνια με στόχο την από άκρο εις άκρο ανάπτυξη τυποποιήσεων για τις επικοινωνίες M2M. Τα δημοσιευθέντα πρότυπα αφορούν τα λεγόμενα τριχοειδή (capillary) δίκτυα M2M, στα οποία τα τερματικά μπορούν να οργανώνονται σύμφωνα με δενδρική τοπολογία ή τοπολογία βρόχου (mesh), συνήθως (αλλά όχι απαραίτητως) είναι ασύρματα συνδεδεμένα μεταξύ τους και συνδέονται μέσω κάποιας πύλης (gateway) στο διαδίκτυο.



Σχήμα 2-10: Τριχοειδή M2M, ©V. B. Mišić et al.

Η αρχιτεκτονική με την οποία προσεγγίζει το ETSI τα δίκτυα M2M αποτελείται από 5 διακριτά τμήματα:

- α. έξυπνες συσκευές οι οποίες αντλούν δεδομένα από το περιβάλλον (π.χ. αισθητήρες) και είναι σε θέση και απαντούν σε αιτήσεις για δεδομένα ή στέλνουν σε τακτά χρονικά διαστήματα χωρίς να τους ζητηθεί
- β. πύλες εισόδου σε άλλα δίκτυα (gateway), οι οποίες παρέχουν διασύνδεση μεταξύ επιμέρους δικτύων
- γ. το δίκτυο περιοχής M2M (M2M area network), το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των έξυπνων συσκευών και των gateways
- δ. δίκτυα επικοινωνιών επιτυγχάνουν σύνδεση μεταξύ των διαφόρων gateways και του διακομιστή στον οποίο βρίσκεται η εφαρμογή M2M
- ε. η εφαρμογή M2M η οποία αναλύει τα δεδομένα και εξάγοντας τα όποια απαιτούμενα συμπεράσματα είτε τα παρουσιάζει σε κατάλληλη μορφή είτε αναλαμβάνει δράσεις στέλνοντας εντολές ελέγχου πίσω στις έξυπνες συσκευές



Σχήμα 2-11: Αρχιτεκτονική συστήματος M2M σύμφωνα με το ETSI, ©ETSI

Πρότυπο	Περιοχή κάλυψης	Ρυθμός μετάδοσης [Mbps]	Ενεργειακοί περιορισμοί	Τυπικές εφαρμογές
NFC	Προσωπική	<0.42	Πιθανοί	Έξυπνες πληρωμές
SRD	Προσωπική	<0.02	Πιθανοί	Ασύρματος ήχος, RFID
Infrared	Προσωπική	<16	Πιθανοί	Ανταλλαγή αρχείων
UWB	Προσωπική	>100	Όχι	Εικόνα, Video, ανταλλαγή αρχείων
Zigbee	Προσωπική	<0.25	Ναι	Αισθητήρες, παρακολούθηση
Bluetooth	Προσωπική	3	Ναι	Ανταλλαγή αρχείων, μουσική
PLC	Τοπική	>4.5	Όχι	Ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο
M-BUS	Τοπική	<0.0096	Όχι	Αυτοματισμοί
Wi-Fi	Τοπική	<600 (802.11n)	Όχι	Δικτύωση υπολογιστών
Femtocell	Τοπική	>7.2	Όχι	Κινητή τηλεφωνία

Πίνακας 2-1: Χρησιμοποιούμενα φυσικά στρώματα (PHY) στα M2M area networks

Τα δίκτυα επικοινωνιών μεταξύ των πυλών M2M (gateways) και των εφαρμογών μπορούν να διαιρεθούν σε δίκτυα πρόσβασης (access networks), μεταφοράς (transport networks) και κορμού (core networks). Σε αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες όπως οι xDSL, WLAN, δορυφορικές, GSM, GPRS, CDMA2000, WiMAX, LTE και άλλες.

	Zigbee-like	Low-Power Wifi	
IETF	Application	IETF CORE	HTTP, etc
	Transport	(Lightweight TCP), UDP	TCP, UDP, etc
	Networking	IETF ROLL (routing)	IPv4/6, etc
IETF 6LoWPAN (adapt.)			
IEEE	MAC	IEEE 802.15.4e	IEEE 802.11
	PHY	IEEE 802.15.4-2006	

Σχήμα 2-12: Η τρέχουσα προσπάθεια τυποποίησης της στοίβας επικοινωνίας τριχοειδών (capillary) M2M επικοινωνιών, ©M. Dohler et al.

2.5.2.1 Βασικά πλεονεκτήματα των capillary M2M

Το βασικό πλεονέκτημα της τριχοειδούς αρχιτεκτονικής είναι η δυνατότητα συγκέντρωσης (aggregation) και μορφοποίησης (shaping) της κίνησης των δεδομένων πριν και κατά τη μεταφορά τους στους αντίστοιχους M2M διακομιστές στους οποίους «τρέχει» η εφαρμογή. Επιπλέον, τα δίκτυα θα μπορούν να μεγαλώνουν σύμφωνα με τις απαιτήσεις χωρίς να απαιτείται σημαντική τροποποίηση της υπάρχουσας υποδομής. Νέοι πάροχοι θα μπορούν να λάβουν μέρος στη διαδικασία υλοποίησης των συστημάτων αφού το κόστος θα είναι χαμηλότερο και ο ανταγωνισμός θα λειτουργήσει προς όφελος της αγοράς.

Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή επιτάσσει την εξέλιξη αποτελεσματικών και αποδοτικών μεθόδων συγκέντρωσης δεδομένων, κοινής πρόσβασης στο μέσο (medium access), διαχείρισης παρεμβολών και ασφάλειας. Εκτιμάται πάντως ότι παρά τις όποιες τρέχουσες δυσκολίες οι κατάλληλες λύσεις θα βρεθούν και τα capillary M2M θα μπορέσουν να αποτελέσουν τη βάση των M2M επικοινωνιών.

2.5.2.2 Βασικά μειονεκτήματα των capillary M2M

Το μεγάλο πλήθος των κόμβων που συναποτελούν τα τριχοειδή δίκτυα M2M θα καλούνται να συλλειτουργήσουν, εγείροντας ζητήματα διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών και προτύπων. Θα έχουν μικρή γεωγραφική κάλυψη (εμβέλεια), ενδεχομένως χαμηλότερη ασφάλεια σε σχέση με τα κυψελωτά M2M και έντονα προβλήματα παρεμβολών.

Τα δίκτυα αυτά θα πρέπει να λειτουργούν σε μη αδειοδοτούμενες φασματικές περιοχές (όπως στη ζώνη Industrial, Scientific, Medical – ISM, των 2.4 GHz), συνυπάρχοντας με ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες όπως η 802.11 (WiFi). Έτσι, ζητήματα παρεμβολών ενδεχομένως περιορίσουν την

αποδοτικότητά τους, ενώ μπορεί να προκληθούν προβλήματα και σε ήδη υπάρχουσες συσκευές άλλων υπηρεσιών και δικτύων.

Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, η επιλογή κατάλληλου φυσικού στρώματος και πρωτοκόλλων πολλαπλής πρόσβασης θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στη βιωσιμότητα των capillary M2M. Έχουν κατατεθεί διάφορες προτάσεις φυσικών στρωμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (βλ. παραπάνω πίνακα) ενώ διάφορα πρότυπα πολλαπλής πρόσβασης εξετάζονται ανάλογα με το PHY (π.χ. 802.15.4e.). Φυσικά, κάθε πρόταση συνοδεύεται από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της και θα χρειαστεί ενδελεχής μελέτη πριν πραγματοποιηθεί σύγκλιση υπό μια κοινή λύση για την κάθε εφαρμογή.

2.6 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις επικοινωνιών M2M

Η ιδιαίτερη φυσιογνωμία που παρουσιάζουν οι επικοινωνίες M2M συνοδεύεται από μια πληθώρα απαιτήσεων και περιορισμών οι οποίοι θα πρέπει να αντιμετωπισθούν και να ληφθούν σοβαρά υπόψη σε οποιαδήποτε απόπειρα υλοποίησης:

- *εμβέλεια, throughput, QoS*: ανάλογα με την εφαρμογή και τον χώρο στον οποίο αναπτύσσεται το δίκτυο M2M υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις ως προς την περιοχή κάλυψης (εμβέλεια), τη ρυθμαπόδοση (throughput) και την ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) οι οποίες είναι σημαντικές και θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στην επιλογή κατάλληλου φυσικού στρώματος (PHY) και πρωτοκόλλων επικοινωνίας.
- *περιβάλλον λειτουργίας*: το αντίξοο περιβάλλον στο οποίο ίσως κληθούν να αναπτυχθούν τα συστήματα M2M επιτάσσει σχεδίαση ανθεκτικών (και ενδεχομένως όχι εύκολα ορατών) συσκευών.
- *κινητικότητα*: ανάλογα με την εφαρμογή μπορεί να κληθεί να υποστηριχθεί κινητικότητα των κόμβων M2M σε διαφορετικές ταχύτητες και περιβάλλοντα.
- *κατανάλωση ενέργειας*: παρά το γεγονός ότι αρκετές από τις συσκευές M2M θα είναι συνδεδεμένες με σταθερή πηγή ενέργειας (ηλεκτρικό δίκτυο), οι περισσότερες αναμένεται ότι θα καλούνται να λειτουργούν με μπαταρίες ή υπό το καθεστώς αυτόνομης συγκομιδής ενέργειας (energy harvesting), για παράδειγμα μέσω ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης ή ηλιακής ακτινοβολίας. Πρέπει να ληφθεί επομένως ειδική μέριμνα ώστε οι συσκευές αυτές να έχουν χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις με ό,τι αυτό συνεπάγεται (μικρότερη εμβέλεια, χαμηλότερο throughput).
- *συνύπαρξη πληθώρας συσκευών*: όσο περισσότερες συσκευές βρίσκονται σε κάποια γεωγραφική περιοχή τόσο καλύτερη και ακριβέστερη άντληση δεδομένων επιτυγχάνεται. Ωστόσο, οι συσκευές αυτές ενδεχομένως κληθούν να μοιραστούν κοινούς πόρους (π.χ. το ασύρματο κανάλι) μεταξύ τους και με άλλες ετερογενείς συσκευές, οπότε θέματα *διαλειτουργικότητας* και κυρίως *παρεμβολών* θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στην επίδοση του συστήματος (το τελευταίο μελετάται στα επόμενα κεφάλαια για την περίπτωση εσωτερικού χώρου και φυσικού στρώματος IR-UWB).
- *εγκατάσταση και συντήρηση*: οι συσκευές ιδανικά θα πρέπει να είναι plug-and-play (PnP), να χρειάζονται δηλαδή ελάχιστη παραμετροποίηση κατά την εγκατάσταση και να είναι εύκολη η συντήρησή τους.

- *αποφυγή και διαχείριση αστοχίας (failover)*: ανάλογα με την κρισιμότητα της εφαρμογής (π.χ. ευφυές ηλεκτρικό δίκτυο, εφαρμογές υγείας, βιομηχανικές εφαρμογές) θα πρέπει να εξεταστούν λύσεις που θα διαθέτουν χαρακτηριστικά εφεδρείας προκειμένου το σύστημα να συνεχίσει να λειτουργεί ακόμη και σε περίπτωση μερικής αστοχίας.
- *διάρκεια ζωής*: μια συσκευή εξοπλισμένη με τεχνολογία M2M ενδεχομένως χρειαστεί να συνεχίσει να λειτουργεί για περισσότερα από 20 έτη. Θα πρέπει λοιπόν ο σχεδιασμός να είναι μακράς πνοής επιτρέποντας στις συσκευές να λειτουργούν παρά τις όποιες τεχνολογικές αλλαγές προκύψουν μελλοντικά. Στην περίπτωση ασύρματης επικοινωνίας, θα πρέπει να χαραχθεί πολιτική ορθής χρήσεως του φάσματος, αφού λόγω της μακροβιότητας των συσκευών M2M αναμένεται σταθερή χρήση φασματικών ζωνών και πιθανή εξάντληση του μη αδειοδοτούμενου φάσματος.
- *ασφάλεια και προστασία ιδιωτικότητας*: το νέο οικοσύστημα που δημιουργούν οι επικοινωνίες M2M αναδεικνύει ζητήματα ασφάλειας και προστασίας των προσωπικών δεδομένων και της ιδιωτικότητας του ατόμου. Τα θέματα αυτά αναλύονται διεξοδικότερα παρακάτω.

2.7 Εκδοθέντα πρότυπα από 3GPP και ETSI για M2M επικοινωνίες

Ακολουθεί παρουσίαση των προσπαθειών προτυποποίησης που έχουν γίνει από το 3GPP και το ETSI για το πεδίο των M2M επικοινωνιών.

TS 22.030	Man-Machine Interface of the User Equipment
TR 22.868	Study on facilitating M2M communication in GSM and UMTS
TR 22.888	Study on enhancements for MTCs
TR 22.988	Study on alternatives to E.164 for MTCs
TR 23.888	Architectural enhancements for MTCs
TR 33.812	Feasibility study on the security aspects of remote provisioning and change of subscription for M2M equipment
TR 37.868	Study on RAN improvements for MTCs
TR 43.868	Study on GERAN improvements for MTCs

Πίνακας 2-2: εκδοθέντα πρότυπα για το M2M από το 3GPP, © V. Galetić et al.

TS 102 689	M2M service requirements
TS 102 690	M2M functional architecture
TR 102 691	Smart metering use cases
TR 102 725	M2M definitions
TR 102 732	M2M use case - eHealth
TR 102 857	M2M use case - Connected Consumer
TR 102 897	M2M use case - City Automation
TR 102 898	M2M use case - Automotive Applications
TS 102 921	M2M m1a, d1a and m1d interfaces
TR 102 935	Impact of smart grids on M2M platform

Πίνακας 2-3: εκδοθέντα πρότυπα για το M2M από το ETSI, © V. Galetić et al.

2.8 Θέματα ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων

Η επικοινωνία M2M συνεπάγεται αλληλεπίδραση μεταξύ του πραγματικού κόσμου και του «κυβερνοκόσμου». Τις περισσότερες φορές οι συσκευές που συναποτελούν τα δίκτυα M2M μπορεί να βρίσκονται σε εντελώς απομακρυσμένες περιοχές ή σε μη ελεγχόμενα περιβάλλοντα και να είναι διασυνδεδεμένες ασύρματα. Οι συσκευές αυτές αντλούν πλειάδα δεδομένων από το περιβάλλον τους και σε μεγάλο βαθμό μπορούν να καταγράψουν πληροφορίες που αφορούν την προσωπική ζωή ανθρώπων. Ανακύπτουν επομένως ζητήματα ασφάλειας των δεδομένων και προστασίας της ιδιωτικής ζωής, τα οποία θα πρέπει να εξετασθούν προσεκτικά και να ληφθούν σοβαρά υπόψη.

2.8.1 Ζητήματα ασφάλειας

Η διεξαγόμενη έρευνα για την ασφάλεια στα δίκτυα M2M αφορά κατά κύριο λόγο την ταυτοποίηση πιθανών απειλών, τύπων επιθέσεων και εγγενών αδυναμιών των συστημάτων. Το ζήτημα της ασφάλειας είναι κρίσιμο αν λάβει κανείς υπόψη τη σημασία των επηρεαζόμενων εφαρμογών (π.χ. μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, υγεία, βιομηχανίες με επικίνδυνες ύλες) και των συνεπειών που οποιαδήποτε αλλοίωση πληροφορίας ή μη εξουσιοδοτημένος έλεγχος των συστημάτων τους θα έχει για την κοινωνία. Δεν είναι μάλιστα απίθανο αν τα ζητήματα ασφάλειας δε λυθούν αποτελεσματικά να προκύψουν νέα είδη κυβερνο-τρομοκρατίας.

Οι απειλές μπορούν να χωριστούν σε δυο επιμέρους κατηγορίες, ενεργές ή παθητικές. Συνήθως οι παθητικές επιθέσεις δεν διακόπτουν τη λειτουργία των συστημάτων αλλά επιχειρούν να αποκτήσουν πληροφορία μέσω υποκλοπών. Αυτού του τύπου οι επιθέσεις εντοπίζονται δύσκολα, ωστόσο δε δημιουργούν μεγάλα προβλήματα και μπορούν να αποφευχθούν αν τα συστήματα είναι σχεδιασμένα κατάλληλα. Το άλλο είδος επιθέσεων, οι ενεργές επιθέσεις, μπορούν να γίνουν αντιληπτές ευκολότερα όμως η ζημία που δύνανται να προκαλέσουν είναι μεγέθους πολλών τάξεων μεγαλύτερη. Μια ενεργή επίθεση ουσιαστικά προσπαθεί είτε να παραβιάσει την ίδια τη συσκευή (device physical tampering), είτε τα αποστελλόμενα από αυτή δεδομένα μέτρησης. Οι ενεργές επιθέσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε εξωτερικές, όπου οι επιτιθέμενοι δε διαθέτουν εξοπλισμό του δικτύου M2M υπό τον έλεγχό τους, και σε εσωτερικές, στις οποίες οι επιτιθέμενοι έχουν στη διάθεσή τους εξοπλισμό του δικτύου M2M (π.χ. κάποια συσκευή-κόμβο) και άρα έχουν πρόσβαση σε κρίσιμες πληροφορίες όπως κλειδιά και πιστοποιητικά (certificates) για ταυτοποίηση και σύνδεση με τον διακομιστή της εφαρμογής.

Για την εμπέδωση της ασφάλειας στα δίκτυα M2M είναι απαραίτητα τα εξής χαρακτηριστικά:

- *Εμπιστευτικότητα* (confidentiality): αποτροπή αποκάλυψης δεδομένων μέσω παθητικών επιθέσεων (υποκλοπών) κατά τη μετάδοσή τους, εξασφαλίζοντας τη δυνατότητα ανάγνωσής τους μόνο από εξουσιοδοτημένα μέρη.
- *Ακεραιότητα* (integrity): διασφάλιση ότι οποιασδήποτε μορφής παραποίηση των δεδομένων μετρήσεων μπορεί να εντοπισθεί. Τα δεδομένα αυτά δε θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ενώ άμεση μέριμνα πρέπει να υπάρχει για την διακοπή της παράνομης δραστηριότητας.
- *Γνησιότητα* (authentication): η επιβεβαίωση γνησιότητας των μερών που λαμβάνουν μέρος στην επικοινωνία είναι απαραίτητη και μπορεί να συνεπάγεται ανταλλαγή κατάλληλων πιστοποιητικών, κλειδιών, κωδικών πρόσβασης ή άλλων μέσων ανάλογα με την επικοινωνία και την κρισιμότητα της εφαρμογής.

- *Μη αποκήρυξη* (non-repudiation): μετά την αποστολή δεδομένων οι κόμβοι δεν μπορούν να αρνηθούν ότι τα έστειλαν.
- *Έλεγχος πρόσβασης* (access control): επίτρεψη πρόσβασης στο διακομιστή εφαρμογής M2M μόνο από εξουσιοδοτημένα μέρη (συσκευές – ανθρώπους).
- *Διαθεσιμότητα* (availability): διαβεβαίωση ότι όλα τα συστήματα θα είναι διαθέσιμα όποτε πρέπει να γίνει διακίνηση δεδομένων M2M μεταξύ των επιμέρους υποδικτύων, υποσυστημάτων και κόμβων που τα αποτελούν.

2.8.2 Ζητήματα προστασίας προσωπικών δεδομένων

Η προστασία της ιδιωτικότητας του ατόμου θεωρείται θεμελιώδες ανθρώπινο δικαίωμα στις σύγχρονες κοινωνίες. Σύμφωνα με τον D. J. Solove, είναι απαραίτητο στοιχείο για την ελευθερία, τη δημοκρατία, την ψυχική υγεία, την ατομικότητα και τη δημιουργικότητα.

Σε ένα κόσμο γεμάτο έξυπνες συσκευές αναμένεται ότι θα συλλέγονται σε μεγάλη κλίμακα δεδομένα, πολλές φορές προσωπικής φύσεως. Τα δεδομένα αυτά αναλύονται και ενδεχομένως συνδυάζονται με δεδομένα από άλλες πηγές προκειμένου να επιτευχθεί το προσδοκώμενο αποτέλεσμα. Η συλλογή και διανομή των δεδομένων δε γνωρίζει σύνορα, λόγω της απανταχού παρουσίας των έξυπνων συσκευών και της διασύνδεσής τους με το internet, γεγονός που επιδεινώνει την κατάσταση, αφού πλέον προσωπικές πληροφορίες μπορούν να γίνουν διαθέσιμες σε παγκόσμια κλίμακα. Καθίσταται επομένως επιβεβλημένη η ανάγκη για προσεκτική διαχείριση του ζητήματος προστασίας των προσωπικών δεδομένων, ενώ αν κάτι τέτοιο δε γίνει τα συστήματα M2M πιθανόν να μην τύχουν ευρείας αποδοχής από τις κοινωνίες. Για το λόγο αυτό ο R. H. Weber αναφέρει ότι η ευρωπαϊκή επιτροπή εξετάζει σοβαρά τη δυνατότητα παροχής δικαιωμάτων «σίγησης των chips» και κατά βούληση αποσύνδεσης του ατόμου από το δικτυωμένο περιβάλλον ανα πάσα στιγμή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η κείμενη ευρωπαϊκή νομοθεσία θεωρεί υποκείμενα σε νόμους προστασίας ιδιωτικότητας και προσωπικών δεδομένων μόνο φυσικά πρόσωπα. Σε περιβάλλοντα ωστόσο επικοινωνιών M2M, έξυπνες συσκευές θα είναι άμεσα συσχετισμένα με τους ιδιοκτήτες τους και θα διαθέτουν «εικονική προσωπικότητα», επηρεάζοντας άμεσα την προστασία ιδιωτικότητας των ιδιοκτητών τους.

Οι επόμενοι παράγοντες θεωρείται ότι θα παίξουν καθοριστική σημασία στην αποδοχή των επικοινωνιών M2M και ταυτόχρονα στην προστασία της ιδιωτικότητας:

- *Διαφάνεια*: η λειτουργία των συσκευών και τα οφέλη από αυτή θα πρέπει να είναι γνωστά στο κοινό το οποίο περιβάλλουν. Ταυτόχρονα η ανταλλαγή πληροφοριών που τους αφορούν θα πρέπει να είναι γνωστή και σαφώς διατυπωμένη. Στην κατεύθυνση αυτή προτείνεται η επισήμανση αντικειμένων και συσκευών με «έξυπνες» δυνατότητες.
- *Απλότητα*: οι πληροφορίες για τη λειτουργία των συσκευών, η ασφάλεια και οι ασκούμενες πολιτικές προστασίας προσωπικών δεδομένων θα πρέπει να είναι διαθέσιμες με απλό και κατανοητό τρόπο.
- *Έλεγχος*: το άτομο θα πρέπει να έχει πλήρη έλεγχο των πληροφοριών που το αφορούν ενώ φρόνιμο είναι να του παρέχονται εργαλεία διαχείρισής τους.

- *Ιδιοκτησία πληροφορίας*: το καθεστώς ιδιοκτησίας και πρόσβασης που διέπει τα δεδομένα θα πρέπει να είναι γνωστό στο άτομο ώστε να γνωρίζει σε ποιον θα πρέπει να απευθυνθεί σε περίπτωση νομικών διεκδικήσεων.
- *Υπαναχώρηση*: το άτομο θα πρέπει να είναι σε θέση να αποσύρει τη συγκατάθεσή του για χρήση των πληροφοριών που το αφορούν, να απενεργοποιήσει συσκευές που αντλούν δεδομένα από το στενό του περιβάλλον και να ζητήσει διαγραφή τυχόν αποθηκευμένων πληροφοριών.

2.9 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] D. Boswarthick, O. Elloumi, O. Hersent, *M2M Communications A systems Approach*, John Wiley & Sons, 2012
- [2] H. Zhou, *The Internet of Things in the Cloud A Middleware Perspective*, CRC Press, 2013
- [3] Z. Zou, “Impulse Radio UWB for the Internet-of-Things: A Study on UHF/UWB Hybrid Solution”, *Doctoral Thesis*, KTH, Sweden 2011
- [4] M. J. Booyesen, J. S. Gilmore, S. Zeadally, G. –J. van Rooyen, “Machine-to-Machine (M2M) Communications in Vehicular Networks”, *KSII Transactions on internet and information systems Vol. X, No. X, December 2011*
- [5] D. Katusic, G. Jezic, “Implementing Self-Organizing Information Dissemination into Network-Centric Machine-to-Machine Systems”, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 10, Number 2, April 2014*
- [6] OECD, “Machine-to-Machine Communications: Connecting Billions of Devices”, *OECD Digital Economy Papers, No 192, OECD Publishing 2012*
- [7] M. Dohler, D. Boswarthick, J. Alonso-Zarate, “Machine-to-Machine in Smart Grids & Smart Cities Technologies, Standards, and Applications”, *Tutorial Globecom 2012, Anaheim, California, USA, 2012*
- [8] N. Accettura, M. R. Palattella, M. Dohler, L. A. Grieco, G. Boggia, “Standardized Power-Efficient & Internet-Enabled Communication Stack for Capillary M2M Networks”, *WCNC 2012 Workshop on Internet of Things Enabling Technologies, Embracing Machine-to-Machine Communications and Beyond, Paris, France, 2012*
- [9] Y. Zhang, R. Yu, S. Xie, W. Yao, Y. Xiao, M. Guizani, “Home M2M Networks: Architectures, Standards, and QoS Improvement”, *IEEE Communications Magazine, April 2011*
- [10] M. Starsinic, “System Architecture Challenges in the Home M2M Network”, *Applications and Technology Conference (LISAT), 2010 Long Island Systems, May 2010*
- [11] I. Auge-Blum, K. Boussetta, H. Rivano, R. Stanica, F. Valois, “Capillary Networks: A Novel Networking Paradigm for Urban Environments”, *UrbaNE’12, Nice, France, December 2012*

- [12] V. Galetic, I. Bojic, M. Kusek, G. Jezic, S. Desic, D. Huljenic, “Basic principles of Machine-to-Machine communication and its impact on telecommunications industry”, MIPRO 2011, Opatija, Croatia, 2011
- [13] C. H. Potter, G. P. Hancke, B. J. Silva, “Machine-to-Machine: Possible Applications in Industrial Networks”, Industrial Technology (ICIT), 2013 IEEE International Conference, February 2013
- [14] NIST, NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0, NIST Special Publication 1108R2, National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S Department of Commerce, 2012
- [15] V. B. Mistic, J. Mistic, X. Lin, D. Nerandzic, “Capillary Machine-to-Machine Communications: The Road Ahead”, Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks, 11th International Conference, ADHOC-NOW 2012, Belgrade, Serbia, July 2012 (available in: X. –Y. Li, S. Papavassiliou, S. Ruehrup (Eds.), ADHOC-NOW 2012, LNCS 7363, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012)
- [16] K. –C. Chen, S. – Y. Lien, “Machine-to-machine communications: Technologies and challenges”, Ad Hoc Netw., 2013
- [17] F. Zhao, D. Viehland, “The Future of Personal Area Networks in a Ubiquitous Computing World”, AMCIS 2009 Proceedings, 2009
- [18] R. Lu, X. Li, X. Liang, X. Shen, X. Lin, “GRS: The Green, Reliability and Security of Emerging Machine to Machine Communications”, IEEE Communications Magazine, April 2011
- [19] Orange Business Services, Syntec informatique, Fing, “Whitepaper Machine To Machine stakes and prospects”, retrieved from www.m2mpremier.com
- [20] D. J. Solove, Understanding Privacy, Harvard University Press, 2008
- [21] I. Gudymenko, K. Borcea-Pfitzmann, K. Tietze, “Privacy Implications of the Internet of Things”, Aml 2011 Workshops, Amsterdam (available in: R. Wichert, K. Van Laerhoven, J. Gelissen (Eds.), Aml 2011 Workshops, CCIS 277, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012)
- [22] L. Fritsch, A. –K. Groven, T. Schulz, “On the Internet of Things, Trust is Relative”, Aml 2011 Workshops, Amsterdam (available in: R. Wichert, K. Van Laerhoven, J. Gelissen (Eds.), Aml 2011 Workshops, CCIS 277, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012)
- [23] J. Schrammel, C. Hochleitner, M. Tscheligi, “Privacy, Trust and Interaction in the Internet of Things”, Aml 2011 Workshops, Amsterdam (available in: R. Wichert, K. Van Laerhoven, J. Gelissen (Eds.), Aml 2011 Workshops, CCIS 277, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012)
- [24] J. –H. Hoepman, “In Things We Trust? Towards Trustability in the Internet of Things”, Aml 2011 Workshops, Amsterdam (available in: R. Wichert, K. Van Laerhoven, J. Gelissen (Eds.), Aml 2011 Workshops, CCIS 277, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012)
- [25] European Parliament and Council Directive: Directive 2002/58/EC of the European Parliament and of the Council: concerning the processing of personal data and the protection of privacy in the electronic communications sector (Directive on privacy and electronic communications). Official Journal of the European Communities, 2002

- [26] R. H. Weber, "Internet of things – new security and privacy challenges. Computer Law & Security Review 26(1), 23 30, 2010

Κεφάλαιο 3

Το IR-UWB ως ΡΗΥ για επικοινωνίες M2M

3.1 Εισαγωγή

Οι τεχνολογίες επικοινωνίας βασισμένες σε σήματα υπερ-ευρείας ζώνης (Ultra Wideband – UWB) έχουν προσελκύσει τεράστιο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια και ειδικά από τη στιγμή που η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών των ΗΠΑ (Federal Communication Commission – FCC) επέτρεψε τη χρήση τους σε εφαρμογές επικοινωνίας στις συχνότητες μεταξύ των 3.1 και 10.6 GHz. Το UWB και ειδικότερα το παλμικού τύπου UWB (Impulse Radio Ultra Wideband – IR-UWB) αποτελεί σημαντικό υποψήφιο για χρήση ως φυσικό στρώμα σε επικοινωνίες M2M λόγω των χαμηλών ενεργειακών του απαιτήσεων, της σχετικά εύκολης και χαμηλού κόστους υλοποίησης, της δυνατότητας υποστήριξης πολύ μεγάλων ρυθμών μετάδοσης και της δυνατότητας χρήσης σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης (ranging – positioning). Επιπλέον, λόγω του μεγάλου χρησιμοποιούμενου εύρους ζώνης κατέχει πλεονεκτική θέση για χρήση σε περιβάλλοντα με έντονη πολυδιαδρομική λήψη (όπως τα περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου), παρέχοντας τη δυνατότητα φώρασης με υψηλή ανάλυση στο πεδίο του χρόνου (fine temporal resolution).

3.2 Ιστορική αναδρομή

Παρά το γεγονός ότι συχνά το UWB νοείται ως μια νέα τεχνολογία στον κλάδο των επικοινωνιών, κάτι τέτοιο δεν είναι αληθές. Στην πραγματικότητα, σήματα υπέρ-ευρείας ζώνης αποτέλεσαν την αφετηρία της ασύρματης επικοινωνίας όταν οι Hertz και Marconi το 1893 και 1894 αντίστοιχα, κατάφεραν να παράξουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα μέσω διακένων σπινθηρισμού στα πλαίσια πειραμάτων. Τα κύματα αυτά συνιστούσαν αυτό που σήμερα καλείται έγχρωμος θόρυβος (coloured noise), ενώ από τότε και για τα επόμενα είκοσι χρόνια ηλεκτρομαγνητικά κύματα παρήγοντο με παρόμοιες μεθόδους (διάκενα σπινθηρισμού, ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ ηλεκτροδίων άνθρακα). Αργότερα, η απαίτηση για ταυτόχρονη μετάδοση από πολλούς πομπούς και η δυνατότητα διαχωρισμού των επιμέρους σημάτων στο πεδίο της συχνότητας ανάγκασαν τις ασύρματες επικοινωνίες να στραφούν στο μοντέλο διαμόρφωσης ημιτονοειδούς φέροντος το οποίο και αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο των σύγχρονων επικοινωνιών.

Η ανάγκη για κατασκευή αποτελεσματικών ραντάρ οδήγησε τη στρατιωτική βιομηχανία στην επιστράτευση και πάλι της παλμικής τεχνολογίας περί το 1960, ενώ τη δεκαετία του 1970 οι Bennet και Ross παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη μελέτη συστήματος υπερ-ευρείας ζώνης. Το 1973 το πρώτο σχετικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας απονεμήθηκε στις ΗΠΑ και μέχρι περίπου τα τέλη της δεκαετίας του 1990 οι όποιες εφαρμογές αφορούσαν στρατιωτικά συστήματα ή απόρρητα προγράμματα χρηματοδοτούμενα από την αμερικανική κυβέρνηση. Πιστεύεται μάλιστα ότι ο όρος Ultra Wideband επινοήθηκε από το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας των ΗΠΑ για να περιγράψει τη δημιουργία, εκπομπή και λήψη πολύ στενών παλμών ενέργειας για χρήση σε ραδιοεπικοινωνία. Έως τότε, οι σχετικές τεχνολογίες αναφέρονταν συνήθως στη βιβλιογραφία ως τεχνικές «βασικής ζώνης», «παλμικές» ή «χωρίς φέρον».

Το πολύ έντονο ενδιαφέρον γύρω από το UWB άρχισε να διαμορφώνεται όταν το 1998 η FCC

δημοσίευσε την πρώτη σχετική μελέτη και κορυφώθηκε το 2002 όταν εξέδωσε τις πρώτες κανονιστικές διατάξεις για τη χρήση του σε τηλεπικοινωνίες και εφαρμογές ηλεκτρονικών ευρείας κατανάλωσης.

3.3 Σήματα UWB

3.3.1 Εισαγωγή

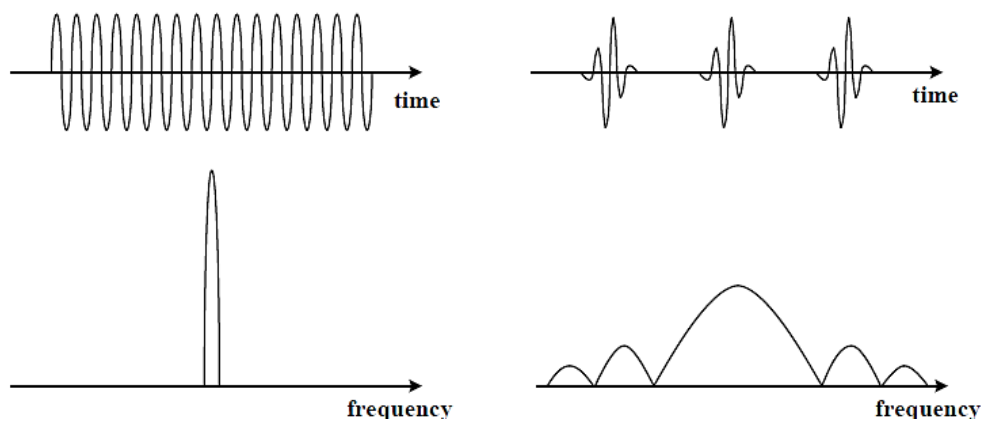
Στα συστήματα επικοινωνίας, η προς μετάδοση πληροφορία ομαδοποιείται σε σύμβολα πεπερασμένης διάρκειας τα οποία αναπαρίστανται από κατάλληλα σήματα. Το χρησιμοποιούμενο από τα συστήματα εύρος ζώνης δίδεται προσεγγιστικά από την εξίσωση:

$$B \approx \frac{1}{T_s}$$

όπου B το εύρος ζώνης και T_s η διάρκεια συμβόλου. Σύμφωνα με την FCC, ένα τηλεπικοινωνιακό σήμα καλείται υπερ-ευρείας ζώνης (UWB) όταν:

- είτε το κλασματικό εύρος ζώνης του (fractional bandwidth) B_f είναι μεγαλύτερο ή ίσο από 0.2, όπου $B_f = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L}$ και f_L , f_H οι κάτω και άνω συχνότητες -10dB του σήματος αντίστοιχα
- είτε το εύρος ζώνης του είναι μεγαλύτερο ή ίσο των 500MHz, ανεξαρτήτως κλασματικού εύρους ζώνης

Σημειωτέον ότι για την ταυτοποίηση του σήματος ως UWB λαμβάνεται υπόψη ο ορισμός που δίδει το μικρότερο αποτέλεσμα. Η παραγωγή τέτοιων σημάτων μπορεί να επιτευχθεί με πλειάδα διαφορετικών μεθόδων οι οποίες περιγράφονται αναλυτικά σε επόμενη παράγραφο.



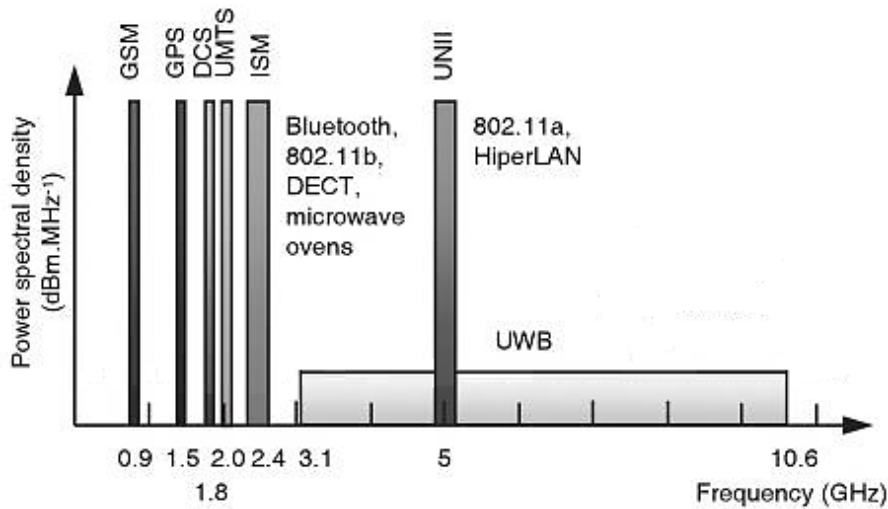
Σχήμα 3-1: Σύγκριση φασματικού περιεχομένου συμβατικών σημάτων και σημάτων UWB, © Z. Zou

Τα συμβατικά συστήματα ασύρματης επικοινωνίας χαρακτηρίζονται από σήματα στενού εύρους ζώνης (της τάξεως το πολύ μερικών δεκάδων MHz) και υψηλή στάθμη ισχύος εκπομπής. Διαθέτουν συνεπώς υψηλή φασματική πυκνότητα ισχύος (Power Spectral Density, PSD), όπως προκύπτει από την εξίσωση:

$$PSD = \frac{P}{B}$$

σε μονάδες Watts/Hz, όπου P η ισχύς εκπομπής (W) και B το εύρος ζώνης του εκπεμπόμενου σήματος (Hz). Τα σήματα UWB αντιθέτως, χαρακτηρίζονται από χαμηλή φασματική πυκνότητα

ισχύος ως αποτέλεσμα τόσο του μεγάλου εύρους ζώνης που διαθέτουν όσο και της χαμηλής ισχύος εκπομπής (όπως επιβάλλουν οι κατά τύπους ρυθμιστικές αρχές προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τυχόν παρεμβολές σε ήδη υπάρχοντα συστήματα).



Σχήμα 3-2: Σύγκριση φασματικής πυκνότητας ισχύος σημάτων UWB με συμβατικά σήματα, © P. Pagani et al.

Η χωρητικότητα ενός καναλιού προκύπτει από το θεώρημα Shannon-Hartley, σύμφωνα με το οποίο:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

όπου C η μέγιστη χωρητικότητα του καναλιού (bits/sec), B το εύρος ζώνης του καναλιού (Hz), S η ισχύς του σήματος (W) και N η ισχύς του θορύβου (W). Ο λόγος S/N αναφέρεται συνήθως ως σηματοθορυβικός λόγος (Signal-to-Noise Ratio, SNR) του καναλιού. Από την εξίσωση αυτή καθίσταται εμφανές ότι για την επίτευξη υψηλής χωρητικότητας καναλιού είτε θα πρέπει να αυξήσει κανείς το εύρος ζώνης B με το οποίο υπάρχει γραμμική εξάρτηση, είτε να βελτιώσει το σηματοθορυβικό λόγο (αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής), με τον οποίο υπάρχει λογαριθμική εξάρτηση. Τα σήματα UWB επομένως, έχοντας εξαιρετικά διευρυμένο φασματικό περιεχόμενο, είναι σε θέση να επιτύχουν (τουλάχιστον θεωρητικά) θεαματικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (της τάξεως των εκατοντάδων Mbps), ειδικά σε επικοινωνία μεταξύ μικρών αποστάσεων.

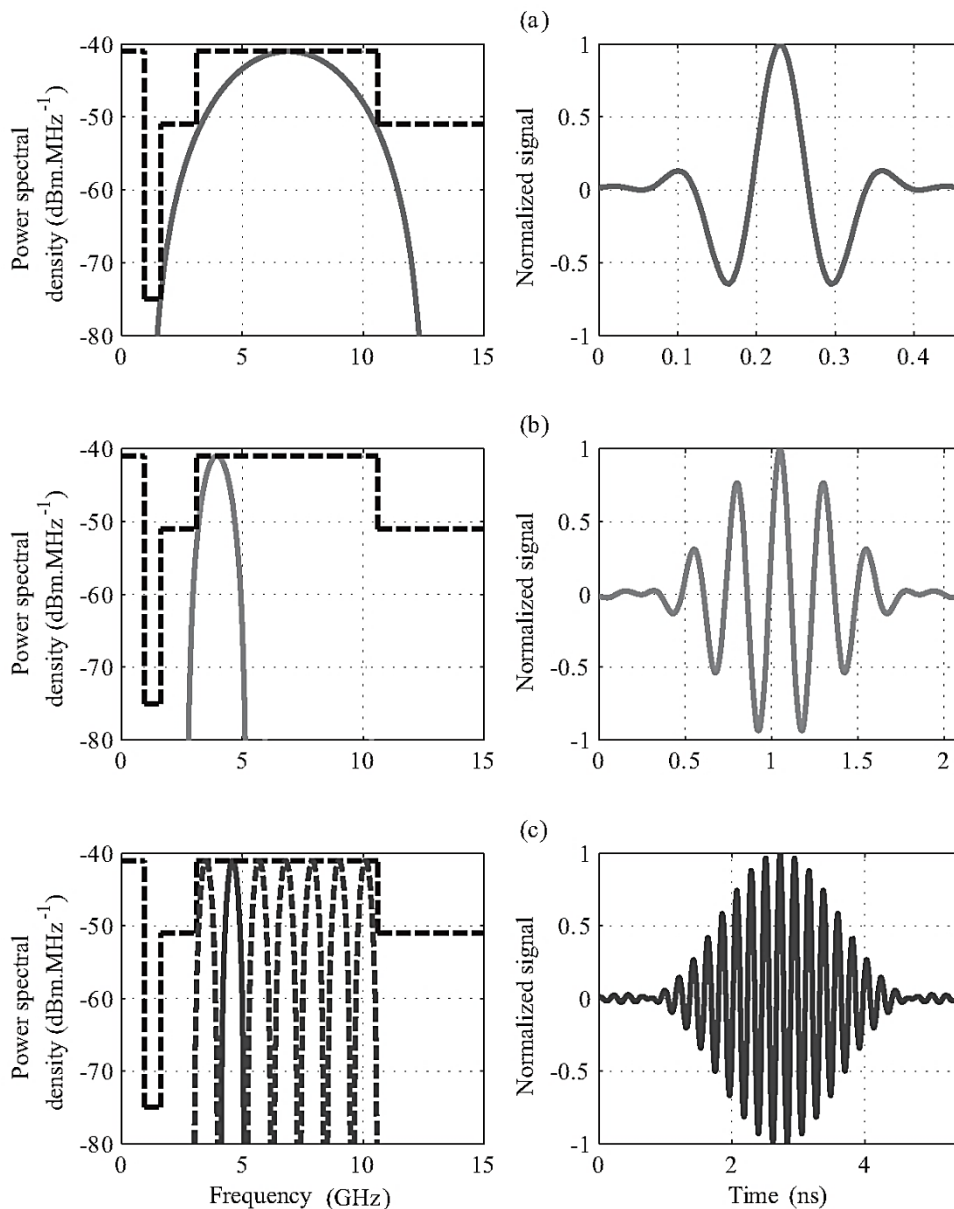
Σύστημα	Ισχύς εκπομπής	Εύρος ζώνης	PSD	Κατηγορία
Ραδιόφωνο	50 kW	75 KHz	666 600	Στενής ζώνης
Τηλεόραση	100 kW	6 MHz	16 700	Στενής ζώνης
Κυψελωτό 2G	500 mW	8.33 KHz	60	Στενής ζώνης
802.11a	1 W	20 MHz	0.05	Ευρείας ζώνης
UWB	0.5 mW	7.5 GHz	6.670×10^{-8}	Υπερ-ευρείας ζώνης

Πίνακας 3-1: Τυπικές παράμετροι συστημάτων ασύρματης επικοινωνίας, © M. Ghavami et al.

3.3.2 Κατηγορίες σημάτων UWB

Για τη σχεδίαση συστημάτων επικοινωνίας βασισμένων σε UWB μπορεί να επιστρεφεί πληθώρα διαφορετικών τεχνικών. Ανάλογα με τη μορφή του προκύπτοντος φάσματος μπορούν να διακριθούν δύο επιμέρους κατηγορίες, τα σήματα μονής ζώνης (single-band) και τα σήματα

πολλαπλής ζώνης (multi-band) ή πολλαπλών φορέων (multi-carrier).



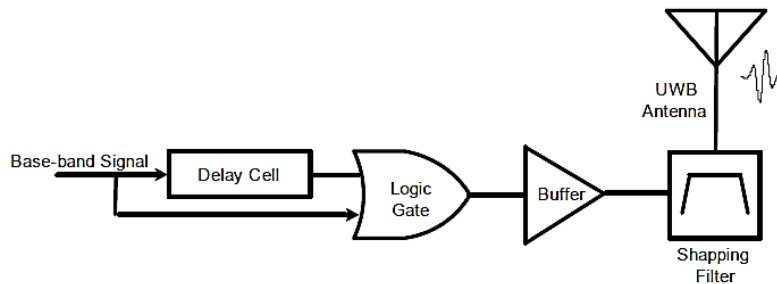
Σχήμα 3-3: Φάσματα συστημάτων UWB (a) μονής ζώνης χωρίς φέρον, (b) μονής ζώνης με φέρον, (c) πολλαπλής ζώνης, © P. Pagani et al.

3.3.2.1 Συστήματα μονής ζώνης (single-band)

Τα σήματα μονής ζώνης είναι συνήθως παλμικού τύπου (Impulse Radio UWB, IR-UWB) και μπορούν να διαιρεθούν σε παλμικά χωρίς φέρον (carrier-less IR-UWB) και παλμικά διαμορφωμένα κατά ημιτονοειδές φέρον (carrier-based IR-UWB). Φυσικά, είναι δυνατόν να παραχθούν σήματα υπερ-ευρείας ζώνης και με συμβατικές τεχνικές CDMA, χρησιμοποιώντας πολύ υψηλό ρυθμό κώδικα εξάπλωσης (chip rate) και άρα επιτυγχάνοντας πολύ αυξημένο συντελεστή εξάπλωσης (spreading factor). Λόγω της ομοιότητας ωστόσο που κατέχουν τα συστήματα CDMA υπερ-ευρείας ζώνης έναντι των συμβατικών συστημάτων CDMA στενής ζώνης, παρακάτω γίνεται εκτενέστερη ανάλυση μόνο για τα παλμικά συστήματα, τα οποία και είναι τα πλέον διαδεδομένα για παραγωγή σημάτων UWB.

3.3.2.1.1 Παλμικά συστήματα μονής ζώνης χωρίς φέρον (carrierless IR-UWB)

Στα συστήματα carrierless IR-UWB δε χρησιμοποιείται διαμόρφωση ημιτονικού φέροντος, σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα. Αντιθέτως, εκπέμπονται παλμοί πολύ μικρής διάρκειας, στη θέση, την πολικότητα ή το πλάτος των οποίων κωδικοποιείται η προς μετάδοση πληροφορία. Απουσιάζει έτσι η ανάγκη για τοπικούς ταλαντωτές, μείκτες και η υλοποίηση των πομπών απλουστεύεται σημαντικά, κρατώντας παράλληλα την κατανάλωση ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα. Οι παλμοί και οι διαμορφώσεις που συνήθως επιλέγονται αποτελούν αντικείμενο επόμενης παραγράφου.



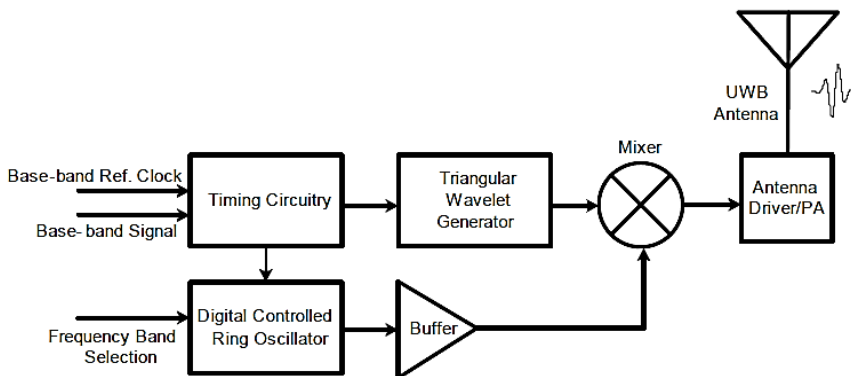
Σχήμα 3-4: Μπλοκ διάγραμμα τυπικού πομπού IR-UWB χωρίς φέρον, © Z. Zou

3.3.2.1.2 Παλμικά συστήματα μονής ζώνης με φέρον (carrier-based IR-UWB)

Εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί η μίξη παλμών με ημίτονο όχι πολύ μεγαλύτερης συχνότητας από το εύρος ζώνης αυτών. Ως αποτέλεσμα προκύπτει σήμα με περιβάλλουσα το σχήμα της οποίας καθορίζεται από τους χρησιμοποιούμενους παλμούς. Το σήμα είναι της μορφής:

$$s(t) = p(t)\cos(2\pi f_c t)$$

όπου $p(t)$ ο χρησιμοποιούμενος παλμός και f_c η συχνότητα του φέροντος. Η περιβάλλουσα συνήθως επιλέγεται τετραγωνική, τριγωνική, υπερυψωμένου συνημιτόνου ή γκαουσιανή. Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα προκειμένου να αποφεύγεται η δημιουργία ουρών απόσβεσης - ροζ θορύβου στο πεδίο της συχνότητας (οι κατά τόπους ρυθμιστικές αρχές απαγορεύουν τη χρήση αποσβεννύμενων κυμάτων από εκούσιους ακτινοβολητές λόγω ισχυρών παρεμβολών που δύνανται να προκαλέσουν σε υπάρχοντα συστήματα).



Σχήμα 3-5: Μπλοκ διάγραμμα τυπικού πομπού IR-UWB φέροντος, © Z. Zou

Όπως είναι αναμενόμενο, η πολυπλοκότητα και οι ενεργειακές απαιτήσεις αυτού του είδους των συστημάτων είναι υψηλότερες εν συγκρίσει με τα παλμικά συστήματα μονής ζώνης χωρίς φέρον.

Παρόλα αυτά, αυτό το είδος συστημάτων παρουσιάζει ενδιαφέροντα πλεονεκτήματα, όπως καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος (δυνατότητα ακριβούς επιλογής φασματικής ζώνης – fine tuning) και υποστήριξη δεκτών τεταρτημορίου (quadrature) αφού το λαμβανόμενο σήμα περιλαμβάνει πληροφορίες για τη φάση.

3.3.2.2 Συστήματα πολλαπλής ζώνης / πολλαπλού φέροντος (multiband / multicarrier UWB)

Εκτός από τα προαναφερθέντα συστήματα μονής ζώνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες τεχνικές προκειμένου να παραχθούν σήματα πολλαπλής ζώνης ή πολλαπλού φέροντος. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες είναι:

- ταυτόχρονη μετάδοση παλμών διαμορφωμένων από διαφορετικά φέροντα
- τεχνικές OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
- τεχνικές OFDM πολλαπλής ζώνης (Multi-Band OFDM, MB-OFDM)
- μεικτές τεχνικές OFDM-CDMA, όπως Multi-Carrier CDMA (MC-CDMA), Multi-Carrier DS-SS-CDMA και Multi-Tone CDMA (MT-CDMA).

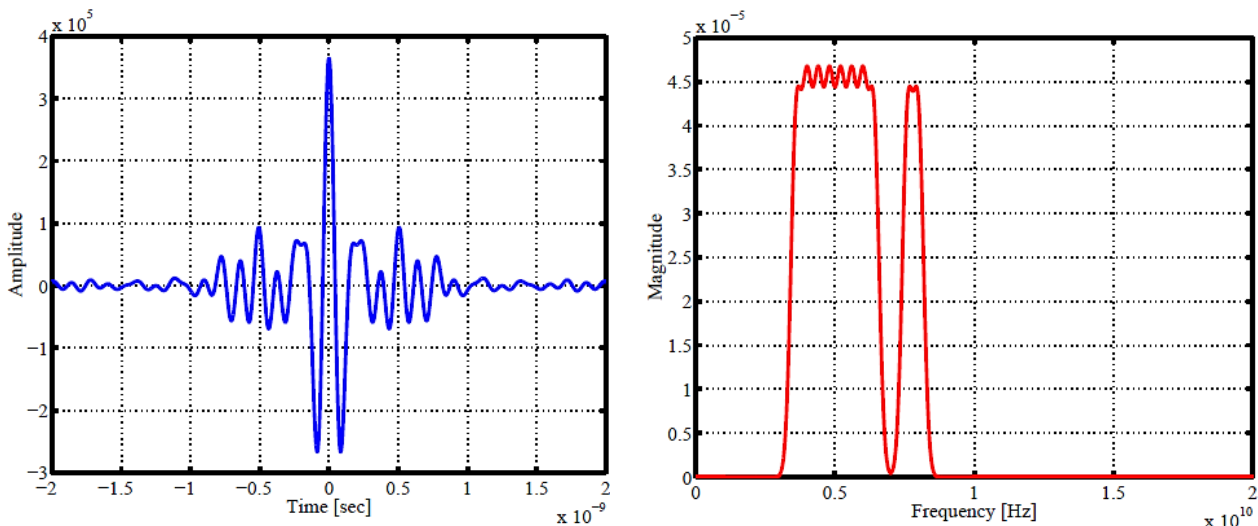
Σε κάθε περίπτωση το φασματικό περιεχόμενο πρέπει να προκύπτει μεγαλύτερο ή ίσο των 500 MHz προκειμένου το σήμα να θεωρείται UWB. Παρότι τα σχήματα αυτά δε χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ακολουθεί μια αδρομερής περιγραφή τους για λόγους πληρότητας.

3.3.2.2.1 Ταυτόχρονη μετάδοση παλμών διαμορφωμένων από διαφορετικά φέροντα

Σήματα UWB πολλαπλής ζώνης δύνανται να προκύψουν από ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων του ενός παλμικών σημάτων, διαμορφωμένων με διαφορετικό φέρον το καθένα, ως εξής:

$$s(t) = \sum_{i=1}^N s_i(t) = \sum_{i=1}^N p(t) \cos(2\pi f_{c,i}t) = p(t) \sum_{i=1}^N \cos(2\pi f_{c,i}t)$$

όπου N το πλήθος των διαφορετικών σημάτων, $p(t)$ ο χρησιμοποιούμενος παλμός και $f_{c,i}$ η συχνότητα του φέροντος για τη διαμόρφωση του i -οστού σήματος.

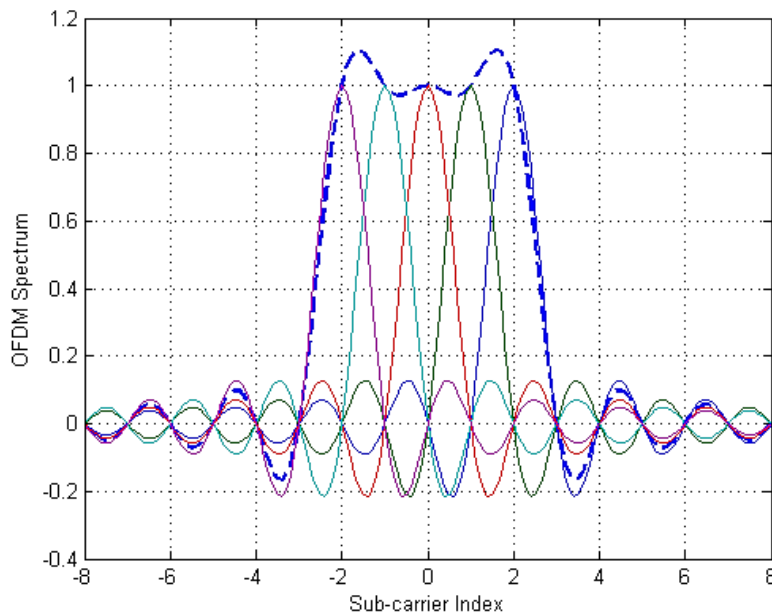


Σχήμα 3-6: Ταυτόχρονη μετάδοση γκαουσιανών παλμών διάρκειας $\tau=1.2$ ns διαμορφωμένων κατά $f_c = 3.6, 4, 4.4, 4.8, 5.2, 5.6, 6, 6.4, 7.6, 8$ GHz,
© M. Ghavami et al.

Σε κάθε σήμα (ζώνη) αντιστοιχεί μετάδοση διαφορετικού συμβόλου, επιτυγχάνοντας έτσι πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης ή δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης. Στο δέκτη τα διαφορετικά σήματα θα πρέπει φυσικά να διαχωρισθούν προτού μπορέσουν να αποδιαμορφωθούν.

3.3.2.2 Τεχνικές OFDM

Σύμφωνα με την τεχνική μετάδοσης OFDM, ένα κανάλι διαμερίζεται σε N επιμέρους υπο-κανάλια (subchannels) στα οποία πολυπλέκονται και μεταδίδονται παράλληλα N ροές δεδομένων. Ο ρυθμός μετάδοσης σε καθένα από τα υπο-κανάλια είναι πολύ μικρότερος του συνολικού ρυθμού μετάδοσης ($R_N = R/N$, όπου R_N ο ρυθμός μετάδοσης σε κάθε υπο-κανάλι και R ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης) και έτσι, το εύρος ζώνης που αντιστοιχεί σε κάθε υπο-κανάλι αποτελεί ένα μόνο μέρος του συνολικού εύρους ζώνης του συστήματος. Αν επομένως το πλήθος των υπο-καναλιών επιλεγεί κατάλληλα, οδηγώντας σε υπο-κανάλια εύρους ζώνης μικρότερου από το εύρος ζώνης συνοχής (coherence bandwidth), είναι δυνατό να αποφευχθούν συχνοεπιλεκτικές διαλλείψεις (frequency selective fading). Αξίζει να σημειωθεί ότι η τεχνική OFDM δεν απαιτεί αναγκαστικά φασματική γειτονία των καναλιών και άρα για μετάδοση με υψηλούς ρυθμούς μπορούν να χρησιμοποιηθούν ασυνεχείς περιοχές του φάσματος.



Σχήμα 3-7: Το προκύπτον φάσμα χρησιμοποιώντας τεχνική OFDM, © Nutaq Inc.

Σε κάθε ένα από τα υπο-κανάλια για τη μετάδοση χρησιμοποιείται κατάλληλο υπο-φέρον (subcarrier), ως εξής:

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \varphi_k(t), \quad 0 < t < T_N$$

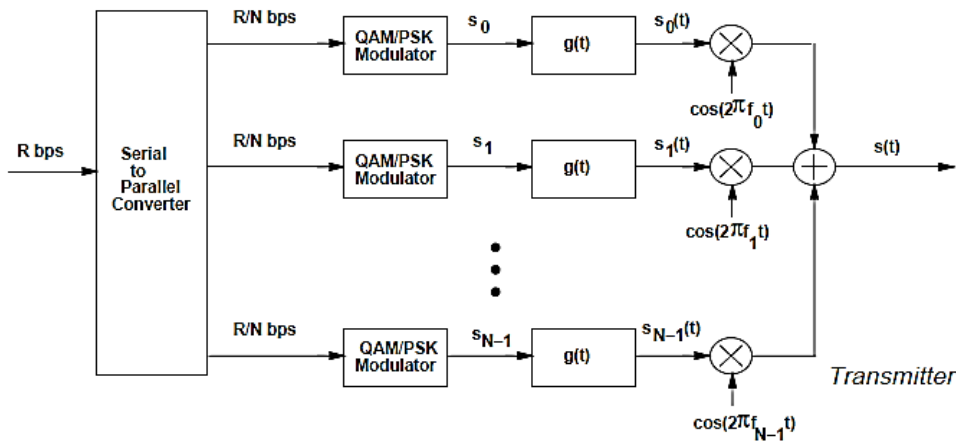
όπου N το πλήθος των υπο-καναλιών, x_k μιγαδικό σύμβολο διάρκειας T_N προς μετάδοση στο k -οστό υπο-φέρον (συνήθως προερχόμενο από διαμόρφωση QPSK) και φ_k το k -οστό υπο-φέρον:

$$\varphi_k(t) = e^{j2\pi f_k t}$$

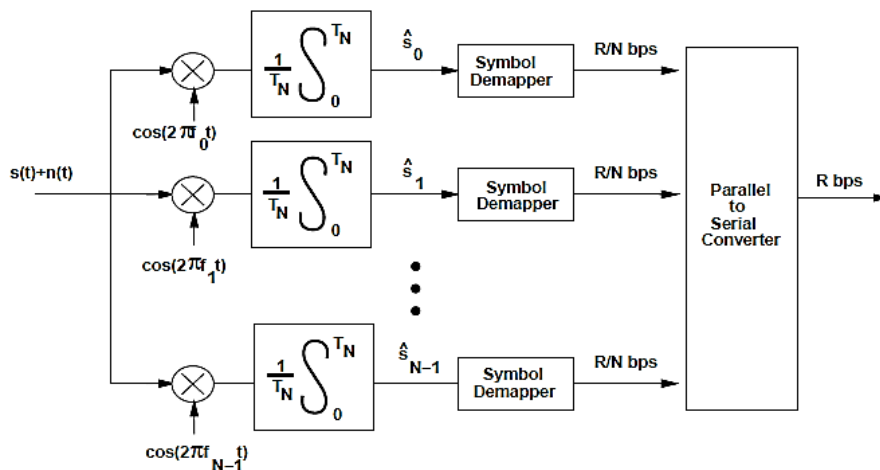
όπου f_k η συχνότητα του k -οστού υπο-φέροντος. Οι συχνότητες f_k προκύπτουν συνήθως ως

$$f_k = \frac{k}{T_N}$$

καθιστώντας τα υπο-φέροντα $\phi_k(t)$ ορθογώνια μεταξύ τους στο διάστημα $0 < t < T_N$. Τα επιμέρους υπο-φέροντα ϕ_k συνιστούν δηλαδή ορθοκανονικές συναρτήσεις βάσης, ενώ είναι εύκολο να δειχθεί ότι δεν υπάρχει σύνολο ορθογωνίων υπο-φερόντων με μικρότερη συχνότητα διαχωρισμού στο $[0, T_N]$.



Σχήμα 3-8: Τυπική αρχιτεκτονική πομπού OFDM, © A. Goldsmith

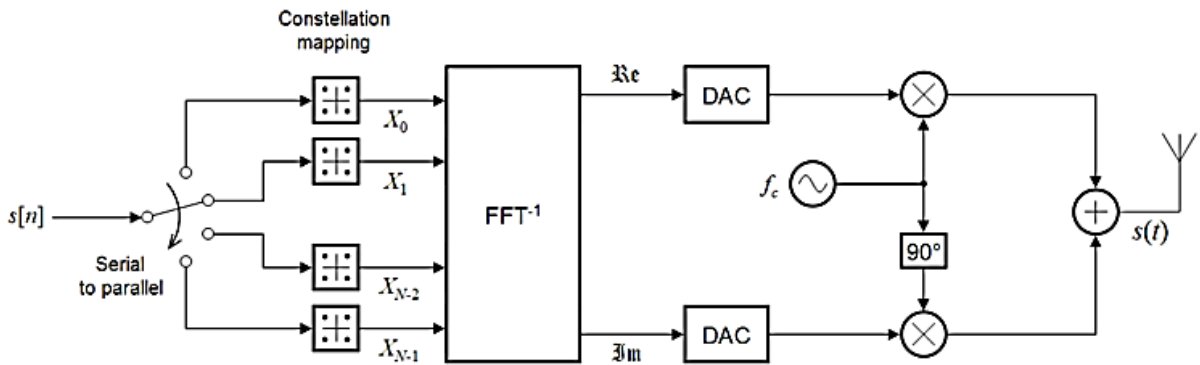


Σχήμα 3-9: Τυπική αρχιτεκτονική δέκτη OFDM, © A. Goldsmith

Συνήθως τα συστήματα OFDM υλοποιούνται ως εξής: Η σειριακή ροή δεδομένων μετασχηματίζεται από έναν μετατροπέα serial-to-parallel σε N παράλληλες ροές (όπου N το πλήθος των υπο-καναλιών) και κάθε μία από αυτές διαμορφώνεται σύμφωνα με κάποιο σχήμα PSK ή QAM. Ως αποτέλεσμα προκύπτει μια παράλληλη ροή μιγαδικών συμβόλων X_k , καθένα εκ των οποίων καλείται να μεταδοθεί στο αντίστοιχο υπο-κάνάλι. Προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση ξεχωριστών τοπικών ταλαντωτών για κάθε υπό-κάνάλι, επιστρατεύονται υλοποιήσεις σε hardware του αντιστρόφου μετασχηματισμού Fourier (IFFT). Η παράλληλη ροή συμβόλων υπόκειται συνεπώς σε IFFT στον οποίο κάθε σύμβολο αντιπροσωπεύει το πλάτος ενός bin και με την εφαρμογή του οποίου προκύπτουν N χρονικά δείγματα ως παράλληλη ροή. Τα δείγματα αυτά αντιπροσωπεύουν για δεδομένη χρονική στιγμή το άθροισμα των επιμέρους διαμορφωμένων συμβόλων κάθε υποκαναλιού και απέχουν T_N/N δευτερόλεπτα μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας μετατροπέα parallel-to-serial η παράλληλη ροή χρονικών δειγμάτων μετασχηματίζεται σε σειριακή, όπου τα χρονικά δείγματα έχουν τοποθετηθεί σε κατάλληλη σειρά για να μεταδοθούν. Το προκύπτον σήμα βασικής ζώνης είναι επομένως:

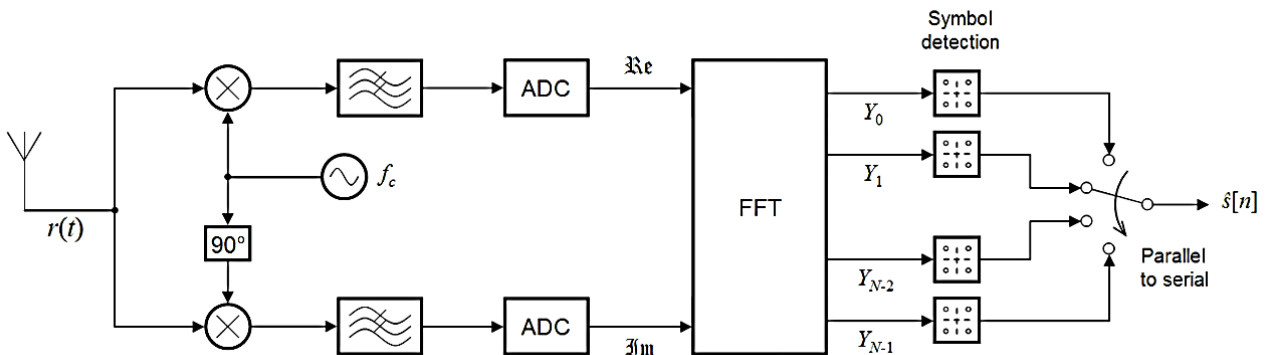
$$x(t) = x(nT_s) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi \frac{k}{N} nT_s}$$

Όπου $n=0, \dots, N-1$ το n -οστό δείγμα ενός συμβόλου και $T_s = T_N/N$ η διάρκεια δειγματοληψίας. Τέλος, παράγονται οι I και Q αναλογικές κυματομορφές χρήσει DAC και μεταφέρονται στην επιθυμητή ζώνη μετά απο μείξη με κατάλληλο φέρον. Στα παραπάνω έχει αγνοηθεί τυχόν ανάδευση (interleaving), προσθήκη κυκλικού προθέματος (cyclic prefix) ή διαστήματος προστασίας (guard interval) για ελαχιστοποίηση φαινομένων διασυμβολικής παρεμβολής (ISI).



Σχήμα 3-10: Μπλοκ διάγραμμα πομπού OFDM,
© O. Filth

Ο δέκτης, εκμεταλλευόμενος την ορθογωνιότητα μεταξύ των επιμέρους υπο-καναλιών αφού υποβιβάσει το σήμα στη βασική ζώνη και το μετατρέψει σε ψηφιακές κυματομορφές I και Q, αφαιρεί τυχόν κυκλικό πρόθεμα ή διάστημα προστασίας, μετατρέπει τη σειριακή ροή δεδομένων σε N παράλληλες ροές, εκτελεί μετασχηματισμό Fourier (FFT), μετατρέπει τις παράλληλες ροές σε σειριακή ροή και αποδιαμορφώνει ανάλογα με το επιλεγέν σχήμα (π.χ. PSK, QAM).



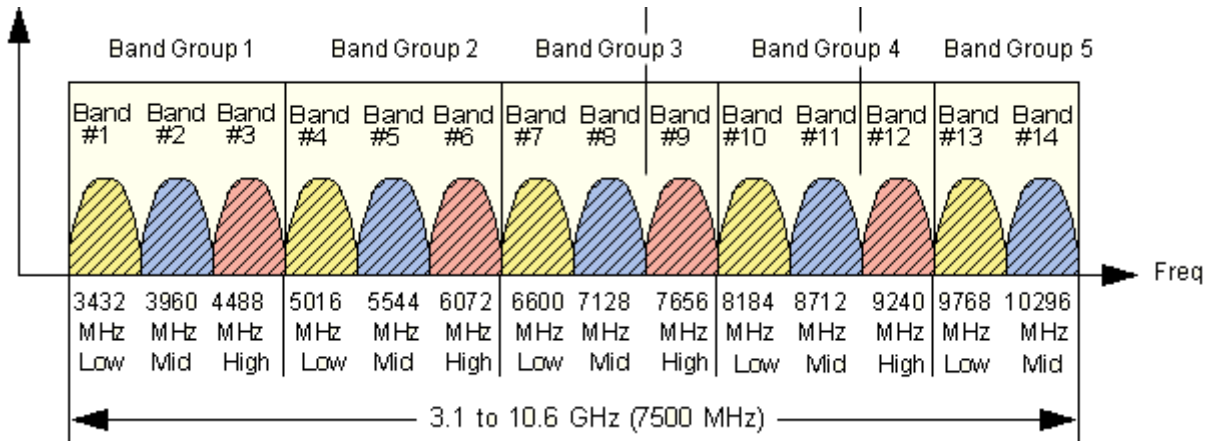
Σχήμα 3-11: Μπλοκ διάγραμμα δέκτη OFDM,
© O. Filth

Προκειμένου το σύστημα OFDM να θεωρηθεί UWB θα πρέπει το συνολικά χρησιμοποιούμενο εύρος ζώνης να ξεπερνά τα 500MHz. Αυτό πρακτικά μπορεί να επιτευχθεί:

- χρησιμοποιώντας πολύ μεγάλο πλήθος υπο-καναλιών ή
- χρησιμοποιώντας υπο-κανάλια αρκούντος μεγάλου εύρους ζώνης έκαστο ή
- συνδυασμός των παραπάνω

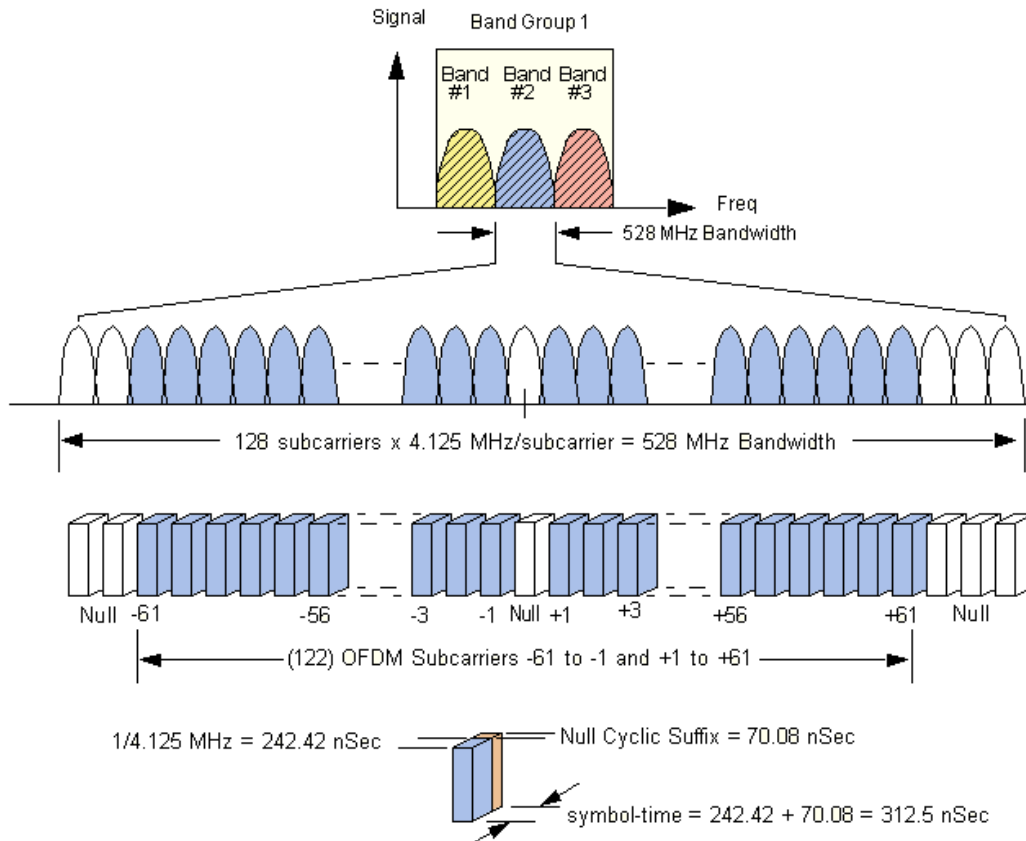
3.3.2.2.3 Τεχνικές OFDM πολλαπλής ζώνης (MB-OFDM)

Το MB-OFDM αποτελεί μια επέκταση του συμβατικού OFDM και προτάθηκε από τις ενώσεις κατασκευαστών MultiBand OFDM Alliance (MBOA) και WiMedia Alliance για χρήση σε επικοινωνίες UWB. Σύμφωνα με αυτό, το διαθέσιμο φάσμα διαιρείται σε 14 επιμέρους υπο-ζώνες (subbands) των 528 MHz έκαστη, οι οποίες ομαδοποιούνται σχηματίζοντας 5 ομάδες και οι συσκευές έχουν τη δυνατότητα στατικής ή δυναμικής επιλογής των υπο-ζωνών που θα χρησιμοποιήσουν κατά τη μετάδοση.



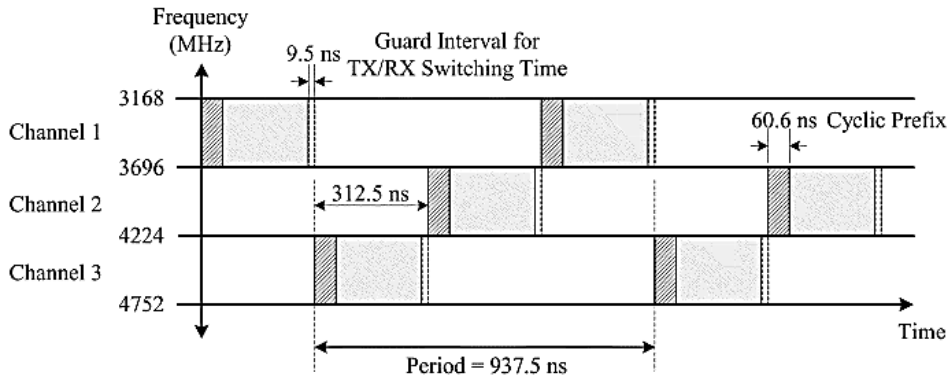
Σχήμα 3-12: Η διαίρεση του φάσματος σε υπο-ζώνες και ομάδες, © Agilent Technologies, Inc

Σε κάθε υποζώνη εφαρμόζεται διαμόρφωση OFDM όπου η προς μετάδοση πληροφορία κατανέμεται σε περισσότερα από 100 υπό-φέροντα στενού εύρους ζώνης (τυπική τιμή 128). Για κάθε φέρον η πληροφορία μπορεί να διαμορφωθεί σύμφωνα με BPSK, QPSK ή QAM (συνήθως επιλέγεται QPSK).



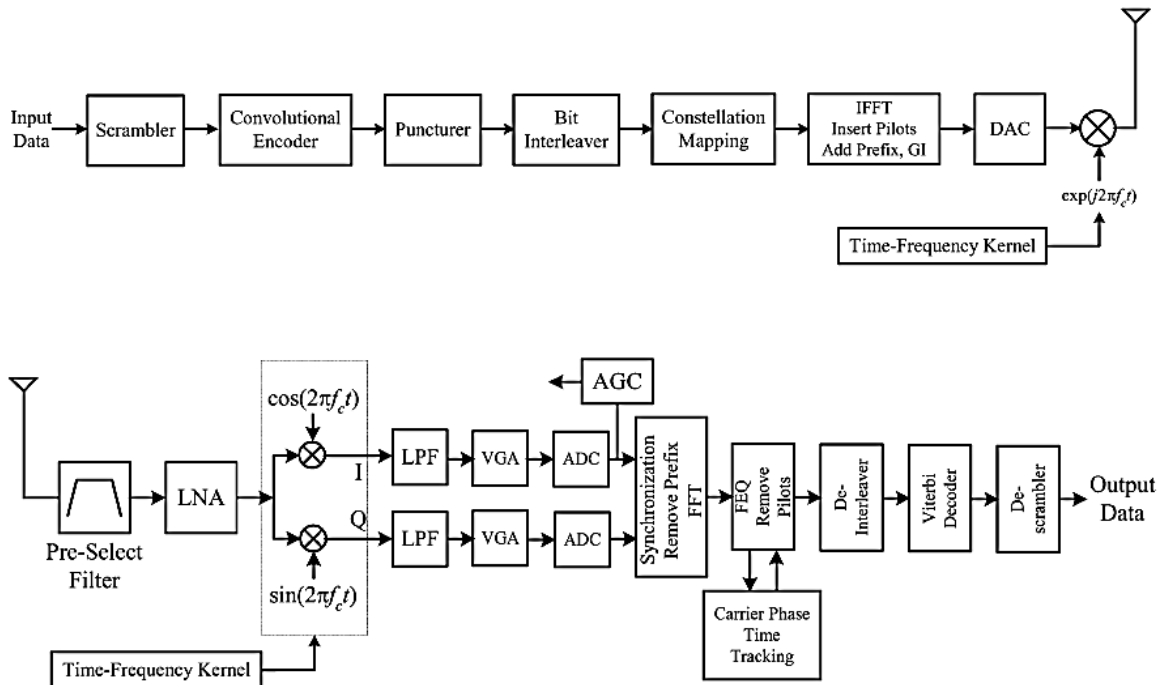
Σχήμα 3-13: Μετάδοση συμβόλου OFDM σε μία υπο-ζώνη, © Agilent Technologies, Inc

Το συγκριτικό πλεονέκτημα του MB-OFDM έναντι του συμβατικού OFDM έγκειται στη δυνατότητα δυναμικής διαπήδησης υπο-ζωνών (sub-band hopping) σύμφωνα με κάποιο κώδικα χρόνου-συχρότητας (Time-Frequency Code, TFC). Στο επόμενο σχήμα γίνεται αντιληπτή η δυνατότητα που παρέχει ένας κώδικας TFC μέσω παραδείγματος: το πρώτο OFDM σύμβολο μεταδίδεται στην υπο-ζώνη 1, το δεύτερο στην υπο-ζώνη 3, το τρίτο στην υπο-ζώνη 2, το τέταρτο στην υπο-ζώνη 1 κ.ο.κ.



Σχήμα 3-14: Παράδειγμα εφαρμογής κώδικα TFC σε σύστημα MB-OFDM, © A. Batra et al.

Για λόγους απλότητας στο συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιούνται μόνο τρεις υπο-ζώνες, ωστόσο στην πράξη ο TFC μπορεί να είναι αρκετά πιο πολύπλοκος και το πλήθος των χρησιμοποιούμενων υπο-ζωνών πολύ μεγαλύτερο. Παρέχεται κατ' αυτόν τον τρόπο η δυνατότητα διαφορισμού στο πεδίο της συχνότητας (frequency diversity) αλλά και η δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης με κατάλληλη χρήση TFC σε κάθε χρήστη.



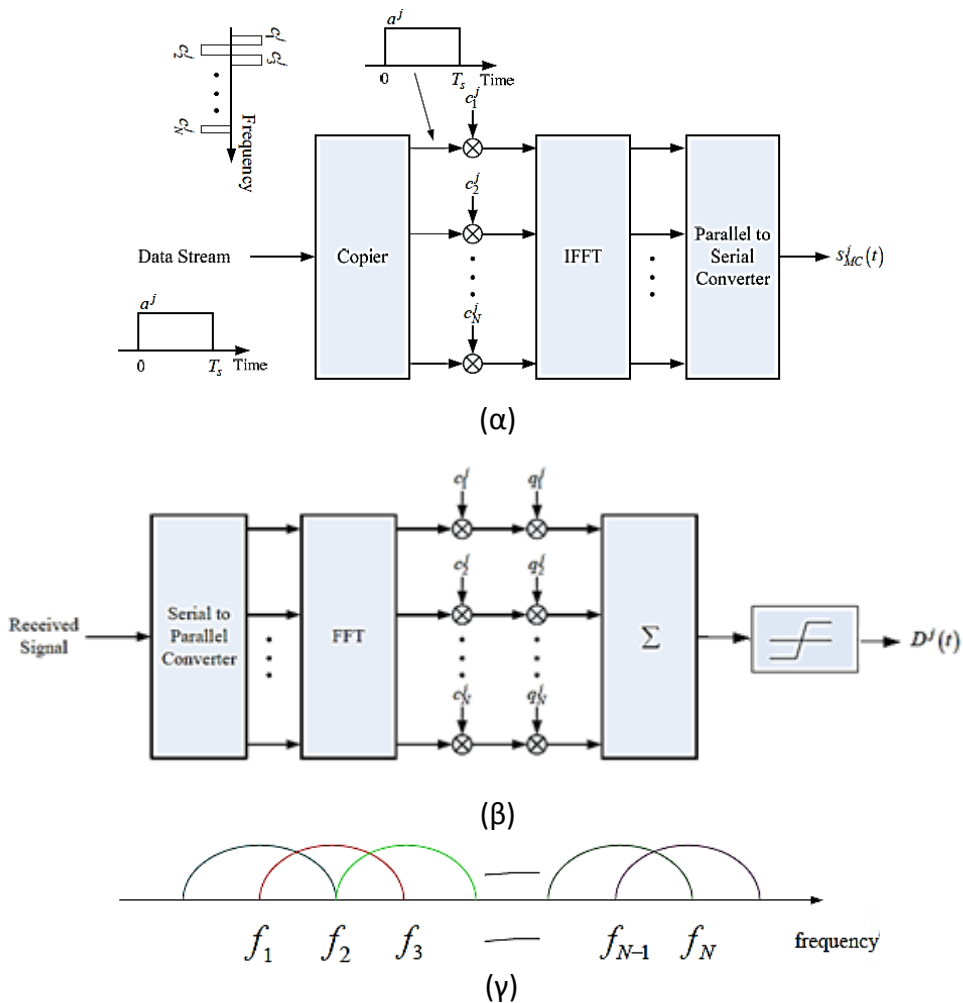
Σχήμα 3-15: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής πομπού και δέκτη συστήματος MB-OFDM, © A. Batra et al.

3.3.2.2.4 Μεικτές τεχνικές OFDM-CDMA

Οι προαναφερθείσες τεχνικές OFDM είναι δυνατόν να συνδυαστούν με τεχνικές CDMA, προκειμένου να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη ανοχή σε συχνοεπιλεκτικά κανάλια, καθώς και

δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλής πρόσβασης. Οι τεχνικές αυτές είναι το CDMA πολλαπλών φερόντων (Multi-Carrier CDMA, MC-CDMA), το DS-CDMA πολλαπλών φερόντων (Multicarrier DS-CDMA, MC-DS-CDMA) και το CDMA πολλαπλών τόνων (Multi-Tone CDMA, MT-CDMA).

Στο MC-CDMA το προς μετάδοση σύμβολο πολλαπλασιάζεται με κατάλληλη ακολουθία εξάπλωσης μήκους $G_{MC} = N_c$ (όπου N_c το πλήθος των υπο-φερόντων) και κάθε προκύπτον υποσύμβολο (chip) διαμορφώνεται σε διαφορετικό υπο-φέρον. Ουσιαστικά πρόκειται για εξάπλωση στο πεδίο της συχνότητας. Η διάρκεια του μεταφερόμενου σε κάθε υπο-φέρον συμβόλου (chip) T_c είναι ίση με τη διάρκεια του αρχικού συμβόλου T_s , ώστε ο τελικά προκύπτον ρυθμός μετάδοσης να παραμένει ίδιος πριν και μετά τη διαμόρφωση. Οι συχνότητες διαδοχικών υπο-φερόντων απέχουν κατά $\Delta f = 1/T_s$ προκειμένου να εξασφαλισθεί η μεταξύ τους ορθογωνιότητα.



Σχήμα 3-16: Παράδειγμα συστήματος MC-CDMA, (α) πομπός, (β) δέκτης, (γ) προκύπτον φάσμα, © S. Hara et al.

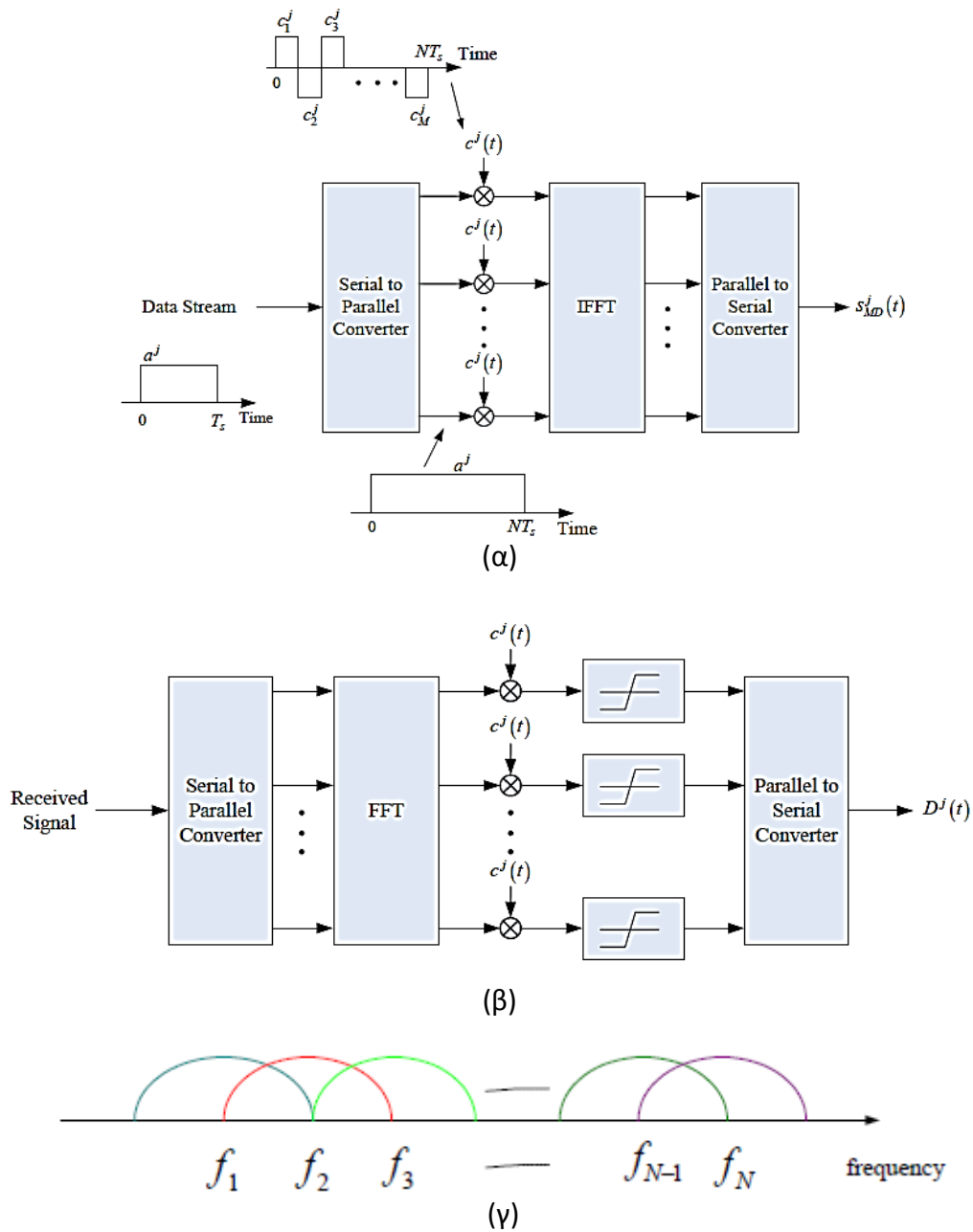
Το μεταδιδόμενο κατά MC-CDMA σήμα για τον j-οστό χρήστη περιγράφεται από την εξίσωση:

$$s_{MC}^j(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=1}^{G_{MC}} a^j(i) c_m^j p_s(t - iT_s) \cos\{2\pi(f_0 + m\Delta f)t\},$$

όπου $\Delta f (=1/T_s)$ η απόσταση μεταξύ υπο-φερόντων και $p_s(t)$ η κυματομορφή του χρησιμοποιούμενου παλμού θεωρούμενη τετραγωνική:

$$p_s(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_s \\ 0, & \text{άλλως} \end{cases}$$

Στο MC-DS-CDMA η σειριακή ροή δεδομένων (συμβόλων) μετατρέπεται σε N_c παράλληλες ροές (όπου N_c το πλήθος των υπο-φερόντων) σε κάθε μία εκ των οποίων εφαρμόζεται κώδικας εξάπλωσης επιθυμητού μήκους G_{MD} . Κατόπιν, κάθε ροή διαμορφώνεται στο κατάλληλο υπο-φέρον για μετάδοση. Η διάρκεια του μεταδιδόμενου συμβόλου σε κάθε υπο-φέρον (πριν την εφαρμογή του κώδικα εξάπλωσης) είναι ίση με $N_c \cdot T_s$, όπου T_s η διάρκεια του συμβόλου πριν την παραλληλοποίηση. Η διάρκεια κάθε υποσυμβόλου (chip) μετά την εφαρμογή του κώδικα εξάπλωσης προκύπτει $N_c \cdot T_s / G_{MD}$, ενώ η απόσταση μεταξύ διαδοχικών υπο-φερόντων τίθεται ίση με $1/T_c$ προκειμένου να εξασφαλισθεί η ορθογωνιότητά τους.



Σχήμα 3-17: Παράδειγμα συστήματος MC-DS-CDMA, (α) πομπός, (β) δέκτης, (γ) προκύπτον φάσμα, © S. Hara et al.

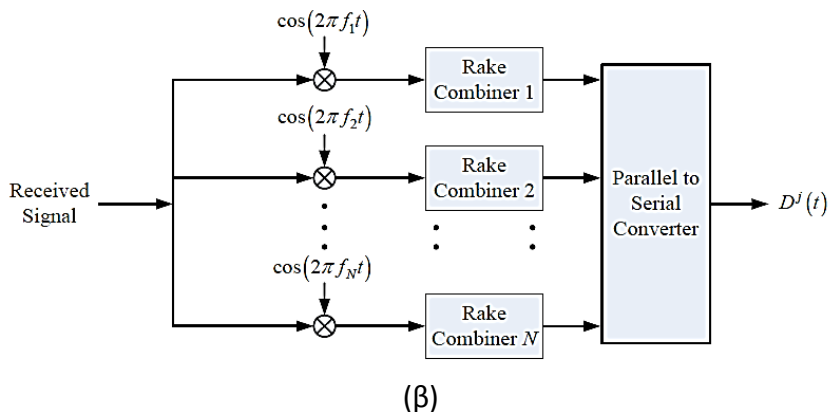
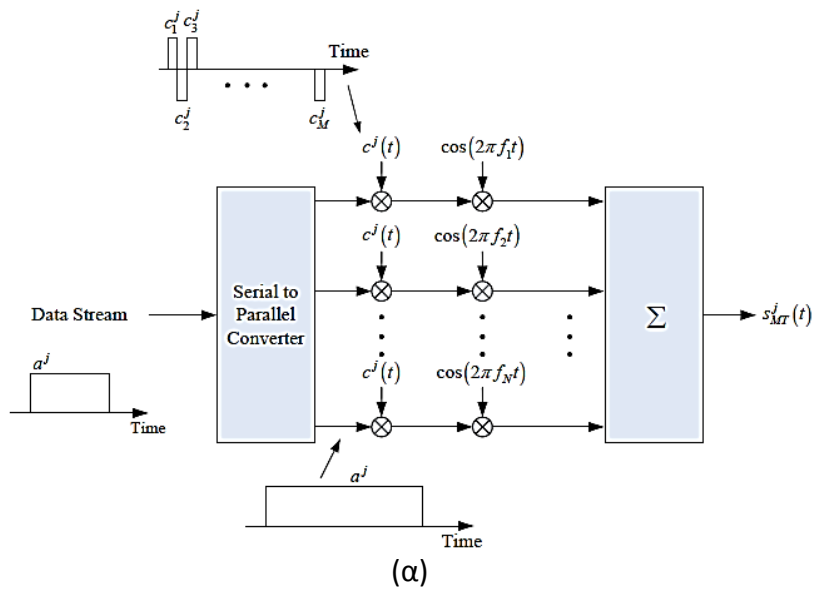
Το μεταδιδόμενο κατά MC-DS-CDMA σήμα για τον j -οστό χρήστη περιγράφεται από την εξίσωση:

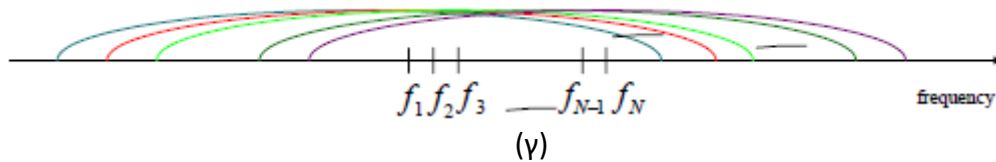
$$s_{MD}^j(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{m=1}^{G_{MD}} b_k^j(i) c_m^j p_c(t - (m - 1)T_c - iT_s') \cos\{2\pi(f_0 + k\Delta f')t\},$$

όπου b_k^j το προς μετάδοση σύμβολο στο k -οστό υπο-φέρον (διάρκειας $T_s'=N_cT_s$, όπου T_s η διάρκεια του συμβόλου πριν την παραλληλοποίηση), $\Delta f'$ ($=1/T_c$) η απόσταση μεταξύ υπο-φερόντων, T_c η διάρκεια του υποσυμβόλου (chip) μετά την εφαρμογή του κώδικα εξάπλωσης ($T_c=N_cT_s/G_{MD}$) και $p_c(t)$ η κυματομορφή του χρησιμοποιούμενου παλμού θεωρούμενη τετραγωνική:

$$p_c(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_c \\ 0, & \text{άλλως} \end{cases}$$

Το *MT-CDMA* αποτελεί τεχνική παρόμοια με το *MC-DS-CDMA*, ωστόσο παρουσιάζει δύο ουσιαστικές διαφορές. Αφενός μεν ο χρησιμοποιούμενος κώδικας εξάπλωσης G_{MT} έχει πολύ μεγαλύτερο μήκος από τον αντίστοιχο G_{MD} ($G_{MT} = N_c G_{MD}$) και αφετέρου τα υπο-φέροντα παύουν να είναι ορθογώνια μετά την εφαρμογή του κώδικα εξάπλωσης (είναι ορθογώνια πριν την εφαρμογή του, όχι όμως και μετά). Η έλλειψη ορθογωνιότητας συνίσταται στο γεγονός ότι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών υπο-φερόντων επιλέγεται μικρότερη εν συγκρίσει με το *MC-DS-CDMA* και πιο συγκεκριμένα ίση με $1/T_s$ (όπου T_s η διάρκεια συμβόλου στο κάθε υπο-φέρον) και όχι $1/T_c$ (όπου T_c η διάρκεια του chip σε κάθε υπό-φέρον μετά την εφαρμογή του κώδικα). Η απουσία ορθογωνιότητας μεταξύ των υπο-φερόντων δύναται να προκαλέσει προβλήματα *Inter-Carrier Interference (ICI)*, παρόλα αυτά, η χρήση πολύ μεγαλύτερου μήκους κώδικα εξάπλωσης επιτρέπει τη φιλοξενία περισσότερων ταυτόχρονων χρηστών στο σύστημα (βελτιωμένα χαρακτηριστικά πολλαπλής πρόσβασης).





Σχήμα 3-18: Παράδειγμα συστήματος MT-CDMA, (α) πομπός, (β) δέκτης, (γ) προκύπτον φάσμα, © S. Hara et al.

Το μεταδιδόμενο κατά MC-DS-CDMA σήμα για τον j-οστό χρήστη περιγράφεται από την εξίσωση:

$$s_{MD}^j(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=1}^{N_c} \sum_{m=1}^{G_{MT}} b_k^j(i) c_m^j p_c(t - (m - 1)T_c - iT_s') \cos\{2\pi(f_0 + k\Delta f'')t\},$$

όπου b_k^j το προς μετάδοση σύμβολο στο k-οστό υπο-φέρον (διάρκειας $T_s' = N_c T_s$, όπου T_s η διάρκεια του συμβόλου πριν την παραλληλοποίηση), $\Delta f'' (=1/T_s)$ η απόσταση μεταξύ υπο-φερόντων), T_c η διάρκεια του υποσυμβόλου (chip) μετά την εφαρμογή του κώδικα εξάπλωσης ($T_c = N_c T_s / G_{MT}$) και $p_c(t)$ η κυματομορφή του χρησιμοποιούμενου παλμού θεωρούμενη τετραγωνική:

$$p_c(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_c \\ 0, & \text{άλλως} \end{cases}$$

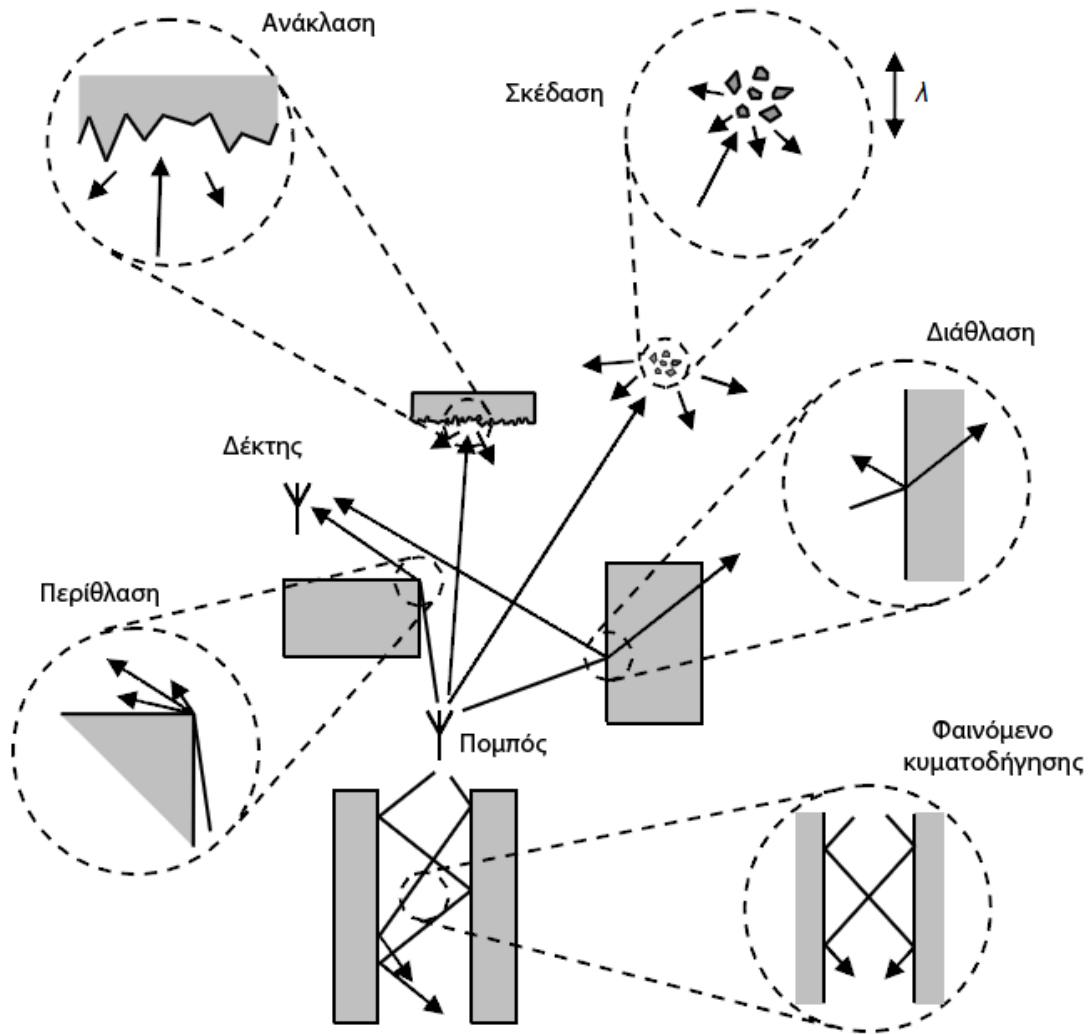
	DS-CDMA	MC-CDMA	MC-DS-CDMA	MT-CDMA
Διάρκεια συμβόλου στο υπο-φέρον	T_s	$N_c T_s / G_{MC}$	$N_c T_s$	$N_c T_s$
Πλήθος υπο-φερόντων	1	$N_c (=G_{MC})$	N_c	N_c
Κέρδος επεξεργασίας	G_{DS}	$G_{MC} \approx G_{DS}$	$G_{MD} = G_{DS}$	$G_{MT} = N_c G_{DS}$
Διάρκεια chip	T_s / G_{DS}	-	$N_c T_s / G_{MD}$	$N_c T_s / G_{MT}$
Απόσταση υπο-φερόντων	-	$1/T_s$	$G_{DS} / N_c T_s$	$1/N_c T_s$
Απαιτούμενο εύρος ζώνης	G_{DS} / T_s (χρησιμ. φίλτρο Nyquist με συντελ. roll-off = 0)	$(N_c + 1) / N_c \cdot G_{MC} / T_s$	$(N_c + 1) / N_c \cdot G_{MD} / T_s$	$(N_c - 1 + 2G_{MT}) / N_c T_s$

Πίνακας 3-2: Σύγκριση των επιμέρους τεχνικών CDMA ενός φέροντος και πολλαπλών υπο-φερόντων, © S. Hara et al.

3.4 Το κανάλι στις επικοινωνίες UWB

3.4.1 Γενική μοντελοποίηση του ασυρμάτου καναλιού

Η σχεδίαση συστημάτων επικοινωνίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τα χαρακτηριστικά του ασυρμάτου διαύλου, η γνώση του οποίου είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη προδιαγραφών και αρχιτεκτονικών. Σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον, το μεταδιδόμενο σήμα υφίσταται εξασθένηση, ανακλάσεις, διάθλαση, περίθλαση, σκέδαση. Αποτέλεσμα είναι στο δέκτη να φθάνει μια εξασθενημένη και παραμορφωμένη εκδοχή του αρχικά μεταδοθέντος σήματος.



Σχήμα 3-19: Μηχανισμοί διάδοσης,
© P. Pagani et al.

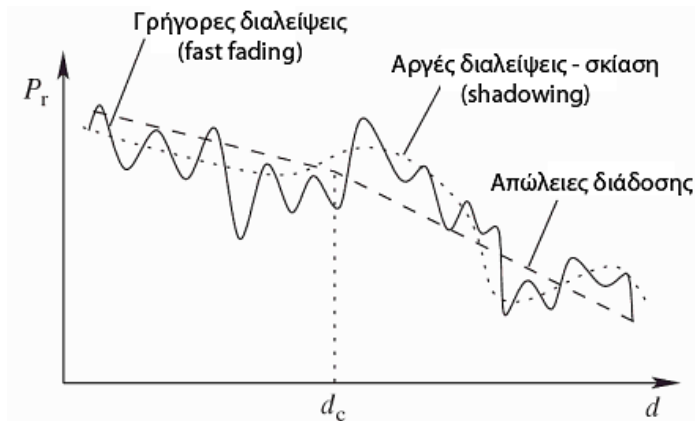
Το ασύρματο κανάλι μπορεί να θεωρηθεί ως φίλτρο το οποίο μετασχηματίζει το σήμα εισόδου στην έξοδο σε μια παραμορφωμένη εκδοχή του, σύμφωνα με τη συνάρτηση μεταφοράς που το διέπει. Συνήθως για την περιγραφή της συμπεριφοράς του επιστρατεύεται κάποιο μοντέλο συνοδευόμενο κατά περίπτωση από ένα σετ παραμέτρων, ενώ η μοντελοποίηση μπορεί να είναι είτε ντετερμινιστική είτε στατιστική.

Τα ντετερμινιστικά μοντέλα χρησιμοποιούν υπολογιστικές τεχνικές ray tracing για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του καναλιού ανάλογα με τα φυσικά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και των πομποδεκτών και χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλη ακρίβεια. Ωστόσο, απαιτούν πλήρη γνώση των φυσικών χαρακτηριστικών και της γεωμετρίας του χώρου και διέπονται από μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα η οποία συχνά τα καθιστά δύσχρηστα. Επιπλέον, η όποια μοντελοποίηση αφορά αποκλειστικά ένα συγκεκριμένο περιβάλλον και δεν μπορεί να γενικευθεί σε άλλα περιβάλλοντα του ίδιου τύπου (λ.χ. οικιακά περιβάλλοντα εσωτερικού χώρου). Η ντετερμινιστική προσέγγιση ακολουθείται σε περιπτώσεις όπου το περιβάλλον λειτουργίας του συστήματος είναι σταθερό, γνωστό εκ των προτέρων και η απαιτούμενη ακρίβεια των όποιων εκτιμήσεων είναι ιδιαίτερως αυξημένη.

Μια άλλη προσέγγιση αποτελεί η στατιστική μοντελοποίηση του καναλιού. Στη στατιστική μοντελοποίηση, η εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός καναλιού γίνεται ανεξάρτητα από την ακριβή

γεωμετρία του περιβάλλοντος χώρου. Αντ' αυτού, πραγματοποιείται κατηγοριοποίηση πιθανών περιβαλλόντων εφαρμογής με κοινά χαρακτηριστικά και περιγραφή τους από κατάλληλα στατιστικά μοντέλα και παραμέτρους. Τα μοντέλα αυτά προκύπτουν μετά από συλλογή πλειάδας μετρήσεων, επεξεργασίας τους και αντιστοίχισής τους σε κατάλληλες στατιστικές κατανομές. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα στατιστικά μοντέλα δεν είναι ακριβή όσο τα ντετερμινιστικά, είναι όμως ευκολότερα διαχειρίσιμα μαθηματικώς και χρησιμοποιούνται ευρέως στην προσομοίωση συστημάτων.

Στη μοντελοποίηση του καναλιού συνήθως λαμβάνονται υπόψη δυο ειδών φαινόμενα: τα μακροσκοπικά (large-scale) και τα μικροσκοπικά (small-scale). Τα μακροσκοπικά φαινόμενα αφορούν την εξασθένηση του σήματος λόγω διάδοσης στο χώρο (path loss) αλλά και την σκίαση (shadowing), την αργή δηλαδή μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος λόγω μεγάλων αντικειμένων-εμποδίων στον περιβάλλοντα χώρο, όπως μεγάλα κτίρια και δέντρα. Τα μικροσκοπικά φαινόμενα αφορούν τις διαλείψεις (fading) που παρουσιάζει το λαμβανόμενο σήμα (ταχείες μεταβολές της λαμβανόμενης ισχύος), ως αποτέλεσμα πολυόδευσης – πολυδιαδρομικής λήψης (multipath propagation). Προκειμένου τα παραπάνω φαινόμενα να ληφθούν υπόψη, η μοντελοποίηση γίνεται σε δύο επίπεδα, συνδυάζοντας μακροσκοπικά και μικροσκοπικά μοντέλα.



Σχήμα 3-20: Παράδειγμα ισχύος λαμβανόμενου σήματος ως συνάρτηση της απόστασης, © K.-L. Du et al

Τα μακροσκοπικά μοντέλα, γνωστά και ως μοντέλα απωλειών διάδοσης δίνουν μια εκτίμηση της μέσης τιμής ισχύος στο δέκτη ως συνάρτηση της απόστασης από τον πομπό και χρησιμοποιούνται κατά κόρον στον υπολογισμό του ισοζυγίου ισχύος (link budget). Το μέγεθος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης εξασθένησης του σήματος από τον πομπό στο δέκτη είναι το κέρδος διόδευσης (path gain), ορισμένο ως εξής:

$$G_{pr}(d) = \frac{E\{P_{RX}(d, f_c)\}}{P_{TX}}$$

όπου $E\{\cdot\}$ η εκτιμώμενη τιμή έχει ληφθεί σε περιοχή αρκετά μεγάλη ώστε να επιτρέψει την εξαγωγή μέσων όρων τόσο για τη σκίαση όσο και τις διαλείψεις μικρής κλίμακος. Συνήθως, αμελώντας τη σκίαση χρησιμοποιείται η κλασική εξίσωση:

$$G_{pr}(d) = G_{pr,0} - 10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)$$

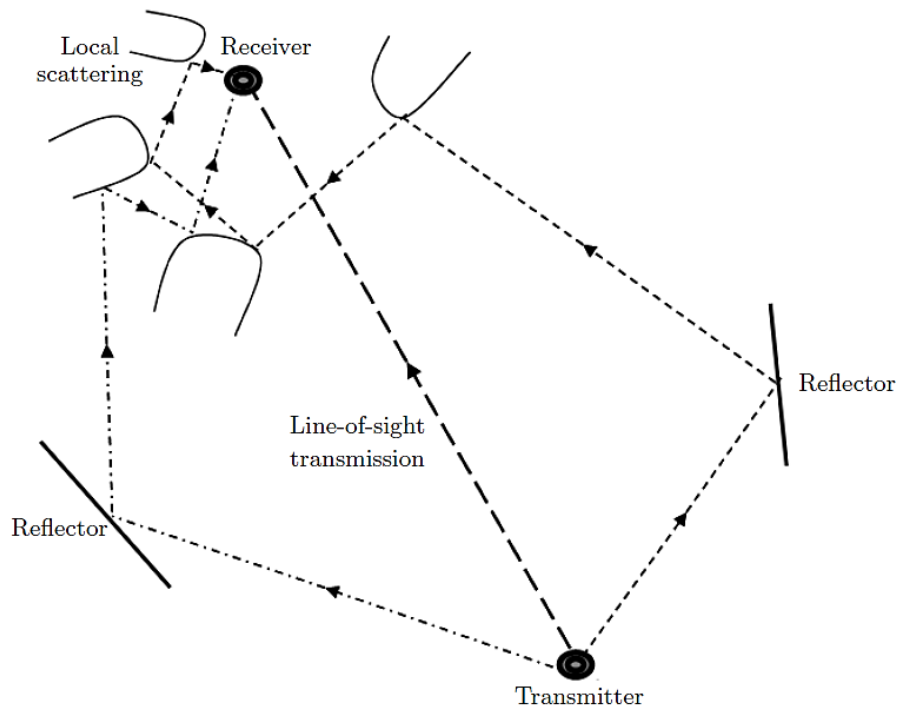
όπου d_0 η απόσταση αναφοράς, $G_{pr,0}$ το κέρδος διόδευσης στην απόσταση αναφοράς και γ ο εκθέτης διάδοσης. Η τιμή του εκθέτη διάδοσης εξαρτάται από το περιβάλλον και για τον ελεύθερο χώρο είναι $\gamma = 2$. Μπορεί να κυμανθεί από τιμές μικρότερες του 1 για διαδρόμους μέχρι 7 για περιπτώσεις εσωτερικού χώρου με πολλά εμπόδια και απουσία οπτικής επαφής. Συνήθως για περιπτώσεις LOS οι τιμές είναι περί το 1.5 ενώ για NLOS περί το 3-4. Προκειμένου να ληφθούν

υπόψη φαινόμενα σκίασης (shadowing), η σχέση μπορεί να τροποποιηθεί ως εξής:

$$G_{pr}(d) = G_{pr,0} - 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma$$

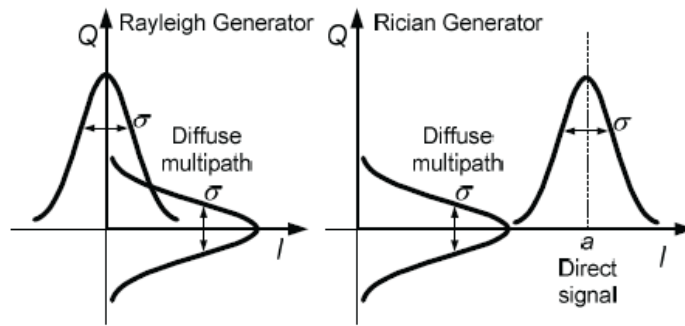
όπου X_σ μια τυχαία μεταβλητή, συνήθως ακολουθούσα τη λογαριθμικοκανονική (log-normal) κατανομή με τυπική απόκλιση σ .

Καθώς το σήμα διαδίδεται στο χώρο λόγω των διαφόρων φαινομένων διάδοσης (περίθλαση, σκέδαση, ανακλάσεις) δύναται να ακολουθήσει πολλαπλές διαδρομές προτού φθάσει στο δέκτη για αποδιαμόρφωση. Ανάλογα με το μήκος κάθε διαδρομής, οι επιμέρους συνιστώσες που οφείλονται στην πολυδιαδρομική λήψη (συνιστώσες πολυόδευσης, Multipath Components - MPCs) φθάνουν με διαφορετική χρονική καθυστέρηση στο δέκτη, ενώ το πλάτος τους μπορεί να διαφέρει σημαντικά. Η ενέργεια απλώνει σημαντικά στις συνιστώσες αυτές και ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους το τελικά λαμβανόμενο σήμα είναι δυνατόν να υποστεί διαλείψεις (fading), ταχείες μεταβολές δηλαδή του πλάτους του ή και παραμόρφωση.



Σχήμα 3-21: Παράδειγμα πολυδιαδρομικής λήψης σήματος,
© M. Ghavami et al.

Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο μικροσκοπικής κλίμακος που περιγράφει το φαινόμενο το διαλείψεων είναι το μοντέλο Rayleigh. Το μοντέλο αυτό εδράζεται στην παραδοχή ότι το κανάλι επιδεικνύει την ίδια συμπεριφορά για το σύνολο των συχνοτήτων που περιέχει το σήμα (flat fading), εφόσον το εύρος ζώνης του τελευταίου είναι αρκούντως μικρό. Στο δέκτη όλες οι λαμβανόμενες συνιστώσες πολυόδευσης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους προσθετικά ή καταστροφικά και οι συνιστώσες του μιγαδικού πλάτους (συνιστώσες I και Q) περιγράφονται από ανεξάρτητες κανονικές κατανομές μηδενικής μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης σ . Το πλάτος της προκύπτουσας μιγαδικής περιβάλλουσας ακολουθεί κατανομή Rayleigh ενώ η φάση είναι ομοιόμορφα καταμεμημένη στο διάστημα $[-\pi, \pi]$. Στην περίπτωση που η συμφασική συνιστώσα I του σήματος έχει μέση τιμή $\alpha > 0$ το πλάτος της μιγαδικής περιβάλλουσας ακολουθεί κατανομή Rice και λαμβάνεται υπόψη όταν κάποια από τις συνιστώσες πολυόδευσης είναι πολύ ισχυρή (συνήθως η συνιστώσα οπτικής επαφής, LOS).



Σχήμα 3-22: Διαφοροποίηση μεταξύ μοντελοποίησης Rayleigh και Rice, © A. Tkac et al.

Η κρουστική απόκριση αυτού του μοντέλου καναλιού σε μικροσκοπικό επίπεδο δίδεται ως:

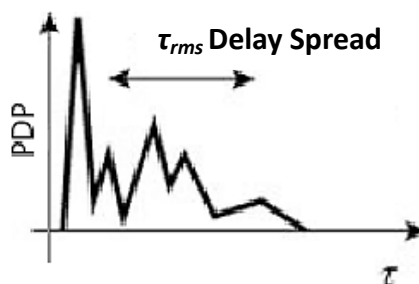
$$h(t) = \alpha e^{j\varphi} \delta(t - \tau)$$

όπου α τυχαία μεταβλητή ακολουθούσα κατανομή Rayleigh ή Rice, $\tau = \frac{\varphi}{2\pi f}$, όπου φ τυχαία μεταβλητή ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα $[-\pi, \pi]$.

Αν και η προσέγγιση αυτή είναι ικανοποιητική για συστήματα πολύ στενού εύρους ζώνης, τα συστήματα επικοινωνίας νέας γενιάς διαθέτουν πολύ πλούσιο φασματικό περιεχόμενο το οποίο οδηγεί σε συχνοεπιλεκτική συμπεριφορά από μέρους του καναλιού. Η συμπεριφορά του καναλιού για τις περιπτώσεις αυτές χαρακτηρίζεται από το προφίλ καθυστέρησης ισχύος (Power Delay Profile, PDP) το οποίο περιγράφει τη σχετική καθυστέρηση και την ισχύ με την οποία καταφθάνουν στο δέκτη οι επιμέρους συνιστώσες πολυόδευσης. Για λόγους ανάλυσης, συνήθως ο άξονας της καθυστέρησης διαιρείται σε ίσα bins των οποίων το μέγεθος (χρονική διάρκεια) είναι συγκρίσιμο του αντιστρόφου του εύρους ζώνης ($1/B$). Στην περίπτωση που το πλήθος των συνιστωσών πολυόδευσης που εμπίπτουν σε κάθε bin και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους είναι μεγάλο, το πλάτος της τελικά προκύπτουσας συνιστώσας για κάθε bin περιγράφεται από κατανομή Rayleigh ή Rice. Εάν ο αριθμός των συνιστωσών που εμπίπτουν σε κάθε bin είναι μικρός ή υπάρχουν άδεια bins, η στατιστική περιγραφή παύει να είναι Rayleigh ή Rice και μπορούν να χρησιμοποιηθούν άλλοι είδους κατανομές, όπως η κατανομή Nakagami, η λογαριθμοκανονική κατανομή, η κατανομή Roca Nazu και άλλες.

Κάνοντας χρήση του προφίλ καθυστέρησης ισχύος μπορούν να εξαχθούν μεγέθη σημαντικά για το χαρακτηρισμό του καναλιού όπως:

- η μέση καθυστέρηση διάδοσης (average delay), η οποία περιγράφει το μέσο χρόνο που απαιτείται για τη διάδοση του σήματος από τον πομπό στο δέκτη
- η καθυστέρηση εξάπλωσης η οποία περιγράφει τη χρονική υστέρηση των επιμέρους συνιστωσών πολυόδευσης στο χρόνο



Σχήμα 3-23: Παράδειγμα προφίλ καθυστέρησης ισχύος (PDP), © F. Pérez Fontán et al.

Η καθυστέρηση εξάπλωσης είναι σημαντική καθώς είναι ενδεικτική των συχνοεπιλεκτικών διαλείψεων, ενώ μια μεγάλη τιμή της μπορεί να προκαλέσει φαινόμενα διασυμβολικής παρεμβολής. Συνήθως για την περιγραφή της καθυστέρησης εξάπλωσης χρησιμοποιούνται δύο μεγέθη, η ενεργός τιμή της (rms delay spread) και η μέγιστη τιμή της (maximum ή total delay spread). Η ενεργός τιμή δίδεται από την εξίσωση:

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N \tau_n^2 |\alpha_n|^2}{\sum_{n=1}^N |\alpha_n|^2} - \bar{\tau}^2}$$

όπου

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{n=1}^N \tau_n |\alpha_n|^2}{\sum_{n=1}^N |\alpha_n|^2}$$

και α_n τα πλάτη των αντίστοιχων συνιστωσών πολυόδευσης.

Η κρουστική απόκριση αυτού του είδους μικροσκοπικών μοντέλων καναλιού περιγράφεται ως:

$$h(t) = \sum_{k=1}^N a_k \delta(t - \tau_k)$$

όπου a_k τυχαία μεταβλητή περιγράφουσα (εν γένει μιγαδική) περιγράφουσα το πλάτος της κρουστικής απόκρισης εξαιτίας της διαδρομής k και τ_k η χρονική υστέρηση στη λήψη.

3.4.2 Χρησιμοποιούμενα μοντέλα καναλιού για UWB

Τα μέχρι πρότινος χρησιμοποιούμενα μοντέλα καναλιού όπως τα COST 259, ITU-R, IEEE 802.11 καθώς προορίζονται για τη μοντελοποίηση συστημάτων στενής ζώνης δε δύνανται να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνίες με σήματα UWB, αφού η διάδοση των τελευταίων παρουσιάζει ιδιαιτερότητες.

Δεδομένου ότι τα σήματα UWB καταλαμβάνουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης, όλα τα φαινόμενα διάδοσης αποκτούν συχνοεπιλεκτικό χαρακτήρα. Η κρουστική απόκριση του καναλιού αποτελείται από το άθροισμα καθυστερημένων, εξασθενημένων και παραμορφωμένων συνιστωσών πολυόδευσης, οι οποίες εν γένει μπορεί να εμφανίζονται αραιά στο χρόνο, ενώ η υπόθεση ασυσχέτιστης στατικής υπό την ευρεία έννοια σκέδασης (Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering, WSSUS) παύει να ισχύει. Συνήθως σε μακροσκοπικό επίπεδο, οι απώλειες διάδοσης και η σκίαση μοντελοποιούνται όπως τα σήματα στενής ζώνης (λ.χ. το μοντέλο από τους Ghassemzadeh et al.), ενώ σε μικροσκοπικό επίπεδο οι διαλείψεις μικρής κλίμακας μοντελοποιούνται συνήθως με τα εξής μοντέλα:

- Μοντέλο Saleh-Valenzuela (S-V):
Το μοντέλο S-V θεωρεί ότι οι συνιστώσες πολυόδευσης δε λαμβάνονται σε κάθε στιγμή δειγματοληψίας αλλά σε συστάδες (clusters), υπάρχουν δηλαδή bins που είναι άδεια ή αποτελούνται από μικρό αριθμό συνιστωσών πολυόδευσης. Οι αφίξεις των συστάδων ακολουθούν κατανομή Poisson με ρυθμό Λ στο χρόνο, ενώ οι αφίξεις των συνιστωσών εντός μιας συστάδας ακολουθούν τη δική τους κατανομή Poisson με ρυθμό λ . Το πλάτος κάθε συνιστώσας ακολουθεί κατανομή Rayleigh και είναι διπλά εκθετικά μειούμενο με σταθερά χρόνου γ εντός κάθε συστάδας και Γ για το σύνολο του προφίλ ισχύος.

- Μοντέλο Poisson και τροποποιημένο μοντέλο Poisson:

Το μοντέλο Poisson θεωρεί ότι οι συνιστώσες πολυόδευσης φθάνουν ως μία συστάδα, δηλαδή δεν υπάρχει περαιτέρω ομαδοποίηση των συνιστωσών. Οι αφίξεις ακολουθούν κατανομή Poisson με ρυθμό λ , η εξασθένιση των συνιστωσών είναι εκθετική με σταθερά χρόνου γ και τα πλάτη τους ακολουθούν λογαριθμοκανονική κατανομή με τυπική απόκλιση σ .

Το τροποποιημένο μοντέλο Poisson θεωρεί ότι υπάρχουν ισχυρές συνιστώσες πολυόδευσης στην αρχή του προφίλ καθυστέρησης ισχύος, οφειλόμενες σε οπτική επαφή (LOS). Έτσι, οι πρώτες m αφίξεις συνιστωσών, όπου m τυχαία μεταβλητή με ισοπίθανες τιμές 2,3,4, ακολουθούν κατανομή Poisson με ρυθμό λ_1 , έχουν μοναδιαία μέση ενέργεια και πλάτη λογαριθμοκανονικά κατανομημένα με τυπική απόκλιση σ_1 . Η πρώτη συνιστώσα (θεωρούμενη LOS) καταφθάνει με μηδενική καθυστέρηση και έχει θετική πολικότητα, σε αντίθεση με τις υπόλοιπες που παρουσιάζουν είτε θετική είτε αρνητική πολικότητα με ίση πιθανότητα. Οι αφίξεις των συνιστωσών πέραν των πρώτων m ισχυρών ακολουθούν επίσης κατανομή Poisson με ρυθμό λ_2 ενώ τα πλάτη τους λογαριθμοκανονική κατανομή με τυπική απόκλιση σ_2 και εκθετικά μειούμενο προφίλ ισχύος.
- Μοντέλο Δ-K:

Σύμφωνα με το μοντέλο Δ-K υπάρχουν δύο καταστάσεις: Η κατάσταση S-1 όπου ο μέσος ρυθμός αφίξεων συνιστωσών πολυόδευσης είναι $\lambda_0(t)$ και η S-2 όπου ο μέσος ρυθμός είναι $\lambda_1(t)$. Η διαδικασία ξεκινά με την κατάσταση S-1, ενώ μόλις μια συνιστώσα ληφθεί τη χρονική στιγμή t , γίνεται μετάβαση στην κατάσταση S-2 για το διάστημα $[t, t+\Delta]$. Αν δε ληφθούν περαιτέρω συνιστώσες στο διάστημα αυτό γίνεται μετάβαση πίσω στην κατάσταση S-1 στο τέλος του διαστήματος. Η επιλογή των παραμέτρων Δ και K είναι κρίσιμη και βασίζεται σε κατάλληλες τεχνικές βελτιστοποίησης σύμφωνα με συλλεγμένα δεδομένα. Στο μοντέλο αυτό η κατανομή που επιλέγεται για τη στατιστική περιγραφή των πλατών των συνιστωσών είναι η λογαριθμοκανονική ή κατανομή γάμμα.
- Μοντέλο Nakagami:

Το μοντέλο Nakagami επιλέγεται συνήθως όταν το κεντρικό οριακό θεώρημα δεν μπορεί να εφαρμοστεί, κυρίως σε περιπτώσεις όπου οι καθυστερήσεις μεταξύ bins είναι μεγάλες.
- Μοντέλο POCA-NAZU:

Το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι τα πλάτη των μη διακρίσιμων (unresolvable) συνιστωσών πολυόδευσης προκύπτουν ως η υπέρθεση ενός μικρού αριθμού συνιστωσών ίσου πλάτους και ακολουθούν κατανομή POCA (POLygoro-CARsalis), με την ενδεχόμενη προσθήκη μια ισχυρής συνιστώσας οπότε τα τελικά προκύπτοντα πλάτη ακολουθούν κατανομή NAZU (Nakagawa-Arita-Zhang-Udagawa).

3.4.3 Το μοντέλο IEEE 802.15.3a

Όταν το ενδιαφέρον για τις τεχνολογίες UWB άρχισε να γίνεται έντονο η IEEE συνέστησε ομάδες εργασίας προκειμένου να μπορέσει να εκδόσει τυποποιήσεις προς διευκόλυνση της ανάπτυξης νέων συστημάτων. Στα πλαίσια αυτά, για τη μοντελοποίηση του καναλιού σε εφαρμογές UWB υψηλών ταχυτήτων επελέγη μια τροποποιημένη εκδοχή του καναλιού Saleh-Valenzuela, όπως αυτό περιγράφηκε νωρίτερα. Το κανάλι αυτό εδράζεται στην παρατήρηση ότι οι συνιστώσες πολυόδευσης εμφανίζονται στο δέκτη ομαδοποιημένες σε συστάδες. Οι αφίξεις των συστάδων μοντελοποιούνται σύμφωνα με ανέλιξη Poisson ρυθμού Λ ως εξής:

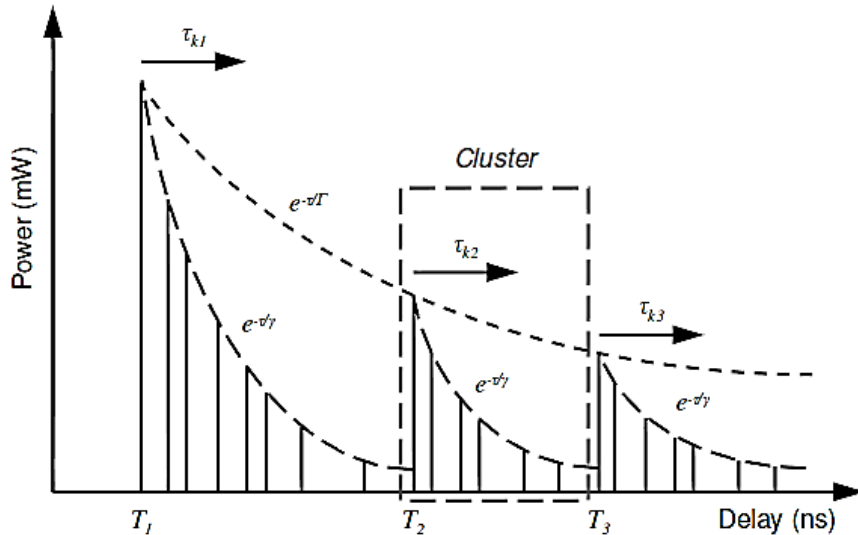
$$p(T_l|T_{l-1}) = \Lambda \exp[-\Lambda(T_l - T_{l-1})], \quad l > 0$$

όπου T_l και T_{l-1} οι χρόνοι άφιξης των l -οστών και $(l-1)$ -οστών συστάδων. Προφανώς τίθεται για την πρώτη συστάδα $T_1 = 0$.

Εντός κάθε συστάδος l , οι αφίξεις των συνιστωσών πολυόδευσης μοντελοποιούνται επίσης σύμφωνα με ανέλιξη Poisson, αυτή τη φορά ρυθμού λ ως εξής:

$$p(\tau_{k,l} | \tau_{(k-1),l}) = \lambda \exp[-\lambda(\tau_{k,l} - \tau_{(k-1),l})], \quad k > 0$$

όπου $\tau_{k,l}$ και $\tau_{(k-1),l}$ οι χρόνοι άφιξης των k -οστών και $(k-1)$ -οστών συνιστωσών εντός της l -οστής συστάδος.



Σχήμα 3-24: Προφίλ καθυστέρησης ισχύος (PDP) για το μοντέλο S-V, © P. Pagani et al.

Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η κρουστική απόκριση του καναλιού περιγράφεται μαθηματικά από την εξίσωση:

$$h(t) = X \sum_{l=0}^L \sum_{k=0}^K a_{k,l} \delta(t - T_l - \tau_{k,l})$$

όπου X ο όρος που περιγράφει τη σκίαση και $a_{k,l}$ οι συντελεστές κέρδους του καναλιού οι οποίοι ορίζονται ως:

$$a_{k,l} = \rho_{k,l} \xi_l \beta_{k,l}$$

με $\rho_{k,l} = \{-1, +1\}$ με ίση πιθανότητα προκειμένου να ληφθεί υπόψη η αντιστροφή του σήματος λόγω ανακλάσεων, ξ_l τυχαία μεταβλητή αντιστοιχούσα στο πλάτος της περιβάλλουσας της l -οστής συστάδας και $\beta_{k,l}$ τυχαία μεταβλητή αντιστοιχούσα στο πλάτος της k -οστής συνιστώσας της l -οστής συστάδας. Είναι:

$$20 \log_{10}(\xi_l \beta_{k,l}) \propto Normal(\mu_{k,l}, \sigma_1^2 + \sigma_2^2)$$

ή

$$|\xi_l \beta_{k,l}| = 10^{(\mu_{k,l} + n_1 + n_2)/20}$$

όπου

$$n_1 \propto Normal(0, \sigma_1^2)$$

και

$$n_2 \propto Normal(0, \sigma_2^2)$$

Η τιμή $\mu_{k,l}$ καθορίζεται κατά τρόπο τέτοιο, ώστε να προκύψει εκθετικά μειούμενο προφίλ ισχύος τόσο μεταξύ των συστάδων, όσο και μεταξύ των συνιστωσών κάθε συστάδος ως εξής:

$$E \left[|\xi_l \beta_{k,l}|^2 \right] = \left| 10^{(\mu_{k,l} + n_1 + n_2)/20} \right|^2 \triangleq \Omega_0 e^{-T_l/\Gamma} e^{-\tau_{k,l}/\gamma}$$

$$\Rightarrow \mu_{k,l} = \frac{10 \ln(\Omega_0) - \frac{10T_l}{\Gamma} - \frac{10\tau_{k,l}}{\gamma}}{\ln(10)} - \frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \ln(10)}{20}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο αρχικό μοντέλο S-V (πριν τις τροποποιήσεις της IEEE) οι συντελεστές $\alpha_{k,l}$ είναι μιγαδικοί $\alpha_{k,l} = \beta_{k,l} e^{j\theta_{k,l}}$, με μέτρο $\beta_{k,l}$ θετική τυχαία μεταβλητή κατανεμημένη κατά Rayleigh και γωνία $\theta_{k,l}$ ομοιόμορφα κατανεμημένη στο διάστημα $[0, 2\pi)$.

Ο όρος X που περιγράφει τη σκίαση ακολουθεί επίσης λογαριθμοκανονική κατανομή:

$$20 \log_{10}(X) \propto Normal(0, \sigma_x^2)$$

και επιβάλλει οι όροι $\{\alpha_{k,l}\}$ να κανονικοποιούνται στη μονάδα για κάθε πραγματοποίηση (realization).

Με βάση της συλλεγείσες μετρήσεις διατυπώθηκαν τέσσερα βασικά μοντέλα καναλιού (Channel Models, CM):

- CM1: σενάρια με οπτική επαφή (LOS) για αποστάσεις πομπού-δέκτη μικρότερες των 4 m.
- CM2 : σενάρια χωρίς οπτική επαφή (NLOS) για αποστάσεις όμοιες με το CM1.
- CM3: σενάρια χωρίς οπτική επαφή (NLOS) για αποστάσεις πομπού δέκτη 4 - 10 m.
- CM4: ακραία σενάρια χωρίς οπτική επαφή με πολύ έντονη διασπορά καθυστέρησης (25 ns rms delay spread)

Στην επόμενη σελίδα ακολουθεί πίνακας με τις αναλυτικές τιμές των παραμέτρων.

Εκτός από το μοντέλο καναλιού 802.15.3a, ομάδες εργασίας της IEEE έχουν εκδόσει και άλλα πρότυπα μοντέλα και πιο συγκεκριμένα τα 802.15.4a για υψηλές συχνότητες (HF) και χαμηλές συχνότητες (LF). Τα μοντέλα αυτά αφορούν συστήματα που καλούνται να λειτουργήσουν σε μεγάλες αποστάσεις, χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων και αφορούν τόσο περιπτώσεις LOS όσο και NLOS. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές επικοινωνίας εσωτερικού χώρου (οικιακά περιβάλλοντα, γραφεία, βιομηχανία) περιβάλλοντα εξωτερικού χώρου, αγροτικά περιβάλλοντα αλλά και ειδικά περιβάλλοντα όπως τα τοπικά δίκτυα σώματος (Body Area Networks, BANs). Το μοντέλο 802.15.4a προσομοιάζει το 802.15.3a, ωστόσο λαμβάνει υπόψη τη συσχέτιση μεταξύ διαλείψεων γειτονικών bins και βασίζεται σε περισσότερες μετρήσεις.

Target Channel Characteristics ⁵	CM 1 ¹	CM 2 ²	CM 3 ³	CM 4 ⁴
τ_m [ns] (Mean excess delay)	5.05	10.38	14.18	
τ_{rms} [ns] (rms delay spread)	5.28	8.03	14.28	25
NP10dB (number of paths within 10 dB of the strongest path)			35	
NP (85%) (number of paths that capture 85% of channel energy)	24	36.1	61.54	
Model Parameters				
Λ [1/nsec] (cluster arrival rate)	0.0233	0.4	0.0667	0.0667
λ [1/nsec] (ray arrival rate)	2.5	0.5	2.1	2.1
Γ (cluster decay factor)	7.1	5.5	14.00	24.00
γ (ray decay factor)	4.3	6.7	7.9	12
σ_1 [dB] (stand. dev. of cluster lognormal fading term in dB)	3.4	3.4	3.4	3.4
σ_2 [dB] (stand. dev. of ray lognormal fading term in dB)	3.4	3.4	3.4	3.4
σ_x [dB] (stand. dev. of lognormal fading term for total multipath realizations in dB)	3	3	3	3
Model Characteristics⁵				
τ_m	5.0	9.9	15.9	30.1
τ_{rms}	5	8	15	25
NP10dB	12.5	15.3	24.9	41.2
NP (85 percent)	20.8	33.9	64.7	123.3
Channel energy mean (dB)	-0.4	-0.5	0.0	0.3
Channel energy standard deviation (dB)	2.9	3.1	3.1	2.7
¹ This model is based on LOS (0–4 m) channel measurements. ² This model is based on NLOS (0–4 m) channel measurements. ³ This model is based on NLOS (4–10 m) channel measurements. ⁴ This model was generated to fit a 25 ns RMS delay spread to represent an extreme NLOS multipath channel. These characteristics are based on a 167 ps sampling time.				

Πίνακας 3-3: Παράμετροι του καναλιού IEEE 802.15.3a,
© A. F. Molisch et al.

3.5 Συστήματα παλμικού UWB

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα συστήματα παλμικού τύπου είναι εκείνα με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς συνεπάγονται απλούστερη υλοποίηση πομπού-δέκτη σε επίπεδο ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (Digital Signal Processing, DSP) και χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας. Στα συστήματα αυτά ανταλλάσσονται παλμοί πολύ μικρής χρονικής διάρκειας, στη θέση, το πλάτος ή την πολικότητα των οποίων κωδικοποιείται η προς μετάδοση πληροφορία.

3.5.1 Επιλογή παλμών

Το φασματικό περιεχόμενο ενός σήματος παλμικού UWB εξαρτάται απόλυτα από τη μορφή του παλμού που χρησιμοποιείται. Συνήθως επιλέγονται τα λεγόμενα μονόκυκλα (monocycles), όπως Γκαουσιανοί παλμοί, παράγωγοι Γκαουσιανών παλμών, παλμοί Rayleigh, Laplace, τροποποιημένοι Ερμητιανοί και τροποποιημένοι Gegenbauer. Οι παλμοί θα πρέπει ιδανικά να έχουν μηδενική συνιστώσα DC προκειμένου να μπορούν να ακτινοβοληθούν αποδοτικά ενώ θα πρέπει αφενός να επιδεικνύουν χαρακτηριστικά υψηλής αυτοσυσχέτισης για αποτελεσματικό συγχρονισμό και αποδιαμόρφωση της μεταδιδόμενης πληροφορίας και αφετέρου συμβατότητα με τις εκδοθείσες από τις κατά τύπους ρυθμιστικές αρχές μάσκες.

Σε ερευνητικές εφαρμογές συνήθως χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση συστημάτων Γκαουσιανοί παλμοί λόγω της ευκολίας με την οποία παράγονται. Η συνάρτηση Gauss δίδεται από την εξίσωση:

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

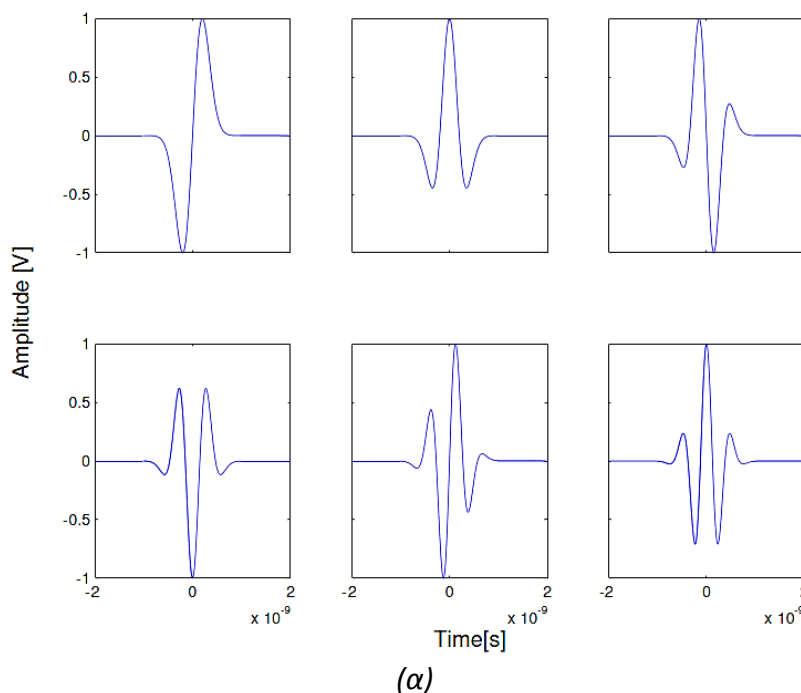
θεωρώντας μηδενική μέση τιμή. Οι κεραιές κατά τη μετάδοση και λήψη του σήματος λειτουργούν ως φίλτρα, παραγωγίζοντας το σήμα. Έτσι, στο δέκτη θεωρείται ότι φθάνει για ενίσχυση σήμα που περιγράφεται από τη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης Gauss:

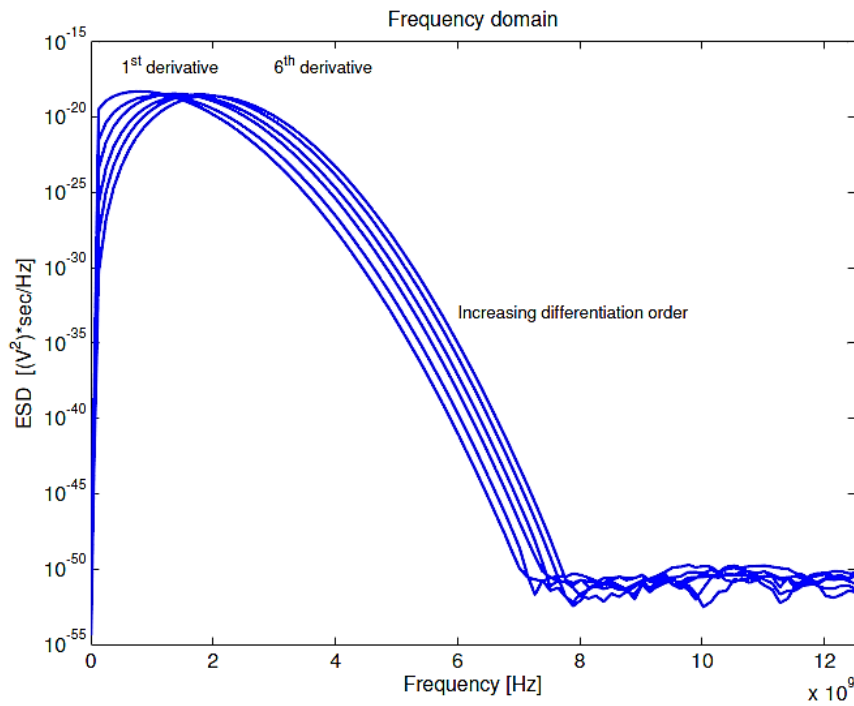
$$G_2(x) = K_3 \frac{-2}{\tau^2} \left(1 - \frac{2t^2}{\tau^2}\right) e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}$$

Ο εξιδανικευμένος παλμός που λαμβάνεται από το δέκτη συνήθως γράφεται ως:

$$p_{rx} = \left[1 - 4\pi \left(\frac{t}{\tau_m}\right)^2\right] e^{-2\pi \left(\frac{t}{\tau_m}\right)^2}$$

όπου η παράμετρος τ_m καθορίζει μοναδικά τα χαρακτηριστικά του παλμού στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας.





(β)

Σχήμα 3-25: (α) Μορφή παλμών για τις έξι πρώτες παραγώγους της συνάρτησης Gauss
(β) Φασματικό περιεχόμενο κάθε παλμού

© Z. Zou

3.5.2 Σχήματα διαμόρφωσης

Οι συνηθέστερες τεχνικές διαμόρφωσης για συστήματα παλμικού UWB είναι οι ακόλουθες:

- Διαμόρφωση θέσης παλμού (Pulse Position Modulation, PPM)
- Διαμόρφωση πλάτους (Pulse Amplitude Modulation, PAM)
- Διαμόρφωση δυαδικής ολίσθησης φάσης (Binary Phase Shift Keying, BPSK)
- Διακοπτική διαμόρφωση (On-Off Keying, OOK)
- Διαμόρφωση M-αδικής διορθογώνιας σηματοδοσίας (M-ary Biorthogonal Keying, MBOK)
- Διαμόρφωση σχήματος παλμού (Pulse Shape Modulation, PSM)
- Διαμόρφωση μεταδοσης αναφοράς (Transmitted Reference, TR)

Οι επικρατέστερες διαμορφώσεις σε πρακτικά συστήματα είναι οι PPM, PAM και OOK για τις οποίες και ακολουθεί συνοπτική ανάλυση παρακάτω.

3.5.2.1 Διαμόρφωση κατά PPM

Στη διαμόρφωση θέσης παλμού (Pulse Position Modulation, PPM), η θέση του παλμού είναι εκείνη που καθορίζει ποιο σύμβολο μεταδίδεται. Πιο συγκεκριμένα, για την περίπτωση δυαδικής σηματοδοσίας, το bit “0” θεωρείται ότι μεταδίδεται τη χρονική στιγμή 0 ενώ το bit “1” θεωρείται ότι μεταδίδεται σε μεταγενέστερη χρονική στιγμή, μετατοπισμένη χρονικά από το 0 κατά δ.

Αναλυτικά το σήμα μπορεί να περιγραφεί ως:

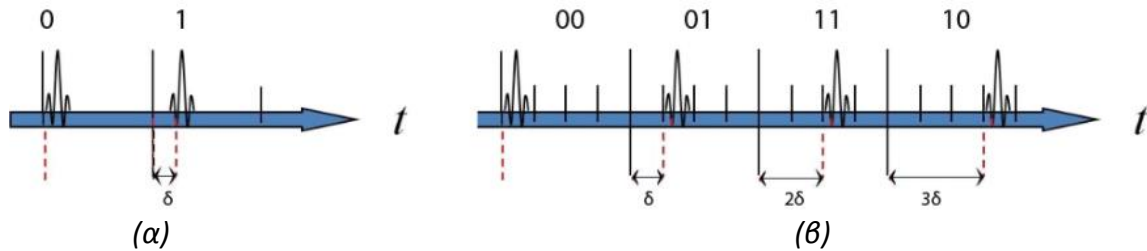
$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_m(k) \cdot p(t - kT_f - m_k \delta)$$

όπου για την περίπτωση δυαδικής σηματοδοσίας το προς μετάδοση σύμβολο είναι $j=0$ ή 1 και:

$$m_k = \begin{cases} 0, & j = 0 \\ 1, & j = 1 \end{cases}$$

ενώ $p(t)$ είναι ο χρησιμοποιούμενος παλμός (π.χ. δεύτερη παράγωγος συνάρτησης Gauss) και T_f η διάρκεια του συμβόλου.

Το σχήμα αυτό αναφέρεται ως αντίποδη δυαδική διαμόρφωση θέσης παλμού (Binary Antipodal Pulse Position Modulation, BPPM ή 2PPM και ταυτίζεται με το BPSK). Φυσικά, χρησιμοποιώντας περισσότερες θέσεις είναι δυνατόν να υποστηριχθούν M-δικά σχήματα.



Σχήμα 3-26: Παράδειγμα διαμόρφωσης PPM: (α) 2PPM, (β) 4PPM

Η τιμή της παραμέτρου δ (χρονικής μετατόπισης) θα πρέπει να επιλεγεί ανάλογα με τα χαρακτηριστικά αυτοσυσχέτισης που παρουσιάζει ο χρησιμοποιούμενος παλμός. Για περιπτώσεις λευκού προσθετικού θορύβου Gauss (AWGN) και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης φαίνεται γενικά ότι καλύτερη επίδοση παρουσιάζεται όταν $d < T_p$, όπου T_p η διάρκεια του παλμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν επιλέγεται $\delta > T_p$ τότε το προκύπτον σχήμα διαμόρφωσης είναι ορθογώνια PPM. Στην περίπτωση που οι χρησιμοποιούμενοι παλμοί είναι παράγωγοι κ-τάξεως της συνάρτησης Gauss δίνονται ενδεικτικά ορισμένες τιμές οι οποίες παρουσιάζουν βέλτιστη συμπεριφορά σε επίπεδο ρυθμού σφαλμάτων (BER).

Χρησιμοποιούμενος παλμός Gauss	Βέλτιστο δ
Δεύτερη παράγωγος	$0.292683 \cdot T_p$
Τρίτη παράγωγος	$0.243902 \cdot T_p$
Τέταρτη παράγωγος	$0.219512 \cdot T_p$
Πέμπτη παράγωγος	$0.195122 \cdot T_p$

Πίνακας 3-4: Βέλτιστες τιμές παραμέτρου δ για χρήση σε με παλμούς Gauss,

© I. Oppermann et al.

3.5.2.2 Διαμόρφωση κατά PAM

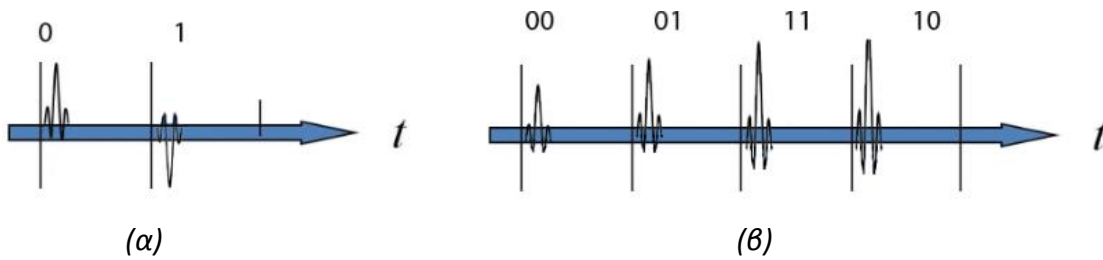
Στη διαμόρφωση πλάτους παλμού (Pulse Amplitude Modulation, PAM) η προς μετάδοση πληροφορία κωδικοποιείται στο πλάτος του παλμού ως εξής:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_m(k) \cdot p(t - kT_f)$$

όπου $p(t)$ ο χρησιμοποιούμενος παλμός και για την περίπτωση δυαδικής σηματοδοσίας συνήθως επιλέγεται για το σύμβολο j :

$$A_m = \begin{cases} -1, & m = 0 \\ 1, & m = 1 \end{cases}$$

δηλαδή αντίποδο σχήμα (Antipodal PAM, όμοιο με την BPSK). Είναι δυνατό να υποστηριχθούν M-δικά σχήματα με επιλογή κατάλληλου πλήθους σταθμών ($=\log_2 M$). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σχήμα Antipodal PAM (BPSK) έχει καλύτερη επίδοση κατά 3dB στην αποδιαμόρφωση σε σχέση με το σχήμα 2PPM.



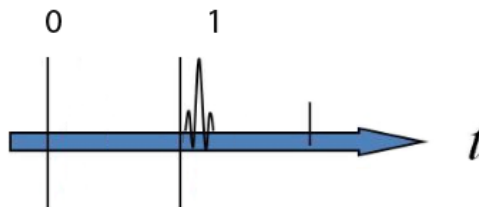
Σχήμα 3-27: Παράδειγμα διαμόρφωσης PAM: (α) BPAM (BPSK) (β) 4PAM

3.5.2.3 Διαμόρφωση κατά OOK

Άλλη τεχνική διαμόρφωσης αποτελεί η διακοπτική διαμόρφωση (On-Off Keying, OOK). Η διαμόρφωση αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη στα συστήματα οπτικής επικοινωνίας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ασύρματα συστήματα UWB. Η διαμόρφωση αυτή είναι παρόμοια με την PAM με τη διαφορά ότι υποστηρίζει μόνο δυαδική σηματοδότηση ως εξής:

$$A_m = \begin{cases} 0, & m = 0 \\ 1, & m = 1 \end{cases}$$

Ουσιαστικά δηλαδή όταν πρόκειται να μεταδοθεί το σύμβολο “0” δε μεταδίδεται παλμός ενώ αν πρόκειται να μεταδοθεί το σύμβολο “1” μεταδίδεται παλμός. Η διαμόρφωση αυτού του τύπου αν και δύναται να υλοποιηθεί εύκολα συνήθως αποφεύγεται καθώς αντιμετωπίζει προβλήματα συγχρονισμού, ειδικά όταν μεταδίδονται μεγάλες ακολουθίες από “0”.



Σχήμα 3-28: Παράδειγμα διαμόρφωσης OOK

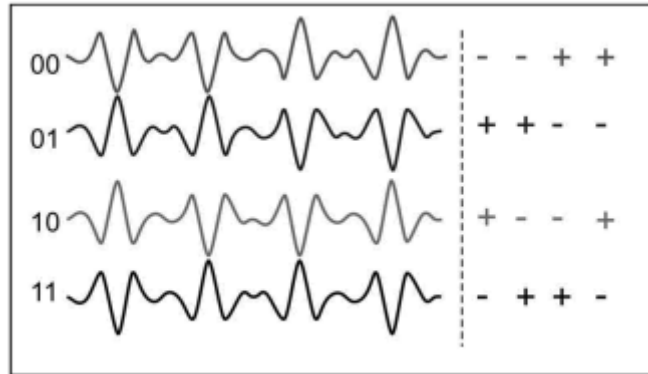
3.5.2.4 Άλλα σχήματα διαμόρφωσης

Άλλα ενδιαφέροντα σχήματα διαμόρφωσης τα οποία έχουν προταθεί και μελετηθεί κατά καιρούς είναι:

- η διαμόρφωση σχήματος παλμού (Pulse Shape Modulation, PSM) κατά την οποία για τη μετάδοση κάθε συμβόλου χρησιμοποιούνται διαφορετικές, ορθογώνιες μεταξύ τους κυματομορφές. Οι κυματομορφές αυτές μπορεί να είναι η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος του παλμού Gauss, τροποποιημένα ορθογώνια Hermite, wavelets ή Prolate Spheroidal Wave Functions (PSWF). Το εκπεμπόμενο σήμα έχει τη μορφή:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_{m_k}(t - kT_f)$$

- η Μ-αδική διορθογώνια σηματοδότηση (M-ary Biorthogonal Keying, MBOK), κατά την οποία τα σύμβολα αναπαρίστανται από συγκεκριμένες ακολουθίες θετικών και αρνητικών παλμών. Οι ακολουθίες επιλέγονται ώστε να είναι ανα δύο ορθογώνιες μεταξύ τους (παρουσιάζουν μηδενική ετεροσυσχέτιση). Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται παράδειγμα 4-BOK.



Σχήμα 3-29: Παράδειγμα διαμόρφωσης 4-BOK,
© D. Dobkin

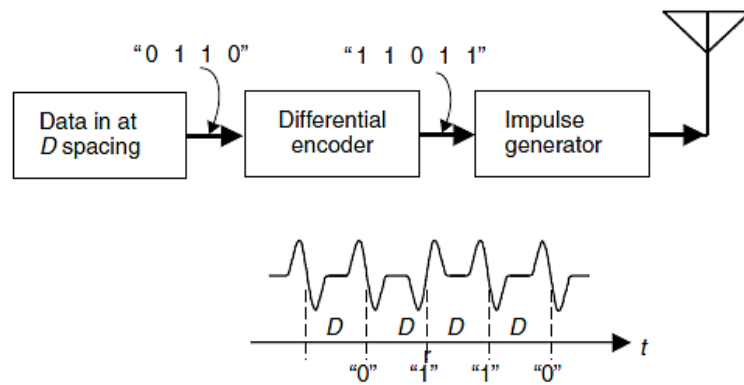
- η διαμόρφωση μετάδοσης αναφοράς (Transmitted Reference, TR) έχει ως βάση της τη μετάδοση ζευγών συσχετισμένων παλμών. Μπορούν να διακριθούν δύο επιμέρους περιπτώσεις:
 - ο η τυπική μέθοδος (Standard TR, STR) σύμφωνα με την οποία, πριν την αποστολή ενός συμβόλου πληροφορίας αποστέλλεται ένας παλμός αναφοράς (πιλότος) ο οποίος δεν είναι διαμορφωμένος και μετά από χρονικό διάστημα d μεταδίδεται ο διαμορφωμένος από τα δεδομένα παλμός. Η χρονική διαφορά d επιλέγεται μεγαλύτερη της ενεργού τιμής εξάπλωσης του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής λήψης, προκειμένου να αποφευχθεί διασυμβολική παρεμβολή μεταξύ των παλμών πιλότου και των παλμών πληροφορίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ανάλογα με την υλοποίηση, μπορεί να επιλεγεί ο παλμός αναφοράς να μεταδίδεται πριν από κάθε παλμό δεδομένων ή οι παλμοί αναφοράς να μεταδίδονται όλοι μαζί ακολουθούμενοι από τους παλμούς δεδομένων.
 - ο η διαφορική μέθοδος (Differential TR, DTR) σύμφωνα με την οποία οι παλμοί χρησιμοποιούνται για τη μετάδοσή τους διαφορική κωδικοποίηση (σχήμα αντίστοιχο με το DPSK)

Η γενική μορφή του σήματος διαμορφωμένου κατά TR είναι:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [p(t - (k - 1)T_f) + (2m_k - 1)p(t - (k - 1)T_f - d)]$$

όπου για το j -οστό σύμβολο (bit) είναι:

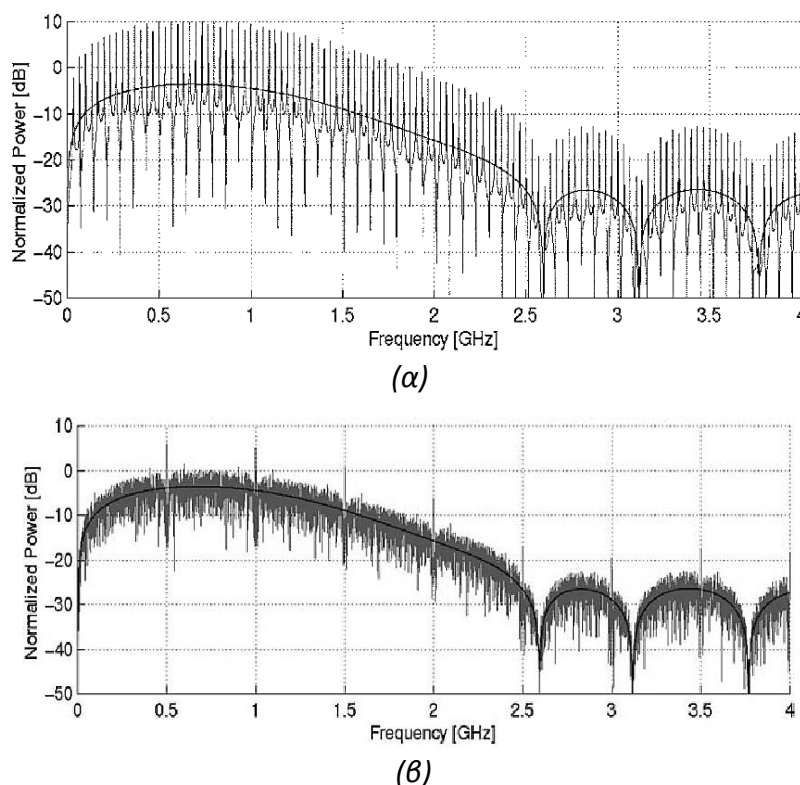
$$m_k = \begin{cases} 0, & j = 0 \\ 1, & j = 1 \end{cases}$$



Σχήμα 3-30: Παράδειγμα πομπού TR-UWB, © K. Siwiak et al.

3.5.3 Τεχνικές λεύκανσης του φάσματος – πολλαπλής πρόσβασης

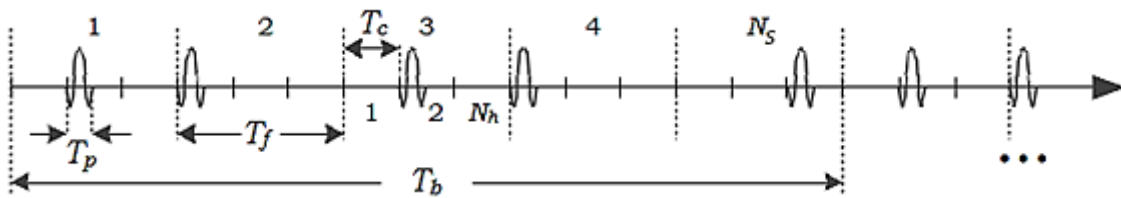
Η μετάδοση στενών παλμών ανα τακτά χρονικά διαστήματα οδηγεί στη δημιουργία ισχυρών φασματικών αιχμών στο πεδίο της συχνότητας. Οι αιχμές αυτές (spectral lines) εμφανίζονται σε ακέραια πολλαπλάσια (αρμονικές) της συχνότητας επανάληψης παλμών (Pulse Repetition Period, PRF) και δύνανται να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα παρεμβολών σε άλλα συστήματα επικοινωνίας που χρησιμοποιούν τις ίδιες φασματικές ζώνες. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το φαινόμενο αυτό συχνά επιστρατεύονται ειδικοί ψευδοτυχαίοι κώδικες, χρήσιμη των οποίων το προκύπτον φασματικό περιεχόμενο γίνεται πιο επίπεδο προσομοιάζοντας τον λευκό θόρυβο. Ταυτόχρονα, κατάλληλη επιλογή των ψευδοτυχαίων κωδικών μεταξύ των επιμέρους χρηστών δίνει στα συστήματα τη δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης με ελαχιστοποίηση παρεμβολών. Οι δύο βασικές τεχνικές λεύκανσης του φάσματος οι οποίες αναλύονται διεξοδικότερα παρακάτω είναι η χρήση κωδικών διαπήδησης χρόνου (Time Hopping UWB, TH-UWB) και η χρήση κωδικών άμεσης ακολουθίας (Direct Sequence UWB, DS-UWB).



Σχήμα 3-31: Φάσμα του εκπεμπόμενου σήματος: (α) χωρίς χρήση τεχνικών λεύκανσης (β) με τεχνική λεύκανσης (TH-UWB), © I. Oppermann et al.

3.5.3.1 Διαπήδηση στο χρόνο (Time Hopping)

Σύμφωνα με την τεχνική διαπήδησης στο χρόνο (Time Hopping UWB, TH-UWB), ο χρόνος διαιρείται σε πλαίσια διάρκειας T_f , σε κάθε ένα εκ των οποίων δύναται να μεταδοθεί ένας παλμός. Κάθε πλαίσιο διαιρείται σε N_h επιμέρους τμήματα (hops) διάρκειας T_c , σε ένα εκ των οποίων θα μεταδοθεί τελικά ο παλμός του συγκεκριμένου πλαισίου σύμφωνα με κάποιο κώδικα, είναι δηλαδή $T_f = N_h \cdot T_c$. Ο χρησιμοποιούμενος κώδικας μπορεί να είναι ντετερμινιστικά ορισμένος, ψευδοτυχαίος ή τυχαίος και να παρουσιάζει ή όχι περιοδικότητα N_p . Προκειμένου να επιτευχθεί επιπλέον κέρδος επεξεργασίας συνήθως επιστρατεύεται ένας κώδικας επανάληψης $(N_s, 1)$, κάθε bit δεδομένων απλώνεται δηλαδή σε περισσότερους του ενός παλμούς. Στην τεχνική διαπήδησης στο χρόνο το μεταδιδόμενο σήμα έχει τέτοια μορφή ώστε το προκύπτον duty cycle των παλμών είναι πολύ χαμηλό. Το TH-UWB συνήθως συνδυάζεται με διαμόρφωση PPM, PAM (M-ary PAM, BPSK) και PSM, ενώ η χρήση OOK αποφεύγεται λόγω της αδυναμίας συγχρονισμού που προκύπτει κατά την αποστολή ακολουθιών από '0'.



Σχήμα 3-32: Παράδειγμα TH-UWB με κώδικα $c = \{1, 0, 1, 0, 2\}$,
© X. Θώμος

Το εκπεμπόμενο σήμα TH-UWB με PPM διαμόρφωση δίδεται ως:

$$s_{PPM}^{(u)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^{N_c} p(t - kT_b - jT_f - c^{(u)}(j)T_c - m_k\delta)$$

όπου m_k το k -οστό M-αδικό σύμβολο και δ η χρονική μετατόπιση λόγω διαμόρφωσης PPM.

Το σήμα TH-UWB με διαμόρφωση PAM δίδεται ως:

$$s_{PAM}^{(u)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^{N_c} A_m(k)p(t - kT_b - jT_f - c^{(u)}(j)T_c)$$

όπου $A_m(k)$ το πλάτος που αντιστοιχεί στο k -οστό M-αδικό σύμβολο.

Στην περίπτωση μετάδοσης TH-UWB με διαμόρφωση PSM είναι:

$$s_{PSM}^{(u)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^{N_c} p_{m_k}(t - kT_b - jT_f - c^{(u)}(j)T_c)$$

όπου p_{m_k} ο παλμός που αντιστοιχεί στο k -οστό M-αδικό σύμβολο.

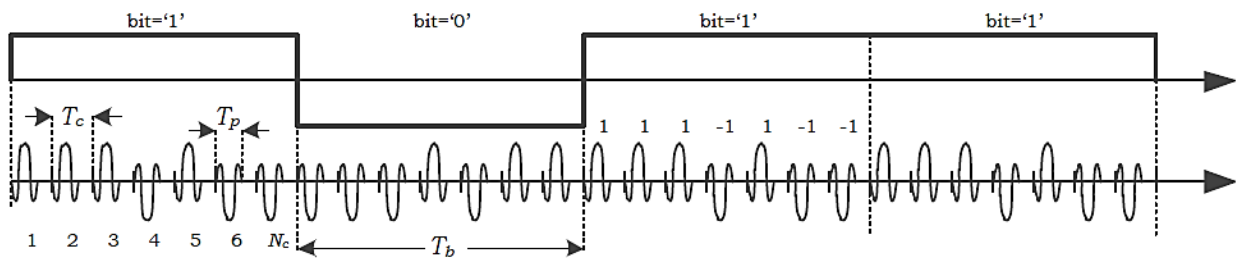
3.5.3.2 Άμεση ακολουθία (Direct Sequence)

Προκειμένου να επιτευχθεί λεύκανση του φάσματος εκτός από τη μέθοδο διαπήδησης στο χρόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η μέθοδος εξάπλωσης με άμεση ακολουθία (Direct Sequence UWB,

DS-UWB). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το προς μετάδοση σύμβολο αφού πολλαπλασιασθεί με κατάλληλη ακολουθία (κώδικα) μήκους N εξαπλώνεται σε N επιμέρους υποσύμβολα (chips) διάρκειας T_c . Η διάρκεια δηλαδή ενός συμβόλου T_b δεν είναι δεδομένη αλλά προκύπτει από το μήκος του χρησιμοποιούμενου κώδικα N και τη διάρκεια του chip, είναι δηλαδή $T_b = N \cdot T_c$. Το duty cycle στην περίπτωση του DS-UWB είναι μεν μεγαλύτερο εν συγκρίσει με το TH-UWB, ωστόσο είναι μικρότερο από 100%, τιμή που συναντά κανείς στις συμβατικές τεχνικές Spread Spectrum.

Στα συμβατικά συστήματα Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS) οι παλμοί που χρησιμοποιούνται είναι τύπου Nyquist με διάρκεια ίση με τη διάρκεια του chip, έχουν δηλαδή duty cycle 100% και στόχος είναι η διεύρυνση του φάσματος χρησιμοποιώντας κώδικες εξάπλωσης πολύ μεγάλου ρυθμού. Στην περίπτωση αυτή, η διάρκεια T_b του συμβόλου είναι δεδομένη και για μήκος κώδικα N η διάρκεια του chip προκύπτει $T_c = T_b / N$. Αντίθετα, στα συστήματα DS-UWB η εξάπλωση επιτυγχάνεται απευθείας με κατάλληλη επιλογή παλμού (π.χ. παλμοί Gauss) και η χρήση της τεχνικής άμεσης ακολουθίας γίνεται αποκλειστικά για την επίτευξη «λείου» φάσματος και δυνατότητας πολλαπλής πρόσβασης με κατάλληλη επιλογή κώδικα για κάθε χρήστη.

Οι κώδικες όπως και στην περίπτωση TH-UWB μπορούν να είναι ντετερμινιστικά ορισμένοι, ψευδοτυχαίοι ή τυχαίοι ενώ μπορεί να είναι ή όχι περιοδικοί με περίοδο N_p . Τα σχήματα διαμόρφωσης με τα οποία συνδυάζεται το DS-UWB είναι συνήθως τα PAM (και ιδίως το BPAM-BPSK), OOK και PSM.



Σχήμα 3-33: Παράδειγμα DS-UWB με κώδικα $\{1, 1, 1, -1, 1, -1, -1\}$,
© X. Θώμος

Το σήμα DS-UWB με διαμόρφωση PAM ή OOK δίδεται ως:

$$s_{PAM,OOK}^{(u)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^{N_c} A_m(k) c_j^{(u)} p(t - kT_b - jT_c)$$

όπου $A_m(k)$ το πλάτος που αντιστοιχεί στο k -οστό M -αδικό σύμβολο.

Στην περίπτωση μετάδοσης DS-UWB με διαμόρφωση PSM είναι:

$$s_{PSM}^{(u)}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^{N_c} c_j^{(u)} p_{m_k}(t - kT_b - jT_c)$$

όπου p_{m_k} ο παλμός που αντιστοιχεί στο k -οστό M -αδικό σύμβολο.

Καθώς στις παραπάνω μεθόδους το μεταδιδόμενο σύμβολο απλώνεται σε περισσότερους του ενός παλμούς διατηρώντας παράλληλα χαμηλό duty cycle, κατά την αποδιαμόρφωση από δέκτη συσχέτισης - προσαρμοσμένου φίλτρου προκύπτει κέρδος επεξεργασίας PG το οποίο δίδεται από τη σχέση:

$$PG[dB] = 10 \log(N_c) + 10 \log\left(\frac{1}{\text{duty cycle}}\right)$$

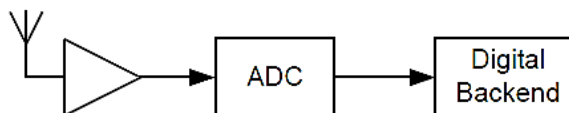
όπου N_c το πλήθος των παλμών στους οποίους απλώνεται το μεταδιδόμενο σύμβολο.

3.5.4 Δέκτες παλμικού UWB

Η ποιότητα της μετάδοσης κρίνεται εν πολλοίς από τη δυνατότητα αποτελεσματικής αποδιαμόρφωσης του λαμβανόμενου σήματος. Για το λόγο αυτό, η σχεδίαση αποδοτικών δεκτών είναι καθοριστικής σημασίας. Στην περίπτωση του παλμικού UWB χωρίς φέρον, το οποίο και συνιστά αντικείμενο της παρούσας εργασίας, έχουν προταθεί διαφορετικές αρχιτεκτονικές δεκτών, οι κύριες διαφορές των οποίων εντοπίζονται στον τύπο της αποδιαμόρφωσης (σύμφωνη/ασύμφωνη) και στη μετατροπή ή όχι του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό και σε ποιο στάδιο. Παρατίθενται οι πιο συχνά απαντούμενες αρχιτεκτονικές.

- Ψηφιακός δέκτης

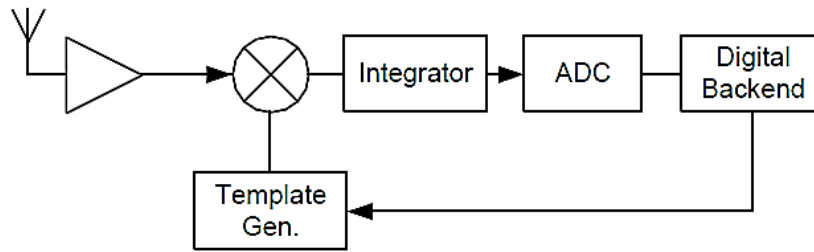
Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική δέκτη εδράζεται σε αμιγώς ψηφιακή υλοποίηση. Σύμφωνα με αυτή, αμέσως μετά τη λήψη του σήματος από την κεραία και την ενίσχυσή του ακολουθεί δειγματοληψία (μετατροπέας A/D) σε ρυθμό Nyquist. Η όποια απαιτούμενη επεξεργασία, όπως η αποδιαμόρφωση και εκτίμηση γίνεται επί ψηφιακών σημάτων, οδηγώντας σε πολύπλοκα και συνήθως ενεργοβόρα συστήματα DSP που είναι δύσκολο να ενσωματωθούν σε μικρές συσκευές. Παρόλα αυτά, η δυνατότητα που παρέχει η μεταχείριση αμιγώς ψηφιακών σημάτων προσδίδει χαρακτηριστικά μεγαλύτερης ευελιξίας εν συγκρίσει με άλλες υλοποιήσεις.



Σχήμα 3-34: Αμιγώς ψηφιακός δέκτης.
© Z. Zou

- Αναλογικός δέκτης συσχέτισης – προσαρμοσμένου φίλτρου

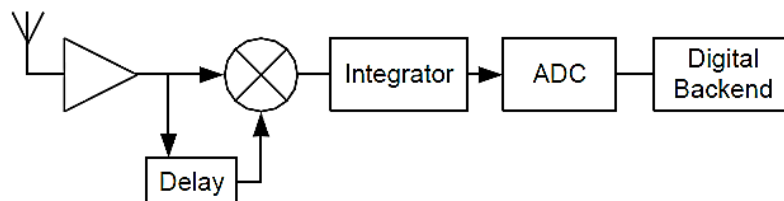
Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη αρχιτεκτονική δεκτών για χρήση σε συστήματα με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης είναι εκείνη του αναλογικού δέκτη συσχέτισης. Το λαμβανόμενο σήμα αποδιαμορφώνεται κάνοντας χρήση συσχετιστή – προσαρμοσμένου φίλτρου, καθιστώντας τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική λιγότερο απαιτητική σε συστήματα DSP σε σχέση με τον αμιγώς ψηφιακό δέκτη. Ωστόσο, όντας μια τεχνική σύμφωνης αποδιαμόρφωσης απαιτεί την τοπική δημιουργία κυματομορφής αναφοράς (template), κάτι που απαιτεί καλό συγχρονισμό και εκτίμηση του καναλιού και άρα είναι ευαίσθητη σε θόρυβο χρονισμού (jitter) καθώς και σε γρήγορες μεταβολές του καναλιού.



Σχήμα 3-35: Αναλογικός δέκτης συσχέτισης,
© Z. Zou

- Δέκτης μετάδοσης αναφοράς

Στην περίπτωση που για τη διαμόρφωση του σήματος έχει χρησιμοποιηθεί το σχήμα μετάδοσης αναφοράς (Transmitted Reference, TR), η αποδιαμόρφωση μπορεί να γίνει χωρίς να απαιτείται η δημιουργία τοπικής κυματομορφής αναφοράς. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, σε αυτό το σχήμα διαμόρφωσης οι μεταδιδόμενοι παλμοί είναι συσχετισμένοι μεταξύ τους (είτε ως ζεύγη όταν χρησιμοποιείται η τυπική μέθοδος - STR είτε ανα δύο όταν χρησιμοποιείται η διαφορική μέθοδος - DTR). Έτσι, για την αποδιαμόρφωση χρησιμοποιείται ως κυματομορφή αναφοράς προγενέστερος κατά χρονικό διάστημα d παλμός. Η συγκεκριμένη υλοποίηση χαρακτηρίζεται από απλότητα, έχει χαμηλές απαιτήσεις σε συγχρονισμό και δεν προϋποθέτει εκτίμηση του καναλιού, ενώ θεωρητικά μπορεί να συλλάβει όλη την ενέργεια από πολυδιαδρομική λήψη (παρότι δεν είναι τύπου Rake). Ωστόσο, για τη λειτουργία τέτοιων συστημάτων απαιτείται υψηλότερη στάθμη ενέργειας ανά bit ενώ ο θόρυβος και οι τυχόν παρεμβολές από άλλα συστήματα επηρεάζουν δραματικά την επίδοση, καθιστώντας τα κατάλληλα μόνο σε περιπτώσεις που απαιτούνται χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης (της τάξεως μερικών εκατοντάδων kbps).

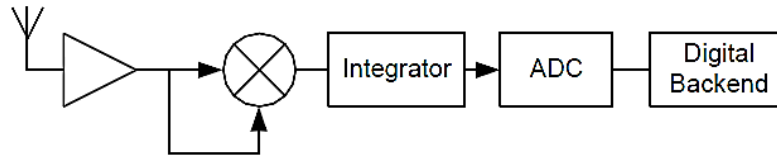


Σχήμα 3-36: Δέκτης μετάδοσης αναφοράς (TR),
© Z. Zou

- Δέκτης ανίχνευσης κατωφλίου ή ανίχνευσης ενέργειας

Οι δέκτες ανίχνευσης ενέργειας ή κατωφλίου βασίζονται στην αυτοσυσχέτιση του λαμβανόμενου σήματος. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ο συνδυασμός ενός τετραγωνιστή με έναν ολοκληρωτή προκειμένου να ανιχνευθεί η ενέργεια του λαμβανόμενου σήματος. Ανάλογα με τη στάθμη της ενέργειας γίνεται εκτίμηση του συμβόλου που έχει μεταδοθεί, συγκρίνοντάς την με κάποιο κατώφλι (το οποίο, όπως και το παράθυρο ολοκλήρωσης, θα πρέπει να μεταβάλλεται δυναμικά ανάλογα με τις αλλαγές στο κανάλι προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη επίδοση). Σχήματα διαμόρφωσης που προσφέρονται για τη χρήση αυτού του είδους δεκτών είναι τα PPM και OOK. Η εν λόγω αρχιτεκτονική είναι σχετικά απλή στην υλοποίηση και χαρακτηρίζεται από χαμηλές απαιτήσεις σε συγχρονισμό, γι' αυτό και ιστορικά ήταν από τις πρώτες που μελετήθηκαν. Τα σημαντικότερα μειονέκτηματά της είναι η έντονη ευαισθησία στο θόρυβο και τις

παρεμβολές (ειδικά στενής ζώνης), καθώς και η έλλειψη δυνατότητας εκμετάλλευσης της πολυδιαδρομικής λήψης. Για το λόγο αυτό η χρήση τέτοιων δεκτών περιορίζεται σε εφαρμογές με χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης.



Σχήμα 3-37: Δέκτης ανίχνευσης ενέργειας,
© Z. Zou

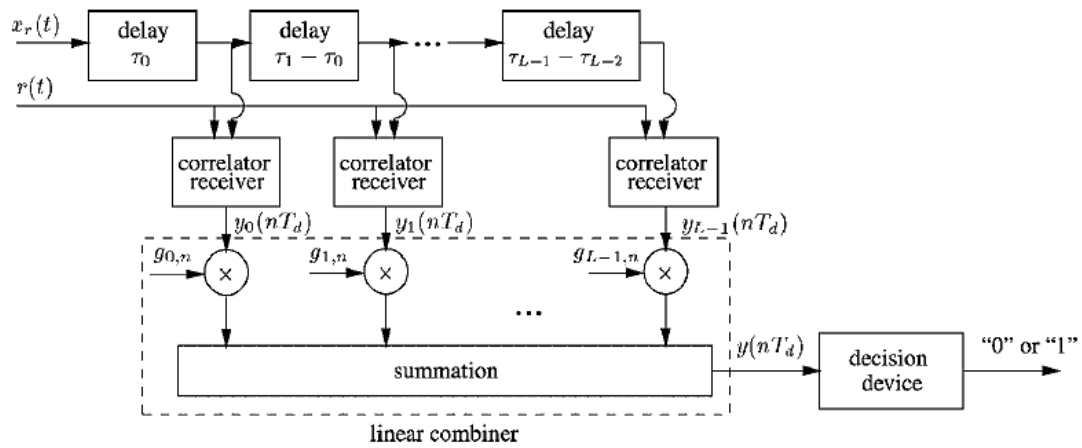
3.5.5 Χρήση δεκτών Rake

Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενοι δέκτες είναι τύπου συσχέτισης-προσαρμοσμένου φίλτρου. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, το UWB κανάλι εμφανίζει έντονη πολυδιαδρομική λήψη – πολυόδευση (multipath) και παρά το γεγονός ότι συνήθως δεν προκαλείται σημαντική διακύμανση στο πλάτος των λαμβανόμενων παλμών (fading), αφού οι παλμοί είναι ιδιαίτερα στενοί (το εύρος ζώνης πολύ μεγάλο) και η ανάλυση στο χρόνο είναι τέτοια που επιτρέπει στο δέκτη να διαχωρίσει τις επιμέρους συνιστώσες πολυόδευσης, η ενέργεια του εκπεμπόμενου σήματος δεν παύει να εξαπλώνεται σε αυτές. Λαμβάνοντας υπόψη την πολύ χαμηλή ισχύ εκπομπής που χαρακτηρίζει τα σήματα UWB, καθίσταται εμφανής η ανάγκη χρήσης δεκτών οι οποίοι θα είναι σε θέση να συλλέξουν την ενέργεια από τις επιμέρους συνιστώσες του σήματος, κάθε μία εκ των οποίων φθάνει στο δέκτη με διαφορετική χρονική καθυστέρηση και πλάτος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι κτενοειδείς δέκτες (Rake), οι οποίοι αποτελούνται από συστοιχία συσχετιστών, καθένας εκ των οποίων αναλαμβάνει να συλλέξει το λαμβανόμενο σήμα οφειλόμενο σε μία συνιστώσα πολυόδευσης. Το σήμα τελικά αποδιαμορφώνεται αφού οι επιμέρους συνεισφορές συνδυαστούν.

Οι δέκτες Rake, αφού πραγματοποιήσουν εκτίμηση του καναλιού (εκμεταλλεζόμενοι παλμούς-πλότους που μεταδίδονται από τον πομπό για συγχρονισμό), είναι σε θέση να συνδυάσουν τα επιμέρους αντίγραφα του σήματος που φθάνουν στο δέκτη με καθυστέρηση και να αποδιαμορφώσουν το σήμα έχοντας εκμεταλλευθεί μεγαλύτερο μέρος της λαμβανόμενης ενέργειας εν συγκρίσει με τους συμβατικούς δέκτες - ουσιαστικά πρόκειται για μια τεχνική χρονικού διαφορισμού (temporal diversity). Υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις στη σχεδίαση δεκτών Rake ανάλογα με τη μέθοδο συνδυασμού των συνιστωσών, όπως:

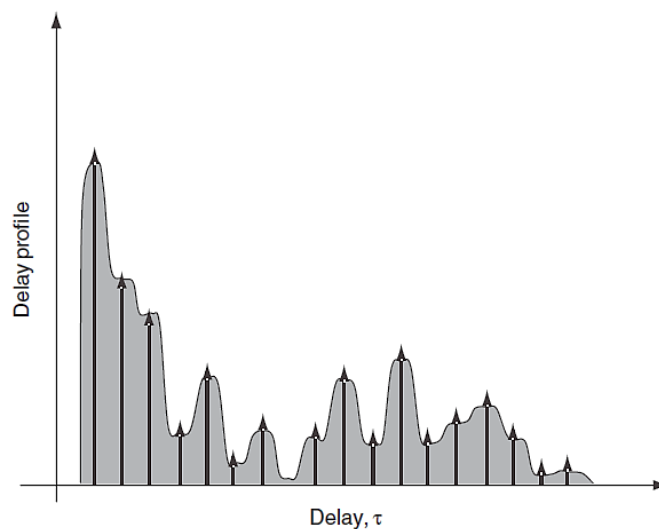
- Διαφορισμός με επιλογή (Selection Diversity, SD): ο δέκτης επιλέγει τη συνιστώσα πολυόδευσης που επιδεικνύει την καλύτερη ποιότητα σήματος (SNR) και αποδιαμορφώνει το σήμα με βάση τη συνιστώσα αυτή. Προφανώς η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει καλύτερη επίδοση σε σχέση με τους συμβατικούς δέκτες, ωστόσο δεν εκμεταλλεύεται τις υπόλοιπες συνιστώσες οι οποίες είναι παρούσες.
- Συνδυασμός ίσου κέρδους (Equal Gain Combining, EGC): ο δέκτης πριν την αποδιαμόρφωση λαμβάνει υπόψη τις επιμέρους συνεισφορές στο λαμβανόμενο σήμα εξαιτίας των διαφορετικών συνιστωσών πολυόδευσης, τις οποίες αφού ευθυγραμμίσει στο χρόνο προσθέτει χωρίς καμία επιπλέον στάθμιση.
- Συνδυασμός μεγίστου λόγου (Maximal Ratio Combining, MRC): αποτελεί επέκταση της μεθόδου EGC, σύμφωνα με την οποία προτού οι επιμέρους συνεισφορές προστεθούν

σταθμίζονται με κατάλληλους συντελεστές – βάρη. Σε κανάλια AWGN η βέλτιστη επίδοση δίδεται πολλαπλασιάζοντας κάθε συνιστώσα με βάρη ανάλογο του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος που αντιστοιχεί σε αυτή.



Σχήμα 3-38: Μπλοκ διάγραμμα δέκτη Rake, © W. Zhuang et al.

Προφανώς, η συλλογή της ενέργειας από το σύνολο των συνιστωσών πολυόδευσης απαιτεί τεράστιο πλήθος συσχετιστών (αναφερόμενοι στη βιβλιογραφία ως βραχίονες ή δάκτυλα), έναν για κάθε συνιστώσα και συνεπώς δέκτες μεγάλης πολυπλοκότητας (δέκτες All Rake, A-Rake).



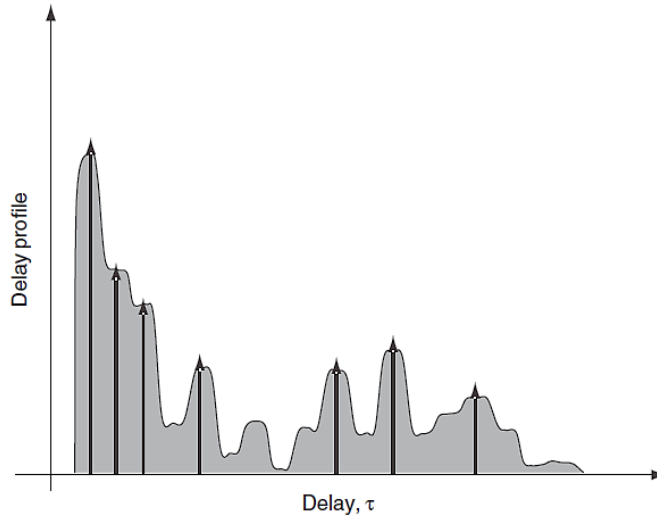
Σχήμα 3-39: Αρχή λειτουργίας δέκτη A-Rake, © I. Oppermann et al.

Φυσικά, τέτοιου είδους δέκτες δεν είναι πρακτικά υλοποιήσιμοι λόγω της δυσκολίας στη σχεδίαση και του υψηλού κόστους κατασκευής. Αντ’ αυτού χρησιμοποιούνται δέκτες Rake οι οποίοι εκμεταλλεύονται μόνο κάποιο πλήθος συνιστωσών και οι οποίοι, ανάλογα με το ποιες συνιστώσες επιλέγουν κατηγοριοποιούνται ως εξής:

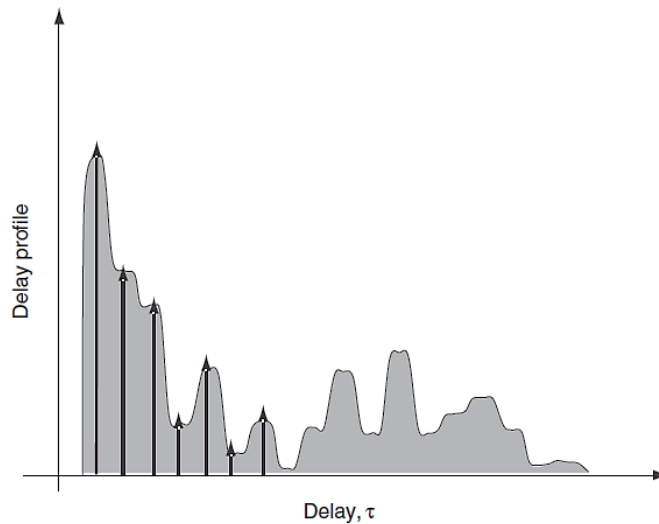
- Οι δέκτες Selective Rake (S-Rake) επιλέγουν από το σύνολο των συνιστωσών πολυόδευσης τις N καλύτερες (συνήθως σε επίπεδο πλάτους) προκειμένου να τις συνδυάσουν και να αποδιαμορφώσουν τελικώς το σήμα πληροφορίας.
- Οι δέκτες Partial Rake (P-Rake) επιλέγουν από το σύνολο των συνιστωσών τις N πρώτες

χρονικά, ανεξαρτήτως του πλάτους τους.

Προφανώς μεταξύ των δύο, καλύτερη επίδοση επιδεικνύουν οι δέκτες S-Rake, ωστόσο η πολυπλοκότητά τους είναι μεγαλύτερη εν συγκρίσει με τους δέκτες P-Rake. Η ψαλίδα στην επίδοση κλείνει όταν οι συνιστώσες με το μεγαλύτερο πλάτος καταφθάνουν στο δέκτη νωρίτερα από τις υπόλοιπες.



Σχήμα 3-40: Αρχή λειτουργίας δέκτη S-Rake, © I. Oppermann et al.



Σχήμα 3-41: Αρχή λειτουργίας δέκτη P-Rake, © I. Oppermann et al.

3.6 Κεραίες UWB

3.6.1 Εισαγωγή στις κεραίες UWB

Η σχεδίαση αποδοτικών κεραιών πάντα αποτελούσε πρόκληση για τους μηχανικούς τηλεπικοινωνιών λόγω των πολλών και αλληλοσυγκρουόμενων απαιτήσεων με τις οποίες είναι συνυφασμένες (μικρό μέγεθος και βάρος, υψηλό κέρδος, σταθερή συμπεριφορά στο εύρος ζώνης του συστήματος, χαμηλό κόστος κ.ά.) και τον κρίσιμο ρόλο που κατέχουν στην επίτευξη

επικοινωνίας υψηλών επιδόσεων. Συνήθως, στα συστήματα στενής ζώνης τα χαρακτηριστικά των κεραιών θεωρούνται σταθερά για ένα μικρό ποσοστό του εύρους ζώνης περί την κεντρική συχνότητα, επιτρέποντας την ευκολότερη ανάλυση και σχεδιάσή τους, ωστόσο, οι κεραιές για συστήματα UWB παρουσιάζουν έντονη συχνοεπιλεκτική συμπεριφορά στα επιμέρους χαρακτηριστικά τους εξαιτίας του τεραστίου φασματικού περιεχομένου που τα διέπει, η οποία δε δύναται να αμεληθεί. Επιπλέον, αν και στα συμβατικά συστήματα στενής ζώνης η περιγραφή της κεραιάς στο πεδίο της συχνότητας είναι αρκετή για να χαρακτηρίσει πλήρως τη συμπεριφορά της, στα συστήματα UWB και ιδίως στα παλμικού τύπου UWB όπου απαιτείται η μετάδοση πολύ στενών παλμών χωρίς παραμόρφωση, είναι πολλές φορές απαραίτητη και η περιγραφή της στο πεδίο του χρόνου μέσω της κρουστικής απόκρισής της.

Οι κεραιές δρουν όπως ένα υψιπερατό φίλτρο, μετασχηματίζοντας το σήμα που δέχονται στην είσοδό τους προτού το ακτινοβολήσουν. Μια κεραιά τροφοδοτούμενη από παλμό UWB παρουσιάζει φαινόμενα:

- Διαφορισμού (κάθε φορά που σήμα μεταδίδεται ή λαμβάνεται από κάποια κεραιά παραγωγίζεται, αφαιρώντας τυχόν dc συνιστώσα)
- Διασποράς (άπλωμα του παλμού στο χρόνο)
- Ακτινοβολίας του σήματος στο χώρο
- Απωλειών (διηλεκτρικών/ωμικών)

3.6.2 Κατευθυντικότητα, διαγράμματα ακτινοβολίας και κέρδους

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά σε μια κεραιά είναι η κατευθυντικότητα που εισάγει στο εκπεμπόμενο σήμα. Ο κλασικός ορισμός της κατευθυντικότητας D έχει ως εξής:

$$D(f, \theta, \varphi) = \frac{U(f, \theta, \varphi)}{U_0} = \frac{4\pi U(f, \theta, \varphi)}{P_{rad}}$$

όπου U η ένταση της ακτινοβολίας για δεδομένη κατεύθυνση, U_0 η μέση ένταση της ακτινοβολίας προς όλες τις κατευθύνσεις (σφαιρικά), P_{rad} η συνολικά ακτινοβολούμενη ισχύς, θ η γωνία ανύψωσης και φ το αζιμούθιο. Η κατευθυντικότητα συνδέεται με το κέρδος G με τη σχέση:

$$G(f, \theta, \varphi) = eD(f, \theta, \varphi)$$

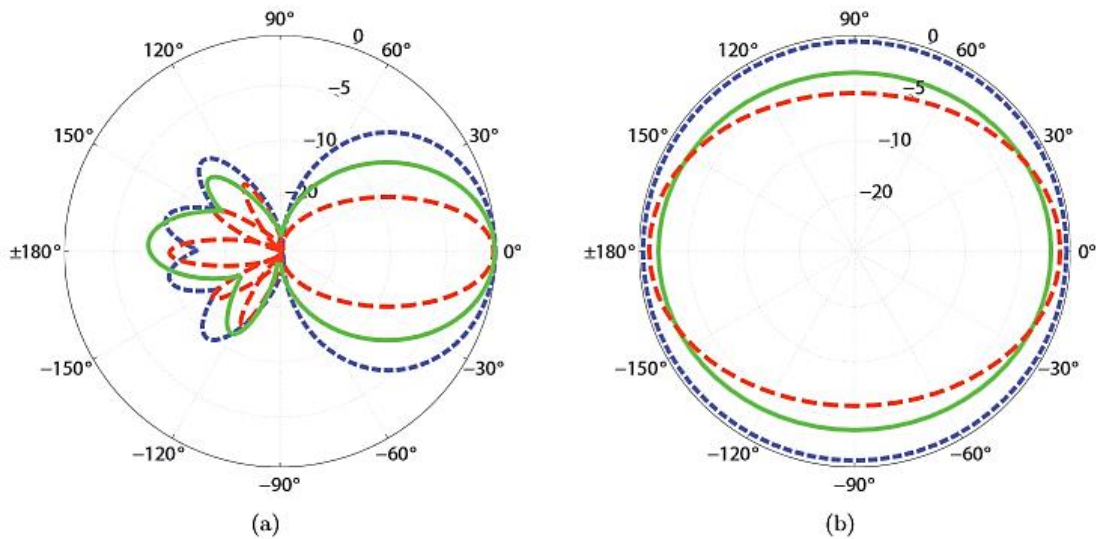
όπου e η απόδοση της κεραιάς ως ακτινοβολητή (radiation efficiency), προκύπτουσα ως:

$$\varepsilon = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{rad}}{P_{rad} - P_{loss}}$$

Εναλλακτικά, το κέρδος μπορεί να υπολογισθεί από τη συνάρτηση μεταφοράς της κεραιάς ως εξής:

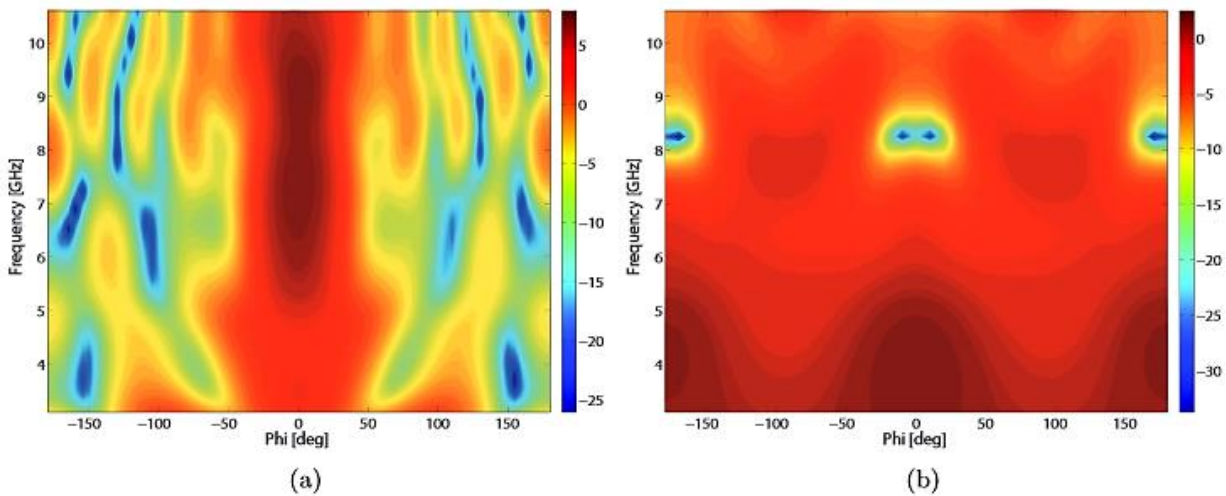
$$G(f, \theta, \varphi) = \frac{4\pi f^2}{c_0^2} |H(f, \theta, \varphi)|^2$$

Στις κεραιές στενής ζώνης, για την αναπαράσταση της ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το χώρο αρκούν συνήθως δύο διαγράμματα ακτινοβολίας (radiation pattern), ένα στο αζιμουθακό επίπεδο και ένα ως συνάρτηση της γωνίας ανύψωσης. Αυτό είναι εφικτό καθώς η κεραιά θεωρείται ότι διατηρεί σταθερά χαρακτηριστικά για το εύρος ζώνης του σήματος.



Σχήμα 3-42: Παραδείγματα αζιμουθιακών διαγραμμάτων ακτινοβολίας κεραιών στενής ζώνης: (a) Κατευθυντικές κεραιές, (b) ομοιοκατευθυντικές κεραιές, © G. Quintero Díaz De León

Στην περίπτωση ωστόσο κεραιών UWB μια τέτοια παραδοχή δεν μπορεί να γίνει λόγω του πολύ εκτεταμένου φασματικού περιεχομένου των σημάτων. Αντ’ αυτού χρησιμοποιείται το λεγόμενο διάγραμμα κέρδους (gain pattern), το οποίο δεν είναι τίποτα περισσότερο από μια δισδιάστατη αναπαράσταση του κέρδους ως συνάρτηση της συχνότητας και της γωνίας.

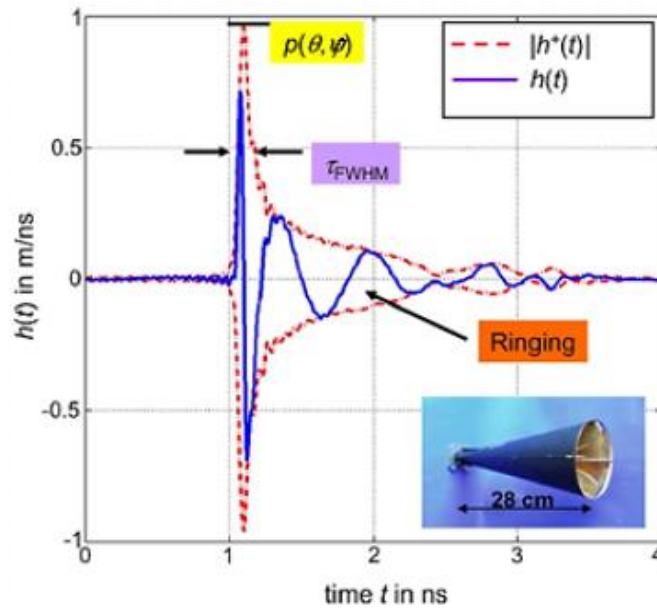


Σχήμα 3-43: Παράδειγμα διαγράμματος κέρδους για κεραιές UWB (θ =σταθ.): (a) κεραιά Vivaldi, (b) κυκλικό μονόπολο, © G. Quintero Díaz De León

Προκειμένου να ερμηνευθούν καλύτερα τα διάφορα φαινόμενα και ιδίως εκείνο της διασποράς, είναι χρήσιμη η μελέτη της αναλυτικής κρουστικής απόκρισης $h(t, \theta_{TX}, \phi_{TX})$ που παρουσιάζει η κεραιά και η οποία προκύπτει μετά από μετασχηματισμό Hilbert της κρουστικής απόκρισης ως εξής:

$$h^+(t, \theta, \varphi) = h(t, \theta, \varphi) + j\mathcal{H}\{h(t, \theta, \varphi)\}$$

Μια ένδειξη για τη διασπορά που εισάγει η κεραιά στο μεταδιδόμενο σήμα γίνεται εύκολα αντιληπτή από την περιβάλλουσα $|h^+(t)|$, αφού η τελευταία καταδεικνύει την κατανομή της ενέργειας στο χρόνο.



Σχήμα 3-44: Παράδειγμα κρουστικής απόκρισης για χοανοκεραία, © W. Wiesbeck et al.

Μερικά από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την επίδοση των κεραιών UWB είναι η μέγιστη τιμή της περιβάλλουσας, το εύρος της περιβάλλουσας, τυχόν ταλάντωση (ringing) και το μεταβατικό κέρδος.

Η μέγιστη τιμή της περιβάλλουσας

$$p(\theta, \varphi) = \max_t |h^+(t, \theta, \varphi)| \text{ σε m/ns}$$

είναι ένα σημαντικό μέγεθος και είναι επιθυμητό να έχει υψηλή τιμή, αφού συνδέεται με την ισχύ που είναι σε θέση να ακτινοβολήσει η κεραία.

Ένα άλλο μέγεθος που έχει καθοριστική σημασία είναι το εύρος της περιβάλλουσας, το οποίο συνήθως μετράται στα σημεία ημίσεος πλάτους (Full Width at Half Maximum, FWHM) της $|h^+(t, \theta, \varphi)|$. Το FWHM περιγράφει το άπλωμα στο χρόνο που υφίσταται ο εκπεμπόμενος από την κεραία παλμός, ή αλλιώς τον απαιτούμενο χρόνο που απαιτείται προκειμένου να ακτινοβοληθεί το ήμισυ της ενέργειας. Το FWHM ορίζεται ως:

$$\tau_{FWHM} = t_1 |_{h^+(t_1)=p/2} - t_2 |_{t_2 < t_1, h^+(t_1)=p/2}$$

και γενικά δε θα πρέπει να ξεπερνά την τάξη μερικών picosecond προκειμένου να εξασφαλισθεί η δυνατότητα επικοινωνίας σε υψηλούς ρυθμούς δεδομένων ή η υψηλή ανάλυση σε εφαρμογές ραντάρ.

Κατά τη μετάδοση ενός σήματος παλμικού τύπου από την κεραία είναι πιθανή η εμφάνιση ουράς ταλάντωσης (ringing). Έτσι, το ακτινοβολούμενο από την κεραία σήμα δεν έχει πλέον εμφάνιση παλμού αλλά ενός παλμού συνοδευόμενου από μια ουρά αποσβεννύμενης ταλάντωσης. Τα αίτια του φαινομένου αυτού εντοπίζονται σε αποθήκευση ενέργειας ή πολλαπλές ανακλάσεις στο εσωτερικό της κεραίας. Η διάρκεια του ringing τ_r ορίζεται ως ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που η περιβάλλουσα εμφανίζει μέγιστο $p(\theta, \varphi)$ έως ότου πέσει κάτω από κάποιο κατώφλι $\alpha \cdot p(\theta, \varphi)$. Μαθηματικά εκφράζεται ως εξής:

$$\tau_{r=\alpha} = t_1|_{h^+(t_1)=ap} - t_2|_{t_2 < t_1, h^+(t_1)=p}$$

Η ενέργεια που αποδίδεται στο ringing δεν έχει κανένα ουσιαστικό όφελος αλλά αντίθετα προκαλεί ελάττωση τη μέγιστης τιμής $p(\theta, \varphi)$ περιβάλλουσας και μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα διασυμβολικής παρεμβολής (ISI). Για το λόγο αυτό θα πρέπει να διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, χαμηλότερα από μερικά πλάτη περιβάλλουσας FWHM.

Το μεταβατικό κέρδος είναι ένα μέτρο της δυνατότητας που έχει μια κεραία να ακτινοβολήσει δεδομένη κυματομορφή ως ακολούθως:

$$g_T(\theta, \varphi) = \frac{\|h(t, \theta, \varphi) * \frac{du_{Tx}(t)}{dt}\|^2}{\|\sqrt{\pi}c_0 u_{Tx}(t)\|^2} = \frac{\|H(\omega, \theta, \varphi) * j\omega U_{Tx}(f)\|^2}{\|\sqrt{\pi}c_0 U_{Tx}(f)\|^2}$$

3.6.3 Καθυστέρηση ομάδας

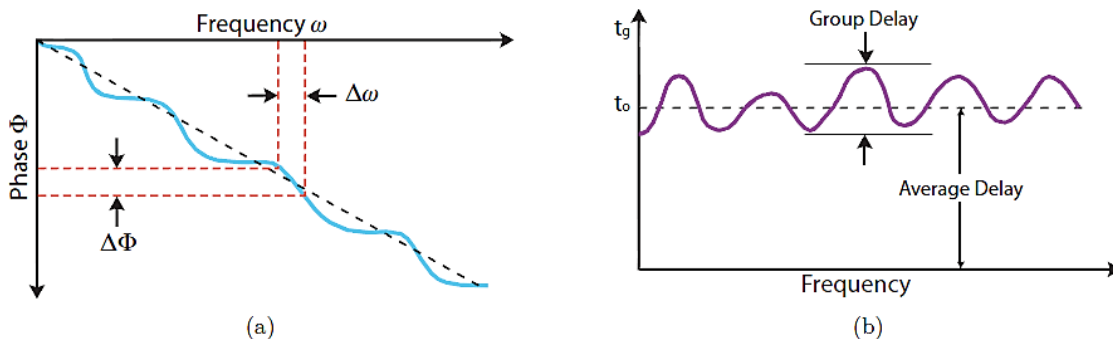
Η καθυστέρηση ομάδας (group delay) αποτελεί μέτρο της καθυστέρησης και της παραμόρφωσης φάσης που υφίσταται ένα σήμα λόγω εξάρτησης από τη συχνότητα, καθώς αυτό διέρχεται από δίθυρο (όπως φίλτρο, ενισχυτή, μείκτη). Θεωρώντας συνάρτηση μεταφοράς

$$H(\omega) = A(\omega)e^{j\Phi(\omega)}$$

όπου $A(\omega)$ η απόκριση πλάτους και $\Phi(\omega)$ η απόκριση φάσης του συστήματος, η καθυστέρηση ομάδας ορίζεται μαθηματικά ως:

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\Phi(\omega)}{d\omega} = -\frac{d\Phi(f)}{2\pi df}$$

Τυχόν μη γραμμικότητα στη φάση προκαλεί παραμόρφωση του σήματος και είναι ενδεικτική της ικανότητας της συσκευής να αποθηκεύει ενέργεια. Το αποτέλεσμα είναι η πρόκληση ringing και ταλαντώσεων στην κρουστική απόκριση της κεραίας, υποβιβάζοντας την επίδοση των συστημάτων στα οποία χρησιμοποιείται.



Σχήμα 3-45: Παράδειγμα καθυστέρησης ομάδας: (α) Απόκριση φάσης, (β) Καθυστέρηση ομάδας
© G. Quintero Díaz De León

Ένα άλλο ενδιαφέρον μέγεθος είναι η μέση καθυστέρηση ομάδας $\bar{\tau}_g$ η οποία στον υπολογισμό λαμβάνει υπόψη το συνολικό εύρος συχνοτήτων που συμμετέχουν στο σήμα:

$$\bar{\tau}_g = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1} \int_{\omega_1}^{\omega_2} \tau_g(\omega) d\omega$$

Έτσι, καθίσταται εφικτός ορισμός ενός άλλου μεγέθους, της σχετικής καθυστέρησης ομάδος $\tau_{g,rel}$, η οποία αντιπροσωπεύει τη σταθερότητα της καθυστέρησης ομάδος και δύναται να υπολογισθεί ως η απόκλιση από τη μέση καθυστέρηση ομάδας $\bar{\tau}_g$:

$$\tau_{g,rel}(\omega) = \tau_g(\omega) - \bar{\tau}_g$$

Η καθυστέρηση ομάδας θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρότερη και πιο σταθερή, ωστόσο δεν υπάρχουν τυποποιημένες τιμές και η σωστή επιλογή επαφίεται στην κρίση του σχεδιαστή.

3.6.4 Συντελεστής πιστότητας

Ο Συντελεστής Πιστότητας (Fidelity Factor, FF) προτάθηκε ως ένα μέτρο για την αξιολόγηση των φαινομένων παραμόρφωσης που επιφέρουν κεραιές σε παλμικά συστήματα ήδη από το 1994. Ορίζεται ως η μέγιστη ετερο-συσχέτιση του κανονικοποιημένου προς εκπομπή σήματος $r(t)$ με το κανονικοποιημένο ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο $f(t)$ στο μακρινό πεδίο της κεραιάς (far field). Οι κανονικοποιήσεις γίνονται προκειμένου η σύγκριση να αφορά μόνο το σχήμα των παλμών και όχι το πλάτος τους, αφού το $f(t)$ αναμένεται προφανώς πολύ μικρότερο σε σχέση με το $r(t)$. Έτσι, προκύπτει:

$$FF = \max_{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(t) \hat{r}(t + \tau) dt$$

όπου

$$\hat{r}(t) = \frac{r(t)}{[\int_{-\infty}^{\infty} |r(t)|^2 dt]^{1/2}}$$

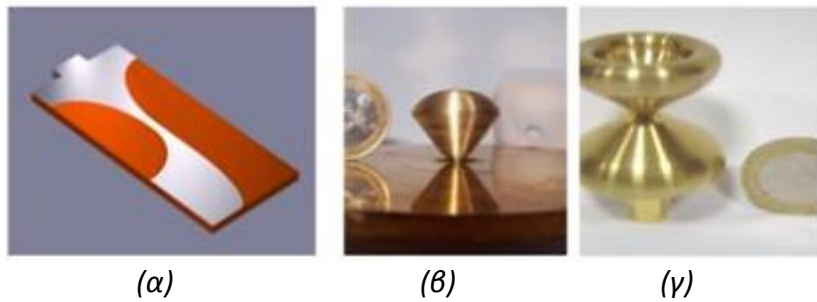
και

$$\hat{f}(t) = \frac{f(t)}{[\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt]^{1/2}}$$

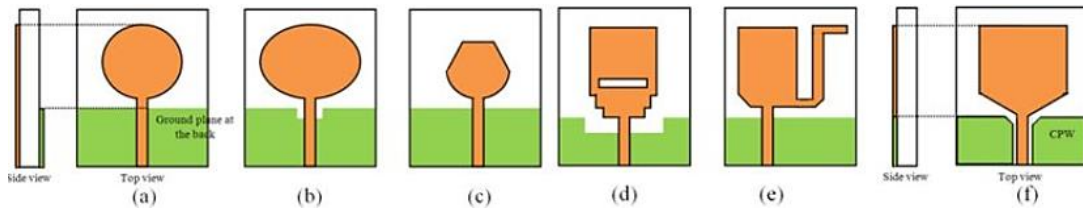
3.6.5 Υποψήφια είδη κεραιών

Παρά το μεγάλο πλήθος κεραιών που έχουν προταθεί για χρήση σε επικοινωνίες UWB, η πραγματοποίηση κατάλληλης επιλογής ανάλογα με την εφαρμογή είναι γενικά πολύπλοκη υπόθεση. Η κεραιά θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από μικρό μέγεθος για να χωράει σε φορητές ή υπερ-φορητές συσκευές, σταθερό κέρδος και γραμμικότητα της φάσης σε όλο το εύρος των συχνοτήτων και τέλος χαμηλό κόστος και ευκολία στην κατασκευή.

Υπό το πρίσμα αυτό, υποψήφια για χρήση είναι οι κεραιές Vivaldi, μονοκωνικές και δικωνικές κεραιές, οι χοανοκεραίες και προσφάτως, επίπεδα μονόπολα και δίπολα, τα οποία κατασκευάζονται εύκολα σε PCB.



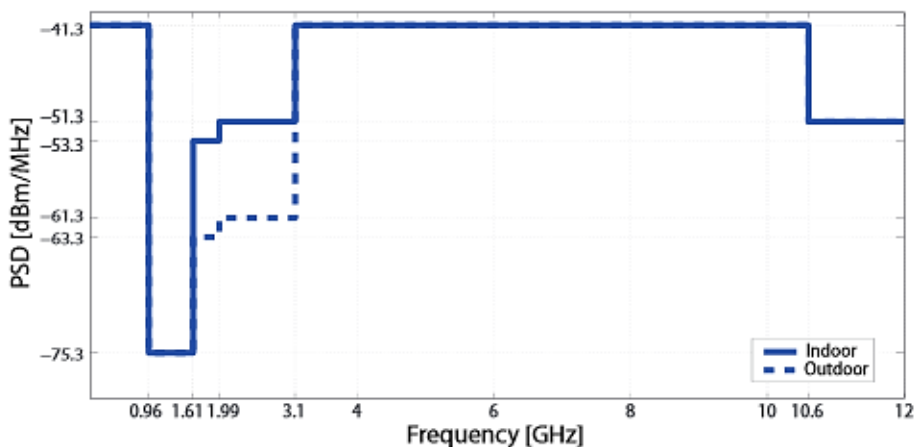
Σχήμα 3-46: (α) Κεραία Vivaldi, (β) Μονοκωνική κεραία, (γ) Δικωνική κεραία, © O. Haraz et al.



Σχήμα 3-47: Επίπεδες κεραίες PCB, © O. Haraz et al.

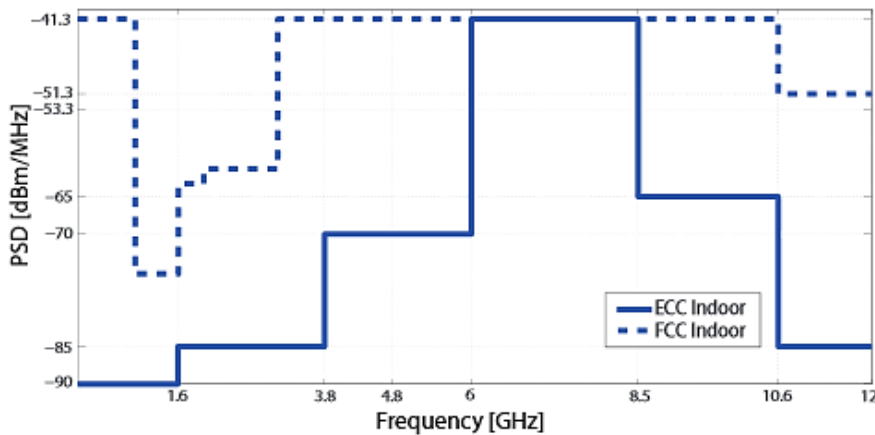
3.7 Ρυθμιστικό πλαίσιο

Όπως αναφέρθηκε στην ιστορική αναδρομή, το έντονο ενδιαφέρον γύρω από το UWB ξεκίνησε όταν τον Φεβρουάριο του 2002 η FCC (Federal Communications Commission) στις ΗΠΑ ανακοίνωσε το πρώτο ρυθμιστικό κείμενο (“Report and Order”) επιτρέποντας τη χρήση σημάτων UWB στο εύρος μεταξύ 3.1-10.6 GHz. Σύμφωνα με την FCC, προκειμένου ένα σήμα να θεωρείται UWB θα πρέπει είτε να έχει φασματικό περιεχόμενο μεγαλύτερο των 500 MHz είτε τουλάχιστον 20% της κεντρικής συχνότητας λειτουργίας του (κλασματικό εύρος ζώνης). Η ανώτερη επιτρεπτή στάθμη ισχύος εκπομπής ορίστηκε στα -41.3 dBm/MHz εντός της ζώνης 3.1-10.6 GHz. Σύμφωνα με την FCC, η εκδοθείσα μάσκα εξασφαλίζει την λειτουργία χωρίς παρεμβολές των ήδη υφιστάμενων συστημάτων ενώ προσφέρει επιπλέον προστασία σε κρίσιμες υπηρεσίες όπως το GPS, υπαγορεύοντας τη μέγιστη ισχύ εκπομπής στα -75 dBm/MHz για τη ζώνη 0.96-1.61 GHz. Τέλος, η ισχύς εκπομπής δε θα πρέπει να ξεπερνά τα 0 dBm EIRP για το εύρος ζώνης των 50 MHz με κέντρο την συχνότητα με την υψηλότερη φασματική πυκνότητα ισχύος.



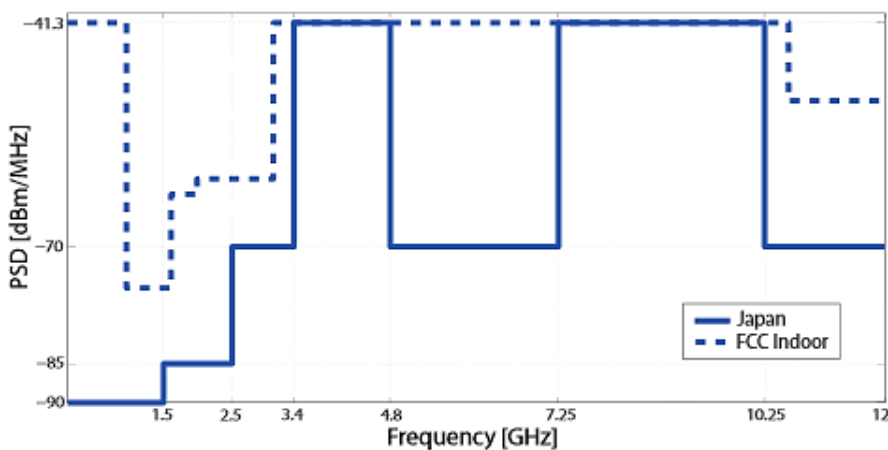
Σχήμα 3-48: Μάσκες της FCC για επικοινωνία UWB εσωτερικού (indoor) και εξωτερικού (outdoor) χώρου, © G. Quintero Díaz De León

Στην Ευρώπη, το ETSI (European Technical Standard Institute) και η ECC (Electronic Communications Committee) του CEPT (European Conference of Postal and Telecommunications Administration) έχουν επίσης εκδώσει σχετικές οδηγίες (Φεβρουάριος του 2007) σχετικά με την ορθή χρήση επικοινωνιών UWB. Σύμφωνα με αυτές, οι συσκευές UWB θα πρέπει κατά κύριο λόγο να χρησιμοποιούνται εντός εσωτερικού χώρου για αποφυγή παρεμβολών, ενώ ο εξοπλισμός θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να σταματήσει τη μετάδοση εντός 10 δευτερολέπτων από την πρώτη μετάδοση, εφόσον δε λάβει απάντηση από συσχετισμένο πομποδέκτη. Επιπλέον, στην οδηγία καθίσταται σαφές ότι οι πιθανές εφαρμογές UWB δε θα πρέπει να αφορούν σταθερές εξωτερικές κεραίες ή οχήματα. Όπως είναι φανερό από την εκδοθείσα μάσκα, τα επιτρεπτά όρια εκπομπής στην Ευρώπη είναι αυστηρότερα εν συγκρίσει με τις ΗΠΑ.



Σχήμα 3-49: Σύγκριση μεταξύ масκών εσωτερικού χώρου ECC και FCC, © G. Quintero Díaz De León

Στην Ιαπωνία η αρμόδια υπηρεσία εξέδωσε το Σεπτέμβριο του 2005 μάσκα για επικοινωνία UWB εσωτερικού χώρου η οποία δίνει τη δυνατότητα εκπομπής σε δύο ζώνες, στα 3.4-4.8 GHz και στα 7.25-10.25 GHz. Για τη χρήση συσκευών στην πρώτη ζώνη είναι απαραίτητη η εφαρμογή τεχνολογίας εντοπισμού και αποφυγής (Detect and Avoidance, DAA) προκειμένου να διασφαλιστεί η αρμονική συνύπαρξη των νέων υπηρεσιών με ήδη υφιστάμενα συστήματα. Σε περίπτωση που οι συσκευές δε φέρουν αντίστοιχη τεχνολογία η επιτρεπτή μέση στάθμη εκπομπής τίθεται στα -70 dBm/MHz και η μέγιστη στάθμη εκπομπής στα -64 dBm/MHz. Η δεύτερη ζώνη συχνοτήτων δεν απαιτεί τεχνολογία DAA.



Σχήμα 3-50: Σύγκριση μεταξύ масκών εσωτερικού χώρου Ιαπωνίας και FCC, © G. Quintero Díaz De León

3.7 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] M. Ghavami, L. B. Michael, R. Kohno, Ultra Wideband signals and systems in communication engineering second, Second Edition, John Wiley & Sons, 2007
- [2] M.-G. Di Benedetto, G. Giancola, Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals, Prentice Hall, 2004
- [3] I. Oppermann, M. Hamalainen, J. Iinatti, UWB Theory and Applications, John Wiley & Sons, 2004
- [4] P. Pagani, F. T. Talom, P. Pajusco, B. Uguen, Ultra Wide Band Radio Propagation Channels, ISTE and John Wiley & Sons, 2008
- [5] K. Siwiak, D. McKeown, Ultra-Wideband Radio Technology, John Wiley & Sons, 2004
- [6] X. Shen, M. Guizani, T. Le-Ngoc, Ultra-Wideband Wireless Communications and Networks, John Wiley & Sons, 2006
- [7] R. Gharpurey, P. Kinget, Ultra Wideband: Circuits, Transceivers and Systems, Springer, 2008
- [8] Z. Zou, "Impulse Radio UWB for the Internet-of-Things: A study on UUF/UWB Hybrid Solution", Doctoral Thesis, Stockholm, December 2011
- [9] Χ. Ι. Θώμος, «Δέκτες/Αποδιαμορφωτές Βασικής Ζώνης για Ασύρματα Συστήματα Υπέρ-Ευρείας Ζώνης (Ultra Wideband – UWB)», Διδακτορική διατριβή, Πάτρα, Δεκέμβριος 2011
- [10] Α. Π. Δουκέλη, «Σχεδιασμός Πομποδεκτών για Ασύρματα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα Υπέρ-ευρείας Ζώνης», Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, Δεκέβριος 2012
- [11] Ε. Λ. Κόλλια, «Σχεδίαση και ανάλυση UWB κεραιών με τη χρήση του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης SuperNEC. Βελτιστοποίηση των χαρακτηριστικών της κεραίας με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων», Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Μάρτιος 2010
- [12] J. Ryckaert, M. Badoroglu, C. Desset, V. De Heyn, G. Van der Plas, P. Wambacq, B. Van Poucke, S. Donnay, "Carrier-Based UWB Impulse Radio: Simplicity, Flexibility and Pulser Implementation in 0.18-micron CMOS", 2005 IEEE International Conference on Ultra-Wideband, September 2005
- [13] K. Iniewski, Wireless Technologies: Circuits, Systems and Devices, CRC Press, 2007
- [14] A. Batra, J. Balakrishnan, G.R. Aiello, J.R. Foerster, A. Dabak, "Design of a Multiband OFDM System for Realistic UWB Channel Environments", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 52, No. 9, September 2004
- [15] S. Parajulim B. Mishra, "Multiband Orthogonal Frequency Division Multiplexing Based Ultra Wideband System", International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 2, Issue 6, pp. 922-924, November-December 2012
- [16] M. Schmidt, F. Jondral, "Ultra Wideband Transmission based on MC-CDMA", Global Telecommunications Conference (GLOBECOM) 2003, Vol. 2, December 2003

- [17] Y.-B. Park, C.-S. Kim, K.-K. Cho, C.-J. Lee, H.-K. Lee, J.-M. Kim, K.-S. Kwak, "Performance of UWB DS-CDMA/OFDM/MC-CDMA System", The 47th IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), Vol. 1, July 2004
- [18] T. S. Chakraborty, S. Chakrabarti, "Adaptive Overlap-and-Add Technique in MB-OFDM based Receiver Design", 2011 National Conference on Communications (NCC), January 2011
- [19] S. Hara, R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA", IEEE Communications Magazine, December 1997
- [20] S. Hara, R. Prasad, DS-CDMA, MC-CDMA and MT-CDMA for Mobile Multi-Media Communications, IEEE 46th Vehicular Technology Conference, Mobile Technology for the Human Race, April-May 1996
- [21] M. Hélar, R. Le Gouable, J.-F. Hélar, J.-Y. Baudais, "Multicarrier CDMA techniques for future wideband wireless networks, Annales Des Télécommunications, Vol. 56, Issue 5-6, May 2001
- [22] A. C. McCormick, E. A. Al-Susa, "Multicarrier CDMA for future generation communication", Electronics & Communication Engineering Journal, April 2002
- [23] L. L. Hanzo, T. Keller, OFDM and MC-CDMA: A primer, Wiley-IEEE Press, 2007
- [24] K. N. Jleta, M. Ismail, A. M. Hasbi, "Performance of Multitone Code Division Multiple Access (MT-CDMA) in Fading Channels and in Presence of Narrowband Jamming, 13th IEEE International Conference on Networks jointly held with the IEEE 7th Malaysia International Conference on Communication, November 2005
- [25] K.-L. Du, M. N. S. Swamy, Wireless Communication Systems From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies, Cambridge University Press, 2010
- [26] D. Dobkin, RF Engineering for Wireless Networks Hardware, Antennas and Propagation, Newnes, 2004
- [27] H. Zhang, T. Arita, M. Nakagawa "A Statistical Model for the Small-Scale Multipath Fading Characteristics of Ultra Wideband Indoor Channel", IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2002
- [28] A. F. Molisch, J. R. Foerster, M. Pendergrass, "Channel Models for Ultrawideband Personal Area Networks", IEEE Wireless Communications Magazine, December 2003
- [29] J. R. Foerster, M. Pendergrass, A. F. Molisch, "A channel Model for Ultrawideband Indoor Communication", International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), October 2003
- [30] A. Tkac, V. Wieser, S. Pollak, "Calculation of Impulse Response in Rician and Rayleigh Channel", ELEKTRO, 2012
- [31] M. S. W. Chen, R. W. Brodersen, "The Impact of a Wideband Channel on UWB System Design", IEEE Military Communications Conference (MILCOM), November 2004

- [32] J. K. Townsend, L. Li, R. J. Ulman “Performance of Transmitted Reference UWB Communications with Imperfect Power Control”, IEEE Military Communications Conference (MILCOM), October 2007

- [33] F. Elbahhar, A. Rivenq-Menhaj, J.M. Rouvaen, “Multi-User Ultra-Wide Band Communication System Based on Modified Gegenbauer and Hermite Functions”, Wireless Personal Communications, Vol. 34, Issue 3, August 2005

- [34] A. Lamari, F. Elbahhar, A. Rivenq, J.M. Rouaven, “Performance Evaluation of a Multi-band UWB Location and Communication System Based on Modified Gegenbauer Functions”, Wireless Personal Communications, Vol. 48, Issue 3, February 2009

- [35] A. Elabed, F. Elbahhar, Y. Elhillali, A. Rivenq, R. Ellassali, “UWB Communication System Based on Bipolar PPM with Orthogonal Waveforms”, Wireless Engineering and Technology, Vol. 3, No. 3, 2012

- [36] W. Wiesbeck, G. Adamiuk, “Basic Properties and Design Principles of UWB Antennas”, Proceedings of the IEEE, Vol. 97, No. 2, February 2009

- [37] O. Haraz, A.-R. Sebak, UWB Antennas for Wireless Applications, Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications, InTech, 2013

- [38] G. Quintero Díaz De León, “Analysis and Design of Ultra-Wideband Antennas in the Spectral and Temporal Domains”, Doctoral Thesis, EPFL, Laussane, June 2010

Κεφάλαιο 4

Το πρόβλημα των παρεμβολών

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικότερα προηγουμένως, η βασική διαφοροποίηση του συνόλου των τεχνολογιών UWB έναντι των παραδοσιακών μεθόδων διαμόρφωσης έγκειται στο γεγονός ότι το εκπεμπόμενο σήμα διαθέτει ιδιαίτερα εκτεταμένο φασματικό περιεχόμενο. Για το λόγο αυτό και με δεδομένο ότι προκαλείται επικάλυψη σε αδειοδοτούμενες φασματικές ζώνες, η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς των πομπών UWB θα πρέπει να διατηρείται σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα, όπως αυτά έχουν οριστεί από τις κατά τόπους υπεύθυνες ρυθμιστικές αρχές με μάσκες που έχουν εκδώσει. Το γεγονός αυτό, ωστόσο, συνδυαζόμενο με τα φαινόμενα διάδοσης, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του καναλιού (έντονη πολυδιαδρομική λήψη – multipath) αλλά και τον θόρυβο, περιορίζει τις εφαρμογές του UWB ως προς την περιοχή κάλυψης. Έτσι, για εφαρμογές που απαιτούν σημαντικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (της τάξεως δεκάδων έως εκατοντάδων Mbps), η περιοχή κάλυψης συνήθως δεν ξεπερνά τις μερικές δεκάδες μέτρα. Σε κάθε περίπτωση, για χρήση σε περιβάλλον εσωτερικού χώρου (indoor) εμφανίζεται ως μια ελκυστική επιλογή φυσικού στρώματος (PHY), δεδομένου ότι οι αποστάσεις που καλείται να εξυπηρετήσει το όποιο δίκτυο είναι σχετικά μικρές και συνήθως υπάρχει οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη (Line of Sight – LOS).

Το πρόβλημα που εισάγει η αναγκαστικά χαμηλή ισχύς εκπομπής επιδεινώνεται έτι περαιτέρω στην περίπτωση όπου περισσότερα από ένα ζεύγη πομπού-δέκτη (Tx-Rx) καλούνται να ανταλλάξουν δεδομένα χρησιμοποιώντας την ίδια φασματική ζώνη (κανάλι), ταυτόχρονα και σε κοντινή απόσταση το ένα από το άλλο. Γενικά, όταν επιμέρους ζεύγη πομπού-δέκτη (χρήστες) του καναλιού μοιράζονται την ίδια φασματική περιοχή, αυτό που προκύπτει είναι παρεμβολή του ενός σήματος στο άλλο και τελικά μερική ή ολική καταστροφή της μεταδιδόμενης πληροφορίας (σύγκρουση).

4.2 Κοινή πρόσβαση στο μέσο – είδη παρεμβολών στις ασύρματες επικοινωνίες

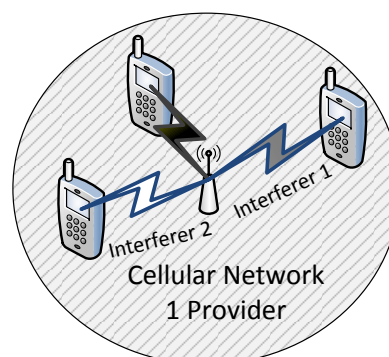
Το πρόβλημα των παρεμβολών φυσικά δεν είναι κάτι καινούριο για τον κόσμο των τηλεπικοινωνιών. Το να μπορούν να επικοινωνήσουν ταυτόχρονα πολλοί χρήστες (πολλαπλή πρόσβαση στο μέσο, multiple access) ήταν στην πραγματικότητα από τα πρώτα προβλήματα που κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν οι μηχανικοί τηλεπικοινωνιών ήδη από τις αρχές της ανάπτυξης του κλάδου.

Στο σημείο αυτό καλό είναι να γίνει κάποιος διαχωρισμός στα είδη των παρεμβολών στις οποίες υπόκεινται οι ασύρματες ζεύξεις. Οι παρεμβολές ανάλογα με την προέλευσή τους μπορούν να καταταχθούν στις εξής επιμέρους κατηγορίες:

- παρεμβολή από χρήστες της ίδιας υπηρεσίας και του ίδιου δικτύου: χρήστες κάποιας υπηρεσίας οι οποίοι ανήκουν στο ίδιο δίκτυο, είναι συσχετισμένοι μεταξύ τους δημιουργώντας ζευγάρια πομπού-δέκτη που έχουν άμεσα ή έμμεσα εικόνα για το υπόλοιπο δίκτυο (είτε μέσω κεντρικού συντονισμού είτε ως αυτο-οργανούμενο ad-hoc

δίκτυο). Πρόκειται για κλασική περίπτωση όπου ένα πρωτόκολλο ελέγχου πολλαπλής πρόσβασης (Multiple Access Control Protocol – MAC) είναι υπεύθυνο για τον τρόπο και το χρόνο ανταλλαγής των δεδομένων μεταξύ των κόμβων. Το είδος αυτό της παρεμβολής συνήθως αποκαλείται Multi-User Interference (MUI) ή intra-network interference. Παράδειγμα αυτού του είδους της παρεμβολής είναι οι χρήστες κινητών τηλεφώνων που ανήκουν στον ίδιο πάροχο και βρίσκονται εντός της ίδιας κυψέλης. Άλλο παράδειγμα αποτελούν οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές ασύρματα συνδεδεμένοι είτε μεταξύ τους (είτε σε σχήμα ad-hoc είτε κεντρικά μέσω κάποιου σημείου πρόσβασης – access point), οι οποίοι σχηματίζουν ένα ασύρματο δίκτυο WLAN. Η ιδιαιτερότητα αυτού του είδους της παρεμβολής έναντι των άλλων που παρουσιάζονται παρακάτω, είναι ότι υπάρχει η δυνατότητα συντονισμού μεταξύ των κόμβων (είτε σε επίπεδο ρολογιών είτε με άλλες μεθόδους), επιτυγχάνοντας ελαχιστοποίηση της σύγκρουσης που προκαλεί η ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων από περισσότερους του ενός κόμβους.

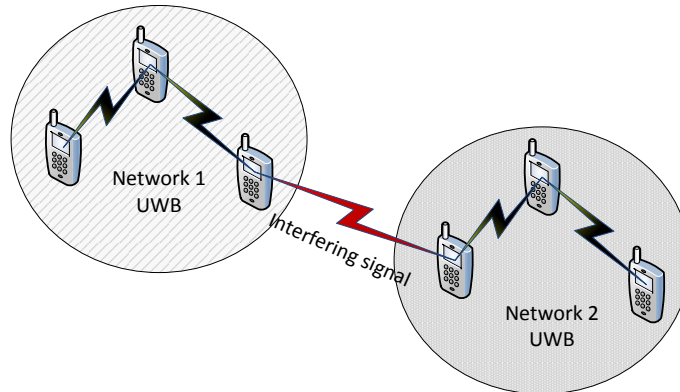
Σε σχέση με την επίλυση του προβλήματος πολλαπλής πρόσβασης εντός ενός δικτύου, αρχικά επικράτησε ως μέθοδος η πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου (Time Division Multiple Access – TDMA), όπου ο χρόνος διαιρείται σε χρονοσχισμές. Οι χρονοσχισμές αυτές επαναλαμβάνονται περιοδικά και σε κάθε μία εξ αυτών αντιστοιχίζεται ένας χρήστης. Άλλο σύστημα πολλαπλής πρόσβασης είναι εκείνο της διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Multiple Access – FDMA), βάσει του οποίου σε κάθε χρήστη αντιστοιχίζεται ένα μέρος του διατιθέμενου για την συγκεκριμένη υπηρεσία εύρους ζώνης (ένα κανάλι) το οποίο μπορεί να χρησιμοποιεί κατ' αποκλειστικότητα. Την τελευταία δεκαετία, έκανε έντονη την παρουσία του και ένα άλλο σύστημα πολλαπλής πρόσβασης, βασιζόμενο σε διαίρεση κωδίκων (Code Division Multiple Access - CDMA), όπου οι επιμέρους χρήστες που μοιράζονται το ίδιο κανάλι, μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα ταυτόχρονα, κωδικοποιώντας τα δεδομένα πριν τα στείλουν με κώδικες που έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες (είναι ορθογώνιοι ανά δύο ή επιδεικνύουν πολύ χαμηλή στατιστική συσχέτιση). Αξίζει να σημειωθεί ότι το CDMA είναι το de facto πρότυπο για τα κυψελωτά δίκτυα νέας γενιάς. Μερικά ακόμη από τα δημοφιλή πρότυπα πολλαπλής πρόσβασης είναι το CSMA-CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) χρησιμοποιούμενο στα ενσύρματα τοπικά δίκτυα (LANs) και το CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), χρησιμοποιούμενο στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs). Φυσικά, τα προαναφερθέντα δεν αποτελούν την πλήρη λίστα με τα πρότυπα πολλαπλής πρόσβασης αλλά μόνο μια συνοπτική αναφορά.



Σχήμα 4-1: Παράδειγμα παρεμβολών μεταξύ χρηστών της ίδιας υπηρεσίας και του ίδιου δικτύου (MUI)

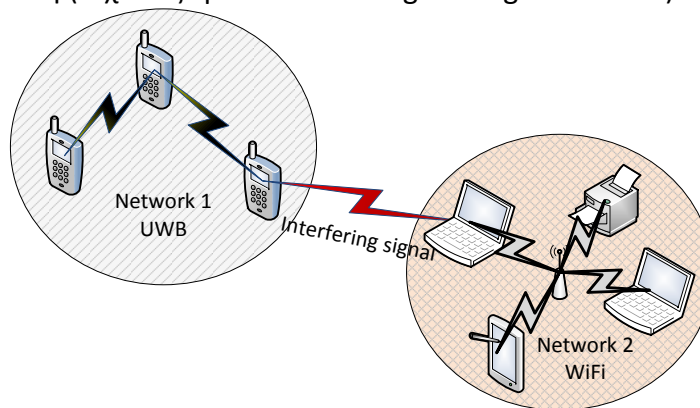
- παρεμβολή από χρήστες της ίδιας υπηρεσίας που όμως ανήκουν σε διαφορετικά επιμέρους δίκτυα: χρήστες κάποιας υπηρεσίας στην προσπάθειά τους να ανταλλάξουν δεδομένα με τους υπόλοιπους χρήστες που ανήκουν στο δίκτυό τους, συναντούν

προβλήματα παρεμβολών από χρήστες άλλων γειτονικών δικτύων της ίδιας υπηρεσίας, αφού τα δίκτυά τους μοιράζονται το ίδιο κανάλι. Η παρεμβολή αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως inter-network interference ή intra-tier interference. Στην περίπτωση αυτή, η μετρίαση της παρεμβολής που αντιμετωπίζει ο κόμβος ενός δικτύου εξαιτίας της ταυτόχρονης μετάδοσης δεδομένων από κόμβο άλλου δικτύου δεν είναι απλή, αφού συνήθως τα επιμέρους δίκτυα δεν γνωρίζουν κατ' ανάγκη την ύπαρξη το ένα του άλλου ούτε δύνανται να έρθουν εύκολα σε από κοινού συντονισμό. Αυτό που στην πράξη γίνεται είναι χρήση τεχνικών carrier sensing, εκτίμησης δηλαδή κατά πόσο το κανάλι είναι τη δεδομένη στιγμή κατειλημένο ή όχι. Παράδειγμα τέτοιων παρεμβολών συναντά κανείς συχνά στα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs), τα οποία χρησιμοποιούν το ίδιο κανάλι.



Σχήμα 4-2: Παράδειγμα παρεμβολών μεταξύ χρηστών διαφορετικών δικτύων του ίδιου τύπου (Inter-network Interference)

- παρεμβολή από χρήστες διαφορετικών υπηρεσιών ανήκοντες σε ετερόκλιτα δίκτυα που μοιράζονται το ίδιο κανάλι: χρήστες από διαφορετικά δίκτυα στα πλαίσια άλλων υπηρεσιών μοιράζονται το ίδιο ασύρματο κανάλι, το φασματικό τους περιεχόμενο δηλαδή επικαλύπτεται, οδηγώντας στη λεγόμενη ομοδιαυλική παρεμβολή (cochannel interference), η οποία συχνά απαντάται στην βιβλιογραφία και με τον τίτλο cross-tier interference ανάλογα με τη δομή των δικτύων. Και σε αυτήν την περίπτωση είναι εξαιρετικά δύσκολη η μετρίαση των παρεμβολών που εισάγει το ένα δίκτυο στο άλλο, καθώς τα δίκτυα αυτά μπορούν εν γένει να έχουν εντελώς διαφορετική προτυποποίηση και χαρακτηριστικά και ως εκ τούτου οποιαδήποτε προσπάθεια ανίχνευσης ή συντονισμού μεταξύ τους καθίσταται μάλλον αδύνατη. Συνήθως εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές σάρωσης του φάσματος προκειμένου να διαπιστωθεί αν το κανάλι είναι ενεργό και αν όχι επιχειρείται αποστολή (τεχνικές spectrum sensing και cognitive radio).



Σχήμα 4-3: Παράδειγμα παρεμβολών μεταξύ χρηστών ετερόκλιτων δικτύων (Cross-tier interference)

4.3 Παρεμβολές σε δίκτυα UWB

Σε επίπεδο UWB και ειδικότερα για το IR-UWB που είναι και το θέμα της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιείται είτε μια εκδοχή του CDMA, η οποία όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο οδηγεί στο λεγόμενο DS-UWB, είτε η διαπήδηση στο χρόνο (Time Hopping – TH), η οποία οδηγεί στο TH-UWB. Το προς μετάδοση σήμα κωδικοποιείται σύμφωνα είτε με κάποιον ντετερμινιστικά ορισμένο κώδικα, είτε με κάποιον τυχαία ή ψευδοτυχαία παραχθέντα κώδικα (random code ή pseudonoise code – PN code). Το αποτέλεσμα είναι να μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ίδιο κανάλι από περισσότερους του ενός χρήστες του ίδιου δικτύου διατηρώντας υψηλές επιδόσεις, ενώ ταυτόχρονα η χρήση των κωδίκων επιφέρει λεύκανση (whitening) του σήματος στο πεδίο της συχνότητας. Το σήμα εμφανίζεται δηλαδή σχετικά επίπεδο φασματικά, όπως ο λευκός θόρυβος. Για την απόλυτη αξιοποίηση των χρησίμων ιδιοτήτων που παρέχει η χρήση κωδίκων, θα πρέπει οι ανταλλαγές δεδομένων μεταξύ των κόμβων που συναποτελούν το δίκτυο να είναι συγχρονισμένες τουλάχιστον σε επίπεδο chip (στοιχειώδους υποσυμβόλου που προκύπτει μετά την εφαρμογή του κώδικα).

Το πρόβλημα της παρεμβολής που οφείλεται σε Multi-User Interference (MUI), χρηστών δηλαδή που ανήκουν και συναποτελούν ένα δίκτυο UWB μελετάται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία τόσο σε επίπεδο αναλυτικών εκφράσεων όσο και προσομοίωσης. Ωστόσο, πολλές φορές οι παραδοχές που γίνονται είτε οδηγούν σε υπερεκτίμηση της επίδοσης του δικτύου, είτε δεν παρουσιάζονται πολλοί δείκτες για την επίδοση (BER, SINR, INR κλπ.). Επίσης, οι παρεμβολές που προκαλούνται από ετερόκλητα δίκτυα UWB συνυπάρχοντα στον ίδιο χώρο καθώς και οι παρεμβολές που εισάγονται από δίκτυα στενού εύρους ζώνης (narrowband) σε δίκτυα UWB αποτελούν ενδιαφέρουσες περιπτώσεις που χρήζουν περισσότερης μελέτης. Η παρούσα εργασία εξετάζει τις περιπτώσεις παρεμβολών MUI και παρεμβολών οφειλόμενες σε narrowband συστήματα (NBI). Δεδομένου ότι στα πλαίσια του M2M ο σχεδιαστής του φυσικού στρώματος (PHY) καλείται να συγκεράσει μια μεγάλη γκάμα συσκευών και εφαρμογών που καλούνται να ανταλλάξουν δεδομένα εντός μικρών αποστάσεων, η αξία της μελέτης των παρεμβολών είναι καθοριστικής σημασίας για την αποδοχή ή όχι ενός προτύπου. Παρακάτω αναλύονται οι δυνατοί τρόποι προσέγγισης για την αξιολόγηση της επίδοσης τέτοιων συστημάτων με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει η καθεμία, καθώς και η τελικά επιλεγείσα μεθοδολογία.

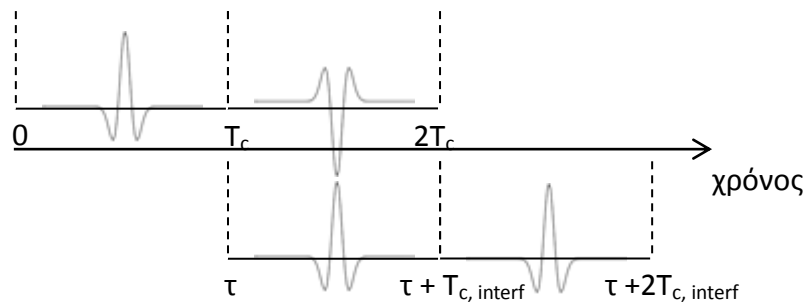
4.4 Τρόπος αξιολόγησης παρεμβολής

Για την εκτίμηση της επίδοσης ενός συστήματος στο οποίο περιοριστικό παράγοντα αποτελούν οι παρεμβολές (interference-limited system), ο μελετητής καλείται να επινοήσει ένα μοντέλο για τη συμπεριφορά των σημάτων στο χρόνο, βάσει του οποίου θα μπορέσει να εξάγει τα όποια συμπεράσματα. Αυτό είναι απαραίτητο, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για αναλυτική προσέγγιση ή (υπολογιστική) προσομοίωση και συνήθως συνεπάγεται μεγάλο πλήθος παραδοχών.

4.4.1 Αξιολόγηση με χρονική ευθυγράμμιση των chip δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η χρήση κωδίκων είτε Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS) πάνω στην οποία εδράζεται το CDMA είτε κωδίκων χρονικής διαπήδησης Time Hopping Spreading Spectrum (TH-SS), αντιστοιχίζει κάθε σύμβολο (bit στην περίπτωση δυαδικών συμβόλων) σε μια ακολουθία από στοιχειώδη υποσύμβολα, τα οποία καλούνται chips και τα οποία προκύπτουν με πολλαπλασιασμό του προς αποστολή συμβόλου με τον αντίστοιχο κώδικα. Έτσι, μια πιθανή προσέγγιση ευρέως χρησιμοποιούμενη στη βιβλιογραφία για τη μελέτη MUI

είναι η εξέταση παρεμβαλλόμενων κυματομορφών με χρονικά ευθυγραμμισμένα chips, όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4-4: Αξιολόγηση παρεμβολής με ευθυγράμμιση chip

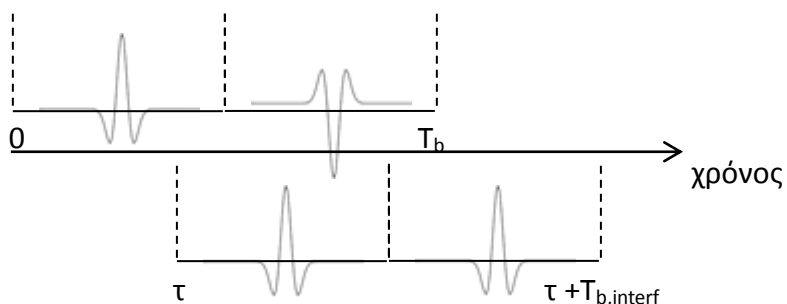
όπου T_c η διάρκεια του chip (στοιχειώδους υποσυμβόλου μετά την εφαρμογή του κώδικα εξάπλωσης) της ζεύξης ενδιαφέροντος και $T_{c,interf}$ η αντίστοιχη διάρκεια chip της παρεμβάλλουσας ζεύξης. Γενικά οι δύο αυτές διάρκειες μπορούν να διαφέρουν, εαν πρόκειται για ζεύξεις ανήκουσες σε διαφορετικά δίκτυα.

Η μεθοδολογία αυτή είναι σχετικά αποδεκτή για τη μελέτη MUI, ωστόσο για τη μελέτη παρεμβολών προκαλούμενη από κόμβους που ανήκουν σε ετερόκλητα δίκτυα (Inter-Network Interference) φαντάζει ακατάλληλη. Απαραίτητη συνθήκη για τη χρήση αυτού του μοντέλου παρεμβολής είναι η δυνατότητα συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων (μπορούν να παραβλεφθούν μικρά clocks drifts και timing jitters). Κάτι τέτοιο είναι ίσως εφικτό στην περίπτωση που οι κόμβοι ανήκουν στο ίδιο δίκτυο (και άρα η μελέτη αφορά MUI), ωστόσο δεν ισχύει κατ' ανάγκη στην περίπτωση που οι κόμβοι ανήκουν σε διαφορετικά δίκτυα. Στην πραγματικότητα είναι μάλλον απίθανο να υπάρξει τέλειος συγχρονισμός σε επίπεδο chip, αφού οι αποστολές μπορούν να είναι πλήρως ετεροχρονισμένες (και η διάρκεια του chip εν γένει μπορεί να διαφέρει μεταξύ διαφορετικών δικτύων). Το μοντέλο λοιπόν αυτό απορρίπτεται διότι οδηγεί σε υποτίμηση της τάξης μεγέθους της παρεμβολής εκμεταλλευόμενο τυχόν ορθογωνιότητα ή χαμηλή ετεροσυσχέτιση των κωδικών εξάπλωσης που χρησιμοποιούν οι κόμβοι.

Ακραία εκδοχή της παραπάνω μεθοδολογίας είναι να θεωρηθεί ότι τα ίδια τα μεταδιδόμενα σύμβολα (bits) ενδιαφέροντος και παρεμβολής ευθυγραμμίζονται στο χρόνο και κατ' επέκταση και τα αντίστοιχα chips (εφόσον έχουν ίση διάρκεια).

4.4.2 Αξιολόγηση ανά σύμβολο δεδομένων

Στην περίπτωση αυτή, για τη διάρκεια ενός συμβόλου που ανταλλάσσεται στη ζεύξη ενδιαφέροντος, εξετάζεται τι θα συμβεί εαν παρεμβληθεί το σύμβολο κάποιας άλλης ζεύξης. Αν θεωρηθεί ότι σύμβολο ενδιαφέροντος τοποθετείται χρονικά στο διάστημα $[0, T_b)$, τότε η αρχή του παρεμβάλλοντος συμβόλου τ μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή ομοιόμορφα στο διάστημα $[0, T_b)$. Σχηματικά:



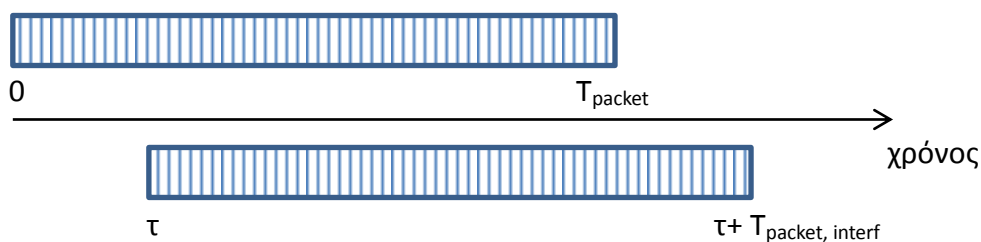
Σχήμα 4-5: Αξιολόγηση παρεμβολής ανά σύμβολο δεδομένων

όπου T_b η διάρκεια του συμβόλου της ζεύξης ενδιαφέροντος και $T_{b,interf}$ η αντίστοιχη διάρκεια συμβόλου της παρεμβάλλουσας ζεύξης. Γενικά οι δύο αυτές διάρκειες μπορούν να διαφέρουν εαν πρόκειται για ζεύξεις ανήκουσες σε διαφορετικά δίκτυα.

Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των δύο συμβόλων θα είναι προφανώς διασυμβολική παρεμβολή (Inter-Symbol Interference - ISI), όπου η τελική κυματομορφή θα είναι παραμορφωμένη, είτε προσθετικά είτε καταστροφικά. Η εξέταση της παρεμβολής βασιζόμενη σε αυτό το σενάριο, συνεπάγεται αναγκαστικά σύγκρουση μεταξύ των δυο bits. Το αποτέλεσμα της όποιας μελέτης θα δίνει το κατώτατο φράγμα στην επίδοση του συστήματος, αφού για δεδομένο μέγεθος πακέτου σε bits (σύμβολα), θεωρείται ότι όλα έχουν συγκρουστεί με παρεμβαλλόμενα συστήματα. Κάτι τέτοιο όχι απλώς δεν δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα για ένα σύστημα, αφού οι αποστολές δεν γίνονται στο 100% του χρόνου, αλλά δε λαμβάνει υπόψη και την εξάρτηση που εγκαθιστά το μήκος του πακέτου. Με άλλα λόγια είναι διαφορετικό να στέλνονται μαζί 100 bits (σύμβολα) ομαδοποιημένα ως ένα πακέτο και διαφορετικό να στέλνονται 200 bits (σύμβολα), αφού αυτό τροποποιεί σημαντικά την στατιστική κατανομή της παρατηρούμενης κίνησης στο κανάλι.

4.4.3 Αξιολόγηση ανά πακέτο δεδομένων

Με στόχο να ληφθεί υπόψη η εξάρτηση στη μορφή των παρεμβολών που εισάγει η ομαδοποίηση των bits (συμβόλων) σε πακέτα, είναι προτιμότερο η εξέταση της παρεμβολής να γίνεται επι τη βάση ενός πακέτου δεδομένων. Υπό το πρίσμα αυτό, για τη διάρκεια ενός πακέτου που ανταλλάσσεται από τη ζεύξη ενδιαφέροντος, εξετάζεται τι θα συμβεί αν αυτό συγκρουστεί με πακέτο που ανταλλάσσεται ταυτόχρονα από παρεμβάλλουσα ζεύξη. Αν θεωρηθεί ότι το πακέτο ενδιαφέροντος ανταλλάσσεται στο διάστημα $[0, T_{\text{packet}})$, τότε η χρονική στιγμή έναρξης του παρεμβάλλοντος πακέτου θα είναι τ ακολουθώντας ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα $[0, T_{\text{packet}})$ ως εξής:



Σχήμα 4-6: Αξιολόγηση παρεμβολής ανα πακέτο δεδομένων

όπου T_{packet} η (μέση) διάρκεια πακέτου της ζεύξης ενδιαφέροντος και $T_{\text{packet,interf}}$ η αντίστοιχη διάρκεια πακέτου της παρεμβάλλουσας ζεύξης. Γενικά οι δύο αυτές διάρκειες μπορούν να διαφέρουν.

Το αποτέλεσμα της υπέρθεσης των κυματομορφών που αντιστοιχούν στο κάθε πακέτο είναι και πάλι διασυμβολική παρεμβολή, αυτή τη φορά όμως με διαφορετική στατιστική περιγραφή απ' ό,τι στην προηγούμενη προσέγγιση. Τώρα, ένα μέρος των μεταδιδόμενων bits υφίσταται ISI, ενώ ένα άλλο θα μείνει ανεπηρέαστο (π.χ. το τμήμα από $[0, \tau)$ όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα).

Αυτή η μέθοδος αξιολόγησης θα δώσει αρκετά ρεαλιστικά αποτελέσματα, ωστόσο πάλι συνεπάγεται σύγκρουση μεταξύ των πακέτων, μερική η ολική. Έτσι, αν και αποτελεί μια καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας εν συγκρίσει με τις προαναφερθείσες μεθόδους αξιολόγησης, πάλι δεν λαμβάνει υπόψη το ενδεχόμενο να μεταδοθεί πακέτο ανεπηρέαστο από οποιαδήποτε

παρεμβολή.

Ακραία εκδοχή της παραπάνω μεθοδολογίας είναι η θεώρηση ότι τα πακέτα είναι ευθυγραμμισμένα στο χρόνο, κάτι που θα δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα μόνο στην περίπτωση MUI (ζεύξεις που ανήκουν στο ίδιο δίκτυο) με μηχανισμό πολλαπλής πρόσβασης slotted ALOHA.

4.4.4 Στοχαστική προσέγγιση Gauss

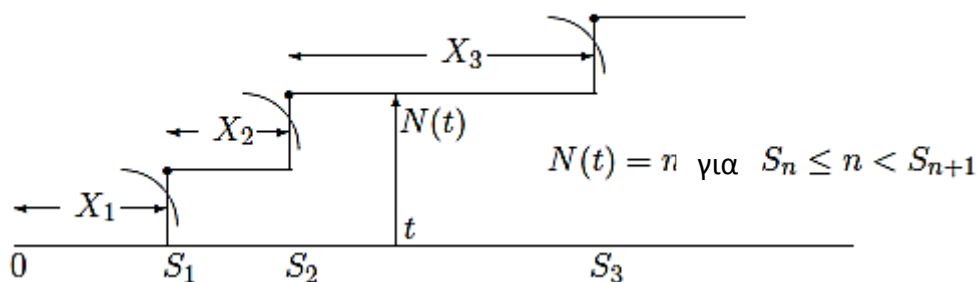
Σε πολλές περιπτώσεις όπου αναζητούνται αναλυτικές εκφράσεις αλλά ο προσδιορισμός της στατιστικής κατανομής που ακολουθεί η παρεμβολή είναι δύσκολος, συχνά γίνεται η παραδοχή ότι το λαμβανόμενο σήμα, περιέχον το σήμα ενδιαφέροντος, τα παρεμβάλλοντα σήματα και το θόρυβο, μπορεί να θεωρηθεί τυχαία μεταβλητή στο χρόνο, αντιστοιχούσα σε μια στοχαστική ανέλιξη Gauss κατάλληλης μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης. Αυτό είναι εφικτό κάνοντας χρήση του κεντρικού οριακού θεωρήματος, υπό την παραδοχή ότι το πλήθος των παρεμβαλλόντων σημάτων είναι μεγάλο και καθένα από αυτά είναι στατιστικά ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα.

Η τεχνική αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό κλειστών εκφράσεων με αποτελέσματα κοντά στα πραγματικά, όταν αφ' ενός το πλήθος των παρεμβαλλόντων σημάτων είναι όντως μεγάλο και αφ' ετέρου, όταν ο χρησιμοποιούμενος παλμός καταλαμβάνει το σύνολο της διάρκειας συμβόλου. Επειδή δυστυχώς το δεύτερο δε συμβαίνει στην περίπτωση του παλμικού UWB όπου ο παλμός καταλαμβάνει ένα μόνο μέρος της διάρκειας συμβόλου, τα αποτελέσματα που δίδει η προσέγγιση αυτή διατηρούν χαλαρή σχέση με την πραγματική επίδοση του συστήματος (υπερεκτίμηση επίδοσης) όπως φανερώνεται σε δημοσιευμένες μελέτες. Έτσι, αποφεύγεται και η χρήση αυτής της μεθόδου αξιολόγησης στην παρούσα εργασία.

4.4.5 Στοχαστική προσέγγιση της κίνησης

4.4.5.1 Εισαγωγή

Κάνοντας χρήση της θεωρίας αναμονής, η στοχαστικότητα στην παραγωγή των πακέτων (εμφάνισή τους στο σύστημα προς διαμόρφωση) μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας στοχαστικές ανελίξεις. Ο χρόνος τον οποίο εμφανίζεται ένα πακέτο προς διαμόρφωση στο σύστημα καλείται χρόνος άφιξης και είναι μια τυχαία μεταβλητή. Δεδομένου ότι κάθε πακέτο έχει το δικό του χρόνο άφιξης στο σύστημα, μια ανέλιξη αφίξεων θα είναι μια αύξουσα ακολουθία από τυχαίες μεταβλητές $0 < S_1 < S_2 < \dots$, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες πραγματοποιείται το φαινόμενο. Πρέπει να τονισθεί ότι η ανέλιξη ξεκινά από τη χρονική στιγμή 0 και πολλαπλές αφίξεις δεν είναι δυνατόν να σημειωθούν ταυτόχρονα.



Σχήμα 4-7: Μοντελοποίηση της γέννησης πακέτων (αφίξεων) στο χρόνο,
© R. Gallager

4.4.5.2 Η στοχαστική ανέλιξη Poisson

Η στοχαστική ανέλιξη Poisson είναι μια απλή και συνάμα ευρέως διαδεδομένη στοχαστική ανέλιξη για τη μοντελοποίηση του πλήθους των αφίξεων σε ένα σύστημα μέσα σε δεδομένο χρονικό διάστημα παρατήρησης, αποτελεί δηλαδή μια μετρώσα ανέλιξη (counting process). Ουσιαστικά αποτελεί το ανάλογο συνεχούς χρόνου της ανέλιξης Bernoulli, όπου οι αφίξεις μπορούν να συμβούν μόνο σε θετικά ακέραια πολλαπλάσια ενός στοιχειώδους διαστήματος (διακριτός χρόνος).

Έτσι, το πλήθος των αφίξεων $N(t)$ για το χρονικό διάστημα $(0,t]$, $t>0$ είναι μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί τη γνωστή κατανομή Poisson με συνάρτηση μάζας πιθανότητας (σ.μ.π.):

$$P_{N(t)}(n) = \frac{(\lambda t)^n \exp(-\lambda t)}{n!}$$

Οι χρόνοι μεταξύ αφίξεων (inter-arrival times) X_i είναι τυχαίες μεταβλητές ανεξάρτητες και όμοια κατανομημένες σύμφωνα με την εκθετική κατανομή. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (σ.π.π.) της εκθετικής κατανομής είναι η εξής:

$$f(x; \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

όπου $x \in [0, \infty)$ και $\lambda > 0$ καλείται παράμετρος ρυθμού. Για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα διάρκειας t , η εκτιμώμενη τιμή αφίξεων στο διάστημα αυτό είναι ίση με λt . Για το λόγο αυτό η παράμετρος λ καλείται ρυθμός της ανέλιξης.

Αυτό που καθιστά την ανέλιξη Poisson ιδιαίτερα χρήσιμη είναι η ιδιότητα «έλλειψης μνήμης» (memoryless property) που τη διέπει. Η έλλειψη μνήμης είναι μια ιδιότητα της εκθετικής κατανομής την οποία εμμέσως κληρονομεί η Poisson αφού τα διαστήματα μεταξύ αφίξεων ακολουθούν εκθετική κατανομή. Μαθηματικά περιγράφεται ως εξής:

αν $X \sim \text{Exp}(\lambda)$, τότε:

$$\mathbb{P}(X > s + t | X > s) = \mathbb{P}(X > t), \quad s, t \geq 0.$$

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν έχει προηγηθεί κάποιος χρόνος παρατήρησης στον οποίο δεν έχει πραγματοποιηθεί άφιξη, η γνώση αυτή δεν δίνει πληροφορία για το πόσο ακόμη χρονικό διάστημα θα πρέπει να μεσολαβήσει προκειμένου τελικά να πραγματοποιηθεί άφιξη.

Έστω δύο ανεξίτητες Poisson $N_1(t)$, $N_2(t)$ με ρυθμούς λ_1 και λ_2 αντίστοιχα. Αποδεικνύεται ότι το άθροισμά τους $N(t) = N_1(t) + N_2(t)$ είναι επίσης ανέλιξη Poisson με ρυθμό $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$.

4.4.5.3 Εφαρμογή της ανέλιξης Poisson στις αφίξεις πακέτων

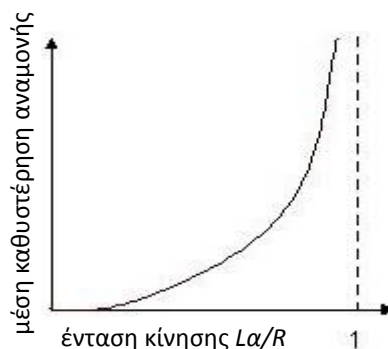
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη των παρεμβολών κάνοντας χρήση προσομοίωσης. Οι προαναφερθείσες προσεγγίσεις για την αξιολόγηση συστημάτων που υφίστανται παρεμβολές εξυπηρετούν στην περίπτωση που επιχειρείται προσδιορισμός κλειστών αναλυτικών εκφράσεων, ωστόσο σε επίπεδο προσομοίωσης

κρίνονται μάλλον ανεπαρκείς. Λόγω της ταυτόσημης συμπεριφοράς που επιδεικνύει το σύστημα προϊόντος του χρόνου, τα λαμβανόμενα κάνοντας χρήση αυτών των προσεγγίσεων αποτελέσματα συγκλίνουν προς ένα κατώτερο φράγμα επίδοσης, μη αποδεκτό όταν επιχειρείται ρεαλιστικότερη μελέτη. Έτσι, προτείνεται η ακόλουθη μέθοδος προσέγγισης για την αξιολόγηση συστήματος υπό το καθεστώς παρεμβολών:

κάθε κόμβος ανεξαρτήτως του δικτύου στο οποίο ανήκει παράγει bits προς διαμόρφωση με μέσο ρυθμό περί το 90% του ρυθμού μετάδοσής του. Αν δηλαδή ο ρυθμός μετάδοσης είναι R bits/sec, τότε ο μέσος ρυθμός παραγωγής bits θα είναι $0.9 \cdot R$ bits/sec. Ο ρυθμός αυτός επιλέχθηκε θεωρώντας ότι οι ζεύξεις εξυπηρετούν εφαρμογές με μεγάλες απαιτήσεις σε ανταλλαγή δεδομένων, όπως είναι οι εφαρμογές εικόνας/βίντεο, ήχου ή τηλεμετρίας πραγματικού χρόνου. Τα παραγόμενα bits ομαδοποιούνται σε πακέτα, έστω μεγέθους L , οπότε ο μέσος ρυθμός παραγωγής πακέτων προκύπτει $\alpha = \frac{0.9R}{L}$ packets/sec. Για την ενσωμάτωση της στοχαστικότητας στην παραγωγή των πακέτων, οι αφίξεις πακέτων στον διαμορφωτή κάθε κόμβου θεωρείται ότι ακολουθούν κατανομή Poisson με ρυθμό $\lambda = \frac{0.9R}{L}$ packets/sec και άρα για έναν κόμβο τα διαστήματα μεταξύ παραγωγής πακέτων (inter-arrival times) ακολουθούν εκθετική κατανομή με παράμετρο $\lambda = \frac{0.9R}{L}$. Η τυχαία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει τις συνολικές αφίξεις που παρατηρούνται στο σύστημα για δεδομένο χρονικό διάστημα αποτελεί επίσης ανέλιξη Poisson, ως άθροισμα επιμέρους ανεξίτητων Poisson, με ρυθμό $\sum_{i=1}^n \lambda_i$, όπου n το συνολικό πλήθος των κόμβων (πομπών) από όλα τα δίκτυα στο υπό μελέτη σενάριο.

Το προτεινόμενο μοντέλο αξιολόγησης αν και απλό, συλλαμβάνει την στοχαστικότητα στην κίνηση των δικτύων. Παραλλαγές και προεκτάσεις αυτού του μοντέλου μπορούν να υπάρξουν, σε περίπτωση που είναι γνωστό το μοτίβο της κίνησης που παράγει κάθε κόμβος.

Ο λόγος που ο μέσος ρυθμός παραγωγής bits τίθεται χαμηλότερος του ρυθμού μετάδοσης είναι ώστε η ένταση της κίνησης να προκύψει μικρότερη της μονάδας. Πριν τα παραχθέντα bits διαμορφωθούν, αποθηκεύονται προσωρινά σε μια ουρά αναμονής (buffer). Από την ουρά εξέρχονται συνήθως σειριακά (First In First Out – FIFO). Αν η ουρά αναμονής έχει μικρό μήκος, τότε η καθυστέρηση λόγω αναμονής θα είναι μικρή, διαφορετικά θα πρέπει να περιμένουν να φθάσει η σειρά τους πριν μεταδοθούν. Ο λόγος $\frac{L\alpha}{R}$, όπου L , α , R ορίστηκαν προηγουμένως, καλείται ένταση κίνησης (traffic intensity) και παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της έκτασης της καθυστέρησης αναμονής. Αν $\frac{L\alpha}{R} > 1$, τότε ο μέσος ρυθμός με τον οποίο φτάνουν bit στην ουρά προς μετάδοση (διαμόρφωση) είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό με τον οποίο τα bit μπορούν να εξέρχονται (μεταδίδονται) από την ουρά. Στην περίπτωση αυτή, η ουρά θα τείνει να αυξάνεται και η καθυστέρηση αναμονής θα φτάσει στο άπειρο, ή ισοδύναμα θα



Σχήμα 4-8: Ποιοτική καμπύλη μέσης καθυστέρησης μετάδοσης για διαφορετικές εντάσεις κίνησης, © J. F. Kurose et al.

χρειάζεται ουρά με άπειρο μήκος (πρακτικά ανέφικτο). Έτσι, επιλέγεται η ένταση της κίνησης να είναι $\frac{L\alpha}{R} = 0.9$, προκειμένου αφενός να υπάρχει μεγάλη ένταση κίνησης, χωρίς ωστόσο τα συναγόμενα αποτελέσματα να είναι εκτός πραγματικότητας λόγω δημιουργίας ουράς αναμονής απείρου μήκους (κάτι μη ρεαλιστικό).

4.5 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] A. S. Tanenbaum, Computer Networks 4th ed., Prentice Hall PTR, 2003.
- [2] K. Du and M. N. S. Swamy, Wireless Communication Systems From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies, Cambridge University Press, 2010.
- [3] J.F. Kurose and K.W. Ross, Computer Networking: A Top-Down Approach 6th ed., Pearson Education, 2010.
- [4] H. Hassan, J. M. Garcia et al., "Generic modeling of multimedia traffic sources", 2005.
- [5] R. Gallager, 6.262 Discrete Stochastic Processes, Spring 2011. (MIT OpenCourseWare: Massachusetts Institute of Technology), <http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-262-discrete-stochastic-processes-spring-2011> (Accessed 10 Jul, 2014). License: Creative Commons BY-NC-SA.
- [6] D.P. Kroese and J.C.C. Chan. Statistical Modeling and Computation, Springer, 2014.
- [7] D.P. Kroese, T. Taimre and Z.I. Botev, Handbook of Monte Carlo Methods, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley and Sons, New York, 2011.
- [8] M.-G. Di Benedetto, L. De Nardis, M. Junk, G. Giancola, "(UWB)²: Uncoordinated, Wireless, Baseborn Medium Access for UWB Communication Networks", Mobile Networks and Applications, Vol. 10, Issue 5, October 2005
- [9] M. U. Mahfuz, K. M. Ahmed, N. Rajatheva, "On the Effects of Code Cardinality for TH-PPM Ultra Wideband Systems", Journal of Telecommunications and Information Technology, April 2008
- [10] G. Durisi, G. Romano, "On the Validity of Gaussian Approximation to Characterize the Multiuser Capacity of UWB TH PPM", IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2002
- [11] G. Durisi, S. Benedetto, "Performance Evaluation and Comparison of Different Modulation Schemes for UWB Multiaccess Systems", IEEE International Conference on Communications, May 2003
- [12] M. J. Kim, J. H. Chung, C. Y. Jung, J. W. Chong, D. K. Sung, "Link Performance Evaluation of a TH-PPM UWB System in the Presence of Multi-User Interference", IEEE International Conference on Ultra-Wideband, September 2005
- [13] N. V. Kokkalis, P. T. Mathiopoulos, G. K. Karagiannidis, C. S. Koukourlis, "Performance

- Analysis of M-ary PPM TH-UWB Systems in the Presence of MUI and Timing Jitter”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 24, Issue 4, April 2006
- [14] L. Zhao, A. M. Haimovich, “The Capacity of an UWB Multiple-Access Communications System”, IEEE International Conference on Communications, Vol. 3, 2002
- [15] G. Durisi, J. Romme, S. Benedetto, “Performance of TH and DS UWB Multiaccess Systems in Presence of Multipath Channel and Narrowband Inteference”, International Workshop on Ultra Wideband Systems, 2003
- [16] T.-H. Tan, Y.-C. Shen, Y.-F. Huang, “Performance Analysis of Multi-User DS-UWB System under Multipath Effects”, 12th WSEAS International Conference on Communications, July 2008
- [17] L. Yang, G. B. Giannakis, “Ultra-Wideband Multiple Access: Unification and Narrowband Interference Analysis”, IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, November 2003
- [18] N. C. Beaulieu, D. J. Young, “Designing Time-Hopping Ultra-Wide Bandwidth Receivers for Multi-User Interference Environments”, Proceedings of the IEEE, Vol. 97, Issue 2, February 2009
- [19] M. Chiani, A. Giorgetti, “Coexistence Between UWB and Narrow-Band Wireless Communication Systems”, Proceedings of the IEEE, Vol 97, Issue 2, February 2009
- [20] G. Durisi, G. Romano, “Simulation Analysis and Performance Evaluation of and UWB system in indoor multipath channel”, IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 2002
- [21] M. Z. Win, P. C. Pinto, L. A. Shepp, “A Mathematical Theory of Network Interference and Its Applications”, Proceedings of the IEEE, Vol 97, Issue 2, February 2009
- [22] P. C. Pinto, A. Giorgetti, M. Z. Win, M. Chiani, “A Stochastic Geometry Approach to Coexistence in Heterogeneous Wireless Networks”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 27, Issue 7, September 2009

Κεφάλαιο 5

Η προσομοίωση

5.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, αποφασιστική σημασία για την υλοποίηση συστημάτων M2M αποτελεί η επιλογή κατάλληλου φυσικού στρώματος (PHY). Το φυσικό στρώμα είναι εκείνο που παραλαμβάνει την παραχθείσα πληροφορία και καλείται να την μετατρέψει σε κυματομορφή η οποία θα μεταδοθεί στο ενσύρματο μέσο για την περίπτωση ενσύρματης επικοινωνίας ή του ασύρματου μέσου για την περίπτωση ασύρματης επικοινωνίας. Στην παρούσα εργασία θα επιχειρηθεί να αξιολογηθεί κατά πόσο το παλμικό UWB (IR-UWB) με τις διάφορες παραλλαγές του μπορεί να αποτελέσει κατάλληλο και αποδοτικό PHY για συστήματα M2M. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε προσομοιωτής σε γλώσσα “python” χρησιμοποιώντας τις επιστημονικές βιβλιοθήκες “scipy”, “numpy”, τη βιβλιοθήκη “cython” για τη μετατροπή του κώδικα σε γλώσσα “C++”, τη βιβλιοθήκη “IPython” για την παράλληλη εκτέλεση του προγράμματος σε πολλαπλούς πυρήνες-CPUs και τη βιβλιοθήκη matplotlib για την κατασκευή των γραφικών παραστάσεων.

Τα ασύρματα συστήματα καλούνται να αντεπεξέλθουν σε ένα αντίξοο περιβάλλον, το οποίο περιλαμβάνει τα διάφορα φαινόμενα διάδοσης (εξασθένηση, ανάκλαση, σκέδαση, περίθλαση, διάθλαση κλπ), θόρυβο λόγω της παρουσίας ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, κοσμικής ακτινοβολίας κλπ. και το κυριότερο ίσως, παρεμβολών από γειτονικές ζεύξεις. Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε εκτενής αναφορά στις διάφορες δυνατές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση συστημάτων λειτουργούντων υπό το καθεστώς παρεμβολών. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν επιμέρους παράγοντες που είναι σημαντικοί για τη σωστή μοντελοποίηση των συστημάτων, καθώς και οι τελικές παράμετροι που επελέγησαν για τη διεξαγωγή της προσομοίωσης.

5.2 Εφαρμογή της στοχαστικής γεωμετρίας στην χωροθέτηση των κόμβων

5.2.1 Η αναγκαιότητα της μοντελοποίησης της χωρικής κατανομής των κόμβων

Όπως είναι γνωστό, κατά τη διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος από τον πομπό στο δέκτη μιας ζεύξης, η ισχύς του κύματος εξασθενεί. Για την περίπτωση της διάδοσης ελευθέρου χώρου, η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της διανυθείσας απόστασης, ως εξής:

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

όπου P_r η λαμβανόμενη ισχύς στο δέκτη, P_t η ισχύς εκπομπής, G_t το κέρδος της κεραίας εκπομπής, G_r το κέρδος της κεραίας λήψης, λ το μήκος κύματος του σήματος και R η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση μετάδοσης Friis και ισχύει στον ελεύθερο χώρο για αποστάσεις $R \gg \lambda$ (στο μακρινό πεδίο της κεραίας εκπομπής).

Φυσικά, για τη ρεαλιστική προσομοίωση της επίδοσης ενός συστήματος που βρίσκεται σε πραγματικό περιβάλλον με έντονα φαινόμενα πολλαπλών ανακλάσεων και άρα πολυδιαδρομικής λήψης, η χρήση της παραπάνω σχέσης κρίνεται ανεπαρκής. Ωστόσο, καθιστά άμεσα αντιληπτή την αξία που έχει η μοντελοποίηση των θέσεων των κόμβων στο επίπεδο, αφού οι μεταξύ τους αποστάσεις παίζουν κυρίαρχο ρόλο στη στάθμη ισχύος των λαμβανόμενων κυματομορφών. Στην περίπτωση που το πλήθος και οι θέσεις των κόμβων είναι γνωστές εκ των προτέρων τα πράγματα διευκολύνονται αρκετά. Επειδή η επικοινωνία M2M μπορεί να συνεπάγεται διαφορετική πυκνότητα των κόμβων στο χώρο, καθώς και διαφορετική χωροθέτησή τους κάθε φορά, το πλήθος των κόμβων και η διάταξή τους στο χώρο θα πρέπει να αντιμετωπισθούν ως ένα στοχαστικό φαινόμενο.

Αυτό που έχει επικρατήσει στις περιπτώσεις όπου το πλήθος των κόμβων και οι σχετικές θέσεις τους είναι άγνωστες, είναι η χρήση μοντέλων στοχαστικής γεωμετρίας. Η χρήση στοχαστικής γεωμετρίας όχι μόνο λαμβάνει υπόψη την τοπολογική τυχαιότητα των συστημάτων αλλά ταυτόχρονα είναι ένα κομψό μαθηματικό εργαλείο που μπορεί να οδηγήσει σε κλειστές αναλυτικές εκφράσεις. Έχει ήδη εφαρμοστεί για τη μοντελοποίηση ασυρμάτων δικτύων σε πλειάδα περιπτώσεων και εφαρμογών με μεγάλη επιτυχία.

5.2.2 Σημειακές ανελίξεις

Στην ανάλυση στοχαστικής γεωμετρίας, το δίκτυο αναπαριστάται με μια κατάλληλη σημειακή ανελίξη (Point Process – PP), η οποία συλλαμβάνοντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του δικτύου μοντελοποιεί τις θέσεις των επιμέρους κόμβων που το συναποτελούν. Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των δημοφιλέστερων σημειακών ανελίξεων που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των ασυρμάτων δικτύων.

5.2.2.1 Σημειακή ανελίξη Poisson (Poisson Point Process –PPP)

Οι σημειακές ανελίξεις Poisson χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση κόμβων που χαρακτηρίζονται από παντελή χωρική τυχαιότητα. Έστω E ένα υποσύνολο του \mathbb{R}^d και \mathcal{E} μια συλλογή από σύνολα Borel στο E . Για κάθε συλλογή από τυχαία σημεία $\{X_1, \dots, X_N\}$ στο E αντιστοιχεί ένα τυχαίο μέτρο καταμέτρησης (counting measure) $\mathbf{X}(A)$, $A \in \mathcal{E}$ το οποίο ορίζεται ως

$$\mathbf{X}(A) = \sum_{i=1}^N I_{\{X_i \in A\}}, \quad A \in \mathcal{E},$$

το οποίο καταμετρά το τυχαίο πλήθος των σημείων στο A . Το τυχαίο μέτρο \mathbf{X} μπορεί να ταυτιστεί είτε με το τυχαίο σύνολο $\{X_i, i = 1, \dots, N\}$, είτε με το τυχαίο διάνυσμα (X_1, \dots, X_N) . Το μέτρο $\mu(A) = \mathbb{E}\mathbf{X}(A)$, $A \in \mathcal{E}$ καλείται μέσο μέτρο του \mathbf{X} . Στις περισσότερες πρακτικές περιπτώσεις το μέσο μέτρο μ έχει πυκνότητα $\lambda(x)$, η οποία καλείται ένταση τέτοια ώστε

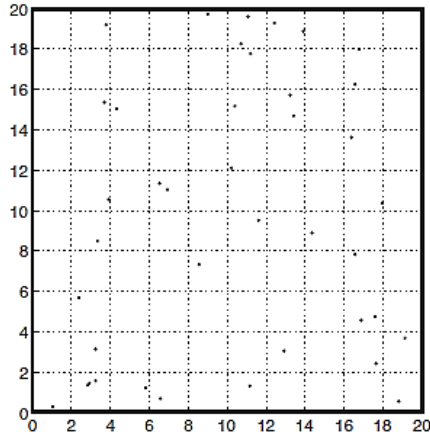
$$\mu(A) = \mathbb{E}\mathbf{X}(A) = \int_A \lambda(x) dx.$$

Ένα τυχαίο μέτρο καταμέτρησης \mathbf{X} ονομάζεται τυχαίο μέτρο Poisson με μέσο μέτρο μ αν και μόνον αν ισχύουν τα εξής:

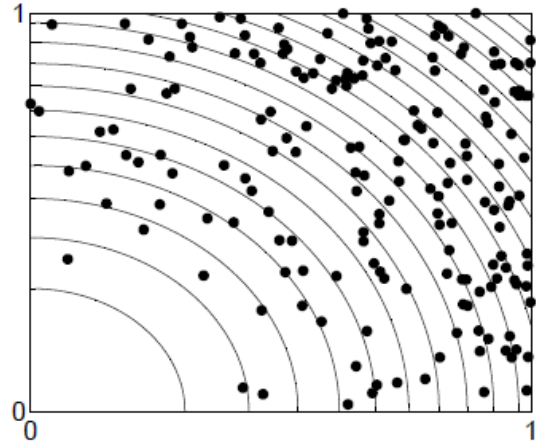
- Για κάθε σύνολο $A \in \mathcal{E}$ η τυχαία μεταβλητή $\mathbf{X}(A)$ ακολουθεί κατανομή Poisson με μέση τιμή $\mu(A)$, δηλ. $\mathbf{X}(A) \sim \text{Poi}(\mu(A))$.
- Για κάθε διακριτό (ξένο) σύνολο $A_1, \dots, A_N \in \mathcal{E}$, οι τυχαίες μεταβλητές $\mathbf{X}(A_1), \dots, \mathbf{X}(A_N)$ είναι ανεξάρτητες.

Επιπλέον, η σημειακή ανέλιξη Poisson καλείται ομογενής αν η συνάρτηση έντασης $\lambda(x)$ είναι σταθερή. Ένα σημαντικό πόρισμα που εξάγεται από τις δυο προαναφερθείσες ιδιότητες είναι:

- με δεδομένο $X(E) = N$, τα σημεία X_1, \dots, X_N είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και έχουν σ.π.π. $g(x) = \lambda(x)/\mu(E)$.



Σχήμα 5-1: Παράδειγμα ομογενούς PPP σε παράθυρο $20 \times 20 \text{ m}$ με ένταση 0.1 σημεία/m^2 , © H. ElSawy et al.



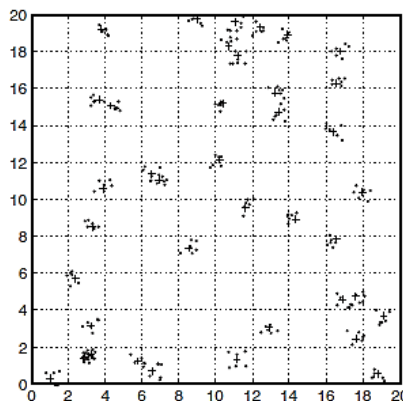
Σχήμα 5-2: Παράδειγμα μη ομογενούς PPP σε παράθυρο $1 \times 1 \text{ m}$ με ένταση $\lambda(x,y) = 300(x^2 + y^2)$, © D. P. Kroese et al.

5.2.2.2 Άλλες σημειακές ανελίξεις

Πέρα από την σημειακή ανέλιξη Poisson, υπάρχουν κι άλλες σημειακές ανελίξεις που συχνά χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση ασυρμάτων δικτύων. Μερικές από τις σημαντικότερες είναι η σημειακή ανέλιξη συστάδων Poisson (Poisson Cluster Process – PCP), η Hardcore Point Process (HCPP) και η σημειακή ανέλιξη Cox.

5.2.2.2.1 Η σημειακή ανέλιξη συστάδων Poisson (Poisson Cluster Process –PCP)

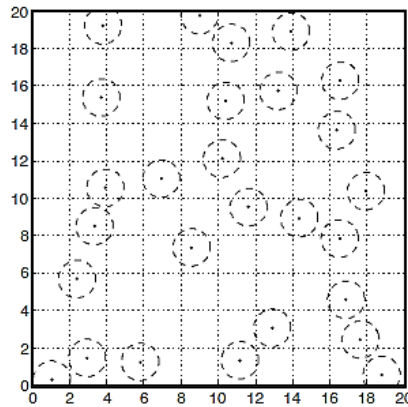
Η PCP μοντελοποιεί τυχαία μοτίβα που παράγονται από την χωρική εμφάνιση των κόμβων σε συστάδες (clusters). Η PCP μπορεί να προκύψει από μια PPP $\Pi = \{x_i, i = 1,2,3 \dots \}$ αντικαθιστώντας κάθε σημείο $x_i \in \Pi$ με μια συστάδα σημείων M_i , όπου τα σημεία εντός κάθε συστάδας M_i είναι ανεξάρτητα και όμοια κατανομημένα στο χώρο που αυτή ορίζει.



Σχήμα 5-3: Παράδειγμα PCP σε επιφάνεια $20 \times 20 \text{ m}$ με μέσο πλήθος σημείων ανά συστάδα 2 ομοιόμορφα κατανομημένα σε κυκλική περιοχή μοναδιαίας ακτίνας, © H. ElSawy et al.

5.2.2.2.2 Η σημειακή ανέλιξη Hard core (Hard Core Point Process – HCPP)

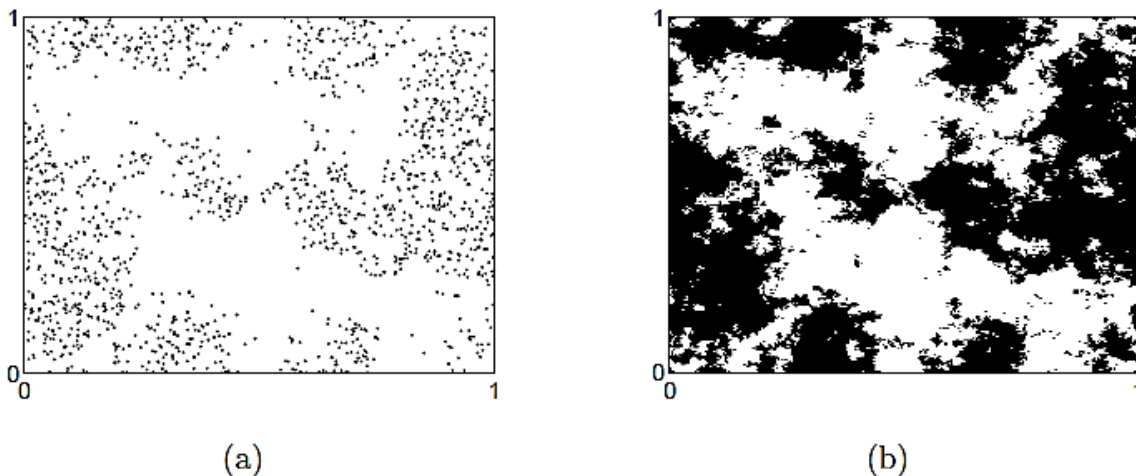
Η HCPP είναι μια σημειακή ανέλιξη στην οποία τα σημεία ανα δύο θα πρέπει να διατηρούν απόσταση μεγαλύτερη από μια καθορισμένη “hard core” παράμετρο r_h . Μια σημειακή ανέλιξη $\Pi = \{x_i, i = 1, 2, 3 \dots\} \subset \mathbb{R}^d$ είναι HCPP αν και μόνον αν $\|x_i - x_j\| \geq r_h, \forall x_i, x_j \in \Pi, i \neq j$, όπου $r_h \geq 0$ μια προκαθορισμένη hard core παράμετρος.



Σχήμα 5-4: Παράδειγμα HCPP, προκύπτουσα από PPP με $\lambda=0.1$ σημεία/ m^2 και $r_h = 2 m$, © H. ElSawy et al.

5.2.2.2.3 Η σημειακή ανέλιξη Cox (Cox Point Process – CPP)

Η σημειακή ανέλιξη Cox αποτελεί επέκταση της PPP, κατά την οποία η παράμετρος έντασης λ είναι και αυτή τυχαία μεταβλητή. Η CPP δηλαδή μπορεί να θεωρηθεί ως μια διπλά στοχαστική PPP.



Σχήμα 5-5: (a) Παράδειγμα σημειακής ανέλιξης Cox σε επιφάνεια $1 \times 1 m$ παραχθείσα σύμφωνα με την τυχαία συνάρτηση έντασης (b), Η χρησιμοποιηθείσα συνάρτηση έντασης, © D. P. Kroese et al.

5.2.3 Η επιλεγείσα σημειακή ανέλιξη

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, για το σκοπό της προσομοίωσης επελέγη η χωρική κατανομή των κόμβων στο δισδιάστατο επίπεδο σύμφωνα με ομογενείς σημειακές ανερίξεις Poisson. Έτσι, η πιθανότητα n κόμβων να βρίσκονται εντός μιας περιοχής R (όχι απαραίτητα συνδεδεμένης) εξαρτάται μόνον από την ολική επιφάνεια A_R της περιοχής και δίδεται από την εξίσωση:

$$\mathbb{P}\{n \text{ in } \mathcal{R}\} = \frac{(\lambda A_{\mathcal{R}})^n}{n!} e^{-\lambda A_{\mathcal{R}}}, \quad n \geq 0$$

όπου λ η (σταθερή) χωρική πυκνότητα των κόμβων ανά μονάδα επιφανείας.

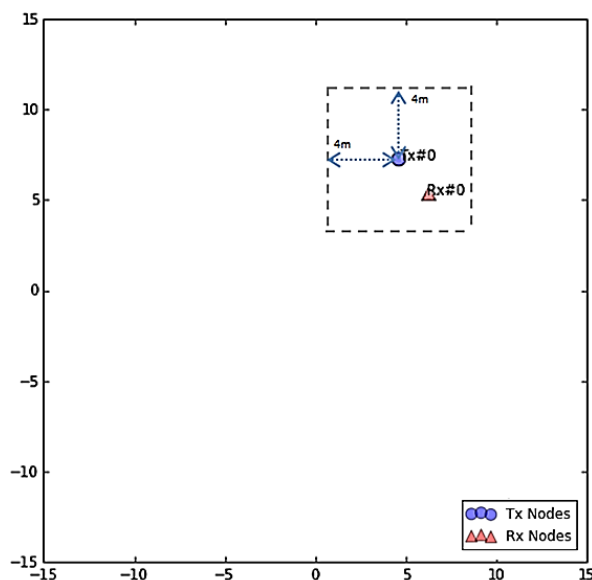
Για την παραγωγή της συγκεκριμένης σημειακής ανέλιξης ακολουθήθηκε ο εξής αλγόριθμος:

- Παραγωγή μια τυχαίας μεταβλητής $N \sim \text{Poi}(\lambda|A|)$
- Με δεδομένο $N = n$, παραγωγή n σημείων ανεξάρτητα και ομοιόμορφα στην επιφάνεια A . Αυτά είναι τα σημεία της ομογενούς ανέλιξης Poisson για το συγκεκριμένο λ .

5.3 Παράμετροι και μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση

5.3.1 Χωρική κατανομή κόμβων

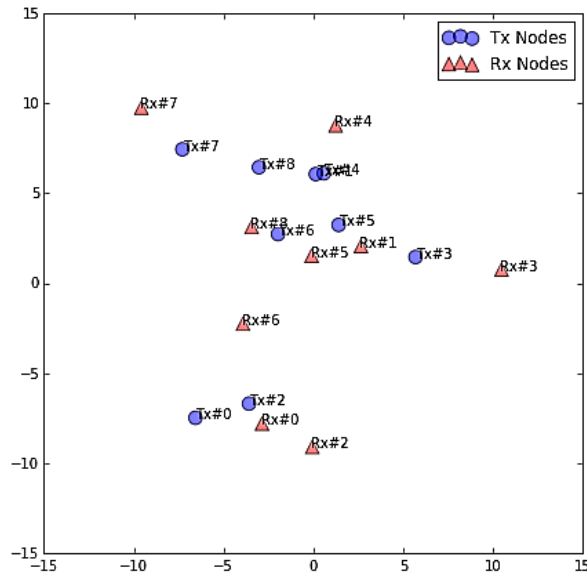
Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, οι πομποί θεωρείται ότι καταλαμβάνουν εντελώς τυχαίες θέσεις εντός ενός παραθύρου παρατήρησης, σύμφωνα με την ομογενή σημειακή ανέλιξη Poisson (PPP). Πιο συγκεκριμένα, θεωρήθηκε παράθυρο παρατήρησης επιφάνειας 15×15 m μέσα στο οποίο οι εκπέμποντες κόμβοι (πομποί – Tx) κατανέμονται σύμφωνα με το προαναφερθέν μοντέλο στοχαστικής γεωμετρίας. Σε κάθε πομπό αντιστοιχεί ένας δέκτης ο οποίος μπορεί να καταλάβει ομοιόμορφα οποιαδήποτε θέση εντός παραθύρου 8×8 m με κέντρο τον αντίστοιχο πομπό. Σχηματικά:



Σχήμα 5-6: Παράδειγμα ζεύγους Tx-Rx στο παράθυρο παρατήρησης.

Τα μεγέθη των παραθύρων παρατήρησης δεν επελέγησαν τυχαία. Στο IR-UWB η ισχύς εκπομπής είναι απαραίτητο να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα προκειμένου το εκπεμπόμενο φασματικό περιεχόμενο να είναι συμβατό με τη μάσκα που έχει εκδώσει η FCC (ή αντίστοιχοι φορείς) και η οποία αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας. Έτσι, σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 15 m μπορεί να θεωρηθεί ότι η λαμβανόμενη ισχύς (και άρα η όποια προκύπτουσα παρεμβολή) είναι πολύ μικρή. Αντίστοιχα, επειδή οι εφαρμογές ενδιαφέροντος καλούνται να αντεπεξέλθουν σε μικρές αποστάσεις εσωτερικών χώρων με καθαρή (ή σχεδόν καθαρή) οπτική

επαφή (LOS ή soft NLOS), η επιλογή μέγιστης απόστασης $4\sqrt{2}$ m μεταξύ πομπού και αντιστοίχου δέκτη θεωρείται εύλογη.



Σχήμα 5-7: Παράδειγμα χωρικής κατανομής ζευγών Tx-Rx σύμφωνα με PPP, $\lambda_{TX} = 0.04/m^2$.

Στην προσομοίωση μελετήθηκαν σενάρια όπου η πυκνότητα των κόμβων Tx (ένταση της PPP) ήταν $\lambda_1 = 0.018$ κόμβοι/ m^2 , $\lambda_2 = 0.04$ κόμβοι/ m^2 και $\lambda_3 = 0.067$ κόμβοι/ m^2 , που ισοδυναμούν κατά μέσο όρο με περίπου 4, 9 και 15 κόμβους αντίστοιχα στο παράθυρο παρατήρησης.

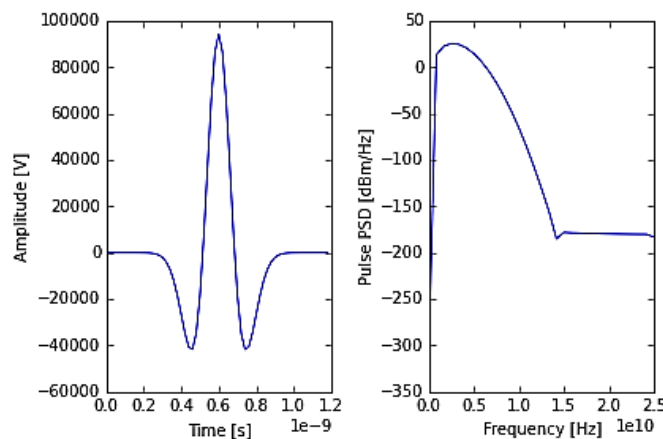
Για τα σενάρια με παρεμβολή στενής ζώνης (Narrowband Interference – NBI) ενδιαφέρει μόνο η χωρική κατανομή των πομπών στενής ζώνης οι οποίοι και πάλι είναι κατανεμημένοι σύμφωνα με PPP με $\lambda_1 = 0.018/m^2$ και $\lambda_2 = 0.04/m^2$ και θεωρείται ότι αποτελούν σημειακή ανέλιξη διαφορετική από εκείνη των UWB κόμβων.

5.3.2 Ο παλμός που χρησιμοποιήθηκε

Ο παλμός που χρησιμοποιήθηκε προκύπτει από τη δεύτερη παράγωγο μιας συνάρτησης Gauss, όπως αυτός περιγράφηκε στο τρίτο κεφάλαιο. Ο παλμός αυτός έχει εξίσωση

$$\frac{d^2p(t)}{dt^2} = \left(1 - 4\pi \frac{t^2}{a^2}\right) e^{-\frac{2\pi t^2}{a^2}}$$

Η τιμή της παραμέτρου a που χρησιμοποιήθηκε ήταν $a = 0.3 \cdot 10^{-9}$ και η διάρκεια του παλμού τέθηκε στα 1.2 ns. Σχηματικά:



Σχήμα 5-8: Ο παλμός που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση (κανονικοποιημένος για μοναδιαία ενέργεια)

5.3.3 Ρυθμός ανταλλαγής πακέτων – ρυθμοί μετάδοσης

Η εξέταση της επίδοσης του συστήματος έγινε παράγοντας πακέτα με τυχαία δεδομένα (ισοπίθανη εμφάνιση “0” ή “1” στην ακολουθία bits που αποτελεί το πακέτο). Για λόγους διερεύνησης της εξάρτησης που εισάγει το μήκος των πακέτων στην επίδοση του συστήματος μελετήθηκαν σενάρια με πακέτα των 256 bits (32 KB) και των 512 bits (64 KB). Ακόμη, προκειμένου να καλυφθεί όλο το εύρος των πιθανών εφαρμογών, μελετήθηκαν σενάρια όπου οι ρυθμοί μετάδοσης ήταν ίσοι με 10 Mbps, 50 Mbps και 100 Mbps.

Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο μέσος ρυθμός με τον οποίο ο κάθε πομπός UWB παράγει δεδομένα (bits) θεωρήθηκε ίσος με το 90% του διαθέσιμου ρυθμού μετάδοσης (bitrate), ούτως ώστε να καλυφθεί το σενάριο έντονης και συνάμα ρεαλιστικής κίνησης (χωρίς να απαιτούνται buffers απείρου μήκους). Οι αφίξεις των πακέτων στο διαμορφωτή κάθε πομπού θεωρήθηκε ανέλιξη Poisson με μέσο ρυθμό $\lambda = \frac{0.9R}{L}$ packets/sec, όπου R το αντίστοιχο bitrate και L το εκάστοτε μήκος του πακέτου. Οι χρόνοι άφιξης μεταξύ των πακέτων ακολουθούν εκθετική κατανομή με μέση τιμή $E\{t\} = 1/\lambda$.

Επειδή η προσομοίωση των δεδομένων γίνεται κάνοντας χρήση διακριτών δειγμάτων (discrete sampling), οι χρόνοι άφιξης μεταξύ των πακέτων μοντελοποιούνται με το διακριτό ανάλογο της εκθετικής κατανομής, τη γεωμετρική κατανομή. Μια τυχαία μεταβλητή X ακολουθεί γεωμετρική κατανομή με παράμετρο $p \in (0, 1]$ αν:

$$P(X = n) = p(1 - p)^{n-1}, \quad \forall n \geq 1,$$

ή ισοδύναμα αν:

$$P(X > n) = (1 - p)^n, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Η παράμετρος p της γεωμετρικά κατανομημένης τυχαίας μεταβλητής $X^{(t)}$ συνδέεται με την παράμετρο λ της εκθετικής κατανομής με τη σχέση $p = \lambda\tau$, όπου τ ο χρόνος που διαρκεί κάθε δείγμα. Καθώς το τ τείνει στο μηδέν, η τυχαία μεταβλητή $X^{(t)}$ τείνει να ακολουθεί εκθετική κατανομή με παράμετρο λ:

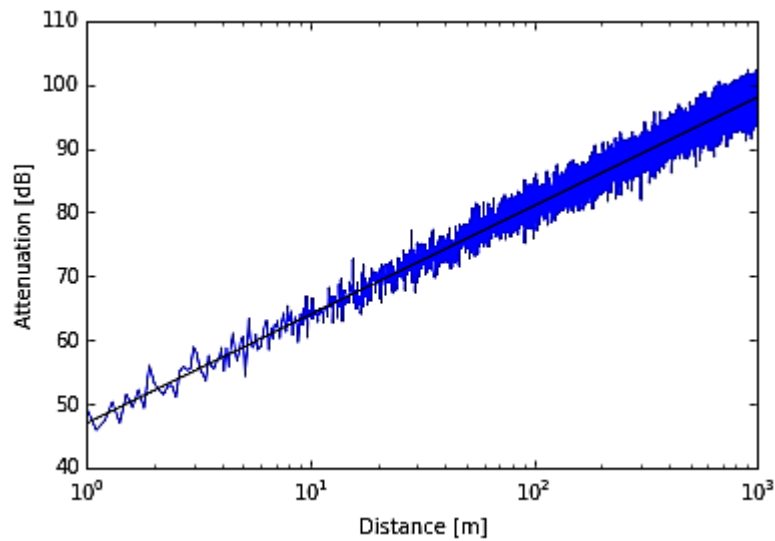
$$P(X^{(\tau)}\tau > t) = (1 - p^{(\tau)})^{\lfloor \frac{t}{\tau} \rfloor} \rightarrow e^{-\lambda t}, \quad \forall t \in \mathbb{R}_+.$$

προφανώς $\tau = 1/f_s$, όπου f_s η συχνότητα δειγματοληψίας. Οι χρόνοι άφιξης θεωρείται επομένως ότι ακολουθούν γεωμετρική κατανομή με μέση τιμή $E\{\tau\} = 1/p$, όπου $p = \lambda\tau$.

5.3.4 Το μοντέλο του καναλιού – φαινόμενα διάδοσης

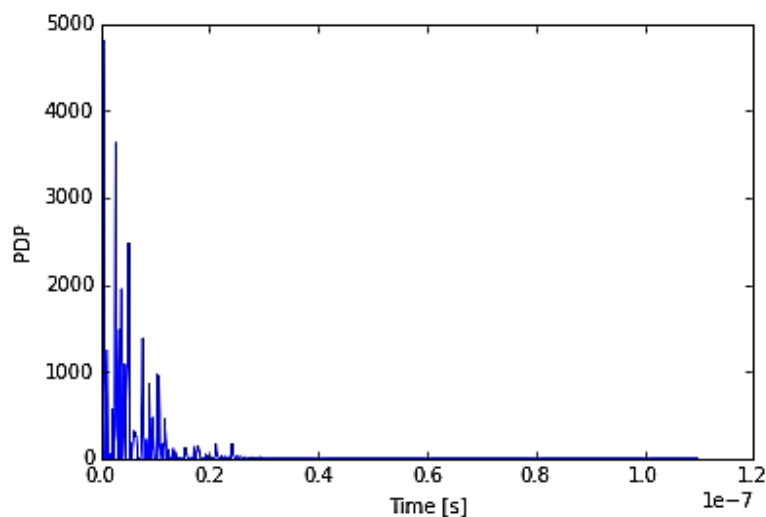
Ένα από τα σημαντικότερα σημεία της προσομοίωσης είναι το μοντέλο του καναλιού που χρησιμοποιήθηκε για τη διάδοση των σημάτων. Τα φαινόμενα απωλειών λόγω διάδοσης (path loss) και σκίασης (shadowing) μοντελοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τιμές παραμέτρων όπως αυτές προσδιορίστηκαν πειραματικά από τους Ghassemzadeh και Tarokh για UWB δίκτυα υπό συνθήκες LOS. Έτσι, οι απώλειες λόγω διάδοσης σε απόσταση αναφοράς (path loss reference attenuation) $D_0 = 1\text{m}$ προσδιορίζονται σε $A_0 = 47\text{ dB}$ και ο εκθετικός συντελεστής εξασθένησης ισχύος (power loss exponent) σε $\gamma = 1.7$. Για τη σκίαση θεωρείται λογαριθμοκανονική κατανομή με $\sigma_{\text{dB}} = 1.6$. Οι ίδιες τιμές παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν τόσο για τα UWB όσο και για τα NB σήματα, καθώς έχει αποδειχθεί σε πειραματικές μελέτες ότι φαινόμενα εξασθένησης και σκίασης

επιδρούν παρόμοια τόσο σε UWB όσο και σε NB σήματα.



Σχήμα 5-9: Συνδυασμένες απώλειες λόγω διάδοσης (μαύρη γραμμή) και σκίασης (μπλε γραμμή) ως συνάρτηση της απόστασης για τις δεδομένες παραμέτρους προσομοίωσης.

Για την περίπτωση των σημάτων UWB, θεωρώντας ότι το σύνολο των κόμβων βρίσκεται σε εσωτερικό χώρο (περιβάλλον indoor), χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο πολυδιαδρομικής λήψης (multipath channel model) που προτάθηκε από το την IEEE, το IEEE 802.15.SG3a, το οποίο οποίο περιγράφηκε εκτενώς στο δεύτερο κεφάλαιο. Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου καναλιού που προτάθηκε αρχικά από τον Turin (Turin et al., 1972) και επισημοποιήθηκε από τους Saleh και Valenzuela (Saleh και Valenzuela, 1987). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το πρώτο από τα τέσσερα προτεινόμενα μοντέλα (Case A), το οποίο αφορά περιπτώσεις καθαρής οπτικής επαφής (LOS) για αποστάσεις 0 – 4 m.



Σχήμα 5-10: Στιγμιότυπο του καναλιού UWB για τις δεδομένες παραμέτρους προσομοίωσης (Case A)

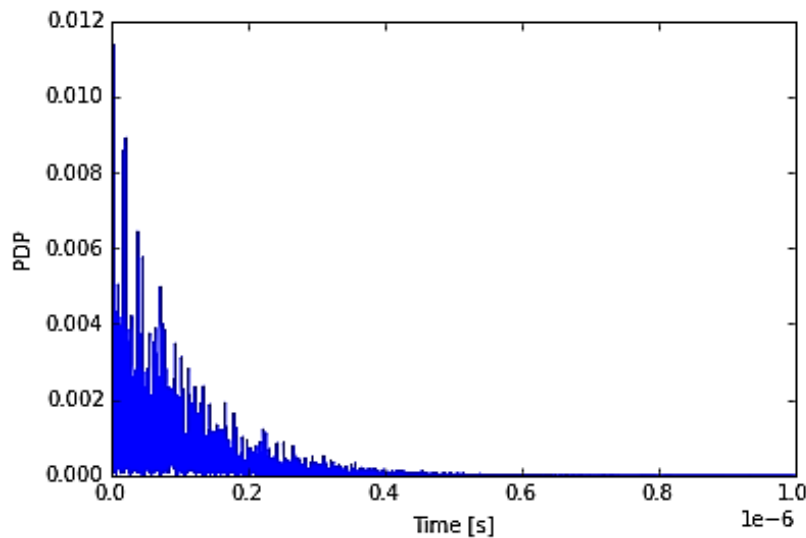
Για την περίπτωση των σημάτων NB, επειδή πρόκειται για εσωτερικό χώρο θεωρήθηκε ότι οι κόμβοι έχουν συμπεριφορά αντίστοιχη των ασυρμάτων τοπικών δικτύων (WLANs) 802.11 και επομένως χρησιμοποιήθηκε το αντίστοιχο μοντέλο πολυδιαδρομικής λήψης που περιλαμβάνει διαλείψεις τύπου Rayleigh με εκθετικά μειούμενο προφίλ ισχύος (Power Delay Profile – PDP). Το μοντέλο αυτό προτάθηκε από τον N. Chayat (1997, 1998) και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως

IEEE 802.11-97/96 και IEEE 802.11-98/156r2. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, η κρουστική απόκριση του καναλιού λόγω πολυδιαδρομικής λήψης είναι:

$$h_k = N(0, \frac{1}{2} \sigma_k^2) + j \cdot N(0, \frac{1}{2} \sigma_k^2) \quad \text{for } k=0,1,\dots,k_{\max} - 1$$

όπου $\sigma_k^2 = \sigma_o^2 e^{-kT_s/\tau_{rms}}$ $\sigma_o^2 = 1 - e^{-T_s/\tau_{rms}}$ $k_{\max} = 10 \cdot \tau_{rms}/T_s$,

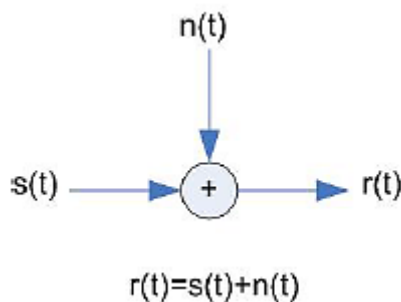
T_s το διάστημα δειγματοληψίας και τ_{rms} η μέση τετραγωνική τιμή της εξάπλωσης καθυστέρησης (rms delay spread). Για τις ανάγκες της προσομοίωσης τέθηκε $\tau_{rms} = 100\text{ns}$ που θεωρείται μια καλή εκτίμηση για περιβάλλον indoor με έντονο φαινόμενο πολλαπλών ανακλάσεων.



Σχήμα 5-11: Στιγμιότυπο του NB καναλιού (802.11) για τις δεδομένες παραμέτρους προσομοίωσης

5.3.5 Μοντελοποίηση του λευκού προσθετικού θορύβου (AWGN)

Ως είναι γνωστό, η μεταδιδόμενη πληροφορία στα συστήματα ασυρμάτων επικοινωνιών πέραν όλων των άλλων, υπόκειται σε θόρυβο ο οποίος δύναται να την αλλοιώσει. Η πηγή του θορύβου μπορεί να προκύψει εξαιτίας διαφόρων φυσικών φαινομένων, όπως είναι οι θερμικές ταλαντώσεις στα άτομα των αγωγών (θερμικός θόρυβος), ο θόρυβος εξαιτίας της διακριτής φύσης της ροής του ρεύματος (θόρυβος βολής – shot noise), η ακτινοβολία μελάνων σωμάτων και η κοσμική ακτινοβολία. Ο θόρυβος αυτός θεωρείται ότι δρα προσθετικά στην λαμβανόμενη από το δέκτη κυματομορφή (additive), έχει σταθερή φασματική πυκνότητα ισχύος (white) και το πλάτος του ακολουθεί κατανομή Gauss, εξ' ου και το όνομα Additive White Gaussian Noise (AWGN).



Σχήμα 5-12: Επίδραση του θορύβου στο λαμβανόμενο σήμα

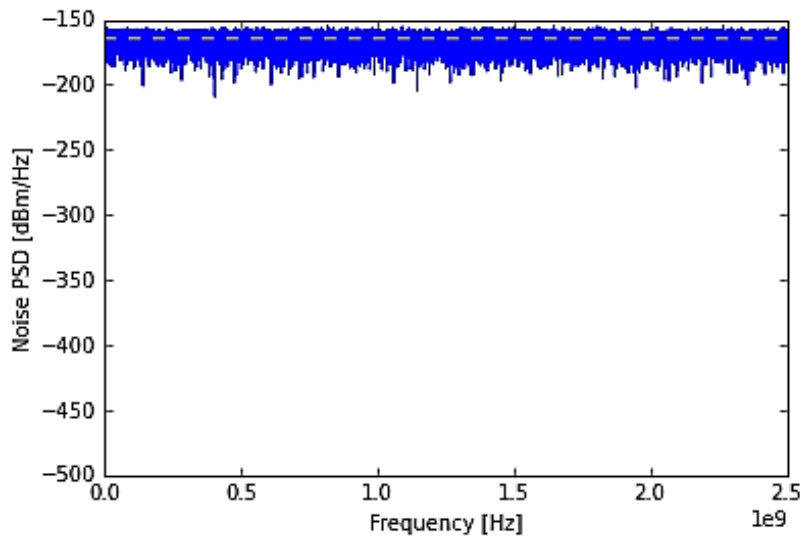
Συνήθως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διαθέσιμης ισχύος θορύβου ο τύπος:

$$N = k_B T_s B$$

όπου k_B η σταθερά Boltzmann ($k_B = 1.3806488 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$), T_s η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου σε Kelvin και B το εύρος ζώνης του σήματος σε Hz. Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου υπολογίζεται ως εξής:

$$T_s = (F - 1)T_0$$

όπου F ο συντελεστής θορύβου του συστήματος (επιλέχθηκε 10) και T_0 η θερμοκρασία περιβάλλοντος (τυπική τιμή 290 K). Για τις ανάγκες της προσομοίωσης το Bandwidth υποτίθεται στα 2.5 GHz (-10dB bandwidth).



Σχήμα 5-13: Η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου για τις δεδομένες παραμέτρους προσομοίωσης

5.3.6 Μέτρηση επίδοσης συστήματος – δείκτες επίδοσης

Προκειμένου να υπάρξει η δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών συστημάτων χρησιμοποιούνται διάφοροι δείκτες επίδοσης στο δέκτη κάθε ζεύξης. Αυτοί συνήθως είναι ο ρυθμός εσφαλμένων bits πληροφορίας (Bit Error Rate – BER), ο σηματοθορυβικός λόγος (Signal-to-Noise Ratio – SNR), ο λόγος παρεμβολής προς θόρυβο (Interference-to-Noise Ratio – INR) και ο λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal-to-Interference-and-Noise Ratio – SINR).

Ο σημαντικότερος δείκτης για την επίδοση του συστήματος είναι ο ρυθμός εσφαλμένων bits πληροφορίας BER, ο οποίος δείχνει τι ποσοστό των bits πληροφορίας που ελήφθησαν από το δέκτη είναι κατεστραμμένα. Η αλλοίωση των bits μπορεί να οφείλεται σε θόρυβο, παρεμβολή ή λόγω φαινομένων διάδοσης (π.χ. πολυδιαδρομική λήψη). Ο ορισμός του είναι ο ακόλουθος:

$$\text{Bit Error Rate (BER)} = \frac{\text{Λανθασμένα bits πληροφορίας}}{\text{Σύνολο ληφθέντων bits πληροφορίας}}$$

Αντίστοιχα, για συστήματα υπό την επίδραση μόνο θορύβου, μια καλή ένδειξη της ποιότητας της ζεύξης αποτελεί ο σηματοθορυβικός λόγος SNR:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} = \frac{E_{\text{signal}}}{E_{\text{noise}}}$$

όπου P_{signal} η ισχύς του ωφέλιμου σήματος και P_{noise} η ισχύς του θορύβου.

Για τις περιπτώσεις όπου εξετάζονται interference-limited συστήματα, συστήματα δηλαδή στα οποία κυρίαρχο πρόβλημα είναι οι παρεμβολές από γειτονικές ζεύξεις, χρησιμοποιείται ευρέως ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο SINR:

$$SINR = \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{interference}} + P_{\text{noise}}} = \frac{E_{\text{signal}}}{E_{\text{interference}} + E_{\text{noise}}}$$

όπου, όπως και πριν, P_{signal} η ισχύς του ωφέλιμου σήματος, P_{noise} η ισχύς του θορύβου και $P_{\text{interference}}$ η συνολική ισχύς των παρεμβαλλόντων σημάτων.

Ένας ενδιαφέρων δείκτης είναι στην περίπτωση interference-limited συστημάτων και ο λόγος παρεμβολής προς θόρυβο INR, ο οποίος είναι ενδεικτικός του μεγέθους του προβλήματος που προκαλεί η παρεμβολή έναντι της περίπτωσης απλού θορύβου:

$$INR = \frac{P_{\text{interference}}}{P_{\text{noise}}} = \frac{E_{\text{interference}}}{E_{\text{noise}}}$$

όπου και εδώ $P_{\text{interference}}$ η συνολική ισχύς των παρεμβαλλόντων σημάτων και P_{noise} η ισχύς του θορύβου.

Σε όλες τις παραπάνω εξισώσεις με E_x υπονοείται η αντίστοιχη ενέργεια.

Όλοι οι παραπάνω δείκτες όπως αναφέρθηκε υπολογίζονται στο δέκτη κάθε ζεύξης και με την πάροδο του χρόνου μπορεί να παραμένουν σχετικά σταθεροί ή να παρουσιάζουν έντονες μεταβολές ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο μελετούνται. Το BER συνήθως υπολογίζεται επι τη βάση ενός πακέτου (πόσα bits καταστράφηκαν στα L bits που αποτελούν το πακέτο), ενώ τα SNR, SINR και INR μπορούν είτε να υπολογίζονται ανά bit (σύμβολο) οπότε οι αντίστοιχες ενέργειες E_x αφορούν τη διάρκεια του bit (συμβόλου), είτε ανά πακέτο, οπότε η οι ποσότητες E_x αφορούν τη διάρκεια του πακέτου.

Στα πλαίσια της προσομοίωσης ο υπολογισμός του BER γίνεται ανά πακέτο, ενώ οι υπολογισμοί των μεγεθών SNR, SINR, INR γίνονται ανά bit και κατόπιν εξάγεται η μέση τιμή τους για το πλήθος των bit που αποτελούν το πακέτο.

5.3.7 Σύνοψη σεναρίων προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν διάφορα σενάρια για την αξιολόγηση της καταλληλότητας και αποδοτικότητας του IR-UWB σε δίκτυα. Συγκεκριμένα, μελετήθηκαν σενάρια χωρίς παρεμβολές (μόνο AWGN), σενάρια με Multi-User Interference (MUI), παρεμβολών δηλαδή μεταξύ κόμβων που ανήκουν στο ίδιο δίκτυο και σενάρια με Mui και narrowband παρεμβολές (NBI). Ελλείψει ειδικών παραδοχών, μπορεί κάλλιστα να θεωρηθεί ότι κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη UWB ανήκει σε διαφορετικό δίκτυο του ίδιου τύπου με τα υπόλοιπα, οδηγώντας σε παρεμβολές τύπου Inter-Network. Αναφορικά με τα σενάρια παρεμβολών NBI, θεωρήθηκε ότι το δίκτυο (ή τα δίκτυα σύμφωνα με την προηγούμενη παρατήρηση) UWB έχουν ως υπερκείμενο δίκτυο δίκτυο στενής ζώνης (NB) τύπου αντίστοιχου με το WLAN στα 2.4 GHz, το οποίο χρησιμοποιεί διαμόρφωση BPSK στα 54Mbps και διαθέτει ισχύ εκπομπής (EIRP) 0 dBm.

Μελετήθηκαν σενάρια όπου οι κόμβοι UWB:

- διαμορφώνουν το σήμα σύμφωνα με: 2PPM-TH, BPAM-TH, BPAM-DS
- στέλνουν με ρυθμούς μετάδοσης: 10 Mbps, 50 Mbps, 100Mbps
- έχουν διάρκεια πλαισίου: $50 \cdot 10^{-9}$, $10 \cdot 10^{-9}$, $5 \cdot 10^{-9}$ sec στην περίπτωση TH για τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης και $2.5 \cdot 10^{-9}$, $5 \cdot 10^{-9}$, $5 \cdot 10^{-9}$ για την περίπτωση DS
- χρονική μετατόπιση $0.5 \cdot 10^{-9}$ μεταξύ συμβόλων 0 και 1 για την περίπτωση 2PPM-TH
- έχουν ρυθμό επανάληψης πλαισίου: 2 στην περίπτωση TH
- έχουν μήκος κώδικα: 35, 7, 3 για την περίπτωση TH και τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης, 40, 4, 2 για την περίπτωση DS και τους αντίστοιχους ρυθμούς μετάδοσης
- έχουν περίοδο κώδικα: ίση με το αντίστοιχο μήκος του κώδικα για όλα τα σχήματα διαμόρφωσης και ρυθμούς μετάδοσης
- έχουν μεγέθη πακέτου: 256 bits (32 bytes), 512 bits (64 bytes)
- έχουν αφίξεις πακέτων Poisson με λ τέτοιο ώστε η ένταση κίνησης να είναι ίση με 0.9
- έχουν χωρική πυκνότητα (ένταση σημειακής ανέλιξης Poisson για τους πομπούς): 0.018 κόμβοι/m², 0.04 κόμβοι/m², 0.067 κόμβοι/m² εντός παραθύρου παρατήρησης 15 x 15 m με τους αντίστοιχους δέκτες εντός παραθύρου 8 x 8 m με κέντρο τον αντίστοιχο πομπό
- χρησιμοποιούν ως κανάλι το IEEE 802.15.3a με τις παραμέτρους Case A, απώλειες διάδοσης με $A_0 = 47$ dB (απώλειες σε θέση αναφοράς $D_0 = 1$ m, εκθετικό συντελεστή εξασθένισης ισχύος (power loss exponent) $\gamma = 1.7$ και λογαριθμοκανονική σκίαση με $\sigma_{dB} = 1.6$.
- εκπέμπουν με ισχείς (EIRP): -50, -40, -30, -20, -10 dBm
- διαθέτουν κτενοειδείς επιλεκτικούς δέκτες (Selective Rake) με 10 συσχετιστές-προσαρμοσμένα φίλτρα (fingers – matched filters) και χρησιμοποιούν εκτίμηση κατωφλίου (soft decision decoding)
- υπάρχει τέλειος συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη
- βρίσκονται όλοι στο ίδιο ύψος και χρησιμοποιούν ομοιοκατευθυντικές κεραιές κέρδους 0 dB

Για τα ειδικά σενάρια παρεμβολών με υπερκείμενο δίκτυο στενής ζώνης, οι κόμβοι αυτού:

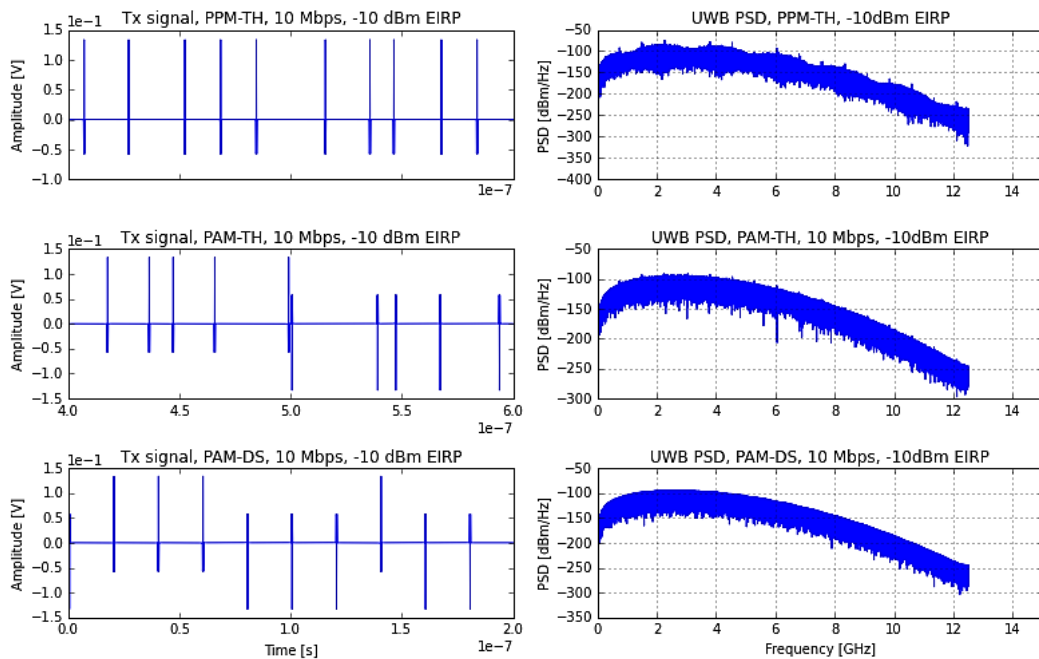
- διαμορφώνουν το σήμα σύμφωνα με BPSK 54 Mbps στα 2.4 GHz
- θεωρείται ότι στέλνουν δεδομένα συνεχώς (μόνιμη παρεμβολή)
- έχουν χωρική πυκνότητα (ένταση σημειακής ανέλιξης Poisson): 0.018 κόμβοι/m², 0.04 κόμβοι/m²
- χρησιμοποιούν ως κανάλι το εκθετικό κανάλι 802.11 με $\tau_{rms} = 100$ ns συνδυασμένο με απώλειες διάδοσης με $A_0 = 47$ dB (απώλειες σε θέση αναφοράς $D_0 = 1$ m, εκθετικό συντελεστή εξασθένισης ισχύος $\gamma = 1.7$ και λογαριθμοκανονική σκίαση με $\sigma_{dB} = 1.6$.

Για κάθε δυνατό ζεύγος Tx-Rx (είτε πρόκειται για πομπό UWB είτε NB) υπολογίζεται το αντίστοιχο κανάλι το οποίο θεωρείται ότι παραμένει αμετάβλητο για τη διάρκεια μετάδοσης ενός πακέτου, υπό την παραδοχή ότι λόγω indoor περιβάλλοντος οι όποιες μεταβολές είναι μικρές και η κινητικότητα των κόμβων αμελητέα. Για κάθε ανταλλαγή πακέτου στη μελέτη MUI δηλαδή υπολογίζονται $n \cdot n$ κανάλια, όπου n το πλήθος των συσχετισμένων ζευγών Tx-Rx UWB ενώ στην περίπτωση με MUI και NBI υπολογίζονται $n \cdot n + \kappa \cdot n$, όπου κ το πλήθος των κόμβων (πομπών) NB.

5.3.8 Διαγραμματική παρουσίαση εκπεμπόμενων κυματομορφών

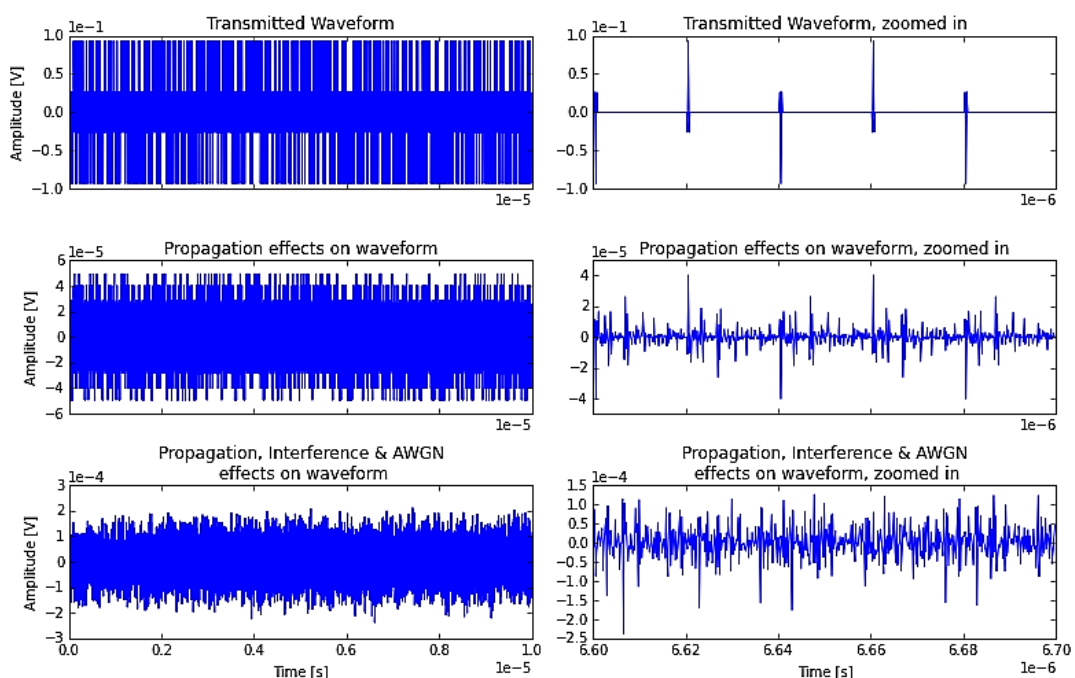
Παρατίθενται διαγράμματα στα οποία καταδεικνύεται το πλούσιο φασματικό περιεχόμενο

εκπεμπόμενων κυματομορφών που αντιστοιχούν στη διάρκεια ενός πακέτου 512 bits (64 bytes), για μετάδοση με ρυθμό στα 10 Mbps και διαμορφώσεις 2PPM-TH, BPAM-TH και BPAM-DS με ισχύ εκπομπής (EIRP) στα -10 dBm.



Σχήμα 5-14: Σύγκριση φασματικού περιεχομένου μεταξύ διαφορετικών διαμορφώσεων

Ακολουθούν παραδείγματα κυματομορφών που εξήχθησαν από την προσομοίωση και στα οποία καθίσταται εμφανής η αλλοίωση που προκαλούν στην κυματομορφή τα διάφορα φαινόμενα διάδοσης (εξασθένιση, πολυδιαδρομική λήψη, σκίαση), οι παρεμβολές από γειτονικές ζεύξεις (προσθετική ή αφαιρετική συμβολή) και ο λευκός προσθετικός θόρυβος. Οι κυματομορφές πάρθηκαν από σύστημα BPAM-DS στα 10 Mbps (μήκος κώδικα 5), $\lambda=0.04$ πομπούς Tx/m² και ισχύ εκπομπής (EIRP) -10 dBm.



Σχήμα 5-15: Παράδειγμα κυματομορφών στις οποίες καθίσταται εμφανής η επίδραση των φαινομένων διάδοσης, παρεμβολών και θορύβου

5.3.9 Ανταλλαγή πακέτων – εξαγωγή μέσω των όρων δεικτών επίδοσης

Στην επόμενη σελίδα ακολουθεί εν είδει διαγράμματος η περιγραφή της λειτουργίας του αλγορίθμου της προσομοίωσης για τη γενική περίπτωση (όχι NB παρεμβολές). Για την προσομοίωση βγήκαν γενικοί μέσοι όροι από 125 διαφορετικές πραγματώσεις (realizations) στοχαστικής γεωμετρίας για κάθε λ , ενώ για κάθε γεωμετρία προέκυψαν οι ενδιάμεσοι μέσοι όροι από ανταλλαγή 25 πακέτων μεταξύ κάθε συσχετισμένου ζεύγους πομπού-δέκτη UWB.

Ακολουθεί συνοπτική περιγραφή των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στην επόμενη σελίδα:

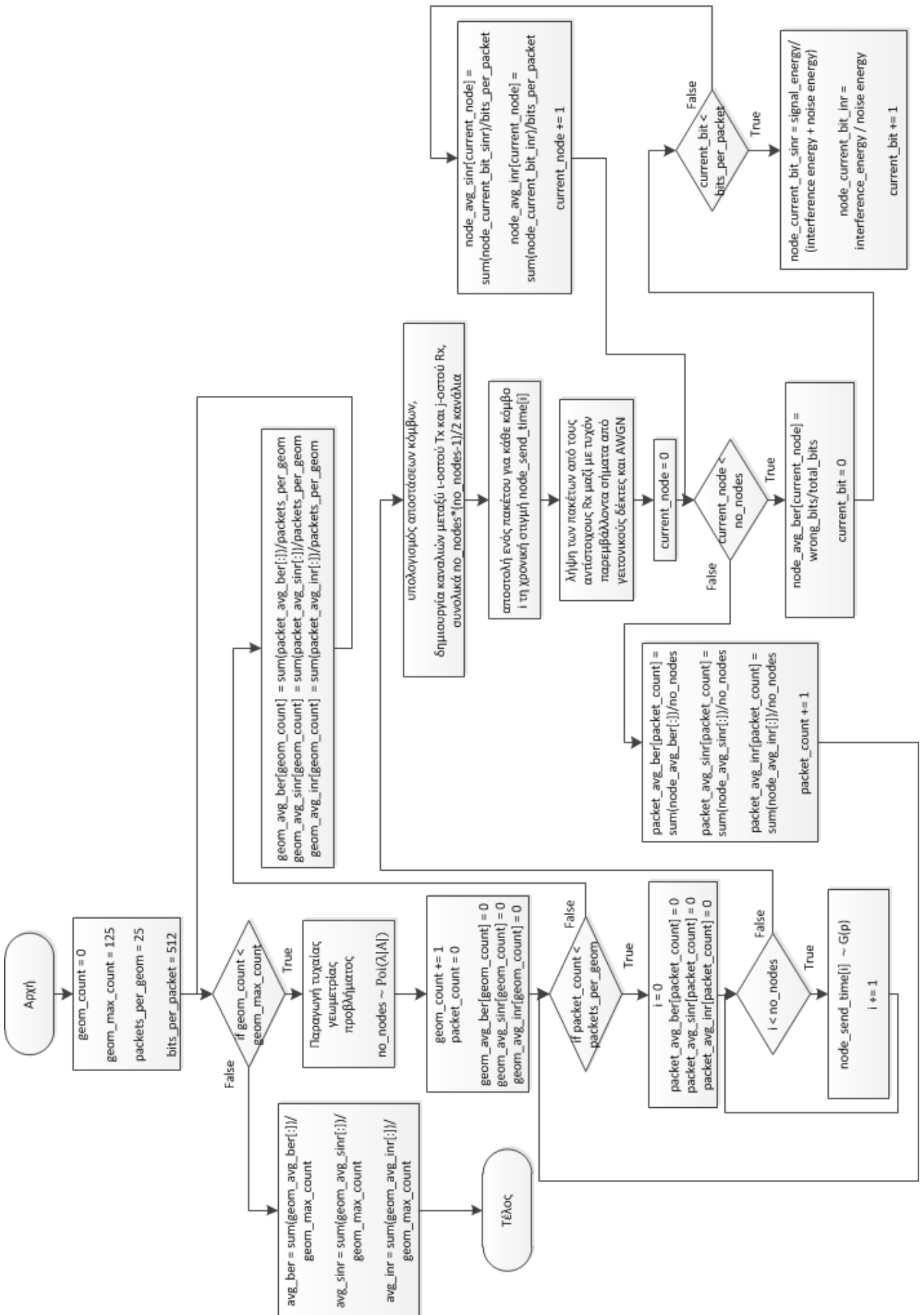
- `geom_count`: αύξων αριθμός της χρησιμοποιούμενης στοχαστικής γεωμετρίας
- `geom_max_count`: συνολικός αριθμός προσομοιούμενων στοχαστικών γεωμετριών (=125)
- `packets_per_geom`: συνολικός αριθμός πακέτων που θα ανταλλαγούν για καθεμία στοχαστική γεωμετρία (=25) μεταξύ κάθε ζεύγους Tx-Rx UWB
- `bits_per_packet`: συνολικός αριθμός των bits που περιλαμβάνει κάθε πακέτο
- `no_nodes`: πλήθος ζευγών Tx-Rx για τη δεδομένη γεωμετρία
- `packet_count`: αύξων αριθμός πακέτου που ανταλλάσσεται μεταξύ των ζευγών Tx-Rx
- `geom_avg_ber`, `geom_avg_sinr`, `geom_avg_inr`: μέσο BER, SINR και INR του δικτύου για τη δεδομένη γεωμετρία
- `node_send_time`: οι χρονικές στιγμές στις οποίες θα ανταλλαχθούν πακέτα για κάθε ζεύγος Tx-Rx
- `packet_avg_ber`, `packet_avg_sinr`, `packet_avg_inr`: μέσο BER, SINR και INR του δικτύου για τη δεδομένη γεωμετρία και αποστολή πακέτου
- `current_node`: αύξων αριθμός του τρέχοντος κόμβου
- `node_avg_ber`, `node_avg_sinr`, `node_avg_inr`: μέσο BER, SINR και SINR του δεδομένου κόμβου για τη δεδομένη γεωμετρία και αποστολή πακέτου
- `current_bit`: αύξων αριθμός bit μέσα στο τρέχον πακέτο
- `node_current_bit_sinr`, `node_current_bit_inr`: υπολογισμός SINR και SINR για το τρέχον bit του τρέχοντος κόμβου στη δεδομένη γεωμετρία και αποστολή πακέτου

5.3.10 Απλό σχήμα ελέγχου ισχύος (power control – PC)

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές γίνεται συνήθως χρήση μιας συγκεκριμένης στάθμης εκπεμπόμενης ισχύος για το σύνολο των κόμβων του δικτύου, αφήνοντας ανεκμετάλλευτη τη δυνατότητα εξειδικευμένης ρύθμισης ισχύος που παρέχεται από το hardware προκειμένου να ελαττωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Άλλες λύσεις, χρησιμοποιούν αλγορίθμους ελέγχου ισχύος οι οποίοι «τρέχουν» από κοινού στο σύνολο των κόμβων του δικτύου.

Στα πλαίσια της εργασίας διερευνήθηκε κατά πόσον ένα απλό σχήμα ελέγχου ισχύος θα μπορούσε να βελτιώσει την επίδοση των συστημάτων IR-UWB υπό συνθήκες έντονων παρεμβολών ή να τη διατηρήσει στα ίδια επίπεδα, με χαμηλότερη ωστόσο κατανάλωση ενέργειας. Για το σκοπό αυτό επιστρατεύθηκε μια τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου ATPC (Adaptive Transmission Power Control) ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN). Το ATPC ακολουθεί τη λογική της μοντελοποίησης ανα ζεύγη (pairwise power control).

Σύμφωνα με το ATPC, κάθε κόμβος που αποτελεί το ασύρματο δίκτυο, κατασκευάζει ένα μοντέλο για κάθε έναν από τους γειτονικούς του κόμβους περιγράφοντας τη συσχέτιση μεταξύ εκπεμπόμενης ισχύος και ποιότητας ζεύξης. Το μοντέλο αυτό λειτουργεί επί τη βάση ενός σχήμα-



Σχήμα 5-16: Συνοπτικό διάγραμμα παρουσίασης του αλγορίθμου προσομοίωσης χωρίς παρεμβολή στενής ζώνης

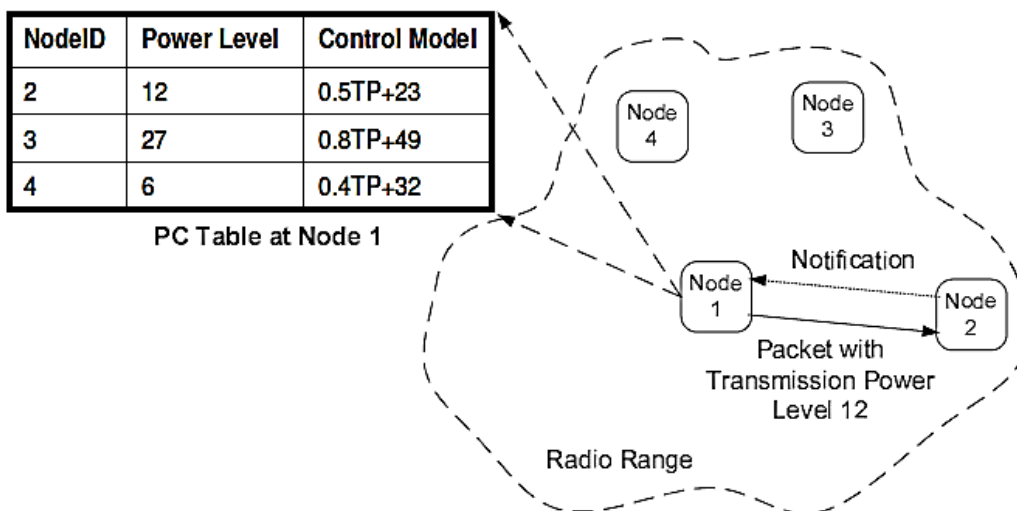
τος ανάδρασης το οποίο είναι σε θέση να διατηρήσει την επιθυμητή ποιότητα σύνδεσης με την πάροδο του χρόνου.

Για τον προσδιορισμό της ποιότητας μιας ζεύξης χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία το BER, ενώ στο ATPC χρησιμοποιούνται οι δείκτες Received Signal Strength Indicator (RSSI) και Link Quality Indicator (LQI), οι οποίοι εν γένει είναι hardware-specific.

Στόχος του αλγορίθμου είναι:

- η εύρεση από κάθε κόμβο της ελάχιστης στάθμης ισχύος εκπομπής που προσφέρει ικανοποιητικής ποιότητας ζεύξη με κάθε γειτονικό κόμβο
- η δυναμική προσαρμογή του μοντέλου προϊόντος του χρόνου ώστε να καλύψει τη χρονική μεταβολή του περιβάλλοντος

Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την κεντρική ιδέα του σχήματος ελέγχου: κάθε κόμβος διατηρεί έναν πίνακα με τους γειτονικούς του κόμβους και αφού ο έλεγχος ισχύος κλειστού βρόχου έχει τρέξει μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων, η κατάλληλη τιμή εκπεμπόμενης ισχύος αναγράφεται στον πίνακα για κάθε γειτονικό κόμβο. Επίσης, διατηρείται μια γραμμική σχέση (control model) που επιτρέπει νέο υπολογισμό της εκπεμπόμενης ισχύος.



Σχήμα 5-17: Ο διατηρούμενος σε κάθε κόμβο πίνακας με τους γειτονικούς κόμβους και τις αντίστοιχες στάθμες ισχύος εκπομπής, © S. Lin et al.

Η επιλογή της κατάλληλης στάθμης εκπομπής εξάγεται από ένα γραμμικό μοντέλο πρόβλεψης μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων. Εμπειρικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι το μοντέλο αυτό δεν είναι αυστηρά γραμμικό, επομένως πρόκειται για μια προσέγγιση της πραγματικότητας. Η βασική ιδέα του μοντέλου είναι η χρήση μιας συνάρτησης η οποία θα δίδει προσεγγιστικά το BER για διάφορες τιμές ισχύος $BER = f(\text{power})$. Η συνάρτηση αυτή δύναται να τροποποιείται με την πάροδο του χρόνου προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη τυχόν μεταβολές στο περιβάλλον.

Ανά τακτά χρονικά διαστήματα (ή όποτε αυτό κρίνεται απαραίτητο όπως θα εξηγηθεί παρακάτω), ο πομπός μεταδίδει πακέτα “μέτρησης - probe” κατά ριπές στο δέκτη, σε διαφορετικές στάθμες ισχύος. Ο δέκτης, αφού λάβει το κάθε probing πακέτο καταγράφει το BER και την αντίστοιχη τιμή εκπεμπόμενης ισχύος που χρησιμοποιήθηκε. Έτσι, το μοντέλο χρησιμοποιεί ένα διάνυσμα TP και μια μήτρα R , όπου $TP = [tp_1, tp_2, \dots, tp_N]$ το διάνυσμα που περιέχει τις N διαφορετικές στάθμες

ισχύος που ο κόμβος δύναται να χρησιμοποιήσει και η μήτρα R αποτελείται από το σύνολο των διανυσμάτων BER R_i , ένα για κάθε γείτονα με $R = [R_1, R_2, \dots, R_n]^T$. $R_i = [r_i^1, r_i^2, \dots, r_i^N]$ το διάνυσμα με τα BER για κάθε γείτονα i , στα οποία r_i^j η τιμή του BER για αποστολή σε ισχύ tp_j . Για τη σύνδεση της ισχύος εκπομπής με το BER χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση για κάθε ζεύγος κόμβων:

$$r_i(tp_j) = a_i \cdot tp_j + b_i$$

Για τον υπολογισμό των a_i και b_i χρησιμοποιείται προσέγγιση ελαχίστων τετραγώνων από τα ζεύγη των τιμών (r_i, tp_j) , δηλαδή στη σχέση

$$\sum (r_i(tp_j) - r_i^j) = S^2$$

ελαχιστοποιείται το S^2 . Έτσι, οι τιμές των παραμέτρων a_i και b_i προκύπτουν ως εξής:

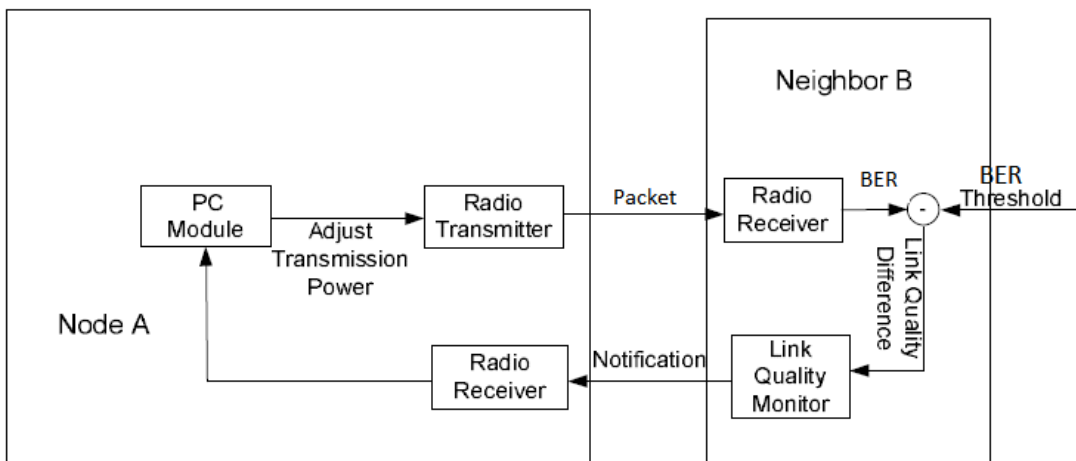
$$\begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} = \frac{1}{N \sum_{j=1}^N (tp_j)^2 - (\sum_{j=1}^N tp_j)^2} \times \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N r_i^j \sum_{j=1}^N (tp_j)^2 - \sum_{j=1}^N tp_j \sum_{j=1}^N tp_j \cdot r_i^j \\ N \sum_{j=1}^N tp_j \cdot r_i^j - \sum_{j=1}^N tp_j \sum_{j=1}^N r_i^j \end{bmatrix},$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι πρέπει να ισχύουν $a_i \leq 0$ (διαφορετικά υπονοείται ότι αυξανόμενη της ισχύος αυξάνεται το BER). Σε αντίθετη περίπτωση η διαδικασία αποστολής probe packets θα πρέπει να επαναληφθεί από την αρχή.

Το μοντέλο αυτό, αν και απλό, επιτρέπει τελικά στον κόμβο δεδομένης μιας επιθυμητής τιμής BER_{target} να απαντήσει στους γειτονικούς του κόμβους σχετικά με το ποια τιμή ισχύος θα πρέπει να χρησιμοποιούν για τη μετάδοση πακέτων με προορισμό τον ίδιο. Η επιθυμητή τιμή ισχύος εκπομπής μπορεί να υπολογισθεί πλέον ως εξής:

$$tp_j = \frac{BER_{target} - b_i}{a_i}$$

Η διαδικασία probing μπορεί να επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ή εφόσον το BER αρχίσει να ξεπερνά κάποια κρίσιμη τιμή.

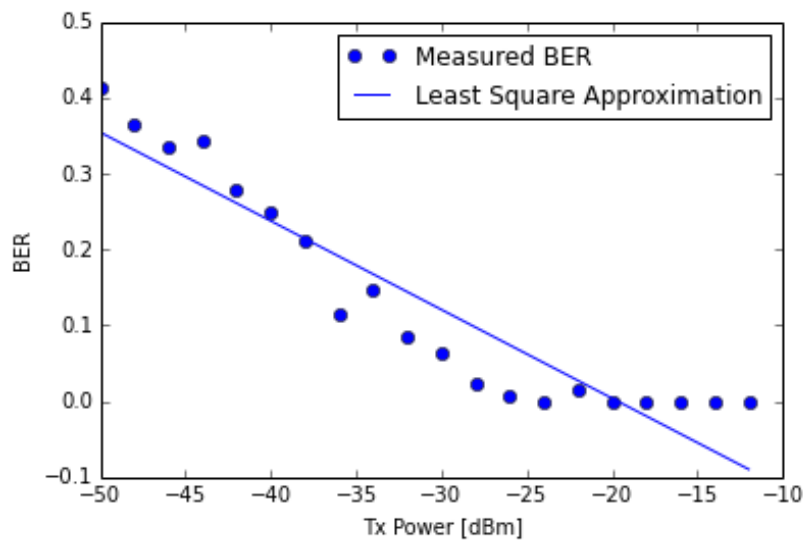


Σχήμα 5-18: Παρουσίαση της λειτουργίας του αλγορίθμου όταν διαπιστώνεται ότι χρειάζεται εκ νέου probing κάποιας ζεύξης, © S. Lin et al.

Έτσι, αν το BER είναι ικανοποιητικό σε χαμηλά επίπεδα ισχύος, δεν υπάρχει λόγος σπατάλης ενέργειας, ενώ αν ξεπερνά τα επιθυμητά όρια αυξάνεται η ισχύς εκπομπής.

Η επιλογή κατάλληλης τιμής BER_{target} μπορεί να γίνει με βάση εμπειρική παρατήρηση και είναι κρίσιμη για την σωστή λειτουργία του συστήματος. Επίσης, η επιλογή του εύρους $[BER_{min}, BER_{max}]$ εντός του οποίου θεωρείται ότι το σύστημα βρίσκεται σε μόνιμη κατάσταση (δε χρειάζεται να γίνει νέο probing) είναι σημαντικό, καθώς είναι αυτό που θα καθορίσει τη βέλτιστη συμπεριφορά του συστήματος. Έτσι, ένα μικρό εύρος μπορεί να οδηγήσει το σύστημα σε ταλαντώσεις, ενώ ένα μεγάλο εύρος θα εμποδίσει την αποδοτική λειτουργία του σχήματος ελέγχου ισχύος.

Ακολουθεί σχηματικό παράδειγμα από τη χρήση του ελέγχου ισχύος για ένα ζεύγος κόμβων:



Σχήμα 5-19: Παράδειγμα εφαρμογής του σχήματος ελέγχου ισχύος σε ζεύξη.
 $a_i = -0.0116886454439$ $b_i = -0.230023789946$

Έτσι, στο παράδειγμα αυτό για την επίτευξη $BER = 6 \times 10^{-4}$ απαιτείται μετάδοση με στάθμη ισχύος -19.73 dBm.

Σε επίπεδο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε $BER_{target} = 6 \times 10^{-4}$ και probing packets με ισχείς εκπομπής

$$-\frac{7}{2} * dynamic\ range + output\ power + 2 * i$$

όπου $dynamic\ range = 10$ dB, $output\ power = [-50, -10]$ dBm και $i = [0, 20]$. Μετά τη σύγκλιση του αλγορίθμου και για την επίτευξη του συγκεκριμένου BER_{target} , οι ισχείς εκπομπής ήταν

$$node\ power = [output\ power - \frac{dynamic\ range}{2}, output\ power + \frac{dynamic\ range}{2}]$$

Με εφαρμογή του Power Control έτρεξαν σενάρια για συστήματα με:

- διαμόρφωση: BPAM-DS
- χωρική πυκνότητα UWB Tx κόμβων: $\lambda_1 = 0.018$ κόμβους/ m^2 , $\lambda_2 = 0.04$ κόμβους/ m^2 , $\lambda_3 = 0.067$ κόμβους/ m^2
- κανάλι το ίδιο με των προηγούμενων σεναρίων χωρίς έλεγχο ισχύος

- ταχύτητα μετάδοσης: 10 Mbps
- μέγεθος πακέτου: 256 bits (32 bytes)
- εκπέμπουν με ισχείς (EIRP) (κεντρικές τιμές για το PC): -50, -40, -30, -20, -10 dBm
- διαθέτουν κτενοειδείς επιλεκτικούς δέκτες (Selective Rake) με 10 συσχετιστές-προσαρμοσμένα φίλτρα (fingers – matched filters)
- υπάρχει τέλειος συγχρονισμός μεταξύ πομπού και δέκτη
- οι κόμβοι βρίσκονται στο ίδιο ύψος και χρησιμοποιούν ομοιοκατευθυντικές κεραίες κέρδους 0 dB

5.4 Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- [1] D. P. Kroese, Z. I. Botev, Spatial Process Generation
- [2] R. Y. Rubinstein, D. P. Kroese, Simulation and the Monte Carlo Method 2nd edition, John Wiley & Sons, New Jersey, 2008
- [3] Z. Pawlas, Spatial modelling and spatial statistics, Course Notes, Autumn 2008
- [4] M. Haenggi, Stochastic Geometry for Wireless Networks, Cambridge University Press, 2013
- [5] H. ElSawy, E. Hossain, M. Haenggi, "Stochastic Geometry for Modeling, Analysis, and Design of Multi-Tier and Cognitive Cellular Wireless Networks: A Survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* , vol.15, no.3, pp.996,1019, Third Quarter 2013
- [6] M. G. Di Benedetto, G. Giancola, Understanding Ultra Wide Band Radio Fundamentals, Prentice Hall, 2004
- [7] S. S. Ghassemzadeh, V. Tarokh, "UWB Path Loss Characterization In Residential Environments", IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, June 2003
- [8] T. Bonald, M. Feuillet, Network Performance Analysis, Wiley-ISTE, 2011
- [9] S. Halford, K. Halford, and M. Webster, "Evaluating the Performance of HRb Proposals in the Presence of Multipath", Intersil Corporation, 2000
- [10] C. Naftali, "Tentative Criteria for Comparison of Modulation Methods", doc.: IEEE 802.11-97/96, Sept. 1997
- [11] C. Naftali, "Tentative Criteria for Comparison of Modulation Methods", doc.: IEEE 802.11-97/96, Sept. 1997
- [12] R. szummy, S. Kozlowski, K. Kurek, "Characterization and modelling of radio channel [D3], RESOLUTION Project IST-026581, Warsaw University of Technology, 2006
- [13] F. P. Fontan, P. M. Espineira, Modeling the Wireless Propagation Channel A Simulation Approach with MATLAB, John Wiley & Sons, 2008

- [14] W. Y. Chen, Home Networking Basics: Transmission Environments and Wired/Wireless Protocols, Prentice Hall, 2003
- [15] G. L. Stueber, Principles of Mobile Communications, Springer Science & Business Media, 2001
- [16] A. Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005
- [17] S. Lin, J. Zhang, G. Zhou, L. Gu, T. He, J. A. Stankovic, "ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks", in Proceedings of the Fourth International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), 2006

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα προσομοίωσης

6.1 Εισαγωγή

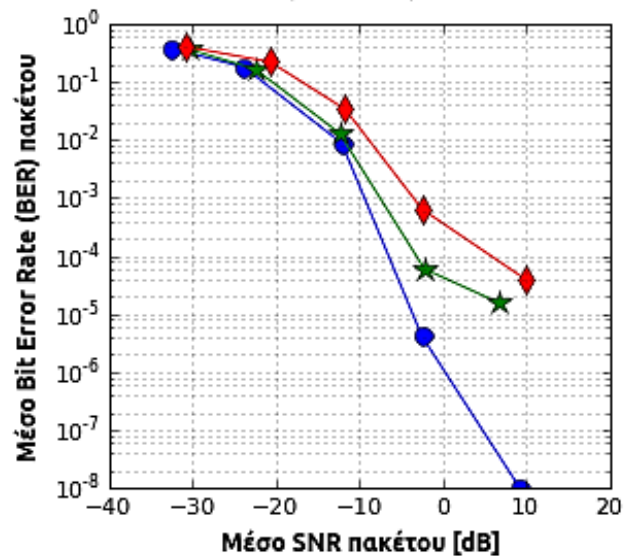
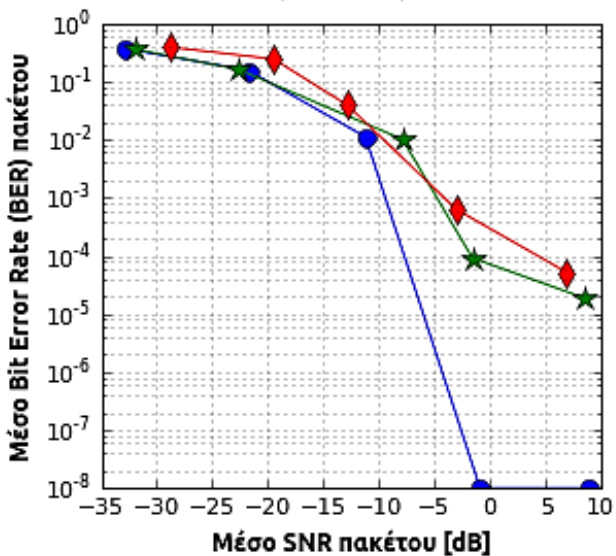
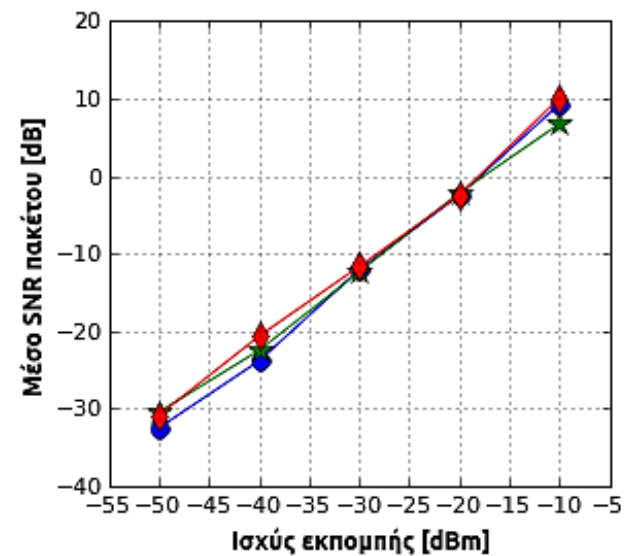
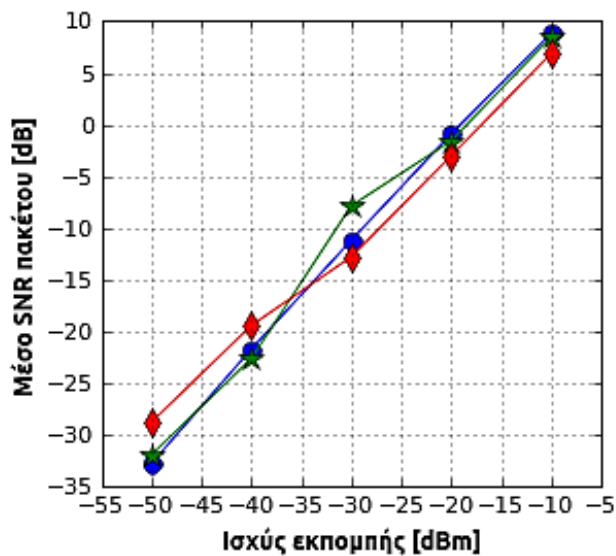
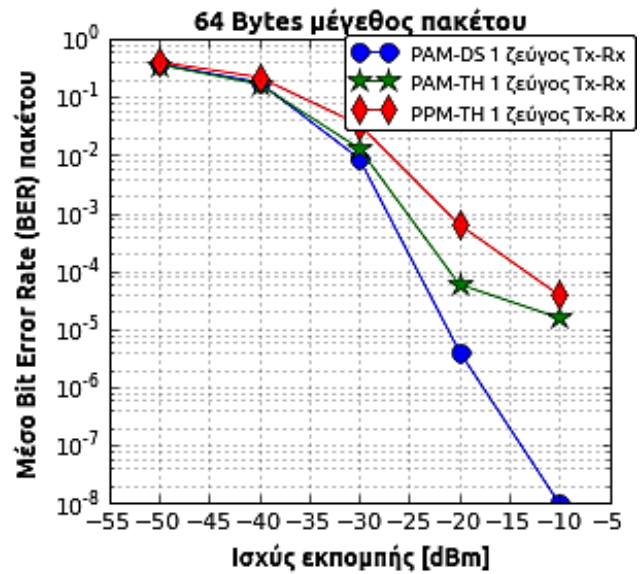
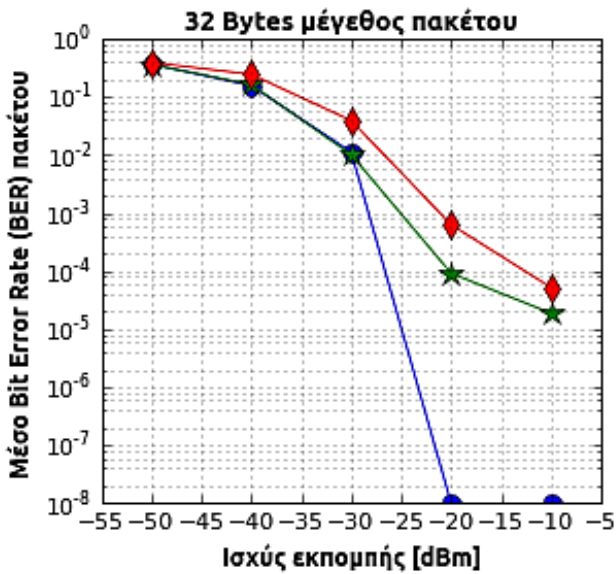
Ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων επίδοσης συστημάτων παλμικού UWB, όπως αυτά εξήχθησαν από τον προσομοιωτή που κατασκευάστηκε, για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Στόχος είναι να διερευνηθεί κατά πόσο το παλμικό UWB κρίνεται κατάλληλο ως φυσικό στρώμα (PHY) για εφαρμογές M2M σε εσωτερικά περιβάλλοντα (indoor) με υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ($\geq 10\text{Mbps}$).

Η διάρθρωση των αποτελεσμάτων έχει ως εξής:

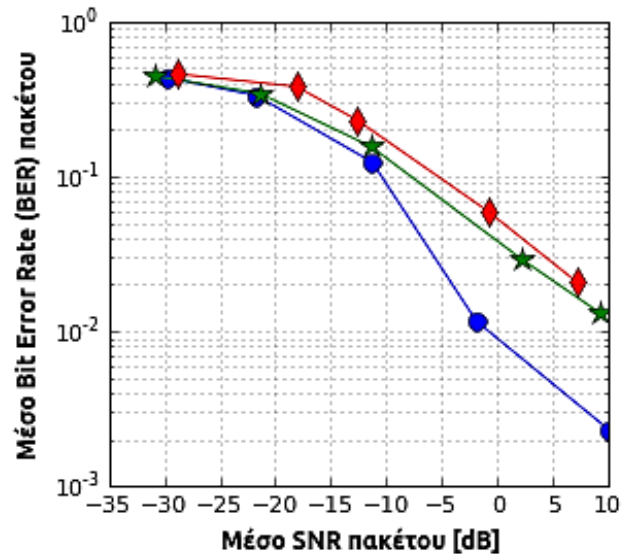
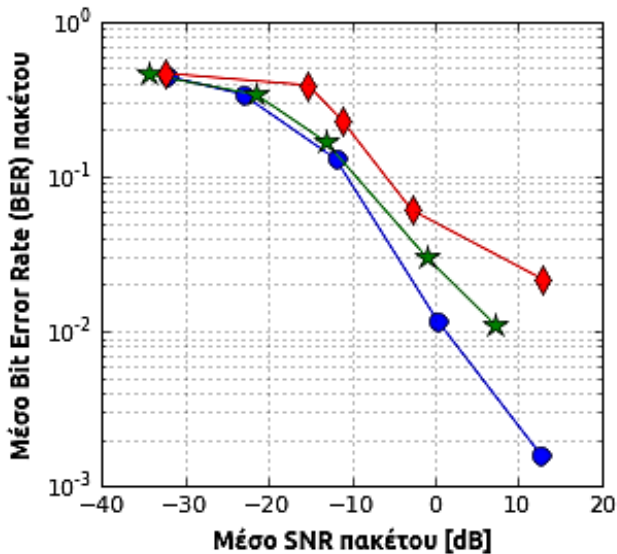
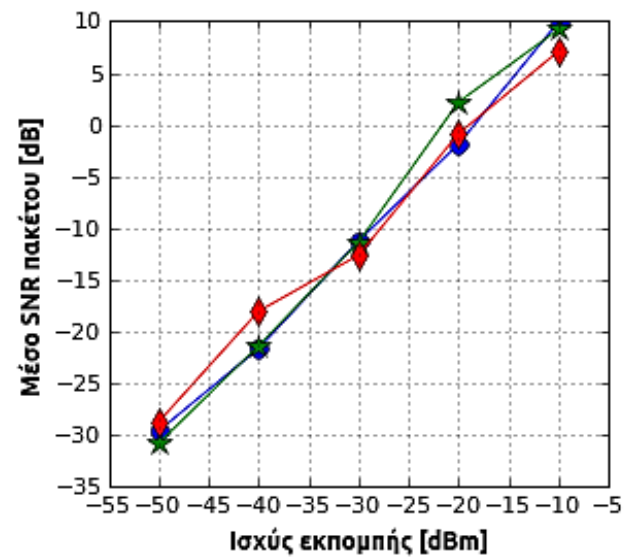
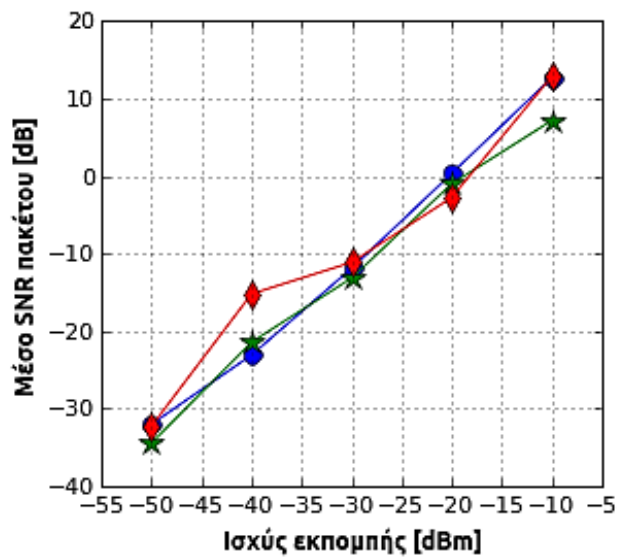
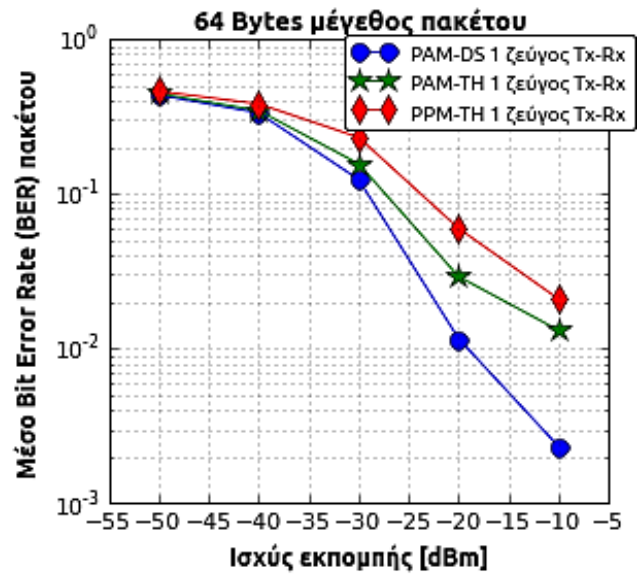
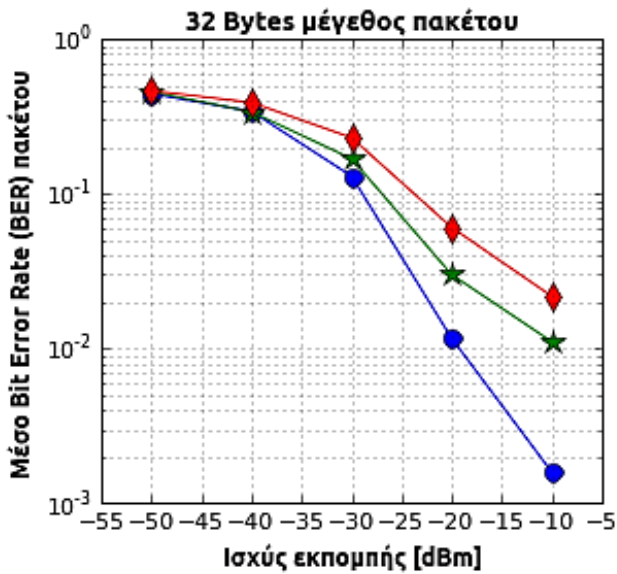
- *Σενάρια χωρίς παρεμβολές:* αρχικά μελετώνται σενάρια όπου στο παράθυρο παρατήρησης (όπως αυτό ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο) τοποθετείται ένα μόνο ζεύγος πομπού-δέκτη (Tx-Rx) UWB. Μελετάται στην περίπτωση αυτή η επίδοση των συστημάτων χωρίς παρεμβολές για διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης (2PPM-TH, BPAM-TH, BPAM-DS), ρυθμού μετάδοσης (10, 50, 100 Mbps), μήκη πακέτων (32 bytes, 64 bytes) και εκπεμπόμενης ισχύος (-50, ..., -10 dBm). Η επίδοση αυτή θα αποτελέσει τη βάση σύγκρισης με σενάρια στα οποία οι ζεύξεις υφίστανται παρεμβολές (MUI ή/και NBI).
- *Σενάρια με παρεμβολές MUI:* ακολούθως, μελετώνται σενάρια στα οποία τοποθετούνται σύμφωνα με στοχαστική γεωμετρία (βλ. προηγούμενο κεφάλαιο) περισσότερα του ενός ζεύγη πομπού-δέκτη UWB. Έτσι, μελετάται η επίδοση των συστημάτων για την περίπτωση παρεμβολής πολλαπλής πρόσβασης (MUI), για τρεις διαφορετικές εντάσεις λ της ομογενούς σημειακής ανέλιξης Poisson (PPP), διαφορετικά σχήματα διαμόρφωσης (2PPM-TH, BPAM-TH, BPAM-DS), ρυθμού μετάδοσης (10, 50, 100 Mbps), μήκη πακέτων (32 bytes, 64 bytes) και εκπεμπόμενης ισχύος (-50, ..., -10 dBm). Τα αποτελέσματα θα συγκριθούν με τα σενάρια χωρίς παρεμβολή προκειμένου να ερμηνευθεί κατά πόσο πρόκειται όντως για interference-limited συστήματα και υπό ποιες ακριβώς παραμέτρους λειτουργίας επιτυγχάνεται ικανοποιητική επίδοση.
- *Σενάρια με παρεμβολές MUI και NBI:* αποτελεί επέκταση των προηγούμενων σεναρίων με MUI στα οποία προστίθενται (πάλι σύμφωνα με στοχαστική γεωμετρία) πομποί στενής ζώνης (NB) BPSK 54 Mbps στα 2.4 GHz. Επιχειρείται έτσι να διαπιστωθεί η έκταση του προβλήματος που προκαλεί η παρεμβολή στενής ζώνης (NBI) στις ζεύξεις UWB. Μελετώνται περιπτώσεις για διαφορετικές εντάσεις λ των PPP τόσο των κόμβων UWB όσο και των NB, ενώ οι ζεύξεις UWB χρησιμοποιούν σχήμα διαμόρφωσης BPAM-DS, ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps, μήκος πακέτων 32 bytes και ισχείς εκπομπής (-50, ..., -10 dBm).
- *Σενάρια με παρεμβολές MUI και έλεγχο ισχύος:* προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχήματος ελέγχου ισχύος (Power Control – PC), προσομοιώνονται σενάρια με παρεμβολές MUI για τρεις διαφορετικές εντάσεις λ της PPP σχήμα διαμόρφωσης BPAM-DS, ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps, μήκος πακέτων 32 bytes και κεντρική ισχύ εκπομπής (-50, ..., -10 dBm), δίνοντας στο PC τη δυνατότητα μεταβολής της έως ± 5 dBm γύρω από τις τιμές αυτές.

6.2 Σενάρια χωρίς παρεμβολές

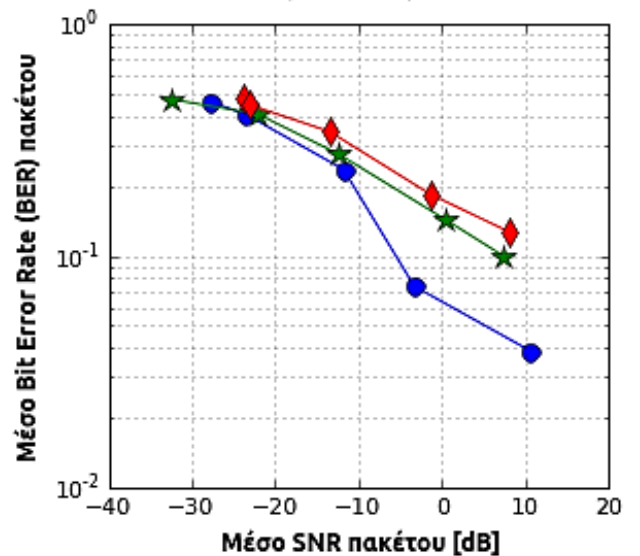
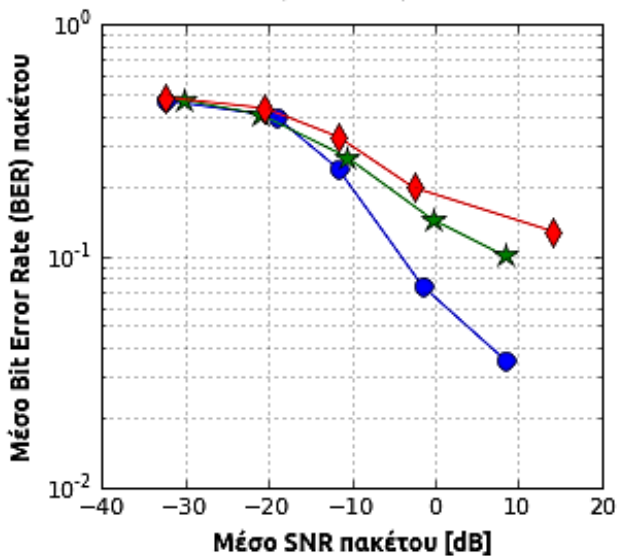
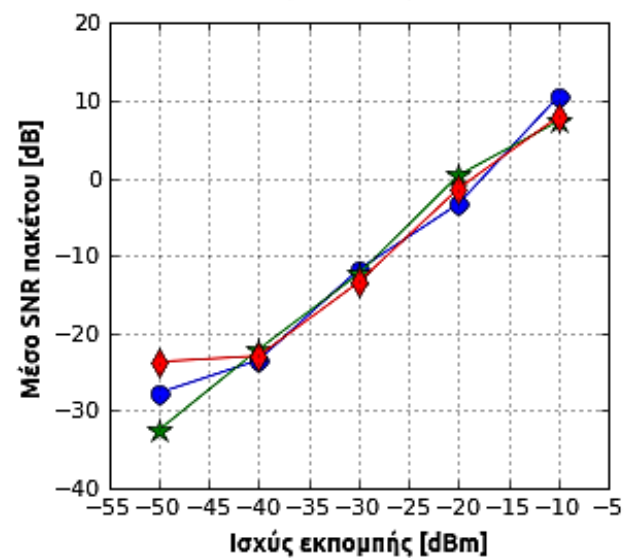
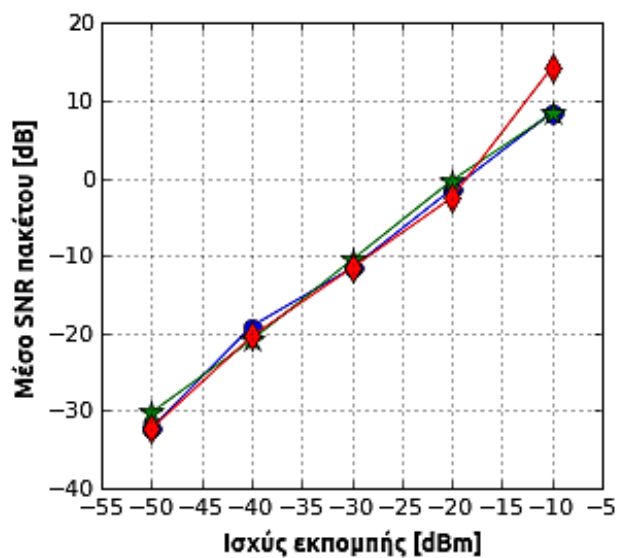
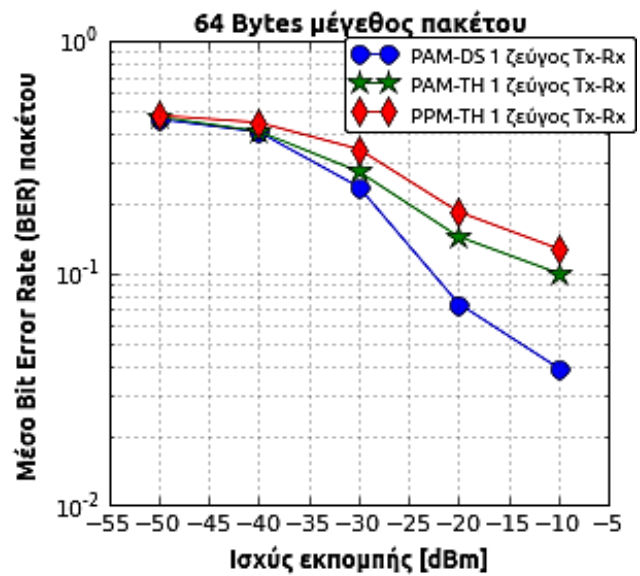
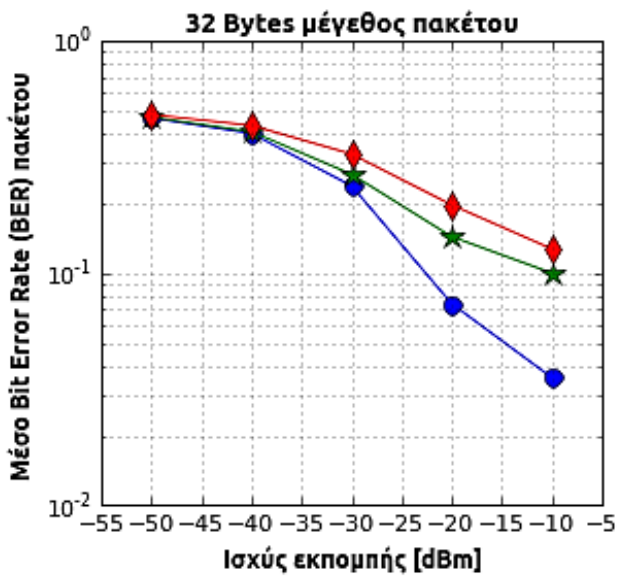
Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps χωρίς παρεμβολές



Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 50 Mbps χωρίς παρεμβολές

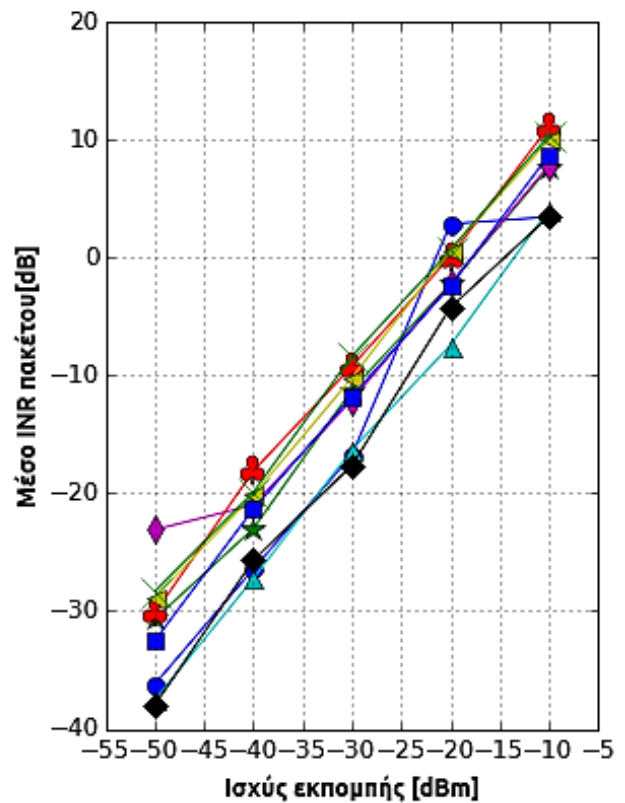
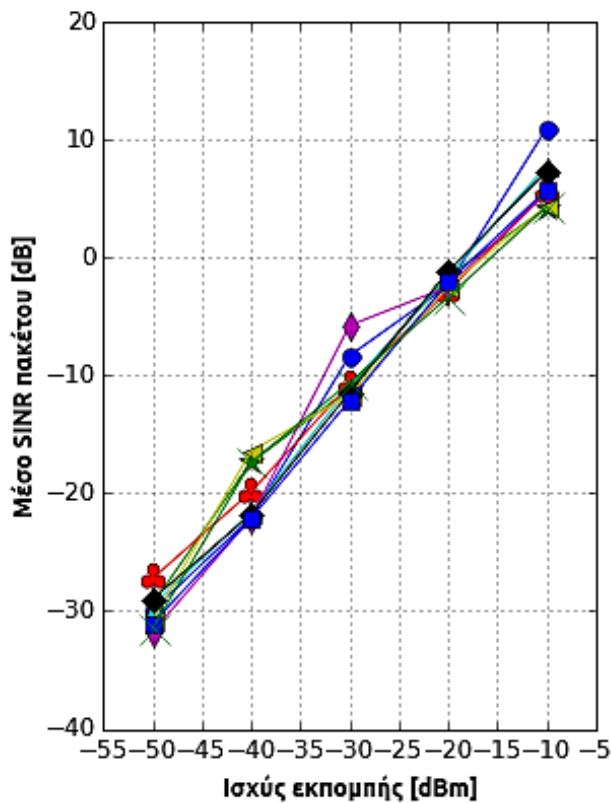
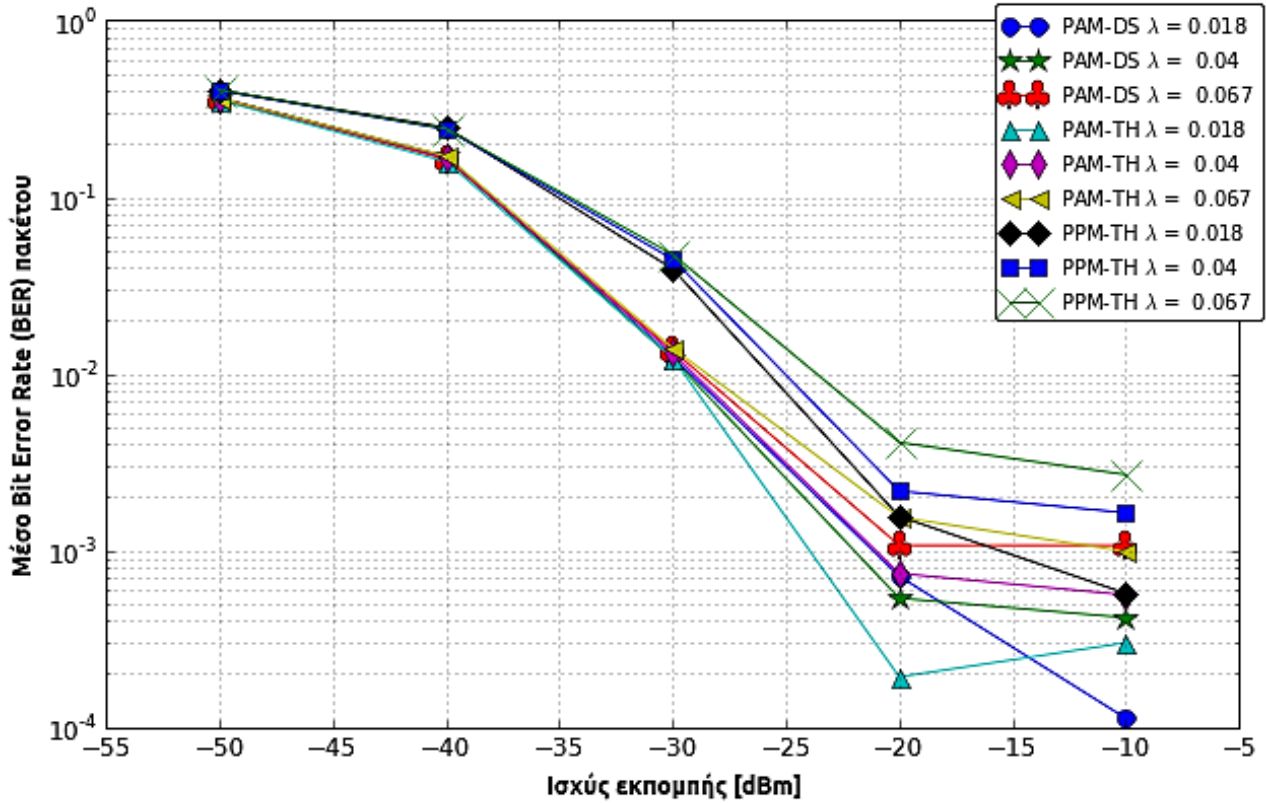


Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 100 Mbps χωρίς παρεμβολές

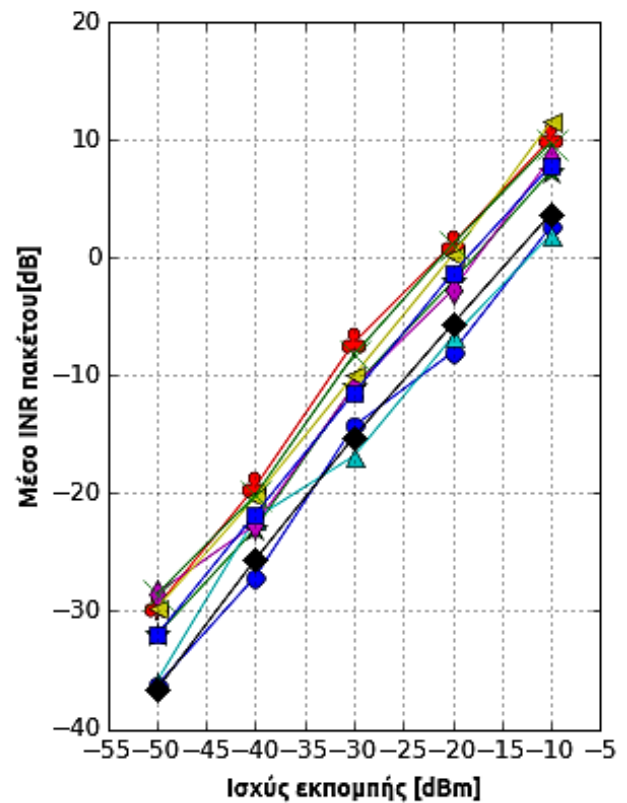
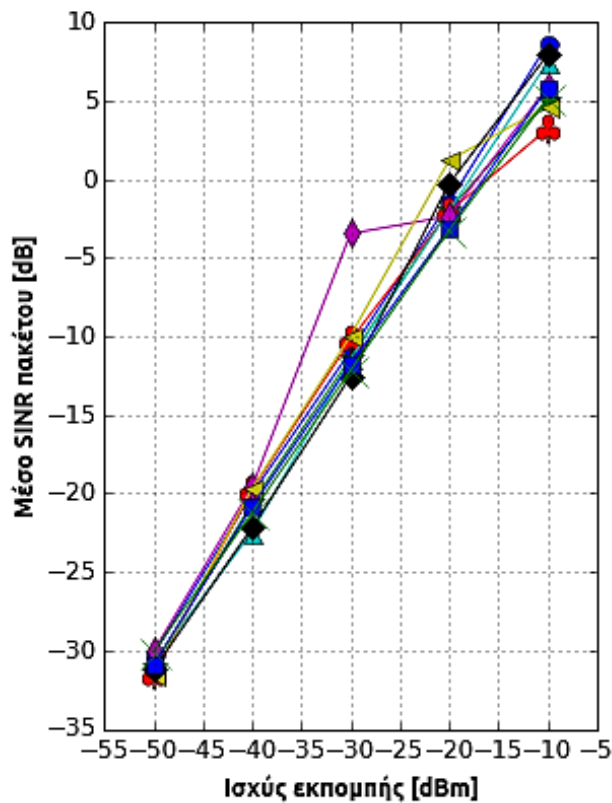
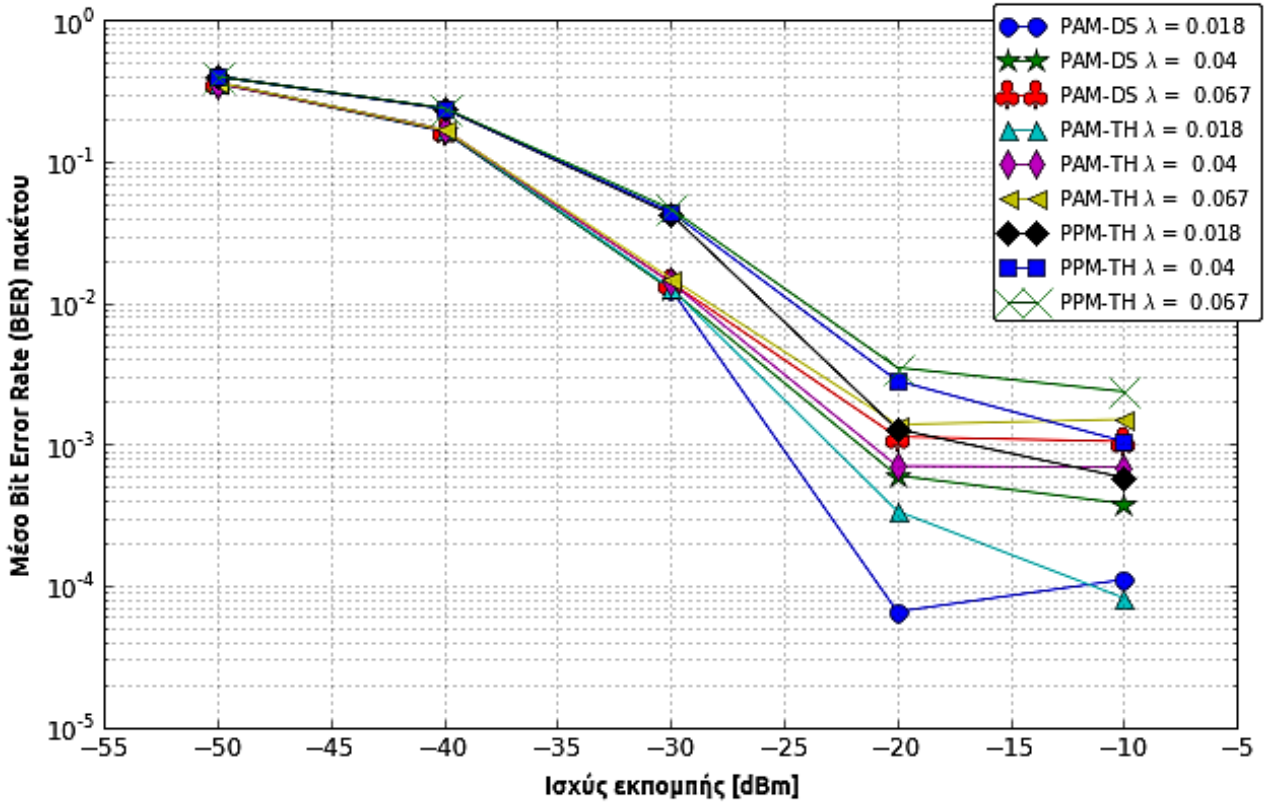


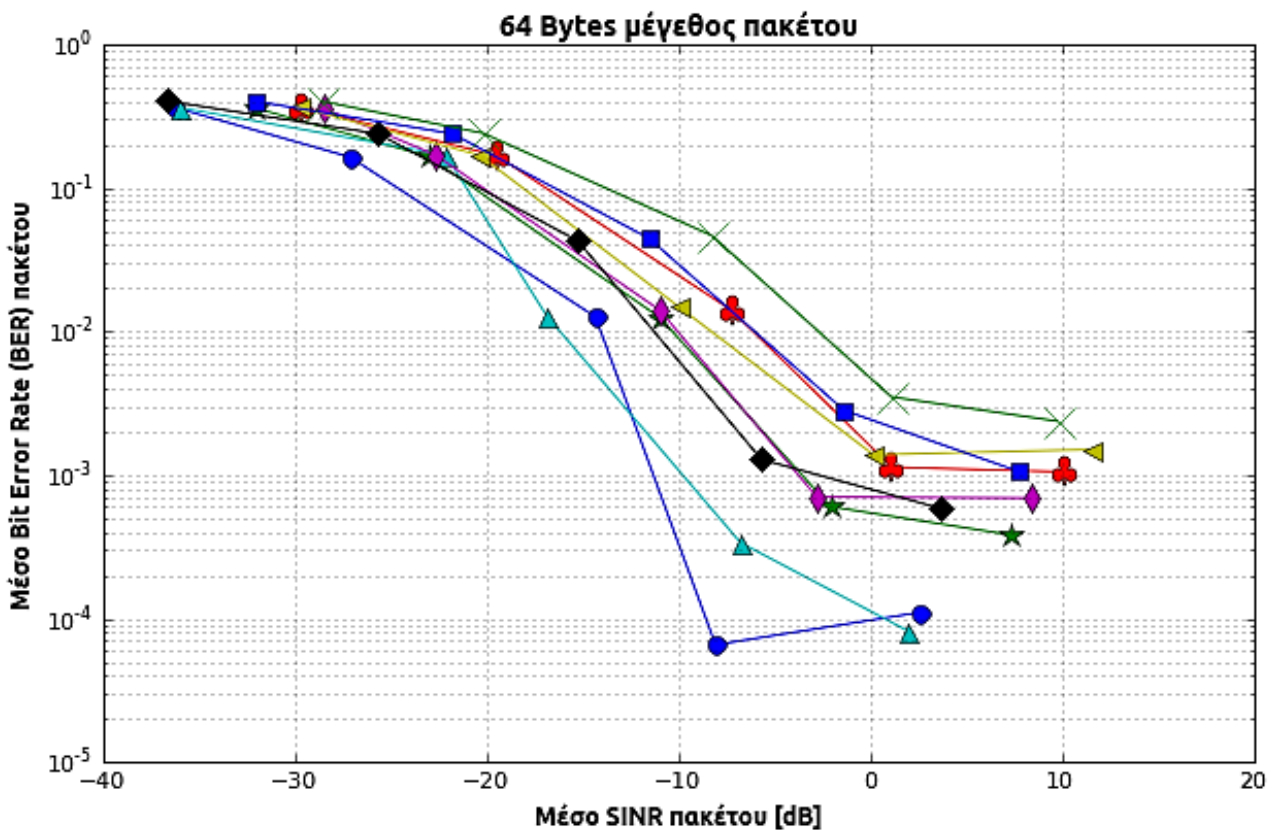
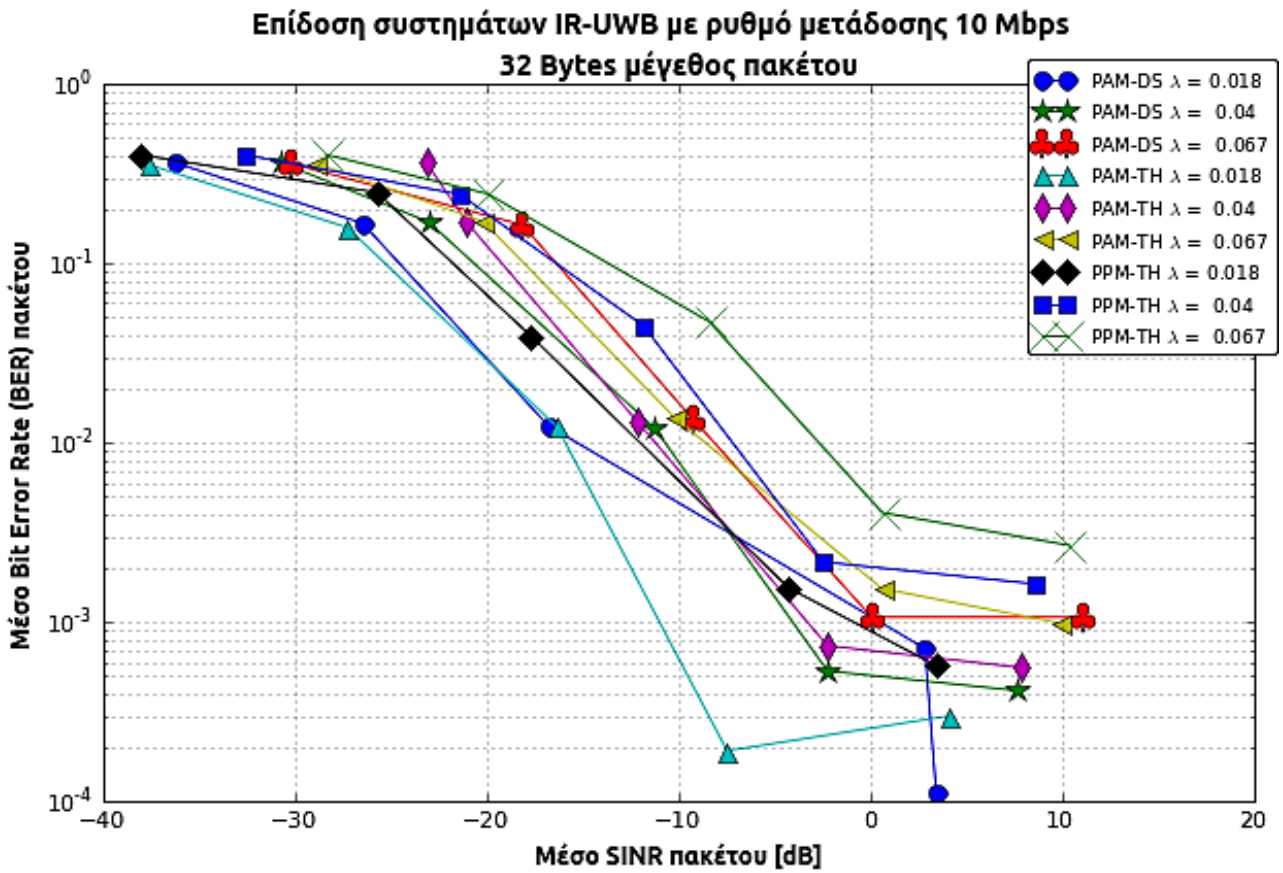
6.3 Σενάρια με παρεμβολές MUI

Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps
μέγεθος πακέτου 32 bytes και MUI

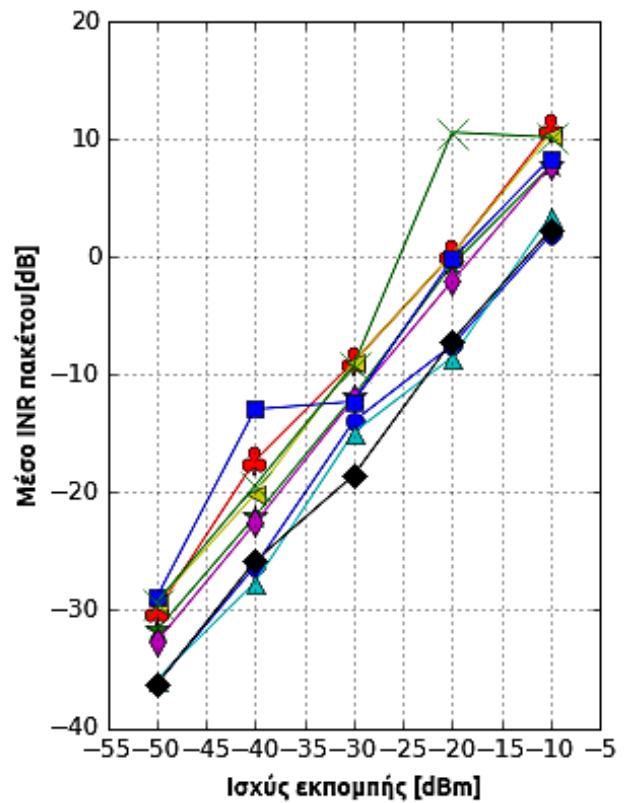
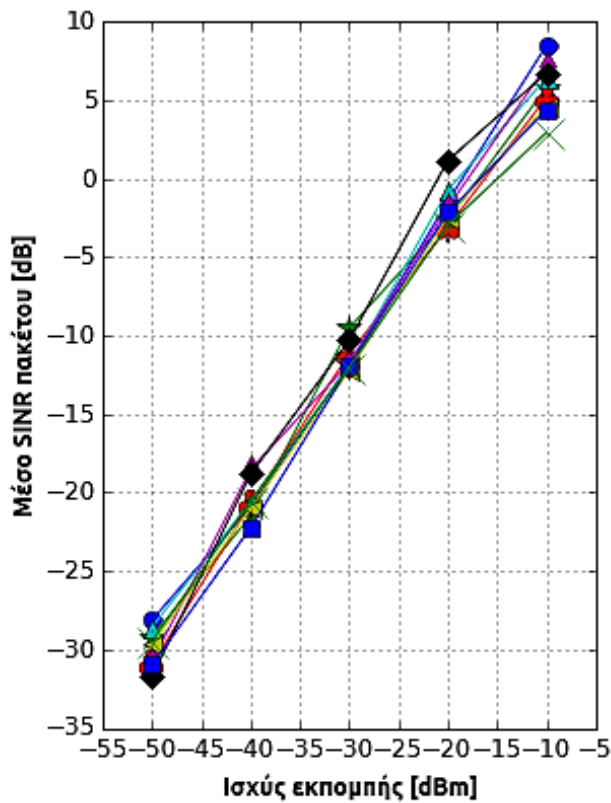
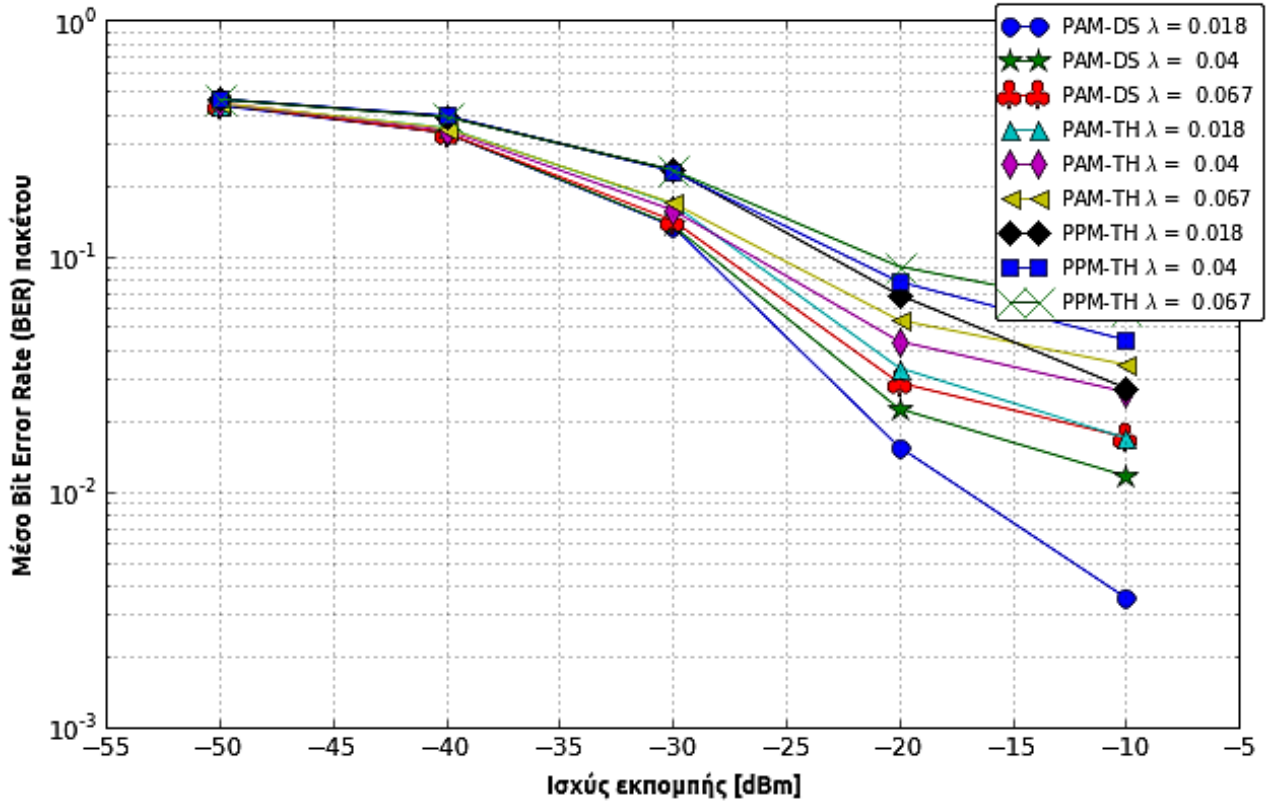


Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps
μέγεθος πακέτου 64 bytes και MUI

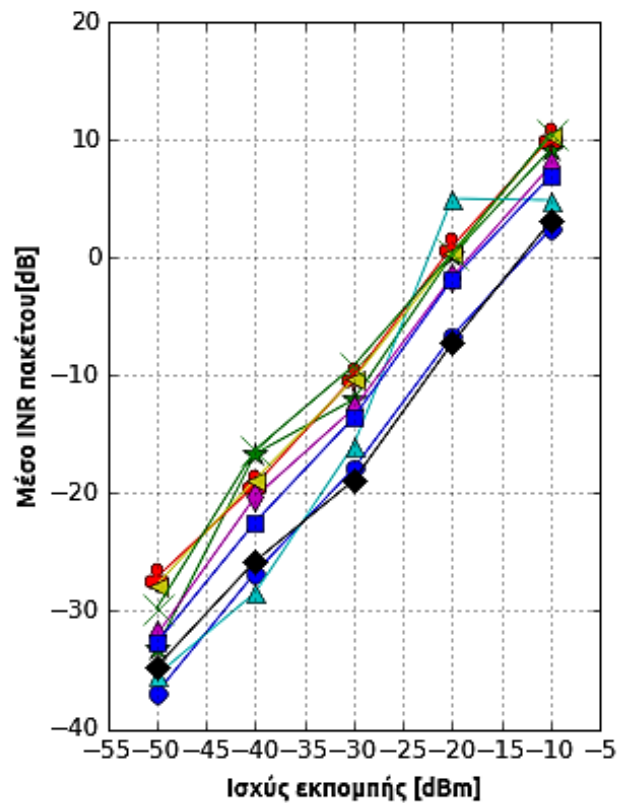
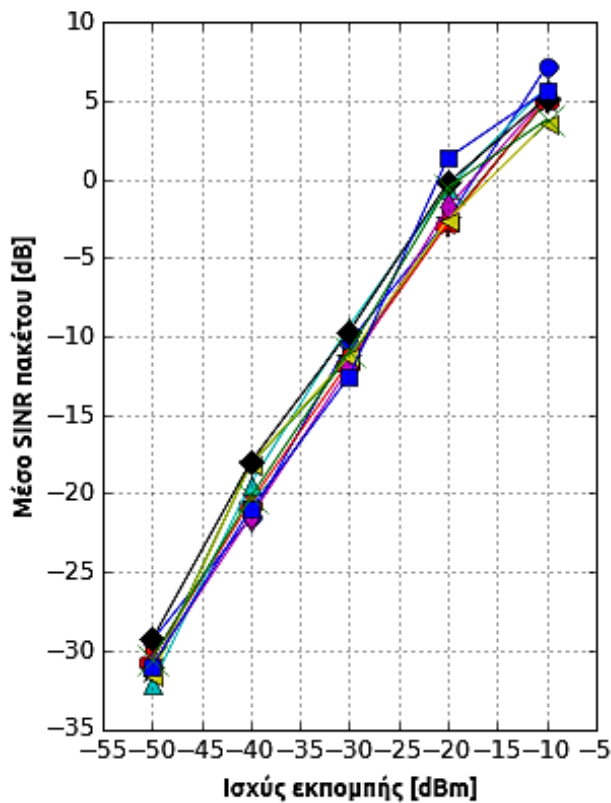
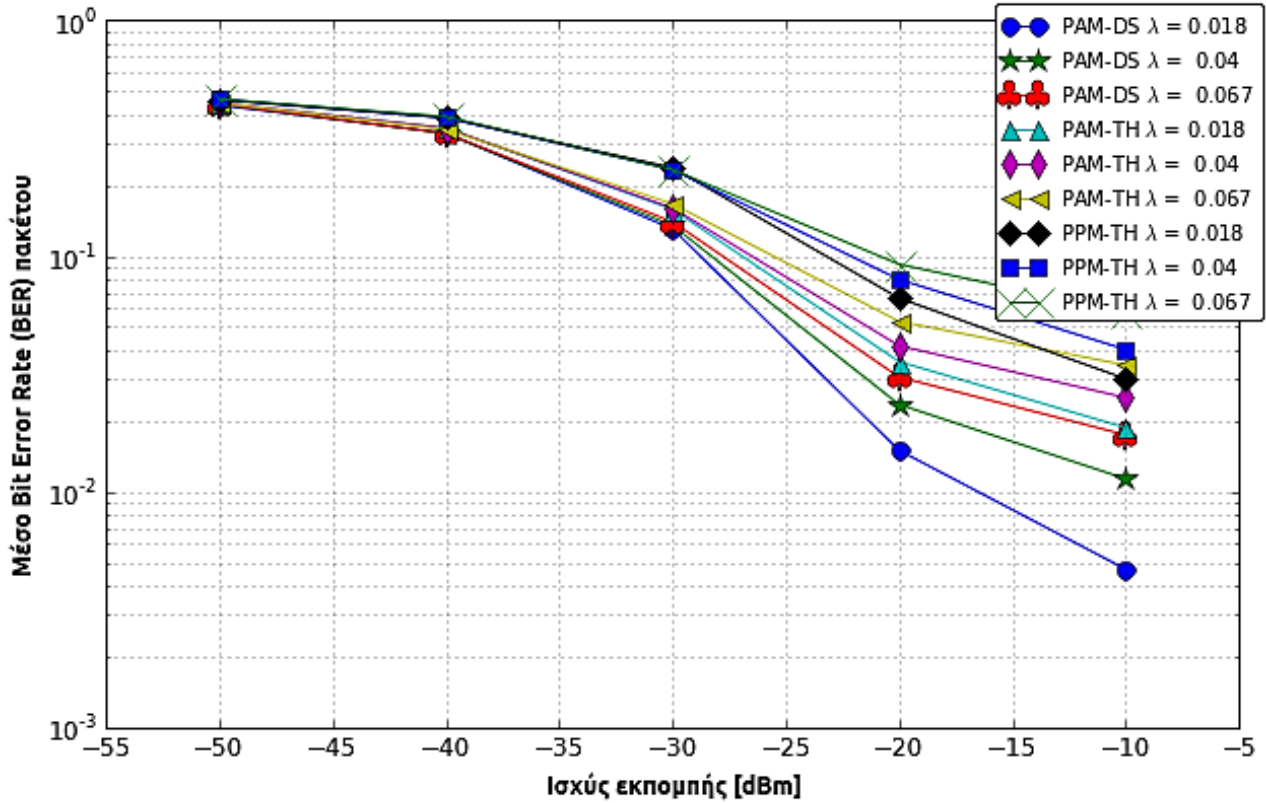




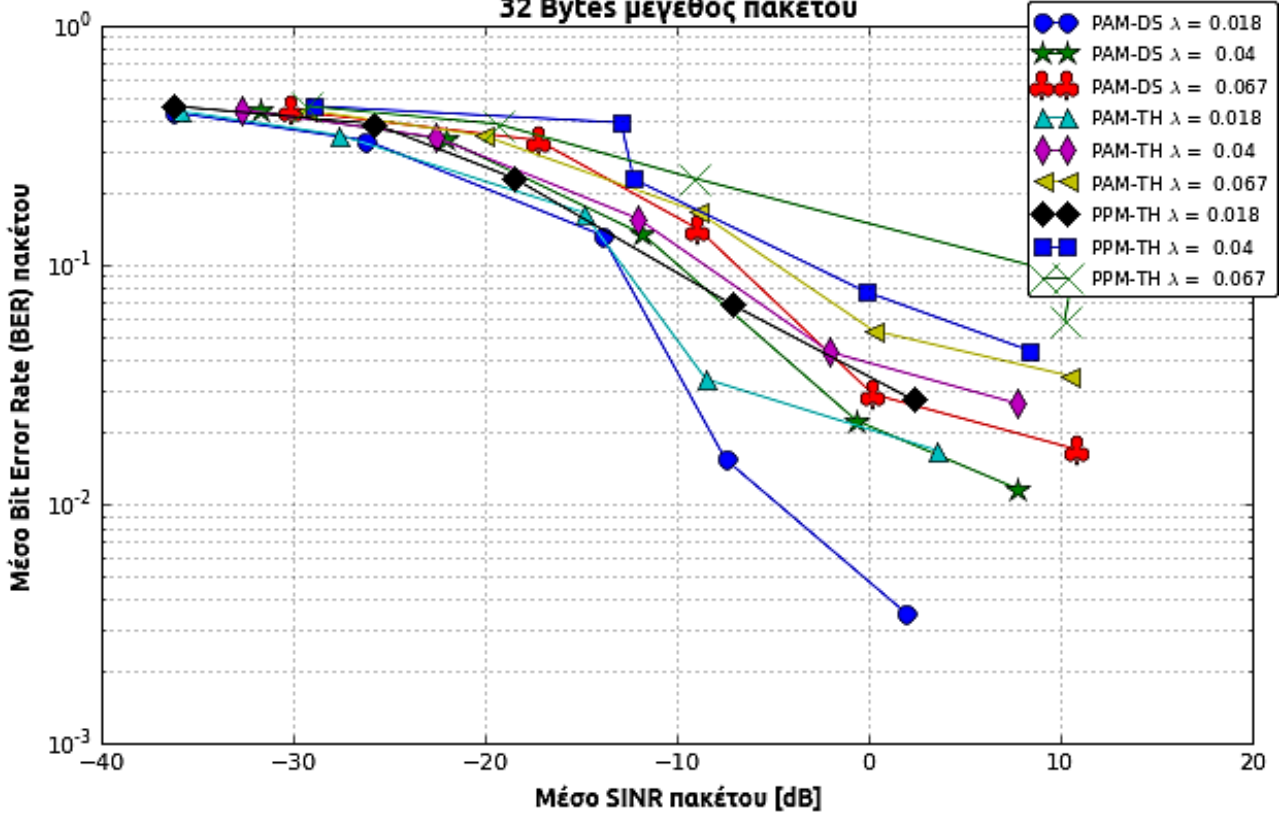
Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 50 Mbps
μέγεθος πακέτου 32 bytes και MUI



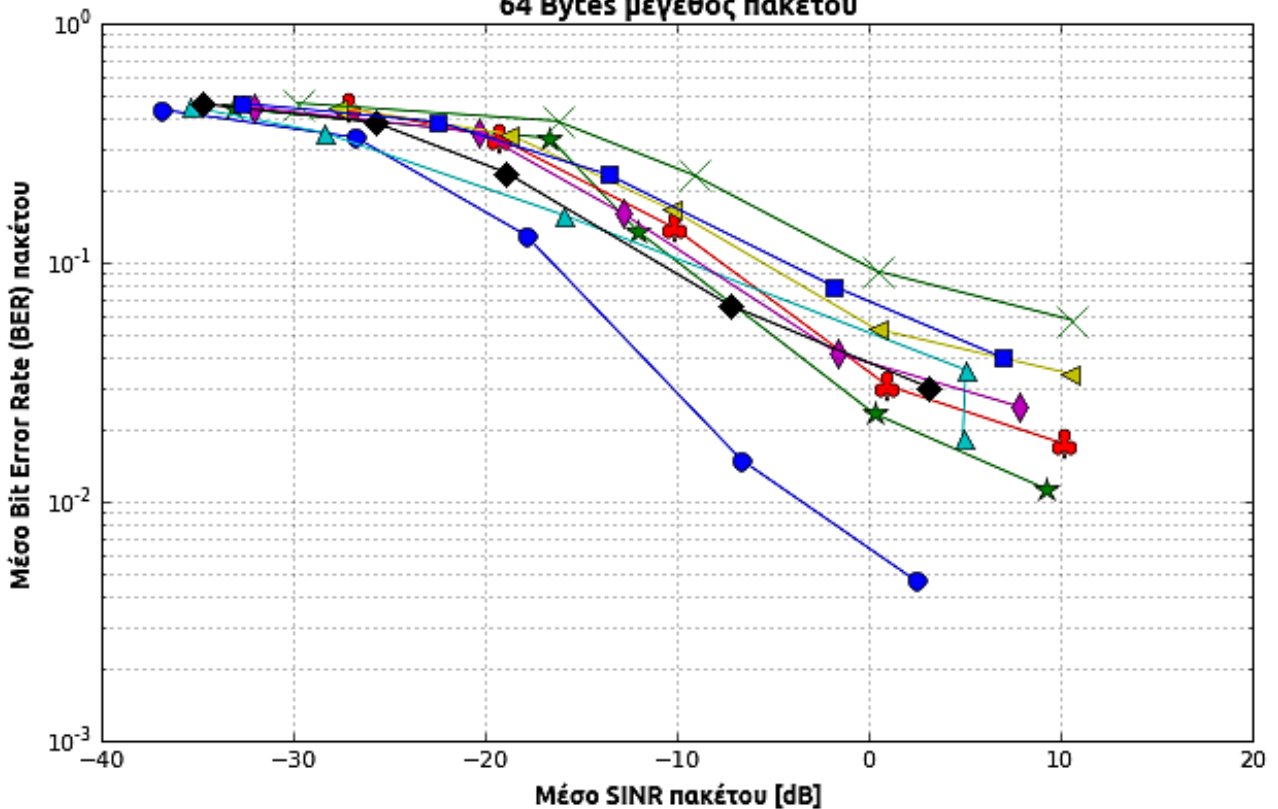
Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 50 Mbps
μέγεθος πακέτου 64 bytes και MUI



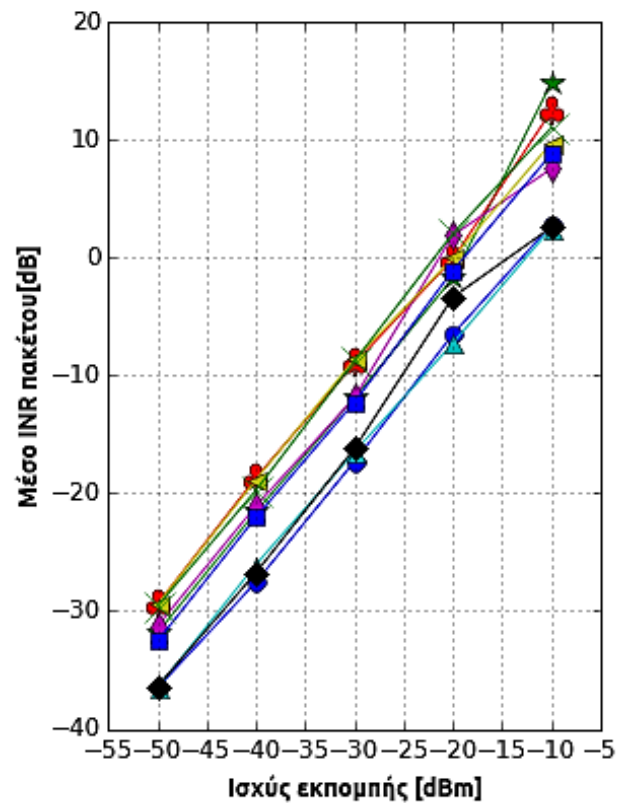
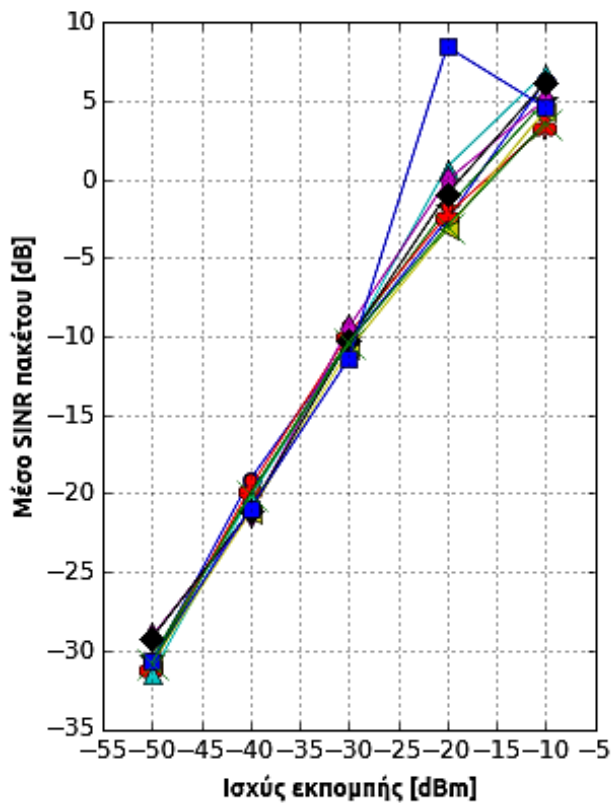
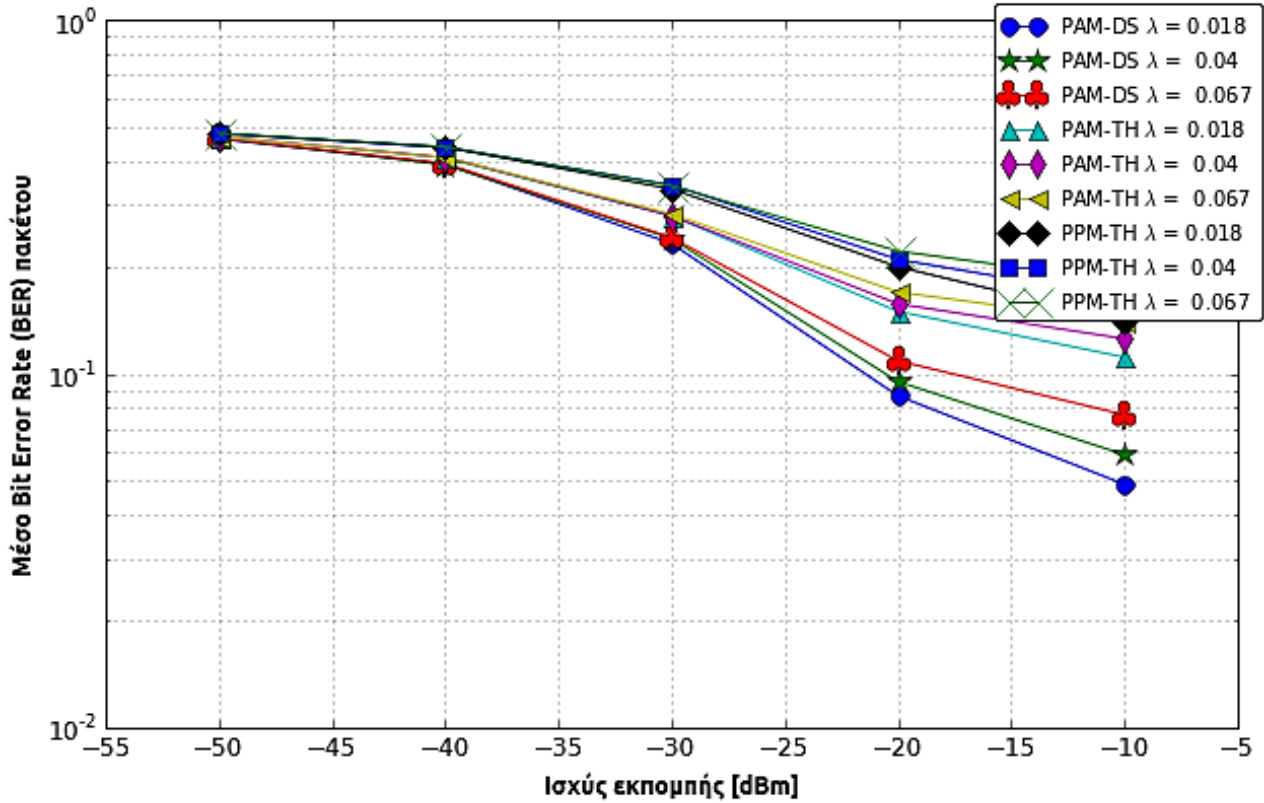
Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 50 Mbps
32 Bytes μέγεθος πακέτου



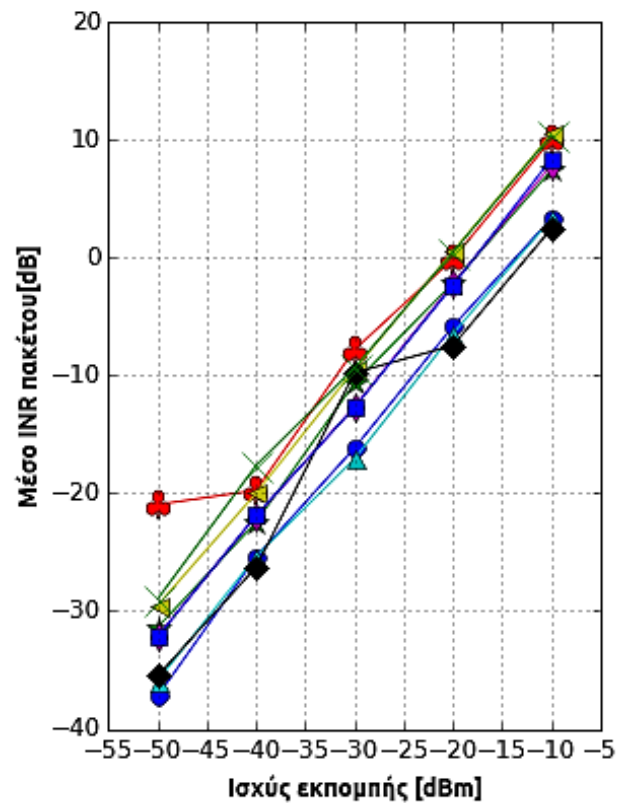
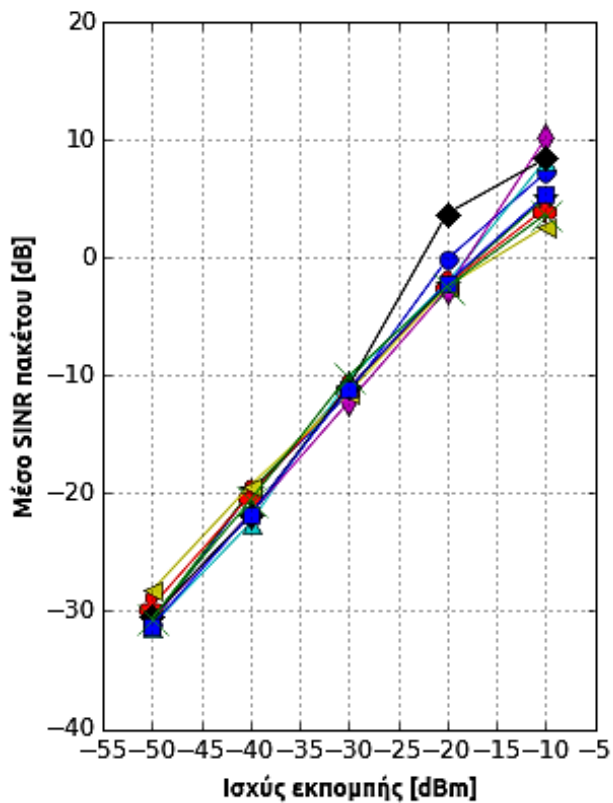
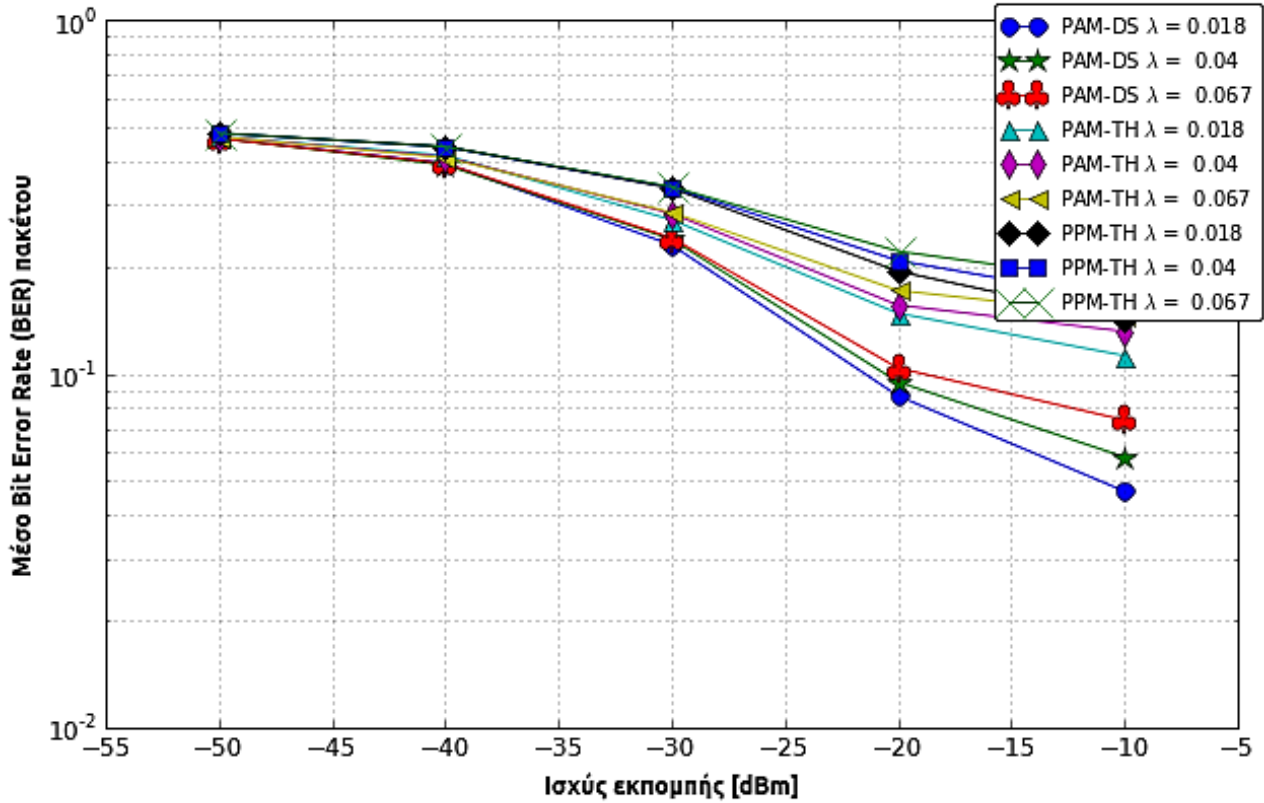
64 Bytes μέγεθος πακέτου

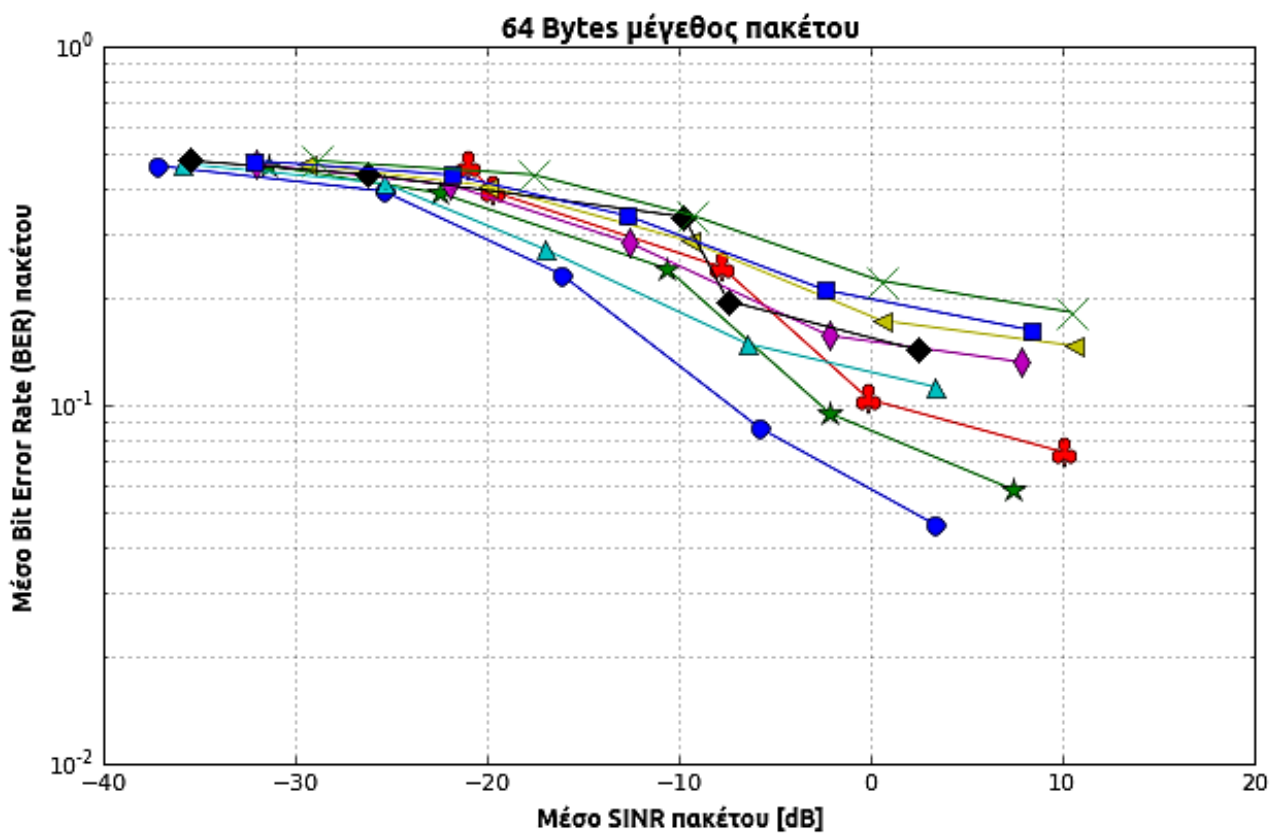
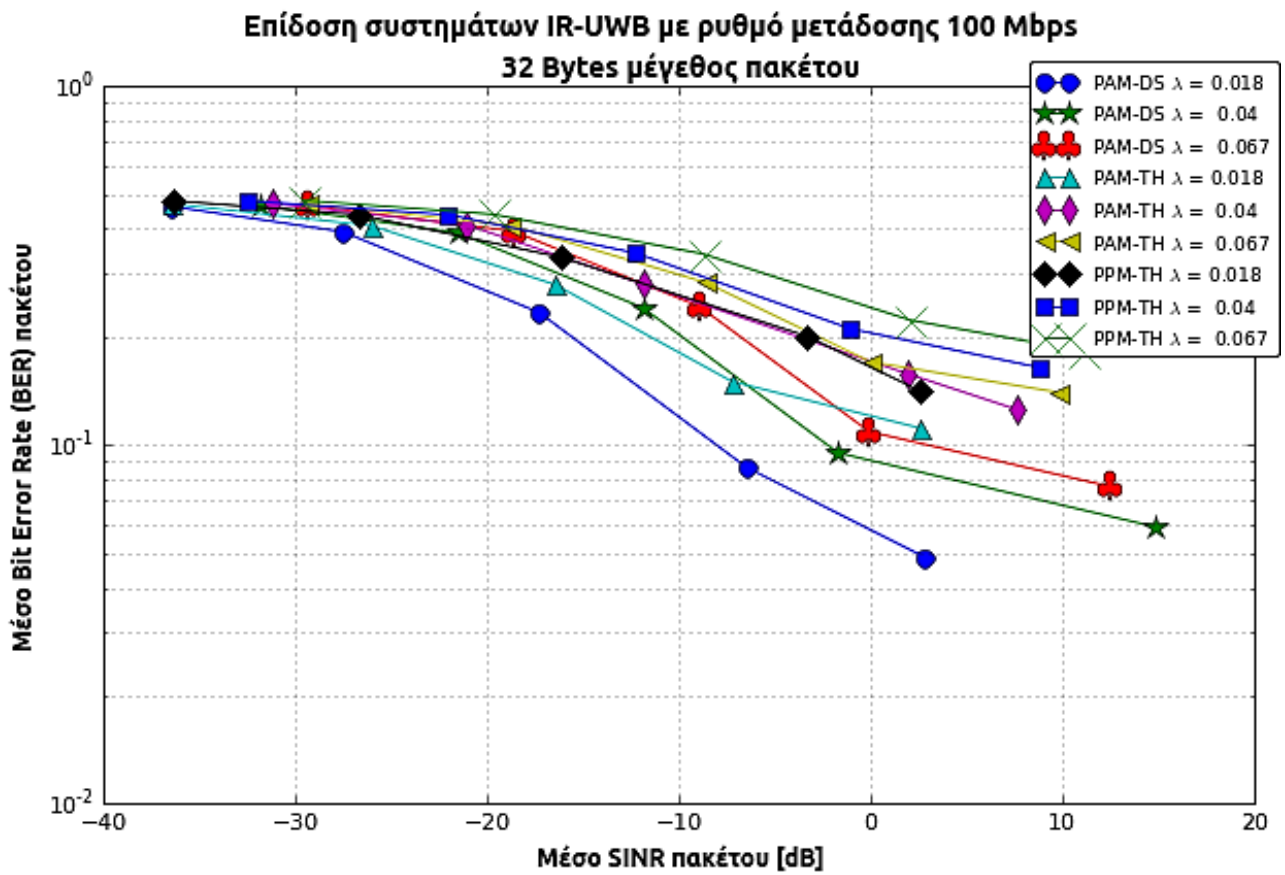


Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 100 Mbps
μέγεθος πακέτου 32 bytes και MUI

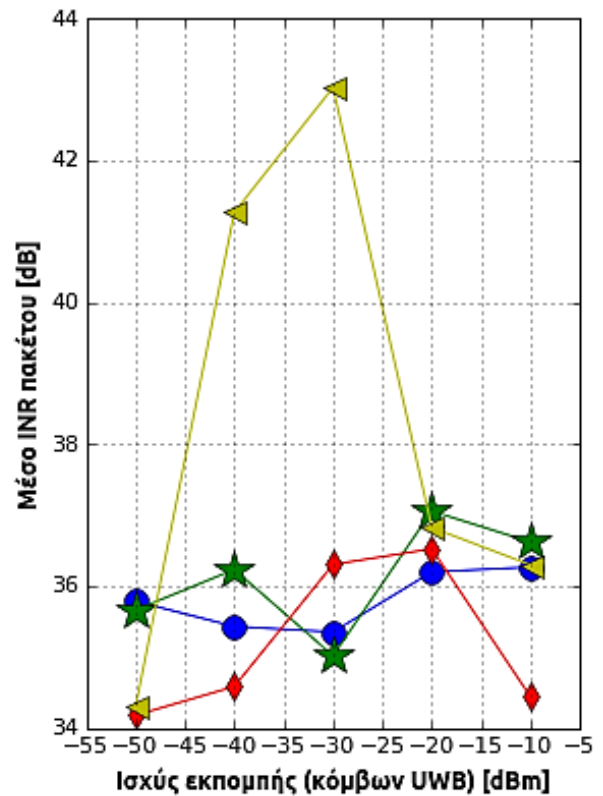
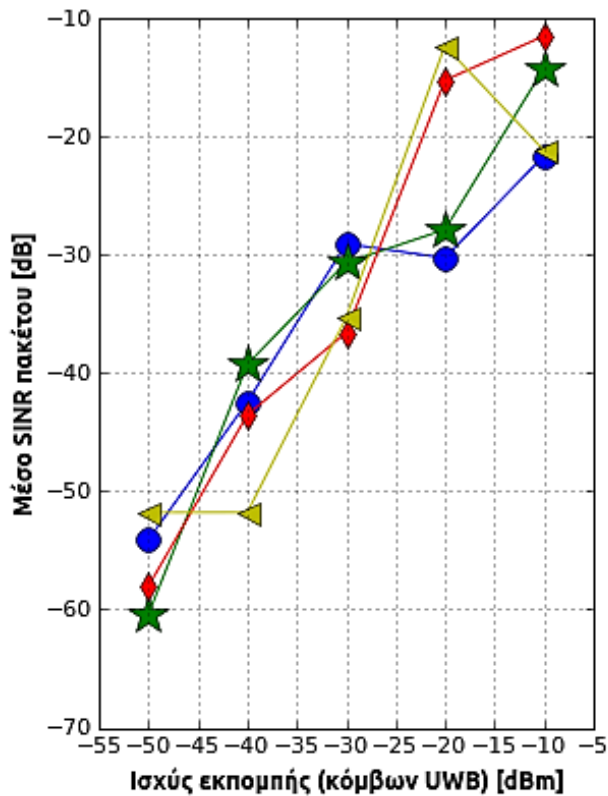
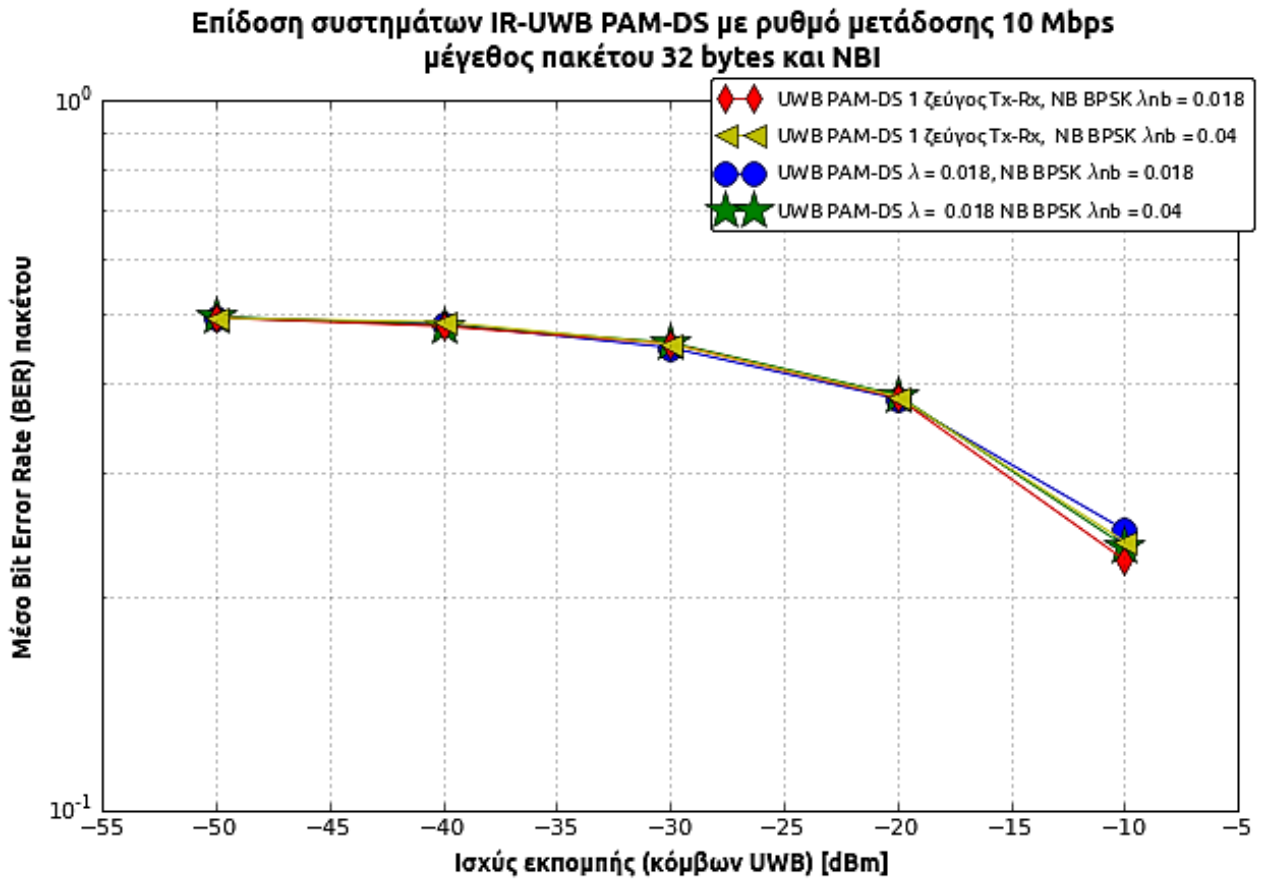


Επίδοση συστημάτων IR-UWB με ρυθμό μετάδοσης 100 Mbps
μέγεθος πακέτου 64 bytes και MUI



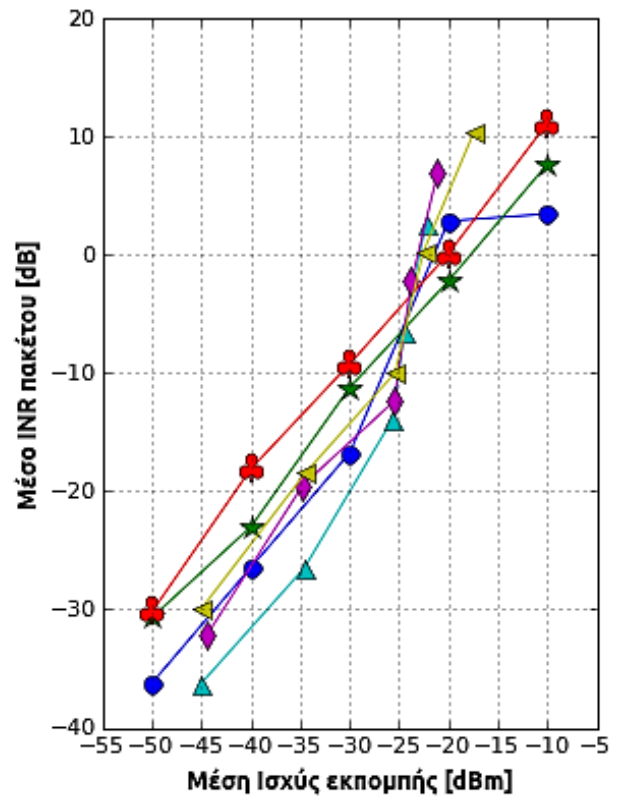
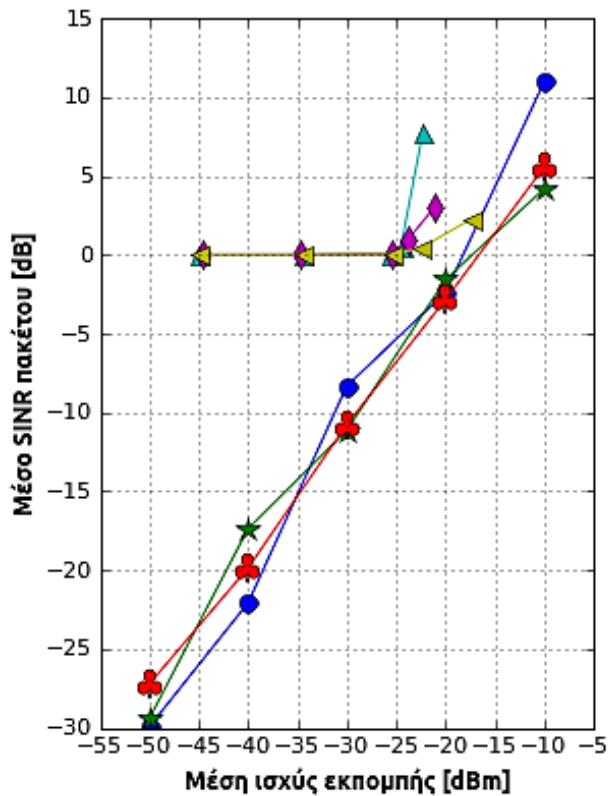
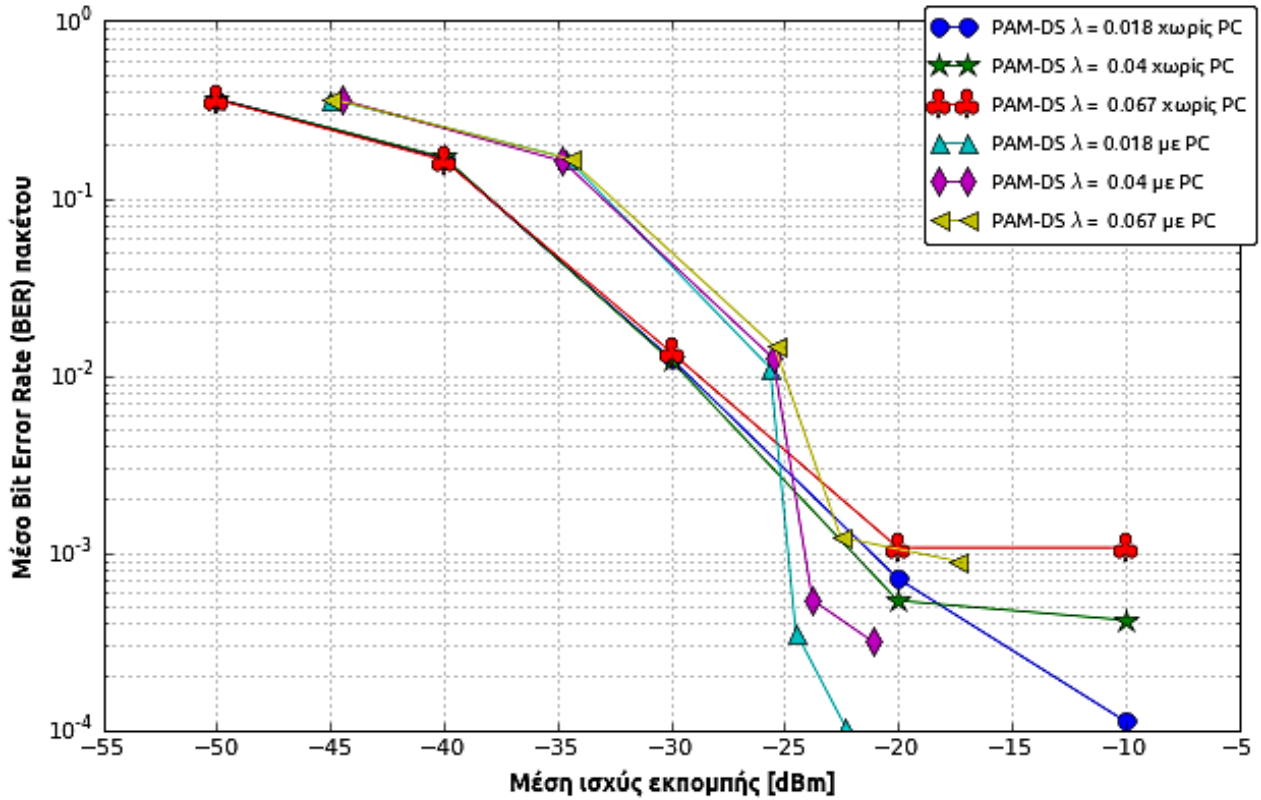


6.4 Σενάρια με παρεμβολές MUI και NBI



6.5 Σενάρια με παρεμβολές MUI και έλεγχο ισχύος

Επίδοση συστημάτων IR-UWB PAM-DS με ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps μέγεθος πακέτου 32 bytes και MUI με Pairwise Power Control [PC]



6.6 Ανάλυση των αποτελεσμάτων

Σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν η διαμόρφωση κατά BPAM-DS υπερτερεί εμφανώς έναντι των υπολοίπων σχημάτων διαμόρφωσης. Έπεται η διαμόρφωση κατά BPAM-TH και τελευταία σε επίδοση έρχεται η διαμόρφωση κατά 2PPM-TH. Οι επιδόσεις των τριών σχημάτων διαμόρφωσης παρουσιάζουν αποκλίσεις πολλών τάξεων μεγέθους στο BER για τις περιπτώσεις ζεύξεων χωρίς παρεμβολές, ενώ οι διαφορές γίνονται λιγότερο αισθητές στις περιπτώσεις συστημάτων υπό το καθεστώς παρεμβολών. Η παρακάτω ανάλυση επομένως πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μόνο τη διαμόρφωση BPAM-DS η οποία και κρίνεται συνολικά αποτελεσματικότερη έναντι των άλλων.

Στα σενάρια χωρίς παρεμβολές διαπιστώνεται εξαιρετική επίδοση των συστημάτων (BPAM-DS) με $BER < 10^{-5}$ για ισχείς εκπομπής άνω των -20 dBm και ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps. Για τις περιπτώσεις ρυθμών μετάδοσης 50 και 100 Mbps υπάρχει χειροτέρευση, με τη βέλτιστη τιμή BER να τείνει σε τάξεις μεγέθους 10^{-3} και 10^{-2} αντίστοιχα για ισχύ εκπομπής περί τα -10 dBm. Ακόμη φαίνεται ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, το μήκος του πακέτου εισάγει εξάρτηση στην επίδοση του συστήματος, με το μεγαλύτερο μήκος (64 bytes) να προκαλεί ελαφρά χειροτέρευση (ανάλογα με την περίπτωση ίσως και αμελητέα). Αξίζει να σημειωθεί ότι το επιτευχθέν BER συνιστά raw bit error rate, μετράται δηλαδή χωρίς χρήση οποιασδήποτε τεχνικής προστασίας - διόρθωσης σφαλμάτων (όπως Forward Error Correction – FEC κλπ). Αν επομένως χρησιμοποιηθεί κάποιο κατάλληλο σχήμα διόρθωσης σφαλμάτων προκειμένου να αντιμετωπισθεί μέρος ή το σύνολο αυτών, διαπιστώνει κανείς ότι, απουσία παρεμβολών, πομποδέκτες IR-UWB με BPAM-DS θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν κάλλιστα σε εφαρμογές εσωτερικού χώρου για πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, με σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε ισχύ.

Στα σενάρια με MUI διαπιστώνεται έντονη χειροτέρευση των δεικτών επίδοσης σε σχέση με τις αντίστοιχες περιπτώσεις χωρίς παρεμβολή. Το φαινόμενο μάλιστα επιτείνεται όσο αυξάνει η πυκνότητα των κόμβων. Για χαμηλά bitrates (10 Mbps) και χαμηλή πυκνότητα κόμβων ($\lambda = 0.018$ κόμβοι/ m^2) επιτυγχάνεται BER κάτω από 10^{-4} , το οποίο κινείται εντός ανεκτών επιπέδων. Όσο αυξάνει η πυκνότητα των κόμβων όμως το BER ξεπερνά το φράγμα του 10^{-3} που μπορεί να θεωρηθεί η ελάχιστη ανεκτή τιμή επίδοσης. Τέλος, στην περίπτωση των συστημάτων 50 και 100 Mbps φαίνεται ότι μεγαλύτερο αντίκτυπο έχει η παρουσία θορύβου παρά η παρεμβολή, αφού η μεταβολή που σημειώνεται σε σχέση με τα αντίστοιχα σενάρια χωρίς παρεμβολή δεν ξεπερνά τη μια τάξη μεγέθους. Πρόκειται δηλαδή στην περίπτωση αυτή για noise-limited συστήματα και όχι interference-limited όπως φαίνεται στην περίπτωση ρυθμού 10 Mbps.

Η συμπεριφορά των συστημάτων υπό το καθεστώς MUI είναι ενδεικτική της απαίτησης για ένα αποτελεσματικό πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης (MAC). Το πρωτόκολλο αυτό θα πρέπει να παρέχει τουλάχιστον στοιχειώδη συντονισμό (είτε κεντρικό είτε κατανεμημένο) μεταξύ των επιμέρους κόμβων, προκειμένου να αποφευχθεί μέρος των συγκρούσεων πακέτων. Παρόλα αυτά, ακόμη και ελλείψει FEC και καταλλήλου πρωτοκόλλου MAC οι επιδόσεις διατηρούνται σε σχετικά ανεκτά επίπεδα για τις περιπτώσεις 10 και 50 Mbps με χαμηλή πυκνότητα κόμβων και επομένως το UWB με BPAM-DS θα μπορούσε κάλλιστα να αποτελέσει PHY για M2M χωρίς NBI.

Στην περίπτωση με NBI, η χειροτέρευση της επίδοσης είναι θεαματική. Το BER αυξάνεται κατά περισσότερο από δύο τάξεις μεγέθους, πλησιάζοντας στο 2×10^{-1} για την περίπτωση BPAM-DS με ρυθμό μετάδοσης στα 10 Mbps και μέγεθος πακέτου 32 bytes. Κάτι τέτοιο φυσικά δεν είναι αποδεκτό για ρεαλιστικά συστήματα αφού σχεδόν τα μισά bits θα καταστρέφονται. Επιπλέον, στην περίπτωση με MUI και NBI φαίνεται ότι το MUI συμμετέχει ελάχιστα στη χειροτέρευση της επίδοσης. Αξίζει να μελετηθούν σενάρια με FEC και ενδεχομένως με τεχνικές spectrum sensing και cognitive radio σε συνδυασμό με δέκτες MMSE, προκειμένου να διαπιστωθεί ποιο είναι το ταβάνι

στην επίδοση συστημάτων UWB BPAM-DS υπό καθεστώς NBI.

Στην περίπτωση με MUI και έλεγχο ισχύος (PC), παρατηρείται θεαματική βελτίωση στη μέση ενεργειακή απαίτηση των συστημάτων εν συγκρίσει με τις περιπτώσεις χωρίς αυτόν. Έτσι, για μέση ισχύ συστημάτων περί τα -25 dBm με PC, επιτυγχάνονται επιδόσεις αντίστοιχες με αυτές για ισχύ -10 dBm χωρίς PC. Το κέρδος δηλαδή στη χρήση PC ανέρχεται σε περίπου τα 15 dB για δεδομένες τιμές BER. Το σχήμα ελέγχου ισχύος φαίνεται επομένως αρκετά υποσχόμενο, ιδίως αν ληφθεί υπόψη η απλότητα που απαιτεί η υλοποίησή του και επομένως χρήζει περαιτέρω μελέτης για περισσότερες παραμέτρους συστημάτων.

Οι καμπύλες SINR φαίνεται ότι παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με την ισχύ εκπομπής, ενώ η θέση τους στα διαγράμματα προσδιορίζεται κατά κύριο λόγο από την πυκνότητα των κόμβων και όχι τόσο από το χρησιμοποιούμενο σχήμα διαμόρφωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι για δεδομένο σενάριο, παρότι ενδεχομένως κάποιο σχήμα διαμόρφωσης επιτυγχάνει την υψηλότερη τιμή SINR, αυτό δε σημαίνει απαραίτητα ότι επιτυγχάνει το βέλτιστο BER. Συνεπώς, το SINR αποτελεί μεν μια ένδειξη της ποιότητας κάποιας ζεύξης, χωρίς ωστόσο να είναι αυτό που την καθορίζει απόλυτα και θα πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλα μεγέθη όπως το BER και το INR.

Οι καμπύλες INR παρουσιάζουν κι εκείνες γραμμική συμπεριφορά εκτός από την περίπτωση NBI και όπως και στην περίπτωση του SINR, η θέση τους στα διαγράμματα καθορίζεται κατά κύριο λόγο από την πυκνότητα των κόμβων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος των τιμών που παίρνει το SINR και INR είναι παρόμοιο για όλες τις διαμορφώσεις, ρυθμούς μετάδοσης και μεγέθη πακέτου και άρα συμπεραίνεται ότι η στατιστική περιγραφή του εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την πυκνότητα των κόμβων, την ένταση της κίνησης (η οποία είναι η ίδια για όλους τους κόμβους στην συγκεκριμένη προσομοίωση) και την ισχύ εκπομπής.

Εν κατακλείδι, από την προσομοίωση φαίνεται ότι το IR-UWB και πιο συγκεκριμένα το BPAM-DS εμφανίζεται ως υποσχόμενο σχήμα ικανό να αποτελέσει φυσικό στρώμα για εφαρμογές M2M εσωτερικού χώρου με υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμό μετάδοσης. Κατά τη σχεδιάσή του ωστόσο θα πρέπει να συμπεριληφθεί κατάλληλο σχήμα διόρθωσης σφαλμάτων (FEC), πρωτόκολλο πολλαπλής πρόσβασης (MAC) και ενδεχομένως πομποδέκτες με τεχνικές MIMO και Cognitive Radio αν αναμένεται έντονη παρουσία παρεμβολών στενής ζώνης (NBI).

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα - επεκτάσεις

Στην παρούσα εργασία έγινε περιγραφή των συστημάτων επικοινωνίας M2M και προτάθηκε η χρήση φυσικού στρώματος βασισμένου σε παλμικό UWB. Η αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας υλοποίησης επαληθεύτηκε κάνοντας χρήση προσομοίωσης για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας.

Τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις κατέδειξαν τη δυνατότητα εφαρμογής της τεχνολογίας παλμικού UWB (και πιο συγκεκριμένα UWB BPAM-DS) σε περιπτώσεις δικτύων M2M εσωτερικού χώρου για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (>10 Mbps) με ικανοποιητικές επιδόσεις ακόμη και χωρίς χρήση σχήματος διόρθωσης σφαλμάτων ή πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης. Ωστόσο, σε ένα ρεαλιστικό σύστημα είναι επιβεβλημένη η χρήση FEC για τη διόρθωση σφαλμάτων, κατάλληλου πρωτοκόλλου πολλαπλής πρόσβασης MAC και για τις περιπτώσεις όπου αναμένεται ισχυρή παρεμβολή στενής ζώνης ή απαιτούνται ρυθμοί μετάδοσης της τάξεως των εκατοντάδων Mbps, ενδεχομένως η χρήση τεχνικών MIMO και Cognitive Radio (CR) σε συνδυασμό με δέκτες MMSE.

Σε κάθε περίπτωση το IR-UWB φαίνεται μια υποσχόμενη λύση για επικοινωνίες M2M με υψηλές απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης, χαμηλή πολυπλοκότητα και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Προτείνεται επομένως περαιτέρω μελέτη για διαφορετικές παραμέτρους και σενάρια, χρησιμοποιώντας π.χ.

- διαφορετικούς συνδυασμούς μήκους κώδικα, ρυθμού επανάληψης πλαισίου και διάρκειας πλαισίου
- πιο εξειδικευμένους παλμούς (προκύπτοντες από τροποποιημένες συναρτήσεις Gegenbauer ή τροποποιημένα ερμητιανά πολυώνυμα) οι οποίοι εκμεταλλεύονται ορθογωνιότητα στις εκπεμπόμενες κυματομορφές μεταξύ διαφορετικών χρηστών
- απουσία συγχρονισμού μεταξύ πομπού και δέκτη
- μοντέλα NLOS για τη μελέτη ζεύξεων σε περιβάλλοντα χωρίς οπτική επαφή
- μεγαλύτερα ή μικρότερα παράθυρα παρατήρησης ανάλογα με την επιδιωκόμενη εφαρμογή
- διαφορετικά μοτίβα/εντάσεις κίνησης
- συνύπαρξη πολλών ετερόκλιτων δικτύων IR-UWB με διαφορετικές παραμέτρους διαμόρφωσης (π.χ. διαφορετικό ρυθμό μετάδοσης) στο ίδιο περιβάλλον

