



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Μετάδοση M2M Δεδομένων σε Περιβάλλον Εσωτερικών Χώρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΞΕΝΟΦΩΝ Δ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων : ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΩΤΤΗΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2017



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

Μετάδοση M2M Δεδομένων σε Περιβάλλον Εσωτερικών Χώρων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΞΕΝΟΦΩΝ Δ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων : ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΩΤΤΗΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 19^η Ιουλίου 2017

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....
ΞΕΝΟΦΩΝ Δ. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

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

Copyright © Ξενοφών Δ. Κωνσταντίνου, 2017

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 τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Παναγιώτη Κωττή, για την ευκαιρία που μου προσέφερε να εκπονήσω την εργασία αυτή και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής της. Για τη βοήθειά του σε ό,τι αφορά την επιστημονική ανάλυση, και για τις παρατηρήσεις και τις συμβουλές του που συνέβαλαν καταλυτικά στη συγγραφή των κειμένων. Επίσης, για τις γνώσεις πάνω στην επιστήμη του τηλεπικοινωνιακού μηχανικού που μου προσέφεραν η διδασκαλία του και οι συζητήσεις μας, αλλά και για την πολύτιμη καθοδήγησή του στην κατεύθυνση των σπουδών μου και σε αποφάσεις σχετικές με το μέλλον μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο για τις πολύτιμες συμβουλές του και τη συμβολή του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Για την αμέριστη παροχή επιστημονικής γνώσης, πηγών και πληροφοριών σχετικά τις ασύρματες επικοινωνίες, και για την καθοδήγησή του στη μαθηματική περιγραφή των ασύρματων καναλιών μετάδοσης. Επίσης, για τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα από το μάθημα των Συστημάτων Κινητών Τηλεπικοινωνιών, οι οποίες ενίσχυσαν το ερευνητικό μου ενδιαφέρον για τις ασύρματες επικοινωνίες γενικότερα.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μεταδιδακτορικό ερευνητή Χαρίλαο Κουρόγιωργα για την αδιάλειπτη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, την άριστη συνεργασία μας, την προθυμία του να με βοηθήσει, αλλά και τη συμβολή του στην εξαγωγή των αριθμητικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και τη στήριξή της καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μου σπουδών, αλλά και για το ότι έθεσε τις βάσεις για να μπορέσω να κυνηγήσω τα όνειρά μου. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για όλα όσα μοιραστήκαμε αυτά τα χρόνια.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	12
Abstract.....	13
Κατάλογος Σχημάτων.....	14
Κατάλογος Πινάκων.....	17
Κατάλογος Συντημήσεων.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – Εισαγωγή στο Internet of Things.....	20
1.1. Η Εξέλιξη του Internet προς το Internet of Things.....	20
1.2. Περιγραφή του Internet of Things.....	21
1.3. Context, Context-Awareness, και Context-Aware Εφαρμογές.....	22
1.4. Πεδία εφαρμογής του IoT.....	24
1.5. Στατιστικά στοιχεία σχετικά με την αγορά του IoT.....	26
1.6. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ως θεμελιώδες τμήμα του IoT.....	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο - Οι M2M Επικοινωνίες και το IoT.....	31
2.1. Εισαγωγή στην Επικοινωνία M2M. Η σχέση της με IoT, WSNs, και CPS.....	31
2.2. Επισκόπηση ενός τυπικού συστήματος M2M.....	35
2.3. Ανάλυση των βασικών στοιχείων των συστημάτων M2M.....	37
2.3.1. Συσκευές και gateways M2M.....	37
2.3.2. Επισκόπηση Τεχνολογιών Διασύνδεσης συσκευών στις M2M Επικοινωνίες.....	39
2.3.3. Διαχείριση δεδομένων στα συστήματα M2M.....	41
2.4. Πεδία εφαρμογής των M2M Επικοινωνιών.....	44
2.4.1. Διαχείριση Κεφαλαίων (Asset Management).....	45
2.4.2. Βιομηχανικός Αυτοματισμός (Industrial Automation).....	46
2.4.3. Έξυπνο Ηλεκτρικό Δίκτυο (Smart Grid) και Έξυπνο Σπίτι (Smart Home).....	47
2.4.4. Αυτοματισμός σε Εμπορικά Κτίρια (Commercial Building Automation).....	49
2.4.5. Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities).....	50
2.4.6. Συμμετοχική Παρακολούθηση Περιβάλλοντος.....	51
2.5. Ανοικτά θέματα και προκλήσεις για τις επικοινωνίες M2M.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο - Αρχιτεκτονική Δικτύου M2M και Πρότυπα.....	54
3.1. Εισαγωγή.....	54
3.2. Η Αρχιτεκτονική 3GPP MTC.....	55
3.3. Η Αρχιτεκτονική ETSI M2M.....	59
3.3.1. Αρχιτεκτονική Συστήματος και Τομείς.....	60
3.3.2. Η Δομή των M2M SCs και τα Σημεία Αναφοράς.....	62
3.3.3. Η σχέση ανάμεσα στο 3GPP και το ETSI.....	65
3.4. Η Αρχιτεκτονική Συστήματος του Προγράμματος EXALTED.....	65
3.4.1. Περιγραφή της Αρχιτεκτονικής.....	65

3.4.2. Τα μέρη του Τομέα Δικτύου (ND).....	69
3.4.3. Τα μέρη του Τομέα M2M Συσκευής και Gateway (DD).....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο - Το πρότυπο IEEE 802.11ad.....	72
4.1. Εισαγωγή.....	72
4.2. Βασικά χαρακτηριστικά του 802.11ad.....	73
4.2.1. Γενικές κατηγορίες χρήσης του 802.11ad και κατηγορίες για εφαρμογές M2M.....	73
4.2.2. Συμβατότητα με προηγούμενες εκδόσεις.....	74
4.2.3. Χρήση της περιοχής συχνοτήτων περί τα 60GHz.....	75
4.3. Το φυσικό στρώμα του IEEE 802.11ad.....	77
4.3.1. Κανάλια λειτουργίας.....	77
4.3.2. Οι τρεις λειτουργίες του DMG PHY.....	77
4.3.2.1. Control PHY.....	78
4.3.2.2. Single Carrier PHY (SC PHY).....	80
4.3.2.3. OFDM PHY.....	84
4.3.2.4. Σύνοψη των MCS.....	86
4.3.3. Beamforming.....	86
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο - Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σενάριο μετάδοσης σε εσωτερικούς χώρους με χρήση του IEEE 802.11ad.....	88
5.1. Ανοικτά θέματα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε εσωτερικούς χώρους με τη χρήση του 802.11ad.....	88
5.2. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με αναγεννητικό επαναλήπτη.....	89
5.3. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες.....	95
5.4. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες.....	97
5.5. Γενίευση του υπολογισμού της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με N αναγεννητικούς επαναλήπτες.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο - Αριθμητικά Αποτελέσματα και Σχολιασμός.....	102
6.1. Σύγκριση της πιθανότητας διακοπής απλής M2M ζεύξης με απώλειες λόγω σκίασης που ακολουθούν τη Λογαριθμική και την Αντίστροφη Κανονική Κατανομή	102
6.1.1. Αριθμητικά αποτελέσματα με τη χρήση MATLAB.....	103
6.1.2. Συμπεράσματα.....	105
6.2. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με αναγεννητικό επαναλήπτη με απώλειες λόγω σκίασης που ακολουθούν την Αντίστροφη Κανονική Κατανομή.....	105
6.2.1. Αριθμητικά αποτελέσματα με τη χρήση MATLAB	106

6.2.2. Συμπεράσματα.....	109
6.3. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε συστήματα M2M με απώλειες λόγω σκίασης που ακολουθούν την Αντίστροφη Κανονική Κατανομή που χρησιμοποιούν έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες.....	109
6.3.1. Αριθμητικά αποτελέσματα με τη χρήση MATLAB θεωρώντας σταθερό $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 4dB$	109
6.3.2. Αριθμητικά αποτελέσματα με τη χρήση MATLAB θεωρώντας σταθερό $x = x_1 = x_2 = x_3 = 15dB$	113
6.3.3. Συμπεράσματα.....	115
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	116

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το Internet of Things είναι ένα όραμα για το άμεσο μέλλον, στο οποίο τα αντικείμενα που οι άνθρωποι χρησιμοποιούν στην καθημερινή τους ζωή θα είναι εφοδιασμένα με μικρο-ελεγκτές, πομπούς και δέκτες για ασύρματη (κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά) επικοινωνία, και στοίβες κατάλληλων πρωτοκόλλων που θα τους επιτρέπουν να επικοινωνούν μεταξύ τους (M2M Επικοινωνία) και με τους χρήστες, αποτελώντας έτσι ένα θεμελιώδες τμήμα του Διαδικτύου.

Η M2M Επικοινωνία και η μετάδοση M2M δεδομένων αναφέρονται στην επικοινωνία μεταξύ M2M συσκευών, δηλαδή υπολογιστών, ενσωματωμένων συστημάτων (επεξεργαστών), έξυπνων αισθητήρων (δηλαδή συσκευών μέτρησης), ενεργοποιητών (δηλαδή ελεγχόμενες συσκευές και κινητήρες, όπως διακόπτες ισχύος, θερμοστάτες, και βαλβίδες), και κινητών συσκευών με ελάχιστη ή πλήρως απύσα ανθρώπινη παρέμβαση. Η τεχνολογία M2M χρησιμοποιεί συσκευές (κατά κύριο λόγο αισθητήρες) για να καταγράψει γεγονότα/συνθήκες (όπως το επίπεδο της θερμοκρασίας), τα οποία μεταφέρονται μέσω δικτύων (ασύρματων, ενσύρματων, ή υβριδικών) προς εφαρμογές λογισμικού, οι οποίες μεταφράζουν τις καταγραφές σε πληροφορίες κατανοητές για τους χρήστες των υπηρεσιών M2M. Η χρήση δικτύων M2M για παρακολούθηση και έλεγχο αποτελεί θεμελιώδες τμήμα των συστημάτων αυτοματισμού στη βιομηχανία, με σημαντική επίδραση στην παγκόσμια οικονομία. Επιπλέον, εκτενής είναι η χρήση των M2M Επικοινωνιών στις υπηρεσίες υγείας, τις υποδομές, την εφοδιαστική αλυσίδα, τις μεταφορές και τις οικιακές εφαρμογές.

Μέχρι τώρα, υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος προτύπων και τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την ασύρματη μετάδοση M2M δεδομένων. Ωστόσο, οι αυξανόμενες απαιτήσεις για ποιοτικές υπηρεσίες M2M από τους χρήστες κάνει αναγκαία της αύξηση του εφικτού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και την αντιμετώπιση προβλημάτων όπως οι παρεμβολές και η επίδραση της σκίασης. Το πρότυπο IEEE 802.11ad είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας που δίνει τη δυνατότητα αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων και υποστηρίζει μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Η ύπαρξη εργαλείων αριθμητικού υπολογισμού της πιθανότητας διακοπής συστήματος M2M, λαμβάνοντας υπόψη τις στατιστικές παραμέτρους των ασυρμάτων ζεύξεων μετάδοσης, είναι απαραίτητα για τη σχεδίαση των συστημάτων M2M.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

M2M Επικοινωνίες, Συσκευές M2M, IoT, IEEE 802.11ad, Inverse Gaussian Κατανομή, 3GPP, ETSI

ABSTRACT

The Internet of Things is a vision for the immediate future, in which the items used daily by humans will be equipped with microcontrollers, transceivers and receivers capable of communicating wirelessly, and protocol stacks enabling them to communicate with each other (M2M Communication) and with end users, hence becoming a fundamental part of the Internet.

M2M Communication and M2M data transmission refer to the communication between M2M devices, e.g. personal computers, embedded systems (processors), smart sensors (measurement devices), actuators, and mobile devices, with minimum or no human interaction. M2M technology uses devices (sensors, mostly) to record events and conditions (such as temperature levels), which are transmitted, by means of wireless, wired, or hybrid networks, towards software applications that translate them to comprehensible information for the M2M services users. The use of M2M networks in monitoring and control is indispensable for the industrial control systems and affects the global economy greatly. Moreover, M2M communications are extensively used in medical services, infrastructure, supply chain, transportation, and home applications.

So far, there is a large number of standards and technologies used in wireless M2M data transmission. Nonetheless, the increasing users' demand for high quality M2M services necessitates the increase in feasible data transmission rates and the overcoming of problems such as interference and shadowing. The IEEE 802.11ad standard is a wireless transmission technology that provides the ability to overcome such problems and supports high data transmission rates. Tools for the numerical calculation of an M2M system's outage probability, considering the statistical parameters of wireless links, are necessary for M2M systems design.

KEY WORDS

M2M Communications, M2M Devices, IoT, IEEE 802.11ad, Inverse Gaussian Distribution, 3GPP, ETSI

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Η εξέλιξη του Διαδικτύου σε 5 κύρια στάδια.....	20
Σχήμα 1.2: Σκιαγράφηση του IoT.....	22
Σχήμα 1.3: Βασικά πεδία εφαρμογής του IoT και σχετικά σενάρια.....	25
Σχήμα 1.4: Αναδυόμενες εφαρμογές στο IoT.....	25
Σχήμα 1.5: Αύξηση του αριθμού των διαδικτυακά συνδεδεμένων συσκευών/αντικειμένων έως το 2020.....	26
Σχήμα 1.6: Πωλήσεις RFID στα βασικά τμήματα της αγοράς.....	27
Σχήμα 1.7: Η δομή ενός δικτύου αισθητήρων σε στρώματα, χωρισμένα αναλόγως με τις δυνατότητες των συσκευών.....	28
Σχήμα 1.8: Η σχέση ανάμεσα στα δίκτυα αισθητήρων και το IoT.....	30
Σχήμα 1.9: Η υλοποίηση του IoT σε τέσσερα στρώματα.....	30
Σχήμα 2.1: Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής ενός συστήματος M2M από την πλευρά του IoT....	33
Σχήμα 2.2: Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής ενός CPS από την πλευρά του IoT και από την πλευρά του πεδίου απόφασης και ελέγχου.....	33
Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση των συσχετισμών ανάμεσα στα συστήματα M2M, τα WSNs, τα CPS, και το IoT.....	34
Σχήμα 2.4: Η συνεχής εξέλιξη προς τα CPS, που θα είναι η βασική μορφή του IoT στο μέλλον.....	35
Σχήμα 2.5: Επισκόπηση ενός τυπικού συστήματος M2M.....	37
Σχήμα 2.6: Η ροή των M2M δεδομένων, από το σημείο της καταγραφής έως τον τελικό προορισμό, όπου αξιοποιούνται από το χρήστη (εταιρεία).....	42
Σχήμα 2.7: Η παγκόσμια αγορά παρακολούθησης και ελέγχου για τα έτη 2007 και 2020.....	44
Σχήμα 2.8: Αδιάλειπτη ηλεκτρονική συντήρηση των κεφαλαίων δύο εταιρειών από εξωτερικό συνεργάτη.....	46
Σχήμα 2.9: Επισκόπηση ενός έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου.....	48
Σχήμα 2.10: Αλληλεπίδραση συσκευών M2M μεταξύ τους και με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας στο έξυπνο σπίτι.....	49
Σχήμα 2.11: Τα βασικά μέρη ενός BAS.....	51
Σχήμα 3.1 : Μοντέλα επικοινωνίας MTC.....	56
Σχήμα 3.2: Αρχιτεκτονική αναφοράς για το 3GPP MTC.....	57
Σχήμα 3.3: Αρχιτεκτονική δικτύου M2M υψηλού επιπέδου.....	60
Σχήμα 3.4: Η δομή της λειτουργικής αρχιτεκτονικής των M2M SCs.....	63
Σχήμα 3.5: Υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική του EXALTED.....	67
Σχήμα 3.6: Τα μέρη της αρχιτεκτονικής EXALTED.....	68
Σχήμα 4.1: Η χρονική εξέλιξη των προτύπων για τα WLANs.....	72
Σχήμα 4.2: Διαθεσιμότητα συχνοτήτων στην περιοχή των 60GHz προς εκμετάλλευση, σε κάθε περιοχή του κόσμου.....	76

Σχήμα 4.3: Η φασματική μάσκα του 802.11ad στο εύρος ζώνης που θα χρησιμοποιεί.....	76
Σχήμα 4.4: Η δομή ενός πακέτου στο Control PHY.....	79
Σχήμα 4.5: Η δομή της επικεφαλίδας στο Control PHY.....	79
Σχήμα 4.6: Επισκόπηση της επεξεργασίας στην πομπό για το Control PHY.....	80
Σχήμα 4.7: Η δομή ενός πακέτου στο SC PHY.....	80
Σχήμα 4.8: Η δομή της επικεφαλίδας στο SC PHY.....	81
Σχήμα 4.9: Επισκόπηση της επεξεργασίας στην πομπό για το SC PHY σε κανονική λειτουργία.....	82
Σχήμα 4.10: Η δομή των μπλοκ δεδομένων σε ένα πακέτο του SC PHY σε κανονική λειτουργία.....	82
Σχήμα 4.11: Επισκόπηση της επεξεργασίας στην πομπό για το SC PHY σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος.....	83
Σχήμα 4.12: Η δομή των μπλοκ δεδομένων σε ένα πακέτο του SC PHY σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος.....	84
Σχήμα 4.13: Η δομή ενός πακέτου στο OFDM PHY.....	84
Σχήμα 4.14: Η δομή της επικεφαλίδας στο OFDM PHY.....	85
Σχήμα 4.15: Επισκόπηση της επεξεργασίας στην πομπό για το OFDM PHY.....	85
Σχήμα 4.16: Η δομή του πακέτου TRN.....	87
Σχήμα 5.1: Σύστημα που χρησιμοποιεί ένα αναγεννητικό επαναλήπτη.....	91
Σχήμα 5.2: Σύστημα που χρησιμοποιεί δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες.....	95
Σχήμα 5.3: Σύστημα που χρησιμοποιεί τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες.....	97
Σχήμα 5.4: Σύστημα που χρησιμοποιεί N αναγεννητικούς επαναλήπτες.....	99
Σχήμα 6.1: Πιθανότητα διακοπής σε μονόδρομη ζεύξη, με χρήση της Λογαριθμοκανονικής και Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 2\text{dB}$	103
Σχήμα 6.2: Πιθανότητα διακοπής σε μονόδρομη ζεύξη, με χρήση της Λογαριθμοκανονικής και Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4\text{dB}$	103
Σχήμα 6.3: Πιθανότητα διακοπής σε μονόδρομη ζεύξη, με χρήση της Λογαριθμοκανονικής και Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 6\text{dB}$	104
Σχήμα 6.4: Πιθανότητα διακοπής σε μονόδρομη ζεύξη, με χρήση της Λογαριθμοκανονικής και Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 8\text{dB}$	104
Σχήμα 6.5: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 0\text{dB}$	106
Σχήμα 6.6: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 5\text{dB}$	107
Σχήμα 6.7: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 10\text{dB}$	107
Σχήμα 6.8: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 15\text{dB}$	108

Σχήμα 6.9: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 20\text{dB}$	108
Σχήμα 6.10: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 25\text{dB}$	109
Σχήμα 6.11: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4\text{dB}$ και $x = 0\text{dB}$	110
Σχήμα 6.12: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4\text{dB}$ και $x = 5\text{dB}$	110
Σχήμα 6.13: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4\text{dB}$ και $x = 10\text{dB}$	111
Σχήμα 6.14: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4\text{dB}$ και $x = 15\text{dB}$	111
Σχήμα 6.15: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4\text{dB}$ και $x = 20\text{dB}$	112
Σχήμα 6.16: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4\text{dB}$ και $x = 25\text{dB}$	112
Σχήμα 6.17: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x = 15\text{dB}$ και $\sigma = 2\text{dB}$	113
Σχήμα 6.18: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x = 15\text{dB}$ και $\sigma = 4\text{dB}$	113
Σχήμα 6.19: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x = 15\text{dB}$ και $\sigma = 6\text{dB}$	114
Σχήμα 6.20: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x = 15\text{dB}$ και $\sigma = 8\text{dB}$	114

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Οι συσχετισμοί ανάμεσα στα M2M, WSNs, CPS, και το IoT.....	34
Πίνακας 2.2: Επισκόπηση κυριότερων τεχνολογιών διασύνδεσης συσκευών M2M.....	40
Πίνακας 3.1: Ισοδυναμίες ορολογιών για τις αρχιτεκτονικές των ETSI, 3GPP, και EXALTED.....	67
Πίνακας 4.1: Νέα μοντέλα χρήσης των WLANs.....	73
Πίνακας 4.2: Επισκόπηση των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται από κάθε φυσικό στρώμα.....	77
Πίνακας 4.3: Σύνοψη των χαρακτηριστικών των συνδυασμών MCS που χρησιμοποιούνται από τα τρία φυσικά στρώματα.....	86

Κατάλογος Συντμήσεων

3GPP	Third Generation Partnership Project
AGC	Automatic Gain Control
ALG	Application Layer Gateway
API	Application Programming Interface
BAS	Building Automation Systems
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CPS	Cyber-Physical Systems
D2D	Device-to-Device
DMG	Directional Multi-Gigabit
DSL	Digital Subscriber Line
DoS	Denial of Service
E2E	End-to-End
eNB	Evolved NodeB
EPC	Evolved Packet Core
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved Terrestrial Radio Access Network
FCC	Federal Communication Union
FDD	Frequency Division Duplex
FSL	Free Space Loss
GERAN	GSM Edge Radio Access Network
H2H	Human-to-Human
HAN	Home Access Network
HFC	Hybrid Fiber Coaxial
HLR	Home Location Register
HSS	Home Subscriber Server
HTC	Human Type Communications
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
IWF	Internetworking Functions
LDPC	Low-Density Parity-Check
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
LTE-M	Long Term Evolution for Machine to Machine
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control
MCS	Modulation and Coding Scheme
MTC	Machine-Type Communications

MIMO	Multiple Input Multiple Output
NSCL	Network Service Layer
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OS	Operational System
PHY	Physical Layer
PLMN	Public Land Mobile Network
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RS	Reed-Solomon
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SMS	Short Message Service
TDD	Time Division Duplex
UE	User Equipment
UI	User Interface
WWW	World Wide Web
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WSN	Wireless Sensor Network

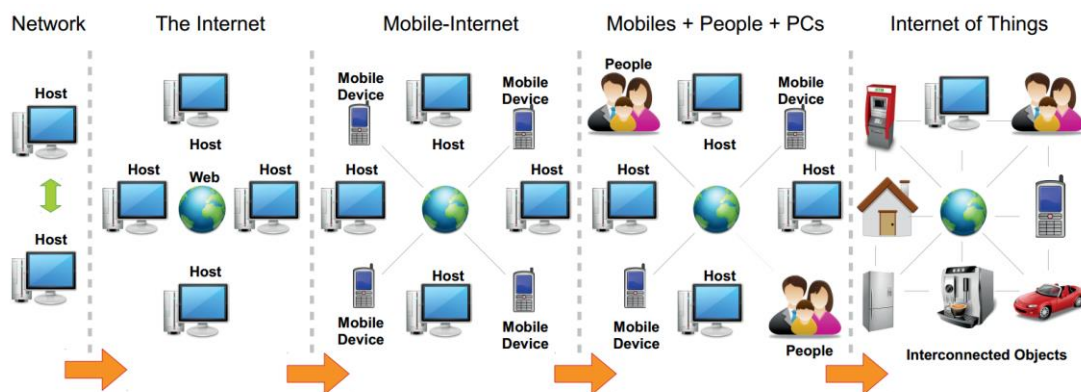
Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή στο Internet of Things

1.1. Η Εξέλιξη του Internet προς το Internet of Things

Πριν τη διερεύνηση του Internet of Things σε μεγαλύτερο βάθος, είναι χρήσιμο να γίνει αναφορά στην εξέλιξη του Διαδικτύου. Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 έγινε η πρώτη επιτυχής επικοινωνία μεταξύ δύο υπολογιστών, μέσω ενός πρώιμου δικτύου υπολογιστών. Η στοίβα πρωτοκόλλων TCP/IP παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στις αρχές της δεκαετία του 1980. Στη συνέχεια, ο Παγκόσμιος Ιστός (World Wide Web – WWW) εμφανίστηκε το 1991, κάτι που αύξησε δραματικά τη δημοτικότητα του Διαδικτύου, το οποίο με τη σειρά του άνοιξε νέους ορίζοντες για την ανθρωπότητα και οδήγησε σε οικονομική ανάπτυξη. Αργότερα, η άφιξη κινητών συσκευών συνδεδεμένων στο Διαδίκτυο εισήγαγε στις ζωές των ανθρώπων το Κινητό Διαδίκτυο (Mobile Internet). Με την ξαφνική και ταχεία διεύρυνση της κοινωνικής δικτύωσης (social networking), οι χρήστες άρχισαν για πρώτη φορά να είναι μαζικά συνδεδεμένοι μέσω του Διαδικτύου.

Το επόμενο βήμα στην ανωτέρω πορεία εξέλιξης θα είναι η ουσιαστική υλοποίηση του Internet of Things, στο οποίο τα αντικείμενα που χρησιμοποιούνται καθημερινά από τους ανθρώπους θα είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω του Διαδικτύου και θα ανταλλάσσουν δεδομένα με Επικοινωνία Μεταξύ Μηχανών (Machine-to-Machine – M2M Communication, ή Machine-Type Communication – MTC).



Σχήμα 1.1: Η εξέλιξη του Διαδικτύου σε 5 κύρια στάδια

1.2. Περιγραφή του Internet of Things

Το *Internet of Things (IoT)* είναι ένα όραμα για το άμεσο μέλλον, στο οποίο τα αντικείμενα που οι άνθρωποι χρησιμοποιούν στην καθημερινή τους ζωή θα είναι εφοδιασμένα με μικρο-ελεγκτές, πομπούς και δέκτες για ασύρματη (κυρίως, αλλά όχι αποκλειστικά) επικοινωνία, και στοίβες κατάλληλων πρωτοκόλλων που θα τους επιτρέπουν να επικοινωνούν μεταξύ τους (M2M Επικοινωνία) και με τους χρήστες, αποτελώντας έτσι ένα θεμελιώδες τμήμα του Διαδικτύου. Το IoT θα έχει τη δυνατότητα να ενσωματώνει αδιαφανώς και αδιάλειπτα ένα μεγάλο πλήθος από ετερογενή συστήματα, παρέχοντας ταυτοχρόνως ανοικτή πρόσβαση σε επιλεγμένα σύνολα δεδομένων, με στόχο την ανάπτυξη καινοτόμων ψηφιακών εφαρμογών που θα αλλάξουν την καθημερινότητα των ανθρώπων.

Σύμφωνα με το [18], το IoT θα είναι η υλοποίηση ενός παγκόσμιου δικτύου με υποδομές που θα συνδέουν πραγματικά και εικονικά αντικείμενα, μέσω της εκμετάλλευσης των συλλεγόμενων δεδομένων και των δυνατοτήτων που θα παρέχουν οι σύγχρονες επικοινωνίες. Οι υποδομές αυτές θα περιλαμβάνουν το Διαδίκτυο, το οποίο εξελίσσεται ακατάπαυστα, καθώς και όλα τα υπάρχοντα και αναπτυσσόμενα δίκτυα. Το IoT θα προσφέρει ταυτοποίηση αντικειμένων, αισθητηριακές δυνατότητες (μέσω της χρήσης αισθητήρων) και τη δυνατότητα διασύνδεσης ως βάση για την ανάπτυξη *ανεξάρτητων* και *συνεργατικών* εφαρμογών και υπηρεσιών. Οι εφαρμογές αυτές θα έχουν υψηλό βαθμό αυτονομίας στη συλλογή δεδομένων, στη μεταφορά γεγονότων (event transfer), και στη δικτυακή συνδεσιμότητα, αλλά και δυνατότητα διαλειτουργικότητας (interoperability).

Τα τελευταία χρόνια, το IoT έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον τόσο της βιομηχανίας όσο και της ακαδημαϊκής κοινότητας. Ο όρος "IoT" χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στο τέλος της δεκαετίας του 1990, και από τότε εταιρείες start-up, ακαδημαϊκά ινστιτούτα, κρατικοί οργανισμοί και μεγάλες επιχειρήσεις έχουν εισαγάγει στην αγορά προϊόντα και υπηρεσίες που εντάσσονται στην ευρύτερη έννοια του IoT. Αυτή η δημοτικότητά του οφείλεται στο ότι έχει ως στόχο «οι άνθρωποι και τα αντικείμενα να συνδέονται οποτεδήποτε, οπουδήποτε, με ο,τιδήποτε και οποιονδήποτε, χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε δίκτυο και οποιαδήποτε υπηρεσία και εφαρμογή» [11].

Σε έναν τέτοιο κόσμο, στον οποίο τα αντικείμενα γνωρίζουν σε ποια κατάσταση είναι κάθε άνθρωπος και ποιες είναι οι ανάγκες και οι επιθυμίες του, οι επικοινωνίες πρέπει να επιτρέπουν στα αντικείμενα να δρουν με τρόπο τέτοιο που θα ικανοποιεί τις ανάγκες αυτές με τη μικρότερη δυνατή ανθρώπινη παρέμβαση, ιδανικά με πλήρη απουσία της. Συνεπώς, οι Context-Aware Επικοινωνίες και τα πανταχού παρόντα υπολογιστικά συστήματα (ubiquitous computing) αποτελούν θεμελιώδη προϋπόθεση για την επίτευξη ευφυούς αλληλεπίδρασης μεταξύ αντικειμένων και ανθρώπων ως βάσης της υλοποίησης του IoT.



Σχήμα 1.2: Σκιαγράφιση του IoT

1.3. Context, Context-Awareness, και Context-Aware Εφαρμογές

Για να διευκολυνθεί η κατανόηση των όρων “Context-Aware Επικοινωνίες” και “ubiquitous computing”, είναι απαραίτητο να γίνει κατανοητή η έννοια της λέξης “context”, καθώς και ποια είναι τα χαρακτηριστικά μιας “Context-Aware” εφαρμογής.

Σύμφωνα με το [14], η λέξη *context* “ορίζεται ως ένα τμήμα πληροφορίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει την κατάσταση μιας οντότητας. Μια οντότητα μπορεί να είναι ένα άτομο, ένα μέρος, ή ένα αντικείμενο που μπορεί να θεωρηθεί σχετικό με την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός χρήστη και μιας εφαρμογής, συμπεριλαμβανομένων του χρήστη και της εφαρμογής”. Συνεπώς, οποιαδήποτε πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της κατάστασης ενός συμμετέχοντος σε μια σχέση αλληλεπίδρασης και μπορεί να επηρεάσει την αλληλεπίδραση αυτή, μπορεί να χαρακτηριστεί ως *context*. Ως παράδειγμα μπορεί να εξεταστεί η περίπτωση όπου κάποιος χρησιμοποιεί ένα ψηφιακό υπολογιστικό φύλλο (*digital spreadsheet*) για να διαμορφώσει ένα κατάλογο με τα βάρη συγκεκριμένων αντικειμένων και να υπολογίσει το άθροισμά τους. Οι οντότητες είναι ο άνθρωπος και η ψηφιακή εφαρμογή που χρησιμοποιείται για τη συμπλήρωση του φύλλου. Στο παράδειγμα εξετάζονται δύο τμήματα πληροφορίας – η παρουσία άλλων ανθρώπων στο δωμάτιο όπου ο χρήστης διαμορφώνει τον κατάλογο, και η θέση του χρήστη στο χάρτη – ως προς τη συνάφειά τους με τον ορισμό “context”. Η παρουσία άλλων ανθρώπων δεν επηρεάζει το χρήστη ή την εφαρμογή για την επίτευξη του στόχου της συγκεκριμένης αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Η θέση του χρήστη, ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει την κατάσταση του χρήστη: αν βρίσκεται στις ΗΠΑ, το άθροισμα θα υπολογιστεί σε ουγκιές, ενώ αν βρίσκεται στον Καναδά, σε κιλά. Συνεπώς, η θέση χαρακτηρίζει την κατάσταση του χρήστη και είναι *context*.

Οι Context-Aware εφαρμογές, στον κόσμο του IoT, πρέπει να δρουν αυτόνομα και να ανταποκρίνονται βέλτιστα στις απαιτήσεις και τις επιθυμίες των χρηστών. Συνεπώς, πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνουν, μέσα από το σύνολο των εισερχόμενων πληροφοριών, τις πληροφορίες εκείνες που απαντούν στα ερωτήματα «ποιος», «πού», «τι» και «πότε» για τις οντότητες, και να χρησιμοποιήσουν τις πληροφορίες αυτές για να συμπεράνουν το γιατί οι οντότητες είναι σε συγκεκριμένη κατάσταση, ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν βέλτιστα. Για το λόγο αυτό, έχει οριστεί ότι ένα context μπορεί να ανήκει σε μια από τις εξής κύριες κατηγορίες [14]: *θέση (location)*, *ταυτότητα (identity)*, *δραστηριότητα (activity)*, και *χρόνος (time)*. Εκτός των βασικών κατηγοριών, υπάρχουν πολλές δευτερεύουσες κατηγορίες για κάθε context.

Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους προηγούμενους ορισμούς και περιγραφές, το IoT, χρησιμοποιώντας context-aware εφαρμογές, έχει τα ακόλουθα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας:

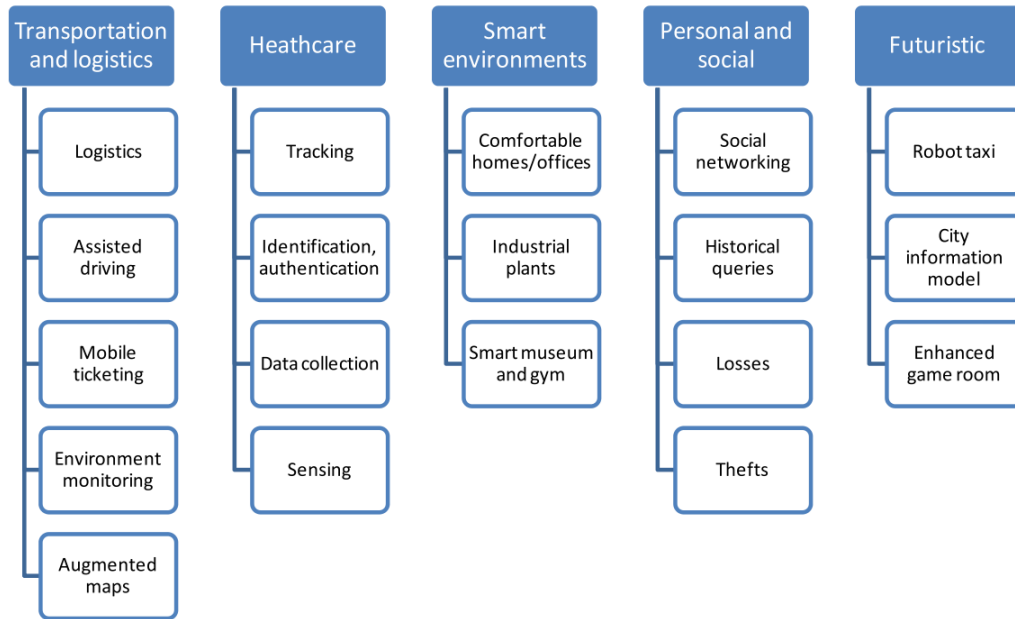
- i. *Παρουσίαση (Presentation)*: Context-aware εφαρμογές θα αποφασίζουν ποιες υπηρεσίες και πληροφορίες πρέπει να παρουσιαστούν σε κάθε χρήστη, σε κάθε συγκεκριμένη στιγμή, και σε κάθε μέρος, αναλόγως με τη βασική και δευτερεύουσα κατηγορία τους. Για παράδειγμα, όταν ένας χρήστης εισέρχεται σε ένα πολυκατάστημα, μια εφαρμογή θα αποφασίσει να ελέγξει το ψυγείο του σπιτιού του και να παρουσιάσει στο έξυπνο κινητό του πληροφορίες σχετικά με το ποια προϊόντα λείπουν, ώστε να αγοράσει αυτά που χρειάζεται.
- ii. *Εκτέλεση (Execution)*: Οι υπηρεσίες στο IoT πρέπει να εκτελούνται αυτόματα από τις context-aware εφαρμογές. Για παράδειγμα, όταν ένας χρήστης κατευθύνεται από το γραφείο του με κατεύθυνση το σπίτι του, μια εφαρμογή στο έξυπνο αυτοκίνητό του θα επικοινωνήσει με μια εφαρμογή στο έξυπνο σπίτι του, ώστε ενδεικτικά να ενεργοποιήσει τον κλιματισμό.
- iii. *Tagging*: Τα δεδομένα που παράγονται από ένα αισθητήρα δεν θα επαρκούν για την εκτίμηση μιας κατάστασης, οπότε πρέπει να συγχωνευθούν με τα δεδομένα από τους υπόλοιπους αισθητήρες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι, στο IoT, δισεκατομμύρια αισθητήρες προσκολλημένοι σε αντικείμενα θα είναι συνδεδεμένοι στο Διαδίκτυο, είναι αδύνατον να γίνει από τα υπολογιστικά συστήματα επεξεργασία όλων των δεδομένων που παράγονται. Γίνεται αντιληπτή η αναγκαιότητα context-aware υπολογιστικών συστημάτων που θα προσθέτουν ετικέτες (tags) στα δεδομένα, με βάση την κατηγορία τους, ώστε να γίνεται διάκριση των πληροφοριών που πρέπει να επεξεργάζεται κάθε εφαρμογή.

1.4. Πεδία εφαρμογής του IoT

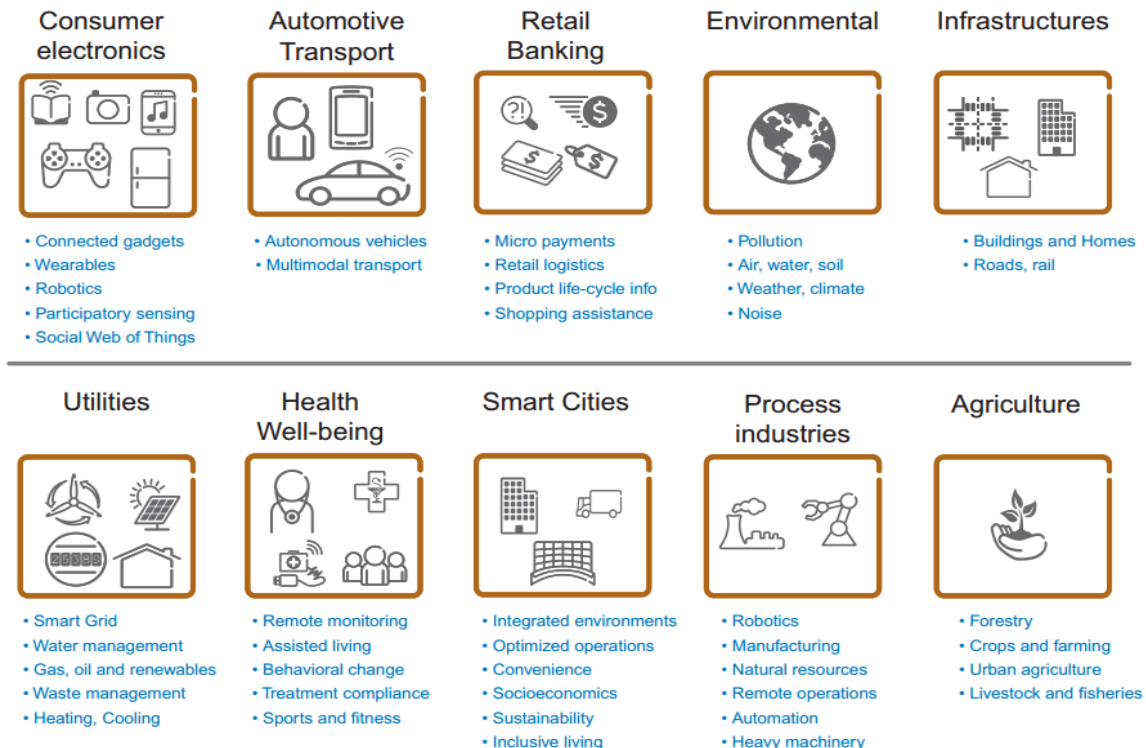
Οι δυνατότητες που θα προσφέρονται από την υποδομή του IoT καθιστούν εφικτή την ανάπτυξη ενός τεράστιου πλήθους εφαρμογών, από το οποίο μόνο ένα μικρό σύνολο είναι διαθέσιμο αυτή τη στιγμή. Τα περιβάλλοντα και τα πεδία στα οποία οι νέες εφαρμογές θα βελτιώσουν την ποιότητα ζωής των ανθρώπων είναι πολυπληθή: το σπίτι, τα ταξίδια, ο χώρος εργασίας, το νοσοκομείο, κλπ. Στα πεδία και τα περιβάλλοντα υπάρχουν, αυτή τη στιγμή, αντικείμενα πρωτόγονης νοημοσύνης, που στις περισσότερες περιπτώσεις δεν έχουν τη δυνατότητα επικοινωνίας. Με την υλοποίηση του IoT, στα αντικείμενα αυτά δοθεί η δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους και να επεξεργάζονται τις πληροφορίες που συλλέγουν από το περιβάλλον τους. Επειδή τα πεδία εφαρμογής θα ποικίλλουν, μπορούν να ενταχθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες [12]: *βιομηχανία, κοινωνία, και περιβάλλον.*

Διαχείριση της αλυσίδας προμηθειών (supply chain management), μεταφορές, λογιστική, αεροδιαστημική, αεροπορία, και αυτοκίνηση είναι μερικά από τα πεδία εφαρμογών του IoT στη *βιομηχανία*. Οι τηλεπικοινωνίες, η ιατρική επιστήμη, οι υπηρεσίες υγείας, και τα έξυπνα κτίρια είναι πεδία εφαρμογών στην *κοινωνία*. Τέλος, γεωργία και γεωπονία, ανακύκλωση, διαχείριση καταστροφών, και παρακολούθηση του περιβάλλοντος είναι μερικά από τα πεδία εφαρμογών στο *περιβάλλον*.

Όσων αφορά την κατηγοριοποίηση των Context-Aware εφαρμογών που θα χρησιμοποιούνται στο IoT, οι A. Asin και D. Gascon ταξινόμησαν τις εφαρμογές στις εξής 12 κατηγορίες: *έξυπνες πόλεις (smart cities), έξυπνο περιβάλλον (smart environment), έξυπνο νερό (smart water), έξυπνες μετρήσεις (smart metering), ασφάλεια και επείγοντα περιστατικά (security and emergencies), λιανεμπόριο (retail), λογιστική (logistics), βιομηχανικός έλεγχος (industrial control), έξυπνη γεωργία (smart agriculture), έξυπνη κτηνοτροφία (smart animal farming), οικιακός αυτοματισμός (domestic and home automation), και ηλεκτρονική υγεία (eHealth).*



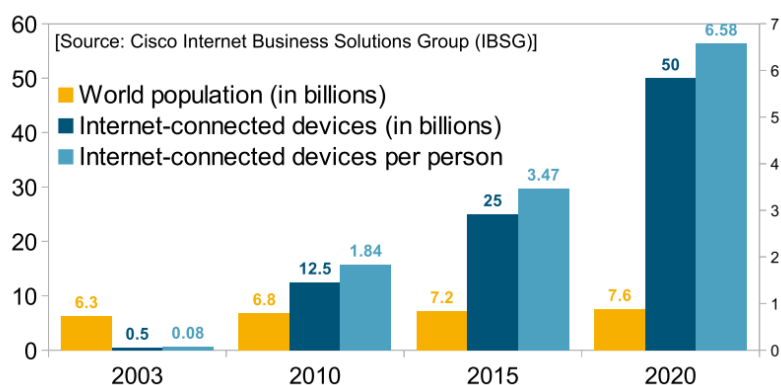
Σχήμα 1.3: Βασικά πεδία εφαρμογής του ΙοΤ και σχετικά σενάρια [10]



Σχήμα 1.4: Αναδυόμενες εφαρμογές στο ΙοΤ [17]

1.5. Στατιστικά στοιχεία σχετικά με την αγορά του IoT

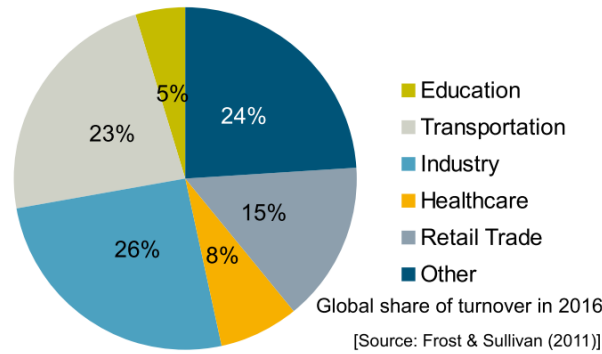
Το όραμα για το IoT ενισχύεται έντονα από τα σχετικά στατιστικά στοιχεία και προβλέψεις. Το 2014 υπολογιζόταν [9] ότι περί τα 1.5 δισεκατομμύρια υπολογιστές και πάνω από 1 δισεκατομμύρια κινητά τηλέφωνα ήταν συνδεδεμένα στο Διαδίκτυο. Μέχρι το 2020, από 50 έως 100 δισεκατομμύρια συσκευές θα είναι συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων, εκτός των Η/Υ και των έξυπνων τηλεφώνων (smartphones), και των ATMs (Automatic Teller Machines), συσκευών και εξοπλισμού στη βιομηχανία, αλλά και μεταφερόμενων προϊόντων. Σύμφωνα με το Σχ. 1.5, έως το 2020 κάθε άνθρωπος στη Γη θα έχει κατά μέσο όρο περισσότερες από 6 συσκευές συνδεδεμένες στο Διαδίκτυο.



Σχήμα 1.5: Αύξηση του αριθμού των διαδικτυακά συνδεδεμένων συσκευών/αντικειμένων έως το 2020

Σύμφωνα με έρευνα του 2011 της BCC, η παγκόσμια αγορά αισθητήρων το 2010 υπολογιζόταν στα \$56.3 δισεκατομμύρια, ενώ το 2011 ήταν στα \$62.8 δις. Αναμενόταν ότι έως το 2016, η αγορά θα είχε φθάσει τα \$91.5 δις, με ετήσιο δείκτη αύξησης 7.8%. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι αισθητήρες θα αποτελούν το μεγαλύτερο τμήμα των διαδικτυακά συνδεδεμένων συσκευών στο IoT, γίνεται αντιληπτό ότι η αγορά στρέφεται προς τις υπηρεσίες και τις λύσεις που θα παρέχει το IoT (IoT solutions).

Μια από τις τεχνικές σύνδεσης αντικειμένων καθημερινής χρήσης σε δίκτυα είναι η τεχνολογία RFID (Radio Frequency Identification Technology), σύμφωνα με την οποία τα δεδομένα που υπάρχουν στο chip που είναι προσκολλημένο σε ένα αντικείμενο μεταδίδονται μέσω ασυρμάτων ζεύξεων. Με τον τρόπο αυτό, η RFID έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει συσκευές σε έξυπνα αντικείμενα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πληθώρα πεδίων. Το μερίδιο της αγοράς RFID ανά πεδίο εφαρμογής φαίνεται στο Σχ. 1.6.



Σχήμα 1.6: Πωλήσεις RFID στα βασικά τμήματα της αγοράς

1.6. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων ως θεμελιώδες τμήμα του IoT

Οι αισθητήρες θα αποτελούν το μεγαλύτερο τμήμα των διαδικτυακά συνδεδεμένων συσκευών στο IoT, άρα τα δίκτυα αισθητήρων θα αποτελούν θεμελιώδες τμήμα των υποδομών του IoT. Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από χωρικά καταναμημένους αυτόνομους αισθητήρες-κόμβους (sensor nodes), οι οποίοι επικοινωνούν με ενσύρματο ή ασύρματο τρόπο και μπορούν να εκτιμήσουν φυσικές ή περιβαλλοντικές συνθήκες, παρακολουθώντας τη θερμοκρασία, τον ήχο, την πίεση, κλπ. Οι αισθητήρες σε ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί να είναι είτε ομογενείς είτε ετερογενείς, και συνεργάζονται ώστε να μεταφέρουν δεδομένα μέσω του δικτύου τους προς μια προεπιλεγμένη κεντρική τοποθεσία. Πολλαπλοί αισθητήρες μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες και πρωτόκολλα.

Υπάρχουν τρεις βασικές αρχιτεκτονικές για τα δίκτυα αισθητήρων:

- *Επίπεδη αρχιτεκτονική (flat architecture)*, στην οποία τα δεδομένα μεταφέρονται από στατικούς κόμβους προς τον τελικό κόμβο (sink node) μέσω πολυβηματικής (multi-hop) επικοινωνίας.
- *Αρχιτεκτονική δύο επιπέδων (two-layer architecture)*, στην οποία χρησιμοποιούνται περισσότεροι στατικοί και κινητοί τελικοί κόμβοι (mobile sink nodes) για τη συλλογή δεδομένων από κόμβους-αισθητήρες.
- *Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων (three-layer architecture)*, στην οποία πολλαπλά δίκτυα αισθητήρων συνδέονται διαδικτυακά (δηλαδή μέσω του Διαδικτύου), και είναι αυτή που θα χρησιμοποιείται στο IoT.

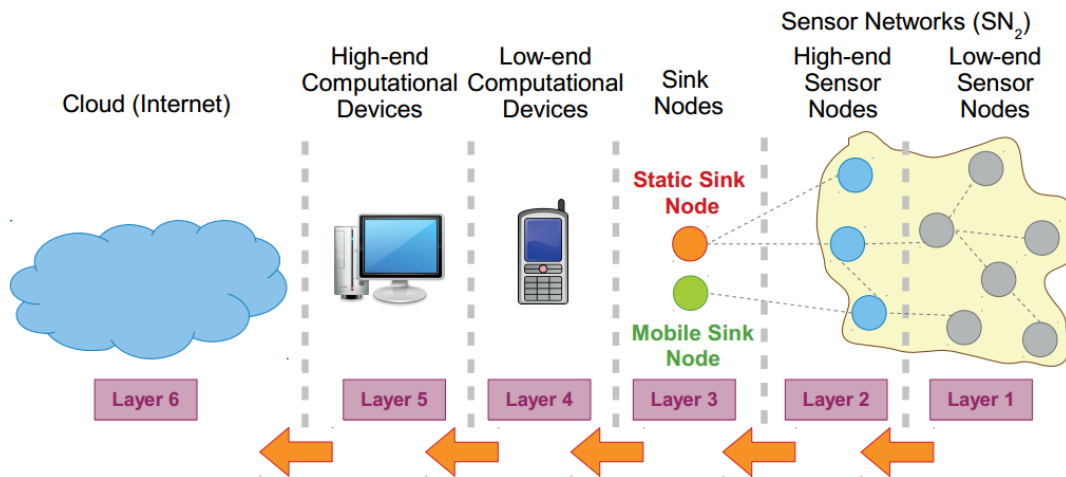
Η πλειοψηφία των σύγχρονων αισθητήρων χρησιμοποιούνται σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSNs), τα οποία λειτουργούν με χρήση διάφορων τεχνολογιών, όπως η τεχνολογία Wireless Personal Area Network (WPAN) (π.χ. Bluetooth), η τεχνολογία Wireless Local Area Network (WLAN) (π.χ. WiFi), η τεχνολογία Wireless Metropolitan

Area Network (WMAN) (π.χ. WiMAX), και τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης (GPS, GLONASS). Επιπλέον, τα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούν πρωτόκολλα επικοινωνίας που χωρίζονται στις εξής δύο κατηγορίες:

- IP based πρωτόκολλα, π.χ. NanoStack, PhyNet, IPv6
- Non-IP based πρωτόκολλα, π.χ. ZigBee, Sensor-Net

Τα δίκτυα αισθητήρων δεν εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια σχεδιασμού των του IoT, αλλά προϋπήρχαν πολύ πριν διατυπωθούν οι λύσεις και οι δυνατότητες που αυτό θα προσφέρει. Ωστόσο, ο σκοπός λειτουργίας τους περιοριζόταν αποκλειστικά σε εφαρμογές συγκεκριμένων κατηγοριών και μόνο, όπως ο περιβαλλοντικός έλεγχος, η γεωργία, και η διαχείριση κινδύνων και καταστροφών. Στο IoT, τα δίκτυα αισθητήρων θα εντάσσονται σε 3 βασικές κατηγορίες:

- Δίκτυα αισθητήρων σώματος (Body Sensor Networks – BSNs)
- Δίκτυα αισθητήρων αντικειμένων (Object Sensor Networks – OSNs)
- Δίκτυα αισθητήρων περιβάλλοντος (Environment Sensor Networks – ESNs)



Σχήμα 1.7: Η δομή ενός δικτύου αισθητήρων σε στρώματα, χωρισμένα αναλόγως με τις δυνατότητες των συσκευών. Στο IoT, η ανωτέρω αρχιτεκτονική μπορεί να περιλαμβάνει πρόσθετα υποστρώματα, καθώς αναμένεται να περιλαμβάνει πολλαπλά είδη αισθητήρων.

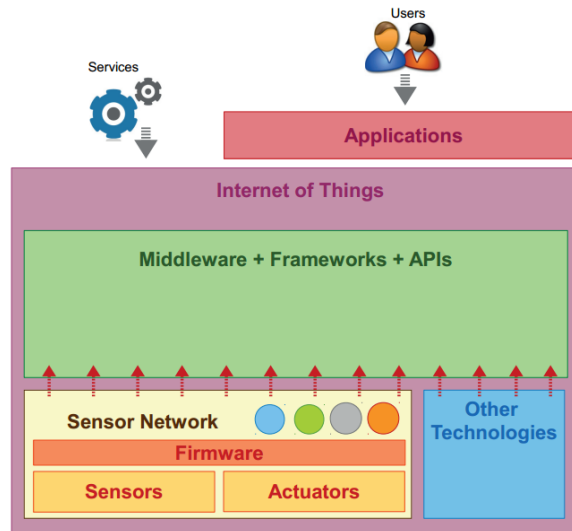
Στο IoT θα γίνεται μαζική χρήση *αισθητήρων* και *ενεργοποιητών* (actuators). Οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή των δεδομένων, τα οποία επεξεργάζονται από τις συσκευές και τις εφαρμογές του IoT και τις οδηγούν στη λήψη αποφάσεων. Οι ενεργοποιητές είναι αυτοί που υλοποιούν τις αποφάσεις.

Μπορούμε να συνοψίσουμε τη σχέση ανάμεσα στα δίκτυα αισθητήρων και το IoT στα εξής τρία σημεία [12]:

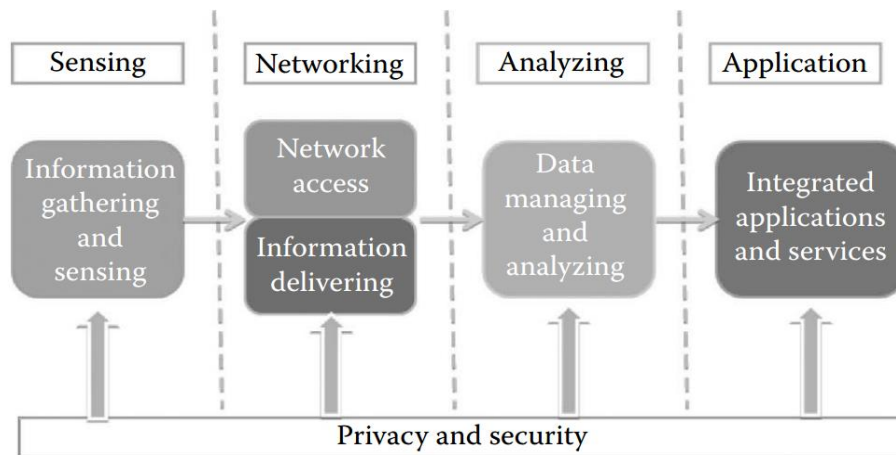
- i. Ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από hardware (αισθητήρες και ενεργοποιητές), firmware, και ένα λεπτό στρώμα λογισμικού. Το IoT περιλαμβάνει ο,τιδήποτε υπάρχει σε ένα δίκτυο αισθητήρων, με την προσθήκη ενός παχέος στρώματος λογισμικού, όπως frameworks, APIs (Application Programming Interfaces), και πολλά άλλα στοιχεία λογισμικού¹. Στις υποδομές του IoT, αυτό το στρώμα λογισμικού είναι εγκατεστημένο στο σύνολο των υπολογιστικών συστημάτων και στο σύννεφο (cloud), δηλαδή στο Διαδίκτυο.
- ii. Από καταβολής τους, τα δίκτυα αισθητήρων σχεδιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για εφαρμογές ειδικού σκοπού. Για παράδειγμα, ένα δίκτυο αισθητήρων για τον εντοπισμό καπνού σε ένα εμπορικό κέντρο σχεδιάζοταν αποκλειστικά και μόνο για το σκοπό αυτό. Αντιθέτως, το IoT δεν εστιάζει σε συγκεκριμένες εφαρμογές αλλά αποτελεί ουσιαστικά ένα δίκτυο αισθητήρων *γενικού σκοπού*, υποστηρίζοντας εφαρμογές διαφόρων ειδών και ειδικού σκοπού. Συνεπώς, κατά το στάδιο της εγκατάστασης των αισθητήρων για το IoT, βασικός στόχος δεν θα είναι η συλλογή δεδομένων συγκεκριμένου είδους, αλλά η τοποθέτηση των αισθητήρων θα αποσκοπεί στη χρήση τους για συλλογή δεδομένων από τα περισσότερα δυνατά πεδία εφαρμογών, ενώ η επιλογή των κατάλληλων αισθητηριακών δεδομένων για κάθε περίπτωση θα γίνεται από τις context-aware εφαρμογές. Για παράδειγμα, μια εταιρεία μπορεί να τοποθετήσει αισθητήρες πίεσης σε μια γέφυρα για την παρακολούθηση της ακεραιότητάς της. Οι αισθητήρες αυτοί, όμως, μπορούν μεταγενέστερα να συνδεθούν με άλλους αισθητήρες και να χρησιμοποιηθούν σε μια εφαρμογή υπολογισμού της κίνησης πάνω στη γέφυρα.
- iii. Τα δίκτυα αισθητήρων υφίστανται χωρίς το IoT. Το αντίστροφο, ωστόσο, δεν συμβαίνει, διότι τα δίκτυα αισθητήρων παρέχουν στο IoT το σύνολο των δεδομένων προς επεξεργασία από τις context-aware εφαρμογές. Εκτός των δικτύων αυτών, υπάρχουν πρόσθετες τεχνολογίες που μπορούν να παρέχουν στο IoT πρόσβαση στο hardware των αισθητήρων, όπως τα ad-hoc δίκτυα. Ωστόσο, τα ad-hoc δίκτυα δεν είναι επεκτάσιμα

¹ Ένα στρώμα λογισμικού αποτελείται από τμήματα λογισμικού. Ένα λεπτό στρώμα αποτελείται από μερικά προγράμματα και εφαρμογές, ενώ ένα παχύ στρώμα αποτελείται από προγράμματα και εφαρμογές, frameworks, APIs (Application Programming Interfaces), κλπ.

(scalable) και δεν μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες του IoT ατομικά, καίτοι μπορούν να λειτουργήσουν συμπληρωματικά ως προς τη βασική υποδομή του IoT.



Σχήμα 1.8: Η σχέση ανάμεσα στα δίκτυα αισθητήρων και το IoT



Σχήμα 1.9: Η υλοποίηση του IoT σε τέσσερα στρώματα

Κεφάλαιο 2^ο

Οι M2M Επικοινωνίες και το IoT

2.1. Εισαγωγή στην Επικοινωνία M2M. Η σχέση της με IoT, WSNs, και CPS

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 1, το όραμα του IoT έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλές τα τελευταία χρόνια μέσω των σημερινών αντιπροσωπευτικών πεδίων εφαρμογής του. Κάποια από αυτά είναι οι έξυπνες μετακινήσεις (Intelligent Transportation), η ηλεκτρονική υγεία (e-Health), η παρακολούθηση της συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου, κλπ. Οι εφαρμογές αυτές, παρά την πρώιμη μορφή τους, είναι τυπικά παραδείγματα για το ποιες μπορεί να είναι οι υπηρεσίες που θα προσφέρει το IoT στους χρήστες του, αλλά και πώς θα γίνεται η επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων συσκευών που θα χρησιμοποιούνται. Η επικοινωνία αυτή είναι επικοινωνία μεταξύ μηχανών/συσκευών, η οποία αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως M2M Επικοινωνία (Machine-to-Machine Communication), ή Machine-Type-Communication (MTC). Συχνά, οι όροι M2M και IoT χρησιμοποιούνται εναλλακτικά. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια προσπάθεια αποσαφήνισης των διαφορών μεταξύ τους και θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στις M2M επικοινωνίες και τα συστήματα που τις χρησιμοποιούν.

Η M2M επικοινωνία αναφέρεται στην επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών, ενσωματωμένων συστημάτων (επεξεργαστών), έξυπνων αισθητήρων (δηλαδή συσκευών μέτρησης), ενεργοποιητών (δηλαδή ελεγχόμενες συσκευές και κινητήρες, όπως διακόπτες ισχύος, θερμοστάτες, και βαλβίδες), και κινητών συσκευών με ελάχιστη ή πλήρως απύουσα ανθρώπινη παρέμβαση. Η λογική που ωθεί την ανάπτυξη των M2M επικοινωνιών βασίζεται σε δύο αρχές:

- Μια δικτυωμένη συσκευή/μηχανή είναι κατά πολύ χρησιμότερη από μια απομονωμένη.
- Οι αυτόνομες και ευφυείς εφαρμογές γενικώς απαιτούν τη συμμετοχή πολλαπλών συσκευών. Συνεπώς, η διασύνδεση πολλαπλών συσκευών/μηχανών είναι απαραίτητη για την υλοποίηση αυτόνομων και ευφύων εφαρμογών, όπως οι M2M εφαρμογές.

Συνεπώς, ο όρος M2M (Machine-to-Machine) αναφέρεται στις τεχνολογίες εκείνες που επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ συσκευών/μηχανών, είτε ασύρματα είτε ενσύρματα, με την ελάχιστη δυνατή ανθρώπινη παρέμβαση. Η τεχνολογία M2M χρησιμοποιεί συσκευές (κατά κύριο λόγο αισθητήρες) για να καταγράψει γεγονότα/συνθήκες (όπως το επίπεδο της θερμοκρασίας), τα οποία μεταφέρονται μέσω δικτύων (ασύρματων, ενσύρματων, ή υβριδικών) προς εφαρμογές λογισμικού, οι οποίες μεταφράζουν τις καταγραφές σε πληροφορίες κατανοητές για τους χρήστες (end users) [17, 18].

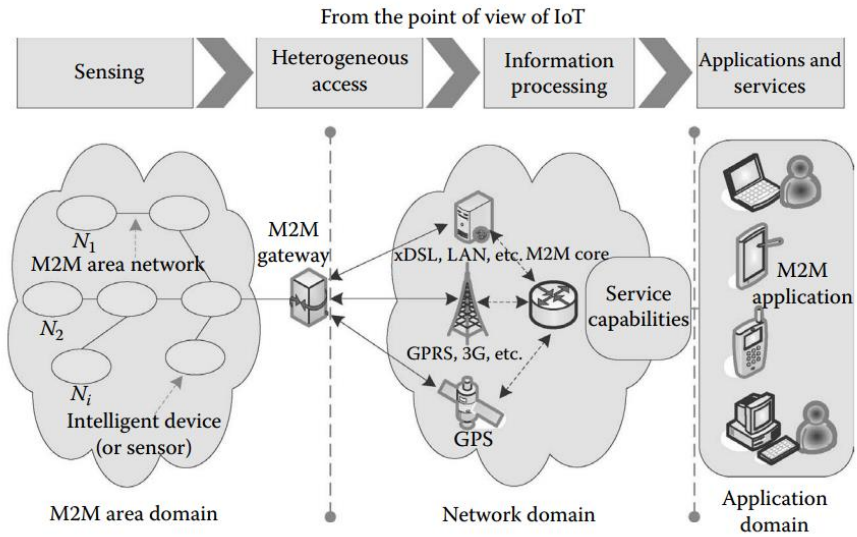
Μολονότι οι όροι M2M και IoT συχνά συγχέονται, υπάρχουν βασικές παράμετροι που τους διαφοροποιούν. Το IoT αναφέρεται στη διασύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών και αντικειμένων εφοδιασμένων με αισθητήρες μέσω του Διαδικτύου, καθώς και στη μαζική (και σε πολλές περιπτώσεις ανοικτή) πρόσβαση σε σύνολα δεδομένων, από context-aware εφαρμογές και υπολογιστικά συστήματα που μπορούν να χρησιμοποιούνται από οποιονδήποτε χρήστη, οπουδήποτε και οποτεδήποτε. Η επικοινωνία ανάμεσα στις συσκευές και τα αντικείμενα θα είναι τύπου M2M. Ωστόσο, τα τρέχοντα συστήματα M2M δεν παρέχουν ακόμα ανοικτή πρόσβαση σε δεδομένα ή άμεση σύνδεση των συσκευών M2M στο Διαδίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα M2M συνδέουν ένα τεράστιο αριθμό κόμβων (συσκευών/μηχανών και αισθητήρων), παρέχοντάς τους τη δυνατότητα ακατάπαυστης επικοινωνίας, διαλειτουργικότητας, αυτόνομης λειτουργίας (ελαχιστοποιώντας την ανθρώπινη παρέμβαση), και αυτό-οργάνωσης, ενώ δίνουν έμφαση στη δικτύωση και τις εφαρμογές, υλοποιώντας το IoT μεσοπρόθεσμα. Ωστόσο, η μελλοντική μορφή του IoT θα περιλαμβάνει ευφυή επεξεργασία πληροφορίας (με τη χρήση, για παράδειγμα, νευρωνικών δικτύων), νοημοσύνη του περιβάλλοντος (ambient intelligence), συγχώνευση δεδομένων, και κατανεμημένο έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, χαρακτηριστικά τα οποία δε θα υποστηρίζονται από τις υποδομές M2M.

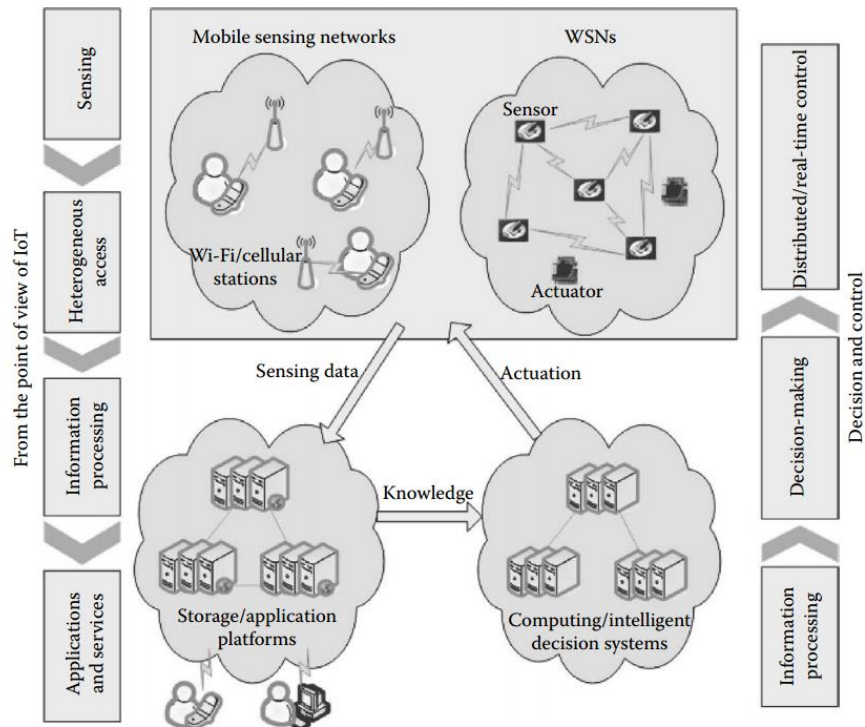
Με την ανάπτυξη προηγμένων δικτυακών τεχνικών, κατανεμημένου πολυδιάστατου ελέγχου, και του cloud computing, δημιουργείται η τάση της εξέλιξης των συστημάτων M2M σε περισσότερο ευέλικτα και ευφυή συστήματα που θα μπορούν να υποστηρίξουν τα χαρακτηριστικά που είναι επιθυμητό να έχει το IoT στο μέλλον. Η εξελιγμένη μορφή των συστημάτων M2M προσδιορίζεται με τον όρο *Cyber-Physical Systems (CPS)*, και αναφέρεται σε συστήματα όπου υπάρχει στενός συνδυασμός και συντονισμός ανάμεσα στα υπολογιστικά και φυσικά τους στοιχεία μέσω της χρήσης εξελιγμένων τεχνολογιών υπολογισμού και επικοινωνίας. Τα CPS θα στοχεύουν στην ενσωμάτωση της υπολογιστικής νοημοσύνης στην αλληλεπίδραση συσκευών και εφαρμογών, οδηγώντας σε μια προηγμένη υλοποίηση του IoT.

Στο Κεφ. 1 αναφέρθηκε ότι τα WSNs αποτελούν θεμελιώδες τμήμα των υποδομών για το IoT. Στην υλοποίηση του IoT μέσω των συστημάτων M2M, τα συστήματα αυτά μπορούν να συλλέξουν ένα μεγάλο εύρος πληροφοριών από αισθητήρες με πρόσβαση στα WSNs. Συνεπώς, οι συσκευές/μηχανές μπορούν, συμπληρωματικά με τις πληροφορίες που λαμβάνουν από άλλες μηχανές μέσω M2M επικοινωνίας, να προβούν σε αποφάσεις βασιζόμενες σε πληροφορίες που συλλέγουν από τα WSNs. Υπό την έννοια αυτή, θεωρείται γενικά ότι τα WSNs λειτουργούν συμπληρωματικά ως προς τα συστήματα M2M στο πλαίσιο του IoT.

Όσον αφορά τη σχέση ανάμεσα στα WSNs και τα CPS, τα πρώτα είναι το θεμέλιο για την ανάπτυξη των CPS. Τα CPS θα έχουν ως στόχο τη μαζική δικτύωση και διασύνδεση έξυπνων συσκευών και την παροχή ευφύων υπηρεσιών που θα χρησιμοποιούν τη γνώση που θα συλλέγεται από τον περιβάλλοντα φυσικό κόσμο. Η συλλογή αυτή θα γίνεται μέσω των WSNs.



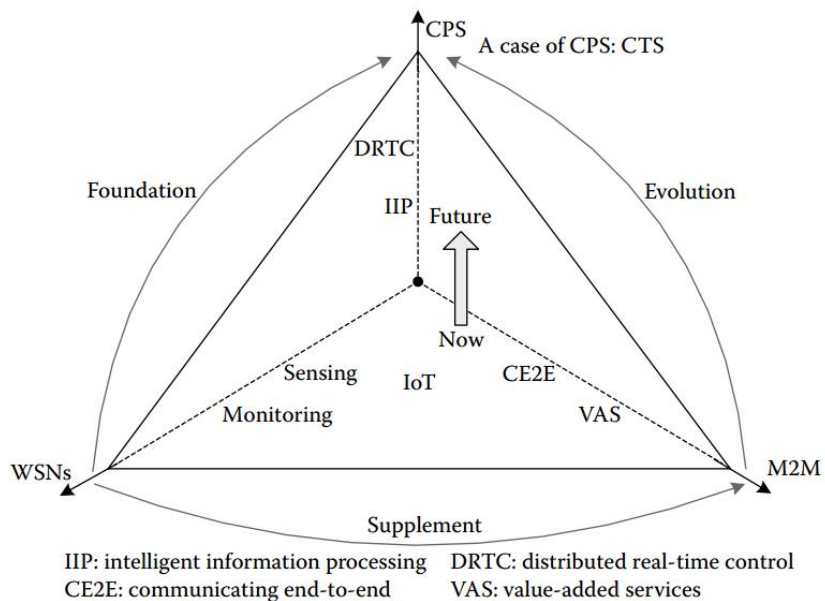
Σχήμα 2.1: Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής ενός συστήματος M2M από την πλευρά του IoT



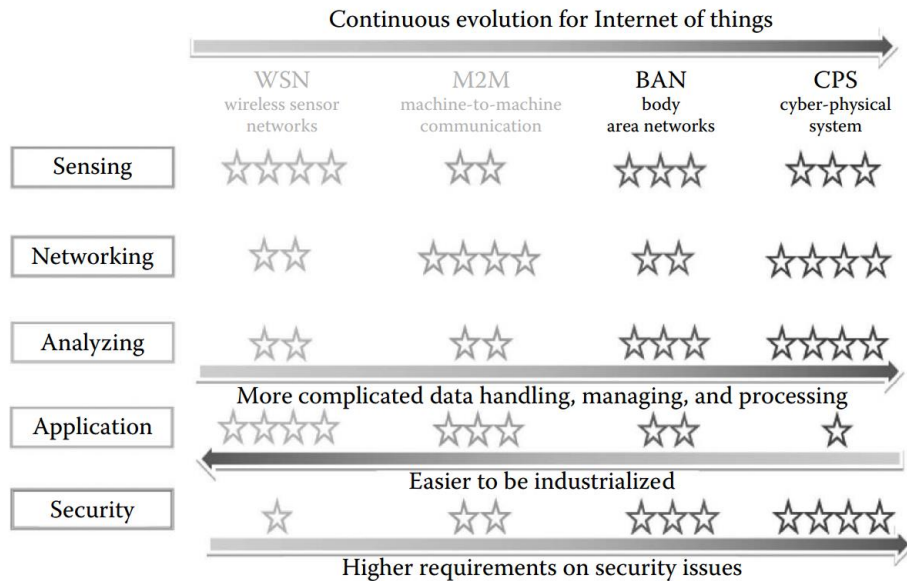
Σχήμα 2.2: Επισκόπηση της αρχιτεκτονικής ενός CPS από την πλευρά του IoT και από την πλευρά του πεδίου απόφασης και ελέγχου

Ταξινόμηση τεχνολογίας	Συσχετισμοί
WSNs, M2M, CPS	Όλα συμπεριλαμβάνονται στην ευρύτερη έννοια του IoT από πλευράς αρχιτεκτονικής.
WSNs	Αποτελούν βασικό στοιχείο των υποδομών για το IoT και θεμέλιο των CPS, ενώ η λειτουργία τους είναι συμπληρωματική προς αυτή των συστημάτων M2M.
M2M	Η βασική υποδομή για την υλοποίηση του IoT μεσοπρόθεσμα.
CPS	Μια εξελιγμένη μορφή των συστημάτων M2M, με κύριο χαρακτηριστικό την ευφυή επεξεργασία πληροφοριών και την ευελιξία. Τα CPS αποτελούν τη βασική υποδομή για την υλοποίηση του IoT μακροπρόθεσμα.

Πίνακας 2.1: Οι συσχετισμοί ανάμεσα στα M2M, WSNs, CPS, και το IoT



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση των συσχετισμών ανάμεσα στα συστήματα M2M, τα WSNs, τα CPS, και το IoT



Σχήμα 2.4: Η συνεχής εξέλιξη προς τα CPS, που θα είναι η βασική μορφή του IoT στο μέλλον. Τα άστρα χαρακτηρίζουν το βάρος με το οποίο θα χρησιμοποιείται η αντίστοιχη τεχνολογία στο αντίστοιχο επίπεδο

2.2. Επισκόπηση ενός τυπικού συστήματος M2M

Τα συστήματα M2M χρησιμοποιούνται από εταιρίες και οργανισμούς για αύξηση της παραγωγικότητας, μείωση του κόστους παραγωγής και λειτουργίας, και ενίσχυση της ασφάλειας. Η χρήση τους γίνεται σε διάφορα σενάρια, όπως απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχος κεφαλαίων (δηλαδή περιουσιακών στοιχείων ενεργητικού, όπως μηχανήματα, κτίρια, και εγκαταστάσεις), και η παροχή δυνατότητας επικοινωνίας σε απομακρυσμένες συσκευές/μηχανές με σκοπό τη συνδεσιμότητά τους. Η απομακρυσμένη παρακολούθηση και ο έλεγχος έχουν ως βασικό πεδίο εφαρμογής τη βιομηχανία, ενώ η συνδεσιμότητα σενάρια διασύνδεσης αυτόματων πωλητών και τερματικά ηλεκτρονικών συναλλαγών. Επιπλέον, κοινό χαρακτηριστικό των συστημάτων M2M, όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1, είναι ότι γενικά, στην παρούσα μορφή τους, δεν παρέχουν ανοικτή πρόσβαση σε δεδομένα ή άμεση σύνδεση των συσκευών τους στο Διαδίκτυο.

Ένα τυπικό σύστημα M2M αποτελείται από:

- i. Συσκευές/μηχανές M2M.
- ii. Δίκτυα επικοινωνίας που παρέχουν συνδεσιμότητα απομακρυσμένων συσκευών.
- iii. Εφαρμογές που παρέχουν υπηρεσίες.
- iv. Ενσωμάτωση των εφαρμογών M2M στις διαδικασίες που υλοποιεί μια επιχείρηση μέσω ενός συστήματος πληροφοριών (IT system). Συγκεκριμένα, ένα σύστημα M2M

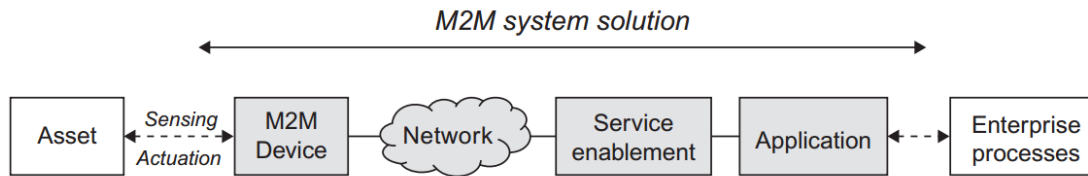
χρησιμοποιείται από εταιρείες για την απομακρυσμένη παρακολούθηση και τον έλεγχο κεφαλαίων και εγκαταστάσεων, όπως οχήματα, containers, κτίρια, έξυπνοι μετρητές και αισθητήρες, κλπ, και την ενσωμάτωσή τους στις επιχειρηματικές τους δραστηριότητες.

Οι συνιστώσες ενός συστήματος M2M είναι οι ακόλουθες:

- *Συσκευές M2M*: Ο όρος αναφέρεται σε συσκευές που μπορούν να συνδεθούν σε κάποιο τοπικό δίκτυο (ή απευθείας στο Διαδίκτυο) και να επικοινωνούν μεταξύ τους με ελάχιστη (ή μηδενική) ανθρώπινη παρέμβαση. Αυτές μπορεί να είναι:
 - i. Διατάξεις τοποθετημένες στα κεφάλαια (ακίνητα και κινητά) μιας εταιρείας, που παρέχουν δυνατότητες αισθητήρων και ενεργοποιητών.
 - ii. Ηλεκτρικές συσκευές με ενσωματωμένους αισθητήρες (π.χ. ψυγείο, πλυντήριο), κινητά τηλέφωνα, ρολόγια χειρός, κλπ.

Το είδος μιας συσκευής M2M περιλαμβάνεται σε ένα εύρος πιθανών ειδών που κυμαίνεται από απλούς αισθητήρες χαμηλών προδιαγραφών μέχρι σύνθετες διατάξεις υψηλών προδιαγραφών με πολλαπλές αισθητηριακές λειτουργίες. Εκτενέστερη ανάλυση των συσκευών M2M πραγματοποιείται στην παράγραφο 2.3.1.

- *M2M Δίκτυα*: Ως δίκτυο M2M ορίζεται το σύνολο των M2M συσκευών που χρησιμοποιούνται σε μία εφαρμογή και ο τρόπος διασύνδεσης των συσκευών αυτών. Ο σκοπός ενός δικτύου M2M είναι να παρέχει αδιάλειπτη συνδεσιμότητα ανάμεσα στις συσκευές M2M και τους εξυπηρετητές (servers) που υλοποιούν την εφαρμογή από πλευράς λογισμικού.
- *M2M Εφαρμογές*: Υπό τον όρο M2M εφαρμογές ορίζονται οι ολοκληρωμένες λύσεις που παρέχονται για την επίλυση κάποιου προβλήματος ή την αντιμετώπιση κάποιας ανάγκης. Περιλαμβάνουν συσκευές M2M, κατάλληλο λογισμικό, και την απαραίτητη τεχνική υποστήριξη από τον πάροχο της εφαρμογής που απαιτείται για την ορθή λειτουργία από άκρο σε άκρο (end-to-end). Αυτές ποικίλλουν από ψυχαγωγικής μορφής με τελικό χρήστη κάποιον μεμονωμένο άτομο μέχρι εταιρικές εφαρμογές υψηλού επιπέδου που έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένη λειτουργία (π.χ. παρακολούθηση στόλου οχημάτων με ταυτόχρονη καταγραφή της οδικής συμπεριφοράς του οδηγού).
- *Ενεργοποίηση Υπηρεσιών M2M (M2M Service Enablement)*: Αυτή η συνιστώσα παρέχει γενική λειτουργικότητα του συστήματος M2M σε όλες τις M2M εφαρμογές που χρησιμοποιούνται. Βασικός σκοπός της είναι να διευκολύνει την ανάπτυξή τους και να μειώσει το κόστος υλοποίησής τους.



Σχήμα 2.5: Επισκόπηση ενός τυπικού συστήματος M2M

2.3. Ανάλυση των βασικών στοιχείων των συστημάτων M2M

2.3.1. Συσκευές και gateways M2M

Γενικά, μια συσκευή M2M είναι μια μονάδα hardware που μπορεί να αντιληφθεί συγκεκριμένες παραμέτρους του περιβάλλοντός της και να πραγματοποιήσει λειτουργίες μέσα σε αυτό. Μια συσκευή M2M, η οποία μπορεί να έχει δυνατότητα αυτόνομης επικοινωνίας με άλλες συσκευές M2M και διασύνδεσης, διαθέτει διάφορα στοιχεία και ιδιότητες. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται:

- *Μικρο-ελεγκτής (Microcontroller)*: Χρήση μνήμης 8-, 16-, ή 32-bit.
- *Πηγή ενέργειας*: Σταθερή παροχή ισχύος, μπαταρία, διάταξη συλλογής ενέργειας (π.χ. ηλιακής ενέργειας), ή υβριδική.
- *Αισθητήρες και ενεργοποιητές*: Είτε είναι προσκολλημένοι στη συσκευή M2M και αυτόνομοι είτε βρίσκονται σε συγκεκριμένη συνδεσμολογία που επιτρέπει στη συσκευή τον έλεγχό τους.
- *Επικοινωνία*: Ασύρματη ή ενσύρματη, μέσω LAN, WAN, ή κυψελωτού δικτύου.
- *Λειτουργικό Σύστημα (OS)*
- *Εφαρμογές*: Μπορεί να είναι είτε εφαρμογές απλής δειγματοληψίας από τους αισθητήρες είτε περισσότερο σύνθετες και προηγμένες.
- *Διεπαφή χρήστη (User Interface)*: Οθόνη, κουμπιά, ή άλλες λειτουργίες για αλληλεπίδραση με το χρήστη.
- *Διαχείριση συσκευής (Device Management)*: Firmware, τροφοδοσία, έλεγχος
- *Περιβάλλον εκτέλεσης εφαρμογών (Execution Environment)*: Διεπαφή προγραμματισμού των εφαρμογών (Application Programming Interface – API)

Οι συσκευές M2M μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο γενικές κατηγορίες:

- *Βασικές συσκευές*: Συσκευές οι οποίες υποστηρίζουν αποκλειστικά βασικές λειτουργίες δειγματοληψίας σε αισθητήρες και κίνησης, και πολλές φορές έχουν περιορισμένη αλληλεπίδραση με το χρήστη. Είναι σχεδιασμένες για τοπική δικτύωση, οπότε για διασύνδεση μέσω WAN απαιτείται η χρήση συσκευών gateway.

- *Προηγμένες συσκευές*: Συσκευές οι οποίες, εκτός των βασικών λειτουργιών, έχουν τη δυνατότητα εκτέλεσης εφαρμογών και απευθείας σύνδεσης σε WAN. Επίσης, μπορούν να περιλαμβάνουν περιβάλλον εκτέλεσης πολλαπλών εφαρμογών. Οι συσκευές gateway ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία.

Οι χρήσεις και τα παραδείγματα συσκευών που μπορεί κανείς να συναντήσει σε πραγματικές εφαρμογές M2M ποικίλλουν αντιστοίχως με την κατηγορία της συσκευής. Για τις βασικές συσκευές, μερικά συνήθη παραδείγματα χρήσης είναι τα ακόλουθα:

- *Οικιακές Συσκευές Συναγερμού (Home Alarms)*: Τέτοιες συσκευές μπορεί να είναι αισθητήρες κίνησης, μαγνητικοί αισθητήρες, ή αισθητήρες καπνού. Υπάρχει μια συσκευή gateway, η οποία αναλαμβάνει την εκτέλεση της εφαρμογής και ενεργοποιεί το συναγερμό ή/και ειδοποιεί την ασφάλεια όταν κάποιος αισθητήρας ενεργοποιείται. Επίσης, η συσκευή gateway χειρίζεται την επικοινωνία, μέσω WAN, με το κεντρικό σημείο παροχής υπηρεσιών ασφαλείας.
- *Έξυπνοι Μετρητές (Smart Meters)*: Είναι εγκατεστημένοι σε οικιακούς χώρους, σε σενάρια Οικιακών Δικτύων (Home Area Networks), και μετρούν την κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος, πετρελαίου, κλπ. Υπάρχει μια συσκευή gateway, η οποία συσσωρεύει τα δεδομένα από τους μετρητές, συναθροίζει τα δεδομένα, και περιοδικά τα μεταδίδει προς κάποιον εξυπηρετητή μέσω του κυψελωτού δικτύου. Με χρήση τριχοειδούς (capillary) δικτύου (π.χ. με χρήση του προτύπου IEEE 802.15.4 - ZigBee), υπάρχει η δυνατότητα αύξησης της εμβέλειας της συσκευής gateway, επιτρέποντας σε κάποιους μετρητές να χρησιμοποιήσουν άλλους μετρητές ως επέκταση των πρώτων, μέσω πολυβηματικής (multi-hop) επικοινωνίας, παράλληλα με την ύπαρξη συσκευών με διεπαφή αλληλεπίδρασης με το χρήστη.
- *Συστήματα Αυτοματισμού Κτιρίων (Building Automation Systems – BASs)*: Χρησιμοποιούνται συσκευές όπως θερμοστάτες, ανεμιστήρες, και αισθητήρες κίνησης, ελεγχόμενοι είτε τοπικά είτε απομακρυσμένα.
- *Αυτόνομοι Έξυπνοι Θερμοστάτες (Standalone Smart Thermostats)*: Χρησιμοποιούν τεχνολογία WiFi (πρότυπα IEEE 802.11) για απευθείας επικοινωνία με εξυπηρετητές που υλοποιούν τις εφαρμογές από πλευράς λογισμικού.

Για τις προηγμένες συσκευές, μερικά συνήθη παραδείγματα χρήσης είναι τα ακόλουθα:

- *Συσκευές ενσωματωμένες σε αυτοκίνητα*, οι οποίες χρησιμοποιούνται για απομακρυσμένη επισκόπηση και έλεγχο, μέσω σύνδεσης με χρήση του κυψελωτού δικτύου.
- *Ρομπότ και αυτόνομα οχήματα*, όπως μη-επανδρωμένα αιωρούμενα οχήματα που λειτουργούν είτε αυτόνομα είτε με απομακρυσμένο έλεγχο μέσω σύνδεσης με χρήση του κυψελωτού δικτύου.
- *Κάμερες*, για απομακρυσμένη παρακολούθηση μέσω του κυψελωτού δικτύου
- *Διασύνδεση εκτυπωτών*, οι οποίοι μπορούν να αναβαθμιστούν και να εξυπηρετηθούν απομακρυσμένα.

Στις σημερινές εφαρμογές M2M, οι διάφορες συσκευές χρησιμοποιούν τεχνολογίες επικοινωνίας όπως οι KNX, Z-Wave, και ZigBee. Ωστόσο, στα μελλοντικά δίκτυα M2M που θα χρησιμοποιούνται στο IoT, προβλέπεται ότι κάθε συσκευή θα έχει δική της, μοναδική διεύθυνση IP, και θα είναι συνδεδεμένη στο Διαδίκτυο, είτε έμμεσα είτε απευθείας.

Όσον αφορά τις M2M συσκευές gateway, είναι συσκευές που διασφαλίζουν τη σύνδεση των συσκευών M2M στο Διαδίκτυο και τη διασύνδεσή τους στα στρώματα του δικτύου και της εφαρμογής. Επίσης, υπάρχουν gateways που λειτουργούν στο στρώμα της εφαρμογής (Application Layer Gateways – ALGs), εκτελώντας M2M εφαρμογές από πλευράς λογισμικού και παρέχοντας υπηρεσίες σε άλλες συσκευές M2M. Οι ALGs περιλαμβάνουν τουλάχιστον μια μονάδα hardware για επικοινωνία μέσω τοπικού δικτύου, και συνήθως μια (ή και περισσότερες) μονάδες για επικοινωνία με ασύρματα WANs και με το κυψελωτό δίκτυο.

2.3.2. Επισκόπηση Τεχνολογιών Διασύνδεσης συσκευών στις M2M Επικοινωνίες

Στον Πίνακα 2.2 [22] καταγράφονται οι κυριότερες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση συσκευών στα δίκτυα M2M. Εκτενέστερη αναφορά στις τεχνολογίες αυτές γίνεται στο Κεφ. 3, όπου και αναλύεται η αρχιτεκτονική των δικτύων M2M.

Τεχνολογία	Πρότυπο IEEE	Συχνότητα λειτουργίας	Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	Απόσταση μετάδοσης	Κατανάλωση ενέργειας	Διάρκεια ζωής μπαταρίας συσκευής	Γνωστές εφαρμογές	Σύνδεση στο Διαδίκτυο
Ethernet	802.3	-	Από 10 Mbps έως και 100 Gbps	100 m	Χαμηλή	Υψηλή	Χρήση σε δίκτυα Η/Υ	Ναι, μέσω δρομολογητή
WiFi	802.11	2.4 GHz, 5 GHz, 60 GHz	Πάνω από 1300 Mbps	50 m για τα 2.4 και 5 GHz, 10m για τα 60 GHz	Υψηλή	Χαμηλή	Χρήση σε εσωτερικούς χώρους	Ναι
ZigBee/6LoWPAN	802.15.4	915 MHz, 868 MHz, 2.4 GHz	Έως και 250 Kbps	10 – 20 m	Χαμηλή	Υψηλή	Συσκευές IoT	Ναι, μέσω δρομολογητή
Bluetooth 4.0	802.15.1	2.4 GHz	Έως και 50 Mbps	200 m	Χαμηλή	Υψηλή	Διασυνδεδεμένα προσωπικά αντικείμενα	Ναι, μέσω δρομολογητή
UWB WPAN	802.15.3a	3.1 – 10.6 GHz	Από 480 Mbps έως και 1.6 Gbps	30 m	Χαμηλή	Υψηλή	Διασυνδεδεμένα προσωπικά αντικείμενα	Ναι, μέσω δρομολογητή
WBAN	802.15.6	2.4 GHz	Έως και 200 Kbps	5 m	Χαμηλή	Υψηλή	Διασυνδεδεμένα προσωπικά αντικείμενα	Ναι, μέσω δρομολογητή
LTE	-	800, 900, 1800, 2100, 2600 MHz	Έως και 1 Gbps	1 - 10 Km	Υψηλή	Χαμηλή	Κινητά τηλέφωνα και συσκευές που χρησιμοποιούν δεδομένα	Ναι
Cellular (όχι μόνο LTE)	-	800, 900, 1800, 2100, 2600 MHz	Έως και 1 Gbps	10 Km	Υψηλή	Χαμηλή	Κινητά τηλέφωνα και συσκευές που χρησιμοποιούν δεδομένα	Ναι
LTE-M (Rel. 13)	-	800, 900, 1800, 2100, 2600 MHz	Έως και 100 Kbps	1 – 10 Km	Χαμηλή	Υψηλή	Συσκευές M2M	Ναι

Πίνακας 2.2: Επισκόπηση κυριότερων τεχνολογιών διασύνδεσης συσκευών M2M

2.3.3. Διαχείριση δεδομένων στα συστήματα M2M

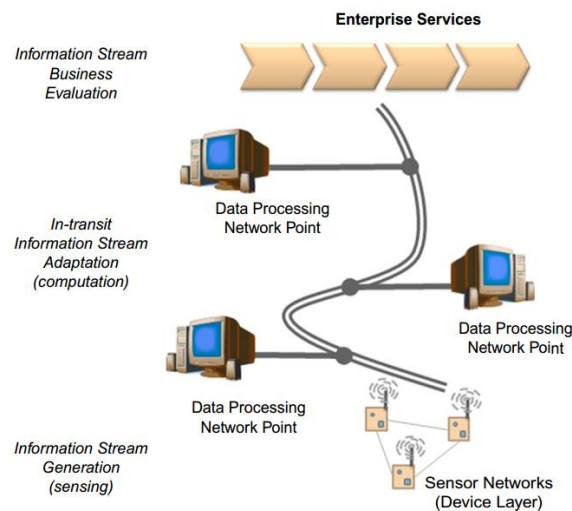
Οι σύγχρονες επιχειρήσεις πρέπει να είναι ευέλικτες και να επιτελούν λειτουργίες που βασίζονται στη λήψη πολλαπλών αποφάσεων. Για να το πετύχουν αυτό, πρέπει κάθε στιγμή να έχουν στη διάθεσή τους τις απαραίτητες πληροφορίες και δεδομένα που τους παρέχουν οι λύσεις M2M (M2M solutions).

Τα βασικά χαρακτηριστικά των M2M δεδομένων είναι τα ακόλουθα:

- *Πολύ μεγάλου πλήθους Δεδομένα (Big Data)*: Ο όγκος των M2M δεδομένων είναι πολύ μεγάλος, δεδομένου ότι πρέπει να καταγράφονται όλες οι διαδικασίες στις οποίες συμμετέχουν οι συσκευές M2M.
- *Ετερογενή Δεδομένα (Heterogenous Data)*: Τα M2M δεδομένα παράγονται από μεγάλη ποικιλία συσκευών, οι οποίες είναι και αυτές ετερογενείς σε μεγάλο βαθμό, και διαφέρουν ως προς το ρυθμό δειγματοληψίας, το είδος των τιμών (values), κλπ.
- *Πραγματικά Δεδομένα (Real-World Data)*: Αποτελούν την πλειοψηφία των M2M δεδομένων, τα οποία είναι σχετικά με διαδικασίες που συμβαίνουν στον πραγματικό κόσμο και είναι εξαρτώμενα από το περιβάλλον στο οποίο καταγράφηκαν.
- *Δεδομένα Πραγματικού Χρόνου (Real-Time Data)*: Τα M2M δεδομένα παράγονται και μεταδίδονται σε πραγματικό χρόνο. Το τελευταίο έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς για πολλές επιχειρήσεις είναι απαραίτητη η επεξεργασία των δεδομένων M2M σε πραγματικό χρόνο.
- *Χρονικά Δεδομένα (Temporal Data)*: Η συντριπτική πλειοψηφία των M2M δεδομένων είναι χρονικής φύσης, υπό την έννοια ότι μετρούν τιμές του περιβάλλοντος για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- *Χωρικά Δεδομένα (Spatial Data)*: Όλο και περισσότερο, τα M2M δεδομένα δεν καταγράφονται μόνο από κινητές συσκευές, αλλά αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και η εκτίμησή τους μπορεί να αλλάζει δυναμικά αναλόγως της τοποθεσίας.
- *Πολυμορφικά Δεδομένα (Polymorphic Data)*: Τα σύνολα δεδομένων που καταγράφονται από τις M2M συσκευές μπορεί να είναι πολύπλοκα και να αποτελούνται από πολλά είδη δεδομένων τα οποία έχουν διαφορετική σημασία αντιστοίχως με τη διαδικασία στην οποία χρησιμοποιούνται.
- *Ιδιωτικά Δεδομένα (Proprietary Data)*: Έως τώρα, η πλειοψηφία των M2M δεδομένων καταγράφονται και αποθηκεύονται σε ιδιωτικές πλατφόρμες. Ωστόσο, λόγω της μαζικής αλληλεπίδρασης ετερογενών συσκευών, έχουν αρχίσει και υιοθετούνται πολιτικές ανοικτής πρόσβασης δεδομένων.
- *Πτυχές ασφαλείας και ιδιωτικότητας (Security and Privacy Data Aspects)*: Λόγω της λεπτομερούς καταγραφής αλληλεπιδράσεων από τις συσκευές M2M, υπάρχει ο

κίνδυνος υποκλοπής ιδιωτικών πληροφοριών και μοτίβων χρήσης δεδομένων από τα M2M δεδομένα.

Η ροή δεδομένων, από τη στιγμή που αυτά καταγράφονται από μια συσκευή M2M μέχρι και τη στιγμή που φθάνουν στο σύστημα προορισμού, έχει υποστεί επεξεργασία πολλές φορές και με πολλούς τρόπους, είτε για να αλλάξει η περιγραφή των δεδομένων για να χρησιμοποιηθούν στις κατάλληλες εφαρμογές είτε για να γίνουν υπολογισμοί ώστε να εξαχθούν τα κατάλληλα συμπεράσματα για το χρήστη της M2M εφαρμογής (π.χ. μια εταιρεία). Η ροή αυτή απεικονίζεται στο Σχ. 2.6.



Σχήμα 2.6: Η ροή των M2M δεδομένων, από το σημείο της καταγραφής έως τον τελικό προορισμό, όπου αξιοποιούνται από το χρήστη (εταιρεία).

Στη γενική περίπτωση ενός συστήματος M2M, τα στάδια από τα οποία διέρχεται κάθε ροή δεδομένων είναι τα ακόλουθα (χωρίς να είναι απαραίτητο όλα εξ αυτών να υπάρχουν σε κάθε σύστημα):

1. **Παραγωγή των Δεδομένων (Data Generation):** Στο στάδιο αυτό, τα δεδομένα παράγονται από μια συσκευή M2M, ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασής της με το περιβάλλον ή με άλλη συσκευή. Η δειγματοληψία για την παραγωγή των δεδομένων εξαρτάται τόσο από το είδος της συσκευής και τις δυνατότητές της, όσο και από την M2M εφαρμογή για την οποία συλλέγονται τα δεδομένα. Συνήθως, υπάρχουν προκαθορισμένες συμπεριφορές για την παραγωγή δεδομένων, οι οποίες μπορούν να ρυθμιστούν για την εξασφάλιση του επιθυμητού κόστους και ποιότητας. Μπορεί, για παράδειγμα, να γίνει ρύθμιση της συχνότητας δειγματοληψίας και της ενέργειας που καταναλώνεται για τη συλλογή δεδομένων από ένα WSN για μια M2M εφαρμογή. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι απαραίτητο να μεταδίδονται όλα τα συλλεγόμενα δεδομένα, καθώς κάποια από αυτά μπορούν να εκτιμηθούν τοπικά, από την M2M συσκευή συλλογής πληροφοριών, και να μεταδοθούν τα αποτελέσματα της εκτίμησης.

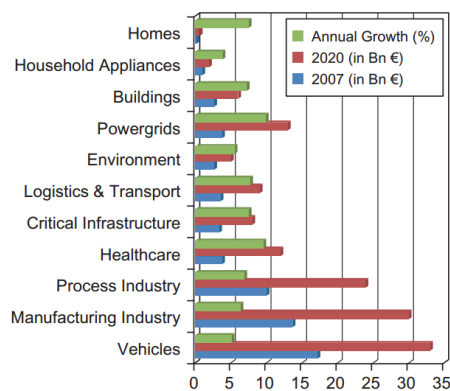
2. *Συλλογή/Απόκτηση των Δεδομένων (Data Acquisition)*: Στο στάδιο αυτό, μια M2M συσκευή επικοινωνεί (ασύρματα ή ενσύρματα) με τις διασπαρμένες συσκευές M2M που μετρούν τα δεδομένα (π.χ. αισθητήρες ενός WSN) και τα συλλέγει από αυτές. Η φύση της διαδικασίας συλλογής μπορεί να διαφέρει κατά περίπτωση και μπορεί να είναι συνεχής, event-based, κλπ. Η συχνότητα της συλλογής καθορίζεται αποκλειστικά από την M2M εφαρμογή ή από κοινή παράμετρο των εφαρμογών για τις οποίες προορίζονται τα δεδομένα.
3. *Επικύρωση των Δεδομένων (Data Validation)*: Τα δεδομένα που συλλέγονται πρέπει να ελέγχονται ως προς την ορθότητα και τη σημασία τους. Το στάδιο αυτό είναι απαραίτητο, καθώς τα δεδομένα μπορεί να έχουν υποστεί φθορά κατά τη μετάδοση, να έχουν μεταβληθεί, ή να μην είναι σαφή για τις λειτουργίες της εταιρείας που χρησιμοποιεί την M2M εφαρμογή. Η αποτυχία επικύρωσης των δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε κενά ασφαλείας, που ενδεχομένως προκαλέσουν διαδικτυακές επιθέσεις σε υπηρεσίες και Denial of Service (DoS), φθορές στις βάσεις δεδομένων, κλπ.
4. *Αποθήκευση των Δεδομένων (Data Storage)*: Επειδή, συνολικά, τα M2M δεδομένα που παράγονται είναι τεράστιου πλήθους (Big Data), υπάρχει ανάγκη αποθήκευσής τους για να γίνει η επεξεργασία τους. Επειδή τα δεδομένα είναι ετερογενή, υπάρχει πιθανότητα μόνο ένα μέρος των δεδομένων να είναι απαραίτητα για συγκεκριμένη εφαρμογή, άρα μόνο αυτά απαιτείται να αποθηκευτούν. Ωστόσο, επειδή το υπόλοιπο τμήμα των δεδομένων μπορεί να είναι χρήσιμο για άλλες εφαρμογές ή για μελλοντική χρήση για την εταιρεία, γίνεται προσεκτική επιλογή των δεδομένων που τελικά θα αποθηκευτούν. Λόγω του μεγάλου όγκου των δεδομένων, για την αποθήκευση χρησιμοποιούνται κατακευματισμένα αρχιεακά συστήματα (file systems), πλατφόρμες cloud computing, κλπ.
5. *Επεξεργασία των Δεδομένων (Data Processing)*: Η επεξεργασία μπορεί να γίνει είτε σε αποθηκευμένα δεδομένα είτε σε ροή δεδομένων, και έχει ως στόχο τη διαμόρφωση των δεδομένων ώστε να είναι στην κατάλληλη μορφή για μελλοντική χρήση. Για παράδειγμα, τα δεδομένα μπορεί να διαμορφώνονται για να κανονικοποιηθούν, για να γίνει εκτίμηση μια τιμής που λείπει, για να ταξινομηθούν τα δεδομένα με συγκεκριμένο κριτήριο, κλπ. Δεδομένα τα οποία λείπουν μπορούν να προβλεφθούν και να χρησιμοποιηθούν μέχρι τα κανονικά δεδομένα φτάσουν στο σύστημα.
6. *“Υπολείμματα” Δεδομένων (Data Remanence)*: Ακόμα και όταν τα δεδομένα αφαιρεθούν από τη μνήμη, ενδέχεται να υπάρξουν “υπολείμματα” που μπορούν εύκολα να αξιοποιηθούν από τρίτους, οι οποίοι μπορεί να αποκτήσουν πρόσβαση σε ιδιωτικά αρχεία. Υπάρχουν πολλές τεχνικές αντιμετώπισης αυτού του κινδύνου, όπως γράψιμο

πάνω στην άδεια μνήμη (over-writing), απομαγνήτιση, κρυπτογράφηση, και φυσική καταστροφή. Εκτός από τις βάσεις δεδομένων, στα συστήματα M2M, ευαίσθητα σημεία είναι οι συσκευές που παράγουν τα δεδομένα και οι ενδιάμεσοι κόμβοι που τα μεταδίδουν.

7. *Ανάλυση των Δεδομένων (Data Analysis)*: Το στάδιο αυτό αποσκοπεί στην πρόσβαση στις πληροφορίες που είναι ενθυλακωμένες στα αποθηκευμένα δεδομένα, ώστε αυτές να χρησιμοποιηθούν στη λήψη αποφάσεων από την M2M εφαρμογή. Η ανάλυση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πεδίο εφαρμογής και το περιεχόμενο των δεδομένων. Είναι το βασικό στάδιο για οποιαδήποτε εφαρμογή εκμεταλλεύεται τις πληροφορίες που είναι κρυμμένες στα δεδομένα.

2.4. Πεδία εφαρμογής των M2M Επικοινωνιών

Πλέον, η χρήση δικτύων M2M για παρακολούθηση και έλεγχο αποτελεί θεμελιώδες τμήμα των συστημάτων αυτοματισμού στη βιομηχανία, με σημαντική επίδραση στην παγκόσμια οικονομία. Σύμφωνα με έρευνα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής του 2008 (βλ. Σχ. 2.6), η παγκόσμια αγορά παρακολούθησης και ελέγχου αναμένεται να αυξηθεί από τα 188 δισεκατομμύρια € το 2007, στα 500 δισεκατομμύρια € το 2020. Ανάμεσα στο 2007 και το 2020, η αντίστοιχη ευρωπαϊκή αγορά αναμένεται να αυξηθεί με συντελεστή 5.7% ετησίως. Το 60% της παγκόσμιας αγοράς παρακολούθησης και ελέγχου αποτελείται από τις βιομηχανίες (i) αυτοκινήτων και (ii) κατασκευής και επεξεργασίας προϊόντων. Οι υπηρεσίες υγείας, οι υποδομές, η εφοδιαστική αλυσίδα, και οι μεταφορές ακολουθούν σε μικρότερο ποσοστό, ενώ οι οικιακές εφαρμογές έχουν το μικρότερο ποσοστό.



Σχήμα 2.7: Η παγκόσμια αγορά παρακολούθησης και ελέγχου για τα έτη 2007 και 2020

Ακολουθεί ανάλυση των βασικών πεδίων εφαρμογής των επικοινωνιών M2M.

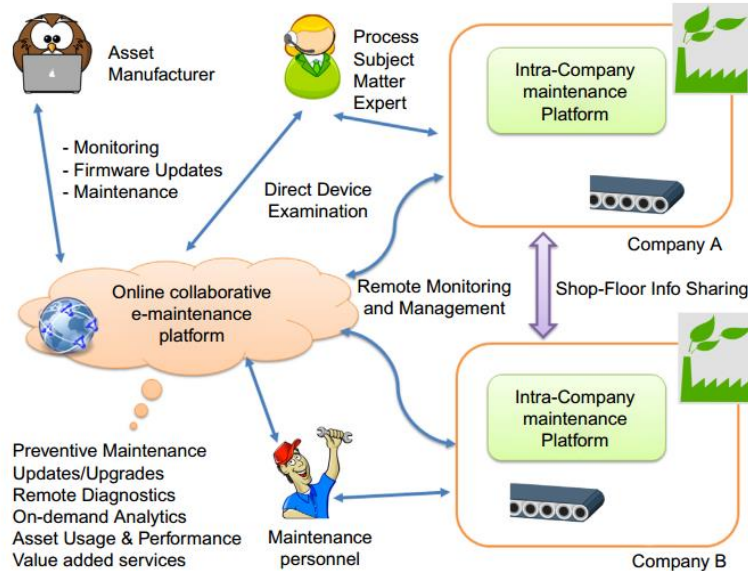
2.4.1. Διαχείριση Κεφαλαίων (Asset Management)

Οι υπάρχουσες πρακτικές διαχείρισης κεφαλαίων από τις επιχειρήσεις είναι στενά συνδεδεμένες με τις δυνατότητες των συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την επισκόπησή τους, και τη φύση και τις ιδιότητες των κεφαλαίων. Συνεπώς, περιορίζονται από ιδιωτικά πρωτόκολλα για να μπορέσουν να διαχειριστούν ένα μεγάλο εύρος λειτουργιών και κεφαλαίων, με αποτέλεσμα να είναι στατικές. Ωστόσο, η αύξηση της πολυπλοκότητας των συσκευών που χρησιμοποιούνται και των αστερισμών που σχηματίζεται από το συνδυασμό τους καθιστά αναγκαία την ευελιξία για την παρακολούθηση και των ελέγχό τους.

Οι επικοινωνίες M2M προσφέρουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα στη διαχείριση κεφαλαίων:

- *Μείωση του κόστους*, καθώς χρησιμοποιείται απομακρυσμένη τηλεμετρία χωρίς την ανάγκη μεσολάβησης προσωπικού.
- *Αύξηση ποιότητας*, λόγω της υψηλής ποιότητας των M2M δεδομένων που παράγονται και αναλύονται σε πραγματικό χρόνο.
- *Αύξηση ελαστικότητας*, διότι η ανάλυση των M2M δεδομένων επιτρέπει την προληπτική συντήρηση των κεφαλαίων και την ελαχιστοποίηση του πλήθους των μη αναμενόμενων βλαβών.
- *Αύξηση επίδοσης και ασφάλειας*, καθώς η απομακρυσμένη ανανέωση του λογισμικού βελτιώνει την επίδοση των συσκευών και καλύπτει ενδεχόμενα κενά ασφάλειας.
- *Εντοπισμός των κεφαλαίων*, που διευκολύνει την ανάκτησή τους και την πρόληψη της κλοπής τους.
- *Βελτιστοποίηση των επιχειρησιακών λειτουργιών*, όπως για παράδειγμα βελτιστοποίηση της πορείας των πλοίων στην περίπτωση διαχείρισης στόλου (fleet management).
- *Νέες υπηρεσίες*, όπως η μείωση του ενεργειακού κόστους με χρήση έξυπνων μετρητών (smart metering), υπηρεσίες με χρήση της τοποθεσίας, κλπ.

Ιδιαίτερη σημασία για τις επιχειρήσεις έχει η δυνατότητα *ηλεκτρονικής συντήρησης (e-Maintenance)* που προσφέρεται από τις επικοινωνίες M2M και η οποία προσφέρει τη δυνατότητα προληπτικής συντήρησης των κεφαλαίων. Οι ετερογενείς συσκευές M2M μπορούν να αξιοποιήσουν τις βασισμένες σε γεγονότα (event-based) μεθόδους επικοινωνίας M2M και να αναφέρουν κατά παραγγελία (on-demand) την κατάστασή τους, ενδεχόμενες βλάβες, και άλλες πληροφορίες. Επιπλέον, η ηλεκτρονική συντήρηση διευκολύνεται από το δυναμικό εντοπισμό νέων κεφαλαίων από τα συστήματα M2M, τα οποία ρυθμίζονται απευθείας και εκκινούν τη λειτουργία τους σύμφωνα με την πολιτική της εταιρείας.



Σχήμα 2.8: Αδιάλειπτη ηλεκτρονική συντήρηση των κεφαλαίων δύο εταιρειών από εξωτερικό συνεργάτη

2.4.2. Βιομηχανικός Αυτοματισμός (Industrial Automation)

Οι χειριστές που εργάζονται σε βιομηχανικούς χώρους και οι σχεδιαστές εργοστασίων αναζητούν συνεχώς οικονομικές μεθόδους για να βελτιώσουν τα παραγόμενα από τη βιομηχανία προϊόντα, να μεγιστοποιήσουν την απόδοση του εξοπλισμού και των διεργασιών στο εργοστάσιο, και να ελαχιστοποιήσουν το χρονικό διάστημα μη διαθεσιμότητας των βιομηχανικών συστημάτων (downtime), που μπορεί να οφείλεται είτε σε βλάβη είτε σε προγραμματισμένη συντήρηση. Αυτές οι μέθοδοι κατά κύριο λόγο περιλαμβάνουν τη χρήση M2M δικτύων βιομηχανικού αυτοματισμού και ελέγχου. Μέσω της δικτύωσης συσκευών M2M όπως οι ελεγκτές των διεργασιών του εργοστασίου και οι διάφοροι αισθητήρες, συλλέγεται μεγάλος όγκος πληροφοριών για τον έλεγχο και την απομακρυσμένη διαχείριση του εργοστασίου, τη βελτιστοποίηση των διεργασιών και της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι πληροφορίες που συλλέγονται στο βιομηχανικό χώρο μπορεί να περιλαμβάνουν παραμέτρους ελέγχου των διεργασιών, παραμέτρους των μηχανημάτων του εργοστασίου, ρυθμούς παραγωγής, κλπ.

Μερικά παραδείγματα χρήσης των M2M δικτύων σε βιομηχανικό περιβάλλον είναι τα ακόλουθα:

- *Έξυπνη Συντήρηση και Παρακολούθηση Κατάστασης Μηχανημάτων (Smart Maintenance and Machine Condition Monitoring)*: Η έξυπνη συντήρηση επιτρέπει την ταξινόμηση και τη βελτιστοποίηση των πόρων που χρησιμοποιούνται για τη συντήρηση στο βιομηχανικό χώρο, αποτρέποντας την περιττή συντήρηση και μειώνοντας το κόστος. Η

παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων μπορεί να έχει τις ακόλουθες εφαρμογές:

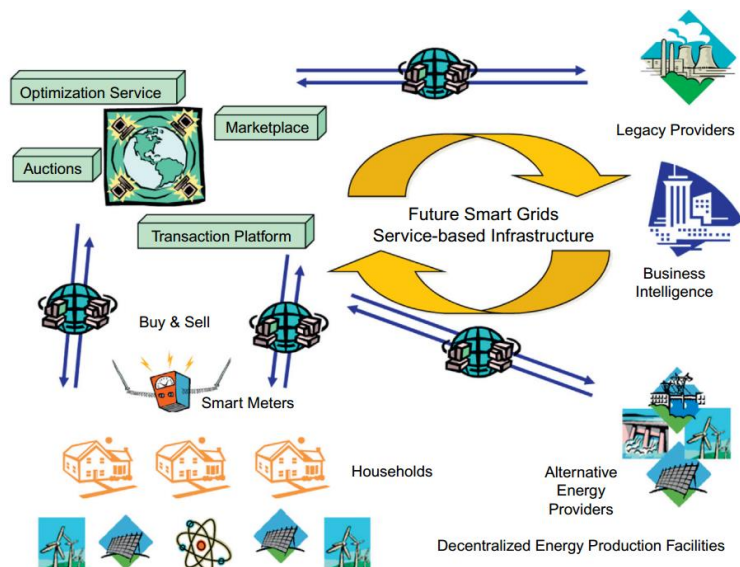
- i. Παρακολούθηση δονήσεων
 - ii. Παρακολούθηση ήχων
 - iii. Παρακολούθηση και ανάλυση λιπαντικών
 - iv. Παρακολούθηση ηλεκτρικών συστημάτων
 - v. Παρακολούθηση θερμοκρασίας
- *Έξυπνες Μετρήσεις και Έλεγχος Ισχύος (Smart Metering and Power Control)*: Το δίκτυο M2M παρέχει τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων σχετικά με την κατανάλωση ισχύος από τα μηχανήματα και εξαγωγής στατιστικών παραμέτρων, ώστε να εντοπίζονται αυτόματα οι σπατάλες ισχύος του εργοστασίου χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.
 - *Εντοπισμός Διεργασιών (Process Tracking)*: Οι M2M εφαρμογές διατηρούν στατιστικά στοιχεία σχετικά με τους ρυθμούς παραγωγής και την ποιότητα. Με βάση τα στοιχεία αυτά μπορούν να εντοπιστούν σημεία του εργοστασίου στα οποία μπορούν να γίνουν βελτιώσεις για την αύξηση της παραγωγικότητας.
 - *Διαχείριση Αντικειμένων (Inventory Management)*: Η δυνατότητα των M2M δικτύων να εντοπίζουν υλικά, εξοπλισμό, και λοιπά αντικείμενα μέσω στο βιομηχανικό περιβάλλον παρέχει πολλαπλά οφέλη, όπως για παράδειγμα την αποτροπή της κλοπής εξοπλισμού.

2.4.3. Έξυπνο Ηλεκτρικό Δίκτυο (Smart Grid) και Έξυπνο Σπίτι (Smart Home)

Η επανάσταση στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι σε εξέλιξη, λόγω της ενσωμάτωσης των τεχνολογιών πληροφορικής σε όλα τα στρώματά τους. Επίσης, η χρήση ευφυών συσκευών M2M δημιουργεί νέες δυνατότητες παρακολούθησης και διαχείρισης των δικτύων, και αλληλεπίδραση των εμπλεκόμενων στο δίκτυο πλευρών.

Κάθε έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο επεκτείνεται σε τρία στρώματα:

- i. Στρώμα Ισχύος και Ενέργειας (Power and Energy Layer)
- ii. Στρώμα Επικοινωνίας (Communication Layer)
- iii. Πληροφοριακό Στρώμα (IT/Computer Layer)

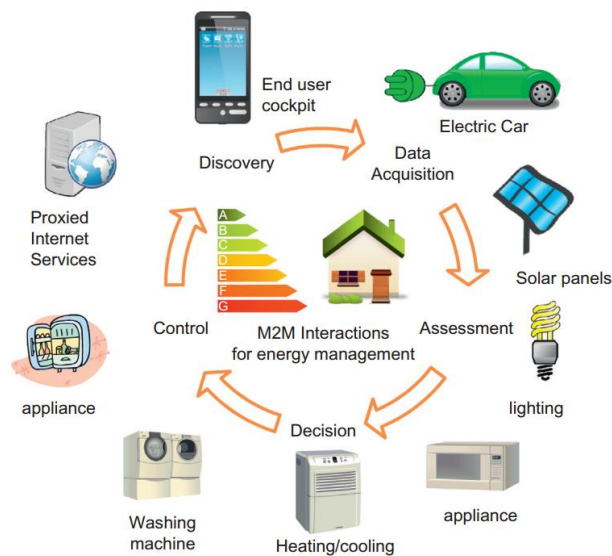


Σχήμα 2.9: Επισκόπηση ενός έξυπνου ηλεκτρικού δικτύου

Η απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας, που θα επιφέρει λειτουργικό διαχωρισμό των ηλεκτρικών δικτύων, θα οδηγήσει σε ριζική αλλαγή της δομής των δικτύων, με την παραγωγή, τη μεταφορά, και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας να επιτελούνται από διαφορετικά, ετερογενή τμήματα. Η αποκεντρωμένη και ετερογενής δομή καθιστά αναγκαία την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των M2M επικοινωνιών στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Επιπλέον, η έλευση των έξυπνων μετρήσεων οδηγεί τους παρόχους υπηρεσιών στην πώληση νέων ενεργειακών υπηρεσιών στους καταναλωτές, προσφέροντάς τους καλύτερο έλεγχο της ενεργειακής τους κατανάλωσης. Οι νέοι μετρητές θα χρησιμοποιούνται ως μέσο μετάδοσης πληροφοριών, από το έξυπνο δίκτυο προς τους καταναλωτές, παρέχοντάς τους πληροφορίες σχετικές με την κατανάλωσή τους, το φόρο επί της ηλεκτρικής ενέργειας, προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης, κλπ. Οι επικοινωνίες M2M, λοιπόν, είναι ζωτικής σημασίας για την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ παρόχων και καταναλωτών.

Επίσης, η χρήση M2M συσκευών στις κατοικίες καθιστά τις οικιακές υποδομές έξυπνες (έξυπνο σπίτι – smart house) και τις συνδέει με το έξυπνο ηλεκτρικό δίκτυο. Έτσι, συσκευές όπως ψυγεία, πλυντήρια, και φούρνοι μικροκυμάτων δεν είναι πλέον παθητικές ηλεκτρικές διατάξεις αλλά έξυπνες συσκευές που επεκτείνουν τις υποδομές M2M σχετικές με την ενέργεια. Σε μια εκτεταμένη ενεργειακή υποδομή M2M, πολλαπλές συσκευές συμμετέχουν στη διαδικασία διαχείρισης ενέργειας.



Σχήμα 2.10: Αλληλεπίδραση συσκευών M2M μεταξύ τους και με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας στο έξυπνο σπίτι

2.4.4. Αυτοματισμός σε Εμπορικά Κτίρια (Commercial Building Automation)

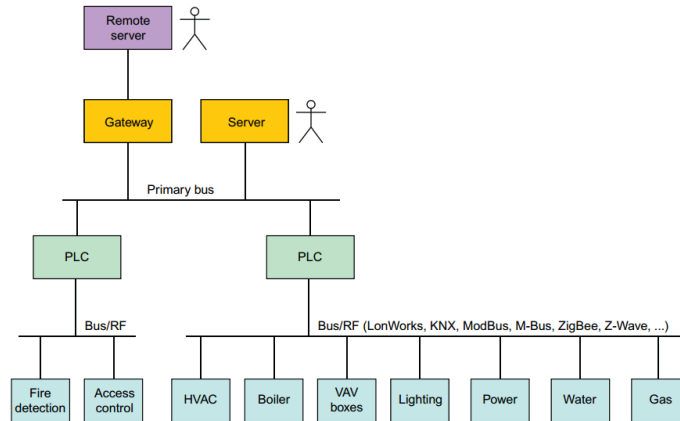
Το Σύστημα Αυτοματισμού Κτιρίου (Building Automation System – BAS) είναι ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου και μέτρησης των συστημάτων φωτισμού, κλιματισμού, ασφάλειας, αλλά και άλλων ηλεκτρικών και μηχανικών συστημάτων σε ένα κτίριο. Στόχος του είναι η μείωση του κόστους ενέργειας και συντήρησης, και η ενίσχυση του ελέγχου, της αξιοπιστίας, και η διευκόλυνση των εργασιών συντήρησης. Κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- Έλεγχος της θέρμανσης και του κλιματισμού με βάση την ώρα, την εξωτερική θερμοκρασία, και την πληρότητα του κτιρίου.
- Εποπτικός έλεγχος και παρακολούθηση που επιτρέπει στο προσωπικό συντήρησης να εντοπίζει και να διορθώνει ταχέως τα προβλήματα στον εξοπλισμό του κτιρίου.
- Παρακολούθηση και επιτέλεση λειτουργιών από απομακρυσμένο κέντρο.
- Συλλογή δεδομένων για την εξαγωγή στατιστικών μεγεθών και βελτιστοποίηση των λειτουργιών.
- Ατομικές έξυπνες μετρήσεις σε κάθε δωμάτιο ή διαμέρισμα.
- Εντοπισμός φωτιάς ή εισβολής.
- Έλεγχος πρόσβασης στο κτίριο.

Ένα BAS είναι καταναμημένο ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία των υπόλοιπων υποσυστημάτων όταν κάποιο από αυτά έχει βλάβη. Τα βασικά μέρη ενός BAS είναι τα ακόλουθα:

- Αισθητήρες
- Ενεργοποιητές

- *Ελεγκτές προγραμματιστικής λογικής (PLCs)*, που μπορούν να χειριστούν πολλαπλές εισόδους και εξόδους σε πραγματικό χρόνο, και να πραγματοποιήσουν ρυθμιστικές λειτουργίες.
- Ένας *εξυπηρετητής*, ο οποίος παρακολουθεί και αυτομάτως ρυθμίζει τις παραμέτρους του συστήματος.
- Μια ή περισσότερες *δικτυακές πλατφόρμες (network buses)* (KNX, LonWorks, ή BACnet).



Σχήμα 2.11: Τα βασικά μέρη ενός BAS

2.4.5. Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities)

Η ανάγκη για έξυπνες πόλεις εμφανίστηκε τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της εκτεταμένης αστικοποίησης των τελευταίων 50 ετών. Οι πόλεις είναι υπεύθυνες για το 75% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως, ενώ καταλαμβάνουν μόνο το 2% της επιφάνειας της Γης. Επιπλέον, περί τα 600 αστικά κέντρα παράγουν το 60% του παγκόσμιου κατά κεφαλήν εισοδήματος. Η ανάγκη ώστε τα μεγάλα αστικά κέντρα να προσφέρουν στην πλειοψηφία του παγκόσμιου πληθυσμού, ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, οδηγεί στη μαζική εφαρμογή των M2M επικοινωνιών στο αστικό περιβάλλον.

Ως έξυπνη πόλη ορίζεται η πόλη που χρησιμοποιεί τα δεδομένα M2M και την τεχνολογία της πληροφορικής ώστε:

- Να αξιοποιήσει βέλτιστα τις υπάρχουσες υποδομές και να συμβάλει στον αποτελεσματικότερο προγραμματισμό για μελλοντικές επενδύσεις στις υποδομές.
- Να παρέχει νέες, αποτελεσματικότερες υπηρεσίες στους πολίτες.
- Να μειώσει τη γραφειοκρατία στην αλυσίδα παροχής υπηρεσιών και να δημιουργήσει νέα στρώματα συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών τομέων της αλυσίδας.
- Να συμβάλει στην κατεύθυνση προσαρμογής των δημοτικών και κρατικών αρχών στους στόχους προς αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

- Να ενεργοποιήσει νέα επιχειρησιακά μοντέλα για την παροχή υπηρεσιών από το δημόσιο και τον ιδιωτικό τομέα.

Υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών έξυπνης πόλης. Οι κυριότερες είναι οι εξής:

- *Έξυπνες Μετακινήσεις (Smart Transportation)*: Παρέχονται λύσεις για τη στάθμευση, την παρακολούθηση της κίνησης, τις δημόσιες μεταφορές, και τη διαχείριση των στόλων δημοτικών οχημάτων.
- *Έξυπνη Υγεία (Smart Healthcare)*: Περιλαμβάνει την ηλεκτρονική διαχείριση του ιατρικού ιστορικού, τη διαχείριση των κεφαλαίων των νοσοκομείων, και τα συστήματα απομακρυσμένης παρακολούθησης ασθενών.
- *Έξυπνη Εκπαίδευση (Smart Education)*: Περιλαμβάνει την ηλεκτρονική μάθηση (e-Learning) και τις διασυνδεδεμένες εκπαιδευτικές υποδομές.
- *Δημόσια Ασφάλεια (Security and Public Safety)*: Περιλαμβάνει την παρακολούθηση μέσω καμερών, προηγμένες μεθόδους ανάλυσης δεδομένων ασφαλείας, και την άμεση ανταπόκριση σε έκτακτα περιστατικά.
- *Έξυπνα Κτίρια (Smart Buildings)*: Διασύνδεση όλων των έξυπνων κτιρίων που χρησιμοποιούν έξυπνους μετρητές.

2.4.6. Συμμετοχική Παρακολούθηση Περιβάλλοντος

Η συμμετοχική παρακολούθηση περιβάλλοντος (Participatory Sensing – PS) είναι μια μορφή συμμετοχής των πολιτών στη διαδικασία καθημερινής συλλογής δεδομένων από το περιβάλλον της πόλης. Το βασικό χαρακτηριστικό της είναι το ότι οι κάτοικοι της πόλης λειτουργούν ως ανθρώπινοι αισθητήρες και πολλές φορές ως χρήστες ενός προϊόντος PS, με σκοπό τη μετατροπή της πόλης τους σε ένα βέλτιστο συλλογικό περιβάλλον διαβίωσης. Οι περισσότεροι πολίτες σήμερα χρησιμοποιούν έξυπνα κινητά τηλέφωνα για να καταγράψουν εικόνες, video, ήχους, θερμοκρασία, κλπ και να τα μοιραστούν στο Διαδίκτυο. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αναλυθούν και να ερμηνευθούν από συγκεκριμένα άτομα, ομάδες και από τις δημοτικές αρχές, και να συμβάλουν στη βελτιστοποίηση της λήψης αποφάσεων για βελτίωση υπηρεσιών και αντιμετώπιση προβλημάτων όπως, για παράδειγμα, η πρόληψη οδικών ατυχημάτων.

Οι βασικοί συμμετέχοντες στο PS είναι οι πολίτες και οι δημοτικές αρχές. Οι κάτοικοι/πολίτες μιας πόλης έχουν πρόσβαση σε συσκευές M2M με αισθητηριακές δυνατότητες και τις χρησιμοποιούν για συλλογή πληροφοριών από το περιβάλλον. Οι δημοτικές αρχές μπορούν να είναι ο δέκτης των συλλεγόμενων πληροφοριών και να οργανώνουν τις εκστρατείες για την ευαισθητοποίηση και προσέλκυση των πολιτών για συμμετοχή. Οι δημοτικές αρχές μπορούν να αναλάβουν την ανάλυση των δεδομένων και να προγραμματίσουν τις απαιτούμενες ενέργειες, ή να το αναθέσουν σε εταιρείες.

Με βάση το βαθμό συμμετοχής των ατόμων και των δημοτικών αρχών, υπάρχουν τρία βασικά μοντέλα συμμετοχής στο PS:

- *Συλλογικός σχεδιασμός και έρευνα (Collective design and investigation)*: Οι πολίτες/άτομα σχεδιάζουν την καμπάνια ευαισθητοποίησης, συμμετέχουν στη συλλογή δεδομένων, αναλύουν και ερμηνεύουν τα δεδομένα.
- *Δημόσια συμβολή (Public contribution)*: Οι πολίτες συμμετέχουν μόνο στη συλλογή των δεδομένων που οργανώνεται από άλλα άτομα ή οργανισμό, ενώ δεν συμμετέχουν απαραίτητα στην ανάλυση των δεδομένων.
- *Προσωπική χρήση και προβολή (Personal use and reflection)*: Οι πολίτες καταγράφουν αυτοτελώς το περιβάλλον τους χωρίς συμμετοχή σε κάποια εκστρατεία. Ένας πολίτης μπορεί είτε να απέχει από τη δημοσίευση των δεδομένων είτε να δημοσιεύσει συγκεκριμένα δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά γνωστοποιούνται συνήθως σε μικρές ιδιωτικές ομάδες.

2.5. Ανοικτά θέματα και προκλήσεις για τις επικοινωνίες M2M

Οι επικοινωνίες M2M αποτελούν ένα νέο τεχνολογικό πεδίο που περιλαμβάνει πολλές και σημαντικές προκλήσεις. Σε όλα τα πεδία εφαρμογής των επικοινωνιών M2M, τα ακόλουθα προβλήματα πρέπει να αντιμετωπιστούν:

- Η ανάπτυξη του cloud computing θα διευκολύνει την ανάπτυξη και υποστήριξη M2M εφαρμογών. Ωστόσο, για την πλήρη ενσωμάτωσή του στα συστήματα M2M απαιτείται περαιτέρω έρευνα.
- Οι επικοινωνίες M2M θα κατευθύνουν τεράστιο όγκο δεδομένων (big data) στις οντότητες που λαμβάνουν αποφάσεις για τις επιχειρήσεις. Η έρευνα για την ανάλυση των big data είναι αυτή που θα καταστήσει δυνατή τη λήψη αποφάσεων με βάση τα δεδομένα αυτά.
- Η ενσωμάτωση των συστημάτων M2M σε μεγαλύτερα συστήματα απαιτεί την εξέλιξη των τεχνικών ενσωμάτωσης.
- Η δημιουργία αξιόπιστων δικτύων M2M μπορεί να είναι πολύπλοκη και ακριβή.
- Η ασφάλεια αποτελεί θεμελιώδη απαίτηση των M2M επικοινωνιών. Στην παρούσα μορφή τους, οι εφαρμογές M2M απλώς βασίζονται στους μηχανισμούς ασφαλείας των κατώτερων δικτύων, κάτι που πρέπει να αλλάξει.
- Κατά τη σχεδίαση των δικτύων M2M, κάθε κόμβος αποτελείται από βασικά στοιχεία, όπως οι αισθητήρες, το κύκλωμα RF, ο μικρο-ελεγκτής, και η παροχή ενέργειας. Η αδιάλειπτη συνεργατική και ενεργειακά βιώσιμη λειτουργία τους απαιτεί την ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών διαχείρισης ενέργειας.

- Οι εξωτερικές παρεμβολές συχνά αμελούνται κατά τη σχεδίαση των συστημάτων M2M, μολονότι έχουν ισχυρό αντίκτυπο στην αξιοπιστία και την ποιότητα της υπηρεσίας (Quality of Service – QoS). Τα πρωτόκολλα ελέγχου πρόσβασης (Medium Access Control – MAC) και δρομολόγησης συνήθως αγνοούν τις συνθήκες του διαύλου μετάδοσης. Η μαθηματική περιγραφή των διαύλων επικοινωνίας και η σχεδίαση των συστημάτων ώστε να παρέχουν την επιθυμητή ποιότητα υπηρεσίας υπό συγκεκριμένες συνθήκες μετάδοσης, είναι στοιχεία απαραίτητα για τις μελλοντικές M2M επικοινωνίες.

Κεφάλαιο 3^ο

Αρχιτεκτονική Δικτύου M2M και Πρότυπα

3.1. Εισαγωγή

Η προτυποποίηση των συστημάτων επικοινωνιών M2M καλύπτεται κυρίως από δύο σώματα προτυποποίησης: το 3GPP (3rd-Generation Partnership Project) και τον ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Κάθε σώμα έχει δώσει αντίστοιχη πρόταση για την αρχιτεκτονική των δικτύων M2M: την 3GPP MTC και την ETSI M2M. Επιπλέον, υπάρχει πρωτοβουλία, από πλευράς του ETSI, για το σχεδιασμό ενός συνδυαστικού μοντέλου αρχιτεκτονικής ETSI/3GPP. Οι προτάσεις της 3GPP MTC εστιάζουν κυρίως στις επικοινωνίες, ενώ αυτές της ETSI M2M στις εφαρμογές.

Επιπλέον, υπάρχουν ερευνητικά προγράμματα για τη βελτίωση των υπάρχοντων δικτύων προς χρήση τους στις επικοινωνίες M2M. Το πλέον εξειδικευμένο πρόγραμμα προς το σκοπό αυτό αφορά την επέκταση των συστημάτων LTE σε LTE-M (LTE για συσκευές M2M) και αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως “πρόγραμμα EXALTED”. Ο στόχος του EXALTED είναι να δημιουργήσει τα θεμέλια μιας νέας, επεκτάσιμης αρχιτεκτονικής δικτύου που θα ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των μελλοντικών M2M επικοινωνιών και θα παρέχει ασφαλή και ενεργειακά και οικονομικά βιώσιμη μετάδοση δεδομένων μεταξύ συσκευών M2M. Οι ερευνητικές περιοχές του EXALTED είναι οι ακόλουθες:

- Μακροπρόθεσμη εξέλιξη των συστημάτων LTE-M για επικοινωνίες M2M.
- Προηγμένες τεχνικές ασύρματης δικτύωσης για την υποστήριξη συνεκτικής αρχιτεκτονικής End-to-End (E2E) για τις μελλοντικές M2M επικοινωνίες και το IoT.
- Λύσεις χαμηλού κόστους υψηλής ασφάλειας και αξιοπιστίας για επικοινωνίες M2M μέσω του LTE.
- Βελτίωση των M2M συσκευών, με έμφαση την ενίσχυση της αυτονομίας από την πλευρά των εφαρμογών.

Οι βασικές αρχιτεκτονικές που θεωρείται ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση του EXALTED είναι η 3GPP MTC και η ETSI M2M. Ωστόσο, ο στόχος του EXALTED δεν είναι απλώς να τις υιοθετήσει αλλά να θεμελιώσει μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική με πρόσθετα στοιχεία και επιλογές.

3.2. Η Αρχιτεκτονική 3GPP MTC

Η αρχιτεκτονική αυτή είναι σχεδιασμένη ώστε να υποστηρίζει μεγάλο πλήθος συσκευών MTC εντός του δικτύου 3GPP MTC, να μπορεί να εκτελέσει τις υπηρεσίες MTC, και να επιτρέπει συνδυασμούς των επιμέρους αρχιτεκτονικών προς βελτίωση της ίδιας της αρχιτεκτονικής 3GPP MTC και την αναβάθμιση των επικοινωνιών MTC.

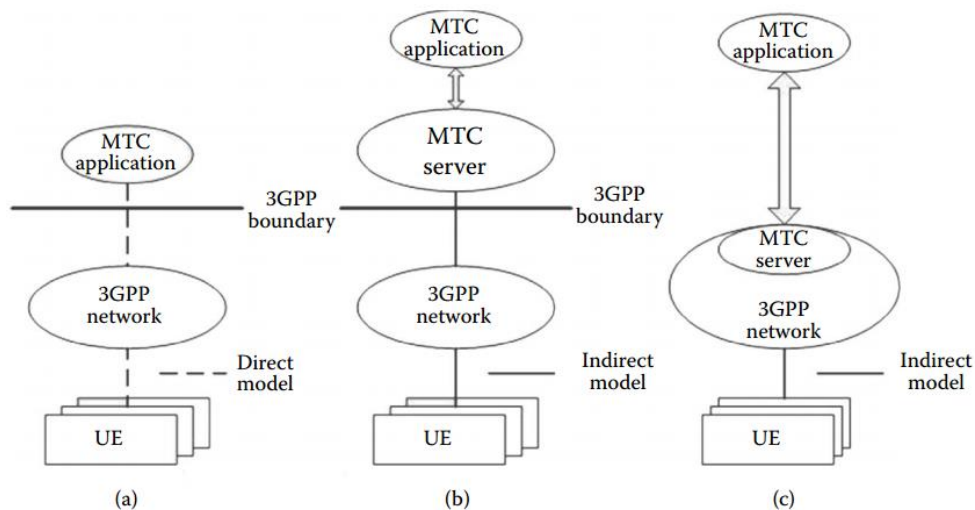
Με βάση τον ορισμό που δίνεται από το 3GPP, η MTC είναι μορφή επικοινωνίας μεταξύ δύο ή και περισσότερων οντοτήτων χωρίς να είναι απαραίτητη η μεσολάβηση ανθρώπων. Συνεπώς, μια υπηρεσία βελτιστοποιημένη για επικοινωνία MTC διαφέρει από μια υπηρεσία για επικοινωνία μεταξύ ανθρώπων (H2H). Οι επικοινωνίες H2H υλοποιούνται με τα παρόντα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Αντιθέτως, οι επικοινωνίες MTC περιλαμβάνουν επικοινωνία μεγάλου πλήθους δεδομένων, διαφορετικά σενάρια για την τηλεπικοινωνιακή αγορά, χαμηλό κόστος υλοποίησης, και πολύ μεγάλο πλήθος τερματικών, καθένα από τα οποία διαχειρίζεται πολύ μικρή τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

Στην 3GPP MTC, κάθε *συσκευή MTC* αποτελεί εξοπλισμό χρήστη (User Equipment – UE) για MTC επικοινωνία, που επικοινωνεί μέσω του επίγειου δημόσιου δικτύου κινητών επικοινωνιών (Public Land Mobile Network – PLMN) με άλλες συσκευές ή εξυπηρετητές MTC. Ο *εξυπηρετητής MTC* είναι μια οντότητα που συνδέεται στο δίκτυο MTC για να επικοινωνεί με τους UE και τους κόμβους/τερματικά του PLMN. Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.1, η 3GPP MTC έχει δύο μοντέλα: το *άμεσο* και το *έμμεσο*.

- I. Στο *άμεσο μοντέλο* (βλ. Σχ. 3.1.a), η εφαρμογή MTC επικοινωνεί με τον UE άμεσα ως μια εφαρμογή over-the-top (OTT) επί του δικτύου του 3GPP, χωρίς τη μεσολάβηση κάποιου εξυπηρετητή MTC.
- II. Στο *έμμεσο μοντέλο*, η επικοινωνία μεταξύ MTC εφαρμογής και UE γίνεται με χρήση πρόσθετων υπηρεσιών που παρέχονται από το δίκτυο 3GPP και η μεσολάβηση του εξυπηρετητή MTC είναι απαραίτητη. Ο εξυπηρετητής μπορεί να υποστηρίζει υπηρεσία είτε ελεγχόμενη από τον πάροχο της υπηρεσίας (βλ. Σχ. 3.1.b) είτε ελεγχόμενη από κάποιο χειριστή του 3GPP (βλ. Σχ. 3.1.c). Για το έμμεσο μοντέλο, υπάρχουν συγκεκριμένες υποκατηγορίες μοντέλων:
 - a) Έμμεσο μοντέλο, στο οποίο η εφαρμογή παρέχεται από ένα τρίτο πάροχο υπηρεσιών MTC, και η διεπαφή μεταξύ εξυπηρετητή MTC και εφαρμογής είναι εντελώς εκτός των ορίων του δικτύου 3GPP MTC. Η επικοινωνία μεταξύ εξυπηρετητή και δικτύου 3GPP γίνεται μέσω μια άλλης διεπαφής ή διεπαφών.
 - b) Έμμεσο μοντέλο, στο οποίο η εφαρμογή χρησιμοποιεί εξυπηρετητή που παρέχεται από κάποιο χειριστή του 3GPP. Η διεπαφή επικοινωνίας του εξυπηρετητή και της εφαρμογής μένει εντός των ορίων του δικτύου 3GPP MTC,

ενώ η επικοινωνία ανάμεσα σε εξυπηρετητή και δίκτυο 3GPP MTC είναι εντός του PLMN.

- c) Οι δύο ανωτέρω υποκατηγορίες είναι συμπληρωματικές και είναι δυνατό ο χειριστής του 3GPP να τις συνδυάσει για διαφορετικές εφαρμογές σε κάθε περίπτωση.



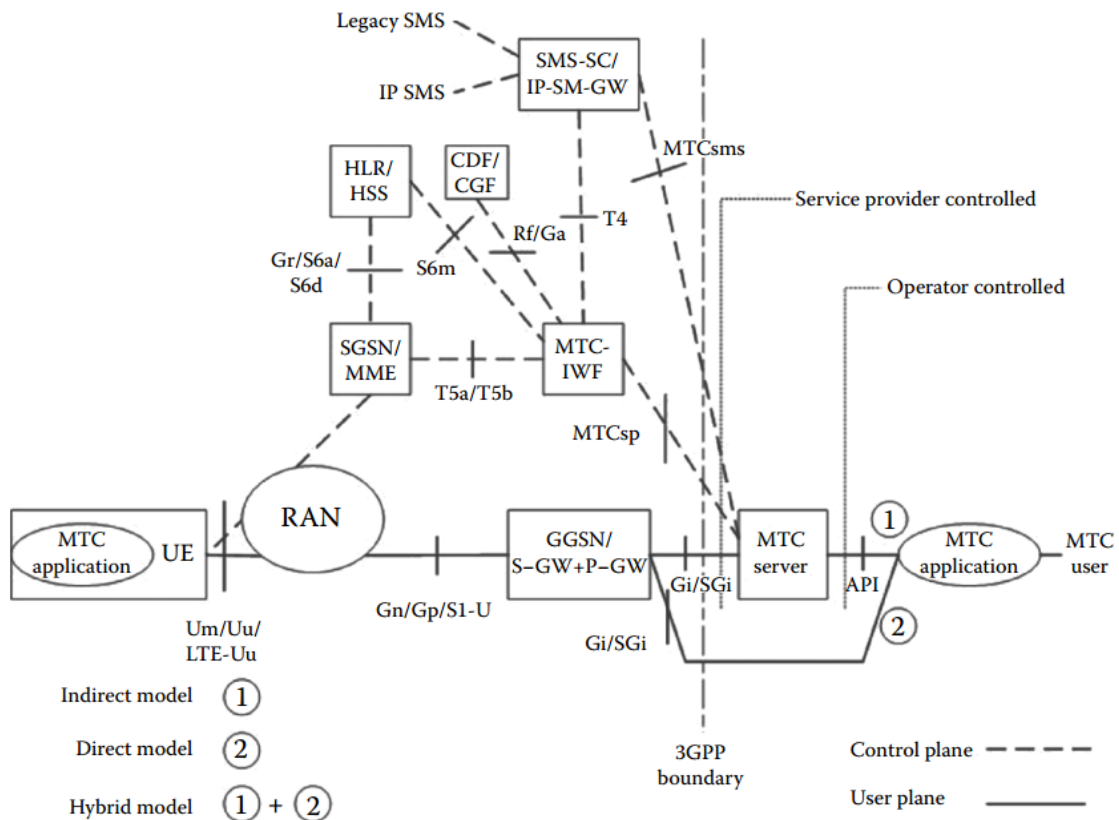
Σχήμα 3.12: Μοντέλα επικοινωνίας MTC:

- a) Άμεση επικοινωνία υπό τον έλεγχο χειριστή 3GPP
 b) Έμμεση επικοινωνία όπου ο εξυπηρετητής υποστηρίζει υπηρεσία ελεγχόμενη από τον πάροχο
 c) Έμμεση επικοινωνία όπου ο εξυπηρετητής υποστηρίζει υπηρεσία ελεγχόμενη από έναν χειριστή του 3GPP

Η επικοινωνία στο επίπεδο της εφαρμογής ανάμεσα στη συσκευή MTC και στην MTC εφαρμογή είναι εκτός του πεδίου της προτυποποίησης από το 3GPP. Επιπλέον, σε αυτή δεν περιλαμβάνονται οι πτυχές της επικοινωνίας End-to-End (E2E) μεταξύ συσκευών και εξυπηρετητών. Ωστόσο, περιλαμβάνονται οι υπηρεσίες μεταφοράς για την επικοινωνία MTC που παρέχονται από το 3GPP. Από την οπτική του E2E, η επικοινωνία μεταξύ UE και εφαρμογής υλοποιείται με χρήση υπηρεσιών μεταφοράς και επικοινωνίας του 3GPP, καθώς και διαφόρων βελτιώσεων προς διευκόλυνση της επικοινωνίας.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2 [45], στην αρχιτεκτονική αναφοράς για το 3GPP MTC, ο UE συνδέεται με το δίκτυο 3GPP, το οποίο μπορεί να είναι είτε το E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), είτε το GERAN (GSM Edge Radio Access Network), είτε το I-WLAN (Interworking Wireless Local Area Network). Η αρχιτεκτονική αυτή είναι γενικής χρήσης και καλύπτει όλα τα προαναφερθέντα μοντέλα του 3GPP MTC.

² Στο Σχ. 3.1, ως "3GPP boundary" ορίζονται τα όρια του δικτύου 3GPP MTC.



Σχήμα 3.2: Αρχιτεκτονική αναφοράς για το 3GPP MTC

Τα στοιχεία του δικτύου 3GPP παρέχουν τις λειτουργίες για την υποστήριξη των καθορισμένων μοντέλων αρχιτεκτονικής. Επειδή η αρχιτεκτονική του 3GPP MTC αναμένεται να εξελιχθεί περαιτέρω, ενδεχομένως καθοριστούν στο μέλλον πρόσθετα στοιχεία δικτύου. Τα υπάρχοντα στοιχεία της 3GPP MTC είναι τα ακόλουθα:

1. *Λειτουργίες διαδικτύωσης MTC (MTC Internetworking Functions - MTC-IWF):* Το στοιχείο αυτό κρύβει την τοπολογία του εσωτερικού PLMN και μεταβιβάζει ή μεταφράζει πρωτόκολλα σηματοδότησης που χρησιμοποιούνται επί του σημείου αναφοράς MTCsp για την υλοποίηση συγκεκριμένων λειτουργιών στο PLMN. Το MTC-IWF περιλαμβάνει τις ακόλουθες λειτουργίες:
 - Τερματίζει τα σημεία αναφοράς MTCsp, S6m, T5a, T5b, T4, και Rf/Ga.
 - Μπορεί να πιστοποιήσει την αυθεντικότητα του εξυπηρετητή MTC πριν την εγκατάσταση της επικοινωνίας με το δίκτυο 3GPP.
 - Μπορεί να εξουσιοδοτήσει τις αιτήσεις ελέγχου προς κάποιο εξυπηρετητή MTC.
 - Υποστηρίζει την αποστολή και λήψη μηνυμάτων ελέγχου από εξυπηρετητές MTC.

- Επιλέγει το βέλτιστο και αποτελεσματικότερο μηχανισμό παράδοσης μηνυμάτων ενεργοποίησης προς τις MTC συσκευές, λαμβάνοντας υπόψη:
 - Τις πληροφορίες για τη δυνατότητα πρόσβασης στον UE.
 - Ενδεχόμενες υπηρεσίες παράδοσης μηνυμάτων ενεργοποίησης συσκευής που υποστηρίζονται από το οικιακό δίκτυο PLMN (HPLMN), ή κάποιο τρίτο δίκτυο PLMN (Visited PLMN – VPLMN).
 - Μηχανισμούς παράδοσης μηνυμάτων ενεργοποίησης που υποστηρίζονται από τον UE.
 - Τις υπάρχουσες πολιτικές παράδοσης μηνυμάτων ενεργοποίησης τύπου χειριστή κινητού δικτύου (Mobile Network Operator – MNO).
 - Τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τον εξυπηρετητή MTC.
- Ενεργοποιεί τα μητρώα καταγραφής των δεδομένων μηνυμάτων ενεργοποίησης σχετικά με τη χρέωση της συσκευής για τις κλήσεις και τη χρήση του κινητού Διαδικτύου (mobile internet) (Charging Data Records - CDRs) και προωθεί τα δεδομένα σε μια λειτουργία δεδομένων χρέωσης (Charging Data Function/Charging Gateway Function - CDF/CGF), μέσω ενός νέου σημείου αναφοράς Rf/Ga.
- Μπορεί να υποστηρίξει ασφαλή επικοινωνία ανάμεσα στο δίκτυο 3GPP και τον εξυπηρετητή MTC.
- Πραγματοποιεί μετάφραση πρωτοκόλλων, όταν αυτό κριθεί απαραίτητο, και προώθηση ενός αιτήματος ενεργοποίησης συσκευής προς μια σχετική δικτυακή οντότητα (κόμβος εξυπηρέτησης για υποστήριξη του GPRS (Serving GPRS - SGSN)/οντότητα διαχείρισης κινητικότητας (Mobile Management Entity - MME), ή κέντρο εξυπηρέτησης υπηρεσιών SMS (Short Message Service-Service Centre - SMS-SC) μέσα στο πεδίο του HPLMN), τέτοιο ώστε να ταιριάζει με τον επιλεγμένο μηχανισμό παράδοσης.
- Τέλος, έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
 - Σε κάποιο HPLMN μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά MTC-IWFs.
 - Το σύστημα πρέπει να είναι ανθεκτικό στη διακοπή της λειτουργίας κάποιου από τα MTC-IWFs.

II. *Λειτουργία Home Subscriber Server/Home Location Register (HSS/HLR):* Η λειτουργία HSS/HLR για την ενεργοποίηση συσκευών περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

- Τερματίζει το σημείο αναφοράς S6m, στο οποίο τα MTC-IWFs συνδέονται στο HSS/HLR.
- Αποθηκεύει και παρέχει στο MTC-IWF πληροφορίες δρομολόγησης, ρύθμισης των συσκευών, και προσβασιμότητας του UE.

III. *Λειτουργία SGSN/MME*: Περιλαμβάνει τα εξής:

- Ο SGSN επικοινωνεί με το MTC-IWF μέσω του σημείου αναφοράς T5a.
- Η MME επικοινωνεί με το MTC-IWF μέσω του σημείου αναφοράς T5b.
- Ο SGSN/MME λαμβάνει μηνύματα ενεργοποίησης συσκευής από το MTC-IWF και προαιρετικά τα αποθηκεύει.
- Ο SGSN/MME ενθυλακώνει πληροφορίες παράδοσης μηνυμάτων ενεργοποίησης σε ένα μήνυμα που αποστέλλεται στον UE.

Τα σημεία αναφοράς που σχετίζονται με την επικοινωνία MTC είναι τα ακόλουθα:

- *MTCsms*: Χρησιμοποιείται από μια οντότητα εκτός του συστήματος του 3GPP για την επικοινωνία με τους UEs μέσω μηνυμάτων SMS.
- *MTCsp*: Χρησιμοποιείται από μια οντότητα εκτός του συστήματος του 3GPP για την επικοινωνία με το MTC-IWF.
- *T4*: Χρησιμοποιείται από το MTC-IWF για να δρομολογήσει μηνύματα ενεργοποίησης συσκευής προς το SMS-SC εντός του HPLMN.
- *T5a*: Χρησιμοποιείται για την επικοινωνία ανάμεσα στο MTC-IWF και το SGSN.
- *T5b*: Χρησιμοποιείται για την επικοινωνία ανάμεσα στο MTC-IWF και το MEM.
- *S6m*: Χρησιμοποιείται από το MTC-IWF για την επικοινωνία με το HSS/HLR με σκοπό την άντληση πληροφοριών δρομολόγησης, ρύθμισης των συσκευών, και προσβασιμότητας του UE.

3.3. Η Αρχιτεκτονική ETSI M2M

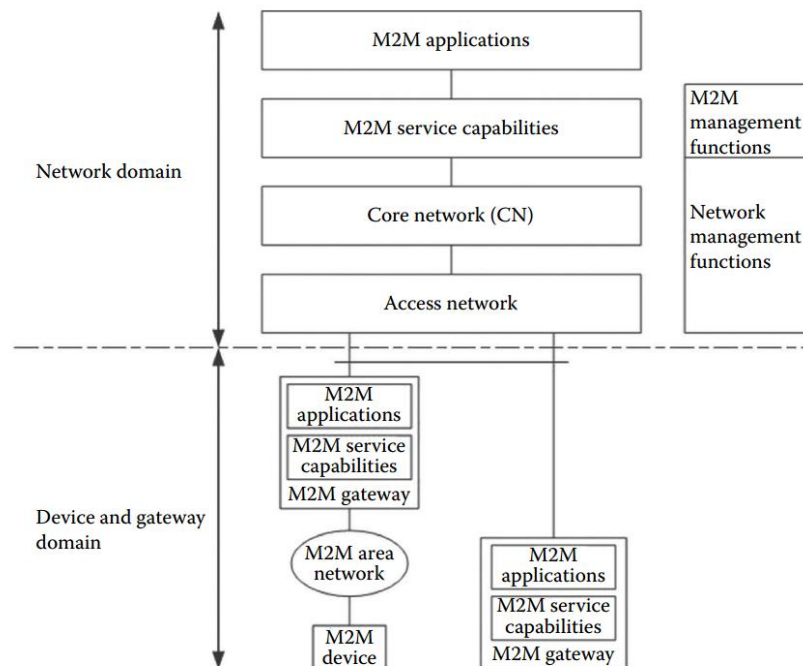
Η αρχιτεκτονική ETSI M2M είναι σχεδιασμένη ώστε να χρησιμοποιεί ένα υποκείμενο δίκτυο που διαθέτει δυνατότητα δικτύωσης IP και συμπεριλαμβάνει τις υπηρεσίες IP που παρέχει το 3GPP, τις Τηλεπικοινωνιακές και Διαδικτυακές Υπηρεσίες και Πρωτόκολλα Προηγμένης Δικτύωσης (TISPAN), και τα συστήματα που συμμορφώνονται με το 3GPP2. Η πρόθεση του ETSI είναι να προσδιορίσει μια δομή για την ανάπτυξη υπηρεσιών M2M με ένα γενικό σύνολο δυνατοτήτων, ανεξάρτητων από το υποκείμενο IP δίκτυο. Τα βασικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής ETSI M2M είναι *οι τομείς, οι δυνατότητες παροχής υπηρεσιών, τα σημεία αναφοράς, και οι πόροι*.

Η πρόθεση της τεχνικής επιτροπής (TC) του ETSI είναι η δημιουργία μιας πλατφόρμας υπηρεσιών επικοινωνίας E2E M2M και ενός ενδιάμεσου στρώματος υπηρεσιών ως βασικού συστατικού μιας οριζόντιας λύσης M2M, καθώς και η ανάπτυξη και συντήρηση της συνολικής αρχιτεκτονικής για τις επικοινωνίες M2M. Τα βασικά πρότυπα που έχουν εκδοθεί στο ETSI TC M2M Release 1 είναι ένα σύνολο τριών συγκεκριμένων διασαφήσεων: απαιτήσεις υπηρεσιών M2M, λειτουργική αρχιτεκτονική, και περιγραφές διεπαφής. Σχετικά με το Release 2, ο ETSI έχει ήδη θέσει τις προτεραιότητες για το σχεδιασμό του, και κάποια βασικά στοιχεία του που

εξετάζονται είναι η χρέωση (για τις κλήσεις και το mobile internet), τα μοντέλα δεδομένων, επεκτάσεις στην ασφάλεια, η προτυποποίηση της χρήσης των δικτυακών διεπαφών των χειριστών, οι πλατφόρμες υπηρεσιών πολλών χειριστών, η ανακάλυψη υπηρεσιών, η διαχείριση της περιοχής δικτύου, και τα προφίλ υπηρεσιών διαδικτύωσης.

3.3.1. Αρχιτεκτονική Συστήματος και Τομείς

Μια υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική συστήματος M2M απεικονίζεται στο Σχ. 3.3 και παρέχει την επισκόπηση των μερών του συστήματος και της σχέσης ανάμεσά τους. Η αρχιτεκτονική αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη Δυνατοτήτων Παροχής Υπηρεσιών M2M (M2M service capabilities – M2M MCs) στο δίκτυο, στις συσκευές, και στα gateways που αλληλοεπιδρούν με τις M2M εφαρμογές. Οι βασικοί τομείς της αρχιτεκτονικής ETSI M2M είναι δύο: ο τομέας του δικτύου, και ο τομέας συσκευής και gateway.



Σχήμα 3.3: Αρχιτεκτονική δικτύου M2M υψηλού επιπέδου

Ο τομέας συσκευής και gateway περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- **Συσκευή M2M:** Μια συσκευή που υλοποιεί M2M εφαρμογές χρησιμοποιώντας M2M SCs και λειτουργίες του τομέα δικτύου. Οι συσκευές M2M μπορούν να συνδέονται με τον τομέα δικτύου με τους τρόπους που περιγράφονται στη συνέχεια.

- *Άμεση συνδεσιμότητα:* Οι συσκευές M2M συνδέονται στον τομέα δικτύου μέσω του δικτύου πρόσβασης, δηλαδή μέσω συσκευών που είναι απευθείας συνδεδεμένες με το δίκτυο πρόσβασης του χειριστή. Η συσκευή πραγματοποιεί διαδικασίες σε επικοινωνία με τον τομέα δικτύου όπως εγγραφή, εξουσιοδότηση, πιστοποίηση αυθεντικότητας, διαχείριση, και τροφοδοσία. Επίσης, μπορεί να παρέχει υπηρεσίες προς άλλες συσκευές M2M συνδεδεμένων με αυτή, “κρυμμένων” από τον τομέα δικτύου.
- *Gateway ως πληρεξούσιο (proxy) δικτύου:* Η συσκευή M2M συνδέεται στον τομέα δικτύου μέσω ενός M2M gateway. Οι συσκευές M2M συνδέονται με τα gateways χρησιμοποιώντας ένα τοπικό δίκτυο M2M. Το gateway λειτουργεί ως πληρεξούσιος του τομέα δικτύου προς τις συσκευές M2M για της εξής διαδικασίες: πιστοποίηση αυθεντικότητας, εξουσιοδότηση, διαχείριση, και τροφοδοσία. Τέλος, οι συσκευές M2M μπορούν να συνδεθούν με τον τομέα δικτύου μέσω πολλαπλών gateways.
- *Τοπικό Δίκτυο M2M:* Παρέχει συνδεσιμότητα στο φυσικό στρώμα και στο στρώμα MAC ανάμεσα σε συσκευές M2M και gateways. Μερικά παραδείγματα τέτοιων δικτύων είναι αυτά που χρησιμοποιούν τεχνολογίες ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής (WPAN) όπως τα IEEE 802.15.x, ZigBee, Bluetooth, Internet Engineering Task Force (IETF) Routing over Low-Power and Lossy (ROLL) Networks, ISA100.11a, κλπ, αλλά και τεχνολογίες τοπικών δικτύων όπως τα Power Line Communications, Meter-Bus (M-BUS), Ασύρματο M-BUS, και το WiFi (IEEE 802.11x).
- *M2M Gateway:* Είναι ένα gateway που υλοποιεί M2M εφαρμογές χρησιμοποιώντας M2M SCs. Διασφαλίζει τη διαδικτύωση και τη διασύνδεση των συσκευών M2M με τους τομείς δικτύου και εφαρμογής. Λειτουργεί ως πληρεξούσιος ανάμεσα στις συσκευές και τον τομέα δικτύου. Επίσης, μπορεί να υλοποιεί εφαρμογές παρέχοντας υπηρεσίες σε άλλες συσκευές που είναι συνδεδεμένες με αυτό και “κρυμμένες” από τον τομέα δικτύου. Συνήθως, το M2M gateway διαθέτει τμήμα hardware με μια μονάδα επικοινωνίας (GSM, GPRS/LTE), για την επικοινωνία με ασύρματα και κινητά δίκτυα, αλλά και μια τουλάχιστον μονάδα επικοινωνίας που επιτρέπει την πρόσβαση στο τοπικό δίκτυο M2M.

Ο τομέας δικτύου αποτελείται από τα ακόλουθα στοιχεία:

- *Δίκτυο Πρόσβασης (Access Network):* Είναι το δίκτυο που επιτρέπει στον τομέα συσκευής και gateway να επικοινωνεί με το δίκτυο κορμού. Τα δίκτυα πρόσβασης μπορεί να είναι γραμμές xDSL (Digital Subscriber Line), δορυφορικό HFC (Hybrid Fiber Coaxial), GERAN (GSM Edge Radio Access Network), Γενικά Επίγειο Δίκτυο

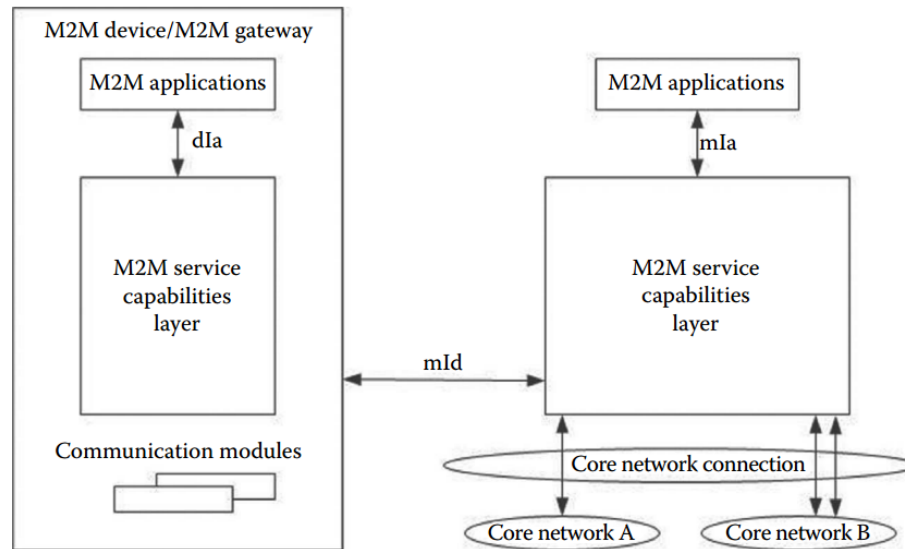
Πρόσβασης (Universal Terrestrial Access Network - UTRAN), Εξελιγμένο (E-UTRAN), WLAN, και WiMAX.

- *Δίκτυο Κορμού (Core Network – CN):* Παρέχει στο δίκτυο τα ακόλουθα:
 - Λειτουργίες σχετικές με την IP συνδεσιμότητα και διασύνδεση με άλλα δίκτυα.
 - Λειτουργίες υπηρεσιών και ελέγχου του δικτύου.
 - Περιαγωγή (roaming) με άλλα δίκτυα κορμού.
 - Τα διαφορετικά είδη δικτύων κορμού έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά. Κάποια δίκτυα κορμού είναι τα 3GPP CNs, ETSI TISPAN CN, και 3GPP2 CN.
- *Δυνατότητες Παροχής Υπηρεσιών M2M (M2M SCs):* Παρέχουν λειτουργίες M2M που μπορούν να μοιράζονται σε διαφορετικές εφαρμογές μέσω ενός συνόλου από διεπαφές. Χρησιμοποιούν λειτουργίες του δικτύου κορμού, και απλοποιούν και βελτιστοποιούν την ανάπτυξη και υλοποίηση των εφαρμογών.
- *M2M Εφαρμογές:* Εφαρμογές που εκτελούνται με τη λογική της υπηρεσίας και χρησιμοποιούν M2M SCs προσβάσιμα μέσω μιας διεπαφής ανοιχτής πρόσβασης.
- *Λειτουργίες Διαχείρισης Δικτύου (Network Management Functions):* Όλες οι λειτουργίες που απαιτούνται για να γίνει διαχείριση του δικτύου πρόσβασης και του δικτύου κορμού. Μερικές από τις λειτουργίες αυτές είναι η επίβλεψη του δικτύου ETSI M2M και η διαχείριση σφαλμάτων.
- *Λειτουργίες Διαχείρισης M2M (M2M Management Functions):* Όλες οι λειτουργίες που απαιτούνται για τη διαχείριση των M2M SCs στον τομέα δικτύου.

3.3.2. Η Δομή των M2M SCs και τα Σημεία Αναφοράς

Οι M2M SCs είναι λειτουργίες που παρέχονται από κάθε τομέα προς τις M2M εφαρμογές και τις μοιράζονται διαφορετικές εφαρμογές. Μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις λειτουργίες ενός ή και περισσότερων δικτύων κορμού μέσω διεπαφών που προσδιορίζονται από τα 3GPP, 3GPP2, ETSI TISPAN, κλπ. Το στρώμα των M2M SCs (M2M SCL) θέτει προς διάθεση τις λειτουργίες αυτές στα διάφορα σημεία αναφοράς. Όταν ένα χαρακτηριστικό ενός τομέα είναι άμεσα διαχειρίσιμο από κάποια M2M εφαρμογή, πρέπει να βρίσκεται στο αντίστοιχο SCL. Λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν είναι όλες οι δυνατότητες παροχής υπηρεσιών υποχρεωτικές, και ότι δεν προσδιορίζονται όλες από πρότυπα, η δομή των M2M SCs έχει δημιουργηθεί με τη

δυνατότητα επέκτασης. Η δυνατότητα εισαγωγής πρόσθετων SCs και ανακάλυψής τους από τις εφαρμογές έχει θεμελιώδη σημασία για την ευελιξία της δομής και των προτύπων.



Σχήμα 3.4: Η δομή της λειτουργικής αρχιτεκτονικής των M2M SCs

Οι ακόλουθοι ορισμοί έχουν υιοθετηθεί από το ETSI ως αναφορά στα M2M SCs, στους τομείς δικτύου και συσκευής/gateway:

- *Στρώμα SC Δικτύου (Network Service Layer – NSCL)*: αναφέρεται στα M2M SCs στον τομέα δικτύου.
- *Στρώμα SC Gateway (GSCL)*: αναφέρεται στις M2M SCs των gateways.
- *Στρώμα SC Συσκευής (DSCL)*: αναφέρεται στις M2M SCs των συσκευών.
- *Στρώμα SC (SCL)*: αναφέρεται σε οποιοδήποτε από τα NSCL, GSCL, DSCL.
- *Στρώμα SC συσκευής/gateway (D/G SCL)*: αναφέρεται σε οποιοδήποτε από τα DSCL, GSCL.

Ο ETSI αναγνωρίζει τις ακόλουθες βασικές κατηγορίες M2M SCs:

- *Ενεργοποίηση Εφαρμογής (Application Enablement – xAE)*: Παρέχει μια μοναδική διεπαφή API στις εφαρμογές.
- *Γενική Επικοινωνία (Generic Communication – xGC)*: Διαχειρίζεται όλες τις πτυχές που αναφέρονται στην εγκατάσταση και διακοπή μιας συνεδρίας ασφαλούς μετάδοσης, καθώς και πρόσβαση, μέσω διεπαφών, στις υπηρεσίες του δικτύου κορμού.
- *Προσβασιμότητα, Διευθυνσιοδότηση, και Αποθήκευση (Reachability, Addressing, and Repository – xRAR)*: Παρέχει χωρητικότητα αποθήκευσης καταστάσεων σχετικών με εφαρμογές, συσκευές, και gateways, και διαχειρίζεται τις εγγραφές για αλλαγή δεδομένων.

- *Επιλογή Επικοινωνίας (Communication Selection – xCS)*: Παρέχει τη δυνατότητα επιλογής δικτύου στις συσκευές και τα gateways που είναι προσβάσιμα μέσω πολλαπλών δικτύων, για παράδειγμα μέσω WiFi και GPRS.
- *Απομακρυσμένη Διαχείριση Οντοτήτων (Remote Entity Management – xREM)*: Παρέχει λειτουργίες σχετικές με τη διαχείριση του κύκλου ζωής της συσκευής ή του gateway, όπως η ανανέωση του λογισμικού και του firmware, και η διαχείριση σφαλμάτων και απόδοσης.
- *Ασφάλεια (Security – xSEC)*: Υλοποιεί την πιστοποίηση αυθεντικότητας, την εξουσιοδότηση, και τη διαχείριση κλειδιών. Υποστηρίζει, μέσω μιας διεπαφής, την επικοινωνία με κάποιον εξυπηρετητή εξουσιοδότησης για την απόκτηση των πληροφοριών αυθεντικότητας.
- *Διατήρηση Ιστορικού και Δεδομένων (History and Data Retention – xHDR)* (προαιρετική): Αποθηκεύει αρχεία σχετικά με τη χρήση των M2M SCs. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς επιβολής της νομιμότητας, όπως για παράδειγμα η προστασία της ιδιωτικότητας.
- *Διαχείριση Συναλλαγών (Transaction Management – xTM)* (προαιρετική): Διαχειρίζεται τις συναλλαγές.
- *Διαχειριστής Αποζημίωσης (Compensation Broker – xCB)* (προαιρετική): Διαχειρίζεται της συναλλαγές αποζημίωσης εκ μέρους των εφαρμογών.
- *Έκθεση Τηλεπικοινωνιακής Διαχείρισης (Telco Operator Exposure – xTOE)* (προαιρετική): Παρέχει πρόσβαση, μέσω της ίδιας διεπαφής API που χρησιμοποιείται για πρόσβαση στις SCs, στις παραδοσιακές υπηρεσίες διαχείρισης δικτύου, όπως η SMS, η MMS, και η USSD.
- *Πληρεξούσιο Διαδικτύωσης (Internetworking Proxy – xIP)*: Επιτρέπει σε μια συσκευή χωρίς προτυποποίηση από το ETSI να συνδεθεί με ένα πρότυπο του ETSI.

Επισημαίνεται ότι, στη συντομογραφία κάθε ορισμού, το “x” μπορεί να αντικατασταθεί με “N” για τα δίκτυα, “G” για τα gateways, και “D” για τις συσκευές.

Εκάστη των M2M SCs διαθέτει τα ακόλουθα στοιχεία:

- *M2M Εφαρμογές*: Μπορούν να είναι μια από τις ακόλουθες: εφαρμογή συσκευής (DA), εφαρμογή gateway (GA), και εφαρμογή δικτύου (NA). Συγκεκριμένα, μια DA μπορεί να βρίσκεται μέσα σε συσκευή M2M που χρησιμοποιεί SCs ή σε συσκευή που δεν τις χρησιμοποιεί.
- *Σημείο αναφοράς mla*: Δίνει σε μια εφαρμογή δικτύου (NA) πρόσβαση στις M2M SCs του τομέα δικτύου. Εγκαθιστά μια διεπαφή ανάμεσα σε μια M2M εφαρμογή του τομέα δικτύου και σε μια SC ενεργοποίησης εφαρμογής δικτύου (Network Application Enablement SC – NAE SC).

- *Σημείο αναφοράς dla*: Δίνει σε μια εφαρμογή συσκευής (DA) εντός μιας συσκευής M2M πρόσβαση σε διαφορετικές M2M SCs της ίδιας συσκευής ή ενός gateway. Επίσης, παρέχει σε μια GA εντός ενός M2M gateway πρόσβαση σε διαφορετικές M2M SCs του ίδιου gateway. Το σημείο αναφοράς αυτό εγκαθιδρύει μια διεπαφή ανάμεσα σε μια SC μιας συσκευής ή gateway και σε μια SC γενικής επικοινωνίας δικτύου (Network Generic Communication SC – NGC SC). Μια SC του DSCL ή του GSCL έχει πρόσβαση σε όλες τις SCs μέσω επικοινωνίας NGC, με χρήση του σημείου αναφοράς mld.
- *Σημείο αναφοράς mld*: Επιτρέπει σε μια M2M SC μιας M2M συσκευής ή gateway να επικοινωνήσει με άλλες SCs στον τομέα δικτύου και αντιστρόφως. Χρησιμοποιεί τις λειτουργίες συνδεσιμότητας του δικτύου κορμού ως υποκείμενο στρώμα δικτύου. Εγκαθιστά ένα σημείο αναφοράς ανάμεσα σε μια M2M εφαρμογή του τομέα συσκευής και gateway και σε μια SC ενεργοποίησης εφαρμογής συσκευής/gateway (Device/Gateway Application Enablement SC – DAE/GAE SC). Μια M2M εφαρμογή του τομέα συσκευής και gateway έχει πρόσβαση σε όλες τις SC με χρήση των υπηρεσιών DAE/GAE, μέσω του σημείου αναφοράς dla.

3.3.3. Η σχέση ανάμεσα στο 3GPP και το ETSI

Ενώ η αρχιτεκτονική 3GPP MTC εστιάζει κυρίως στις επικοινωνίες, η ETSI M2M εστιάζει στις εφαρμογές, συμπεριλαμβάνοντας τις SCs, την ασφάλεια, και τη διαχείριση συσκευών. Οι δύο οργανισμοί, έχοντας αναγνωρίσει τη διαφορά αυτή από το 2012, ξεκίνησαν μια κοινή δράση, με στόχο το σχεδιασμό μιας λειτουργικής αρχιτεκτονικής M2M που θα χρησιμοποιεί ένα υποκείμενο δίκτυο, ικανό να υποστηρίξει μετάδοση IP.

3.4. Η Αρχιτεκτονική Συστήματος του Προγράμματος EXALTED

3.4.1. Περιγραφή της Αρχιτεκτονικής

Ανάμεσα στους βασικούς του στόχους, το πρόγραμμα EXALTED προσδιορίζει μια αρχιτεκτονική συστήματος που έχει ως βασικό στόχο να βελτιώσει και να διευκολύνει την M2M επικοινωνία μέσω ενός δικτύου LTE, αλλά με μειωμένη πολυπλοκότητα και κόστος συσκευών, και με βελτιωμένη ασφάλεια.

Ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός και η περαιτέρω εξέλιξη και διύλιση της αρχιτεκτονικής του EXALTED ξεκίνησαν με τον προσδιορισμό των πλέον χαρακτηριστικών περιπτώσεων χρήσης του συστήματος. Αυτές περιπτώσεις – μερικές από τις οποίες είναι τα Έξυπνα Συστήματα Μεταφοράς, οι Έξυπνοι Μετρητές, και η Ηλεκτρονική Υγεία – λήφθηκαν υπόψη κατά τον ορισμό των λειτουργιών, των χαρακτηριστικών, των τοπολογιών, των χαρακτηριστικών κίνησης, και των

απαιτήσεων σε εύρος ζώνης του συστήματος για το πρόγραμμα EXALTED. Το σύστημα αυτό ονομάζεται LTE-M και είναι η επέκταση του LTE για συσκευές/μηχανές M2M.

Η βασική ιδέα για το EXALTED ήταν ο σχεδιασμός ενός αποτελεσματικού συστήματος E2E, που θα μπορούσε να καλύψει τα κενά στα τρέχοντα συστήματα των αρχιτεκτονικών ETSI M2M και 3GPP MTC, αλλά θα μπορούσε παράλληλα να διατηρήσει στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τη διαλειτουργικότητα και τη συμβατότητα και με τις δύο. Συνεπώς, οι δύο αυτές αρχιτεκτονικές χρησιμοποιούνται ως αναφορά για το LTE-M, και όλες οι καινοτομίες του EXALTED αποτελούν βελτιώσεις τους και ενσωματώνονται στη δομή τους.

Τα συστατικά μέρη της αρχιτεκτονικής και οι αντίστοιχες λειτουργίες αναγνωρίζονται με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές του EXALTED. Ένα μέρος είναι είτε φυσική οντότητα (όπως κάποια συσκευή) είτε λογικό στοιχείο που συνοψίζει συγκεκριμένες λογικές συναρτήσεις.

Σε υψηλό επίπεδο, η αρχιτεκτονική του EXALTED απεικονίζεται στο Σχ. 3.5. Τα μέρη του EXALTED ομαδοποιούνται σε δύο τομείς:

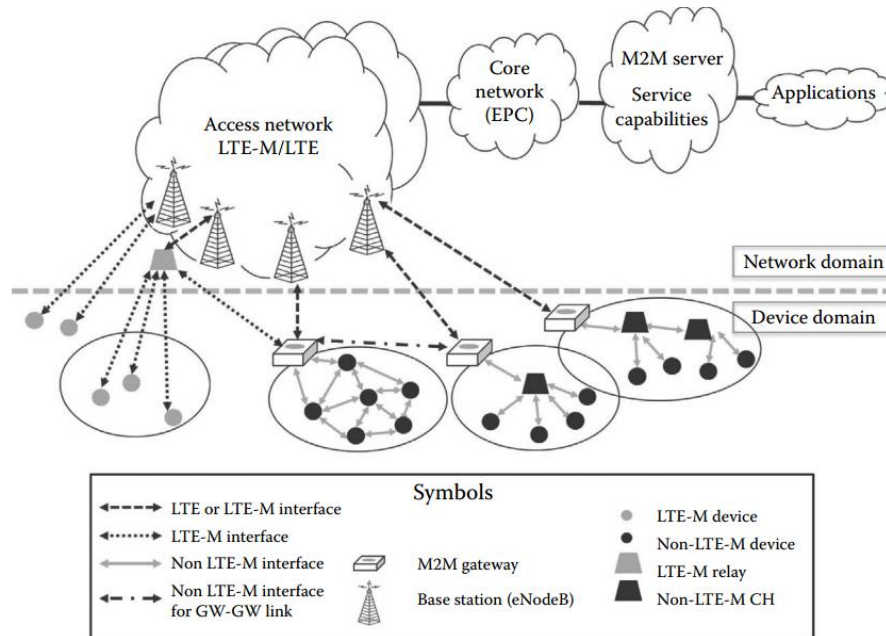
- Τομέας Δικτύου (Network Domain – ND)
- Τομέας M2M Συσκευής και Gateway (M2M Device and Gateway Domain – DD)

Ο ND περιλαμβάνει όλα τα μέρη που ελέγχουν τις εφαρμογές που εκτελούνται στις συσκευές και τους εξυπηρετητές, παρέχει ασφαλή επικοινωνία E2E, και αναλαμβάνει τη διαχείριση των συσκευών.

Ένα σημαντικό μέρος του ND είναι το δίκτυο κορμού του LTE, το EPC (Evolved Packet Core), που είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση του κυψελωτού δικτύου και του eNodeBs στα δίκτυα E-UTRAN. Οι εφαρμογές που εκτελούνται στους M2M εξυπηρετητές είναι προσβάσιμες από το δίκτυο μέσω του EPC. Άλλα λογικά τμήματα του ND είναι οι εξυπηρετητές πιστοποίησης αυθεντικότητας και διαχείρισης των συσκευών και των υπολοίπων στοιχείων του δικτύου.

Ο DD αποτελείται από συσκευές που υλοποιούν μια ή περισσότερες M2M εφαρμογές. Η ζεύξη ανάμεσα σε DD και ND είναι η διεπαφή Uu που καθορίζεται από το 3GPP. Ωστόσο, η διεπαφή αέρα (air interface) που χρησιμοποιείται δεν είναι το LTE αλλά το LTE-M, το οποίο συνυπάρχει με το LTE στο ίδιο φάσμα συχνοτήτων.

Με κριτήριο αν οι M2M συσκευές στο DD χρησιμοποιούν ως ασύρματη διεπαφή το LTE-M ή όχι, ταξινομούνται σε συσκευές LTE-M και σε non-LTE-M συσκευές. Οι non-LTE-M συσκευές μπορούν να σχηματίσουν ένα δίκτυο χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες από το LTE-M. Ένα τέτοιο δίκτυο ονομάζεται “τριχοειδές” δίκτυο (capillary network), και αποτελείται από ομάδα M2M συσκευών που χρησιμοποιούν την ίδια τεχνολογία και επικοινωνούν μεταξύ τους ανεξάρτητα από το δίκτυο LTE-M. Για την παροχή συνδεσιμότητας στα τριχοειδή δίκτυα με το δίκτυο LTE-M, χρησιμοποιείται M2M gateway. Συνεπώς, το M2M gateway στο EXALTED λειτουργεί ως η ζεύξη ανάμεσα στο κυψελωτό δίκτυο (LTE-M) και στα συνδεδεμένα σε αυτό τριχοειδή δίκτυα, και επιτρέπει την αξιόπιστη επικοινωνία των συσκευών non-LTE-M και των M2M εξυπηρετητών.

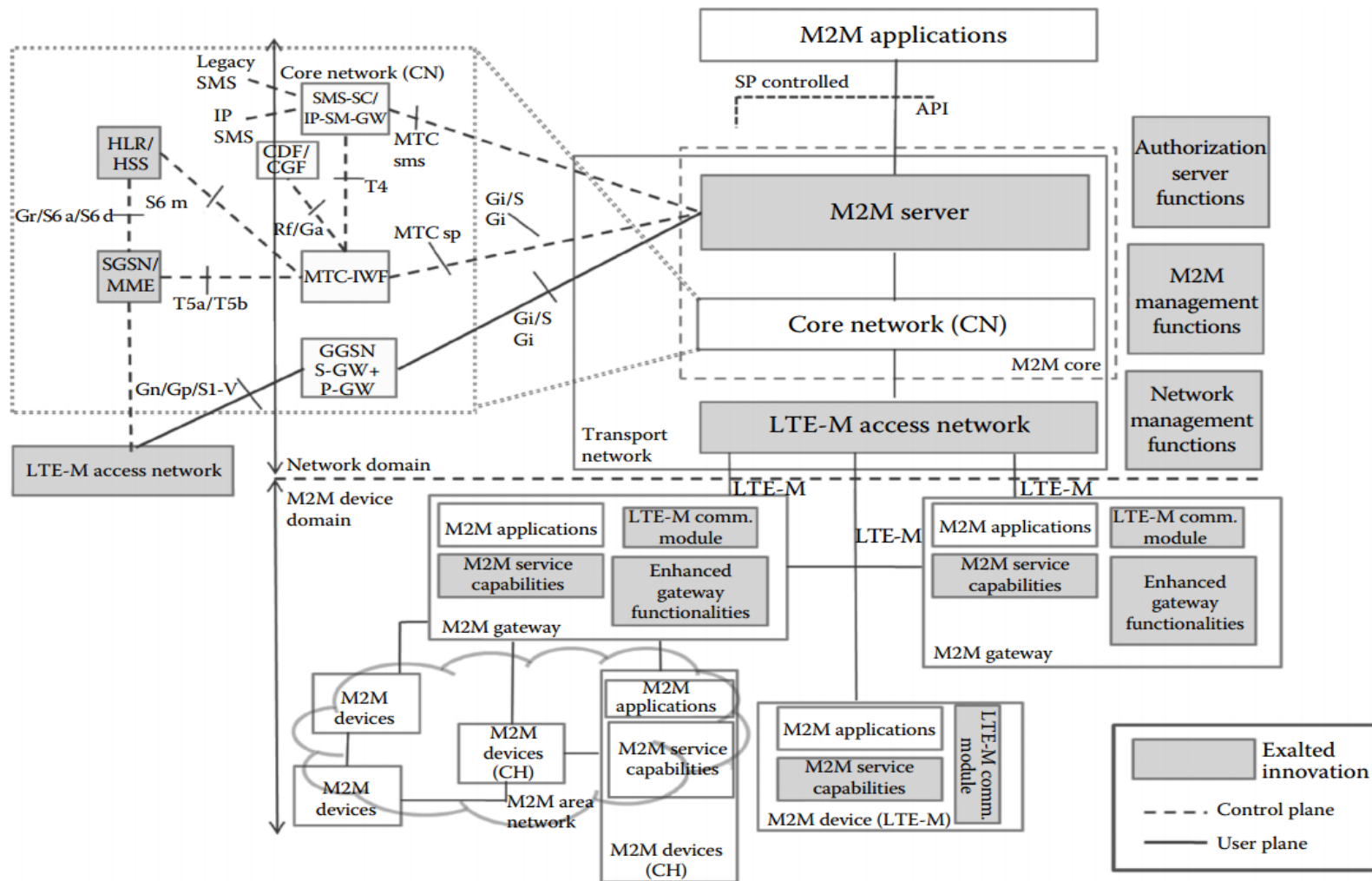


Σχήμα 3.5: Υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική του EXALTED

Για λόγους διαύγειας και πληρότητας, στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι αντιστοιχίες των όρων που χρησιμοποιούνται στις αρχιτεκτονικές των ETSI, 3GPP, και EXALTED. Οι ρόλοι και οι λειτουργίες τους δεν είναι απαραίτητα οι ίδιες, αλλά τα στοιχεία τους είναι ομοειδή.

Ορολογία 3GPP	Ορολογία ETSI	Ορολογία EXALTED
Εξυπηρετητής MTC	M2M SCs	Εξυπηρετητής M2M
Εφαρμογή MTC (UE)	Εφαρμογή M2M (συσκευή)	Εφαρμογή M2M (συσκευή)
-	Εφαρμογή M2M (M2M gateway)	Εφαρμογή M2M (M2M gateway)
-	-	Εφαρμογή M2M (CH)
Χρήστης MTC	Συσκευή M2M	LTE-M/non-LTE-M συσκευή
EPC	Δίκτυο Κορμού	EPC
Δίκτυο Τυχαίας Πρόσβασης	Δίκτυο Πρόσβασης	LTE-M Δίκτυο Πρόσβασης
eNB	-	eNB
Κόμβος Επαναλήπτης	-	Επαναλήπτης LTE-M
-	M2M gateway	M2M gateway
-	Δίκτυο Περιοχής M2M	Τριχοειδές Δίκτυο M2M

Πίνακας 3.1: Ισοδυναμίες ορολογιών για τις αρχιτεκτονικές των ETSI, 3GPP, και EXALTED



Σχήμα 3.6: Τα μέρη της αρχιτεκτονικής EXALTED

3.4.2. Τα μέρη του Τομέα Δικτύου (ND)

- *Εξυπηρετητής M2M*: Είναι ένα λογικά τμήμα που εκτελεί τις εφαρμογές M2M. Οι εξυπηρετητές M2M είναι υπεύθυνοι για την έναρξη και τον τερματισμό της E2E συνδεσιμότητας με οποιοδήποτε πρόσθετο στοιχείο του DD - δηλαδή τις M2M συσκευές και gateways, και τα M2M CHs (βλ.3.4.3) - αλλά μόνο εφόσον αυτό έχει ήδη εγγραφεί στον εξυπηρετητή. Οι εφαρμογές εκτελούνται πάνω από διάφορα υποκείμενα πρωτόκολλα και τεχνολογίες. Εκτός από την εκτέλεση της εφαρμογής, ο εξυπηρετητής εκτελεί λειτουργίες διαχείρισης και ελέγχου των συσκευών. Για παράδειγμα, εκτελώντας ένα ειδικά σχεδιασμένο πρωτόκολλο ελέγχου συσκευών, οι εξυπηρετητές χρησιμοποιούν το ίδιο δίκτυο για την επικοινωνία τόσο με τις M2M συσκευές όσο και με τα M2M gateways.
- *EPC (Δίκτυο Κορμού)*: Τα ακόλουθα στοιχεία του EPC είναι τα σημαντικότερα για τη γενική επισκόπηση της αρχιτεκτονικής του EXALTED: δικτυακό gateway δεδομένων πακέτου (Packet Data Network Gateway – PDN-GW), gateway εξυπηρέτησης, οντότητα διαχείρισης κινητικότητας (MME), Home Subscriber Server (HSS), και λειτουργίες ελέγχου πολιτικής και αλλαγής κανόνων. Δεν έχουν γίνει αλλαγές στο EPC, σε σχέση με το αντίστοιχο του 3GPP. Ωστόσο, για την εκπλήρωση ορισμένων ειδικών στόχων του EXALTED (όπως η ενεργειακή βιωσιμότητα, η μείωση της σηματοδότησης, και η διαχείριση του μεγάλου πλήθους των M2M συσκευών), απαιτείται από το EPC να ελαχιστοποιήσει την αποστολή μηνυμάτων από και προς τις συσκευές. Στη χρήση του EPC στο LTE-M, η απαίτηση αυτή πρέπει να ικανοποιηθεί από το χειριστή του δικτύου.
- *LTE-M eNB*: Το στοιχείο αυτό διαφοροποιείται από το eNB του 3GPP. Πολλοί μηχανισμοί και αλγόριθμοι υλοποιούνται στο φυσικό στρώμα, στο στρώμα MAC, και στο RRC (Radio Resource Control) uplink και downlink για την υποστήριξη των αντίστοιχων πρωτοκόλλων της διεπαφής LTE-M Uu. Οι σημαντικότερες λειτουργίες του LTE-M eNB είναι οι ακόλουθες:
 - Προστασία από σφάλματα.
 - Παροχή τυχαίας πρόσβασης και σχεδιασμένης πρόσβασης στους τηλεπικοινωνιακούς πόρους στο χρόνο και στη συχνότητα (κανάλια και χρονικές στιγμές) που χρησιμοποιούνται για τη σηματοδότηση.
 - Μετάδοση πιλοτικών σημάτων για την εκτίμηση του διαύλου.
 - Έναρξη και έλεγχος των διαδικασιών αναμετάδοσης.
 - Εγκατάσταση και τερματισμός σύνδεσης.
 - Συγχρονισμός πομπού-δέκτη.
 - Προσαρμογή των παραμέτρων της ζεύξης στις συνθήκες διάδοσης.
 - Υποστήριξη υπηρεσιών ευρυεκπομπής (broadcasting) και πολυεκπομπής (multicasting).

- *Επαναλήπτης LTE-M*: Τέτοιοι επαναλήπτες είναι παρόμοιοι με τους επαναλήπτες που χρησιμοποιούνται από το 3GPP Release 10 LTE-A. Χρησιμοποιούνται στο περιβάλλον του LTE-M για επέκταση της τηλεπικοινωνιακής κάλυψης. Έχουν τις ίδιες λειτουργίες με τους επαναλήπτες του LTE, με πρόσθετη δυνατότητα της υποστήριξης μιας διεπαφής του LTE-M. Αντιστοίχως του είδους του επαναλήπτη, οι απαιτούμενες λειτουργίες είναι υποσύνολο των λειτουργιών του eNB.

3.4.3. Τα μέρη του Τομέα M2M Συσκευής και Gateway (DD)

- *Συσκευή LTE-M*: Οι M2M συσκευές που λειτουργούν στο LTE-M μπορούν να έχουν πρόσβαση στο ND μέσω της διεπαφής Uu, είτε με άμεση πρόσβαση στο δίκτυο LTE-M είτε μέσω επαναλήπτη LTE-M. Οι συσκευές αυτές υλοποιούν M2M εφαρμογές όπως κάθε M2M συσκευή. Αναφορικά με τα υπόλοιπα μέρη του LTE-M (eNB, επαναλήπτες), οι συσκευές πρέπει να εξυπηρετούν τους βασικούς στόχους του EXALTED: τη συνύπαρξη με το LTE, την ενεργειακή και φασματική απόδοση, τη μείωση της σηματοδοσίας, την ευρεία τηλεπικοινωνιακή κάλυψη, και την ενεργειακή ανεξαρτησία. Συνεπώς, οι λειτουργίες τους είναι παρόμοιες με αυτές του eNB.
- *M2M Gateway*: Βασικός του ρόλος είναι η λειτουργία ως κρίκου διασύνδεσης των LTE, LTE-A, LTE-M, και των τριχοειδών δικτύων που αποτελούνται από μια ή και περισσότερες non-LTE-M συσκευές. Εκτελεί πολλαπλές λειτουργίες, όπως η μετάφραση των πρωτοκόλλων, η δρομολόγηση, η διαχείριση πόρων και συσκευών, η συνάθροιση δεδομένων, κλπ. Σε ειδικές περιπτώσεις, ένα M2M gateway μπορεί τοπικά να διακόψει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών, χωρίς πρόσβαση στο LTE-M και στο δίκτυο κορμού, μολονότι τέτοιες περιπτώσεις είναι εκτός των ορίων του EXALTED. Επιπλέον, η συνεχής πρόσβαση στο EPC δεν είναι υποχρεωτική ενόσω η ασφάλεια και άλλες απαιτούμενες λειτουργίες έχουν διακοπεί. Από την πλευρά του δικτύου, ένα M2M gateway είναι μια συσκευή M2M με πρόσθετες λειτουργίες. Αναφορικά με τη συνάθροιση και τη διαχείριση της κίνησης, το gateway εκτελεί μεταγλώττιση διευθύνσεων, συμπίεση δεδομένων, μείωση του ωφέλιμου φορτίου, κλπ. Τέλος, ως συσκευή που υποστηρίζει το LTE-M, πρέπει να ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις μιας συσκευής αναφορικά με τη διεπαφή αέρα.
- *Συσκευές Non-LTE-M*: Οι συσκευές αυτές δεν έχουν διεπαφή LTE-M, αλλά σχηματίζουν τριχοειδή δίκτυα χρησιμοποιώντας άλλες τεχνολογίες, όπως τη ZigBee και την IEEE 802.11x. Μπορούν να έχουν πρόσβαση στο ND μέσω ενός M2M gateway και εκτελούν εφαρμογές M2M τοπικά. Οι περισσότερες λειτουργίες τους είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη δικτυακή τεχνολογία που χρησιμοποιούν και εξαρτώμενες από το πρωτόκολλο που εκτελείται στο τριχοειδές δίκτυο.

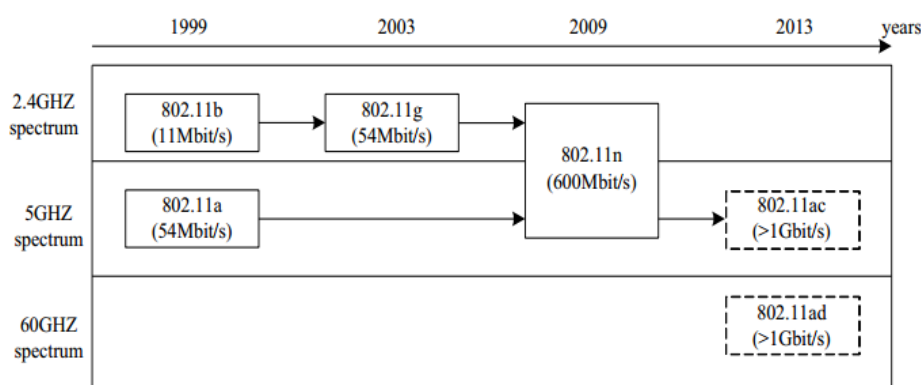
- *Non-LTE-M Cluster Heads (CHs)*: Όπως οι συνήθεις συσκευές M2M, τα CHs είναι τμήματα των τριχοειδών δικτύων, ενώ η επικοινωνία μιας συσκευής M2M μπορεί να κατευθύνεται σε ένα CH και να ελέγχεται από αυτό. Οι λειτουργίες ενός CH περιλαμβάνουν τη συνάθροιση δεδομένων, τη διαχείριση συσκευών, τη δρομολόγηση, κλπ. Σε αντίθεση με τα M2M gateways, τα CHs δεν εκτελούν μεταγλώττιση πρωτοκόλλων. Οι περισσότερες λειτουργίες τους είναι άμεσα συνδεδεμένες με τη δικτυακή τεχνολογία που χρησιμοποιούν και εξαρτώμενες από το πρωτόκολλο που εκτελείται στο τριχοειδές δίκτυο.

Κεφάλαιο 4^ο

Το πρότυπο IEEE 802.11ad

4.1. Εισαγωγή

Τα πρώτα δημοφιλή πρότυπα για τα Ασύρματα LAN (Wireless LAN – WLAN), δηλαδή τα IEEE 802.11a και 802.11b, σχεδιάστηκαν αρχικά για να παρέχουν σύνδεση στο Διαδίκτυο σε φορητούς υπολογιστές σε οικιακούς χώρους και γραφεία, ενώ αργότερα για χώρους όπως αεροδρόμια, εστιατόρια, και ξενοδοχεία. Επειδή οι ευρυζωνικές συνδέσεις είχαν τότε περιορισμένη ταχύτητα, μια ασύρματη ζεύξη χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή μικρού throughput, ήταν επαρκής. Συγκεκριμένα, το 802.11a παρείχε ρυθμούς μετάδοσης έως και 54 Mbps σε συχνότητα 5GHz, ενώ το 802.11b παρείχε έως και 11 Mbps στα 2.4GHz. Για τον περιορισμό των παρεμβολών, τα δύο πρότυπα χρησιμοποιούσαν τεχνικές διεύρυνσης φάσματος (spread-spectrum techniques) [26] και ισχυρή κωδικοποίηση. Μια βελτιωμένη έκδοση των προτύπων αυτών, η 802.11g, καθιέρωσε τη χρήση των 2.4GHz, διατηρώντας μέγιστο ρυθμό μετάδοσης στα 54 Mbps. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου, υπήρξε η απαίτηση για ζεύξεις μεγαλύτερου throughput λόγω της ανάγκης για μετάδοση δεδομένων ανάμεσα σε συνδεδεμένες συσκευές σε εσωτερικούς χώρους. Έτσι, άρχισε να χρησιμοποιείται το πρότυπο 802.11n, το οποίο εξασφάλισε μέγιστη ταχύτητα 100 Mbps περίπου, ενώ παράλληλα πρωτοπόρησε με τη χρήση της τεχνολογίας MIMO (Multiple Input, Multiple Output), με την οποία πομποί και δέκτες χρησιμοποιούν έως και τέσσερις διακριτές κεραιές που εκπέμπουν και λαμβάνουν ανεξάρτητες ροές δεδομένων, οι οποίες πολυπλέκονται και αποπλέκονται.



Σχήμα 4.1: Η χρονική εξέλιξη των προτύπων για τα WLANs

Οι υπηρεσίες που προσφέρονται (αλλά και αυτές που θα προσφέρονται στο μέλλον) από τις M2M Επικοινωνίες απαιτούν τη μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων σε ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς με πολύ μικρή ισχύ εκπομπής στα σύγχρονα WLANs. Για την ικανοποίησή τους, ορίστηκε ως στόχος η δημιουργία δύο νέων προτύπων: των IEEE 802.11ac και 802.11ad. Το πρώτο είναι στο τελικό στάδιο κατασκευής του και αποτελεί επέκταση του

802.11n, παρέχοντας ταχύτητα 500 Mbps σε μονόδρομη (απλή) ζεύξη (single link) και 1 Gbps συνολικό throughput περί τα 5GHz. Το 802.11ad, που είναι στο στάδιο του σχεδιασμού, θα προσφέρει ονομαστικούς ρυθμούς μετάδοσης έως και 7Gbps, χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης περί τα 2GHz στην περιοχή των 60GHz σε ζεύξεις μικρού μήκους, σε εσωτερικούς χώρους.

4.2. Βασικά χαρακτηριστικά του 802.11ad

4.2.1. Γενικές κατηγορίες χρήσης του 802.11ad και κατηγορίες για εφαρμογές M2M

Κατηγορία	Μοντέλο χρήσης/υπηρεσίας
Ασύρματη Απεικόνιση (Wireless Display) (εμπίπτει στο M2M)	Ασύρματη απεικόνιση από σταθερούς υπολογιστές, προβολή σε αίθουσες συνεδριάσεων, streaming από κάμερες σε προβολείς, επαγγελματική χρήση HDTV.
Διανομή Τηλεόρασης Υψηλής Ευκρίνειας (HDTV Distribution)	Video streaming στο σπίτι, home multimedia station, HDTV σε αεροπλάνα και πλοία, ασύρματη δικτύωση στο γραφείο, παροχή ιατρικής βοήθειας εξ αποστάσεως.
Ταχύ upload/download (εμπίπτει στο M2M)	Ταχύτατη μεταφορά αρχείων και συγχρονισμός, Wireless Desktop, κατέβασμα μεγάλων αρχείων video σε φορητές συσκευές, μεταφορά δεδομένων παρακολούθησης.
Backhaul Δίκτυα	Point-to-point backhaul δίκτυο, multi-media mesh backhaul δίκτυο.
Εξωτερικοί χώροι (εμπίπτει στο M2M)	Τηλε-παρουσιάσεις σε αίθουσες συνεδριάσεων και εκδηλώσεων, mesh δίκτυο δημόσιας ασφάλειας.
Βιομηχανικοί χώροι (εμπίπτει στο M2M)	Αυτοματισμός

Πίνακας 4.1: Νέα μοντέλα χρήσης των WLANs

Από τις ανωτέρω κατηγορίες χρήσης του προτύπου 802.11ad, κάποιες εμπίπτουν στα πεδία εφαρμογής των M2M επικοινωνιών, όπως αυτά αναλύθηκαν στο Κεφ. 2. Κάποια σενάρια εφαρμογής στο M2M, για συγκεκριμένες κατηγορίες χρήσης, είναι τα ακόλουθα:

- *Ασύρματη απεικόνιση*: Θα έχει εκτεταμένη χρήση στις εφαρμογές των επικοινωνιών M2M στο έξυπνο σπίτι (βλ. 2.4.3), όπου συσκευές M2M θα μπορούν αυτόματα να εκκινούν την απεικόνιση εικόνας ή video υψηλής ανάλυσης. Για παράδειγμα, ένα

σύστημα ασφαλείας θα μπορούσε, στην περίπτωση όπου ενεργοποιηθεί κάποιος αισθητήρας κίνησης, να εκκινήσει την προβολή της καταγραφής μιας κάμερας παρακολούθησης (συσκευή M2M) από έναν προβολέα (συσκευή M2M), σε ζωντανό χρόνο, σε μια οθόνη κοντά στο χρήστη, ώστε να υπάρξει άμεση ειδοποίησή του. Στο παράδειγμα αυτό, ιδιαίτερη σημασία έχει ο μεγάλος ρυθμός μετάδοσης για την απρόσκοπτη και ποιοτική προβολή video μεγάλης ευκρίνειας σε ζωντανό χρόνο.

- *Ταχύ upload/download*: Οι μεγάλοι ρυθμοί μετάδοσης αρχείων εικόνας, ήχου, και video, καθώς και η τεχνική του beamforming³ θα συμβάλουν δραματικά στη βελτιστοποίηση των εφαρμογών M2M της Συμμετοχικής Παρακολούθησης Περιβάλλοντος (βλ. 2.4.6). Επιπλέον, στο έξυπνο ενεργειακό δίκτυο, στο έξυπνο σπίτι, και στο έξυπνο κτίριο, οι μεγάλοι ρυθμοί μετάδοσης θα συμβάλουν στην άμεση αναγνώριση και ρύθμιση (setup) των νέων συσκευών M2M που εισέρχονται στο αντίστοιχο δίκτυο και θα διευκολύνουν την ανάλυση των δεδομένων M2M σε πραγματικό χρόνο.
- *Εξωτερικοί χώροι*: Ήδη αναφέρθηκαν τα οφέλη των υψηλών ρυθμών μετάδοσης για τη Συμμετοχική Παρακολούθηση Περιβάλλοντος σε εξωτερικούς χώρους. Ιδιαίτερο θα είναι το όφελος για την εξασφάλιση της δημόσιας ασφάλειας και την αποφυγή κινδύνων και καταστροφών, όπου η ταχεία μετάδοση των M2M δεδομένων από την παρακολούθηση περιβάλλοντος (εικόνες, video, ήχοι, κλπ) στις συσκευές M2M είναι απαραίτητη.
- *Βιομηχανικοί χώροι*: Εκτεταμένη μπορεί να είναι η χρήση του 802.11ad για τον αυτοματισμό σε βιομηχανικούς χώρους με χρήση συσκευών και εφαρμογών M2M. Οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης βελτιστοποιούν την επίδοση του δικτύου M2M εντός του βιομηχανικού χώρου. Το beamforming έχει σημαντικό ρόλο στον εντοπισμό και τη διαχείριση των αντικειμένων εντός του βιομηχανικού χώρου (βλ. 2.4.2).

4.2.2. Συμβατότητα με προηγούμενες εκδόσεις

Λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο πλήθος των συσκευών που είναι ήδη σε λειτουργία και χρησιμοποιούν τα παλαιότερα πρότυπα IEEE 802.11, είναι απαραίτητο το 802.11ad (αλλά και το 802.11ac) να είναι σχεδιασμένο ώστε να είναι συμβατό με τις προηγούμενες εκδόσεις (backward compatibility). Με τον τρόπο αυτό, όλα τα πρότυπα 802.11 θα έχουν πλήρη συμβατότητα στα στρώματα MAC και ζεύξης δεδομένων (data link layer), και θα διαφέρουν μόνο στο φυσικό στρώμα (physical layer). Έτσι, θα δοθεί η δυνατότητα στις συσκευές να επιλέξουν ανάμεσα σε τρεις λειτουργίες:

- i. Λειτουργία στα 2.4GHz, γενικής χρήσης, η οποία όμως είναι επιρρεπής στις παρεμβολές.
- ii. Λειτουργία στα 5GHz, η οποία είναι ανθεκτικότερη στις παρεμβολές και υποστηρίζει μεγαλύτερες ταχύτητες.

³ Για την τεχνική του beamforming που χρησιμοποιεί το IEEE 802.11ad, βλ. 4.3.3.

- iii. Λειτουργία στα 60GHz, για εφαρμογές που απαιτούν πολύ υψηλές ταχύτητες, και οι ζεύξεις θα περιορίζονται σε αποστάσεις έως και 10m σε εσωτερικούς χώρους.

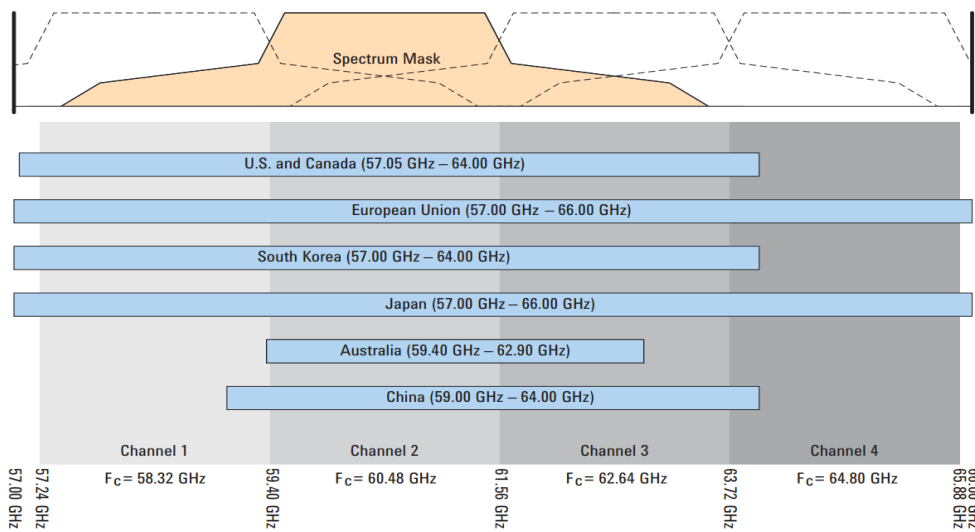
4.2.3. Χρήση της περιοχής συχνοτήτων περί τα 60GHz

Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να αναφερθεί το βασικό πρόβλημα της διάδοσης στις υψηλές συχνότητες περί τα 60GHz σε περιβάλλον εσωτερικών χώρων, που είναι η *πολύ μεγάλη απόσβεση ελευθέρου χώρου (free space loss – FSL)*. Συγκεκριμένα, σε απόσταση 1m υπάρχει απόσβεση περί τα 68dB, ενώ στα 10m απόσβεση περί τα 91 dB [25]. Σε σχέση με τη διάδοση στα 2.4 και 5GHz (που ήταν οι μοναδικές συχνότητες μετάδοσης των προηγούμενων εκδόσεων), οι απώλειες αυτές είναι από 22 έως 27 dB μεγαλύτερες, άρα οι αποστάσεις που μπορούν να καλυφθούν είναι πολύ μικρότερες για την ίδια ισχύ εκπομπής. Αυτό περιορίζει τα συστήματα που θα λειτουργούν στα 60GHz σε διάδοση μικρών αποστάσεων, το πολύ μέχρι 10m. Επιπλέον, οι απώλειες λόγω ύπαρξης σκεδαστών που παρεμβάλλονται στη ζεύξη είναι σημαντικές, λόγω του πολύ μικρού μήκους κύματος. Η διάδοση στους εσωτερικούς χώρους δυσχεραίνεται από τις απώλειες λόγω της σκίασης που προκαλείται από κινούμενους σκεδαστές, όπως οι άνθρωποι. Για την αντιμετώπιση της μεγάλης απόσβεσης ελευθέρου χώρου και της σκίασης, το 802.11ad χρησιμοποιεί την τεχνική του beamforming (βλ. 4.2.4).

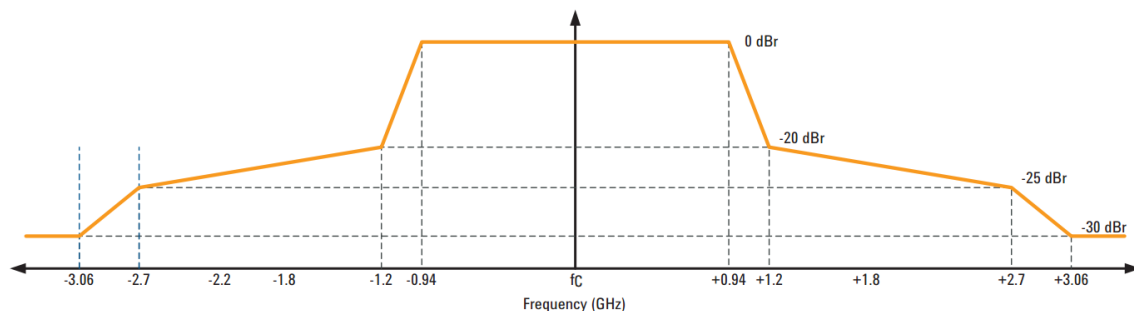
Παρά την ύπαρξη του ανωτέρω μειονεκτήματος, η χρήση της περιοχής περί τα 60GHz προσφέρει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- i. Στη φασματική περιοχή περί τα 60GHz, υπάρχει μια περιοχή συχνοτήτων που είναι αχρησιμοποίητη και διαθέσιμη για νέες εφαρμογές παγκοσμίως. Η διαθεσιμότητα στην περιοχή των 60GHz δεν είναι η ίδια σε όλες τις χώρες του κόσμου, αλλά υπάρχει επικάλυψη στο μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου εύρους, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.1. Επιπλέον, λόγω του μεγάλου πλήθους των συσκευών που είναι ασύρματα δικτυωμένες σε WLANs, οι περιοχές περί τα 2.4GHz και 5GHz αντιμετωπίζουν προβλήματα συμφόρησης. Η χρήση της νέας περιοχής περί τα 60GHz δίνει τη δυνατότητα αποσυμφόρησής τους.
- ii. Η περιοχή αυτή προσφέρει τη δυνατότητα μεγάλου εύρους ζώνης για την επίτευξη πολύ μεγάλου ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Ο ρυθμός μετάδοσης είναι γραμμικά εξαρτημένος από το εύρος ζώνης, και γύρω από τα 60GHz υπάρχει ένα μεγάλο αχρησιμοποίητο εύρος συχνοτήτων. Το ονομαστικό εύρος ζώνης για το 802.11ad θα είναι 2.16 GHz.
- iii. Οι μικρές αποστάσεις, στις οποίες περιορίζεται η διάδοση στα 60GHz, μπορεί να θεωρηθούν ως πλεονέκτημα, καθώς μειώνεται η πιθανότητα παρεμβολής (co-channel interference), ενώ διευκολύνεται η αναχρησιμοποίηση συχνότητας. Επιπλέον, μειώνεται η πιθανότητα υποκλοπής ευαίσθητου περιεχομένου.

- iv. Το μικρό μήκος κύματος (περίπου 5mm στα 60GHz) επιτρέπει τη χρήση μικρών, συμπαγών κεραιών μεγάλου κέρδους, εξαιρετικά κατευθυντικών (με χρήση beamforming). Το μεγάλο κέρδος χρησιμοποιείται για να αντισταθμιστούν οι μεγάλες απώλειες ελευθέρου χώρου, ενώ η κατευθυντικότητα χρησιμοποιείται για τη μεγιστοποίηση της ισχύος που μπορεί να φθάσει στο δέκτη και την αποφυγή παρεμβολών από γειτονικές ζεύξεις. Η χρήση συσκευών με διατάξεις πολλαπλών κατευθυντικών κεραιών (χωρική διαφορικότητα) επιτρέπει την αποφυγή σταθερών εμποδίων σε εσωτερικούς χώρους και τη μετρίαση της επίδρασης της σκίασης που προκαλείται από κινούμενους σκεδαστές (π.χ. ανθρώπους).



Σχήμα 4.2: Διαθεσιμότητα συχνοτήτων στην περιοχή των 60GHz προς εκμετάλλευση, σε κάθε περιοχή του κόσμου



Σχήμα 4.3: Η φασματική μάσκα του 802.11ad στο εύρος ζώνης που θα χρησιμοποιεί

4.3. Το φυσικό στρώμα του IEEE 802.11ad

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αυτό που διαφοροποιεί το 802.11ad από τις προηγούμενες εκδόσεις είναι το φυσικό στρώμα (physical layer – PHY). Το φυσικό στρώμα στο 802.11ad ονομάζεται “*Directional Multi-Gigabit (DMG) PHY*”.

4.3.1. Κανάλια λειτουργίας

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.2, το 802.11ad θα λειτουργεί σε 4 διαφορετικές φέρουσες συχνότητες, δηλαδή 4 κανάλια, με βάση τη γεωγραφική περιοχή. Το ονομαστικό εύρος ζώνης είναι 2.16 GHz. Το κανάλι 2 είναι διαθέσιμο σε όλες τις περιοχές, επομένως θα είναι και το προκαθορισμένο (default channel). Κάθε πομπός που θα λειτουργεί σε μια από τις φέρουσες συχνότητες πρέπει να χρησιμοποιεί εύρος ζώνης που θα ταιριάζει με την αντίστοιχη φασματική μάσκα του Σχ. 4.2.

4.3.2. Οι τρεις λειτουργίες του DMG PHY

Στο φυσικό στρώμα του 802.11ad, υπάρχουν τρεις διαφορετικές επιλογές συνδυασμών διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Με βάση τις διαφορετικές απαιτήσεις του συστήματος επικοινωνίας, όπως για παράδειγμα ευρωστία ή υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων, το πρότυπο επιλέγει διαφορετικό σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Συνεπώς, το 802.11ad μπορεί να χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά φυσικά στρώματα, τα οποία συνοψίζονται ως ακολούθως:

- i. Διαμόρφωση διευρυμένου φάσματος (Spread-Spectrum Modulation): το φυσικό στρώμα ελέγχου (Control PHY)
- ii. Διαμόρφωση απλού φέροντος (Single Carrier Modulation): Single Carrier PHY (SC PHY) και Single Carrier PHY χαμηλής ισχύος
- iii. Διαμόρφωση OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Modulation): OFDM PHY

PHY	Σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης (Modulation and Coding Scheme - MCS) ⁴
Control PHY	0
Single Carrier PHY (SC PHY)	1, 2, ..., 12 (κανονική λειτουργία) 25, 26, ..., 31 (λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος)
OFDM PHY	13, 14, ..., 24

Πίνακας 4.2: Επισκόπηση των σχημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιούνται από κάθε φυσικό στρώμα

⁴ Για τη σύνοψη των χαρακτηριστικών των διάφορων συνδυασμών MCS, βλ. 4.3.2.4.

Η γενική δομή του πακέτου είναι η ίδια και για τα τρία είδη φυσικού στρώματος, ώστε να διευκολύνεται η επεξεργασία σήματος και η αναγνώριση του τύπου φυσικού στρώματος στο δέκτη. Ωστόσο, τα φυσικά στρώματα διαφέρουν ως προς το συνδυασμό σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται, άρα και ως προς το πως ορίζεται κάθε πεδίο της δομής του πακέτου.

Η γενική δομή του πακέτου περιλαμβάνει τα ακόλουθα μέρη:

- i. *Προοίμιο (preamble)*: Αποτελείται από το πεδίο Short Training Field (STF), ακολουθούμενο από το πεδίο εκτίμησης καναλιού (Channel Estimation Field – CEF), που είναι απαραίτητα για κάθε πακέτο. Το προοίμιο προσδιορίζει το είδος του φυσικού στρώματος που χρησιμοποιείται και είναι απαραίτητο για τη χρήση του Automatic Gain Control (AGC) από το δέκτη. Επίσης, ο δέκτης χρησιμοποιεί το CEF για την εκτίμηση του καναλιού.
- ii. *Επικεφαλίδα (header)*: Είναι διαφορετική για κάθε είδος φυσικού στρώματος και περιλαμβάνει πρόσθετες, σημαντικές πληροφορίες για το δέκτη, όπως το σχήμα διαμόρφωσης και η κωδικοποίηση FEC, το μήκος του πεδίου δεδομένων, και το checksum.
- iii. *Πεδίο δεδομένων (data)*: Χρησιμοποιείται για τη μετάδοση των δεδομένων, που είναι διαμορφωμένα και κωδικοποιημένα με κάποιον από τους διαθέσιμους συνδυασμούς ανά κατηγορία φυσικού στρώματος.
- iv. *Πεδίο Beamforming Training (TRN)*: Το πεδίο αυτό είναι προαιρετικό και περιλαμβάνει πληροφορίες για το beamforming.

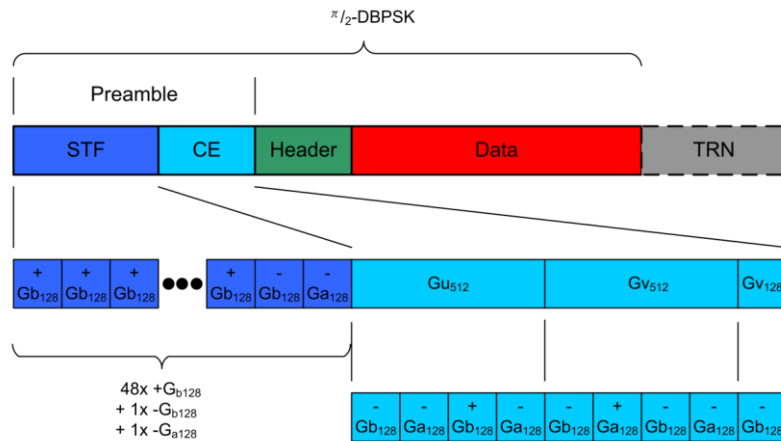
Τα πεδία εντός των πακέτων είναι κατασκευασμένα από Συμπληρωματικές Ακολουθίες Golay (Golay Complementary Sequences), οι οποίες έχουν διαμορφωθεί με το αντίστοιχο κατά περίπτωση σχήμα. Κάθε ακολουθία αποτελείται από διπολικά σύμβολα (± 1) και κατασκευάζεται μαθηματικά για την επίτευξη αυτοσυσχέτισης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών. Κάθε ακολουθία Golay αποτελείται από ένα ζεύγος συμπληρωματικών όρων a και b , και ένας δείκτης δηλώνει το μήκος της ακολουθίας. Για παράδειγμα, οι όροι G_{a128} , G_{b128} αντιπροσωπεύουν μια συμπληρωματική ακολουθία μήκους 128 συμβόλων.

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των τριών λειτουργιών του DMG PHY στο 802.11ad, βασισμένη στην ανάλυση που γίνεται στο [25].

4.3.2.1. Control PHY

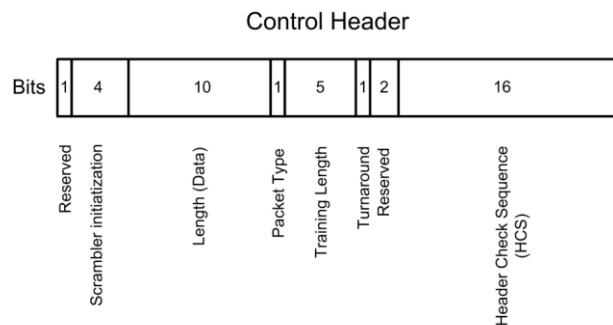
Το σχήμα MCS0, το οποίο χρησιμοποιείται από το Control PHY, είναι το περισσότερο εύρωστο με την ισχυρότερη κωδικοποίηση FEC, αλλά και αυτό με το μικρότερο ρυθμό μετάδοσης, και έχει επιλεγεί αποκλειστικά για τη μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου του διαύλου για την εγκαθίδρυση και επισκόπηση συνδέσεων ανάμεσα στις συσκευές. Είναι υποχρεωτικό για όλες τις συσκευές να μπορούν να το υποστηρίξουν. Η ευρωστία του οφείλεται χρήση ισχυρού κώδικα FEC και διαφορικής διαμόρφωσης DBPSK. Επιπλέον, το

μήκος του προοιμίου είναι μεγαλύτερο σε σχέση με το SC PHY και το OFDM PHY, κάτι που ενισχύει την ευρωστία της μετάδοσης.



Σχήμα 4.4: Η δομή ενός πακέτου στο Control PHY

Το STF αποτελείται από 50 ακολουθίες G_{128} . Η $+G_{b128}$ είναι πρώτη και επαναλαμβάνεται 48 φορές, ακολουθούμενη από μια $-G_{b128}$ και μια $-G_{a128}$. Το CEF αποτελείται από μια G_{u512} και μια G_{v512} , ακολουθούμενες από μια $-G_{b128}$. Το ίδιο CEF χρησιμοποιείται και στο Single Carrier PHY.

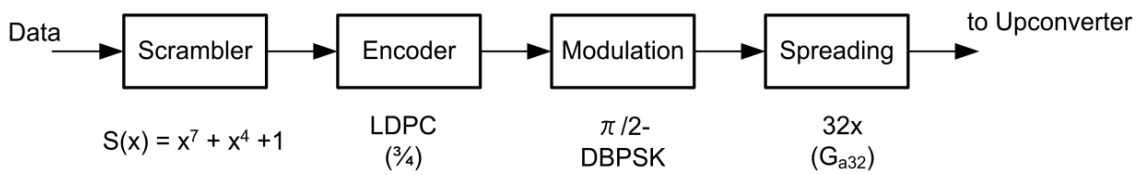


Σχήμα 4.5: Η δομή της επικεφαλίδας στο Control PHY

Η επικεφαλίδα ελέγχου στο Σχ. 4.5 έχει μήκος 40 bits και τα βασικά της πεδία είναι τα ακόλουθα:

- *Αρχιλοποίηση του scrambler (scrambler initialization)*: Παρέχει το εναρκτήριο σημείο για τη διάταξη του scrambler.
- *Μήκος δεδομένων*: Προσδιορίζει το μήκος του πεδίου δεδομένων του πακέτου. Για το Control PHY, αυτό κυμαίνεται από 14 έως και 1023 bytes.
- *Είδος πακέτου*: Προσδιορίζεται αν το TRN απευθύνεται σε πομπό ή δέκτη. Δεν περιλαμβάνει πληροφορία όταν το μήκος του TRN είναι μηδενικό.
- *Training Length*: Προσδιορίζει αν χρησιμοποιείται το πεδίο TRN, και αν ναι, ποιο είναι το μήκος του.
- *HCS*: Περιλαμβάνει ένα checksum ανά CRC για την επικεφαλίδα.

Τα δεδομένα, προτού μεταδοθούν, κρυπτογραφούνται από τον scrambler, κωδικοποιούνται, διαμορφώνονται, και διευρύνονται όπως στο Σχ. 4.5.

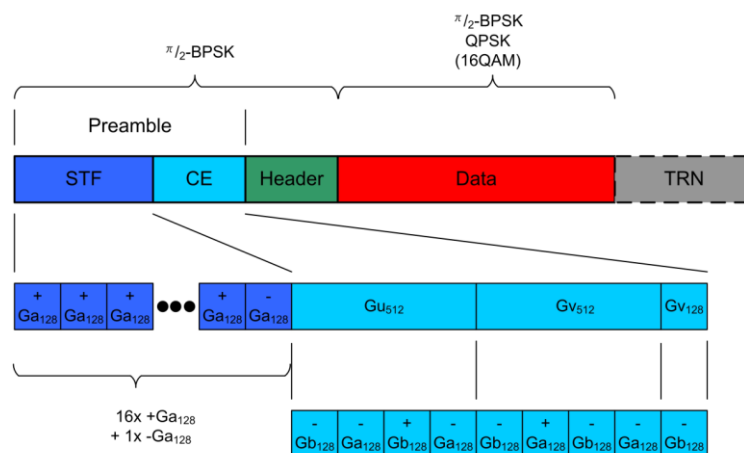


Σχήμα 4.6: Επισκόπηση της επεξεργασίας στην πομπή για το Control PHY

- Ο scrambler είναι ο ίδιος και για τα τρία φυσικά στρώματα. Το μόνο που αλλάζει για κάθε στρώμα είναι η τιμή αρχικοποίησής του.
- Για την κωδικοποίηση χρησιμοποιείται κωδικοποιητής Low-Density Parity-Check (LDPC) [32]. Χρησιμοποιεί λέξεις των 672 bits, και ο ρυθμός κώδικα μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος του φυσικού στρώματος. Χρησιμοποιείται μήτρα $3/4_5$, που οδηγεί σε ρυθμό κώδικα έως και $1/2$.
- Χρησιμοποιείται η διαφορική BPSK διαμόρφωση, στραμμένη κατά γωνία $\pi/2$ για την αποφυγή των μηδενικών στο διάγραμμα του αστερισμού και τη μείωση της διαφοράς ανάμεσα στη μέγιστη και τη μέση εκπεμπόμενη ισχύ.
- Τέλος, το σήμα διευρύνεται με την προσθήκη μιας ακολουθίας Ga_{32} .

4.3.2.2. Single Carrier PHY (SC PHY)

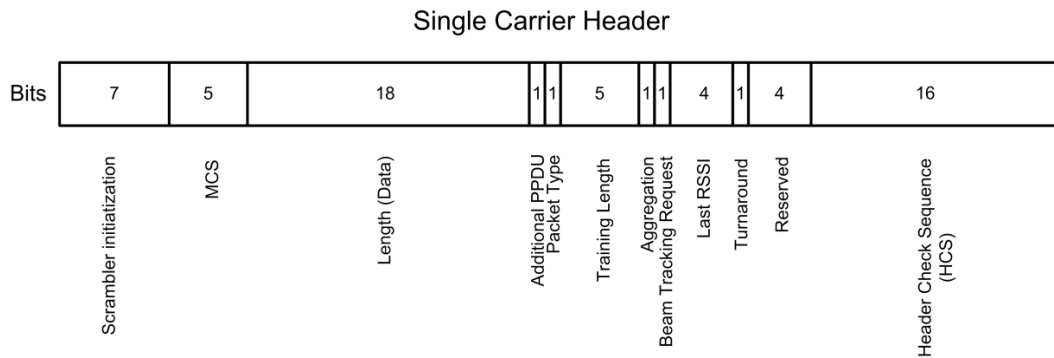
Στο SC PHY, ο ρυθμός μετάδοσης κυμαίνεται από 385 έως και 4620 Mbps, αναλόγως του συνδυασμού MCS που θα επιλεγεί από το πρότυπο. Λόγω της ύπαρξης συσκευών που είναι επιρρεπείς στην κατανάλωση ενέργειας (π.χ. κινητά τηλέφωνα που λειτουργούν με μπαταρία), έχουν προστεθεί συνδυασμοί MCS για λειτουργία με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 4.7: Η δομή ενός πακέτου στο SC PHY

⁵ Ο λόγος $3/4$ αναφέρεται στη μήτρα ελέγχου ισοτιμίας που χρησιμοποιείται από τον κωδικοποιητή. Ο λόγος μιας τέτοιας μήτρας είναι της μορφής $R = (N - M)/N$, όπου N ο αριθμός των στηλών και M ο αριθμός των γραμμών της μήτρας ελέγχου ισοτιμίας [47].

Η δομή του πακέτου που απεικονίζεται στο Σχ. 4.7 είναι κοινή και για τις δύο λειτουργίες. Στην λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος δεν χρησιμοποιείται η διαμόρφωση 16QAM για εξοικονόμηση ενέργειας, αλλά οι DBPSK και QPSK. Το πεδίο STF αποτελείται από 17 ακολουθίες G_{128} : η ακολουθία $+Ga_{128}$ επαναλαμβάνεται 16 φορές, ακολουθούμενη από μια $-Ga_{128}$. Το πεδίο CEF αποτελείται από μια Gv_{512} και μια Gv_{512} , ακολουθούμενες από μια $-Gb_{128}$.



Σχήμα 4.8: Η δομή της επικεφαλίδας στο SC PHY

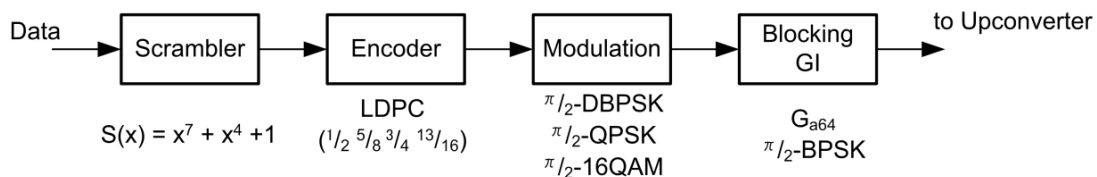
Η επικεφαλίδα ελέγχου στο Σχ. 4.8 έχει μήκος 64 bits και τα βασικά της πεδία είναι τα ακόλουθα:

- *Αρχικοποίηση του scrambler (scrambler initialization)*: Παρέχει το εναρκτήριο σημείο για τη διάταξη του scrambler.
- *MCS*: Προσδιορίζει το σχήμα διαμόρφωσης και την κωδικοποίηση που χρησιμοποιείται για το πεδίο των δεδομένων.
- *Μήκος δεδομένων*: Προσδιορίζει το μήκος του πεδίου δεδομένων του πακέτου. Για το SC PHY, αυτό κυμαίνεται από 1 έως και 262143 bytes.
- *Είδος πακέτου*: Προσδιορίζεται αν το TRN απευθύνεται σε πομπό ή δέκτη. Δεν περιλαμβάνει πληροφορία όταν το μήκος του TRN είναι μηδενικό.
- *Training Length*: Προσδιορίζει αν χρησιμοποιείται το πεδίο TRN, και αν ναι, ποιο είναι το μήκος του.
- *Last RSSI*: Απεικονίζει το επίπεδο ισχύος του τελευταίου πεδίου που λήφθηκε.
- *HCS*: Περιλαμβάνει ένα checksum ανά CRC για την επικεφαλίδα.

Το σχήμα διαμόρφωσης και η κωδικοποίηση των δεδομένων διαφέρει αντίστοιχα με τον αν το SC PHY βρίσκεται σε κανονική λειτουργία, ή σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος. Ακολουθεί η διάκριση των διαδικασιών επεξεργασίας στον πομπό, αναλόγως της λειτουργίας.

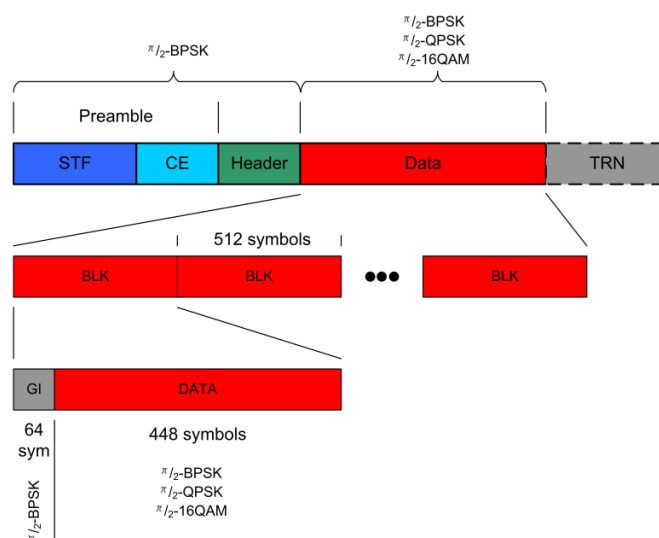
I. SC PHY σε κανονική λειτουργία

Για τη λειτουργία αυτή υπάρχουν συνολικά 12 διαθέσιμοι συνδυασμοί MCS, από τον 1 έως και τον 12, εκ των οποίων οι πρώτοι 4 πρέπει υποχρεωτικά να υποστηρίζονται από όλες τις συσκευές. Τα δεδομένα, προτού μεταδοθούν, κρυπτογραφούνται από τον scrambler, κωδικοποιούνται, διαμορφώνονται, και διευρύνονται όπως στο Σχ. 4.9.



Σχήμα 4.9: Επισκόπηση της επεξεργασίας στην πομπή για το SC PHY σε κανονική λειτουργία

- Για την κωδικοποίηση χρησιμοποιείται κωδικοποιητής LDPC. Χρησιμοποιούνται λέξεις των 672 bits, και στην κανονική λειτουργία οι ρυθμοί κώδικα που χρησιμοποιούνται είναι 1/2, 5/8, 3/4, και 13/16.
- Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι BPSK, QPSK, και 16QAM. Στο καθένα, έχει γίνει στροφή κατά $\pi/2$ για την αποφυγή των μηδενικών στο διάγραμμα του αστερισμού.
- Τέλος, το σήμα διευρύνεται με την προσθήκη μιας ακολουθίας G_{a64} .
- Τα δεδομένα μεταδίδονται σε μπλοκ δεδομένων, με 448 σύμβολα ανά μπλοκ. Επιπλέον 64 σύμβολα εισέρχονται συνολικά ανάμεσα στα μπλοκ ως σήμα αναφοράς για το δέκτη (Guard Interval blocks – GI blocks) στην περίπτωση πακέτων μεγάλου μήκους. Συνεπώς, πλήρες μπλοκ δεδομένων ενός πακέτου αποτελείται από 512 σύμβολα, και καθένα από τα GI μπλοκ αποτελείται από μια ακολουθία G_{a64} και είναι πάντα διαμορφωμένα με $\pi/2$ -BPSK, όπως φαίνεται στο Σχ.4.9.

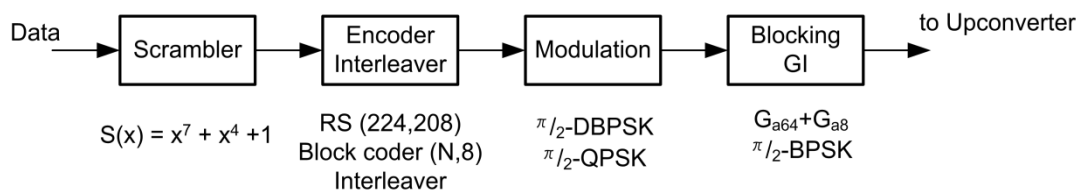


Σχήμα 4.10: Η δομή των μπλοκ δεδομένων σε ένα πακέτο του SC PHY σε κανονική λειτουργία

II. SC PHY σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος

Στη λειτουργία αυτή, το SC PHY λειτουργεί ομοίως με την κανονική λειτουργία, αλλά βέλτιστα για εξοικονόμηση ενέργειας που είναι απαραίτητη για μικρές συσκευές που χρησιμοποιούν μπαταρία, όπως τα κινητά τηλέφωνα. Συνεπώς, αντί της κωδικοποίησης LDPC, χρησιμοποιείται κωδικοποίηση Reed-Solomon, ενώ η διαμόρφωση 16QAM δε χρησιμοποιείται καθόλου, καθώς είναι ιδιαίτερα δαπανηρή σε ισχύ. Υπάρχουν συνολικά 7 διαθέσιμοι συνδυασμοί MCS, από τον 25 έως και τον 31, και η υποστήριξή τους από τις συσκευές είναι προαιρετική. Ο ρυθμός μετάδοσης που επιτυγχάνει ο καθένας είναι διαφορετικός, με τον MCS25 (με χρήση BPSK και ρυθμού κώδικα 13/28) να εξασφαλίζει ρυθμό μετάδοσης έως και 626 Mbps, ενώ ο MCS31 (με χρήση QPSK και ρυθμού κώδικα 13/14) να εξασφαλίζει έως και 2503 Mbps

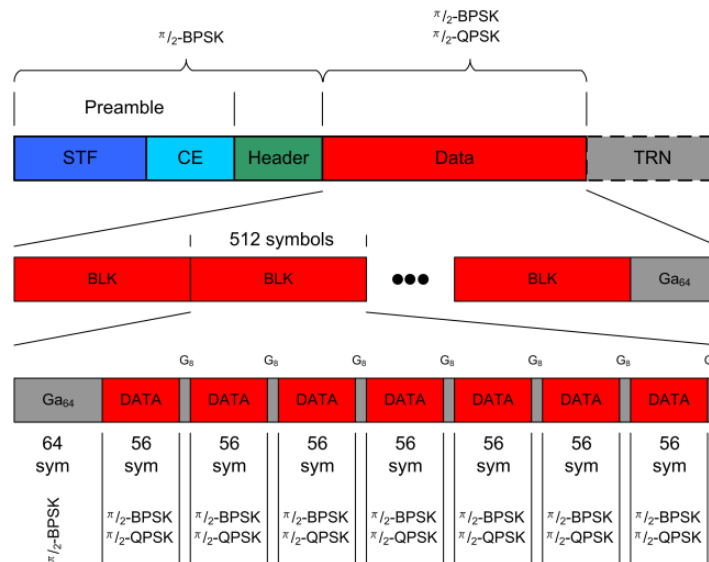
Τα δεδομένα, προτού μεταδοθούν, κρυπτογραφούνται από τον scrambler, κωδικοποιούνται, διαμορφώνονται, και διευρύνονται όπως στο Σχ. 4.11.



Σχήμα 4.11: Επισκόπηση της επεξεργασίας στην πομπή για το SC PHY σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος

- Για την κωδικοποίηση χρησιμοποιείται κωδικοποιητής Reed-Solomon(224, 208) και μπλοκ κώδικα (N, 8)⁶.
- Τα σχήματα διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται είναι DBPSK και QPSK. Στο καθένα, έχει γίνει στροφή κατά $\pi/2$ για την αποφυγή των μηδενικών στο διάγραμμα του αστερισμού.
- Τέλος, το σήμα διευρύνεται με την προσθήκη μιας ακολουθίας $G_{a64} + G_{a8}$.
- Τα δεδομένα μεταδίδονται σε μπλοκ δεδομένων, με 512 σύμβολα ανά μπλοκ. Επιπλέον 64 σύμβολα εισέρχονται συνολικά ανάμεσα στα μπλοκ ως GI μπλοκ. Καθένα από τα GI μπλοκ αποτελείται από μια ακολουθία G_{a64} και είναι πάντα διαμορφωμένα με $\pi/2$ -BPSK. Επιπλέον 8 σύμβολα προστίθενται για κάθε 56 σύμβολα και σχηματίζουν ένα guard block, το οποίο είναι μια αντιγραφή των τελευταίων 8 συμβόλων της ακολουθίας G_{a64} του GI μπλοκ. Συνεπώς, ένα μπλοκ 512 συμβόλων στο πεδίο δεδομένων του πακέτου περιλαμβάνει 392 σύμβολα που αντιστοιχούν σε δεδομένα. Τέλος, μια ακολουθία G_{a64} μεταδίδεται στο τέλος καθενός από τα μπλοκ δεδομένων, όπως φαίνεται στο Σχ. 4.12.

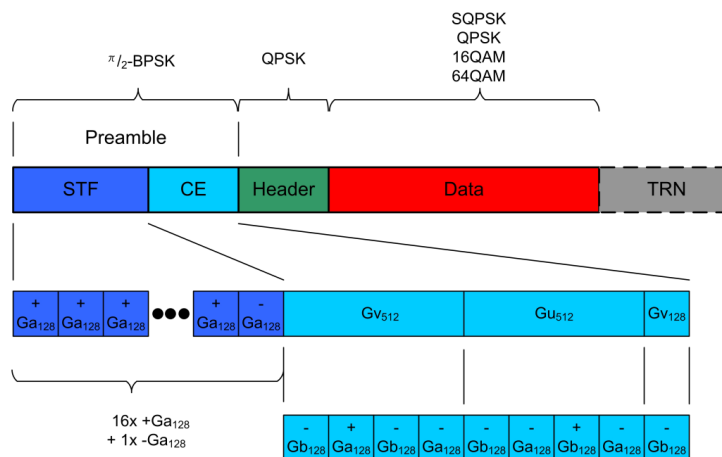
⁶ Για πληροφορίες σχετικά με την κωδικοποίηση Reed-Solomon και τα μπλοκ κώδικα, βλ. [33].



Σχήμα 4.12: Η δομή των μπλοκ δεδομένων σε ένα πακέτο του SC PHY σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος

4.3.2.3. OFDM PHY

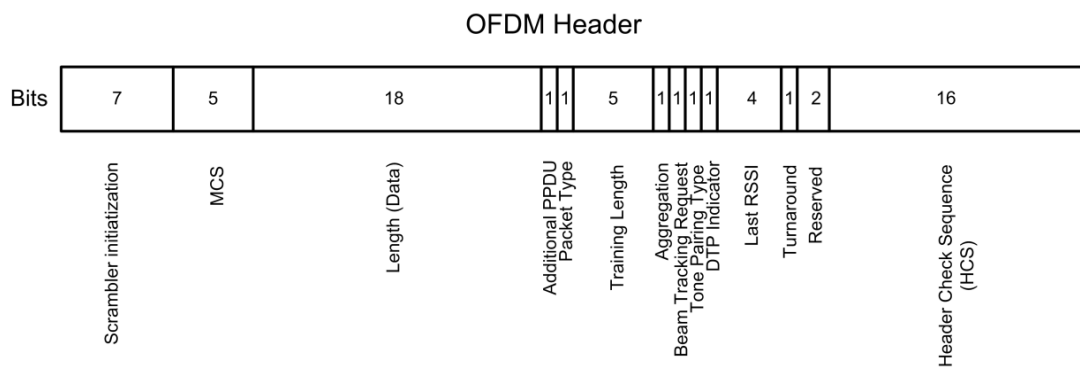
Η λειτουργία OFDM χρησιμοποιείται για την επίτευξη του μέγιστου δυνατού ρυθμού μετάδοσης από το 802.11ad. Περιλαμβάνει συνολικά 12 συνδυασμούς MCS, από τον 13 έως και τον 24. Ο MCS13, με χρήση SQPSK (Spread QPSK) και ρυθμού κώδικα 1/2, εξασφαλίζει ρυθμό μετάδοσης έως και 693 Mbps, ενώ ο MCS24, με χρήση 64QAM και ρυθμού κώδικα 13/16, εξασφαλίζει έως και 6757 Mbps. Η υποστήριξη της λειτουργίας OFDM είναι προαιρετική για τις συσκευές, αλλά όταν υλοποιείται η υποστήριξη των MCS από 13 έως και 17 είναι υποχρεωτική.



Σχήμα 4.13: Η δομή ενός πακέτου στο OFDM PHY

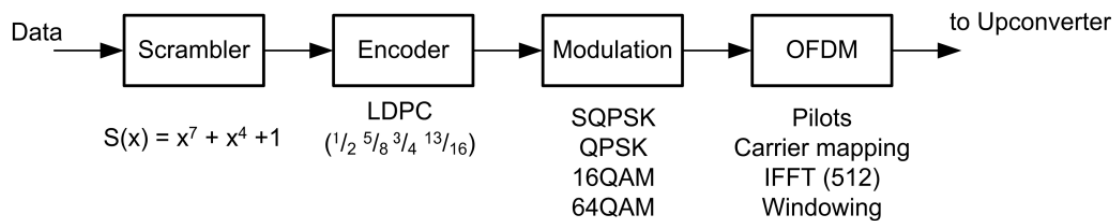
Η δομή του πακέτου στο OFDM PHY που απεικονίζεται στο Σχ. 4.13 είναι κοινή με του SC PHY. Προκειμένου ο δέκτης να διακρίνει ένα OFDM πακέτο από ένα SC πακέτο, οι ακολουθίες G_u και G_v έχουν εναλλαχθεί στο πεδίο CEF. Το πεδίο STF αποτελείται από 17

ακολουθίες G_{128} : η G_{a128} επαναλαμβάνεται 16 φορές και ακολουθείται από μια $-G_{a128}$. Το πεδίο CEF αποτελείται από μια G_{v512} και μια G_{u512} , ακολουθούμενο από μια $-G_{b128}$.



Σχήμα 4.14: Η δομή της επικεφαλίδας στο OFDM PHY

Το πεδίο που διαφοροποιεί την επικεφαλίδα στο OFDM PHY από την αντίστοιχη στο SC PHY είναι το Tone Pairing Type, το οποίο χρησιμοποιείται για τη διαδικασία ταιριάσματος τόνου (tone pairing - TP) (βλ. Σχ. 4.16).



Σχήμα 4.15: Επισκόπηση της επεξεργασίας στην πομπή για το OFDM PHY

Κατά την επεξεργασία στον πομπό, χρησιμοποιούνται τα σχήματα διαμόρφωσης SQPSK, QPSK, 16QAM, και 64QAM. Για τις SQPSK και QPSK ισχύουν τα ακόλουθα:

- Χρησιμοποιείται η διαδικασία ταιριάσματος τόνου, κατά την οποία δύο υποφέροντα σήματα σε μια συγκεκριμένη φέρουσα συχνότητα μεταφέρουν τα ίδια δεδομένα. Με τον τρόπο αυτό η μετάδοση γίνεται ανθεκτικότερη σε συχνο-επιλεκτικές παρεμβολές. Η διαδικασία TP έχει δύο λειτουργίες: τη στατική (Static Tone Pairing - STP) και τη δυναμική (Dynamic Tone Pairing - DTP), η οποία χρησιμοποιείται όταν οι συνθήκες στο διάλυο μεταβάλλονται.
- Με τη χρήση της SQPSK (Spread QPSK), τα μισά από τα φέροντα διαμορφώνονται με το σχήμα QPSK, ενώ τα υπόλοιπα περιλαμβάνουν ένα αντίγραφο των δεδομένων.

4.3.2.4. Σύνοψη των MCS

PHY	MCS	Προοίμιο		Επικεφαλίδα		Δεδομένα			Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (Mbps)
		STF	CEF	Σχήμα διαμόρφωσης	Μήκος (bits)	Διαμόρφωση	Ρυθμός κώδικα	Μήκος (bytes)	
Spread-Spectrum Modulation									
Control PHY	0	G_{b128}	$G_u + G_v$	$\pi/2$ -DBPSK	40	$\pi/2$ -DBPSK	LDPC 1/2	14-1023	27.5
Single Carrier Modulation									
SC PHY σε κανονική λειτουργία	1-12	G_{a128}	$G_u + G_v$	$\pi/2$ -DBPSK	64	$\pi/2$ -DBPSK, $\pi/2$ -QPSK, 16QAM	LDPC 1/2, 5/8, 3/4, 13/16	1- 262143	385 (MCS1), 1115 (MCS4), 4620 (MCS12)
SC PHY σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ισχύος	25-31					$\pi/2$ -DBPSK, $\pi/2$ -QPSK	Reed-Solomon block		625 (MCS25), 2503 (MCS31)
OFDM Modulation									
OFDM PHY	13-24	G_{a128}	$G_u + G_v$	QPSK	64	SQPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	LDPC 1/2, 5/8, 3/4, 13/16	1- 262143	693 (MCS13), 6756 (MCS24)

Πίνακας 4.3: Σύνοψη των χαρακτηριστικών των συνδυασμών MCS που χρησιμοποιούνται από τα τρία φυσικά στρώματα

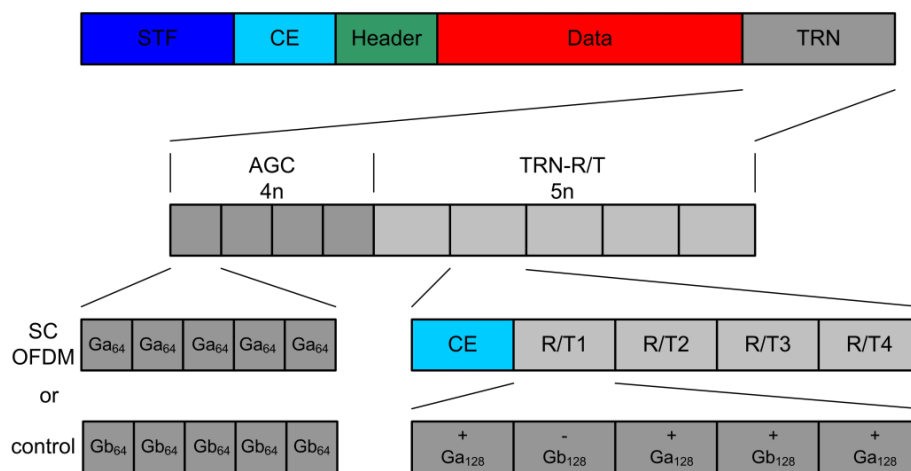
4.3.3. Beamforming

Όπως αναφέρθηκε στο 4.2.3, η διάδοση στα 60 GHz αντιμετωπίζει έντονη απόσβεση ελευθέρου χώρου, καθώς και σκίαση λόγω της ύπαρξης κινούμενων σκεδαστών στους εσωτερικούς χώρους όπου χρησιμοποιείται το 802.11ad (π.χ. άνθρωποι σε οικιακούς χώρους και σε αίθουσες συνεδριάσεων, οχήματα και κινούμενος εξοπλισμός σε βιομηχανικούς χώρους). Για την αντιμετώπιση των δύο αυτών φαινομένων, το 802.11ad σχεδιάζεται ώστε να υποστηρίζει τη δυνατότητα κατευθυντικότητας από τις κεραιές των συσκευών που το χρησιμοποιούν.

Λόγω του πολύ μικρού μήκους κύματος στα 60GHz (περί τα 5mm), οι διατάξεις κεραιών που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι πολύ μικρές και συμπαγείς, και μπορούν να γίνουν εξαιρετικά κατευθυντικές. Η σχεδίαση τέτοιων κεραιών είναι δυνατή λόγω του χαμηλού κόστους κατασκευής τους στη βιομηχανία. Η βελτιστοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας, ώστε να αποκτήσει μεγάλο κατευθυντικό κέρδος, γίνεται σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια της μετάδοσης. Κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης επιτελείται μια διαδικασία που ονομάζεται “Beamforming (BF) Training”, κατά την οποία συμπληρωματικές ακολουθίες Golay μεταδίδονται, μέσα στα πεδία TRN, ανάμεσα σε πομπό και δέκτη και τους παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες (τους “εκπαιδεύουν”) για τη βέλτιστη διαμόρφωση του διαγράμματος ακτινοβολίας τους για τη συγκεκριμένη μετάδοση.

Οι ακολουθίες Golay μπορούν να μεταδοθούν σε πακέτα και των τριών διαθέσιμων φυσικών στρωμάτων. Τα πεδία Packet Type και Training Length στην επικεφαλίδα του πακέτου διαμορφώνονται ως ακολούθως:

- i. Packet Type:
 - 0 για εκπαίδευση δέκτη
 - 1 για εκπαίδευση πομπού
- ii. Training Length: Το μήκος του πεδίου TRN ορίζεται ως n . Το TRN έχει δύο επιμέρους πεδία, τα οποία απεικονίζονται στο Σχ. 4.13, και είναι τα εξής:
 - Το πεδίο AGC, που αποτελείται από $4n$ επαναλήψεις πέντε ακολουθιών G_{64} : ακολουθιών G_{a64} για πακέτα SC και OFDM, και ακολουθιών G_{b64} για πακέτα ελέγχου.
 - Το πεδίο TRN-R/T, το οποίο αποτελείται από $5n$ επαναλήψεις ενός μπλοκ, που περιλαμβάνει ένα αντίγραφο του πεδίου CE από το προίμιο, ακολουθούμενο από 5 ακολουθίες G_{128} .



Σχήμα 4.16: Η δομή του πακέτου TRN

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι όλα τα πεδία TRN είναι διαμορφωμένα κατά $\pi/2$ -BPSK, ενώ η μορφή του διαγράμματος ακτινοβολίας μπορεί να μεταβληθεί μόνο κατά τη διάρκεια του πεδίου TRN και όχι κατά τη διάρκεια των προηγούμενων.

Κεφάλαιο 5^ο

Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σενάριο μετάδοσης σε εσωτερικούς χώρους με χρήση του IEEE 802.11ad

5.1. Ανοικτά θέματα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε εσωτερικούς χώρους με τη χρήση του 802.11ad

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2.3, η διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στη ζώνη περί τα 60 GHz υποφέρει από την πολύ μεγάλη απόσβεση ελευθέρου χώρου. Τα ασύρματα LAN (WLANs), ιδιαίτερα αυτά που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση δικτύων M2M και παροχή M2M υπηρεσιών, αλλά και αυτά που θα αποτελέσουν θεμελιώδες τμήμα του IoT στο μέλλον, πρέπει να ικανοποιούν αυστηρές προδιαγραφές ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service – QoS). Ταυτόχρονα οι λύσεις που προσφέρουν πρέπει να είναι επεκτάσιμες (scalable) και εύρωστες. Σε ένα ασύρματο σύστημα ψηφιακής επικοινωνίας, οι προδιαγραφές αυτές μεταφράζονται στην απαίτηση για συγκεκριμένες τιμές του σηματοθορυβικού λόγου ανά σύμβολο $\gamma = E_s/N_0$ που επιτυγχάνεται στην είσοδο του αποδιαμορφωτή του δέκτη. Απώλειες ισχύος μεγαλύτερες από αυτές που έχουν προβλεφθεί κατά το σχεδιασμό του συστήματος μπορεί να αποτρέψουν τη μετάδοση δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς ή ακόμη να οδηγήσουν σε διακοπή λειτουργίας του συστήματος M2M, γεγονός που θα μείωνε δραματικά την QoS που προσφέρεται στους χρήστες των υπηρεσιών M2M [42]. Επειδή είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται ότι στον αποδιαμορφωτή του δέκτη θα φθάνει μια ελάχιστη στάθμη ισχύος, κατά τη σχεδίαση του συστήματος επικοινωνίας πρέπει να έχουν προβλεφθεί τρόποι αντιστάθμισης των δυσμενών για τη διάδοση φαινομένων.

Τα πρότυπα IEEE 802.11 που λειτουργούν σε συχνότητες περί τα 2.4 και 5GHz αντιμετωπίζουν προβλήματα όπως οι παρεμβολές και η καθυστέρηση (latency). Κατά συνέπεια, προσφέρουν στους χρήστες επίπεδα QoS που υπολείπονται των προδιαγραφών σε απαιτητικά πεδία εφαρμογής, όπως η μετάδοση HD video χωρίς συμπίεση. Ασύρματα LAN που λειτουργούν χρησιμοποιώντας το IEEE 802.11ad έχουν την προοπτική να προσφέρουν λύσεις για τέτοια προβλήματα, εξασφαλίζοντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης χρησιμοποιώντας το εύρος 2GHz διαθέσιμο εύρος ζώνης στην περιοχή των 60GHz. Επιπλέον, οι συσκευές M2M που επικοινωνούν ασύρματα με χρήση του 802.11ad χρησιμοποιούν την τεχνική beamforming⁷ ώστε να αντιμετωπίζουν τόσο τη μεγάλη απόσβεση ελευθέρου χώρου όσο και τις δυσμενείς επιπτώσεις της σκίασης στα περιβάλλοντα διάδοσης εσωτερικού χώρου που προκαλείται από κινούμενους σκεδαστές (π.χ. από ανθρώπους σε οικιακούς χώρους και σε αίθουσες συνεδριάσεων, από οχήματα και κινούμενο εξοπλισμό σε βιομηχανικούς χώρους).

⁷ Όπως περιγράφηκε στο 4.3.3.

Η τεχνική beamforming παρέχει στις συσκευές M2M τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν τις μικρές και συμπαγείς κεραιές τους ώστε να επιτυγχάνουν μεγάλο κατευθυντικό κέρδος και να εξασφαλίζουν οπτική επαφή (Line-of-Sight – LOS) στις ζεύξεις επικοινωνίας μεταξύ τους. Η εξασφάλιση LOS στις ζεύξεις ανάμεσα σε όλους τους κόμβους ενός δικτύου M2M και επικοινωνίας από-σημείο-σε-σημείο (Point-to-Point – P2P), δηλαδή από-συσκευή-σε-συσκευή στο δίκτυο M2M, προσφέρει στο δίκτυο M2M τη δυνατότητα πολυβηματικής (multi-hop) επικοινωνίας. Η πολυβηματική επικοινωνία ανάμεσα στις M2M συσκευές ενός δικτύου M2M εξασφαλίζει LOS ζεύξεις, αποφεύγοντας μεγάλα εμπόδια. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η πολυβηματική επικοινωνία συμβάλλει στην εξασφάλιση αδιάλειπτης επικοινωνίας και υψηλών ρυθμών μετάδοσης δεδομένων, ειδικά στην περίπτωση μετάδοσης ασυμπιεστων δεδομένων HD video με χρήση του 802.11ad [42].

Ωστόσο, παρά την εξασφάλιση υψηλών ρυθμών μετάδοσης από το 802.11ad και παρά τις λύσεις που προσφέρει η τεχνική beamforming, οι δυσμενείς επιπτώσεις της σκίασης δεν εξαλείφονται πλήρως. Στους οικιακούς και βιομηχανικούς χώρους όπου θα χρησιμοποιείται κατά κόρον το 802.11ad για τη μετάδοση M2M δεδομένων, η παρουσία κινούμενων σκεδαστών όπως άνθρωποι, οχήματα εργοστασίου και κινούμενος βιομηχανικός εξοπλισμός είναι αναπόφευκτη. Συνεπώς, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να προσδιορισθεί η πιθανότητα διακοπής ενός συστήματος M2M που υποφέρει από σκίαση σε περιβάλλον εσωτερικών χώρων και η εξαγωγή των σχετικών συμπερασμάτων. Η γνώση της πιθανότητας αυτής θα αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη σχεδίαση των μελλοντικών συστημάτων μετάδοσης M2M δεδομένων σε περιβάλλον εσωτερικών χώρων.

5.2. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με αναγεννητικό επαναλήπτη

Στη μαθηματική ανάλυση που ακολουθεί, οι κόμβοι M2M, εκτός του κόμβου-πομπού και του κόμβου-προορισμού, θεωρούνται ως αναγεννητικοί επαναλήπτες (regenerative repeaters) οι οποίοι χρησιμοποιούν την τεχνική αποκωδικοποίησης-και-προώθησης (decode-and-forward). Το σήμα που λαμβάνει ο επαναλήπτης από το πρώτο τμήμα της ζεύξης αναγεννάται χρησιμοποιώντας ολόκληρη τη διαδικασία επεξεργασίας σήματος πομπού-δέκτη, δηλαδή αποδιαμορφώνεται και αποκωδικοποιείται, στη συνέχεια διαμορφώνεται και κωδικοποιείται⁸, και τέλος επανεκπέμπεται προς τον κόμβο-προορισμό, δηλαδή προωθείται στο δεύτερο τμήμα της ζεύξης [3].

Στη γενική περίπτωση όπου υπάρχει σύστημα πολυβηματικής επικοινωνίας με N αναγεννητικούς επαναλήπτες, άρα με $N + 1$ ζεύξεις, ο σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο στην είσοδο του δέκτη της ζεύξης j δίνεται (σε γραμμική κλίμακα) από τη σχέση:

⁸ Η κωδικοποίηση FEC επιτρέπει την ανίχνευση ή/και διόρθωση των λαθών που προκαλούνται κατά τη μετάδοση σημάτων μέσω των ασύρματων διαύλων.

$$\gamma_j = \frac{1}{N_0} P_{Tj} \cdot w_j \quad (5.1)$$

όπου N_0 η πυκνότητα ισχύος θορύβου σε Watt (η οποία μπορεί να θεωρηθεί μοναδιαία χωρίς βλάβη της γενικότητας), P_{Tj} η ισχύς εκπομπής σε Watt, και w_j οι απώλειες λόγω σκίασης σε γραμμική κλίμακα.

Οι απώλειες λόγω σκίασης w_j θεωρούνται τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη λογαριθμική κατανομή με στατιστικές παραμέτρους που δίνονται (σε Neper) από τη σχέση:

$$w_j \sim (\mu_{w_j}, \sigma_j) = (\ln(G_{Tj} \cdot G_{Rj} \cdot FSL_j), \sigma_j) \quad (5.2)$$

όπου μ_{w_j} η μέση τιμή, σ_j η τυπική απόκλιση, G_{Tj} το κέρδος της κεραίας του πομπού, G_{Rj} το κέρδος της κεραίας του δέκτη, και FSL_j είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου της ζεύξης j (σε γραμμική κλίμακα), όπως προκύπτουν από τη σχέση:

$$FSL_j = \left(\frac{\lambda_j}{4\pi \cdot L_j} \right)^2 \quad (5.3)$$

όπου L_j το μήκος της ζεύξης j και το μήκος κύματος στο οποίο λειτουργεί η ζεύξη j :

$$\lambda_j = \frac{c}{f_j}$$

όπου $c = 3 \times 10^8$ m/sec η ταχύτητα του φωτός και f_j η συχνότητα στην οποία λειτουργεί η ζεύξη j .

Συνεπώς, ο σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο στην είσοδο του δέκτη της ζεύξης j αποτελεί και αυτός τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί τη λογαριθμική κατανομή με παραμέτρους (σε Neper) που δίνονται από τη σχέση:

$$\gamma_j \sim (\mu_{j,LN}, \sigma_{j,LN}) = ((\ln(P_{Tj} / N_0) + \mu_{w_j}, \sigma_j)) \quad (5.4)$$

Προσφάτως, αποδείχθηκε ότι η αντίστροφη κανονική (Inverse Gaussian - IG) κατανομή έχει τη δυνατότητα να περιγράψει αποτελεσματικά το φαινόμενο της σκίασης [48]. Ωστόσο, μέχρι τώρα δεν έχει γίνει μαθηματική περιγραφή της πιθανότητας διακοπής ενός πολυβηματικού συστήματος ασύρματης μετάδοσης που χρησιμοποιεί αναγεννητικούς επαναλήπτες, όταν οι απώλειες λόγω σκίασης ακολουθούν την αντίστροφη κανονική κατανομή. Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να γίνει αυτή η μαθηματική περιγραφή.

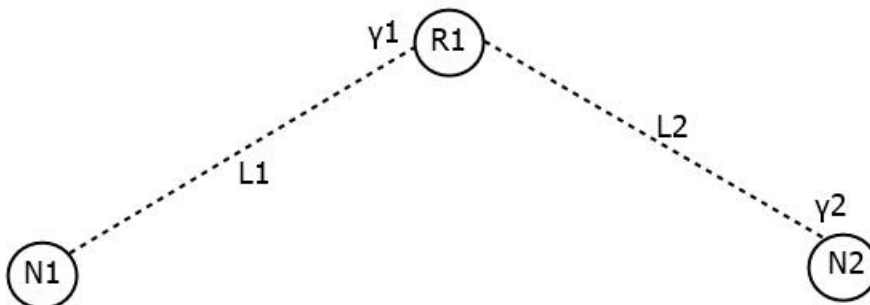
Αν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις για τις παραμέτρους $\mu_{j,LN}$ και $\sigma_{j,LN}$ που ακολουθούν τη λογαριθμική κατανομή, υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού των παραμέτρων μ_j και λ_j της IG κατανομής μέσω των σχέσεων (σε Neper):

$$\mu_j = \exp\left(\mu_{j,LN} + \frac{\sigma_{j,LN}^2}{2}\right), \quad \lambda_j = \frac{\exp(\mu_{j,LN})}{2\sinh(\sigma_{j,LN}^2/2)} \quad (5.5)$$

Επομένως, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο στην είσοδο του δέκτη της ζεύξης j είναι τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί την IG κατανομή με παραμέτρους (σε Neper) που δίνονται από τη σχέση:

$$\gamma_j \sim IG(\mu_j, \lambda_j) = \left(\exp\left(\mu_{j,LN} + \frac{\sigma_{j,LN}^2}{2}\right), \frac{\exp(\mu_{j,LN})}{2\sinh(\sigma_{j,LN}^2/2)}\right) \quad (5.6)$$

Στην περίπτωση όπου υπάρχουν τρεις συσκευές M2M, άρα ένας αναγεννητικό επαναλήπτης, θεωρούνται δύο συσχετισμένες ζεύξεις (correlated links) με αντίστοιχα μήκη L_1, L_2 και αντίστοιχους σηματοθορυβικούς λόγους στις εισόδους των αντίστοιχων δεκτών με παραμέτρους $\mu_1, \lambda_1, \mu_2, \lambda_2$.



Σχήμα 5.1: Σύστημα που χρησιμοποιεί ένα αναγεννητικό επαναλήπτη

Σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει αναγεννητικούς επαναλήπτες δεν μπορεί να υπολογιστεί ο συνολικός (end-to-end) σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο, αλλά μπορεί να οριστεί ένας σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο του συστήματος M2M που εκφράζει το ενδεχόμενο διακοπής της συνολικής ζεύξης. Σε ένα τέτοιο σύστημα που χρησιμοποιεί έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, ο σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση [3]:

$$\gamma_t = \min(\gamma_1, \gamma_2) \quad (5.7)$$

Υποθέτοντας συγκεκριμένο κατώφλιο ισχύος στην είσοδο κάθε δέκτη, το οποίο ορίζεται διαφορετικά για κάθε δέκτη M2M (αναλόγως με τα χαρακτηριστικά κάθε κόμβου-

δέκτη M2M), η πιθανότητα διακοπής συστήματος M2M που χρησιμοποιεί ένα επαναλήπτη προκύπτει από τη σχέση:

$$P_{out} = P_r[(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}) \cup (\gamma_2 \leq \gamma_{th2})] \quad (5.8)$$

Για κάθε ζεύξη του συστήματος M2M ορίζεται ο σηματοθορυβικός λόγος γ_j στην είσοδο του δέκτη, με αντίστοιχη κατανομή πυκνότητας πιθανότητας (PDF_j) [52]:

$$f_{\gamma_i}(\gamma_i) = \sqrt{\frac{\lambda_i}{2\pi}} \gamma_i^{-3/2} \exp\left[-\frac{\lambda_i(\gamma_i - \mu_i)^2}{2\mu_i^2 \gamma_i}\right], \gamma_i > 0 \quad (5.9)$$

και αθροιστική κατανομή πυκνότητας πιθανότητας (CDF_j) [52]:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_i}(\gamma_{thi}) = P(\gamma_i \leq \gamma_{thi}) &= \int_{-\infty}^{\gamma_{thi}} f_{\gamma_i}(\gamma_i) d\gamma_i = Q\left[\sqrt{\frac{\lambda_i}{\gamma_{thi}}}\left(1 - \frac{\gamma_{thi}}{\mu_i}\right)\right] + \\ &+ \exp\left(\frac{2\lambda_i}{\mu_i}\right) \cdot Q\left[\sqrt{\frac{\lambda_i}{\gamma_{thi}}}\left(1 + \frac{\gamma_{thi}}{\mu_i}\right)\right] \end{aligned} \quad (5.10)$$

Επειδή

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)$$

η (5.10) λαμβάνει τη μορφή:

$$F_{\gamma_i}(\gamma_{thi}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\lambda_i}{\gamma_{thi}}} \cdot \frac{1 - \gamma_{thi}/\mu_i}{\sqrt{2}}\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{2\lambda_i}{\mu_i}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\lambda_i}{\gamma_{thi}}} \cdot \frac{1 + \gamma_{thi}/\mu_i}{\sqrt{2}}\right) \quad (5.11)$$

Επιπλέον, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης⁹ ανάμεσα σε δύο ζεύξεις i, j του συστήματος M2M (δηλαδή ανάμεσα στο σηματοθορυβικό λόγο στην είσοδο του δέκτη εκάστης των ζεύξεων i, j), ακολουθώντας το εκθετικό μοντέλο [51], δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_{dij} = p^{|i-j|} \quad (5.12)$$

Ορίζοντας τη συνάρτηση:

⁹ Για δύο τυχαίες μεταβλητές X, Y , ο συντελεστής συσχέτισης ορίζεται ως $p_{XY} = \operatorname{Cov}(X, Y) / \sqrt{\operatorname{Var}(X) \times \operatorname{Var}(Y)}$, όπου $\operatorname{Var}(X)$ η διασπορά της X και $\operatorname{Cov}(X, Y)$ η συνδιακύμανση των X, Y .

$$\Psi_i(x) = \sqrt{8} \sqrt{\frac{\lambda_i}{\mu_i^3}} (x - \mu_i) \cdot \exp\left(\frac{-\lambda_i(x - \mu_i)^2}{2\mu_i^2 x}\right) \quad (5.13)$$

καθώς και τις

$$z_i = \frac{\sqrt{\lambda_i}(\gamma_{thi} - \mu_i)}{\mu_i \sqrt{\gamma_{thi}}}, \quad C_i = \sqrt{2\left(\frac{4\lambda_i}{\mu_i} + z_i^2\right)} \quad (5.14)$$

μπορεί να οριστεί η από κοινού PDF των δύο ζεύξεων, δεδομένου ότι οι γ_1 και γ_2 είναι συσχετισμένες τυχαίες μεταβλητές, η οποία δίνεται από τη σχέση [49]:

$$f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) = f_{\gamma_1}(\gamma_1) \cdot f_{\gamma_2}(\gamma_2) \cdot [1 + p_{d12} \cdot \Psi(\gamma_1, \gamma_2)] \quad (5.15)$$

Η PDF της (5.15) είναι μη μηδενική για $\mu_i > 0$, $\gamma_i > 0$, $\lambda_i > 0$, $i = 1, 2$, ενώ η $\Psi(\gamma_1, \gamma_2)$ ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$\Psi(\gamma_1, \gamma_2) = \Psi_1(\gamma_1) \cdot \Psi_2(\gamma_2) = 8 \sqrt{\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1^3 \mu_2^3}} (\gamma_1 - \mu_1)(\gamma_2 - \mu_2) \cdot \exp\left[-\left(\frac{\lambda_1(\gamma_1 - \mu_1)^2}{2\mu_1^2 \gamma_1} + \frac{\lambda_2(\gamma_2 - \mu_2)^2}{2\mu_2^2 \gamma_2}\right)\right] \quad (5.16)$$

Επιπλέον, ορίζεται η από κοινού CDF των δύο ζεύξεων μέσω της σχέσης:

$$F_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) = P(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}) = \int_{-\infty}^{\gamma_{th2}} \int_{-\infty}^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2$$

η οποία δεδομένου ότι $\gamma_i > 0$ έρχεται στη μορφή:

$$F_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) = \int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 \quad (5.17)$$

Λόγω της (5.15), η (5.17) γράφεται:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) &= \int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) \cdot f_{\gamma_2}(\gamma_2) \cdot [1 + p_{d12} \cdot \Psi(\gamma_1, \gamma_2)] d\gamma_1 d\gamma_2 = \int_0^{\gamma_{th2}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) \cdot \left[\int_0^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \right] d\gamma_2 + \\ &+ p_{d12} \int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) \cdot f_{\gamma_2}(\gamma_2) \cdot \Psi(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 = \\ &= I_1 + I_2 \end{aligned} \quad (5.18)$$

όπου

$$I_1 = \int_0^{\gamma_{th2}} f_{\gamma_2}(\gamma_2) F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) d\gamma_2 = F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) \quad (5.19)$$

και

$$I_2 = p_{d12} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) \quad (5.20)$$

όπου [49]:

$$\begin{aligned} H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) &= \int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} \Psi(\gamma_1, \gamma_2) \cdot f_{\gamma_1}(\gamma_1) \cdot f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2 = \\ &= 16 \sqrt{\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2}} \exp\left[4\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2}\right)\right] \cdot Q(C_1) \cdot Q(C_2) \end{aligned} \quad (5.21)$$

Λόγω της (5.21), η (5.20) γίνεται:

$$I_2 = 16 p_{d12} \sqrt{\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\mu_1 \mu_2}} \exp\left[4\left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_2}\right)\right] \cdot Q(C_1) \cdot Q(C_2) \quad (5.22)$$

ενώ η (5.18) έρχεται στη μορφή:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_1 \gamma_2}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) &= P(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}) = I_1 + I_2 = \\ &= F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) + p_{d12} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) \end{aligned} \quad (5.23)$$

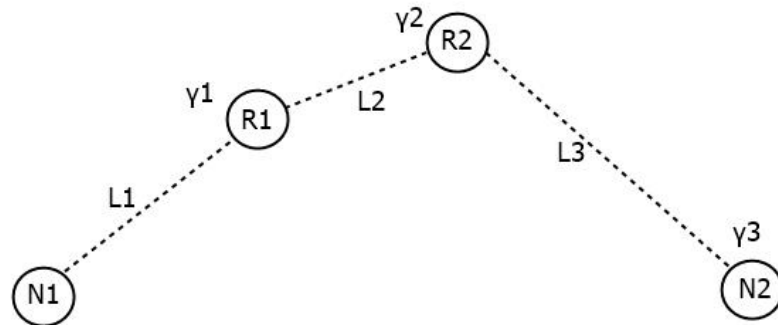
Τελικά, η πιθανότητα διακοπής του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} P_{out} &= P[(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}) \cup (\gamma_2 \leq \gamma_{th2})] = P(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}) + P(\gamma_2 \leq \gamma_{th2}) - P[(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}) \cap (\gamma_2 \leq \gamma_{th2})] = \\ &= P(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}) + P(\gamma_2 \leq \gamma_{th2}) - P(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}) = \\ &= F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) + F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) - F_{\gamma_1 \gamma_2}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) \end{aligned} \quad (5.24)$$

Λόγω της (5.23), η (5.24) λαμβάνει την τελική μορφή:

$$P_{out} = F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) + F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) - F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) - p_{d12} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) \quad (5.25)$$

5.3. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες



Σχήμα 5.2: Σύστημα που χρησιμοποιεί δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες

Σε σύστημα M2M που χρησιμοποιεί δύο αναγεννητικούς επαναλήπτες, άρα περιλαμβάνει τρεις ζεύξεις, ο σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση [3]:

$$\gamma_t = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) \quad (5.26)$$

και η πιθανότητα διακοπής του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση:

$$P_{out} = P_r[(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}) \cup (\gamma_2 \leq \gamma_{th2}) \cup (\gamma_3 \leq \gamma_{th3})] \quad (5.27)$$

Γενικώς, για τρία ενδεχόμενα A_1, A_2, A_3 ισχύει ότι

$$P_r(A_1 \cup A_2 \cup A_3) = \sum_{i=1}^3 P_r(A_i) - P_r(A_1 \cap A_2) - P_r(A_1 \cap A_3) - P_r(A_2 \cap A_3) + P_r(A_1 \cap A_2 \cap A_3) \quad (5.28)$$

Με βάση την (5.28), η (5.27) λαμβάνει τη μορφή:

$$P_{out} = \sum_{i=1}^3 P_r(\gamma_i \leq \gamma_{thi}) - P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}) - P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}) - P_r(\gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}) + P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}) \quad (5.29)$$

Αποδεικνύεται ότι η PDF της n-διάστατης IG κατανομής δίνεται από τη σχέση [50]:

$$f_{x_1 x_2 \dots x_n} = \prod_{j=1}^n f_{x_j}(x_j) \cdot [1 + \sum_{i < j} p_{dij} \cdot \Psi(x_i, x_j)], \quad x_i > 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.30)$$

Η σχέση (5.29) μπορεί ισοδύναμα να γραφεί στην ακόλουθη μορφή:

$$P_{out} = \sum_{i=1}^3 F_{\gamma_i}(\gamma_{thi}) - F_{\gamma_1 \gamma_2}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) - F_{\gamma_1 \gamma_3}(\gamma_{th1}, \gamma_{th3}) - F_{\gamma_2 \gamma_3}(\gamma_{th2}, \gamma_{th3}) + \\ + F_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}) \quad (5.31)$$

Λόγω της (5.23), η (5.31) μπορεί να γραφεί ισοδύναμα ως εξής:

$$P_{out} = \sum_{i=1}^3 F_{\gamma_i}(\gamma_{thi}) - F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) - p_{d12} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) - \\ - F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) - p_{d13} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th3}) - \\ - F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) - p_{d23} \cdot H(\gamma_{th2}, \gamma_{th3}) + \\ + F_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}) \quad (5.32)$$

όπου

$$F_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}) = \int_0^{\gamma_{th3}} \int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) d\gamma_1 d\gamma_2 d\gamma_3$$

Λόγω της (5.30), η ανωτέρω λαμβάνει τη μορφή:

$$F_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}) = \int_0^{\gamma_{th3}} \int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} \prod_{j=1}^3 f_{\gamma_j}(\gamma_j) \cdot [1 + \sum_{(i_1, i_2) \in S_2} p_{di_1 i_2} \cdot \Psi(x_{i_1}, x_{i_2})] d\gamma_1 d\gamma_2 d\gamma_3 = \\ = F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) + p_{d12} \int_0^{\gamma_{th3}} f_{\gamma_3}(\gamma_3) \cdot [\int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1 \gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) \cdot \Psi(\gamma_1, \gamma_2) d\gamma_1 d\gamma_2] d\gamma_3 + \\ + p_{d23} \int_0^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1}(\gamma_1) \cdot [\int_0^{\gamma_{th3}} \int_0^{\gamma_{th2}} f_{\gamma_2 \gamma_3}(\gamma_2, \gamma_3) \cdot \Psi(\gamma_2, \gamma_3) d\gamma_2 d\gamma_3] d\gamma_1$$

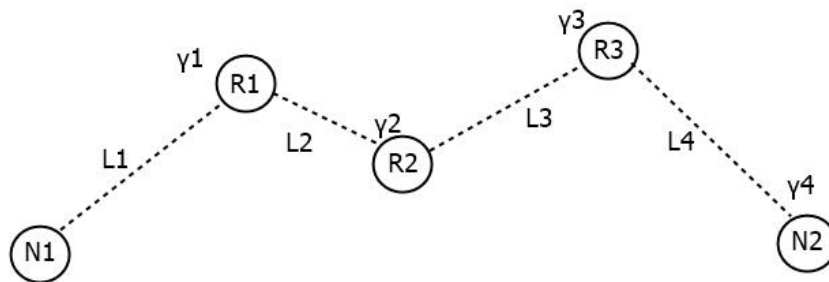
και λόγω της (5.15) έρχεται στη μορφή:

$$F_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}) = \prod_{j=1}^3 F_{\gamma_j}(\gamma_{thj}) + p_{d12} \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_3) \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) + p_{d23} \cdot F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot H(\gamma_{th2}, \gamma_{th3}) \\ + p_{d13} \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_2) \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th3}) \quad (5.33)$$

Τελικά, λόγω της (5.33), η (5.32) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned}
 P_{out} = & \sum_{i=1}^3 F_{\gamma_i}(\gamma_{thi}) - F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) - p_{d12} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) - \\
 & - F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) - p_{d13} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th3}) - \\
 & - F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) - p_{d23} \cdot H(\gamma_{th2}, \gamma_{th3}) + \\
 & + \prod_{j=1}^3 F_{\gamma_j}(\gamma_{thj}) + p_{d12} \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_3) \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) + p_{d23} \cdot F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot H(\gamma_{th2}, \gamma_{th3})
 \end{aligned}
 \tag{5.34}$$

5.4. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες



Σχήμα 5.3: Σύστημα που χρησιμοποιεί τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες

Σε σύστημα M2M που χρησιμοποιεί τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, άρα περιλαμβάνει τέσσερις ζεύξεις, ο σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση [3]:

$$\gamma_t = \min(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) \tag{5.35}$$

Ορίζονται τα σύνολα

$$s_1 = \{i | 1 \leq i \leq n\}, \quad s_2 = \{(i_1, i_2) | 1 \leq i_1 < i_2 \leq n\}$$

και γενικώς

$$s_m = \{(i_1, \dots, i_m) | 1 \leq i_1 < \dots < i_m \leq n\}$$

Η πιθανότητα διακοπής του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
P_{out} &= P_r[(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}) \cup (\gamma_2 \leq \gamma_{th2}) \cup (\gamma_3 \leq \gamma_{th3}) \cup (\gamma_4 \leq \gamma_{th4})] = \\
&= \sum_{j=1}^4 P_r(\gamma_j \leq \gamma_{thj}) - P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}) - P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}) - P_r(\gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}) - \\
&- P_r(\gamma_3 \leq \gamma_{th3}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4}) - P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4}) - P_r(\gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4}) + \\
&+ P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}) + P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4}) + \\
&+ P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4}) + P_r(\gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4}) - \\
&- P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4})
\end{aligned} \tag{5.36}$$

όπου

$$\begin{aligned}
P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4}) &= F_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}, \gamma_{th4}) = \\
&= \int_0^{\gamma_{th4}} \int_0^{\gamma_{th3}} \int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} f_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4) d\gamma_1 d\gamma_2 d\gamma_3 d\gamma_4
\end{aligned}$$

η οποία λόγω της (5.30) λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{aligned}
&P_r(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}, \gamma_2 \leq \gamma_{th2}, \gamma_3 \leq \gamma_{th3}, \gamma_4 \leq \gamma_{th4}) = \\
&= F_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}, \gamma_{th4}) = \\
&= \int_0^{\gamma_{th4}} \int_0^{\gamma_{th3}} \int_0^{\gamma_{th2}} \int_0^{\gamma_{th1}} \prod_{j=1}^4 f_{\gamma_j}(\gamma_j) \cdot [1 + \sum_{(i_1, i_2) \in S_2} p_{di_1 i_2} \cdot \Psi(x_{i_1}, x_{i_2})] d\gamma_1 d\gamma_2 d\gamma_3 d\gamma_4
\end{aligned}$$

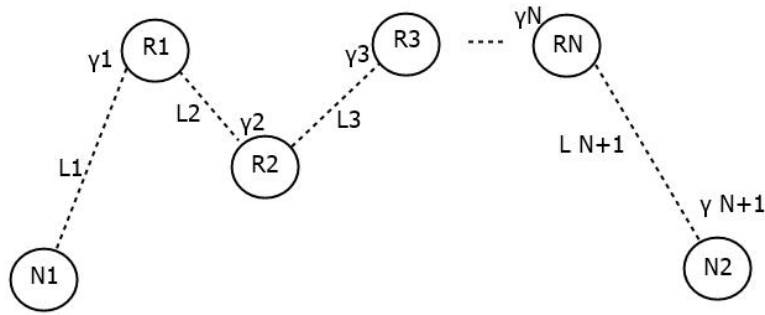
η οποία λόγω της (5.15) λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned}
&F_{\gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 \gamma_4}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}, \gamma_{th4}) = \\
&= \prod_{j=1}^4 F_{\gamma_j}(\gamma_{thj}) + p_{d12} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) \cdot F_{\gamma_4}(\gamma_{th4}) + \\
&+ p_{d13} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th3}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) \cdot F_{\gamma_4}(\gamma_{th4}) + p_{d14} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th4}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) + \\
&+ p_{d23} \cdot H(\gamma_{th2}, \gamma_{th3}) \cdot F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_4}(\gamma_{th4}) + p_{d34} \cdot H(\gamma_{th3}, \gamma_{th4}) \cdot F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_2}(\gamma_{th2})
\end{aligned} \tag{5.37}$$

Τελικά, η (5.36) λαμβάνει τη μορφή:

$$\begin{aligned}
P_{out} = & \sum_{j=1}^4 F_{\gamma_j}(\gamma_{thj}) - F_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) - F_{\gamma_1\gamma_3}(\gamma_{th1}, \gamma_{th3}) - F_{\gamma_1\gamma_4}(\gamma_{th1}, \gamma_{th4}) - \\
& - F_{\gamma_2\gamma_3}(\gamma_{th2}, \gamma_{th3}) - F_{\gamma_2\gamma_4}(\gamma_{th2}, \gamma_{th4}) - F_{\gamma_3\gamma_4}(\gamma_{th3}, \gamma_{th4}) + \\
& + F_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}) + F_{\gamma_1\gamma_2\gamma_4}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th4}) + \\
& + F_{\gamma_1\gamma_3\gamma_4}(\gamma_{th1}, \gamma_{th3}, \gamma_{th4}) + F_{\gamma_2\gamma_3\gamma_4}(\gamma_{th2}, \gamma_{th3}, \gamma_{th4}) - \\
& - F_{\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \gamma_{th3}, \gamma_{th4})
\end{aligned} \tag{5.38}$$

5.5. Γενίκευση του υπολογισμού της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με N αναγεννητικούς επαναλήπτες



Σχήμα 5.4: Σύστημα που χρησιμοποιεί N αναγεννητικούς επαναλήπτες

Σε σύστημα M2M που χρησιμοποιεί N αναγεννητικούς επαναλήπτες, άρα περιλαμβάνει N+1 ζεύξεις, ο σηματοθορυβικός λόγος ανά σύμβολο του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση [3]:

$$\gamma_t = \min(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{N+1}) \tag{5.39}$$

Η πιθανότητα διακοπής του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση:

$$P_{out} = P_r[(\gamma_1 \leq \gamma_{th1}) \cup (\gamma_2 \leq \gamma_{th2}) \cup \dots \cup (\gamma_{N+1} \leq \gamma_{th, N+1})] \tag{5.40}$$

Ως γενίκευση της σχέσης:

$$P_r(A_1 \cup A_2) = P_r(A_1) + P_r(A_2) - P_r(A_1 \cap A_2)$$

για η ενδεχόμενα, ισχύει:

$$P_r\left(\bigcup_{j=1}^n A_j\right) = \sum_{i \in S_1} P_r(A_i) - \sum_{(i_1, i_2) \in S_2} P_r(A_{i_1} \cap A_{i_2}) + \sum_{(i_1, i_2, i_3) \in S_3} P_r(A_{i_1} \cap A_{i_2} \cap A_{i_3}) - \dots + (-1)^{n-1} \cdot P_r\left(\bigcap_{j=1}^n A_j\right)$$

(5.41)

Τελικά, λόγω της (5.41) η σχέση (5.40) λαμβάνει τη μορφή:

$$P_{out} = \sum_{j \in S_1} P_r(\gamma_j \leq \gamma_{thj}) - \sum_{(i_1, i_2) \in S_2} P_r(\gamma_{i_1} \leq \gamma_{th, i_1}, \gamma_{i_2} \leq \gamma_{th, i_2}) + \sum_{(i_1, i_2, i_3) \in S_3} P_r(\gamma_{i_1} \leq \gamma_{th, i_1}, \gamma_{i_2} \leq \gamma_{th, i_2}, \gamma_{i_3} \leq \gamma_{th, i_3}) - \dots + (-1)^N \cdot P_r\left[\bigcap_{j=1}^{N+1} (\gamma_j \leq \gamma_{th, j})\right]$$

(5.42)

όπου

$$P_r\left[\bigcap_{j=1}^{N+1} (\gamma_j \leq \gamma_{th, j})\right] = F_{\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_{n+1}}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \dots, \gamma_{th, N+1})$$

(5.43)

Η (5.43), λόγω των σχέσεων (5.15) και (5.30), λαμβάνει τη μορφή:

$$P_r\left[\bigcap_{j=1}^{N+1} (\gamma_j \leq \gamma_{th, j})\right] = F_{\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_{n+1}}(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}, \dots, \gamma_{th, N+1})$$

$$P_r\left[\bigcap_{j=1}^{N+1} (\gamma_j \leq \gamma_{th, j})\right] = \prod_{j=1}^{N+1} F_{\gamma_j}(\gamma_{thj}) + p_{d12} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th2}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) \cdot F_{\gamma_4}(\gamma_{th4}) \cdot \dots + p_{d13} \cdot H(\gamma_{th1}, \gamma_{th3}) \cdot F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot F_{\gamma_3}(\gamma_{th3}) \cdot \dots + \dots + p_{dN, N+1} \cdot H(\gamma_{th, N}, \gamma_{th, N+1}) \cdot F_{\gamma_1}(\gamma_{th1}) \cdot \dots \cdot F_{\gamma_{N-1}}(\gamma_{th, N-1})$$

και ισοδύναμα:

$$\begin{aligned}
P_r \left[\bigcap_{j=1}^{N+1} (\gamma_j \leq \gamma_{th,j}) \right] &= F_{\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_{N+1}} (\gamma_{th,1}, \gamma_{th,2}, \dots, \gamma_{th,N+1}) = \\
&= \prod_{j=1}^{N+1} F_{\gamma_j} (\gamma_{th,j}) + \sum_{(i_1, i_2) \in S_2} [P_{di_1 i_2} \cdot H(\gamma_{th, i_1}, \gamma_{th, i_2}) \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i_1, j \neq i_2}}^{N+1} F_{\gamma_j} (\gamma_{th,j})]
\end{aligned}
\tag{5.44}$$

Τελικά, η (5.42) λαμβάνει την ακόλουθη γενική μορφή:

$$\begin{aligned}
P_{out} &= \sum_{j \in S_1} F_{\gamma_j} (\gamma_{th,j}) - \sum_{(i_1, i_2) \in S_2} F_{\gamma_{i_1} \gamma_{i_2}} (\gamma_{th, i_1}, \gamma_{th, i_2}) + \\
&+ \sum_{(i_1, i_2, i_3) \in S_3} F_{\gamma_{i_1} \gamma_{i_2} \gamma_{i_3}} (\gamma_{th, i_1}, \gamma_{th, i_2}, \gamma_{th, i_3}) - \dots + \\
&+ (-1)^N \cdot F_{\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_{N+1}} (\gamma_{th,1}, \gamma_{th,2}, \dots, \gamma_{th,N+1})
\end{aligned}
\tag{5.45}$$

Κεφάλαιο 6°

Αριθμητικά Αποτελέσματα και Σχολιασμός

6.1. Σύγκριση της πιθανότητας διακοπής απλής M2M ζεύξης με απώλειες λόγω σκίασης που ακολουθούν τη Λογαριθμική και την Αντίστροφη Κανονική Κατανομή

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2, θεωρώντας ότι οι απώλειες λόγω σκίασης w_j ακολουθούν την αντίστροφη κανονική κατανομή, η αθροιστική πυκνότητα πιθανότητας του σηματοθορυβικού λόγου ανά σύμβολο γ_i στην είσοδο του αποδιαμορφωτή του δέκτη δίνεται από τη σχέση:

$$F_{\gamma_i, IG}(\gamma_{thi}) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\lambda_i}{\gamma_{thi}}} \cdot \frac{1 - \gamma_{thi} / \gamma_i}{\sqrt{2}}\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{2\lambda_i}{\mu_i}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\lambda_i}{\gamma_{thi}}} \cdot \frac{1 + \gamma_{thi} / \gamma_i}{\sqrt{2}}\right) \quad (6.1)$$

Επομένως, σε απλή ζεύξη (single link) η πιθανότητα διακοπής του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση:

$$P_{out} = F_{\gamma_1, IG}(\gamma_{th1}) \quad (6.2)$$

Στην περίπτωση όπου οι απώλειες λόγω σκίασης w_j ακολουθούν την λογαριθμοκανονική κατανομή, η CDF του σηματοθορυβικού λόγου ανά σύμβολο γ_i στην είσοδο του αποδιαμορφωτή του δέκτη δίνεται από τη σχέση [3]:

$$F_{\gamma_i, LN}(\gamma_{thi}) = P_r(\gamma_i \leq \gamma_{thi}) = \int_0^{\gamma_{thi}} f_{\gamma_i}(\gamma_i) d\gamma_i = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\gamma_{thi} - \mu_i}{\sigma_i \sqrt{2}}\right) \quad (6.3)$$

Επομένως, σε απλή ζεύξη η πιθανότητα διακοπής του συστήματος M2M δίνεται από τη σχέση:

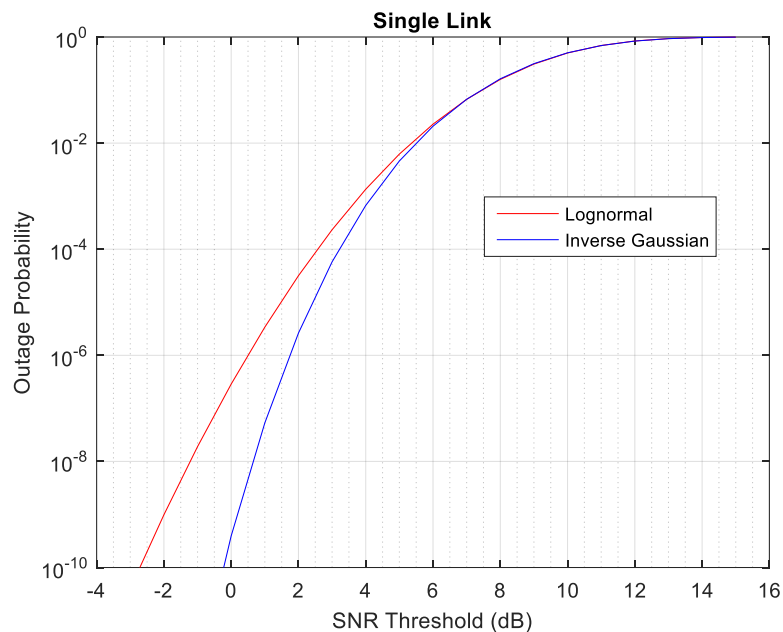
$$P_{out} = F_{\gamma_1, LN}(\gamma_{th1}) \quad (6.4)$$

Είναι χρήσιμο να γίνει σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του υπολογισμού της πιθανότητας διακοπής του συστήματος M2M συναρτήσει του σηματοθορυβικού λόγου κατωφλίου (ανά σύμβολο), για τις δύο περιπτώσεις, σε σύστημα M2M που χρησιμοποιεί απλή ζεύξη, για διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης σ των απωλειών λόγω σκίασης.

6.1.1. Αριθμητικά αποτελέσματα με τη χρήση MATLAB

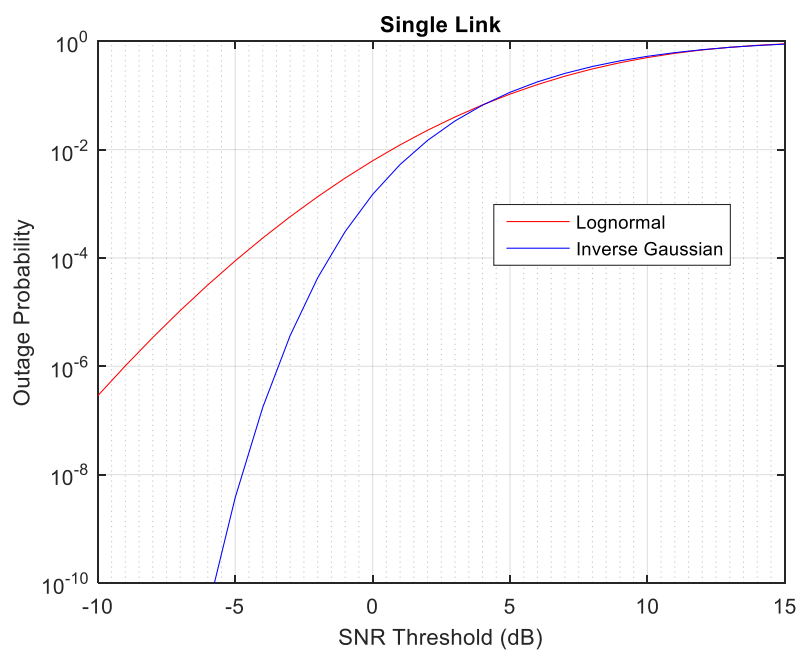
Στα ακόλουθα αριθμητικά αποτελέσματα θεωρείται ότι η μέση τιμή του σηματοθορυβικού λόγου ανά σύμβολο στην είσοδο του δέκτη είναι και στις δύο περιπτώσεις ίση με $\mu_{LN} = 15dB$.

A. Επιλέγοντας $\sigma = 2dB$.



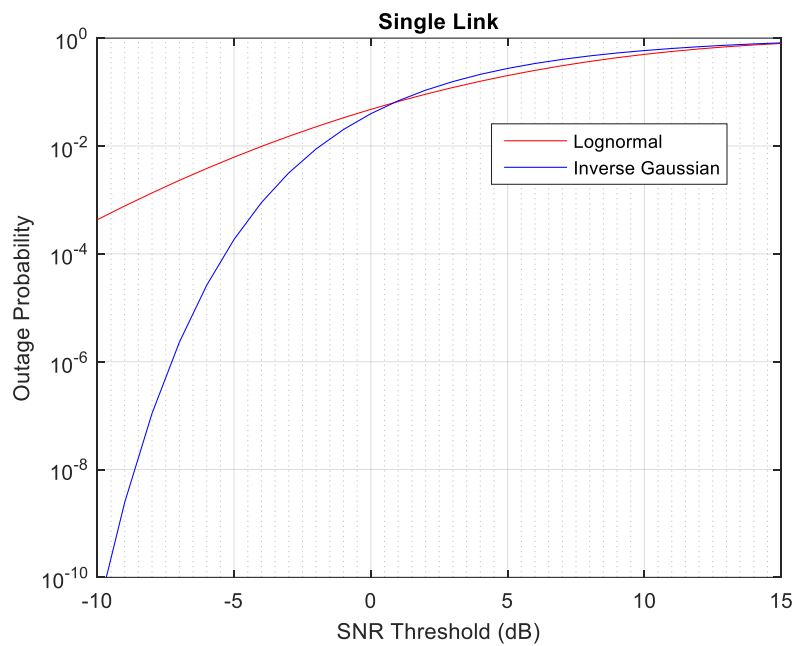
Σχήμα 6.1: Πιθανότητα διακοπής σε μονόδρομη ζεύξη, με χρήση της Λογαριθμοκανονικής και Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 2dB$

B. Επιλέγοντας $\sigma = 4dB$.



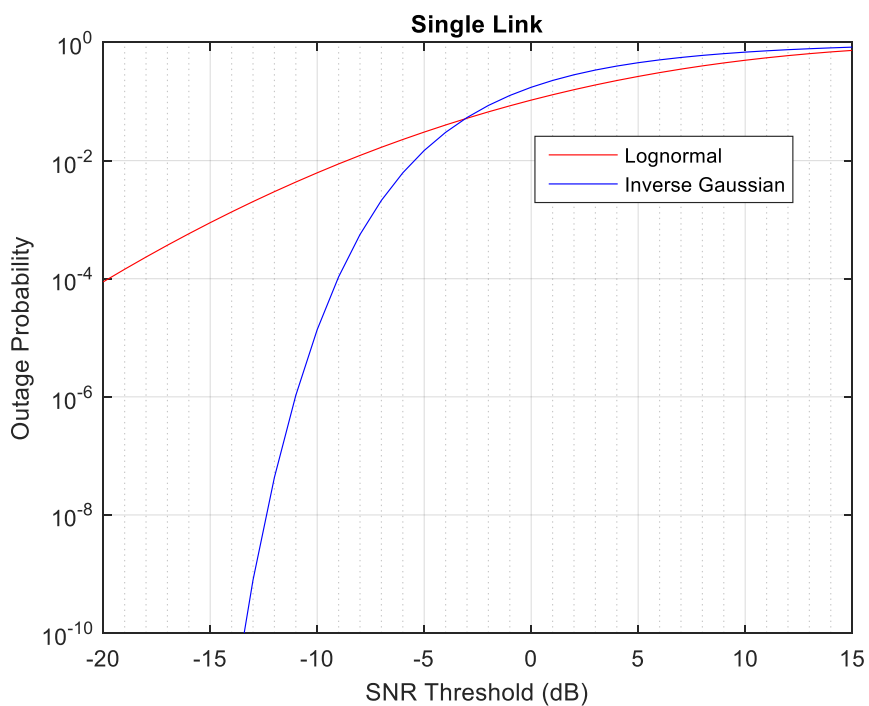
Σχήμα 6.2: Πιθανότητα διακοπής σε μονόδρομη ζεύξη, με χρήση της Λογαριθμοκανονικής και Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4dB$

C. Επιλέγοντας $\sigma = 6dB$.



Σχήμα 6.3: Πιθανότητα διακοπής σε μονόδρομη ζεύξη, με χρήση της Λογαριθμοκανονικής και Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 6dB$

D. Επιλέγοντας $\sigma = 8dB$.



Σχήμα 6.4: Πιθανότητα διακοπής σε μονόδρομη ζεύξη, με χρήση της Λογαριθμοκανονικής και Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 8dB$

6.1.2. Συμπεράσματα

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του υπολογισμού της πιθανότητας διακοπής του συστήματος με τα δύο μοντέλα κατανομής πιθανότητας είναι παραπλήσια, κυρίως για μικρές τιμές της τυπικής απόκλισης σ . Αυτό δεν ακυρώνει τη δυνατότητα της Αντίστροφης Κανονικής Κατανομής να προσεγγίζει τις απώλειες λόγω σκίασης. Υπάρχουν πολλά πειράματα που αποδεικνύουν ότι η Αντίστροφη Κανονική Κατανομή προσαρμόζεται καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα [48]. Αυτό ισχύει και στην περίπτωση όπου έχουμε διάδοση σε περιβάλλον εσωτερικών χώρων.

Επιπλέον, η αύξηση της τυπικής απόκλισης σ ισοδυναμεί με αύξηση των απωλειών λόγω σκίασης, με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας διακοπής του συστήματος.

Στα ακόλουθα αριθμητικά αποτελέσματα θα εξετασθούν οι τελικές αναλυτικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο 5^ο κεφάλαιο, με επιλογή συγκεκριμένων παραμέτρων. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2, μέχρι τώρα δεν έχει γίνει μαθηματική περιγραφή της πιθανότητας διακοπής ενός πολυβηματικού συστήματος ασύρματης μετάδοσης όταν οι απώλειες λόγω σκίασης ακολουθούν την αντίστροφη κανονική κατανομή. Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να γίνουν αριθμητικοί υπολογισμοί με τη χρήση MATLAB, χρησιμοποιώντας τις τελικές αναλυτικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο 5^ο κεφάλαιο για την αντίστροφη κανονική κατανομή. Τα αριθμητικά αποτελέσματα αυτά μπορούν να διευκολύνουν το σχεδιασμό μελλοντικών M2M συστημάτων που μεταδίδουν M2M δεδομένα με χρήση επαναληπτών σε περιβάλλον εσωτερικών χώρων.

6.2. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε σύστημα M2M με αναγεννητικό επαναλήπτη με απώλειες λόγω σκίασης που ακολουθούν την Αντίστροφη Κανονική Κατανομή

Σε όλα τα αριθμητικά αποτελέσματα που ακολουθούν, λόγω της παρουσίας των αναγεννητικών επαναληπτών, προκύπτουν δύο ή και περισσότερες ζεύξεις με συσχετισμένα φαινόμενα σκίασης. Ο συντελεστής συσχέτισης των ζεύξεων μεταξύ τους ανά δύο ορίζεται $\rho_{dij} = 0.8$ σε όλες τις περιπτώσεις, για λόγους απλότητας.

Επιπλέον, για λόγους απλότητας, θεωρείται ότι για κάθε ζεύξη η απόσβεση ελευθέρου χώρου FSL_j , τα κέρδη των κεραιών πομπού και δέκτη, η συχνότητα διάδοσης f_j , και η ισχύς εκπομπής P_{Tj} συμπεριλαμβάνονται στην μέση τιμή του σηματοθορυβικού λόγου ανά σύμβολο στην είσοδο του δέκτη κάθε ζεύξης $\mu_{j,LN}$ στην λογαριθμοκανονική κατανομή, η οποία μέσω της σχέσης (5.6) μετατρέπεται στη μέση τιμή για την αντίστροφη κανονική κατανομή.

Τέλος, για να γίνει δίκαιη σύγκριση των συστημάτων που χρησιμοποιούν διαφορετικό αριθμό επαναληπτών, ορίζεται ότι η μέση τιμή του σηματοθορυβικού λόγου ανά σύμβολο στην είσοδο του δέκτη κάθε ζεύξης δίνεται από τη σχέση (σε dB):

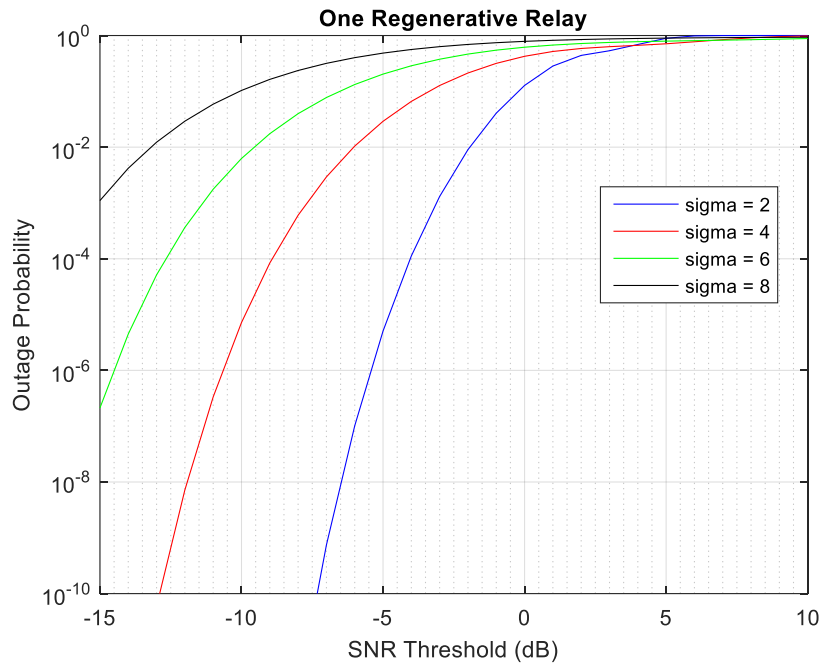
$$\mu_{j,LN} = x_j + 10\log_{10}(n+1) \quad (6.4)$$

όπου x_j σε dB και n το πλήθος των επαναληπτών που χρησιμοποιούνται από σύστημα μετάδοσης.

6.2.1. Αριθμητικά αποτελέσματα με τη χρήση MATLAB

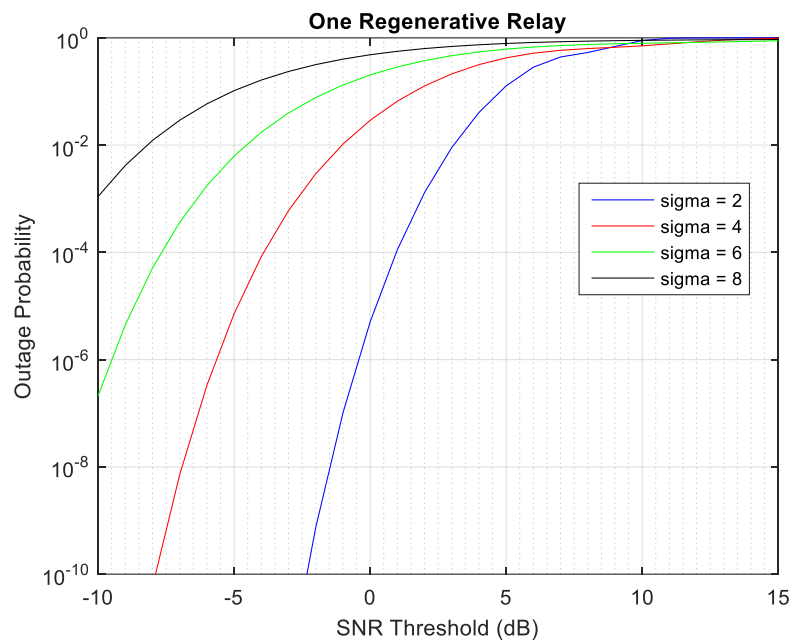
Σε όλες τις ακόλουθες περιπτώσεις θεωρείται ότι για τις δύο ζεύξεις είναι $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ (σε dB).

A. Επιλέγοντας $x_1 = x_2 = 0dB$.



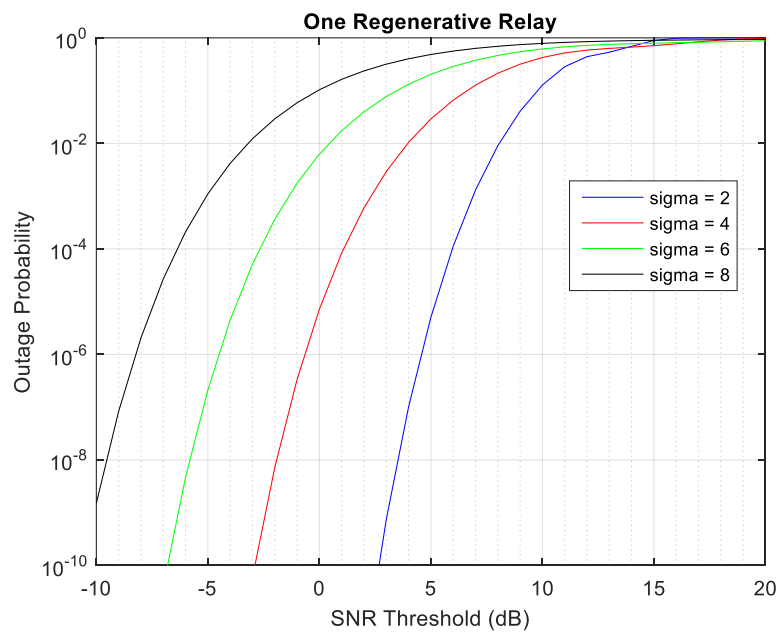
Σχήμα 6.5: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 0dB$

B. Επιλέγοντας $x_1 = x_2 = 5dB$.



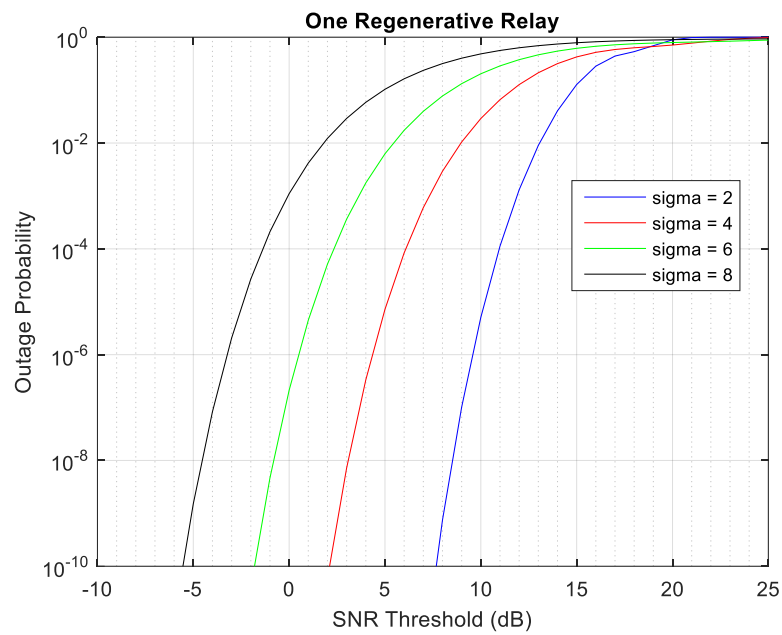
Σχήμα 6.6: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 5dB$

C. Επιλέγοντας $x_1 = x_2 = 10dB$.



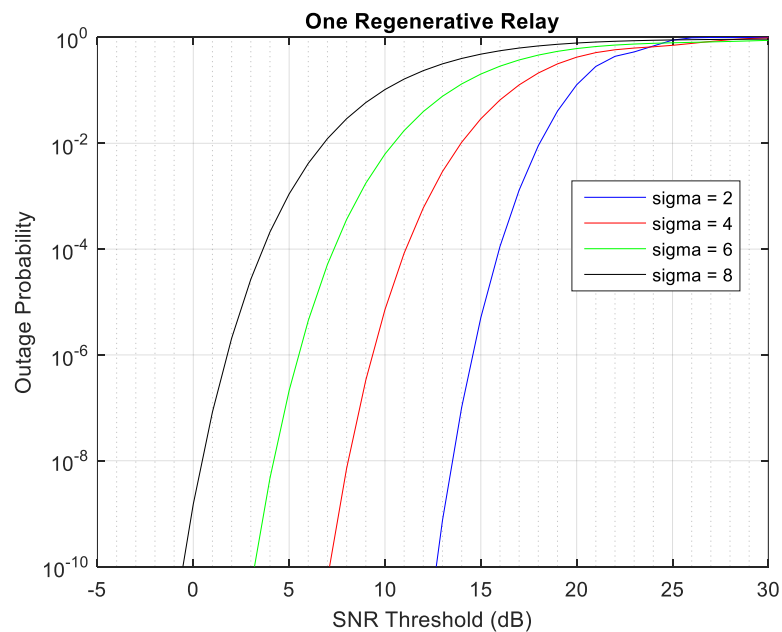
Σχήμα 6.7: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 10dB$

D. Επιλέγοντας $x_1 = x_2 = 15dB$.



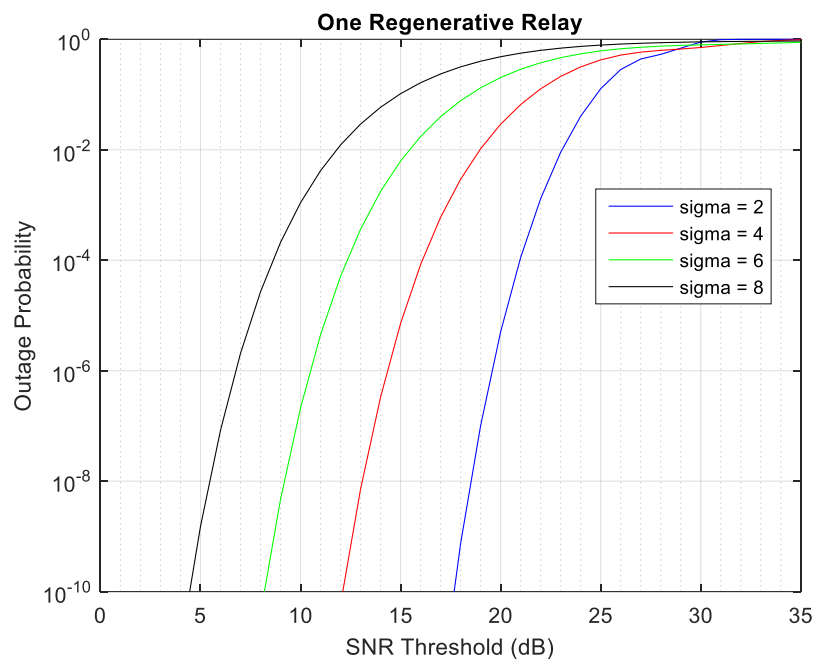
Σχήμα 6.8: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 15dB$

E. Επιλέγοντας $x_1 = x_2 = 20dB$.



Σχήμα 6.9: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 20dB$

F. Επιλέγοντας $x_1 = x_2 = 25dB$.



Σχήμα 6.10: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν αναγεννητικό επαναλήπτη, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x_1 = x_2 = 25dB$

6.2.2. Συμπεράσματα

Παρατηρείται ότι για όλες τις τιμές της μέσης τιμής $\mu_{j,LN}$ η αύξηση της τυπικής απόκλισης σ ισοδυναμεί με αύξηση των απωλειών λόγω σκίασης, με αποτέλεσμα η πιθανότητα διακοπής του συστήματος να είναι μεγαλύτερη.

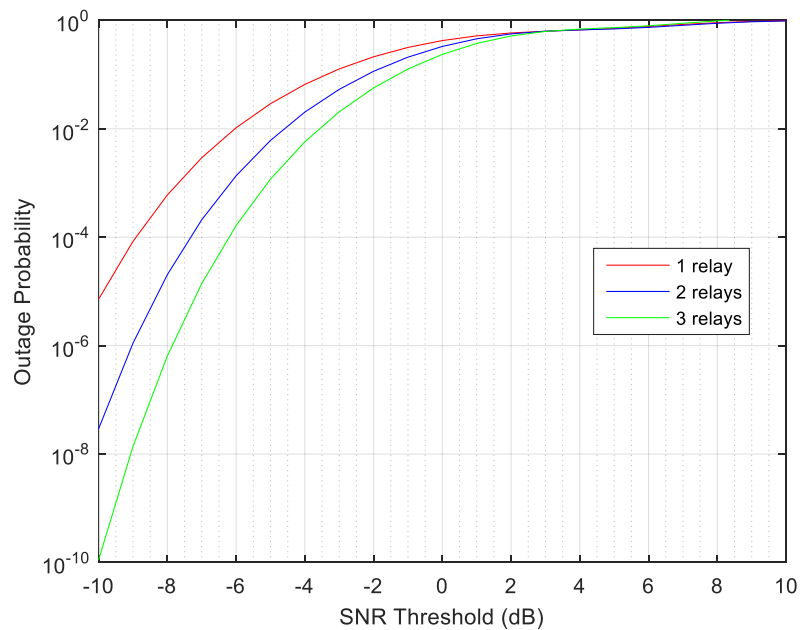
Επιπλέον, η αύξηση της μέσης τιμής του σηματοθορυβικού λόγου ανά σύμβολο στην είσοδο του δέκτη (η οποία εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής και τα κέρδη κεραιών πομπού και δέκτη) ισοδυναμεί με μείωση της πιθανότητας διακοπής.

6.3. Υπολογισμός της πιθανότητας διακοπής σε συστήματα M2M με απώλειες λόγω σκίασης που ακολουθούν την Αντίστροφη Κανονική Κατανομή που χρησιμοποιούν έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες

6.3.1. Αριθμητικά αποτελέσματα με τη χρήση MATLAB θεωρώντας σταθερό $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 4dB$

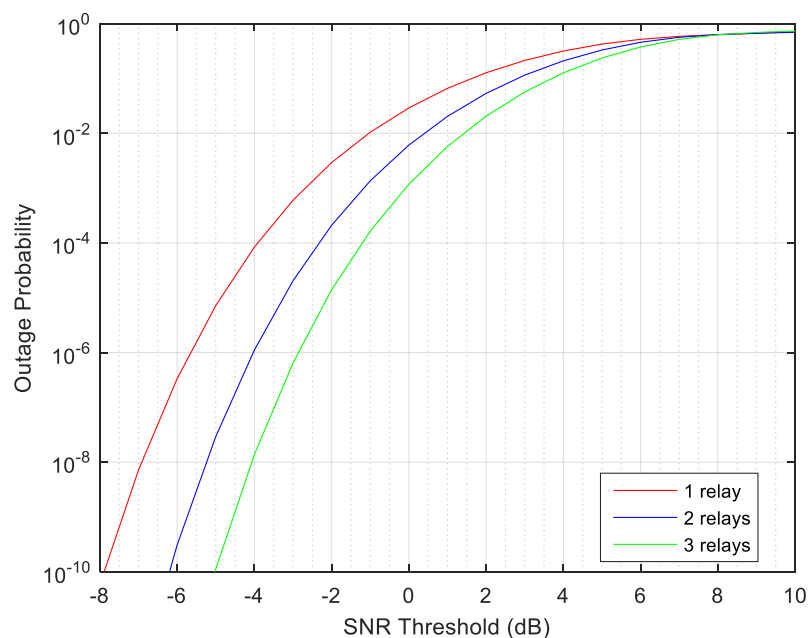
Σε όλες τις ακόλουθες περιπτώσεις θεωρείται ότι $x_1 = x_2 = x_3 = x$.

A. Επιλέγοντας $x = 0dB$.



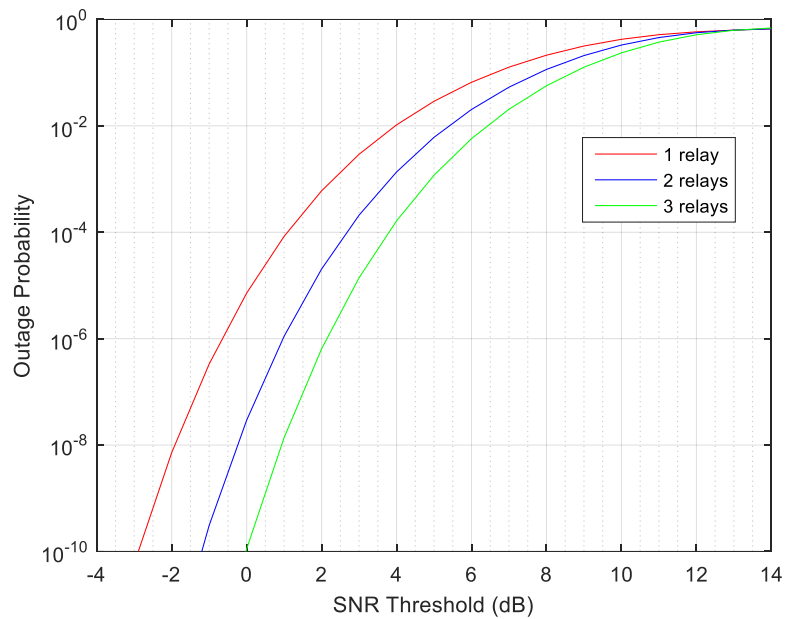
Σχήμα 6.11: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4dB$ και $x = 0dB$

B. Επιλέγοντας $x = 5dB$.



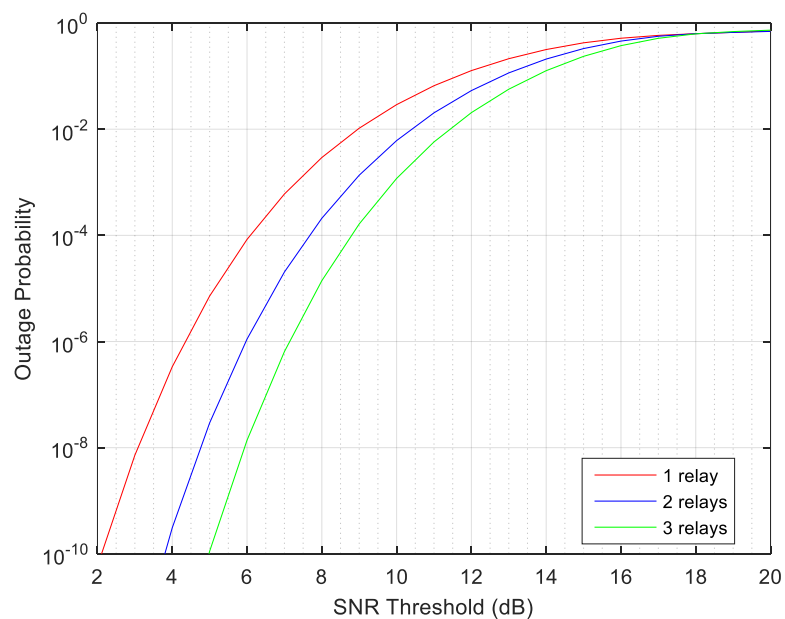
Σχήμα 6.12: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4dB$ και $x = 5dB$

C. Επιλέγοντας $x = 10dB$.



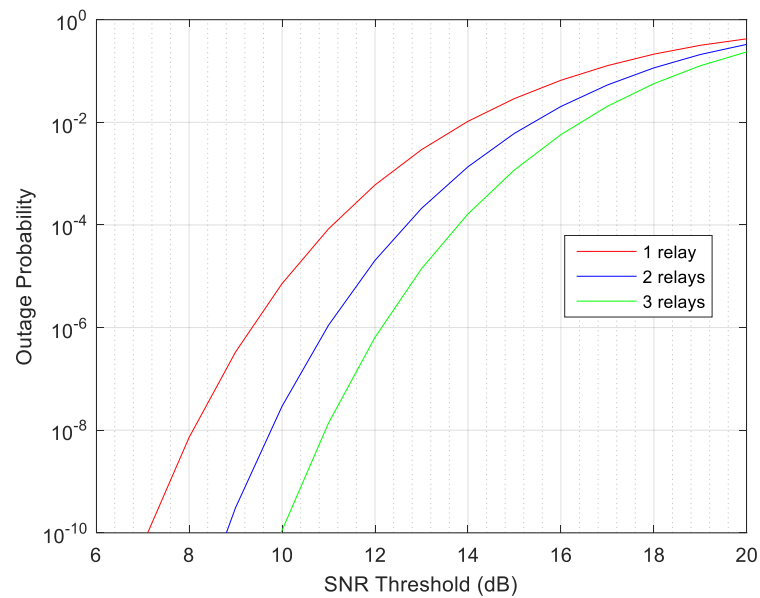
Σχήμα 6.13: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4dB$ και $x = 10dB$

D. Επιλέγοντας $x = 15dB$.



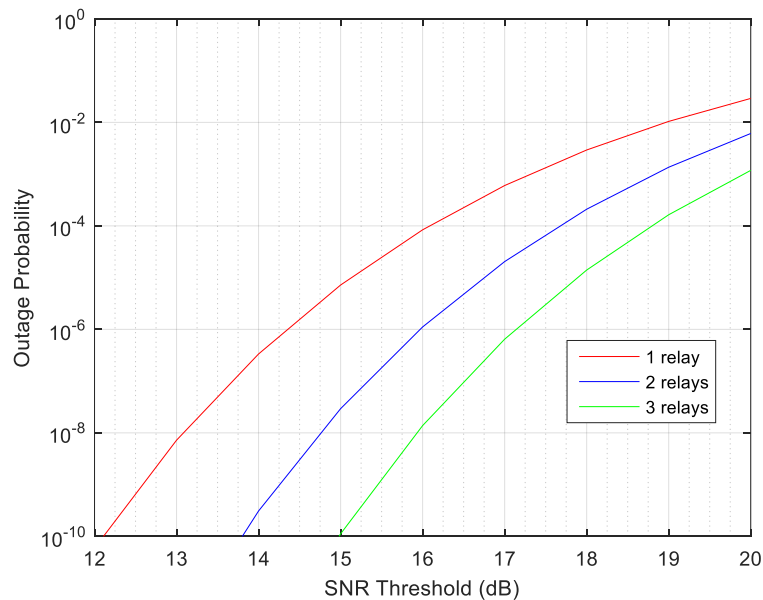
Σχήμα 6.14: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4dB$ και $x = 15dB$

Ε. Επιλέγοντας $x = 20dB$.



Σχήμα 6.15: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4dB$ και $x = 20dB$

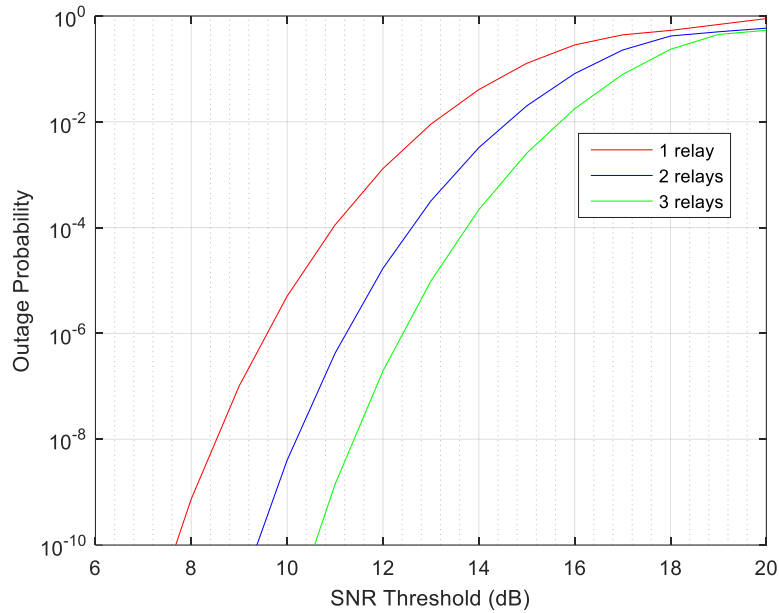
Φ. Επιλέγοντας $x = 25dB$.



Σχήμα 6.16: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $\sigma = 4dB$ και $x = 25dB$

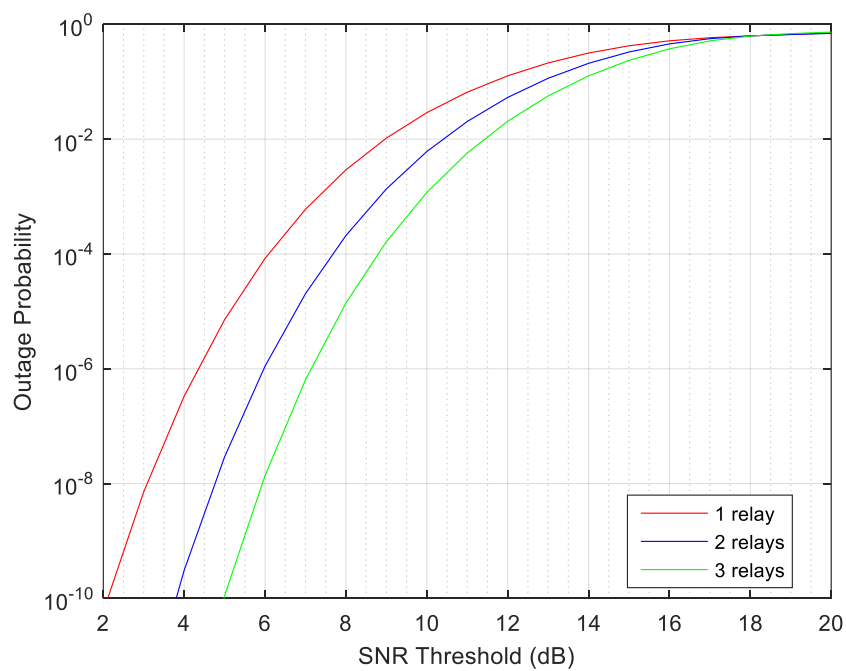
6.3.2. Αριθμητικά αποτελέσματα με τη χρήση MATLAB θεωρώντας σταθερό $x = x_1 = x_2 = x_3 = 15dB$.

A. Επιλέγοντας $\sigma = 2dB$.



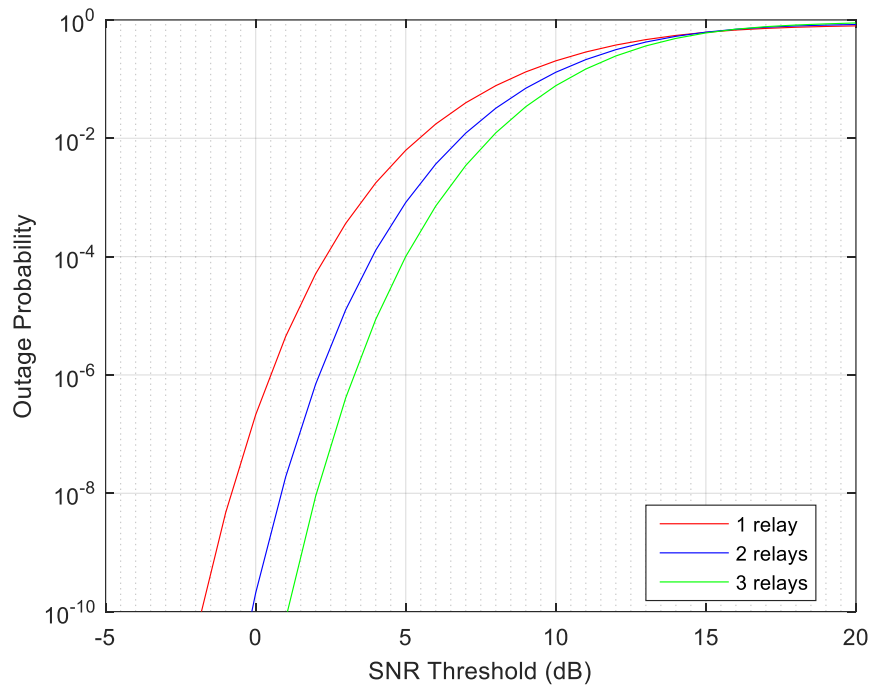
Σχήμα 6.17: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x = 15dB$ και $\sigma = 2dB$

B. Επιλέγοντας $\sigma = 4dB$.



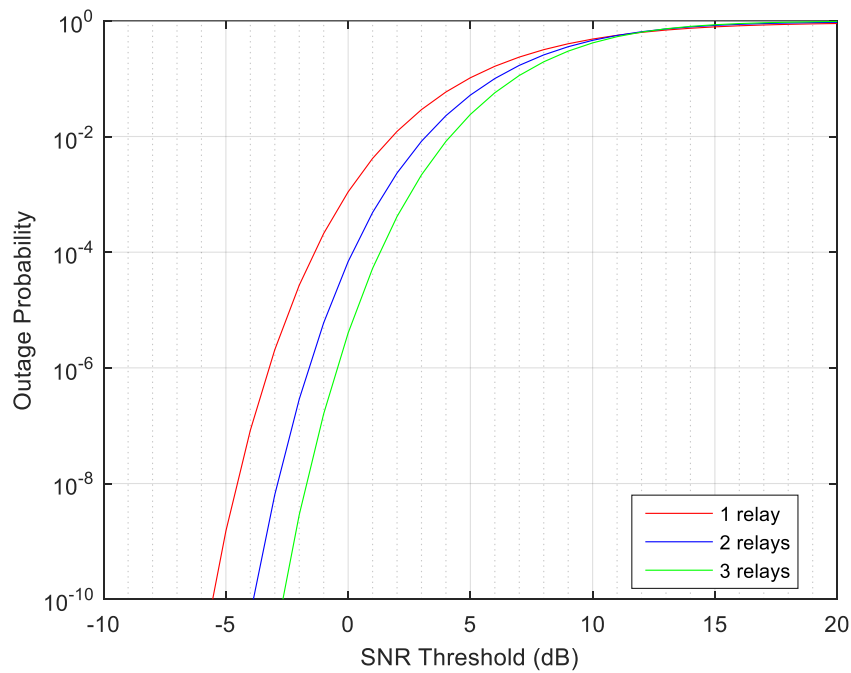
Σχήμα 6.18: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x = 15dB$ και $\sigma = 4dB$

C. Επιλέγοντας $\sigma = 6dB$.



Σχήμα 6.19: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x = 15dB$ και $\sigma = 6dB$

D. Επιλέγοντας $\sigma = 8dB$.



Σχήμα 6.20: Πιθανότητα διακοπής σε σύστημα με έναν, δύο, και τρεις αναγεννητικούς επαναλήπτες, με χρήση της Αντίστροφης Κανονικής κατανομής, για $x = 15dB$ και $\sigma = 8dB$

6.3.3. Συμπεράσματα

Αρχικά, για τα αριθμητικά αποτελέσματα της παραγράφου 6.3.1 παρατηρείται ότι η αύξηση της μέσης τιμής του σηματοθορυβικού λόγου στην είσοδο του δέκτη ισοδυναμεί με μείωση της πιθανότητας διακοπής του συστήματος.

Επιπλέον, για τα αποτελέσματα της παραγράφου 6.3.2 παρατηρείται ότι σε όλα τα συστήματα, ανεξαρτήτως του αριθμού των επαναληπτών, η αύξηση της τυπικής απόκλισης σ ισοδυναμεί με αύξηση της επίδρασης των απωλειών λόγω σκίασης, άρα και με αύξηση της πιθανότητας διακοπής του συστήματος.

Τέλος, από τα αποτελέσματα της παραγράφου 6.3.2 γίνεται αντιληπτό ότι η προσθήκη των επαναληπτών βελτιώνει την απόδοση του συστήματος, καθώς μειώνει την πιθανότητα διακοπής. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι η βελτίωση αυτή είναι ασθενέστερη στις περιπτώσεις όπου η τυπική απόκλιση των απωλειών λόγω σκίασης λαμβάνει σχετικά μεγάλες τιμές, όπως στην περίπτωση όπου $\sigma = 8dB$ (βλ. Σχ. 6.20).

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού ήταν να γίνουν αριθμητικοί υπολογισμοί με τη χρήση MATLAB, χρησιμοποιώντας τις τελικές αναλυτικές σχέσεις που παρουσιάστηκαν στο 5ο κεφάλαιο για την αντίστροφη κανονική κατανομή. Το ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα αποδεικνύει την ορθότητα των αποτελεσμάτων και των τελικών αναλυτικών σχέσεων που παρουσιάστηκαν στο 5^ο κεφάλαιο.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2, έχει αποδειχθεί ότι η αντίστροφη κανονική κατανομή έχει τη δυνατότητα να περιγράψει αποτελεσματικά το φαινόμενο της σκίασης [48]. Μολονότι έχουν γίνει αριθμητικοί υπολογισμοί για πολυβηματικά συστήματα στην περίπτωση όπου οι απώλειες λόγω σκίασης ακολουθούν τη λογαριθμική κατανομή [3], δεν έχουν γίνει αντίστοιχοι υπολογισμοί στην περίπτωση όπου οι απώλειες λόγω σκίασης ακολουθούν την αντίστροφη κανονική κατανομή.

Η μαθηματική περιγραφή των απωλειών λόγω σκίασης που ακολουθούν την αντίστροφη κανονική κατανομή και τα αριθμητικά αποτελέσματα από τον υπολογισμό της πιθανότητας διακοπής ενός πολυβηματικού συστήματος στην περίπτωση αυτή μπορούν να αποτελέσουν ένα πολύτιμο, επιπρόσθετο εργαλείο κατά το σχεδιασμό μελλοντικών M2M πολυβηματικών συστημάτων που θα μεταδίδουν M2M δεδομένα με χρήση επαναληπτών σε περιβάλλον εσωτερικών χώρων.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] Π. Κωπτής, Π. Αράπογλου, "Ασύρματες Επικοινωνίες", Εκδόσεις Τζιόλα, Αθήνα, 2011
- [2] Κανάτας Αθανάσιος, Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος, "Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008
- [3] Βασίλειος Κ. Σακαρέλλος, "Συνεργατικές Επικοινωνίες και Τεχνικές Προώθησης σε Ασύρματα Ευρυζωνικά Επίγεια και Δορυφορικά Δίκτυα", Διδακτορική Διατριβή, 2010
- [4] Shuyi Chen, Ruofei Ma, Hsiao-Hwa Chen, Hong Zhang, Weixiao Meng, Jiamin Liu, "Machine-to-Machine Communications in Ultra-Dense Networks – A Survey", IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, VOL. XX, NO. YY, MONTH 2017
- [5] Jeffrey G. Andrews, Stefano Buzzi, Senior Member, Wan Choi, Stephen V. Hanly, Angel Lozano, Anthony C. K. Soong, Jianzhong Charlie Zhang, "What Will 5G Be?", IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 32, NO. 6, June 2014
- [6] Shao-Yu Lien, Kwang-Cheng Chen, "Toward Ubiquitous Massive Accesses in 3GPP Machine-to-Machine Communications", IEEE Communications Magazine, April 2011
- [7] Andrea Zanella, Nicola Bui, Angelo Castellani, Lorenzo Vangelista, Michele Zorzi, "Internet of Things for Smart Cities", IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL, VOL. 1, NO. 1, February 2014
- [8] Li Da Xu, Wu He, Shancang Li, "Internet of Things in Industries: A Survey", DOI 10.1109/TII.2014.2300753, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014
- [9] Charith Perera, (Member, IEEE), Chi Harold Liu, (Member, IEEE), Srimal Jayawardena, (Member, IEEE) and Min Chen, (Senior Member, IEEE), "A Survey on Internet of Things from Industrial Market Perspective", IEEE Access, Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2015.2389854
- [10] Luigi Atzori, Antonio Iera, Giacomo Morabito, "The Internet of Things: A survey", Computer Networks 54 (2010) 2787–2805
- [11] H. Sundmaeker, P. Guillemin, P. Friess, and S. Woelffle, "Vision and challenges for realising the Internet of Things," European Commission Information Society and Media, Luxembourg, Tech. Rep., Mar. 2010

- [12] Charith Perera, Arkady Zaslavsky, Peter Christen, Dimitrios Georgakopoulos, "Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 16, Issue: 1, First Quarter 2014)
- [13] Emilian Pascalau, Grzegorz J. Nalepa, Krzysztof Kluza, "Towards a better understanding of context-aware applications", Proceedings of the 2013 Federated Conference on Computer Science and Information Systems pp. 959–962
- [14] A. K. Dey and G. D. Abowd, "Towards a better understanding of context and context-awareness," in HUC '99: Proceedings of the 1st international symposium on Handheld and Ubiquitous Computing, Springer-Verlag, 1999, pp. 304–307
- [15] Harpreet S. Dhillon, Howard Huang, and Harish Viswanathan, "Wide-Area Wireless Communication Challenges for the Internet of Things", IEEE Communications Magazine, February 2017
- [16] A. Asin and D. Gascon, "50 sensor applications for a smarter world," Libelium Comunicaciones Distribuidas, Tech. Rep., 2012, <http://www.libelium.com/top-50-iot-sensor-applications-ranking/pdf>
- [17] Jan Holler, Vlasios Tsiatsis, Catherine Mulligan, Stamatis Karnouskos, Stefan Avesand, David Boyle, "From Machine-to-Machine to the Internet of Things: Introduction to a New Age of Intelligence", 2014 Elsevier Ltd.
- [18] Vojislav B. Mišić, Jelena Mišić, "Machine-to-Machine Communications: Architectures, Standards, and Applications", CRC Press, 2014
- [19] Rapeepat Ratasuk, Athul Prasad, Zexian Li, Amitava Ghosh, and Mikko A. Uusitalo, "Recent Advancements in M2M Communications in 4G Networks and Evolution Towards 5G", 2015 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks
- [20] Edward, L., 2008, "Cyber Physical Systems: Design Challenges", Berkeley Technical Report
- [21] Sohraby, K., D. Minoli, and T. Znati, 2007, "Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications", John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey
- [22] Αναστάσιος Δ. Μακρής, "Αξιοποίηση του LTE δικτύου για M2M επικοινωνίες", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Σεπτέμβριος 2016
- [23] Βασίλειος Καλύβας, "Αρχιτεκτονική και Λειτουργία Οικιακού Δικτύου Smart Home", Διπλωματική Εργασία, Αθήνα, Οκτώβριος 2015

- [24] Agilent Technologies, “Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 802.11ad Explained”, Application Note
- [25] Rohde & Schwarz, “802.11ad – WLAN at 60 GHz: A technology introduction”, White Paper
- [26] Branimir Boskovic, Milan Markovic, “On spread spectrum modulation techniques applied in IEEE 802.11 wireless LAN standard”, 2000 IEEE
- [27] Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, “Wireless mesh networks: a survey”, Computer Networks, vol. 47
- [28] Guido R. Hiertz, Dee Denteneer, Lothar Stibor, Yunpeng Zang, Xavier Pérez Costa, Bernhard Walke, “The IEEE 802.11 Universe”, IEEE Communications Magazine, January 2010
- [29] Patrick Stuedi, Oscar Chinellato, Gustavo Alonso, “Connectivity in the presence of Shadowing in 802.11 Ad Hoc Networks”, Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE
- [30] Xiaolong Li, Qing-An Zeng, “Capture Effect in the IEEE 802.11 WLANs with Rayleigh Fading, Shadowing, and Path Loss”, Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, IEEE 2006
- [31] Eldad Perahia, Carlos Cordeiro, Minyoung Park, L. Lily Yang, “IEEE 802.11ad: Defining the Next Generation Multi-Gbps Wi-Fi”, Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2010 7th IEEE
- [32] Robert G. Gallager, “Low-Density Parity-Check Codes”, 1963
- [33] University of Harvard, “Reed-Solomon Codes”, <http://www.eecs.harvard.edu/~michaelm/CS222/eccnotes.pdf>
- [34] Matthew G. Parker, Kenneth G. Patersonyand, Chintha Tellambura, “Golay Complementary Sequences”, 2004
- [35] Elana Kalashnikov, “An Introduction to Golay Complementary Sequences”, 2014
- [36] Ming Lei and Ye Huang, “CFR and SNR Estimation Based on Complementary Golay Sequences for Single-Carrier Block Transmission in 60-GHz WPAN”, Wireless Communications and Networking Conference, IEEE, 2009

- [37] E.S. Rosenblum, "Atmospheric Absorption of 10-400 kMCPS Radiation: Summary and Bibliography to 1961", Microwave Journal, March, 1961
- [38] Eldad Perahia and Michelle X. Gong (Intel Corporation), "Gigabit Wireless LANs: an overview of IEEE 802.11ac and 802.11ad",
- [39] Bo Gao, Zhenyu Xiao, Li Su, Zhen Chen, Depeng Jin, Lieguang Zeng, "Multi-device multi-path beamforming training for 60-GHz millimeter-wave communications", IEEE ICC 2015 SAC - Millimeter-wave Communications
- [40] Ruonan Zhang, Lin Cai, "Modeling UWB indoor channel with shadowing processes", QShine '07, The Fourth International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness & Workshops
- [41] Martin Jacob, Christian Mbianke, Thomas Kurner, "A Dynamic 60 GHz Radio Channel Model for System Level Simulations with MAC Protocols for IEEE 802.11ad", 2010 IEEE 14th International Symposium on Consumer Electronics
- [42] Adewale Abe, Stuart D. Walker, "Multi-hop 802.11ad wireless H.264 video streaming", 2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing, IEEE
- [43] Jie Lin, Wei Yu, Nan Zhang, Xinyu Yang, Hanlin Zhang, Wei Zhao, "A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications", IEEE Internet of Things Journal (Volume: PP, Issue: 99)
- [44] Moray Rumney, "LTE and the Evolution to 4G Wireless, Design and Measurement Challenges, Second Edition", 2013 Agilent Technologies, Inc. Published by John Wiley & Sons, Ltd.
- [45] 3GPP TR 23.888 v11.0.0, 2012, System Improvements for Machine-Type Communications, Release 11
- [46] C.H. Potter, G.P. Hancke, B.J. Silva, "Machine-to-Machine: Possible applications in industrial networks", 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)
- [47] Tamoaki Ohtsuki, "LDPC Codes in Communications and Broadcasting", IEICE Trans. Commun., Vol. E90-B, No. 3 March 2007
- [48] C. Kourogorgas, M. Kvicera, A. D. Panagopoulos and P. Pechac, "Inverse Gaussian based Composite Channel Model and Time Series Generator for LMS Systems under Tree Shadowing", IET Microwaves and Propagation Journal, Volume: 10, Issue: 6, 4 24 2016

[49] Charilaos I. Kourogioras, Athanasios D. Panagopoulos, "Outage performance of dual branch diversity techniques in broadband fixed wireless access networks", IET Commun., 2014, Vol. 8, Iss. 9, pp. 1648–1653

[50] Essam K. Al-Hussaini, Nagi S. Abd-El-Hakim, "Bivariate Inverse Gaussian Distribution", Ann. Inst. Statist. Math. 33 (1981), Part A, 57-66

[51] Dimitrios Skraparlis, Vasileios K. Sakarellos, Athanasios D. Panagopoulos, and John D. Kanellopoulos, "Performance of N-Branch Receive Diversity Combining in Correlated Lognormal Channels", IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 13, NO. 7, JULY 2009

[52] Chikkara, R.S., Folks, J.L., "The inverse Gaussian distribution: theory, methodology and applications", M. Dekker, New York, 1989