



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ -ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Κατανεμημένα Συστήματα, Ασφάλεια και Αναδυόμενες  
Τεχνολογίες Πληροφορίας»**

**Μεταπτυχιακή διατριβή**

Τίτλος διατριβής	<b>Βασικές Αρχές και Λειτουργίες του πρωτοκόλλου 802.15.4 – DSME</b>  <b>Basic Principles and functionalities of the 802.15.4 – DSME protocol</b>
Όνοματεπώνυμο φοιτητή	<b>Ιωάννης Χαρίτος</b>
Πατρώνυμο	<b>Γεώργιος</b>
Αριθμός Μητρώου	<b>ΜΠΚΣΑ20008</b>
Επιβλέπων	<b>Χρήστος Δουληγέρης, Καθηγητής</b>

Ημερομηνία Παράδοσης **Ιούνιος 2023**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Χρήστος Δουλιγέρης  
Καθηγητής

Παναγιώτης Κοτζανικολάου  
Αναπληρωτής Καθηγητής

Μιχαήλ Ψαράκης  
Αναπληρωτής Καθηγητής

**Αθήνα, Ιούνιος 2023**

.....  
Ιωάννης Χαρίτος

Διπλωματούχος τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Copyright © Ιωάννης Χαρίτος, 2022.

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 Πανεπιστημίου Πειραιώς

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου Κο.Χρήστο Δουληγέρη όσο και τον δρ. Απόστολος Καραλής τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν αναθετοντάς μου την διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας, όσο και για την άριστη συνεργασία μας για την επιτυχημένη ολοκλήρωσή της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τα κοντινά μου πρόσωπα, που με την αμέριστη υποστήριξη και εμπιστοσύνη που μου έδειξαν καθόλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου συνέβαλλαν αποφασιστικά στην επίτευξη αυτού του στόχου.

# Περιεχόμενα

Κατάλογος σχημάτων  
Κατάλογος πινάκων  
Λίστα Συντμήσεων  
Περίληψη  
Abstract

1	Εισαγωγή.....	13
1.1.	Ασύρματα Δίκτυα και η χρήση τους για τη διασύνδεση και μετάδοση δεδομένων...	13
1.2.	Η αρχιτεκτονική του 802.15.4 .....	14 -
1.2.1.	Το φυσικό στρώμα (PHY Layer) .....	15 -
1.2.2.	Το στρώμα πρόσβασης μέσου (MAC Layer) .....	17 -
1.2.3.	Ανώτερα Στρώματα .....	18 -
1.3.	Τοπολογία και Μοντέλα δικτύου .....	19
1.4.	Αξιοπιστία και Ασφάλεια του πρωτοκόλλου.....	19
1.5.	Προσθήκες στη λειτουργία του 802.15.4 πρωτοκόλλου.....	22 -
1.6.	Βασικά Χαρακτηριστικά του 802.15.4 DSME .....	23 -
1.6.1.	Η δομή του Super-Frame στο DSME .....	24 -
1.6.2.	Enhanced Beacons - EBs .....	26 -
1.6.3.	Διαφοροποίηση των καναλιών (channel diversity).....	27
1.6.4.	Ομαδική Επιβεβαίωση (Group ACK).....	29
1.6.5.	Διαχείριση του DSME-GTS .....	29
1.6.6.	Διαφορές του DSME και του TSCH.....	30 -
2	Ανοιχτά Θέματα του πρωτοκόλλου 802.15.4 DSME .....	32 -
2.1.	Οι επιλεκτικοί αλγόριθμοι καθορισμού χρονοθυρίδων (sophisticated slot scheduling mechanisms).....	32 -
2.1.1.	Χρονοπρογραμματισμός με κεντροποιημένες τεχνικές διαχείρισης .....	33 -
2.1.2.	Χρονοπρογραμματισμός με αποκεντρωμένη διαχείριση βάσει της κίνησης..	34 -
2.2.	Ο χρονοπρογραμματισμός του EB στα δίκτυα DSME (Enhanced Beacon Scheduling of IEEE 802.15.4 DSME) .....	35 -
2.3.	Η λειτουργία με αναπήδηση και η διατήρηση των χρονοθυρίδων (multi-hop communication and scheduling scheme) .....	38
2.4.	Η Διαχείριση των Χρονοθυρίδων (Slot Management in DSME).....	39
2.5.	Οι χρονικές περίοδοι ανενεργότητας (sleep periods in multi-superframe structure of DSME) .....	39
2.6.	Η απομάκρυνση των δεσμευμένων χρονοθυρίδων (Removing Occupied Slots from SAB).....	39
2.7.	Ατέρμονη φραγή των χρονοθυρίδων (Eternal Blocking of Slots) .....	40 -
2.8.	Αργοποιημένη απομάκρυνση μη Έγκυρων Χρονοθυρίδων (Late Removal of Invalid Slots).....	41
-		
2.9.	Η διαδικασία συσχέτισης των συσκευών στο DSME (Association Procedure in DSME) .....	41 -
2.10.	Η ανάγκη δημιουργίας αλγορίθμων για τη βελτίωση του QoS στο DSME (DSME QoS Improvement).....	41 -
3	Προτεινόμενες Τεχνικές Επίλυσης των Ανοιχτών Θεμάτων του 802.15.4 DSME ..	42 -

3.1.	Ανοικτά Θέματα του προτύπου DSME .....	- 42 -
3.2.	Μελέτη αλγορίθμων για τον χειρισμό των χρονοθυρίδων.....	- 43 -
3.3.	Χρονοπρογραμματισμός του ΕΒ .....	- 44 -
3.4.	Η επίδραση της αναπήδησης στη διατήρηση των χρονοθυρίδων.....	- 45 -
3.5.	Η επίδραση των περιόδων ανενεργότητας στη διατήρηση των χρονοθυρίδων	- 45 -
3.6.	Προβλήματα στην αποδέσμευση των χρονοθυρίδων .....	- 45 -
3.7.	Η διαδικασία συσχέτισης των συσκευών.....	- 46 -
3.8.	Αλγόριθμοι για τη βελτίωση του QoS .....	- 46 -
3.9.	Η βελτίωση της κινητικότητας των χρηστών .....	47
4	Γενικά Συμπεράσματα και Περιοχές για περαιτέρω έρευνα .....	48
4.1.	Γενικά Συμπεράσματα .....	48
4.2.	Περιοχές για περαιτέρω έρευνα .....	- 51 -
	Βιβλιογραφία.....	- 54 -

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Η δομή των καναλιών στη ζώνη ISM.....	16
Σχήμα 2: Γενική Μορφή του Πλαισίου MAC .....	18
Σχήμα 3: Τοπολογίες και επικοινωνία με χρήση του πρωτοκόλλου 802.15.4. ....	19
Σχήμα 4: Υπηρεσίες ασφαλείας και πιθανοί τύποι επειθέσεων κατευθυνόμενοι στα διαφορετικά επίπεδα της διαστρωματώσης .....	21
Σχήμα 5: Δομή του Υπερπλαισίου (SuperFrame) στο πρότυπο IEEE 802.15.4 .....	23
Σχήμα 6: Τυπική χρήση του DSME σε .....	25
Σχήμα 7: Δομή του DSME υπερπλαισίου (super-frame) .....	25
Σχήμα 8: Δομή του πολλαπλού υπερπλαισίου με ενεργοποίηση του μειωμένου CAP .....	26
Σχήμα 9: Χρησιμοποίηση των καναλιών του DSME-GTS με χρήση της τεχνικής Προσαρμογής Καναλιού.....	28
Σχήμα 10: Χρησιμοποίηση των καναλιών του DSME-GTS με χρήση της λειτουργίας Αναπήδησης Καναλιού .....	29
Σχήμα 11: Σχηματισμός διασύνδεσης του δικτύου με χρήση του DSME .....	31
Σχήμα 12: Σχηματισμός διασύνδεσης του δικτύου με χρήση του TSCH .....	31
Σχήμα 13: Η διαδικασία αποφυγής της σύγκρουσης Beacon στο DSME .....	37
Σχήμα 14: Πειραματικά αποτελέσματα για τη σύγκρουση beacon .....	38
Σχήμα 15: Περίπτωση όπου μία θυρίδα θα εκχωρηθεί λανθασμένα από το SAB .....	40

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ζώνες Συχνότητων και Ρυθμοί <b>Μετάδοσης</b> -----	16
Πίνακας 2: Πρωτόκολλα κεντριοποιημένου χρονοπρογραμματισμού θυρίδων-----	33
Πίνακας 3: Πρωτόκολλα αποκεντρωμένου χρονοπρογραμματισμού θυρίδων-----	35



## Λίστα Συντμήσεων

ACT	Allocation Counter Table
ASDA	Adaptive SD Allocation
ASK	Amplitude Shift Keying
BI	Beacon Interval
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CAP	Contention Access Period
CCA	Clear Channel Assessment
CFP	Collision Free Period
CSMA-CA	Carrier Sense for Multiple Access Collision Avoidance
DFBS	Distributed Fast Beacon Scheduling
DNSI	Distributed Neighboring Slot Incrementer
DoS	Denial of Service
DRAND	Distributed Randomized
DSME	Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension
D-DSME	Distributed DSME
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EB	Enhanced Beacon
EFastA	Enhanced Fast Association
FastA	Fast Association
FFD	Full Function Device
GTS	Guaranteed Time Slots
ILP	Integer Linear Programming
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical Zone
LAN	Local Area Network
LIFS	Long Interface Spacing
LLDN	Low Latency Deterministic Network
LLPN	Link Limited Permission Notification
LQI	Link Quality Indicator
MAC	Medium Access Control Layer
MANET	Mobile Ad-hoc Networks
MD	Multi-superframe Duration
MPDU	MAC Protocol Data Unit
O-QPSK	Orthogonal Quadratic Phase Shift Keying
OSI	Open System Interconnection model
PAN	Personal Area Network
PANC	PAN Coordinator
PDR	Packet Delivery Ratio
PHY	Physical Layer
QoS	Quality of Service
RF	Radio Frequency
RFD	Reduced Function Device
RINSD	Representative Indicator of Neighbor Superframe Duration
SAB	Slot Allocation Bitmap
SD	SuperFrame Duration
SF1	Scheduling Function One
SFX	Experimental Scheduling Function

SIFS	Short Interface Spacing
TDM	Time Division Multiplexing
TSCH	Time Slotted Channel Hopping
WiFi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless LAN
WPAN	Wireless Personal Area Networks
WSAN	Wireless Sensor Area Network
WSN	Wireless Sensors Networks

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή παρουσιάζει το πρότυπο DSME, ως βάση εξέλιξης των αρχικών προτύπων IEEE 802.15.4/e, που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση και τη μετάδοση/λήψη στα ασύρματα δίκτυα. Η εργασία μετά από μία σύντομη, εισαγωγική παρουσίαση των αρχών λειτουργίας και των χαρακτηριστικών του DSME, επικεντρώνεται στα ανοικτά θέματα που σχετίζονται με το πρότυπο. Τα θέματα αυτά έχουν εντοπιστεί και μελετηθεί εκτενώς στην ερευνητική βιβλιογραφία μέσω των μελετών και των προσομοιώσεων των μηχανισμών του προτύπου DSME σε πραγματικά δίκτυα.

Η εργασία είναι οργανωμένη σε τμήματα, παρουσιάζοντας τα ακόλουθα θέματα: Η εργασία περιγράφει τις βασικές αρχές λειτουργίας ενός ασύρματου δικτύου, επικεντρώνοντας στα πρωτόκολλα 802.15.4/e και στην εξέλιξή τους που είναι το πρότυπο DSME. Το συγκεκριμένο πρότυπο δημιουργήθηκε, με στόχο να καλύψει τα ανοικτά θέματα από τις προηγούμενες μεθόδους, συμβάλλοντας στη βελτίωση των χαρακτηριστικών ποιότητας του ασύρματου δικτύου (Quality of Service). Στη συνέχεια αναφέρονται τα ανοικτά θέματα καθώς και οι δυσλειτουργίες κατά την εφαρμογή του προτύπου DSME (deadlocks). Οι δυσλειτουργίες έχουν μελετηθεί μέσω σημαντικών ερευνητικών εργασιών, εντοπίζοντας τους μηχανισμούς από τους οποίους προκύπτουν. Κατόπιν αποτυπώνονται προτάσεις για πιθανές λύσεις κατόπιν παρουσιάζει τις προτάσεις για πιθανές λύσεις στα ανοικτά θέματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι προσεγγίσεις για την επίλυση των ανοικτών θεμάτων ποικίλλουν, ξεκινώντας από προτάσεις για την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων μέχρι την προσθήκη απλών διορθωτικών μηχανισμών που χρησιμοποιούν τις ήδη προβλεπόμενες δομές του προτύπου DSME. Ακολούθως διατυπώνονται τα γενικά συμπεράσματα από τη μελέτη των ανοικτών θεμάτων και των μηχανισμών διόρθωσης/βελτίωσης. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση των τομέων έρευνας που αναμένεται να συμβάλουν σημαντικά στη βελτίωση του προτύπου DSME.

Το πρότυπο DSME, αποτελεί ένα σύνθετο μηχανισμό που χρησιμοποιείται στα ασύρματα δίκτυα για την εγκατάσταση και τον έλεγχο των συνδέσεων των ασύρματων συσκευών. Η πολυπλοκότητα του προτύπου συμβάλλει επίσης κατά ένα σημαντικό παράγοντα σε ορισμένα από τα ανοικτά θέματα και τις δυσλειτουργίες/μείωση επιδόσεων που έχουν παρατηρηθεί. Οι ερευνητές συγκλίνουν στην άποψη ότι το πρότυπο χρειάζεται συμπλήρωση και επέκταση σε ορισμένους από τους μηχανισμούς του. Οι προτεινόμενες ερευνητικές μελέτες συνιστούν την επέκταση του προτύπου με την προσθήκη νέων μηχανισμών και αλγορίθμων διαχείρισης.

### Λέξεις κλειδιά

Ασύρματα δίκτυα, δίκτυα αισθητήρων, κεντριοποιημένες και αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές, δίκτυα πολλαπλών κόμβων αναπήδησης, διαστρωμάτωση κατά OSI, στρώμα μέσου, αλγόριθμοι αποφυγής σύγκρουσης, φάροι μετάδοσης, καθυστέρηση μετάδοσης, δείκτες ποιότητας (Quality of Service)

## **Abstract**

The Current master thesis presents the which DSME standard, as a basis for the evolution of the original IEEE 802.15.4/e standards, used for connection and transmission/reception in wireless networks. After a short, introductory presentation of the basic principles and features of DSME, the thesis focuses on the open issues related to the standard. These issues have been identified and studied extensively in the research literature through the studies and simulations of the mechanisms of the DSME standard in real networks.

Thesis is organized into sections, presenting the following topics: The work describes the basic principles of a wireless network, focusing on the 802.15.4/e protocols and their evolution which is the DSME standard are described. The Current standard was created in order to cover open issues from previous realizations, contributing to the improvement of the quality metrics of the wireless network (Quality of Service). Then the open issues as well as malfunctions in the operation and application of the DSME standard (deadlocks). Malfunctions have been studied through significant research work, identifying the mechanisms from which open issues arise. It then presents the proposals for possible solutions to the open issues presented in the previous chapter. Approaches for solving the open issues vary from proposals for the development of new algorithms, up to simple correction mechanisms that use the already provided structures of the DSME standard. Following are the general conclusions from the study of open issues and correction mechanisms. The work concludes by presenting the areas of research that are expected to have a significant contribution on the improvement of the DSME standard.

DSME is a complex mechanism used in wireless networks to establish and control transmit/receive connections. The complexity of the standard is also a major contributor to some of the open issues and malfunctions that degrade performance. Researchers agree that current standards need to be supplemented and expanded on some of its mechanisms. The proposed research studies recommend the extension of the standard by adding new management mechanisms and algorithms.

### **Key words**

Wireless networks, sensor networks, centralized and decentralized architectures, multi-hop networks, OSI layering, MAC medium layer, collision avoidance algorithms, transmission of beacons, transmission delay, network quality metrics (Quality of Service)

# 1

## Εισαγωγή

### **1.1. Τα ασύρματα Δίκτυα ειδικού σκοπού (*ad hoc*) και η χρήση τους για τη διασύνδεση και μετάδοση δεδομένων**

Τα ασύρματα *ad hoc* δίκτυα είναι μια κατηγορία ασύρματων δικτύων που χρησιμοποιούν αναμετάδοση πολλαπλών αναπηδήσεων (*multi-hop*) των πακέτων δεδομένων των χρηστών τους. Τα δίκτυα αυτά είναι ικανά να λειτουργούν χωρίς καμία υποστήριξη υποδομής (*infrastructure support*) και με αυτοματοποιημένο και αλγοριθμικό τρόπο. Τέτοια δίκτυα σχηματίζονται από έναν αριθμό συσκευών, οι οποίες μπορεί να είναι και ετερογενείς μεταξύ τους, αρκεί να εμφανίζουν δυνατότητες ασύρματης επικοινωνίας. Τα δίκτυα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα για δυναμική σύνδεση και αποσύνδεση των συσκευών στο χρόνο. Επιπλέον, ορισμένες ή όλες από αυτές τις συσκευές, μπορεί να είναι κινητές, αλλάζοντας συχνά τη θέση τους. Αυτό επιτρέπει τη δυνατότητα να δημιουργούν *ad hoc* δίκτυα με κινητούς κόμβους. Τα τελευταία δίκτυα συχνά αναφέρονται ως δίκτυα *ad hoc* για κινητές συσκευές ή *MANET* (*Mobile Ad-hoc Networks*). Ακόμα και χωρίς την υποστήριξη κινητικότητας στους κόμβους, οι συσκευές θα πρέπει να μπορούν να ενταχθούν και/ή να αποσυνδεθούν από ένα *ad hoc* δίκτυο κατά βούληση και δυναμικά στο χρόνο. Τέτοια δίκτυα θα πρέπει να διαθέτουν αυτοοργάνωση για τον καθορισμό της δυνατότητας πρόσβασης στα μέσα, και ικανότητα δρομολόγησης καθώς και άλλων λειτουργιών δικτύωσης. Η δυνατότητα της *ad-hoc* δικτύωσης περιλαμβάνει διάφορες εφαρμογές όπως κινητές, συνεργατικές και κατανεμημένες στη χρήση υπολογιστών. Επιπλέον τα δίκτυα αυτά θα πρέπει να επιτρέπουν κινητή πρόσβαση στο Διαδίκτυο, χρήση ασύρματων δικτύων πλέγματος (*mesh-networks*), εφαρμογές έκτακτης ανάγκης κ.α.

Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη τέτοιου τύπου δικτύων παρουσιάζει μια σειρά από προκλήσεις που δεν έχουν ακόμη εντοπιστεί πλήρως, ή έχουν παρουσιαστεί σε μάλλον διαφορετικές μορφές, στα παραδοσιακά ενσύρματα δίκτυα, και αφορούν σε θέματα όπως [1]:

- Αυτο-οργάνωση (*self-organization*), δεδομένου ότι οι μεμονωμένοι κόμβοι σε ένα *ad hoc* δίκτυο πρέπει να μπορούν να συνδέονται και να αποσυνδέονται από το δίκτυο κατά βούληση και χωρίς καμία σταθερή υποδομή. Για το λόγο αυτό απαιτούνται πρωτόκολλα που μπορούν να υποστηρίξουν και να διευκολύνουν τη διασύνδεση υποδομής στην τοπολογία, την επαναδιαμόρφωση, και τη συντήρηση της δυναμικής της λειτουργίας του δικτύου, καθώς και τη δυναμική δρομολόγηση, την παρακολούθηση κυκλοφορίας και τον έλεγχο της διασύνδεσης.

- Η επεκτασιμότητα (scalability) του δικτύου αναφέρεται στην ικανότητά του να διατηρεί ορισμένες παραμέτρους απόδοσης ανεξάρτητα από μεγάλες αλλαγές στον αριθμό των κόμβων που αναπτύσσονται σε αυτό το δίκτυο. Αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πλήθος των γενικών κόμβων εξόδου σε διάφορα επίπεδα της διαστρωμάτωσης των πρωτοκόλλων (φυσικό, έλεγχο πρόσβασης, πρωτόκολλα δικτύωσης/δρομολόγησης και μεταφοράς) καθώς και της χρησιμοποιούμενης στοίβας του δικτύου.
- Η καθυστέρηση (delay) είναι μία κρίσιμη παράμετρος για ορισμένους τύπους εφαρμογών, όπως οι εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης. Χαμηλές καθυστερήσεις μπορεί να επιτευχθούν με δέσμευση εύρους ζώνης (bandwidth), με χρονοπρογραμματισμό ή μέσω κάποιου είδους ελέγχου μετάδοσης και διασύνδεσης στο δίκτυο. Οι δύο τελευταίοι μηχανισμοί απαιτούν την παρουσία ενός ελεγκτή ή συντονιστή για την παρακολούθηση και την πρόληψη της συμφόρησης του δικτύου (network congestion).
- Η ρυθμοαπόδοση (throughput) είναι ο πιο σημαντικός στόχος επίδοσης σε μια σειρά συνεργατικών, και κατανεμημένων υπολογιστικά εφαρμογών με πρόσβαση στο Διαδίκτυο (Internet) μέσω κινητών συσκευών. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει σημαντικό όγκο δεδομένων πολυμέσων. Στο φυσικό επίπεδο (PHY Layer), η απόδοση μπορεί να μειωθεί από τα σφάλματα μετάδοσης πακέτων που προκαλούνται από θόρυβο και παρεμβολές. Στο επίπεδο διασύνδεσης μέσου (MAC-Medium Access Control Layer), η απόδοση μπορεί να μειωθεί από συγκρούσεις, εάν χρησιμοποιείται ένας μηχανισμός πρόσβασης κοινού μέσου που βασίζεται σε μη δίκαιο διαμοιρασμό, ή εάν το εύρος ζώνης χρησιμοποιεί μηχανισμό πρόσβασης βάσει κρατήσεων ή χρονοπρογραμματισμού. Η Βελτιστοποίηση πολλαπλών επιπέδων μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα διακίνησης δεδομένων.
- Απώλειες πακέτων και δεδομένων (data and packet loss). Η απώλεια πληροφοριών δεν είναι ανεκτή σε ad hoc δίκτυα και πρέπει να ληφθούν ενεργά μέτρα για την αποκατάσταση της αξιοπιστίας της μεταφοράς των δεδομένων (τόσο στο επίπεδο MAC όσο και στα ανώτερα στρώματα).
- Η δικαιοσύνη (fairness) στη μετάδοση/λήψη μεταξύ διαφορετικών κόμβων, εφαρμογών, ή/και χρηστών είναι επίσης εξαιρετικά σημαντική.
- Η διαχείριση ισχύος (power management) είναι σημαντική όταν οι κόμβοι λειτουργούν με ισχύ από αυτόνομους συσσωρευτές (μπαταρίες).
- Τέλος, όλες οι εργασίες συντήρησης σε ad hoc δίκτυα θα πρέπει να είναι αυτοματοποιημένες ή (στη χειρότερη περίπτωση) αρκετά απλές για μη εξειδικευμένους χειριστές.

## **1.2. Η αρχιτεκτονική του 802.15.4**

Οι συσκευές που προορίζονται για χρήση του πρωτοκόλλου 802.15.4 έχουν σχεδιαστεί για να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω ενός εννοιολογικά απλού ασύρματου δικτύου. Ο ορισμός των επιπέδων (διαστρωμάτωση στοίβας) δικτύου, βασίζεται στο μοντέλο OSI (Open System Interconnection model). Αν και μόνο τα κατώτερα επίπεδα ορίζονται στο συγκεκριμένο πρότυπο, η αλληλεπίδραση με τα ανώτερα στρώματα προορίζεται, πιθανώς για χρήση ενός υποστρώματος ελέγχου λογικού συνδέσμου IEEE 802.2 που έχει πρόσβαση στο MAC μέσω ενός υποστρώματος σύγκλισης (Convergence Sublayer). Οι υλοποιήσεις μπορεί να βασίζονται σε εξωτερικές συσκευές ή να είναι καθαρά ενσωματωμένες σε αυτό-λειτουργικές συσκευές.

Από την έναρξή της εφαρμογής της, η τεχνολογία 802.15.4, προοριζόταν να είναι ο βασικός παράγοντας για χαμηλή πολυπλοκότητα, με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος και

χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων ασύρματης συνδεσιμότητας μεταξύ σταθερών, φορητών και κινητών συσκευών (IEEE 2006). Επομένως, το πρωτόκολλο αυτό είναι ένας ιδανικός υποψήφιος για την υλοποίηση ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής (Wireless Personal Area Networks - WPAN), χαμηλής ταχύτητας δεδομένων καθώς και ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensors Networks – WSNs). Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας 802.15.4 παρουσιάζονται στις ενότητες που ακολουθούν.

### 1.2.1. Το φυσικό στρώμα (PHY Layer)

Για την υλοποίηση του φυσικού επιπέδου (PHY Layer) της στοίβας πρωτοκόλλου 802.15.4 χρησιμοποιούνται τρεις ζώνες RF ραδιοσυχνοτήτων: 868 έως 868.6 MHz, 902 έως 928 MHz και 2400 έως 2483.5 MHz. Αυτές αναφέρονται ονομαστικά ως ζώνες 868, 915 και 2450 MHz, αντίστοιχα. Η τελευταία δέσμη συχνοτήτων είναι κοινώς γνωστή ως Industrial, Scientific and Medical (ISM) ζώνη. Δεδομένου ότι η ζώνη αυτή δεν απαιτεί άδεια χρήσης, χρησιμοποιείται από μια σειρά διαφορετικών τεχνολογιών επικοινωνίας συμπεριλαμβανομένων και των παραλλαγών b και g του ασύρματου LAN 802.11 (γνωστό και ως Wireless Fidelity Wi-Fi). Επίσης, τη ζώνη αυτή χρησιμοποιούν διάφορα πρότυπα WPAN όπως το 802.15.1 (Bluetooth), το 802.15.3, αλλά και άλλες συσκευές. Αν και η δυνατότητα λειτουργίας σε αυτήν τη συχνοτική ζώνη χωρίς άδεια είναι σίγουρα ελκυστική, η χρήση πολλών συσκευών διαφορετικών τεχνολογιών σε αυτήν τη ζώνη αυξάνει τα επίπεδα θορύβου και παρεμβολών κατά τη λειτουργία τους.

Στο αρχικό πρότυπο (IEEE 2003b), χρησιμοποιήθηκαν ζώνες συχνοτήτων στα 868 και 915 MHz (με διαμορφώσεις εξαπλωμένου φάσματος - Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS Modulations) με συγκριτικά χαμηλό ρυθμό τεμαχισμού (chip) και δυαδική διαμόρφωση φάσης (Binary Phase Shift Keying - BPSK). Η διαμόρφωση αυτή οδήγησε σε μέγιστους εφικτούς ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 20 kbps και 40 kbps αντίστοιχα. Σε αυτήν την περίπτωση, κάθε δυαδικό ψηφίο (bit) δεδομένων αντιπροσωπεύει μία διαμόρφωση σύμβολο το οποίο «απλώνεται» περαιτέρω με την ακολουθία τεμαχισμού. Στη ζώνη ISM (2450 MHz), μια διαμόρφωση ορθογωνικής μετατόπισης φάσης (Orthogonal Quadratic Phase Shift Keying O-QPSK), στην οποία τέσσερα δεδομένα bit συνιστούν ένα σύμβολο διαμόρφωσης, το οποίο εξαπλώνεται περαιτέρω με την ακολουθία τεμαχισμού των 32 bits. Ως αποτέλεσμα, ο μέγιστος ρυθμός μη επεξεργασμένων δεδομένων με αυτήν τη διαμόρφωση φτάνει τα 250 kbps.

Οι πραγματικοί τύποι του φάσματος εξάπλωσης και οι τεχνικές διαμόρφωσης, και οι προκύπτοντες ρυθμοί δεδομένων, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Ζώνες Συχνοτήτων και Ρυθμοί Μετάδοσης

PHY option	Frequency (MHz)	Type of modulation	Bit rate (kbps)	Symbol rate (ksymbols/s)
868/915	868-868.6	BPSK	20	20
	902-928	BPSK	40	40
868/915 (2006)	868-868.6	ASK	250	12.5
	902-928	ASK	250	50
868/915 (2006)	868-868.6	O-QPSK	100	50
	902-928	O-QPSK	250	62.5
2450	2400-2483.5	O-QPSK	250	62.5

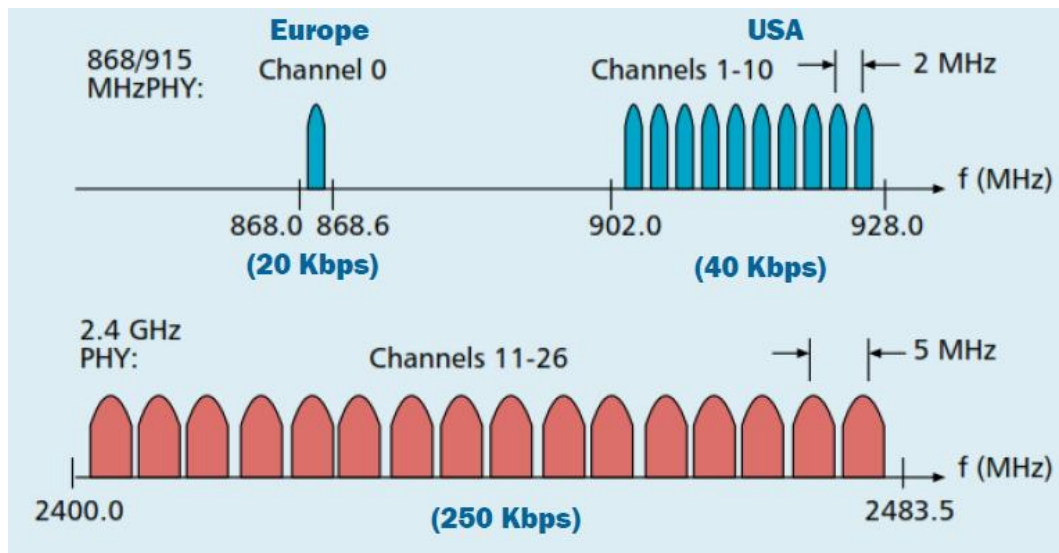
*Note:* PHY specifications from the 2006 standard (IEEE 2006) are optional.

Στο αναθεωρημένο πρότυπο (IEEE 2006), πρόσθετοι συνδυασμοί εξαπλωμένου φάσματος και επιπλέον τεχνικές διαμόρφωσης εισήχθησαν για να επιτρέψουν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων έως και 250 kbps στις χαμηλότερες ζώνες RF.

Το αρχικό πρότυπο χωρίζει το διαθέσιμο φάσμα σε τρεις ζώνες και σε ένα σύνολο 27 καναλιών:

- Το κανάλι 0, τοποθετείται στη συχνότητα 868.3 MHz.
- Τα κανάλια  $k = 1 - 10$ , τοποθετήθηκαν στις συχνότητες  $906 + 2(k - 1)$  MHz
- Τέλος τα κανάλια  $k = 11 - 26$  τοποθετήθηκαν στη ζώνη ISM, στις συχνότητες  $2405 + 5(k - 11)$  MHz.

Η τοποθέτηση των καναλιών στη ζώνη ISM παρουσιάζεται στο σχήμα 1:



Σχήμα 1: Η δομή των καναλιών στη ζώνη ISM

Κάθε συσκευή πρέπει να υποστηρίζει τουλάχιστον μία επιλογή φυσικού στρώματος (PHY Layer) και πρέπει να υποστηρίζει όλα τα κανάλια που ορίστηκαν για την υποστηριζόμενη επιλογή. Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές, μπορεί να μην επιτρέπεται η χρήση όλων των καναλιών του φυσικού στρώματος που ορίστηκαν στο πρότυπο.



Με πρόσθετες επιλογές φάσματος εξάπλωσης και διαμόρφωσης που εισάγονται στο αναθεωρημένο πρότυπο (IEEE 2006), εισήχθη η έννοια των σελίδων καναλιού (pages). Σε αυτή τη ρύθμιση ορίζετε ένα σύνολο από 32 σελίδες καναλιών ως:

- Η σελίδα 0 περιέχει τα 27 κανάλια από το αρχικό πρότυπο.
- Η σελίδα 1 περιέχει 11 κανάλια (0 έως 10) στις συχνότητες 868/915 του PHY Layer με διαμόρφωση Amplitude Shift Keying - ASK
- η σελίδα 2 περιέχει 11 κανάλια (0 έως 10) στις συχνότητες 868/915 του PHY με διαμόρφωση O-QPSK
- Οι σελίδες 3 έως 31, καθώς και τα κανάλια με υψηλότερο αριθμό (11 έως 26) στις σελίδες 1 και 2, προορίζονται για μελλοντική χρήση.

Οι ελάχιστες τιμές για το μεγάλο και μικρό διάστημα χρονικής απόστασης (time gap) μεταξύ των πλαισίων (Long & Short Interface Spacing – LIFS, SIFS αντίστοιχα) καθορίζονται σε 40 και 12 περιόδους συμβόλων, αντίστοιχα, για όλες τις επιλογές PHY Layer που καθορίστηκαν. Το επίπεδο φυσικού στρώματος μπορεί να χειριστεί μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου (δηλαδή πακέτα) με ωφέλιμο φορτίο έως και 127 bytes. Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση του υποσυστήματος από εκπομπή (Tx) σε λήψη (Rx) ή το αντίστροφο, δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή της παραμέτρου aTurnaroundTime, με προεπιλεγμένη τιμή στα 12 σύμβολα.

Το πρότυπο περιέχει άλλες κοινές παραμέτρους, όπως τη δυνατότητα ρύθμισης της ισχύος εκπομπής, την ικανότητα μέτρησης της ισχύος ή/και της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος για κάθε πακέτο (μέσω του λεγόμενου Δείκτη Ποιότητας Συνδέσμου ή Link Quality Indicator - LQI) και τη δυνατότητα ελέγχου για τη δραστηριότητα στο μέσο. Αυτή η τελευταία δυνατότητα, γνωστή ως Εκκαθάριση αξιολόγησης καναλιού ή Clear Channel Assessment - CCA, χρησιμοποιείται για την καθοδήγηση της συμπεριφοράς και των δύο εκδόσεων του αλγορίθμου CSMA-CA (Carrier Sense for Multiple Access Collision Avoidance). Η CCA μπορεί να εκτιμηθεί με έναν από τους παρακατω τρεις τρόπους:

- Στη λειτουργία 1 (Mode 1), ο δέκτης μετρά τη λαμβανόμενη ισχύ και αναφέρει ότι το κανάλι είναι απασχολημένο εάν αυτή η ισχύς υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο.
- Στη λειτουργία 2 (Mode 2), ο δέκτης αναφέρει ότι το κανάλι είναι απασχολημένο εάν μπορεί να εντοπίσει ένα σήμα φέροντος (carrier) που χρησιμοποιεί τα ίδια χαρακτηριστικά διαμόρφωσης και εξάπλωσης με την επιλογή PHY που χρησιμοποιείται από τη δική του συσκευή, ανεξάρτητα από το ενεργειακό της επίπεδο.
- Στη λειτουργία 3 (Mode 3), το μέσο θεωρείται κατειλημμένο εάν ένας συνδυασμός έγκυρου σήματος φέροντος με ισχύ πάνω από το προκαθορισμένο επίπεδο. Ο κανόνας απόφασης αυτών των δύο συνθηκών μπορεί να είναι λογικό ΚΑΙ ή λογικό Ή των συνθηκών μεταξύ τους.

Ανεξάρτητα από την επιλεγμένη λειτουργία του CCA, ο χρόνος ανίχνευσης είναι ίσος με 8 περιόδους συμβόλων.

### **1.2.2. Το στρώμα πρόσβασης μέσου (MAC Layer)**

Το επίπεδο στρώμα ελέγχου πρόσβασης μέσου (Medium Access Control – MAC Layer) επιτρέπει τη μετάδοση πλαισίων MAC, μέσω της χρήσης του φυσικού καναλιού. Εκτός από την υπηρεσία δεδομένων, προσφέρει μια διεπαφή διαχείρισης η οποία διαχειρίζεται την πρόσβαση στο φυσικό κανάλι και στο δίκτυο. Ελέγχει επίσης την επικύρωση των πλαισίων,

εγγυάται τις χρονικές θέσεις και χειρίζεται συσχετίσεις κόμβων. Τέλος, προσφέρει hook points (σημεία διασύνδεσης) για ασφαλείς υπηρεσίες.

Το πρότυπο IEEE 802.15 δεν βασίζεται στα 802.1D ή 802.1Q, δηλαδή δεν ανταλλάσσει τυπικά πλαίσια Ethernet. Η φυσική μορφή του πλαισίου καθορίζεται στο IEEE 802.15.4-2011 [2]. Το πρότυπο είναι προσαρμοσμένο στο γεγονός ότι οι περισσότερες συσκευές που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 PHY, υποστηρίζουν μόνο πλαίσια έως 127 bytes (τα πρωτόκολλα επιπέδου προσαρμογής όπως το 6LoWPAN του IETF παρέχουν σχήματα κατακερματισμού – segmentation για την υποστήριξη μεγαλύτερων πακέτων που απαιτούνται από το επίπεδο δικτύου).

Το στρώμα MAC χειρίζεται όλη την πρόσβαση στο φυσικό κανάλι και είναι υπεύθυνο για τις ακόλουθες διεργασίες:

- Δημιουργία φάρων δικτύου (network beacons) εάν η συσκευή είναι συντονιστής (coordinator)
- Συγχρονισμό με φάρους δικτύου
- Υποστήριξη σύνδεσης και αποσύνδεσης στο PAN
- Υποστήριξη ασφαλούς λειτουργίας της συσκευής
- Χρήση του μηχανισμού CSMA-CA για πρόσβαση στα κανάλια
- Χειρισμό και συντήρηση του μηχανισμού GTS (Guaranteed Time Slots)
- Παροχή αξιόπιστης σύνδεσης μεταξύ δύο ομότιμων οντοτήτων MAC

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μορφή του πλαισίου MAC (MAC Protocol Data Unit - MPDU). Τα πλαίσια στο στρώμα MAC περιγράφονται ως μια ακολουθία πεδίων με συγκεκριμένη σειρά. Όλες οι μορφές πλαισίων απεικονίζονται με τη σειρά με την οποία μεταδίδονται από το φυσικό στρώμα, από αριστερά προς τα δεξιά, όπου το πιο αριστερό bit μεταδίδεται πρώτο στο χρόνο. Τα bits σε κάθε πεδίο αριθμούνται από το 0 (αριστερό και λιγότερο σημαντικό ψηφίο) έως  $k - 1$  (δεξιό και περισσότερο σημαντικό ψηφίο), όπου το μήκος του πεδίου είναι  $k$  bits. Πεδία που είναι μεγαλύτερα από μία οκτάδα (byte) αποστέλλονται στο PHY με τη σειρά από την οκτάδα που περιέχει τα χαμηλότερα αριθμημένα bit προς την οκτάδα που περιέχει τα υψηλότερα αριθμημένα bit.

Η γενική μορφή του πλαισίου MAC παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί:

Octets: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	0/5/6/10/14	variable	2
Frame Control	Sequence Number	Destination PAN Identifier	Destination Address	Source PAN Identifier	Source Address	Auxiliary Security Header	Frame Payload	FCS
Addressing fields								
MHR							MAC Payload	MFR

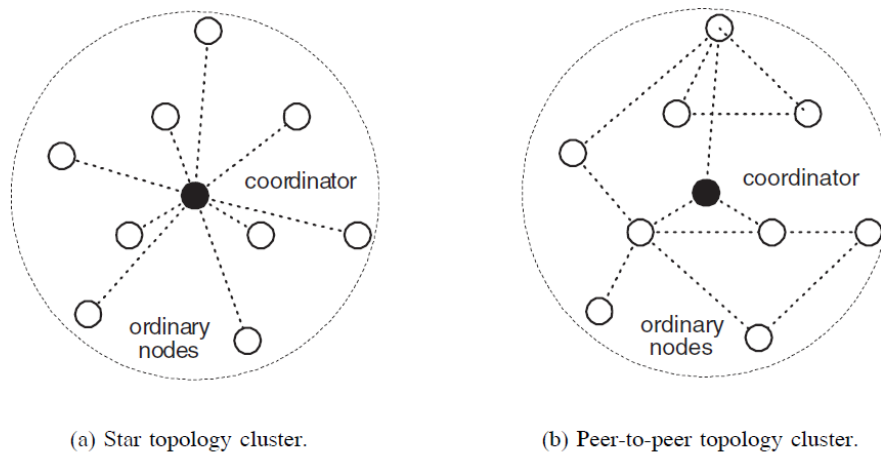
Σχήμα 2: Γενική Μορφή του Πλαισίου MAC

### 1.2.3. Ανώτερα Στρώματα

Το πρότυπο δεν ορίζει στρώματα υψηλότερου επιπέδου ούτε άλλα υποστρώματα διαλειτουργικότητας.

### 1.3. Τοπολογία και Μοντέλα Δικτύου

Σε ένα WPAN δίκτυο το οποίο είναι συμβατό με το πρότυπο IEEE 802.15.4, μια συσκευή ελεγκτής που συνήθως αναφέρεται ως ο συντονιστής (coordinator) του PAN, δημιουργεί ένα προσωπικό δίκτυο ή σύμπλεγμα περιοχής με άλλες συσκευές ή κόμβους μέσα σε ένα μικρό φυσικό χώρο γνωστό ως «ο προσωπικός χώρος λειτουργίας» (Personal Area). Υποστηρίζονται Δύο τοπολογίες για τη διασύνδεση των συσκευών. Στην τοπολογία αστέρα (star topology) που παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, όλες οι επικοινωνίες μεταξύ των συσκευών, πρέπει να διέλθουν από τον συντονιστή PAN. Στην τοπολογία peer-to-peer (ομοτίμων οντοτήτων), οι συνηθισμένες συσκευές μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους άμεσα (εφόσον βρίσκονται εντός της φυσικής εμβέλειας μεταξύ τους) ή/και με το συντονιστή του σχήματος.



Σχήμα 3: Τοπολογίες και επικοινωνία με χρήση του πρωτοκόλλου 802.15.4.

Προκειμένου να φιλοξενηθούν συσκευές υλικού (hardware) με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας, το πρότυπο διακρίνει δύο τύπους συσκευών που μπορούν να συμμετέχουν σε δίκτυα 802.15.4. Μια συσκευή πλήρους λειτουργίας (Full Function Device - FFD) είναι ικανή να ενεργεί ως συντονιστής στο PAN, συντονιστής στο cluster (σχηματισμό), ή ως μια συνηθισμένη συσκευή (τερματικό). Από την άλλη πλευρά, μια συσκευή μειωμένης λειτουργίας (Reduced Function Device - RFD) μπορεί να λειτουργεί ως μία συνηθισμένη συσκευή αλλά όχι ως συντονιστής οποιουδήποτε τύπου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μία συσκευή FFD να μπορεί να επικοινωνήσει με οποιαδήποτε συσκευή του δικτύου, είτε αυτή είναι RFD είτε FFD, ενώ μία συσκευή RFD μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με μία συσκευή FFD. Στην πραγματικότητα, μία συσκευή RFD μπορεί να συσχετιστεί μόνο με ένα FFD σε μια στιγμή. Η χρήση συσκευών τύπου RFD τυπικά περιορίζεται σε απλά σενάρια εφαρμογών, στα οποία οι μεμονωμένοι κόμβοι διαθέτουν βασική ικανότητα επικοινωνίας αλλά μικρή υπολογιστική ικανότητα.

### 1.4. Αξιοπιστία και Ασφάλεια του πρωτοκόλλου

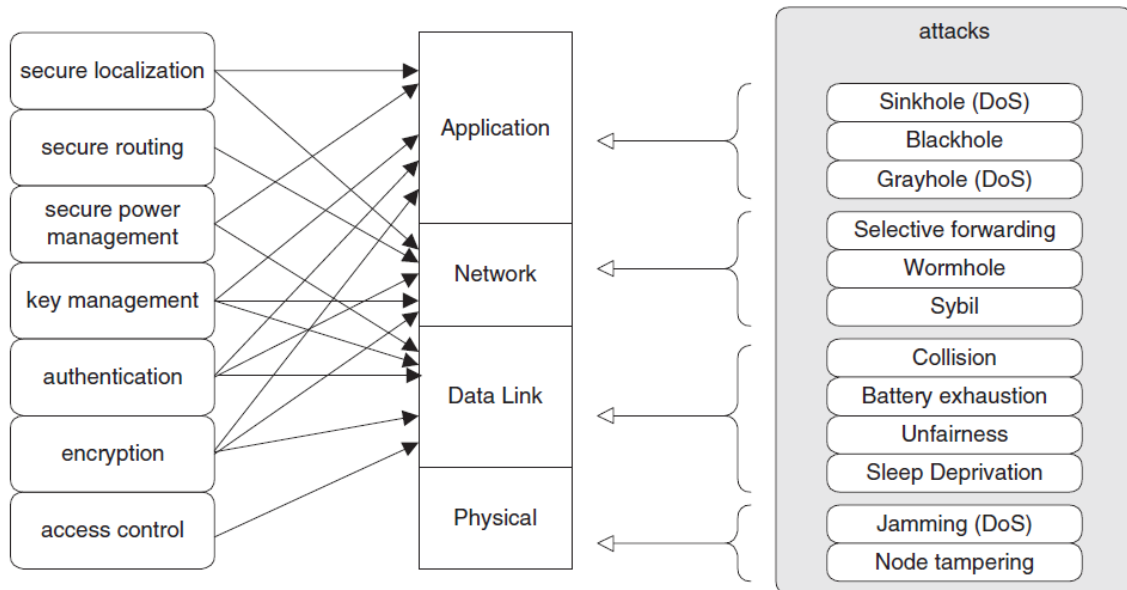
Ένα από τα σημαντικότερα θέματα για την επιτυχή ανάπτυξη ασύρματων δικτύων προσωπικής περιοχής και δικτύων αισθητήρων, είναι η ασφάλειά τους. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές προκλήσεις που δυσκολεύουν αυτό το έργο. Πρώτον, η πρόσβαση στο ασύρματο μέσο είναι ανοιχτή σε όλους όσους μετέχουν στο δίκτυο, χωρίς να χρειάζεται οι συσκευές να βρίσκονται υποχρεωτικά σε κοντινή απόσταση. Δεύτερον, το δίκτυο μπορεί να αποτελείται από πολλούς κόμβους με τους οποίους αναμένεται να λειτουργήσει με μικρή ανθρώπινη

παρέμβαση για παρατεταμένες χρονικές περιόδους. Επιπλέον, μερικοί ή όλοι οι κόμβοι μπορεί να είναι κινητοί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι επιθέσεις και οι διακοπές να είναι πιο δύσκολο να εντοπιστούν. Τρίτον, οι περισσότεροι από τους κόμβους σε ένα WPAN ή ένα δίκτυο αισθητήρων, έχουν περιορισμένη ισχύ (υπολογιστική και μετάδοσης). Αυτό περιορίζει την επιλογή των τεχνικών κρυπτογράφησης που μπορεί να εφαρμοστούν για να διασφαλιστεί το απόρρητο και η ακεραιότητα τους. Τέλος, οι πραγματικοί κόμβοι μπορεί να υποστούν βλάβη, ή ακόμα και φυσικό έλεγχο από κακόβουλες οντότητες ως προς τη λειτουργία του δικτύου.

Κατά συνέπεια, απαιτούνται πολύπλοκες τεχνικές για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό πιθανών εισβολών σε ένα ασύρματο δίκτυο καθώς και για την εφαρμογή κατάλληλων αντιμετρώων. Από τη δομή της διαστρωμάτωσης, απειλές ασφαλείας μπορεί να εμφανιστούν σε διαφορετικά επίπεδα του μοντέλου ISO/OSI:

- Οι επιθέσεις επιπέδου δρομολόγησης (Routing Layer Attacks) περιλαμβάνουν πλαστογραφημένες, τροποποιημένες ή επαναλαμβανόμενες πληροφορίες δρομολόγησης από μία κακόβουλη συσκευή. Επίσης επιλεκτική προώθηση πακέτων, επιθέσεις καταβόθρας που προσελκύουν την κυκλοφορία από μια συγκεκριμένη περιοχή σε έναν παραβιασμένο κόμβο (ή κόμβους). Στις επιθέσεις τύπου Sybil ένας παραβιασμένος κόμβος χρησιμοποιεί πολλές ταυτότητες, προκαλώντας πλαστογράφιση αναγνώρισης, έγχυση κατεστραμμένων πακέτων, παραμέληση πληροφοριών δρομολόγησης ή προώθηση μηνυμάτων κατά μήκος λανθασμένων μονοπατιών.
- Οι επιθέσεις επιπέδου MAC (MAC Layer Attacks) συνήθως επικεντρώνονται στη διακοπή της πρόσβασης στα κανάλια για κανονικούς κόμβους, διαταράσσοντας έτσι τη ροή πληροφοριών τόσο προς, όσο και από τον κόμβο. Αυτό οδηγεί σε μια συνθήκη DoS (Denial of Service) στο επίπεδο MAC. Η ασφάλεια στο στρώμα MAC έχει μελετηθεί κυρίως στο πλαίσιο του στρώματος MAC 802.11 αλλά και σε περισσότερο γενικό πλαίσιο διαφορετικών τύπων επιθέσεων.
- Τέλος, οι επιθέσεις φυσικού στρώματος (jamming) συνίστανται στο ότι ο εισβολέας στέλνει σήματα που διαταράσσουν τη ροή πληροφοριών μέσω παρεμβολών στα κανάλια ραδιοσυχνότητας. Ανάλογη επίθεση στο επίπεδο MAC μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αποστολής πακέτων μεγάλου μεγέθους με άχρηστα δεδομένα.

Μερικές από αυτές τις επιθέσεις, μαζί με τις υπηρεσίες ασφαλείας που αντιμετωπίζουν τις απειλές, παρουσιάζονται στο σχήμα 4:



Σχήμα 4: Υπηρεσίες ασφαλείας και πιθανοί τύποι επειθέσεων κατευθυνόμενοι στα διαφορετικά επίπεδα της διαστρωματώσης

Μεταξύ των υπηρεσιών ασφαλείας που παρουσιάστηκαν στο προηγούμεν σχήμα 4, το πρότυπο 802.15.4 (IEEE 2006) παρέχει υποστήριξη για τα ακόλουθα:

- εμπιστευτικότητα δεδομένων (data confidentiality), η οποία διασφαλίζει ότι τα διαβιβαζόμενα δεδομένα είναι διαθέσιμα μόνο στους κατάλληλους αποδέκτες.
- αυθεντικότητα ή ακεραιότητα δεδομένων (data authenticity or integrity), η οποία διασφαλίζει ότι τα δεδομένα που ελήφθησαν δεν τροποποιήθηκαν κατά τη διέλευση τους από ενδιάμεσο κόμβο, και
- προστασία επανάληψης αναπαραγωγής (replay protection), η οποία διασφαλίζει τον εντοπισμό μεταδόσεων αντιγράφων δεδομένων.

Οι επικοινωνίες προστατεύονται κατα τη μετάδοση κάθε πλαισίου, κάτι που επιτρέπει αντιστάθμιση μεταξύ αυξημένης ασφάλειας και μειωμένης απόδοσης λόγω των μεταδόσεων που σχετίζονται με την ασφάλεια. Η χρήση του απορρήτου των δεδομένων είναι προαιρετική αλλά παρέχονται πολλές εναλλακτικές για την υποστήριξη της ακεραιότητας των δεδομένων. Επιπλέον, προστίθεται και προστασία επανάληψης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ασφάλεια ισχύει και για την προστασία των πλαισίων εντολών beacon, δεδομένων και MAC. Τα πλαίσια αναγνώρισης δεν προστατεύονται.

Για την υποστήριξη αυτών των υπηρεσιών, το πρότυπο χρησιμοποιεί κρυπτογραφικούς μηχανισμούς που βασίζονται σε κρυπτογραφία συμμετρικού κλειδιού (symmetric key) που χρησιμοποιεί κλειδιά που παρέχονται από τα ανώτερα στρώματα του δικτύου. Τα κλειδιά μπορούν να μοιράζονται μεταξύ δύο ομότιμων οντοτήτων ή μεταξύ μιας ομάδας συσκευών. Αυτά αναφέρονται ως κλειδιά σύνδεσης και κλειδιά ομάδας, αντίστοιχα. Κλειδιά και πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την ασφάλεια εισερχόμενων και μη ασφαλών εξερχόμενων πλαισίων δεδομένων διατηρούνται στον λεγόμενο πίνακα κλειδιών (key table). Μια ειδική μεταβλητή, το macDefaultKeySource, διατηρεί τις πληροφορίες που κοινοποιούνται μεταξύ του δημιουργού και του παραλήπτη, ή των αποδεκτών, του ασφαλισμένου πλαισίου και χρησιμοποιείται για την απλοποίηση της διαδικασίας ασφάλισης ενός εξερχόμενου πλαισίου ή μη ασφαλούς εισερχόμενου.

Ένας ξεχωριστός πίνακας, γνωστός ως πίνακας συσκευών (device table), περιέχει πληροφορίες διευθύνσεων και άλλες πληροφορίες που σχετίζονται με την ασφάλεια σε συγκεκριμένες συσκευές. Όταν απαιτείται προστασία για ένα συγκεκριμένο πλαίσιο, οι πληροφορίες από αυτόν τον πίνακα συνδυάζονται με αυτές στον πίνακα κλειδιών. Οι πληροφορίες παρέχουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τη διασφάλιση των εξερχόμενων πλαισίων και των μη ασφαλών εισερχόμενων. Ένας άλλος πίνακας χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα εισερχόμενα πλαίσια δεδομένων ως πίνακας ελάχιστου επιπέδου ασφάλειας (minimum security level table). Όταν λαμβάνεται ένα πλαίσιο, ο κόμβος μπορεί να περιμένει ένα ορισμένο επίπεδο ασφάλειας με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες για τον αποστολέα του πλαισίου. Το ελάχιστο επίπεδο ασφάλειας εξαρτάται επίσης από τον τύπο του πλαισίου και, σε ορισμένες περιπτώσεις, από το περιεχόμενό του. Εάν το εισερχόμενο πλαίσιο δεν έχει ασφαλιστεί κατάλληλα, ενδέχεται να γίνει επεξεργασία ασφαλείας. Εάν αυτή αποτύχει, ο κόμβος μπορεί να επιλέξει να αποδεχτεί ή να απορρίψει το πλαίσιο.

Τέλος, χρησιμοποιείται ένας μετρητής πλαισίων (frame counter) για να εξασφαλίσει προστασία επανάληψης για τα εξερχόμενα πλαίσια. Ο μετρητής πλαισίου αυξάνεται κάθε φορά που ασφαρίζεται ένα εξερχόμενο πλαίσιο. Η τρέχουσα τιμή του περιλαμβάνεται σε κάθε ασφαλισμένο εξερχόμενο πλαίσιο. Η πληροφορία αυτή αποτελεί επίσης ένα από τα στοιχεία που χρειάζονται για την αποσφάλιση ενός εισερχόμενου πλαισίου. Όταν ο μετρητής φτάσει στη μέγιστη τιμή του, το σχετικό υλικό θεωρείται άκυρο και πρέπει να αντικατασταθεί. Με αυτόν τον τρόπο, υποστηρίζεται η προστασία της επικοινωνίας δεδομένων από επιθέσεις επανάληψης.

### **1.5. Προσθήκες στη λειτουργία του 802.15.4 πρωτοκόλλου**

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 [3] ορίζει το φυσικό επίπεδο και το επίπεδο MAC (Medium Access Control) της στοίβας πρωτοκόλλων και θεωρείται το πρότυπο αναφοράς για εμπορικά Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων (Wireless Sensors Network – WSN). Στην πραγματικότητα, πολλά προϊόντα που συμμορφώνονται με αυτό το πρότυπο είναι διαθέσιμα σήμερα. Πολλές μελέτες έχουν διερευνήσει την απόδοση του IEEE 802.15.4 στα WSN [4–12]. Αυτές οι ερευνητικές εργασίες εντοπίζουν ότι το IEEE 802.15.4 έχει ορισμένους περιορισμούς (όπως χαμηλή αξιοπιστία επικοινωνίας και καμία προστασία από παρεμβολές/εξασθένιση). Αυτά το καθιστούν ακατάλληλο για εφαρμογές που έχουν αυστηρές απαιτήσεις, όσον αφορά την καθυστέρηση, την αξιοπιστία, την επεκτασιμότητα, ή τη λειτουργία σε «δύσκολα» περιβάλλοντα [13]. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, το 2008 η IEEE δημιούργησε μια Ομάδα Εργασίας (με το όνομα 802.15 Task Group 4e) με στόχο να βελτιώσει και να προσθέσει λειτουργικότητα στο 802.15.4 MAC, ώστε να αντιμετωπιστούν οι αναδυόμενες ανάγκες των ενσωματωμένων εφαρμογών. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν η κυκλοφορία του προτύπου 802.15.4e το 2012 [13]. Το 802.15.4e βελτιώνει το παλιό πρότυπο εισάγοντας μηχανισμούς όπως η πρόσβαση με χρήση χρονική των θυρίδων (time slotted access), η πολυκαναλική επικοινωνία (multi-channel communication) και η αναπήδηση καναλιού (channel hopping). Συγκεκριμένα, ορίζει πέντε νέα πρωτόκολλα MAC (που ονομάζονται modes συμπεριφοράς MAC). Αυτά προορίζονται για την υποστήριξη συγκεκριμένων τομέων εφαρμογών και εισάγουν γενικές λειτουργικές βελτιώσεις που δεν έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Από αυτή την άποψη, το πρότυπο 802.15.4e είναι συνέχεια του 802.15.4 και παρουσιάζει σημαντικό αριθμό αναφορών που βασίζονται στο αρχικό πρότυπο. Μετά από μια γενική εισαγωγή στο πρότυπο 802.15.4e, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην περιγραφή των λεπτομερειών των κύριων τρόπων συμπεριφοράς MAC 802.15.4e, δηλαδή του Time Slotted Channel Hopping (TSCH), του Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME) και του Low Latency Deterministic Network (LLDN). Για το DSME παρέχεται μια

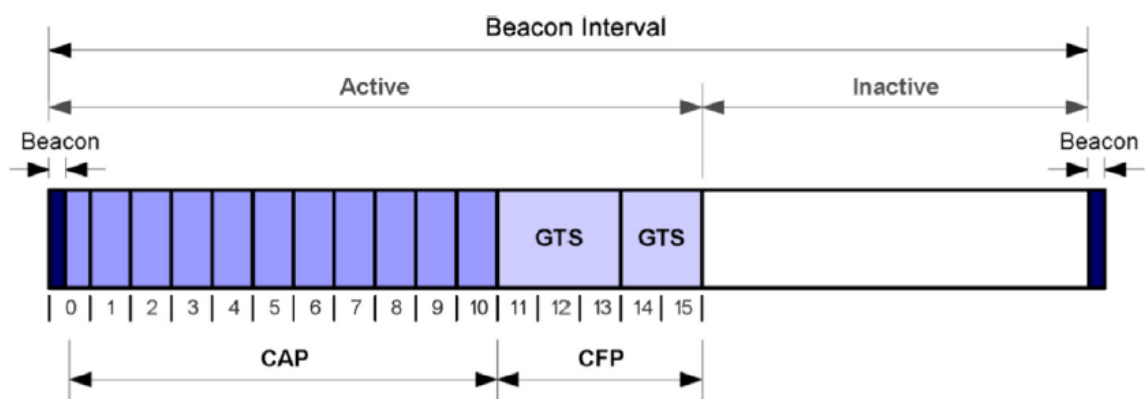
εις βάθος περιγραφή και επισημαίνουμε τα κύρια χαρακτηριστικά καθώς και τους πιθανούς τομείς εφαρμογής.

## 1.6. Βασικά Χαρακτηριστικά του 802.15.4 DSME

Στόχος του 802.15.4 DSME είναι να υποστηρίξει τόσο βιομηχανικές όσο και εμπορικές εφαρμογές με αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά τη λειτουργικότητα και την αξιοπιστία. Για το σκοπό αυτό, συνδυάζει τη συνδεσιμότητα (connection-based) με τη διαίρεση χρόνου (Time Division Multiplexing) και προσφέρει δύο διαφορετικούς τρόπους διαφοροποίησης καναλιών. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για δίκτυα multi-hop και mesh.

Το Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME) έχει σχεδιαστεί για όλες εκείνες τις κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν ντετερμινιστική καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία. Επιπλέον, παρέχει ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε μεταβαλλόμενες χρονικά συνθήκες κυκλοφορίας και λειτουργίας. Από αυτή την άποψη, το DSME είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για πολλές βιομηχανικές, και εμπορικές εφαρμογές, όπως οι αυτοματισμοί εργοστασίων, οι οικιακοί αυτοματισμοί και οι συσκευές έξυπνων μετρήσεων, για την παρακολούθηση έξυπνων κτιρίων και την παρακολούθηση ασθενών.

Το DSME προέρχεται από τη λειτουργία Beacon Enabled που ορίζεται στο προηγούμενο πρότυπο IEEE 802.15.4, αλλά εισάγει πολλές αξιοσημείωτες βελτιώσεις. Όπως και στη λειτουργία Ενεργοποιημένου Beacon του IEEE 802.15.4, ο χρόνος διαιρείται σε Περιόδους Πρόσβασης (Contention Access Periods - CAPs) και Χρονικές Περιόδους Ελεύθερες από Συγκρούσεις (Collision Free Periods CFPs). Οι χρονικές περίοδοι παρουσιάζονται στο σχήμα 5.



Σχήμα 5: Δομή του Υπερπλαισίου (SuperFrame) στο πρότυπο IEEE 802.15.4

Κατά τη διάρκεια των περιόδων CAP, οι κόμβοι χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο με πολλαπλή πρόσβαση (Carrier Sense for Multiple Access Collision Avoidance - CSMA-CA ή ALOHA) για πρόσβαση στα κανάλια, ενώ κατά τη διάρκεια των περιόδων CFP χρησιμοποιούν Εγγυημένες χρονοθυρίδες (Guaranteed Time Slots - GTS), με πολυπλεξία TDMA. Σε σύγκριση με το πρότυπο IEEE 802.15.4, το DSME επεκτείνει τον αριθμό των χρονοθυρίδων GTS και αυξάνει τον αριθμό των καναλιών συχνότητας που χρησιμοποιούνται (προηγουμένως περιοριζόταν μόνο σε ένα). Με την υιοθέτηση μιας ευέλικτης δομής πολλαπλών υπερπλαισίων (super-frames), το DSME διασφαλίζει την απαραίτητη ευελιξία για την εξυπηρέτηση τόσο της περιοδικής όσο και της απεριοδικής (ή βάσει συμβάντων) κίνησης, ακόμη και σε μεγάλα δίκτυα πολλαπλών αναπδήσεων (multi-hop networks). Επιπλέον, χάρη σε δύο στρατηγικές, το πρότυπο DSME μπορεί να επιλέξει δυναμικά τα

καλύτερα κανάλια επικοινωνίας, έτσι ώστε να εγγυάται σταθερότητα (robustness) και υψηλή αξιοπιστία ακόμη και σε συνθήκες που μεταβάλλονται χρονικά.

Στη λειτουργία DSME, οι γειτονικοί κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν με σύνδεση από σημείο σε σημείο (point-to-point). Συγκεκριμένα, το DSME επιτρέπει τη δημιουργία αποκλειστικών συνδέσεων μεταξύ οποιονδήποτε δύο κόμβων του δικτύου, με αποτέλεσμα την ιδανική λύση για την κάλυψη δικτύων τύπου multi-hop mesh με ντετερμινιστική καθυστέρηση.

Το DSME είναι επεκτάσιμο και δεν υποφέρει από ένα μόνο σημείο αστοχίας, επειδή ο προγραμματισμός του beacon και η κατανομή χρονικών θυρίδων εκτελούνται με κατανομημένο τρόπο, χωρίς να βασίζονται σε καμία κεντρική οντότητα. Επιπλέον, δεδομένου ότι κάθε ζεύγος κόμβων μπορεί είτε να καταναίμει αυτόνομα είτε να καταναίμει θυρίδες GTS σύμφωνα με τις ανάγκες του, το DSME είναι σε θέση να προσαρμόζεται γρήγορα σε μεταβαλλόμενη κίνηση και αλλαγές στην τοπολογία του δικτύου. Αυτό επιτυγχάνεται χωρίς να απαιτείται υπολογισμός προγραμματισμού θυρίδων (scheduling). Αυτή είναι μια σημαντική διαφορά του DSME με το TSCH.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του DSME είναι:

- Πολυ-καναλακή επικοινωνία με χρήση Πολλαπλών Υπερπλαισίων (Multi-channel and Multi-SuperFrame)
- Επέκταση για κάλυψη δικτύων mesh (mesh extention to GTS)
- Δύο μηχανισμοί διαχωρισμού καναλιών (channel adaptation and channel hopping)
- Κατανομημένος χρονοπρογραμματισμός του beacon (Distributed Beacon Scheduling)
- Κατανομημένη ανάθεση χρονοθυρίδας (Distributed Slot Allocation)
- Ομαδικές Επιβεβαιώσεις (Group ACKs)
- Υποστήριξη πολλαπλών αρχιτεκτονικών διασύνδεσης δικτύου (star, cluster-tree and peer-to-peer)

Στην πραγματικότητα, το DSME μπορεί να χρησιμοποιηθεί βελτιώνοντας όλες εκείνες τις περιπτώσεις στις οποίες ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο ή η παραγόμενη κίνηση αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, π.χ. ως απάντηση σε ένα εξωτερικό συμβάν. Για παράδειγμα, μπορούμε να εξετάσουμε ένα σύστημα επίβλεψης που αυξάνει τον ρυθμό μετάδοσης bits/sec της ροής βίντεο, όταν ανιχνεύεται μια κίνηση στην εικόνα ή ένα σύστημα παρακολούθησης της ρύπανσης που μειώνει τον χρόνο δείγματος όταν γίνεται υπέρβαση των επιπέδων προστασίας. Αντίθετα, σε ένα δίκτυο TSCH, κάθε παραλλαγή στην τοπολογία ή στην ανταλλασσόμενη κίνηση θα απαιτούσε να υπολογιστεί ξανά το χρονοδιάγραμμα χρονοθυρίδας. Αυτή η λειτουργία δεν είναι πάντα δυνατή και μπορεί να απαιτεί την εκτέλεση πολύπλοκων αλγορίθμων καθώς και σημαντική ανταλλαγή πακέτων μεταξύ των κόμβων. Τέλος, το DSME υποστηρίζει μια επιλογή ομαδικής επιβεβαίωσης κίνησης (group acknowledgement option) που επιτρέπει τη συγκέντρωση των επιβεβαιώσεων πολλαπλών πλαισίων δεδομένων, σε ένα μόνο πλαίσιο ACK, βελτιώνοντας έτσι την ενεργειακή απόδοση των συσκευών.

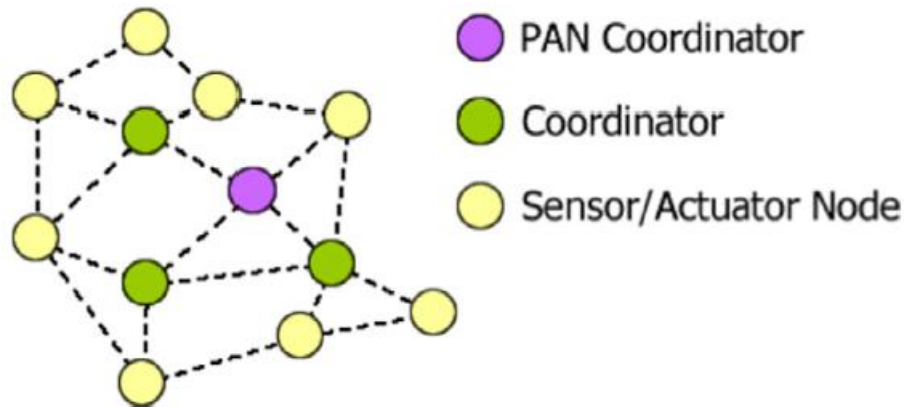
Δεδομένης της μεγάλης ποικιλίας επιλογών και χαρακτηριστικών, το DSME αποδεικνύεται ότι είναι ένας από τους πιο σύνθετους τρόπους λειτουργίας που ορίζονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4e. Στη συνέχεια περιγράφονται τα κύρια χαρακτηριστικά του.

### 1.6.1. Η δομή του Super-Frame στο DSME

Σε ένα δίκτυο DSME όπως αυτό παρουσιάζεται στο σχήμα 6, ορισμένοι κόμβοι που αναφέρονται ως συντονιστές, μεταδίδουν περιοδικά ένα Enabled Beacon (EB), που χρησιμοποιείται για να διατηρεί όλους τους κόμβους συγχρονισμένους και να επιτρέπει σε

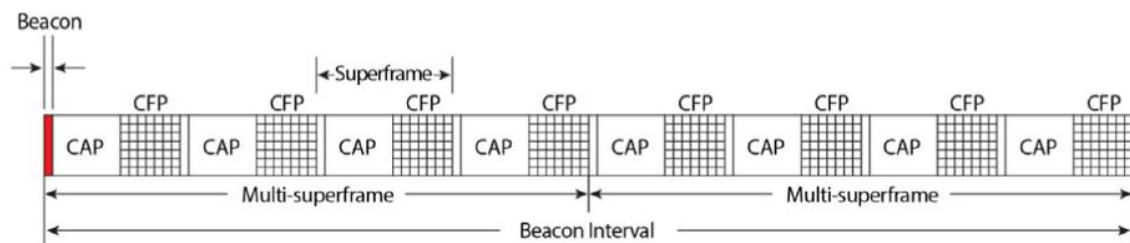


νέους κόμβους να ενταχθούν στο δίκτυο. Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών EB που αποστέλλονται από τον ίδιο συντονιστή ονομάζεται Διάστημα Beacon (Beacon Interval - BI). Το τελευταίο αποτελείται από πολλά υπερ-πλαίσια. Σε αντίθεση με το πρότυπο IEEE 802.15.4, στο DSME δεν υπάρχουν ανενεργές περιόδους.



Σχήμα 6: Τυπική χρήση του DSME σε δίκτυο πλέγματος

Επομένως, τα υπερπλαίσια διαδέχονται το ένα το άλλο απρόσκοπτα. Μέσα σε ένα διάστημα Beacon, είναι δυνατό να οριστούν κύκλοι επαναλαμβανόμενων υπερπλαισίων, που ονομάζονται πολλαπλά υπερπλαίσια, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Δομή του DSME υπερπλαισίου (super-frame)

Όπως και στη λειτουργία Ενεργοποιημένου Beacon του προτύπου IEEE 802.15.4, κάθε υπερπλαίσιο χωρίζεται σε 16 ίσες θυρίδες (αριθμημένες από το 0 έως το 15) και αποτελείται από τρία μέρη, δηλαδή μια θυρίδα Enhanced Beacon, μια χρονική περίοδο Contention Access Period (CAP) και μια χρονική περίοδο χωρίς σύγκρουση (CFP).

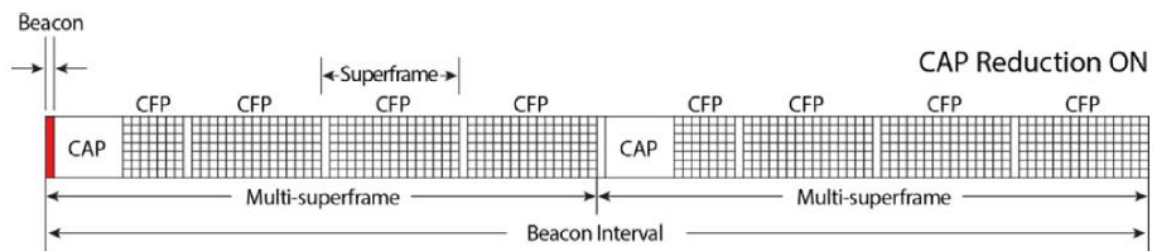
Η θυρίδα 0 χρησιμοποιείται για τη μετάδοση EB. Συγκεκριμένα, κάθε συντονιστής μεταδίδει τα EB του μόνο κατά τη διάρκεια ενός υπερπλαισίου που του έχει εκχωρηθεί μέσω ενός καταναμημένου μηχανισμού προγραμματισμού.

Το CAP ξεκινά αμέσως μετά το EB και τελειώνει πριν από την θυρίδα 9. Συνήθως χρησιμοποιείται για τη μετάδοση μηνυμάτων ελέγχου και επειγόντων ή μη περιοδικών δεδομένων. Κατά τη διάρκεια του CAP, οι κόμβοι χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο CSMA-CA (ή ALOHA) με αυλακώσεις για πρόσβαση στο μέσο. Τόσο το EB όσο και όλα τα πλαίσια που αποστέλλονται κατά τη διάρκεια του CAP μεταδίδονται χρησιμοποιώντας το ίδιο κανάλι (αυτό που επιλέγει ο συντονιστής του PAN για να σχηματίσει το δίκτυο και χρησιμοποιείται από κόμβους για συσχέτιση). Διαφορετικά από το IEEE 802.15.4, κάθε ζεύγος κόμβων που βρίσκεται σε απόσταση μετάδοσης μπορεί να επικοινωνήσει χρησιμοποιώντας το CAP.

Επομένως, οι κόμβοι απαιτείται να είναι πάντα ενεργοποιημένοι, για όλη τη διάρκεια του CAP.

Οι υπόλοιπες 7 θυρίδες συνθέτουν το CFP, το οποίο βρίσκεται στο άκρο του superframe (θυρίδες 9-15). Κάθε θυρίδα εντός του CFP αντιπροσωπεύει μια DSME Guaranteed Time Slot (DSME-GTS) και είναι αποκλειστικά αφιερωμένη σε μεταδόσεις από έναν συγκεκριμένο κόμβο πηγής προς έναν συγκεκριμένο κόμβο προορισμού. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει αμφισβήτηση για πρόσβαση στο κανάλι, το CFP χρησιμοποιείται κυρίως για τη μετάδοση περιοδικής κίνησης και πλαισίων δεδομένων των οποίων ο λανθάνοντας χρόνος πρέπει να είναι προβλέψιμος. Πολλαπλές εκπομπές μπορούν να προσαρμοστούν κατά τη διάρκεια του ίδιου DSME-GTS, χρησιμοποιώντας διαφορετικά κανάλια, αυξάνοντας έτσι σημαντικά τη χωρητικότητα του δικτύου. Προκειμένου να αναγνωριστεί ένα συγκεκριμένο DSME-GTS, κάθε υπερ-πλαίσιο μέσα σε ένα πολλαπλό υπερπλαίσιο έχει ένα σχετικό αναγνωριστικό. Επιπλέον, τα DSME-GTS είναι αριθμημένα (δηλαδή έχουν αναγνωριστικό θυρίδας), με βάση τη θέση τους εντός του CFP. Επομένως, ένα DSME-GTS μπορεί να παραπεμφθεί μέσα σε ένα multi-superframe μέσω του ζεύγους (Superframe ID, Slot ID).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι κόμβοι πρέπει να παραμείνουν ενεργοί καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου CAP. Για την εξοικονόμηση ενέργειας, η λειτουργία DSME παρέχει τον μηχανισμό μείωσης του CAP. Όταν είναι ενεργοποιημένη η μείωση του CAP, μόνο το πρώτο υπερπλαίσιο κάθε πολλαπλού υπερπλαισίου εισέρχεται στο CAP, ενώ στα άλλα υπερπλαίσια το CAP παραλείπεται και το CFP αποτελείται από 15 DSME-GTS, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8:



Σχήμα 8: Δομή του πολλαπλού υπερπλαισίου με ενεργοποίηση του μειωμένου CAP

### 1.6.2. Enhanced Beacons - EBs

Τα EB αποστέλλονται από κάθε συντονιστή στο δίκτυο σε τακτά χρονικά διαστήματα. Γενικά, μεταδίδονται απευθείας μέσω του ασύρματου μέσου στην αρχή του superframe (κατά τη διάρκεια της αποκλειστικής θυρίδας EB), χωρίς CCA ή Backoff (έλεγχος οπισθοχώρησης από το μέσο). Ωστόσο, τα EB ενδέχεται να αντιμετωπίσουν σύγκρουσεις λόγω παρεμβολών με άλλες συσκευές εκτός του δικτύου DSME. Σε αυτήν την περίπτωση, ένας συντονιστής μπορεί να χρησιμοποιήσει την επιλογή Deferred Beacon για να μειώσει την πιθανότητα σύγκρουσης και να βελτιώσει την αξιοπιστία της μετάδοσης του beacon. Βασικά, όταν αυτή η επιλογή είναι ενεργοποιημένη, ο συντονιστής εκτελεί την CCA πριν στείλει το beacon. Το τελευταίο αποστέλλεται μόνο εάν η CCA επιβεβαιώσει ότι το κανάλι είναι καθαρό (χωρίς άλλη ενεργή μετάδοση).

Κάθε EB που αποστέλλεται σε ένα δίκτυο DSME περιλαμβάνει ένα ειδικό πεδίο, συγκεκριμένα το στοιχείο πληροφοριών περιγραφής DSME PAN, το οποίο περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τη δομή του υπερπλαισίου (δηλαδή, τους δείκτες SO, MO και BO) και τις ενεργοποιημένες επιλογές (π.χ., λειτουργία διαφοροποίησης καναλιών, Μείωση CAP, Deferred beacon, Group ACK, κ.λπ.). Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνοντας ένα EB, κάθε κόμβος μπορεί να εξαγάγει τις απαραίτητες τιμές παραμέτρων για τη σωστή λειτουργία του

στο δίκτυο. Ένα EB περιέχει επίσης το SDIndex του τρέχοντος υπερπλαισίου, δηλαδή έναν αριθμό που χρησιμοποιείται για την αναγνώριση του υπερπλαισίου μέσα στο διάστημα Beacon. Αυτός ο δείκτης ξεκινά από το 0, που αντιπροσωπεύει το υπερπλαίσιο που χρησιμοποιείται από τον συντονιστή PAN για τη μετάδοση των EB του.

Επιπλέον, τα EB χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση του παγκόσμιου συγχρονισμού ώρας (global time synchronization) στο PAN. Για τον σκοπό αυτό, κάθε κόμβος στο δίκτυο πρέπει να συσχετιστεί με έναν συντονιστή και να παρακολουθεί τα EB του. Αναλυτικά, όταν ένας νέος κόμβος ενώνεται στο δίκτυο, ξεκινά μια παθητική σάρωση καναλιών σε μια δεδομένη λίστα καναλιών. Συγκεκριμένα, ελέγχει τα EB που αποστέλλονται από τους συντονιστές του δικτύου για περίοδο ίση με τη μέγιστη δυνατή περίοδο Διαστήματος Beacon ( $BO = 14$ ). Εάν δεν ληφθούν EB σε αυτό το διάστημα, ο κόμβος μεταβαίνει στο επόμενο κανάλι της λίστας και περιμένει ξανά. Όταν ο κόμβος ανακαλύψει τους γειτονικούς συντονιστές του, ο κόμβος συσχετίζεται με έναν από αυτούς. Το τελευταίο γίνεται ο γονέας του συγχρονισμού χρόνου.

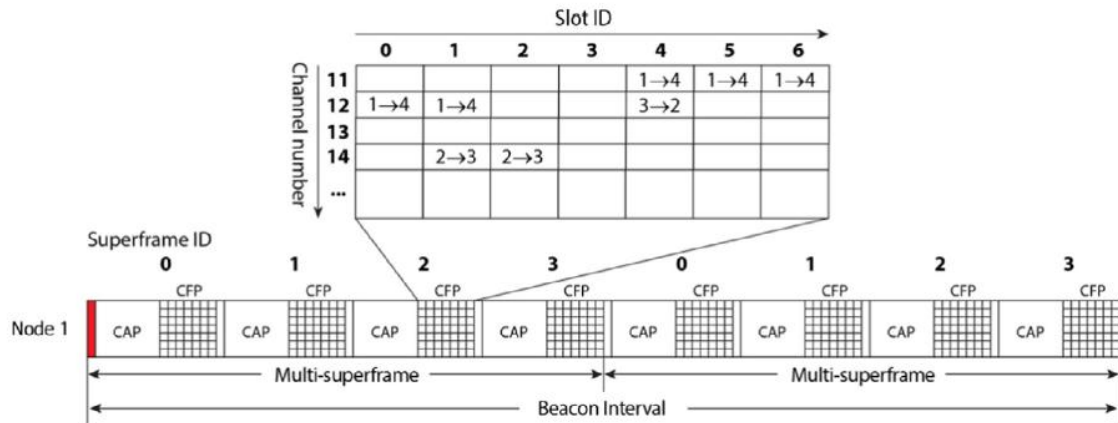
Κάθε συντονιστής μεταδίδει τα EB του κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου υπερπλαισίου στο διάστημα Beacon, που καθορίζεται μέσω ενός καταναμημένου αλγόριθμου προγραμματισμού. Βασικά, ένας συντονιστής που έχει ήδη ενταχθεί στο δίκτυο, μοιράζεται τις πληροφορίες του προγράμματος beacon μέσω των EB του. Στην πράξη, ο κόμβος στέλνει μια ακολουθία bitmap (με μήκος ίσο με τον αριθμό των υπερπλαισίων μέσα στο BI), υποδεικνύοντας τη χρήση των θυρίδων του EB από τους γείτονές του με ένα βήμα. Ένα bit στο bitmap ορίζεται σε τιμή '1' εάν η αντίστοιχη θυρίδα EB χρησιμοποιείται ήδη για μετάδοση beacon. Ένας υποψήφιος συντονιστής αναζητά μια υποδοχή EB με σήμανση 0 σε όλα τα bitmaps που λαμβάνει (στην πραγματικότητα, μπορεί να λάβει περισσότερα EB από διαφορετικούς συντονιστές κατά τη διάρκεια ενός BI). Μόλις βρεθεί μια κενή θέση beacon, ο νέος συντονιστής αρχίζει να τη χρησιμοποιεί ως δική του θυρίδα EB. Επιπλέον, εκπέμπει μια εντολή DSME-Beacon Allocation Notification κατά τη διάρκεια του CAP, προκειμένου να ενημερώσει τους γείτονές του για την τοποθεσία της θυρίδας. Φυσικά, μια σύγκρουση συμβαίνει εάν δύο ή περισσότεροι κόμβοι προσπαθήσουν να ανταγωνιστούν για την ίδια θυρίδα EB. Για παράδειγμα, αυτό μπορεί να συμβεί εάν δύο κόμβοι είναι κρυμμένοι μεταξύ τους και δεν μπορούν να ανιχνεύσουν ο ένας τις μεταδόσεις του άλλου. Σε αυτήν την κατάσταση, γνωστή ως πρόβλημα «κρυφού κόμβου», οι κοινοί γείτονες των δύο κόμβων θα λάβουν τις εντολές DSME-Beacon Allocation Notification και των δύο κόμβων. Για να αποφευχθεί η εκχώρηση της ίδιας θυρίδας EB σε περισσότερους από έναν κόμβους, αποστέλλεται μια ειδοποίηση σύγκρουσης DSME-Beacon στον κόμβο που έχει ειδοποιηθεί αργότερα, ώστε να τον κάνει να επιλέξει διαφορετική θυρίδα EB.

### **1.6.3. Διαφοροποίηση των καναλιών (channel diversity)**

Προκειμένου να παρέχεται πολυκαναλική επικοινωνία κατά τη διάρκεια των χρονικών περιόδων DSME-GTS, η τεχνική DSME προσφέρει δύο μεθόδους διαφοροποίησης των καναλιών. Πιο συγκεκριμένα προσφέρει την Προσαρμογή καναλιών (Channel Adaptation) και την Αναπήδηση καναλιών (Channel Hopping). Ένα δίκτυο DSME πρέπει να αποφασίσει για τη χρήση μίας εκ των δύο μεθόδων. Το δίκτυο DSME ανακοινώνει την επιλογή του μέσω μιας συγκεκριμένης επισήμανσης στα εκπεμπόμενα EB.

Όταν χρησιμοποιείται η λειτουργία με Προσαρμογή καναλιών, δύο γειτονικοί κόμβοι μπορούν να αποφασίσουν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε από τα ανοικτά διαθέσιμα κανάλια συχνότητας. Το κανάλι που θα χρησιμοποιηθεί αποφασίζεται κατά τη φάση εκχώρησης DSME-GTS, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα του καναλιού που εκτιμάται από τους δύο κόμβους. Βασικά, κάθε φορά που εκκινεί χρονικά το εκχωρημένο DSME-GTS (ακόμη και σε επόμενα πολλαπλά υπερπλαίσια), οι δύο κόμβοι θα πρέπει να επικοινωνούν στο κανάλι που διαπραγματεύτηκε κατά τη διάρκεια της εκχώρησης.

Το κανάλι που χρησιμοποιείται σε ένα DSME-GTS δεν αλλάζει με την πάροδο του χρόνου, εκτός εάν υποβαθμιστεί η ποιότητά του. Σε αυτήν την περίπτωση, συνιστάται η αντικατάσταση του DSME-GTS με ένα νέο DSME-GTS με καλύτερη ποιότητα σύνδεσης. Ένα παράδειγμα χρήσης της Προσαρμογής Καναλιού απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί:

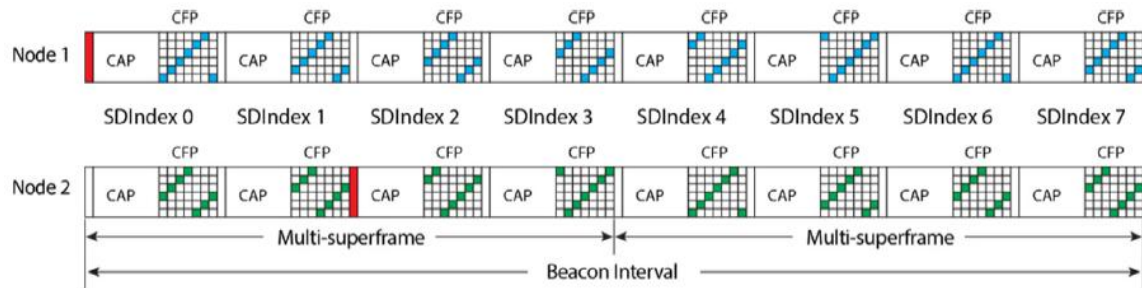


Σχήμα 9: Χρησιμοποίηση των καναλιών του DSME-GTS με χρήση της τεχνικής Προσαρμογής Καναλιού

Σε αυτό το παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του δεύτερου υπερπλαισίου, οι κόμβοι 1 και 4 χρησιμοποιούν το φυσικό κανάλι 12 στις χρονοθυρίδες 0 και 1 και, στη συνέχεια, μεταβαίνουν στο φυσικό κανάλι 11 και την χρονοθυρίδα 4. Αυτό το χρονοδιάγραμμα επαναλαμβάνεται μεταξύ των επόμενων πολλαπλών υπερπλαισίων.

Στη λειτουργία Αναπήδησης Καναλιού, οι κόμβοι αλλάζουν το κανάλι επικοινωνίας σε κάθε DSME-GTS, ακολουθώντας μια προκαθορισμένη ακολουθία που ονομάζεται Ακολουθία Αναπήδησης (Hopping Sequence). Αν και η Ακολουθία Αναπήδησης είναι η ίδια για όλους τους κόμβους του δικτύου (αυτή αποφασίζεται από τον συντονιστή του PAN), διαφορετικοί κόμβοι αρχίζουν να αναπηδούν από διαφορετικές θέσεις στην ακολουθία. Η αρχική θέση ενός κόμβου εξαρτάται από τη μετατόπιση καναλιού (channel offset), δηλαδή έναν ακέραιο αριθμό που επιλέγεται για κάθε κόμβο κατά τη συσχέτιση του με το δίκτυο. Προφανώς αποφεύγεται η εκχώρηση της ίδιας μετατόπισης καναλιού για γειτονικούς κόμβους. Όταν δύο κόμβοι επιθυμούν να επικοινωνήσουν, ο κόμβος εκπομπής πρέπει να μεταβεί στο κανάλι που χρησιμοποιεί ο δέκτης στον οποίο απευθύνεται. Αυτό αντιπροσωπεύει την κύρια διαφορά μεταξύ των μηχανισμών Αναπήδησης Καναλιών του DSME και του TSCH. Στο TSCH η μετατόπιση καναλιού επιλέγεται με βάση τη σύνδεση και συμφωνείται από όλους τους κόμβους που χρησιμοποιούν τη σύνδεση. Αντίθετα, στο DSME, κάθε κόμβος έχει τη δική του μετατόπιση σταθερού καναλιού και ο πομπός πρέπει να χρησιμοποιεί τη μετατόπιση καναλιού του δέκτη. Επίσης, ο τύπος για την εξαγωγή της συχνότητας καναλιού που θα χρησιμοποιηθεί για την επικοινωνία είναι διαφορετικός.

Ένα παράδειγμα του χρονοδιαγράμματος Καναλιών και του DSME-GTS με λειτουργία Αναπήδησης Καναλιών απεικονίζεται στο σχήμα 10:



Σχήμα 10: Χρησιμοποίηση των καναλιών του DSME-GTS με χρήση της λειτουργίας Αναπήδησης Καναλιού

Σε αυτό το παράδειγμα, η ακολουθία αναπήδησης είναι η  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$  και δύο κόμβοι, δηλαδή ο Κόμβος 1 και ο Κόμβος 2, χρησιμοποιούν τις τιμές Μετατόπισης καναλιού 0 και 2, αντίστοιχα. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι δύο κόμβοι χρησιμοποιούν όλα τα κανάλια της Ακολουθίας Αναπήδησης με την πάροδο του χρόνου.

#### 1.6.4. Ομαδική Επιβεβαίωση (Group ACK)

Το DSME παρέχει μια επιλογή ομαδικής Επιβεβαίωσης (Group ACK) που μπορεί να χρησιμοποιηθεί επικερδώς όταν οι κόμβοι στο δίκτυο πρέπει να στέλνουν περιοδική κίνηση στους συντονιστές τους. Βασικά, όταν είναι ενεργοποιημένη η ομαδική επιβεβαίωση ACK ο συντονιστής χρησιμοποιεί ένα μόνο DSME-GTS για να συγκεντρώσει, σε ένα μόνο πλαίσιο, όλες τις επιβεβαιώσεις για τα πλαίσια δεδομένων που ελήφθησαν στα προηγούμενα DSME-GTS. Επίσης, η επιλογή group ACK επιτρέπει στους συντονιστές να καθορίσουν ένα DSME-GTS (μέσα στο πολλαπλό υπερ-πλαίσιο) στο οποίο μπορούν να αναμεταδοθούν εκείνα τα πλαίσια που δεν έχουν ληφθεί σωστά από τον συντονιστή.

Με αυτόν τον τρόπο, η ομαδική επιβεβαίωση ACK επιτυγχάνει διπλό όφελος. Πρώτον, βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση, αφού ο συντονιστής δεν χρειάζεται να αναγνωρίζει κάθε πλαίσιο που λαμβάνει. Δεύτερον, παρέχοντας μια ευκαιρία αναμετάδοσης εντός του ίδιου πολλαπλού υπερπλαισίου, επιτρέπει τη μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης. Αυτό μπορεί να είναι μια κρίσιμη απαίτηση για πολλές εφαρμογές.

#### 1.6.5. Διαχείριση του DSME-GTS

Η λειτουργία DSME-GTS επιτρέπει σε ένα ζεύγος γειτονικών κόμβων να λειτουργούν σε ένα κανάλι μέσα σε ένα δεσμευμένο τμήμα του υπερπλαισίου, βεβαιώνοντας ότι κανένας άλλος κόμβος του δικτύου δεν παρεμβαίνει στην επικοινωνία μεταξύ τους. Αυτό προϋποθέτει ότι έχει εκχωρηθεί ένα DSME-GTS πριν από τη χρήση του. Συγκεκριμένα, ο κόμβος προορισμού είναι αυτός που αποφασίζει εάν θα εκχωρήσει ένα DSME-GTS με βάση τις απαιτήσεις του αιτήματος DSME-GTS που αποστέλλεται από τον κόμβο προέλευσης και την τρέχουσα διαθεσιμότητα της θυρίδας. Σε περίπτωση ροής πολλαπλών αναπηδήσεων, τα DSME-GTS θα πρέπει να κατανέμονται διαδοχικά σε κάθε αναπήδηση για να μειωθεί η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (end-to-end delay). Κάθε DSME-GTS μπορεί να εκχωρηθεί ανά πάσα στιγμή από έναν από τους δύο κόμβους επικοινωνίας. Επιπλέον, ένα DSME-GTS μπορεί να λήξει εάν (i) ο κόμβος πομπού δεν χρησιμοποιεί πλέον το DSME-GTS, (ii) ο κόμβος δέκτη δεν λαμβάνει κανένα πλαίσιο δεδομένων για το χρονικό διάστημα `macDSMEGTSExpirationTime` (προκαθορισμένος χρόνος αναμονής με τιμή προεπιλογής 7) σε διαδοχικά πολλαπλά υπερπλαίσια, (iii) η ποιότητα του συνδέσμου είναι κακή, δηλαδή, δεν λαμβάνεται πλαίσιο επιβεβαίωσης για διαδοχικά πολλαπλά υπερπλαίσια για το χρονικό

διάστημα `macDSMEGTSEExpirationTime`. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, πρέπει να εκχωρηθεί το DSME-GTS πρέπει να εκχωρηθεί.

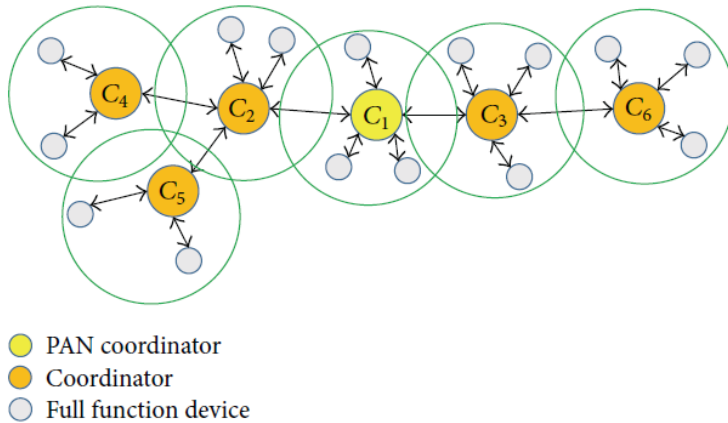
Για τη διαχείριση των DSME-GTS, κάθε κόμβος αποθηκεύει δύο δομές δεδομένων, δηλαδή τον Πίνακα ανάθεσης της κατανομής καναλιών (DSME Allocation Channel Table) και το Bitmap τοποθεσίας της χρονοθυρίδας (DSME Slot Allocation Bitmap). Αναλυτικά, ο πρώτος είναι ένας πίνακας που περιέχει τα ακόλουθα δεδομένα για κάθε DSME-GTS που έχει εκχωρηθεί στον κόμβο:

- Αναγνωριστικό Υπερπλασίου (Superframe ID)
- Αναγνωριστικό θυρίδας (Slot ID)
- Αναγνωριστικό καναλιού (Channel ID). Στη λειτουργία προσαρμογής καναλιού, αυτό το πεδίο περιέχει τον αριθμό καναλιού (δηλαδή το φυσικό κανάλι) του DSME-GTS. Στη λειτουργία αναπήδησης καναλιού, το πεδίο περιέχει τη μετατόπιση καναλιού του κόμβου λήψης.
- Κατεύθυνση μετάδοσης, δηλ. Μετάδοση ή Λήψη (Tx/Rx)
- Τύπος, δηλ. κανονικός, DSME-GTSR, ή GACK1
- Επίπεδο προτεραιότητας (Priority Level), δηλαδή Υψηλό ή Χαμηλό (High/Low).
- Διεύθυνση του κόμβου στο άλλο άκρο της επικοινωνίας
- Μετρητής αδράνειας (IDLE Counter), δηλαδή ο αριθμός αδρανών πολλαπλών υπερπλασίων από την τελευταία χρήση του DSME-GTS.
- Ποιότητα Καναλιού

Αντίθετα, το Bitmap κατανομής θυρίδας του DSME είναι ένα bitmap (ομάδα bits) που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των DSME-GTS στο πολλαπλό υπερ-πλαίσιο (multi-superframe) που έχει εκχωρηθεί στον κόμβο και στους γείτονές του με αναπήδηση. Στη λειτουργία προσαρμογής καναλιού, αυτό το bitmap περιέχει ένα bit για κάθε πιθανό ζεύγος (ch,ts), υποδεικνύοντας εάν το φυσικό κανάλι ch, κατά τη διάρκεια του GTS ts, είναι σε χρήση (τιμή 1) ή ανενεργό (τιμή 0). Για παράδειγμα, για ένα υπερπλαίσιο που περιέχει 7 GTS, το bitmap περιέχει  $7 \times 16 = 112$  bits. Αντίθετα, στη λειτουργία Αναπήδησης καναλιού, δεδομένου ότι μόνο το κανάλι που καθορίζεται από την ακολουθία αναπήδησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια ενός GTS, το bitmap είναι μικρότερο και απλώς υποδεικνύει εάν κάθε GTS στο multi-superframe χρησιμοποιείται ή είναι ελεύθερο.

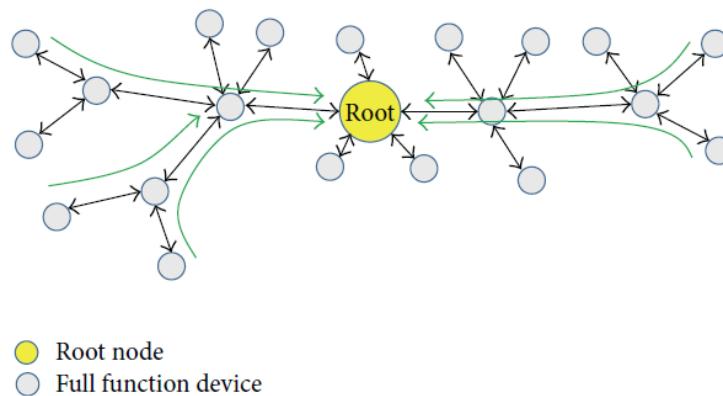
### 1.6.6. Διαφορές του DSME και του TSCH

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ DSME και TSCH παρουσιάζεται στη διαδικασία δημιουργίας των συνδέσεων του δικτύου. Το σχήμα 11 παρουσιάζει τη γενική διαδικασία δημιουργίας δικτύου στο DSME. Η κατανομή των θυρίδων και η επιλογή του συντονιστή δικτύου γίνεται από τους μεμονωμένους κόμβους. Επιπλέον, το αρχικό κόστος του DSME είναι χαμηλό, επειδή κάθε συντονιστής κατέχει μόνο τον σχηματισμό δικτύου και πληροφορίες προγραμματισμού που αφορούν στο υποδέντρο του. Έτσι, το δίκτυο δεν περιορίζεται σε μια ιεραρχική τοπολογία. Η τοπολογία δικτύου μπορεί επίσης να αναπτυχθεί σε DSME-enabled PAN [36]. Αυτή η δυνατότητα μειώνει ουσιαστικά την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο για εφαρμογές περιοδικής παρακολούθησης σε multihop περιβάλλοντα, καθώς ο αριθμός των κόμβων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την επιλογή των κατάλληλων γειτονικών συσκευών και τον προγραμματισμό GTS.



Σχήμα 11: Σχηματισμός διασύνδεσης του δικτύου με χρήση του DSME

Αντίθετα, στον IEEE 802.15.4e TSCH τύπο λειτουργίας, ένα κεντρικό σχέδιο οργάνωσης του MAC διαχειρίζεται το σχηματισμό του δικτύου, την κατανομή θυρίδων, και την επικοινωνία δεδομένων από τους κεντρικούς προς του απομακρυσμένους κόμβους. Το σχήμα 12 δείχνει το γενικό δίκτυο που σχηματίζεται στη λειτουργία με το TSCH. Ο κεντρικός κόμβος γνωρίζει όλες τις πληροφορίες των κόμβων και διαδρομών, και μπορεί να εξασφαλίσει υψηλή αξιοπιστία μετάδοσης σε ένα δίκτυο μεγάλης κλίμακας που οι κόμβοι του δεν εμφανίζουν κινητικότητα. Ωστόσο, επειδή οι κεντρικοί κόμβοι εμπλέκονται σε όλη τη διαδικασία, υπάρχει ένα μειονέκτημα δεδομένου ότι το αρχικό κόστος για την κατανομή των θυρίδων είναι πολύ υψηλό. Επιπλέον, εάν υπάρξει αλλαγή στο δίκτυο, η υποβάθμιση στην αποδοσή του είναι σημαντική.



Σχήμα 12: Σχηματισμός διασύνδεσης του δικτύου με χρήση του TSCH

# 2

## Ανοιχτά Θέματα του πρωτοκόλλου 802.15.4 DSME

### **2.1. Οι επιλεκτικοί αλγόριθμοι καθορισμού χρονοθυρίδων (sophisticated slot scheduling mechanisms)**

Για τον προγραμματισμό των χρονοθυρίδων απαιτείται ένας εξελιγμένος αλγόριθμος για την ανάθεση και τον καθορισμό στο χρόνο και στο πεδίο της συχνότητας, για τις συσκευές που βασίζουν την επικοινωνία τους στο πρότυπο DSME.

Ενώ η τεχνική με το πρότυπο DSME καθορίζει μηχανισμούς για την κατανομή και την επαναδιάθεση των θυρίδων με καταναμημένο τρόπο, το πρότυπο δεν προσδιορίζει τις χρονοθυρίδες που θα πρέπει να κατανεμηθούν. Αυτό αποτελεί θέμα που θα πρέπει να καλυφθεί από τα ανώτερα επιπέδα της διαστρωμάτωσης της υλοποίησης των συσκευών, που πρέπει να λάβουν υπόψη τους τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Κατά πρώτον, απαιτείται για τον λόγο αυτό ένα πολύπλοκο χρονοδιάγραμμα για ένα δίκτυο με υψηλή ζήτηση κίνησης, έτσι ώστε να καταστεί δυνατή μια αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων του. Τα απλά χρονοδιαγράμματα μπορεί να είναι επαρκή για δίκτυα με χαμηλή κίνηση, αλλά και για κίνηση με υψηλή διακύμανση και μεταβολές (fluctuation) θα πρέπει να γίνονται πολύπλοκοι υπολογισμοί κατ' απαίτηση και δυναμικά (on demand). Κατά τρίτον, η αστάθεια μίας δικτυακής τοπολογίας είναι σημαντική για την απαιτούμενη απόδοση της προσέγγισης του χρονο-προγραμματισμού των θυρίδων των συσκευών. Για παράδειγμα, σε δίκτυα με πολλούς κόμβους που καλύπτουν μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή, οι συχνές αλλαγές στο χρονοδιάγραμμα των θυρίδων μετάδοσης - λήψης είναι αναπόφευκτες. Αυτό γίνεται ακόμη πιο εμφανές σε περίπτωση κινητικότητας των χρηστών εντός του δικτύου.

Οι μέθοδοι για τον χρονο-προγραμματισμό των θυρίδων, είναι ένα θέμα που μελετάται εκτενώς στην ερευνητική βιβλιογραφία, προσπαθώντας να καλύψει τα κενά του προτύπου. Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις μπορεί να κατηγοριοποιηθούν σε κεντρικές (centralized) και



αποκεντρωμένες (decentralized) προσεγγίσεις για την ανάθεση των χρονο-θυρίδων. Σε μια κεντρικοποιημένη προσέγγιση [14] – [18], τα στατιστικά στοιχεία για κάθε σύνδεση στο δίκτυο συλλέγονται σε μια κοινή οντότητα. Στη συνέχεια υπολογίζεται ένα επαρκές χρονοδιάγραμμα που θα διανεμηθεί σε όλες τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο. Αποκτώντας έτσι τη συνολική γνώση λειτουργίας του δικτύου, είναι πιο εύκολο να υπολογιστούν τα βελτιστοποιημένα χρονοδιαγράμματα επικοινωνίας για όλες τις συσκευές. Ωστόσο, αυτό απαιτεί τη συλλογή της κατάστασης λειτουργίας όλων των συσκευών του δικτύου, καταλήγοντας τη συνολική πληροφορία σε μία μόνο οντότητα. Το γεγονός αυτό εισάγει υψηλό υπολογιστικό κόστος, καθιστώντας τη μέθοδο ακατάλληλη για μεγάλης κλίμακας δίκτυα. Αυτό δυσκολεύει ακόμη περισσότερο την εφαρμογή των μεθόδων απόδοσης χρονο-θυρίδων, όταν η τοπολογία ή η ποιότητα της σύνδεσης αλλάζει επειδή συνήθως απαιτείται επανάληψη της όλης διαδικασίας.

Στην αποκεντρωμένη προσέγγιση [19] – [20], ο χρονοπρογραμματισμός των θυρίδων υλοποιείται με βάση τη λήψη τοπικών αποφάσεων. Αυτές οι μέθοδοι μπορεί να μην επιτυγχάνουν βέλτιστα χρονοδιαγράμματα, αλλά οι προσεγγίσεις που επιτυγχάνουν είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για μεγάλα ή ασταθή δίκτυα. Στο πρόβλημα εισέρχονται επίσης υβριδικές προσεγγίσεις όπως αυτές που παρουσιάζονται στις ερευνητικές εργασίες [21] – [22]. Οι υβριδικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούν κατανεμημένους αλγόριθμους που δεν απαιτούν κεντρική οντότητα για τον υπολογισμό του χρονοδιαγράμματος. Αυτός είναι ένας τρόπος με τον οποίο μειώνονται σημαντικά τα υπολογιστικά κόστη, αλλά οι μεμονωμένες και ανενεργές συνδέσεις μπορεί να εξακολουθούν να επηρεάζουν το χρονοδιάγραμμα σε μεγάλα τμήματα του δικτύου.

### 2.1.1. Χρονοπρογραμματισμός με κεντρικοποιημένες τεχνικές διαχείρισης

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τεχνικές κεντρικοποιημένου χρονο-προγραμματισμού των θυρίδων για το πρότυπο DSME [37] – [41]:

Πίνακας 2: Πρωτόκολλα κεντρικοποιημένου χρονοπρογραμματισμού θυρίδων στο DSME

Title (author)	Characteristics	Remarks
MSS	Multichannel superframe scheduling and beacon scheduling for avoiding beacon collision	(1) Does not support network mobility (2) Poor performance in a large-scale network
TreeMAC	Tree-based topology and slot allocation using round-robin	(1) Cannot assign communication slots in parallel (2) Poor performance in a large-scale network
Graph coloring	Scheduling using physical collision graphs and graph coloring	(1) Packet-flooding problem for scheduling (2) Poor performance in a large-scale network
Ahn et al.	Proposes a clustering approach based on group management using transmission power control	(1) Good performance in multitree topology (2) Does not support network mobility
Yeh et al.	Proposes stochastic beacon scheduling in order to reuse beacon slots in the network	(1) Good performance in a large-scale network (2) Handles the network interferences and reduces latency

Η ερευνητική πρόταση MSS [37] αφορά στον χρονο-προγραμματισμό των θυρίδων των πολλαπλών υπερ-πλαισίων καθώς και στον χρονο-προγραμματισμό του εκπεμπόμενου Beacon, με στόχο την αποφυγή των συγκρούσεων. Η προτεινόμενη μέθοδος είναι εφαρμόσιμη σε δίκτυα μικρής κλίμακας. Επίσης, η μέθοδος δεν επιτυγχάνει βέλτιστη οργάνωση του χρονο-προγραμματισμού, όταν οι συσκευές του δικτύου αναπτύσσουν προφίλ κινητικότητας.

Το TreeMAC [38], βασίζει τον χρονο-προγραμματισμό και την οργάνωση των θυρίδων χρησιμοποιώντας μια οργάνωση δέντρου, με τεχνικές Round-Robin. Οι τεχνικές Round-Robin αφορούν στη χρήση κυκλικής και επαναλαμβανόμενης ανάθεσης θυρίδων στους

χρήστες ενός δικτύου, παρέχοντας ίσες ευκαιρίες μετάδοσης στους συμμετέχοντες. Η μέθοδος αποτυγχάνει στον παράλληλο χρονο-προγραμματισμό (σειριακή εκτέλεση του αλγορίθμου) για πολλές συσκευές δικτύου ταυτόχρονα. Επιπλέον η μέθοδος εμφανίζει χαμηλή απόδοση για τη διαχείριση δικτύων μεγάλης κλίμακας.

Η μέθοδος Graph Coloring [39], βασίζει την ανάθεση των θυρίδων με βάση τα προφίλ συγκρούσεων, κάνοντας έτσι τη χαρτογράφηση για τη διαχείριση των συσκευών του δικτύου. Η μέθοδος για την εφαρμογή της προκαλεί υπερχειλίση (flooding) σε μεταδόσεις πακέτων που απευθύνονται για τη χαρτογράφηση των κόμβων του δικτύου. Επιπλέον αυτή η μέθοδος δεν αποδίδει σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας.

Η προτεινόμενη από τους Ahn et al [40] μέθοδος, περιορίζει την εφαρμογή της σε ομάδες (groups), με κριτήριο τα επίπεδα ελέγχου ισχύος που απαιτούνται για την εκπομπή. Η μέθοδος αποδίδει καλά σε πολυ-επίπεδες τοπολογίες δικτύων, χωρίς να υποστηρίζει όμως προφίλ κινητικότητας για τους χρήστες.

Η προτεινόμενη μέθοδος από τους Yeh et al [41], χρησιμοποιεί στοχαστικά προφίλ χρονο-προγραμματισμού για τα εκπεμπόμενα beacons, με στόχο την επαναχρησιμοποίηση των θυρίδων (με μια πιθανότητα λειτουργίας χωρίς συγκρούσεις). Η μέθοδος αποδίδει αρκετά καλά σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα. Η μέθοδος χειρίζεται επίσης αρκετά καλά τα θέματα παρεμβολών μειώνοντας τις καθυστερήσεις (delay) επικοινωνίας – μετάδοσης.

Μια άλλη διάκριση μεταξύ των προσεγγίσεων είναι η θεώρηση της ετερογενούς κίνησης (heterogeneous traffic). Ενώ προσεγγίσεις χωρίς γνώση του δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθούν αρκετά εύκολα και ακόμη και χωρίς καμία διαχείριση (Orchestra [23]), η επιτεύξιμη απόδοση είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη για χρονο-προγραμματισμούς που λαμβάνουν υπόψη την κίνηση των κόμβων του δικτύου [24]. Το αρνητικό αποτέλεσμα είναι επίσης γνωστό ως διοχέτευση (tunneling) [25], σε δίκτυα με μόνο έναν (ή λίγους) αποδέκτες κίνησης. Έτσι, συνίσταται ότι για καλύτερα αποτελέσματα στον χρονοπρογραμματισμό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η εκτιμώμενη κίνηση πάνω σε μία σύνδεση [26] ή το τρέχον επίπεδο ουράς (queue) στους κόμβους [27].

Άλλα πολλά υποσχόμενα χαρακτηριστικά για τον χρονοπρογραμματισμό περιλαμβάνουν την απομόνωση της κίνησης (traffic isolation) [28], ή την ελαχιστοποίηση στην κατανάλωση ισχύος των κόμβων [29]. Στην ερευνητική εργασία [30], αναλύονται σημαντικές ιδιότητες των υπαρχουσών μεθόδων συγκριτικά μεταξύ τους. Η επιλογή της μεθόδου που χρησιμοποιείται σε μια πραγματική εφαρμογή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις απαιτήσεις. Ωστόσο, υπάρχει μια συνεχής προσπάθεια για ανάπτυξη τυποποιημένων προσεγγίσεων για τη βελτίωση της διαλειτουργικότητας και επαναχρησιμοποίησης των πόρων του δικτύου, που οδηγεί για παράδειγμα στα SF1 [31] και SFX [32], με το τελευταίο να είναι αντικείμενο προς προτυποποίηση [33].

### **2.1.2. Χρονοπρογραμματισμός με αποκεντρωμένη διαχείριση βάσει της κίνησης**

Στην προσέγγιση αυτή, προτείνεται μια μέθοδος αποκεντρωμένης διαχείρισης των χρονοθυρίδων, λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση των κόμβων του δικτύου. Αυτό απαιτεί σαφείς πληροφορίες από το επίπεδο δρομολόγησης (routing layer) των συσκευών, σε αντίθεση με τους προηγούμενους αλγόριθμους. Οι μέθοδοι αυτές δεν απαιτούν καμία πρόσθετη ανταλλαγή μηνυμάτων εκτός από το μηχανισμό handshake του DSME για την ανάθεση χρονο-θυρίδας. Αυτό καθιστά τους αλγόριθμους αυτούς ως επεκτάσιμους και ευέλικτους (scalable – flexible), ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε επίπεδο δρομολόγησης, συμπεριλαμβανομένων των πρωτοκόλλων RPL και GPSR. Ωστόσο, οι αλγόριθμοι αυτοί μπορούν να προσαρμόζονται δυναμικά στο τρέχον φορτίο του δικτύου με πρόβλεψη του μελλοντικού ποσού κίνησης ανά σύνδεση. Ειδικά οι αλγόριθμοι αυτού του

τύπου δεν καταλήγουν σε συγκρούσεις λόγω του μηχανισμού handshake (χειραψίας) για την κατανομή των χρονο-θυρίδων.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τεχνικές αποκεντρωμένου χρονο-προγραμματισμού για το DSME [42] – [46]:

Πίνακας 3: Πρωτόκολλα αποκεντρωμένου χρονοπρογραμματισμού θυρίδων για το DSME

Title	Characteristics	Remarks
DRAND	Random head election and communication with neighborhood nodes and empty slot allocation technique	(1) Effectively operates only within a limited hop (2) Poor performance in a large-scale network
DB-TDMA	Distributed scheduling using topology depth	(1) Reduces scheduling overhead using depth info. (2) Low reliability due to beacon collisions
TASA	Proposes a network-forming topology with graph coloring, and traffic-aware scheduling using queue length	(1) Operates narrowly distributed scheduling (2) Scheduling overhead on network depth
DeTAS	Similar to TASA, distributed scheduling using a multigraph. Dividing and grouping methods	(1) Does not optimally assign communication slots (2) Good performance in complex tree topology
TDBS	Cluster-based beacon scheduling, likely TDMA, using a beacon-only period for beacon collision avoidance	(1) Does not support network mobility (2) Poor performance in a large-scale network

Ο αλγόριθμος DRAND [42], βασίζει την επιλογή των χρονο-θυρίδων επικοινωνίας για γειτονικούς κόμβους σε τυχαία επιλογή ως προς τις διαθέσιμες (άδειες) χρονο-θυρίδες. Η μέθοδος λειτουργεί ικανοποιητικά όταν προορίζεται για επικοινωνία σε δίκτυα με μικρό βήμα αναπήδησης (hop). Και αυτός ο αλγόριθμος πάσχει από χαμηλή απόδοση σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας.

Η μέθοδος DB-TDMA [43], εφαρμόζει κατανεμημένο χρονο-προγραμματισμό λαμβάνοντας υπόψη το βάθος της διασυνδεόμενης τοπολογίας (hops). Η μέθοδος μειώνει το υπολογιστικό φορτίο των επιλογών, δεδομένης της πληροφορίας του βάθους διασύνδεσης, αλλά πάσχει από συγκρούσεις στη μετάδοση των σημάτων Beacon.

Η μέθοδος TASA [44], βαδίζει σε οργάνωση του δικτύου με χαρτογράφηση τύπου graph coloring, καθώς επίσης λαμβάνει υπόψη για τον χρονο-προγραμματισμό των θυρίδων, τα μήκη των ουρών των κόμβων διασύνδεσης. Η μέθοδος αποδίδει σε στενά πλαίσια ως προς την κλίμακα ενός δικτύου, ενώ το υπολογιστικό της κόστος αυξάνεται καθώς αυξάνεται το βάθος των κόμβων του χαρτογραφούμενου δικτύου.

Ο αλγόριθμος DeTAS [45], μοιάζει στην λειτουργία με τον προηγούμενο αλγόριθμο. Χρησιμοποιεί πολυ-γράφους (multigraph) για την περιγραφή της τοπολογίας του δικτύου, προβαίνοντας σε ομαδοποιήσεις (grouping). Ο αλγόριθμος δεν αποδίδει βελτιστοποιημένα στην ανάθεση των χρονο-θυρίδων, αλλά εμφανίζει σχετικά καλή απόδοση σε πολύπλοκες και πολυ-επίπεδες δομές δικτύου.

Ο αλγόριθμος TDBS [46], οργανώνει σε σμήνη (clusters) τον χρονο-προγραμματισμό των beacons. Χρησιμοποιεί μόνο μία περίοδο για την αποφυγή συγκρούσεων. Και αυτός ο αλγόριθμος δεν υποστηρίζει την κινητικότητα των χρηστών στο δίκτυο, εμφανίζοντας επίσης χαμηλή απόδοση σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας.

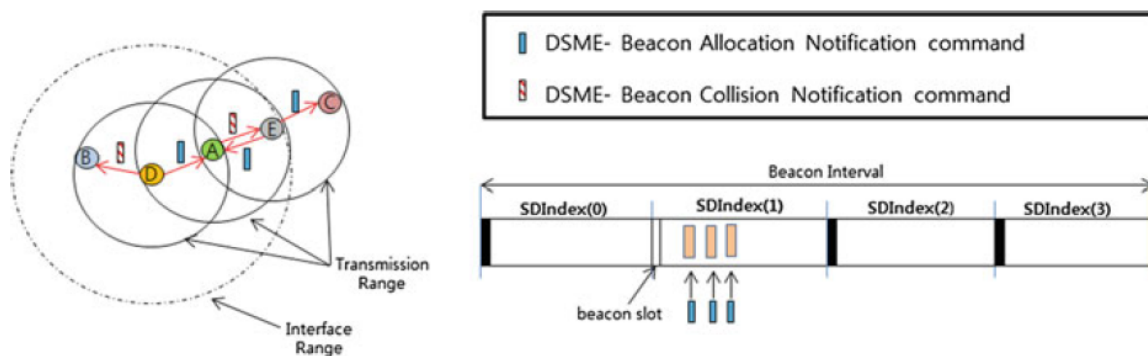
## 2.2. Ο χρονοπρογραμματισμός του EB στα δίκτυα DSME (Enhanced Beacon Scheduling of IEEE 802.15.4 DSME)

Το πρότυπο DSME περιλαμβάνει έναν νέο προγραμματισμό beacon για δίκτυα πλέγματος (grid networks). Αν και το DSME υποστηρίζει πολυ-καναλική χρήση, η λειτουργία πολλαπλών καναλιών περιορίζεται μόνο στην περίοδο χωρίς σύγκρουση (CFP) για τη χρήση του GTS. Στο υπερ-πλαίσιο (superframe) η λειτουργία επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα

μόνο κανάλι, έτσι ώστε το DSME να εστιάζει στην αποφυγή συγκρούσεων των beacon μεταξύ διαφορετικών WPAN. Με την εισαγωγή της μεθόδου χρονοπρογραμματισμού του beacon, διαφορετικοί συντονιστές PAN σε ένα σύνθετο δίκτυο πλέγματος, συγχρονίζονται με τη διεξαγωγή προγραμματισμού του beacon με βάση πολλαπλά υπερπλαίσια (δομή που επιτρέπει σε έναν αριθμό υπερπλαισίων να συνυπάρχουν σε ένα διάστημα beacon - BI). Στον προγραμματισμό beacon για το DSME, κάθε πιθανή συσκευή, εκτελεί πρώτα μια διαδικασία σάρωσης στα διαθέσιμα κανάλια. Κάθε συσκευή DSME διαθέτει πίνακα διάρκειας του superframe (Superframe Duration - SD) για τη διαχείριση των πληροφοριών SD των γειτονικών κόμβων. Επιπλέον, οι πληροφορίες SD ενός κόμβου αντιπροσωπεύονται ως bitmap, συμπεριλαμβανομένου σε ένα πεδίο macSDBitmap του πλαισίου beacon. Αυτό μεταδίδεται περιοδικά για ειδοποίηση της τρέχουσας πληροφορίας κατανομής SD όλων των γειτονικών συσκευών. Εάν ένας υποψήφιος κόμβος λαμβάνει ένα beacon ενός ενεργού κόμβου στον οποίο έχει ήδη εκχωρηθεί το ευρετήριο SD, ο κόμβος επιλέγει μια κενή υποδοχή που αναπαρίσταται σε τιμή λογικού '0' στο λαμβανόμενο macSDBitmap, και θέτει το αντίστοιχο bit σε τιμή λογικού '1' και εκπέμπει ειδοποίηση εκχώρησης DSME-Beacon προς τους γείτονές του. Οι γειτονικοί κόμβοι λαμβάνει την εντολή ειδοποίησης, πρώτα ελέγχουν εάν το bit χρησιμοποιείται από άλλους γειτονικούς κόμβους και, στη συνέχεια, ενημερώνουν τον πίνακα ευρετηρίων SD, εάν η θυρίδα είναι διαθέσιμη.

Ωστόσο, στη διαδικασία εκχώρησης ευρετηρίου SD, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μια σύγκρουση μπορεί να προκύψει όταν περισσότερες από δύο συσκευές επιχειρούν να καταλάβουν την ίδια θυρίδα. Το σχήμα 13, απεικονίζει αυτήν την κατάσταση σύγκρουσης beacon. Όταν οι κόμβοι D και E, που είναι γείτονες του κόμβου A αλλά δεν μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους, λαμβάνουν ένα beacon του κόμβου A, και οι δύο μπορούν να επιλέξουν την ίδια θυρίδα από τις κενές θέσεις στο SDbitmap (γνωστό ως πρόβλημα του κρυφού κόμβου). Επομένως, οι δύο κόμβοι έχουν το ίδιο ευρετήριο SD για τη θυρίδα μετάδοσης του beacon. Αφού τα beacons των δύο κόμβων συγκρούονται, ο κόμβος A δεν μπορεί να αντιληφθεί κανένα σήμα beacon που μεταδίδεται από τους δύο κόμβους. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, το DSME χρησιμοποιεί ένα πρόσθετο πλαίσιο, το DSMEBeacon ως εντολή ειδοποίησης σύγκρουσης. Εάν οι δύο κόμβοι θέλουν να χρησιμοποιήσουν το ίδιο ευρετήριο SD με την αποστολή μηνύματος ειδοποίησης κατανομής, ο κόμβος A επιτρέπει την πρώτη άφιξη για να εκχωρήσει την θυρίδα στο SD, και μετά από αυτό εάν κάποιος άλλος κόμβος ζητήσει να χρησιμοποιήσει την ήδη κατειλημμένη θυρίδα, ο κόμβος A κάνει τον νέο αιτούντα να επιλέξει άλλη θέση με αποστολή μιας εντολής ειδοποίησης σύγκρουσης. Τελικά, αυτή η διαδικασία μπορεί να αποφύγει την επικάλυψη της κατανομής των ευρετηρίων SD μεταξύ γειτονικών κόμβων. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια απλή αλλά ισχυρή μέθοδο για προγραμματισμό του beacon που δεν επιλύεται στο IEEE802.15.4. Συγκεκριμένα, είναι πιθανό ότι η διάρκεια υπερπλαισίου δύο γειτονικών κόμβων καθώς και οι άμεσα γειτονικοί κόμβοι να προγραμματίζονται με καταναμημένο τρόπο [35].

Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι ο αλγόριθμος προγραμματισμού beacon του DSME έχει κάποια κρίσιμα προβλήματα σε μια ρεαλιστική υλοποίηση δικτύου WPAN. Ένα από τα σημαντικά προβλήματα στο αρχικό πρότυπο του DSME, είναι οι συγκρούσεις μεταξύ των πλαισίων εντολών, όπως η ειδοποίηση εκχώρησης και η ειδοποίηση σύγκρουσης. Ένα άλλο πρόβλημα είναι μια σύγκρουση beacon που προκαλείται από τη χρήση της επικαλυπτόμενης θυρίδας SD. Αυτό συμβαίνει επειδή ένας κόμβος εκχωρεί τη θυρίδα ευρετηρίου SD για τον εαυτό του με βάση τη λήψη της πληροφορίας SDbitmap.

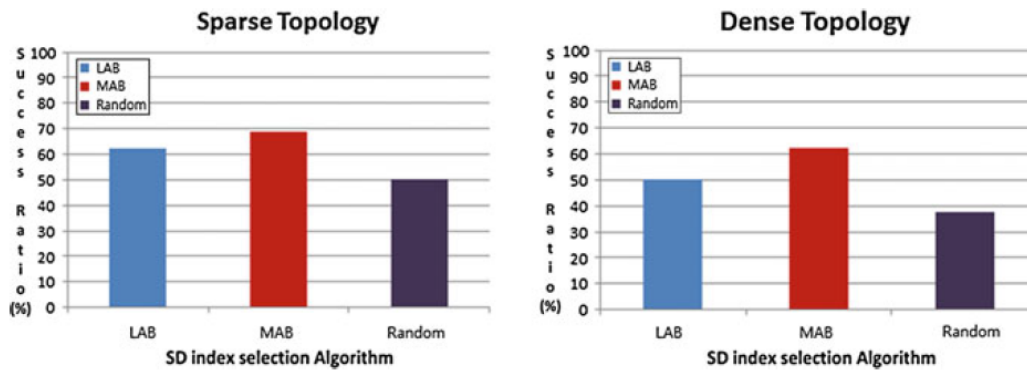


Σχήμα 13: Η διαδικασία αποφυγής της σύγκρουσης Beacon στο DSME

Έτσι, χρησιμοποιείται πρώτα μια ειδοποίηση κατανεμημένης άδειας, η οποία βελτιώνει την ειδοποίηση σύγκρουσης που προτείνεται στο αρχικό πρότυπο του DSME. Το DSME πρότυπο στέλνει μία ειδοποίηση σύγκρουσης μόνο όταν η θυρίδα SD που εκχωρήθηκε πρόσφατα επικαλύπτεται με αντίστοιχη άλλου γειτονικού κόμβου. Η μέθοδος κατανεμημένης άδειας επιτρέπει μόνο στον κόμβο που λαμβάνει ένα μήνυμα ειδοποίησης άδειας μετά την αποστολή της ειδοποίησης κατανομής, για να ολοκληρωθεί η κατανομή ευρετηρίου SD. Ένας υποψήφιος κόμβος, ο οποίος στέλνει μήνυμα ειδοποίησης κατανομής, θα πρέπει να περιμένει μέχρι να ληφθεί μια ειδοποίηση άδειας, από τον γειτονικό ενεργό κόμβο, ο οποίος λαμβάνει την ειδοποίηση εκχώρησης του υποψήφιου κόμβου, και στη συνέχεια ελέγχει εάν το ζητούμενο ευρετήριο SD είναι διαθέσιμο ή όχι. Τότε, εάν η θυρίδα είναι διαθέσιμη, εκπέμπει ειδοποίηση άδειας. Οι γειτονικοί κόμβοι γύρω από τον ενεργό κόμβο, ο οποίος εκπέμπει ειδοποίηση άδειας, γνωρίζουν επίσης τις πληροφορίες του ευρετηρίου SD του νέου κόμβου. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των συγκρούσεων. Επιπλέον, αναμένεται να ανταπεξέλθει αρκετά καλά σε σύνθετα μοντέλα τοπολογίας δικτύων.

Αυτή η βελτίωση αναμένεται να αυξήσει σημαντικά την απόδοση του αρχικού προτύπου DSME. Ωστόσο, αντίθετα με την προσδοκία, τα πειραματικά αποτελέσματα είναι χειρότερα από αυτά που επιτυγχάνει το αρχικό πρότυπο του DSME. Όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί, ο λόγος επιτυχούς προγραμματισμού beacon δείχνει χαμηλότερη τιμή τόσο στα αραιά όσο και στα πυκνά μοντέλα δικτύων.

Ως αποτέλεσμα του προβλήματος ανάλυσης, προκύπτει ένα πρόβλημα σχετικά με την πρώτη αναθεώρηση. Η μέθοδος κατανεμημένης άδειας μπορεί να αποφύγει τις συγκρούσεις μαθαίνοντας τις πληροφορίες του ευρετηρίου SD δύο κόμβων που βρίσκονται σε απόσταση μετάδοσης μεταξύ τους, μέσω μιας ειδοποίησης άδειας. Σε αυτόν τον μηχανισμό όμως όλοι οι κόμβοι, που λαμβάνουν ένα μήνυμα ειδοποίησης κατανομής, έχουν το δικαίωμα αποστολής ειδοποίησης άδειας (ακόμη και οι κόμβοι που δεν χρειάζεται να εκχωρηθούν). Επομένως, διαθέτουν την ίδια θυρίδα SD και τελικά συμβαίνει η σύγκρουση του beacon που η μέθοδος επιθυμούσε να αποφύγει. Οι συγκρούσεις συμβαίνουν επίσης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η μέθοδος επιλογής του ευρετηρίου SD.



Σχήμα 14: Πειραματικά αποτελέσματα για τη σύγκριση beacon

### 2.3. Η λειτουργία με αναπήδηση και η διατήρηση των χρονοθυρίδων (*multi-hop communication and scheduling scheme*)

Για επικοινωνία μέσω χρονο-προγραμματισμού μεταδόσεων σε πολλαπλούς κόμβους αναπήδησης (*multi-hop*), το σύστημα πρέπει να διατηρήσει τις ειδικές εκχωρήσεις GTS σε όλο το μήκος της αλυσίδας μετάδοσης (*hops*) για τη συμμόρφωση της μετάδοσης με διάφορες απαιτήσεις ποιότητας (QoS). Η δυσκολία σε αυτό προκύπτει, καθώς οι συντονιστές (*coordinators*) δεν έχουν τον ίδιο αριθμό συσχετισμένων συσκευών μεταξύ τους και η κίνηση των κόμβων μεταβάλλεται στο δίκτυο. Έτσι, ο μηχανισμός χρονο-προγραμματισμού πρέπει να είναι ευαισθητοποιημένος για αποκεντρωμένη και επεκτάσιμη λειτουργία σε όλο το δίκτυο.

Οι ενημερώσεις *multi-hop* έχουν αρνητική επίδραση επίσης στην κατανάλωση ισχύος των συσκευών, επειδή οι κόμβοι πρέπει να διαβιβάζουν δεδομένα σε άλλους κόμβους ανεξάρτητα από την ανάγκη αποστολής δικών τους δεδομένων. Κατά τη διαδικασία ανάπτυξης τέτοιων δικτύων θα πρέπει να κανονιστεί η εμβέλεια των κόμβων δηλ, να καθοριστεί ένας μόνο πομπός για ενημέρωση όλων των συσκευών ταυτόχρονα (μειώνοντας έτσι την καταναλισκόμενη ισχύ στο συνολικό σύστημα). Η διάδοση δεδομένων μέσω *multi-hop* σε ένα μεγάλο ασύρματο δίκτυο μπορεί επίσης να είναι πολύ χρονοβόρα.

Για την επίτευξη γρήγορης διάδοσης καθώς και χαμηλού κόστους συντήρησης του δικτύου, οι κόμβοι θα πρέπει να προσαρμόζουν το εύρος των περιοχών δράσης τους. Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι στο δίκτυο επικοινωνούν πιο συχνά όταν υπάρχει ενημέρωση. Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα είναι η υπόθεση ότι όλοι οι κόμβοι ενός δικτύου είναι πάντοτε ενεργοί (*active state*). Λόγω αυτού του γεγονότος, οι κόμβοι δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά με χρήση συσσωρευτών (*μπαταριών*) λόγω της υψηλής κατανάλωσης ισχύος που προκύπτει από τη συνεχή ακρόαση για πληροφορίες και ενημερώσεις από τους γειτονικούς τους κόμβους. Η πιθανότητα να λείπουν πληροφορίες ενημέρωσης από έναν κόμβο που δεν είναι πάντα ενεργοποιημένος (*inactive or sleep state*) και επανεκκινείται περιστασιακά, είναι πιθανή. Ένας κόμβος που μετέχει στο δίκτυο DSME χρειάζεται να ακούει για πακέτα ενημέρωσης μέχρι να λάβει ένα πακέτο μέσα σε καθορισμένο χρόνο ενημέρωσης. Ένα δίκτυο θα πρέπει να καθορίζει πολύ χαμηλούς κύκλους λειτουργίας για εξοικονόμηση ενέργειας. Επομένως, οι κόμβοι είναι τις περισσότερες φορές σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας (*sleep*) και δεν είναι συχνά σε θέση να λαμβάνουν μηνύματα.

## **2.4. Η Διαχείριση των Χρονοθυρίδων (Slot Management in DSME)**

Η διαχείριση των χρονοθυρίδων [47] στο πρότυπο DSME δεν ορίζεται απόλυτα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα προβλήματα όπως, η ασυνεπής κατανομή bitmaps για τις θυρίδες, η αποτυχία της κατανομής των GTS σε τοπολογία με κόμβους σε κινητικότητα, καθώς και συγκρούσεις κατά τη διαχείριση των μηχανισμών handshake στη φάση του CAP.

## **2.5. Οι χρονικές περίοδοι ανενεργότητας (sleep periods in multi-superframe structure of DSME)**

Η απουσία περιόδων αναστολή λειτουργίας (sleep periods) στο multisuperframe είναι η πρωτογενής αιτία για την κατανάλωση ισχύος στο πρότυπο DSME. Η μείωση της χρονικής διάρκειας του CAP επηρεάζει ελάχιστα αυτό το πρόβλημα, επιτρέποντας στις συσχετισμένες συσκευές να αδρανούν κατά τη διάρκεια του DSME-GTS όταν δεν είναι σε κατάσταση συγχρονισμένης λήψης ή εκπομπής σε μία θυρίδα. Ωστόσο, οι συντονιστές, πρέπει να παραμείνουν ενεργοί για μεγαλύτερη διάρκεια, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου τους. Ως εκ τούτου, απαιτούνται περαιτέρω έρευνες για να συνδυάσουν την ενεργειακή απόδοση και τις χαμηλές καθυστερήσεις μετάδοσης στο DSME.

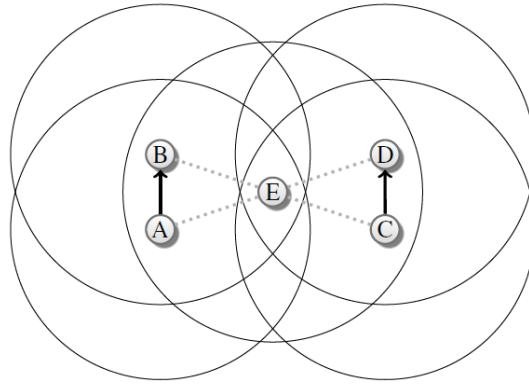
## **2.6. Η απομάκρυνση των δεσμευμένων χρονοθυρίδων (Removing Occupied Slots from SAB)**

Η διαδικασία διαχείρισης που περιγράφεται στο πρότυπο DSME στοχεύει στην αποφυγή όλων των συγκρούσεων των θυρίδων, ενώ ανασχεδιάζει και χειρίζεται περισσότερες περιπτώσεις από όλες τις προσεγγίσεις προγραμματισμού που χρησιμοποιεί το πρότυπο TSCH. Ειδικά αυτό συμβαίνει όσον αφορά στις καταστάσεις κρυφών κόμβων. Όμως έχει κάποια προβλήματα σε ειδικές περιπτώσεις, που πρέπει να επιλυθούν για μια πλήρως εύρωστη διαχείριση των θυρίδων.

Μια κατάσταση που μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα απεικονίζεται στο σχήμα 15. Σε αυτήν την περίπτωση δύο ζεύγη συσκευών A/B και C/D χρησιμοποιούν την ίδια θυρίδα χρόνου και συχνότητας. Δεδομένου ότι δεν βρίσκονται σε κοντινή εμβέλεια μεταξύ τους, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα και βελτιώνει ακόμη και τη χωρική επαναχρησιμοποίηση των ίδιων θυρίδων. Ο κόμβος E ενημερώθηκε κατά τη διαδικασία του μηχανισμού handhaske για την ανάθεση μίας θυρίδας που δεν θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Εάν τώρα, για παράδειγμα, ο C αποφασίσει να αποδεσμεύσει αυτήν τη θυρίδα, εκτελεί μια χειραγία αποδεσμευσής της. Δεδομένου ότι ο κόμβος E δεν αποθηκεύει τις πληροφορίες για το ποιες γειτονικές συσκευές έκαναν κράτηση για τη θυρίδα, αυτή θα επισημανθεί ως διαθέσιμη, οδηγώντας σε μια ασυνεπή υποδοχή bitmap για την κατανομή (SAB).

Μια λύση στο πρόβλημα αυτό θα ήταν να χρησιμοποιηθεί ένας μετρητής αντί για ένα μόνο bit για την κράτηση, αλλά δεδομένου ότι οι καταστάσεις αυτές υποτίθεται ότι συμβαίνουν σπάνια και ο B θα στείλει ένα διπλό μήνυμα εκχώρησης ούτως ή άλλως εάν ο E προσπαθήσει να χρησιμοποιήσει τη θυρίδα, αυτό δεν αξίζει την επιπλέον σπατάλη απαιτούμενης μνήμης.



Σχήμα 15: Περίπτωση όπου μία θυρίδα θα εκχωρηθεί λανθασμένα από το SAB

## 2.7. Ατέρμηση φραγή των χρονοθυρίδων (Eternal Blocking of Slots)

Ένα πιο σοβαρό πρόβλημα που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για δίκτυα μεγάλης χρονικής διάρκειας με ασταθή τοπολογία, παρουσιάζεται στη συνέχεια. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτού του προβλήματος, αλλά όλες έχουν κοινό χαρακτηριστικό ότι οι θυρίδες δεν αφαιρούνται από το SAB, παρόλο που κανένα ζεύγος κόμβων δεν τις χρησιμοποιεί ακόμα. Στο πέρασμα του χρόνου, αυτό θα «γεμίσει» το SAB, έως ότου δεν είναι διαθέσιμες άλλες θυρίδες και δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί νέα κατανομή θυρίδας στο δίκτυο.

Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα, εάν οι συνθήκες επικοινωνίας του επιπέδου σήματος μεταξύ δύο κόμβων επιδεινωθούν σημαντικά. Ακόμα κι αν αυτό αναγνωρίζεται από τους κόμβους, αυτοί δεν είναι πλέον σε θέση να εκτελέσουν μια σωστή χειραγία κατανομής θυρίδας. Συγκεκριμένα, δεν θα αποσταλεί καμία απάντηση και κανένα μήνυμα ειδοποίησης για ενημέρωση των γειτονικών κόμβων, δηλώνοντας ότι μία θυρίδα δεν χρησιμοποιείται πλέον.

Η ίδια κατάσταση θα συμβεί σε περίπτωση κινητικότητας των κόμβων ή εάν ένας κόμβος που τροφοδοτείται από συσσωρευτή (μπαταρία) εξαντλήσει την ενέργειά του και κλείσει πριν κατανεμηθούν οι εκχωρημένες θυρίδες επικοινωνίας. Ενώ το τελευταίο θα μπορούσε να μετριαστεί αποθηκεύοντας το ACT (Allocation Counter Table) σε μόνιμη (μη πτητική – non volatile) μνήμη, απαιτείται μια γενική λύση για την αποφυγή του ατέρμονου αποκλεισμού των θυρίδων.

Μια πιθανή λύση θα μπορούσε να είναι η αφαίρεση των κατειλημμένων θυρίδων από το SAB που δεν τροποποιήθηκαν για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, χρησιμοποιώντας ένα επιπλέον bit ανά θυρίδα. Σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. περίπου μιας ώρας), αυτός ο ενδείκτης (flag) θα οριστεί για κάθε κατειλημμένη θυρίδα. Εάν δεν πραγματοποιήθηκε αντικατάσταση μετά από το προκαθορισμένο χρονικό διάστημα αναμονής, το bit παραμένει σε θέση (set) ακόμα, και έτσι η θυρίδα θα επισημανθεί ως ελεύθερη στο SAB. Φυσικά, ως προς το προηγούμενο θέμα η λειτουργία ανάθεσης θυρίδας θα πρέπει να βασιστεί στο διπλό μήνυμα κατανομής για να αποφευχθούν ασυνέπειες σε αυτήν την περίπτωση. Αυτή η λύση θα μπορούσε να βελτιωθεί με την ανάθεση θυρίδων μόνο για ορισμένο χρονικό διάστημα, μετά την πάροδο του οποίου, θα πρέπει να ανακατανεμηθούν.



## **2.8. Αργοπορημένη απομάκρυνση μη Έγκυρων Χρονοθυρίδων (Late Removal of Invalid Slots)**

Η χειραψία διαχείρισης θυρίδας εκτελείται κατά τη φάση πρόσβασης διενέξεων (CAP). Επομένως, οι συγκρούσεις και συνεπώς η απώλεια μηνυμάτων είναι αρκετά συχνές σε πυκνά δίκτυα με πολλές εκχωρήσεις και αναθέσεις. Σε περίπτωση που χαθεί μία ειδοποίηση, μόνο ένας από τους κόμβους της σύνδεσης θα εγγράψει τη θυρίδα στον πίνακα μετρητή της κατανομής (Allocation Counter Table - ACT). Το πρόβλημα αναλύεται σε βάθος στην εργασία [34], συμπεριλαμβανομένης μιας πρότασης για τη λύση αυτού του προβλήματος, προσθέτοντας ένα επιπλέον ενδείκτη (flag) στο ACT.

## **2.9. Η διαδικασία συσχέτισης των συσκευών στο DSME (Association Procedure in DSME)**

Στην τυπική λειτουργία IEEE 802.15.4e του προτύπου DSME, όταν πολλές μη συσχετισμένες συσκευές εκτελούν ανεξάρτητα μια παθητική σάρωση και εντοπίζουν ένα συντονιστή (coordinator) του PAN ταυτόχρονα, στέλνουν γρήγορα αιτήματα συσχέτισης χρησιμοποιώντας CSMA/CA μετά τη λήψη του πλαισίου beacon. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα κανάλι με πολλές μεταδόσεις και σοβαρό πρόβλημα συγκρούσεων.

Η λύση που προτείνεται στο παραπάνω πρόβλημα είναι η καθυστέρηση της αποστολής απάντησης στο μήνυμα συσχέτισης [48].

## **2.10. Η ανάγκη δημιουργίας αλγορίθμων για τη βελτίωση του QoS στο DSME (DSME QoS Improvement)**

Καθώς το επίπεδο MAC στο πρότυπο DSME έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει πολύπλοκες τοπολογίες (mesh), υπάρχει ανάγκη για αλγόριθμους προγραμματισμού για την υποστήριξη της πολυκαναλικής κατανομής θυρίδων. Ερευνητές στο [49] πρότειναν έναν κατανεμημένο αλγόριθμο για το πρότυπο DSME, με τον οποίο μπόρεσαν να επιδείξουν βελτίωση της απόδοσης κατά 15%, σε σύγκριση με άλλα MAC όπως το TSCH και το CSMA (και μάλιστα για το αρχικό πρότυπο DSME). Ο αλγόριθμος ελέγχθηκε στην πλατφόρμα QualNET [50] και επιβεβαιώθηκε ότι ήταν επίσης ικανός να μειώσει την κατανάλωση ισχύος των συσκευών, βελτιώνοντας τη διαθεσιμότητα θυρίδων επικοινωνίας.

Οι Kwang-il et al [51] έχουν αναπτύξει ένα νέο μοντέλο προγραμματισμού beacon στο πρότυπο DSME. Βασισμένοι σε πειραματικά αποτελέσματα αναλύουν τα προβλήματα και τους περιορισμούς του προτύπου DSME, δοκιμάζοντας μια ποικιλία από πειραματικές τοπολογίες για τον υπολογισμό της επιτυχούς κατανομής θυρίδων. Συμπεριλαμβάνοντας νέες δυνατότητες, όπως και η ειδοποίηση περιορισμένης άδειας (Link Limited Permission Notification – LLPN), μπόρεσαν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση και το QoS (Quality of Service) του δικτύου.

# 3

## Προτεινόμενες Τεχνικές Επίλυσης των Ανοικτών

### Θεμάτων του 802.15.4 DSME

#### **3.1. Ανοικτά Θέματα του προτύπου DSME**

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε ένα σημαντικό πλήθος από ανοικτά θέματα, τα οποία δεν καλύπτονται επακριβώς από το υπάρχον πρότυπο του DSME. Κατά συνέπεια αρκετή ερευνητική βιβλιογραφία και μελέτες ερευνητών υπεισέρχονται στην προσπάθεια βελτίωσης και αναμόρφωσης του προτύπου DSME. Αναλυτικότερα τα ανοικτά θέματα του προτύπου DSME αφορούσαν σε:

- Μελέτη και δημιουργία αλγορίθμων για τον καθορισμό των χρονο-θυρίδων
- Χρονο-προγραμματισμός του Enhanced Beacon – EB
- Η λειτουργία αναπήδησης (multi-hop) και η διατήρηση των χρονο-θυρίδων
- Η γενική διαχείριση των χρονο-θυρίδων
- Η επίδραση των περιόδων ανενεργότητας των συσκευών στην διατήρηση των χρονο-θυρίδων
- Η απομάκρυνση των δεσμευμένων χρονο-θυρίδων
- Η ατέρμονη φραγή των χρονο-θυρίδων
- Η αργοπορημένη απομάκρυνση μη-έγκυρων χρονο-θυρίδων
- Η διαδικασία συσχέτισης των συσκευών
- Οι αλγόριθμοι για βελτίωση του QoS

Στη συνέχεια παρατίθενται με συνοπτικό τρόπο, ένα σημαντικό πλήθος από ερευνητικές εργασίες και πειραματικές μελέτες για την κάλυψη – επίλυση των παραπάνω ανοικτών θεμάτων.

### **3.2. Μελέτη αλγορίθμων για τον χειρισμό των χρονοθυρίδων**

Οι Kauer et al [47], παρουσιάζουν το openDSME. Αυτό αποτελεί μία ολοκληρωμένη εφαρμογή της Ντετερμινιστικής και Σύγχρονης Πολυκαναλικής Επέκτασης (DSME) και προτείνεται μια μέθοδος για τον προγραμματισμό χρονοθυρίδων, με γνώση και αποκεντρωμένο αλγόριθμο για να ενεργοποιήσει την κλιμακούμενη ασύρματη επικοινωνία. Η απόδοση του DSME και η υλοποίησή του, ελέγχθηκαν στον προσομοιωτή OMNeT++ και σε ένα φυσικά αναπτυγμένο ασύρματο δίκτυο στο FIT/IoT-LAB (A large Scale open Experiment for IoT testbed). Από τη μελέτη αποδείχτηκε ότι στα δεδομένα σενάρια, μπορεί να επιτευχθεί αξιόπιστα, διπλάσια κίνηση, χρησιμοποιώντας το πρότυπο DSME αντί για το CSMA/CA. Η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Η μελέτη καταλήγει παρουσιάζοντας τα ανοιχτά ζητήματα της τρέχουσας προδιαγραφής, που απαιτούν περαιτέρω επεξεργασία, έρευνα και τυποποίηση (scheduling techniques to reduce end-to-end delay).

Στην ερευνητική εργασία [56] οι Kauer et al, χρησιμοποίησαν τον προσομοιωτή UPPAAL για την ανάλυση και επαλήθευση της διαδικασίας διαχείρισης των χρονο-θυρίδων στο πρότυπο DSME. Η ανάλυση εντοπίζει αδυναμίες της διαδικασίας κατανομής χρονο-θυρίδων σε συνθήκες αστοχίας επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Ωστόσο, φαίνεται ότι οι ασυνέπειες επιλύονται τελικά και οι βελτιώσεις στη διαδικασία που προτείνεται μειώνουν τις αρνητικές επιπτώσεις από τις αποτυχημένες διαδικασίες κατανομής χρονο-θυρίδων στο δίκτυο.

Οι Ahmad et al [60], μελετούν τη ρύθμιση των παραμέτρων του DSME για τις λειτουργίες σύγκλισης και εκπομπής, έχοντας υπόψη τις παραμέτρους επίδοσης QoS. Προς αυτή την κατεύθυνση, προτείνεται ένας ακριβής προγραμματισμός με επίγνωση της κυκλοφορίας του δικτύου, δηλ. ένας αλγόριθμος βασισμένος στον Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (Integer Linear Programming - ILP), που επιτρέπει στους σχεδιαστές συστημάτων να βελτιστοποιήσουν τη διαμόρφωση όλων των απαιτούμενων παραμέτρων του IEEE 802.15.4e DSME, ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις QoS. Ο αλγόριθμος σε μία από τις εκδοχές του αναφέρεται στον χρονο-προγραμματισμό DSME - GTS.

Οι Meyer et al στην ερευνητική εργασία [61], παρουσιάζουν τη διαμόρφωση παραμέτρων του DSME για μια εφαρμογή συλλογής δεδομένων. Αυτό περιλαμβάνει τον ορισμό της χρονο-θυρίδας και του μήκους πλαισίου καθώς και τον προγραμματισμό των καναλιών. Παρουσιάζονται επίσης διαφορετικές στρατηγικές προγραμματισμού, ως γραμμικοί αλγόριθμοι που ελαχιστοποιούν την καθυστέρηση και την κατανάλωση ισχύος. Τα αποτελέσματα επαληθεύτηκαν μέσω θεωρητικής ανάλυσης και προσομοιώσεων. Αυτά τα αποτελέσματα συγκρίνονται και με άλλους αλγόριθμους χρονοπρογραμματισμού. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν μειωμένη καθυστέρηση έως και 80% για δίκτυα με βάθος τοπολογίας, αυξάνοντας επίσης την αξιοπιστία της επικοινωνίας. Επιπλέον, ο προτεινόμενος προγραμματισμός μειώνει σημαντικά το απαιτούμενο μέγεθος buffer (τοπικής μνήμης) για την επικοινωνία των συσκευών.

Οι Battaglia et al [64], προτείνουν ένα επεκτεταμένο DSME (D-DSME), το οποίο αποτελείται από δύο επεκτάσεις, που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του προτύπου DSME ως προς την επεκτασιμότητα και την αξιοπιστία. Αυτό επιτυγχάνεται με εκμετάλλυση ενός GTS εντός του multi-superframe (πολλαπλού-υπερπλαισίου) για να φιλοξενήσει πολλαπλές ροές ή πολλαπλές αναμεταδόσεις της ίδιας ροής. Η εργασία περιγράφει τις προτεινόμενες επεκτάσεις και τα αποτελέσματα απόδοσης, τόσο μέσω προσομοιώσεων στο OMNeT++, όσο και από πειράματα με πραγματικές συσκευές σε δίκτυα D-DSME.

Οι Asuti et al στην ερευνητική εργασία [65], ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο για το DSME - GTS βάσει προτεραιότητας και εύρους κατανομής (προτεραιότητες των τελικών κόμβων). Επιπλέον, ο προτεινόμενος αλγόριθμος μελετήθηκε σε εφαρμογή σε δύο σενάρια δικτύου

που συναντώνται σε ένα WSN σε τοπολογία αστέρα (star topology). Στο σενάριο - 1, η διαδικασία κατανομής χρονο-θυρίδων πραγματοποιείται με βάση τις προτεραιότητες των τελικών κόμβων. Στη συνέχεια, στο σενάριο - 2, η διαδικασία κατανομής χρονο-θυρίδων πραγματοποιείται με βάση την εκτίμηση εύρους ζώνης των τελικών κόμβων. Μία λεπτομερής μαθηματική μοντελοποίηση του προτεινόμενου αλγόριθμου παρέχει μία μεθοδολογία για τις διάφορες μετρήσεις απόδοσης. Το μοντέλο έχει προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας το εργαλείο προγραμματισμού MATLAB 2017a. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία για DSME - GTS δίνει βελτιώσεις για τους όρους μετρήσεων απόδοσης, όπως η αναλογία παράδοσης πακέτων, η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο, η αναλογία απώλειας πακέτων, η απόδοση, η καθυστέρηση, η χρήση εύρους ζώνης και η κατανάλωση ισχύος.

### **3.3. Χρονοπρογραμματισμός του EB**

Οι Nam et al [54], διερευνούν την εγκυρότητα του αλγόριθμου χρονο-προγραμματισμού beacon στο πρότυπο DSME, και παρουσιάζουν συγκεκριμένες οδηγίες για την πρακτική εφαρμογή του μηχανισμού. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, αναθεωρείται ο χρονο-προγραμματισμός Beacon του DSME, επιλύοντας πολλά προβλήματα. Προτείνεται επίσης μια βελτιωμένη μέθοδος χρονο-προγραμματισμού beacon, αποκαλύπτοντας την ανωτερότητα απόδοσης του βελτιωμένου χρονο-προγραμματισμού beacon, μέσω πειραμάτων σε διάφορα περιβάλλοντα.

Οι Jeon et al [59], καταδεικνύουν ότι το νέο πρότυπο DSME για χρήση σε περιβάλλοντα WPAN, δεν παρέχει μια κρίσιμη μεθοδολογία για την κατανομή διάρκειας του superframe (SD) στον προγραμματισμό των beacon. Επομένως, σε αυτήν την εργασία, εισάγονται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις SD (LSB, MSB και τυχαία). Μέσω πειραμάτων προσομοίωσης, η εργασία δείχνει ότι στο πρότυπο IEEE 802.15.4e DSME, ο χρονο-προγραμματισμός beacon αποδίδει διαφορετικά, καθώς μεταβάλλονται τα σχήματα κατανομής SD. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα προτείνεται ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος κατανομής SD (Adaptive SD allocation - ASDA). Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί έναν ενιαίο δείκτη, επαυξητικής επιλογής θυρίδας (distributed neighboring slot incrementer - DNSI). Τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο ASDA έχει ανώτερη απόδοση έναντι άλλων μεθόδων από την άποψη της αποδοτικότητας στη διαχείριση των πόρων του δικτύου.

Οι Ahmad et al στην ερευνητική εργασία [60], μελετούν τη ρύθμιση των παραμέτρων DSME για τις λειτουργίες σύγκλισης και εκπομπής, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους QoS. Προς αυτή την κατεύθυνση, προτείνεται ένας ακριβής προγραμματισμός με επίγνωση της κυκλοφορίας του δικτύου, δηλ. ένας αλγόριθμος βασισμένος στον Ακέραιο Γραμμικό Προγραμματισμό (Integer Linear Programming - ILP), που επιτρέπει στους σχεδιαστές συστημάτων να βελτιστοποιήσουν τη διαμόρφωση όλων των απαιτούμενων παραμέτρων του IEEE 802.15.4e DSME ώστε οι απαιτήσεις QoS να ικανοποιούνται. Ο αλγόριθμος σε μία από τις εκδοχές του αναφέρεται στον χρονο-προγραμματισμό του EB.

Οι Lee et al [62], εισαγουν ένα νέο αλγόριθμο προγραμματισμού beacon για την κατασκευή ενός επεκτάσιμου, και αξιόπιστου δικτύου πλέγματος (mesh). Η προτεινόμενη προσέγγιση διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις θυρίδες beacon γειτονικών κόμβων (σταθερού μήκους RINSD - Representative Indicator of Neighbor Superframe duration), αντί ενός bitmap, επιτυγχάνοντας γρήγορη κατασκευή του δικτύου μέσω της ενεργούς κατανομής των συσκευών. Ο αλγόριθμος επιλύει το πρόβλημα της πιθανής σύγκρουσης beacon. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το DFBS – Distributed Fast Beacon Scheduling, επιτυγχάνει ταχύτερο προγραμματισμό beacon και είναι πιο αποτελεσματικός σε χρήση μνήμης και μέγεθος πλαισίου beacon για το 802.15.4e πρότυπο DSME.

### **3.4. Η επίδραση της αναπήδησης στη διατήρηση των χρονοθυρίδων**

Στην ερευνητική εργασία [67] οι Gomes et al, προτείνουν τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις, βασισμένες στο πρωτόκολλο DSME. Αυτές υλοποιήθηκαν και αξιολογήθηκαν μέσω μελέτης προσομοίωσης. Η εργασία συγκρίνει τις τεχνικές αναπήδησης με τις τεχνικές προσαρμογής καναλιών για την επίλυση των προβλημάτων του DSME σε δίκτυα WSNs. Η πρώτη τεχνική (CH-DSME) βασίζεται σε ένα απλό μηχανισμό αναπήδησης καναλιού. Η δεύτερη (CA-DSME) χρησιμοποιεί προσαρμογή καναλιού και η Τρίτη τεχνική είναι μια νέα υβριδική προσέγγιση (H-DSME), που χρησιμοποιεί τόσο την αναπήδηση όσο και την προσαρμογή καναλιού. Το H-DSME ξεπέρασε τις άλλες δύο προσεγγίσεις για το υπό εξέταση σενάριο, γεγονός που δείχνει ότι η χρήση της προσαρμογής καναλιού είναι καλύτερη από την αναπήδηση καναλιού για τη μετάδοση unicast πακέτων, όταν η ποιότητα των συνδεδεμένων κόμβων παρακολουθείται συνεχώς. Ωστόσο, για πακέτα που μεταδίδονται από τον συντονιστή, η χρήση της αναπήδησης καναλιών είναι μια καλή εναλλακτική για την αντιμετώπιση της χωρικής διακύμανσης στην ποιότητα των καναλιών.

### **3.5. Η επίδραση των περιόδων ανενεργότητας στη διατήρηση των χρονοθυρίδων**

Στην ερευνητική εργασία [68], προτείνεται ένα σχήμα επικοινωνίας εναλλακτικού ορισμού διαδρομής (ARound) για WSN. Η βασική ιδέα του ARound είναι να ρυθμίσει εναλλακτικές διαδρομές επικοινωνίας μεταξύ συγκεκριμένης πηγής και τους κόμβους προορισμού, αποφεύγοντας τις συμφορημένες διαδρομές δέντρων. Αυτές οι εναλλακτικές διαδρομές θεωρούνται πιο σύντομες διαδρομές μεταξύ συστάδων, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο ενδιάμεσων κόμβων για τη μετάδοση μηνυμάτων κατά τις περιόδους ανενεργότητας τους στο δίκτυο συστάδων - δέντρων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το σχήμα επικοινωνίας ARound μπορεί να μειώσει σημαντικά την καθυστέρηση επικοινωνίας από άκρο σε άκρο, σε σύγκριση με τη χρήση του προτύπου επικοινωνίας συμπλέγματος-δέντρων (nested trees). Επιπλέον, το σχήμα επικοινωνίας ARound είναι σε θέση να μειώσει τη συμφόρηση δικτύου γύρω από τον συντονιστή PAN, επιτρέποντας τη μείωση των φαινομένων υπερχείλισης ουρών στο δίκτυο.

### **3.6. Προβλήματα στην αποδέσμευση των χρονοθυρίδων**

Οι Di Marco et al στην ερευνητική εργασία [4], ελέγχουν την απόδοση του μέσου πρόσβασης ελέγχου (MAC) του IEEE 802.15.4. Όπως έχει διερευνηθεί στα ασύρματα κανάλια, η δυναμική πολλαπλών επιπέδων μεταξύ MAC και φυσικού στρώματος είναι ανοιχτό πρόβλημα, όταν το ασύρματο κανάλι εμφανίζει απώλεια διαδρομής, και μείωση του επιπέδου σήματος λόγω πολλαπλών διαδρομών (fading) είτε σκίαση. Στην ανάλυση του MAC και του ασύρματου καναλιού, η αλληλεπίδραση είναι απαραίτητη για συνεπή πρόβλεψη απόδοσης, το σωστό σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των πρωτοκόλλων. Σε αυτή την εργασία, προτείνεται μία προσέγγιση για την αναλυτική μοντελοποίηση αυτών των αλληλεπιδράσεων. Η ανάλυση θεωρεί ένα σύνθετο κανάλι που υπόκειται σε fading, παρεμβολές που δημιουργούνται από πολλαπλές συσκευές που λειτουργούν παράλληλα. Τα αποτελέσματα που προκαλούνται από κρυφά τερματικά και το MAC, μειώνουν τις δυνατότητες ανίχνευσης beacon και φέροντος. Ανάλογα με τις παραμέτρους του MAC και τα κατώφλια του φυσικού επιπέδου, φαίνεται ότι οι δείκτες απόδοσης MAC δείχνουν ότι κανάλια που υπόκεινται σε fading (ανενεργά) μπορεί να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά που απέχουν πολύ από τις υποθέσεις για ένα ιδανικό κανάλι. Σε αυτά τα αποτελέσματα, παρουσιάζεται σε ποιο βαθμό

η παρουσία εξασθένισης μπορεί να είναι ευεργετική για τη συνολική απόδοση του δικτύου, μειώνοντας τις παρεμβολές πολλαπλής πρόσβασης και πώς αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κοινή επιλογή MAC και παραμέτρους φυσικού στρώματος, στον ορισμό και τη διαχείριση των χρονο-θυρίδων.

### **3.7. Η διαδικασία συσχέτισης των συσκευών**

Οι Vallati et al [52], έχουν ως στόχο τη μελέτη της απόδοσης του πρωτοκόλλου DSME, προτείνοντας λύσεις για τη μείωση του χρόνου δημιουργίας του δικτύου (συσχέτιση και συμμετοχή των συσκευών), βελτιώνοντας την ενεργειακή απόδοση και τους διαθέσιμους πόρους. Η εργασία, για να πραγματοποιήσει την αξιολόγηση απόδοσης του προτύπου DSME, χρησιμοποίησε μία πλατφόρμα στο Contiki OS (λειτουργικό σύστημα), για την προσομοίωση κόμβων αισθητήρων. Η μελέτη έχει επισημάνει ζητήματα και αναποτελεσματικότητα στη διαδικασία διαμόρφωσης του δικτύου, προτείνοντας αποτελεσματικές λύσεις. Συγκεκριμένα, προτείνεται ένα σύνολο κατευθυντήριων γραμμών για προσθήκη στο αρχικό πρότυπο DSME, ως προς το πρωτόκολλο MAC που χρησιμοποιεί και το οποίο έχει αποδειχθεί ότι επιδρά σημαντικά στην απόδοση σχηματισμού του δικτύου.

Οι Liu et al [48], προτείνουν έναν αλγόριθμο Enhanced Fast Association (EFastA). Ο αλγόριθμος αυτός αφορά το πρότυπο IEEE 802.15.4e DSME MAC, στο οποίο ένας ενιαίος Συντονιστής (PANC) του δικτύου, μπορεί να συντονίσει πολυάριθμες συσκευές γρήγορα με χαμηλό ποσοστό συγκρούσεων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το EFastA μπορεί να συσχετίσει εκατοντάδες συσκευές σε χρονική περίοδο τριών MD (Multi-superframe Duration). Ο μέσος αριθμός αναμεταδόσεων που απαιτούνται για μια επιτυχημένη συσχέτιση είναι μόνο το 0.2% στο τυπικό DSME για λειτουργία Fast συσχέτισης (FastA). Ο χρόνος σύγκλισης της διαδικασίας συσχέτισης του EFastA είναι 1.5% ~ 8.8% αυτού του FastA στη χειρότερη περίπτωση, όταν η παράμετρος MD = BI (Διάστημα Beacon).

### **3.8. Αλγόριθμοι για τη βελτίωση του QoS**

Οι Hwang et al [51], έχουν αναπτύξει ένα νέο μοντέλο προγραμματισμού beacon στο πρότυπο DSME. Συμπεριλαμβάνοντας νέες δυνατότητες, όπως η ειδοποίηση περιορισμένης άδειας (Link Limited Permission Notification – LLPN), οι ερευνητές μπόρεσαν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση και το QoS (Quality of Service) του δικτύου.

Οι Mkongwa et al [53], προτείνουν μια εναλλακτική λύση με συνδυασμό των μηχανισμών backoff και προσαρμογής CCA για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών απόδοσης σε ένα εξαιρετικά δυναμικό περιβάλλον δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη τα επίπεδα ισχύος των συσκευών του δικτύου, το Packet Delivery Ratio – PDR δηλ το ποσοστό επιτυχούς διανομής πακέτων δεδομένων, και την απόδοση και την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (End-to-End Delay). Η συγκριτική μελέτη δείχνει ότι οι προτεινόμενες μέθοδοι ξεπερνούν το συμβατικό πρωτόκολλο CSMA-CA που χρησιμοποιεί και το πρότυπο DSME, σε PDR, απόδοση και συμβάλλει σε μείωση της καθυστέρησης κατά 13.1%, 21.44% και 41.13%, αντίστοιχα στα προηγούμενα κριτήρια απόδοσης, ενώ η ενεργειακή απόδοση μειώθηκε κατά 0.43%.

Ο Kurunathan [55], εισάγει μια πρόκληση στον αυστηρό χρονο-προγραμματισμό και στη χρήση των εγγυημένων χρονο-θυρίδων, με σκοπό την αξιοποίηση των δυνατοτήτων του προτύπου DSME στο μέγιστο βαθμό. Η εργασία παρέχει μηχανισμούς προγραμματισμού και αρχιτεκτονικές πολλαπλών επιπέδων για μείωση της συνολικής καθυστέρησης και βελτίωση της αξιοπιστίας, στοχεύοντας στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου.

Ο Taneja [57], προτείνει μια ευέλικτη διαχείριση πόρων για την επίτευξη αυτών των στόχων επικοινωνίας του IoT με χρήση του προτύπου DSME ως προς την ποιότητα της επικοινωνίας.

Όπως τα πακέτα μετακινούνται από μια αρχική συσκευή σε έναν προορισμό (ή το συντονιστή), οι παράμετροι αντιστάθμισης υπολογίζονται και μεταφέρονται ως μέρος του MAC επιπέδου στα πακέτα. Ο κόμβος λήψης (ή ο συντονιστής), χρησιμοποιεί αυτές τις παραμέτρους για τον υπολογισμό ενός παράγοντα αντιστάθμισης και μεταφέρει αυτές στη συσκευή προέλευσης μέσω πρωτοκόλλων όπως π.χ το πρωτόκολλο περιορισμένης εφαρμογής (Constraint Application Protocol). Οι ενδιαμέσοι κόμβοι χρησιμοποιούν παράγοντα αντιστάθμισης για να κάνουν δυναμική διαχείριση πόρων στα δίκτυα DSME. Αυτό επιτρέπει την ευέλικτη διαχείριση πόρων για την κάλυψη των απαιτήσεων για διαφορετικούς τύπους εφαρμογών σε δίκτυα DSME.

Οι Patti et al [58], παρουσιάζουν το πλαίσιο, την ανάλυση και τον προγραμματισμό, μέσω συγκριτικών προσομοιώσεων και χρήση του πρωτοκόλλου LLDN, για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ποιότητας του προτύπου DSME.

Οι Kurunathan et al στην ερευνητική εργασία [63], μελετούν το πρόβλημα που ανακύπτει καθώς το δίκτυο εξελίσσεται δυναμικά, αλλάζοντας τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας του. Σε αυτή τη χρονική φάση οι στατικές ρυθμίσεις μπορούν να επηρεάσουν τη συνολική απόδοση και να αυξήσουν την καθυστέρηση μετάδοσης, λόγω ακατάλληλης κατανομής του εύρους ζώνης του δικτύου. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται στην παρούσα μελέτη, μέσω μιας δυναμικής Τεχνικής συντονισμού πολλαπλών υπερπλαισίων που προσαρμόζει δυναμικά τη δομή των πολλαπλών υπερπλαισίων με βάση το μέγεθος του δικτύου. Αυτή η τεχνική βελτιώνει το QoS παρέχοντας 15 - 30% αύξηση στην απόδοση και 15 - 35% μείωση της καθυστέρησης σε σύγκριση με τα στατικά δίκτυα του προτύπου DSME.

Ο κύριος σκοπός των Lee et al [66], είναι η παροχή χρήσιμων πληροφοριών για το σχεδιασμό του DSME-enabled δικτύου WSN, παρουσία παρεμβολών στο WLAN. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το πρωτόκολλο DSME MAC είναι ανθεκτικό σε μεγάλη διακύμανση των συνθηκών φορτίου κυκλοφορίας και ισχύος παρεμβολής στο επίπεδο του WLAN. Παρατηρείται ότι η κυρίαρχη πηγή παρεμβολής είναι οι ανάλογου τύπου συσκευές WSN που λειτουργούν στο IEEE 802.15.4 πρότυπο, χρησιμοποιώντας τεχνικές CSMA/CA. Εν τω μεταξύ, παρατηρείται ότι ένα δίκτυο WSN με χρήση του προτύπου DSME διατηρεί ένα υψηλό επίπεδο διεκπεραίωσης των πακέτων για μεγάλο εύρος επιπέδων ισχύος παρεμβολής. Η χρήση του CSMA/CA υποβαθμίζεται σοβαρά καθώς ένα δίκτυο WLAN μετασχηματίζεται σε ένα δίκτυο WSN.

### **3.9. Η βελτίωση της κινητικότητας των χρηστών**

Οι Lee et al στην ερευνητική εργασία [36], αξιολογούν τις επιδόσεις βιομηχανικού WSN MAC που βασίζεται σε IEEE 802.15.4e, χρησιμοποιώντας διάφορα σενάρια κινητικότητας για έξυπνα εργοστασιακά περιβάλλοντα. Επίσης, προτείνεται ένας καταναμημένος αλγόριθμος προγραμματισμού που βασίζεται στο IEEE 802.15.4e DSME, για την υποστήριξη κινητικότητας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να εκχωρήσει προσαρμοστικά θυρίδες επικοινωνίας, αναλύοντας την κίνηση δικτύου κάθε κόμβου, βελτιώνοντας έτσι την αξιοπιστία και την ενημέρωση των κόμβων του δικτύου. Το πειραματικό αποτέλεσμα δείχνει ότι η απόδοση του πρωτοκόλλου DSME MAC είναι καλύτερη από το IEEE 802.15.4e TSCH και την παλαιού τύπου slotted CSMA/CA για ένα δίκτυο με πάνω από 30 κόμβους. Επίσης, ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιώνει την απόδοση κατά 15% σε σχέση με άλλους MAC αλγορίθμους, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού DSME. Ο αλγόριθμος επιβεβαιώθηκε πειραματικά ότι μειώνει την κατανάλωση ισχύος, βελτιώνοντας την διαθεσιμότητα θέσεων επικοινωνίας.

# 4

## Γενικά Συμπεράσματα και Περιοχές για περαιτέρω έρευνα

### 4.1. Γενικά Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε η διασύνδεση συσκευών μέσω ασύρματων ad-hoc δικτύων, με έμφαση στη χρήση του προτύπου IEEE 802.15.4e DSME. Τα ασύρματα δίκτυα εισάγουν ένα σημαντικό αριθμό προκλήσεων που αφορά στην κινητικότητα των συσκευών, στη στοιβία των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των εφαρμογών, την ασφάλεια, τη δυναμικότητα στη διασύνδεση, κ.α. Επομένως τα πρωτόκολλα που έχουν αναπτυχθεί για την επίτευξη της διασύνδεσης σε σταθερά δίκτυα δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών επικοινωνίας σε κινητά - δυναμικά δίκτυα ασύρματων συσκευών. Το πρότυπο IEEE 802.15.4e DSME είναι ένα πρότυπο ασύρματης διασύνδεσης με αρκετά σύνθετους μηχανισμούς για την επίτευξη της διασύνδεσης και της συσχέτισης των συσκευών. Για τον λόγο αυτό, στην εφαρμογή του προτύπου ανακύπτουν αρκετά ανοικτά θέματα – προκλήσεις, τα οποία είτε δεν καλύπτονται επαρκώς είτε οδηγούν σε ανεπιθύμητες συνθήκες λειτουργίας. Στη διπλωματική εργασία αναλύθηκαν τα θέματα που σχετίζονται με τα ανοικτά αυτά ζητήματα, καθώς και τις συμπληρωματικές μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί στην ερευνητική βιβλιογραφία για την κάλυψη τους.

Το πρότυπο 802.15.4 (IEEE 2006) αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη ασύρματων δικτύων, προοριζόμενο αρχικώς για συσκευές με χαμηλές απαιτήσεις μετάδοσης σε προσωπικά δίκτυα ή δίκτυα αισθητήρων (< 20 Kbps). Οι ανάγκες διαστομάτωσης (στοίβια πρωτοκόλλων κατά OSI), δεν καλύπτονται απόλυτα, δεδομένου ότι το πρότυπο δεν είναι πλήρες ως προς τα ανώτερα στρώματα. Το φυσικό επίπεδο οργανώνει την επικοινωνία σε κανάλια με καθορισμένη τοποθέτηση συχνοτήτων και διαμοιρασμό χρόνου (TDMA). Επιπλέον, τα κανάλια οργανώνονται σε σελίδες (pages) και η αναγνώριση ελεύθερων καναλιών για τη μετάδοση/λήψη, επιτυγχάνεται με τον μηχανισμό CCA. Το επίπεδο πρόσβασης δεδομένων – MAC, είναι υπεύθυνο για τον χειρισμό του φυσικού στρώματος και το χρονικό εντοπισμό των καναλιών επικοινωνίας. Στόχος είναι η απρόσκοπτη (collision – free) επικοινωνία των συσκευών και η αυτο-οργάνωση και συσχέτιση των συσκευών του δικτύου, σε συνθήκες που μεταβάλλονται δυναμικά στο χρόνο. Τα ανώτερα στρώματα δεν προδιαγράφονται στο πρότυπο της ασύρματης επικοινωνίας και αποτελούν αντικείμενο υλοποίησης που συνδέεται με τη συσκευή και τον τύπο των εφαρμογών.

Οι συσκευές στο πρότυπο 802.15.4 είναι είτε πλήρους (FFD) είτε μειωμένης λειτουργίας (RFD). Η ασύρματη επικοινωνία επιτυγχάνεται με χρήση της συσκευής συντονιστή (coordinator). Οι συσκευές μπορούν να επικοινωνήσουν ομότιμα μεταξύ τους όταν είναι πλήρους λειτουργίας (FFD).

Η ασφάλεια της επικοινωνίας αποτελεί επίσης ένα σημαντικό θέμα για τα ασύρματα δίκτυα. Ο λόγος είναι ότι η επικοινωνία στους ασύρματους διαύλους είναι ανοικτή, επομένως όλοι οι κόμβοι του ασύρματου δικτύου μπορεί να έχουν πρόσβαση σε αυτή (εξουσιοδοτημένοι και μη). Η κρυπτογραφία αποτελεί μία λύση στο πρόβλημα, όμως απαιτεί σημαντικά ποσά επεξεργαστικής και φυσικής ισχύος για μία συσκευή. Δεδομένου ότι οι ασύρματες συσκευές



βασίζουν τη λειτουργία τους σε συσσωρευτές, ένα ισορροπημένο σχήμα με χρήση συμμετρικών κλειδίων (symmetric keys), διασφαλίζει την ασφάλεια της ασύρματης επικοινωνίας (με δυναμική εγκατάσταση και διανομή) χωρίς υπερβολική κατανάλωση ισχύος. Για τη βελτίωση της λειτουργίας του προτύπου 802.15.4 δημιουργήθηκε το πρότυπο 802.15.4e το 2012 [13]. Το 802.15.4e βελτιώνει το παλιό πρότυπο, εισάγοντας μηχανισμούς όπως: η πρόσβαση με χρονική θυρίδα (time slotted access), η πολυκαναλική επικοινωνία (multi-channel communication) και η αναπήδηση καναλιού (channel hopping).

Το Deterministic and Synchronous Multi-channel Extension (DSME) αποτελεί μία εξέλιξη του 802.15.4<sup>e</sup> και έχει σχεδιαστεί για όλες εκείνες τις κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν ντετερμινιστική καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία. Το πρότυπο DSME επεκτείνει τον αριθμό των χρονοθυρίδων και αυξάνει τον αριθμό των καναλιών συχνότητας που χρησιμοποιούνται (στο προηγούμενο πρότυπο περιοριζόταν μόνο σε ένα). Με την υιοθέτηση μιας ευέλικτης δομής πολλαπλών υπερπλασιών (super-frames), το DSME διασφαλίζει την απαραίτητη ευελιξία για την εξυπηρέτηση τόσο της περιοδικής όσο και της απεριοδικής κίνησης, ακόμη και σε μεγάλα δίκτυα πολλαπλών αναπήδησεων (multi-hop networks). Το πρότυπο DSME είναι επεκτάσιμο και δεν υποφέρει από ένα μόνο σημείο αστοχίας (κεντρικός κόμβος), επειδή ο προγραμματισμός του beacon και η κατανομή χρονικών θυρίδων, εκτελούνται με κατανεμημένο τρόπο, χωρίς να βασίζονται σε καμία κεντρική οντότητα. Το πρότυπο DSME προσφέρει δύο μεθόδους διαφοροποίησης των καναλιών. Πιο συγκεκριμένα προσφέρει την Προσαρμογή καναλιών (Channel Adaptation) και την Αναπήδηση καναλιών (Channel Hopping).

Παρά το γεγονός ότι το πρότυπο DSME αποτελεί εξέλιξη του 802.15.4 και επιλύει ένα σημαντικό αριθμό θεμάτων, εντούτοις αφήνει σημαντικά ανοικτά θέματα στην εφαρμογή και τη λειτουργία του. Τα ανοικτά θέματα μελετήθηκαν και προσδιορίστηκαν βάσει ενός σημαντικού πλήθους ερευνητικών εργασιών, προσομοιώσεων σε μοντέλα και εφαρμογών σε πραγματικά δίκτυα.

Ενώ η τεχνική με το πρότυπο DSME καθορίζει μηχανισμούς για την κατανομή και την επαναδιάθεση των θυρίδων με κατανεμημένο τρόπο, το πρότυπο δεν προσδιορίζει τις χρονοθυρίδες που θα πρέπει να κατανεμηθούν. Αυτό αποτελεί θέμα που θα πρέπει να καλυφθεί από ανώτερα επίπεδα της διαστρωμάτωσης της υλοποίησης των συσκευών. Οι μέθοδοι για τον χρονο-προγραμματισμό των θυρίδων, είναι ένα θέμα που μελετάται εκτενώς στην ερευνητική βιβλιογραφία. Για την επίλυση του ανοικτού θέματος της διάθεσης των χρονοθυρίδων, η ερευνητική βιβλιογραφία προτείνει τεχνικές όπως το OpenDSME, που μελετήθηκε σε προσομοίωση. Η κατανάλωση ισχύος μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Σε προσομοίωση για την ανάλυση και επαλήθευση της διαδικασίας διαχείρισης των χρονοθυρίδων στο πρότυπο DSME, η ανάλυση εντόπισε αδυναμίες της διαδικασίας κατανομής των χρονο-θυρίδων σε συνθήκες αστοχίας επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων.

Η ρύθμιση των παραμέτρων του DSME για τις λειτουργίες σύγκλισης και εκπομπής, μπορεί επίσης να καθορισθεί λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους επίδοσης QoS. Προς αυτή την κατεύθυνση, προτείνεται ένας ακριβής προγραμματισμός με επίγνωση της κυκλοφορίας του δικτύου. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βελτιστοποιεί τη διαμόρφωση όλων των απαιτούμενων παραμέτρων του IEEE 802.15.4e DSME, ώστε οι απαιτήσεις QoS να ικανοποιούνται. Μία άλλη προσέγγιση περιλαμβάνει τον ορισμό της χρονο-θυρίδας και του μήκους πλαισίου καθώς και τον προγραμματισμό των καναλιών. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν μειωμένη καθυστέρηση για δίκτυα με βάθος τοπολογίας, αυξάνοντας επίσης την αξιοπιστία της επικοινωνίας. Επίσης στα πλαίσια αυτά προτείνεται ένα επεκταμένο DSME (D-DSME), το οποίο αποτελείται από δύο επεκτάσεις, που βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του προτύπου DSME ως προς την επεκτασιμότητα και την αξιοπιστία. Ένας εναλλακτικός αλγόριθμος για το DSME - GTS βάσει προτεραιότητας και εύρους κατανομής (προτεραιότητες των τελικών κόμβων) βελτιώνει το θέμα καθορισμού των χρονο-θυρίδων.

Ένα άλλο ανοικτό θέμα του προτύπου, αποτελεί ο χρονο-προγραμματισμός και η οργάνωση των beacon του δικτύου. Στον προγραμματισμό beacon για το DSME, κάθε πιθανή συσκευή, εκτελεί πρώτα μία διαδικασία σάρωσης στα διαθέσιμα κανάλια. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι ο αλγόριθμος προγραμματισμού beacon του DSME έχει κάποια κρίσιμα προβλήματα σε μια ρεαλιστική υλοποίηση δικτύου WPAN. Για την αντιμετώπιση του ανοικτού θέματος μία λύση είναι η εισαγωγή τριών διαφορετικών προσεγγίσεων SD (LSB, MSB και τυχαία). Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα προτείνεται ένας προσαρμοστικός αλγόριθμος κατανομής SD (Adaptive SD allocation - ASDA). Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί έναν ενιαίο δείκτη, επαυξητικής επιλογής θυρίδας (distributed neighboring slot incrementer - DNSI). Σε μία άλλη προσέγγιση μελετάται η ρύθμιση των παραμέτρων DSME για τις λειτουργίες σύγκλισης και εκπομπής, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους QoS. Ο αλγόριθμος σε μία από τις εκδοχές του αναφέρεται στον χρονο-προγραμματισμό του EB. Ένας νέος αλγόριθμος προγραμματισμού beacon για την κατασκευή ενός επεκτάσιμου και αξιόπιστου δικτύου πλέγματος (mesh), διαχειρίζεται αποτελεσματικά τις θυρίδες beacon γειτονικών κόμβων (σταθερού μήκους RINSD - Representative Indicator of Neighbor Superframe duration), αντί ενός bitmap, επιτυγχάνοντας γρήγορη κατασκευή του δικτύου μέσω της ενεργούς κατανομής των συσκευών.

Ένα άλλο ανοικτό πρόβλημα αποτελεί η επικοινωνία μέσω χρονο-προγραμματισμού μεταδόσεων σε πολλαπλούς κόμβους αναπήδησης (multi-hop). Το πρότυπο πρέπει να διατηρήσει τις ειδικές εκχωρήσεις GTS σε όλο το μήκος της αλυσίδας μετάδοσης (hops) για τη συμμόρφωση της μετάδοσης με καθορισμένες απαιτήσεις ποιότητας (QoS). Η δυσκολία σε αυτό προκύπτει καθώς οι συντονιστές (coordinators) δεν έχουν τον ίδιο αριθμό συσχετισμένων συσκευών μεταξύ τους, και η κίνηση των κόμβων μεταβάλλεται στο δίκτυο.

Για την αντιμετώπιση του ανοικτού θέματος προτείνονται τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις. Συγκρίνονται οι τεχνικές αναπήδησης με τις τεχνικές προσαρμογής καναλιών για την επίλυση των προβλημάτων του DSME σε δίκτυα WSNs. Η τεχνική H-DSME που χρησιμοποιεί την αναπήδηση και προσαρμογή των καναλιών είναι αποτελεσματικότερη των άλλων προσεγγίσεων, γεγονός που δείχνει ότι η χρήση της προσαρμογής καναλιού είναι καλύτερη από την αναπήδηση καναλιού για τη μετάδοση unicast πακέτων, όταν η ποιότητα των συνδεόμενων κόμβων παρακολουθείται συνεχώς.

Οι περίοδοι ανενεργότητας των συσκευών δημιουργούν επίσης ένα θέμα στην εφαρμογή του προτύπου DSME. Οι συντονιστές, πρέπει να παραμείνουν ενεργοί για μεγαλύτερη διάρκεια, με αποτέλεσμα τη μείωση της διάρκειας ζωής του δικτύου τους. Για την επίλυση του ανοικτού θέματος προτείνεται ένα σχήμα επικοινωνίας εναλλακτικού ορισμού διαδρομής (ARound) για WSN. Η βασική ιδέα του ARound είναι να ρυθμίσει εναλλακτικές διαδρομές επικοινωνίας μεταξύ συγκεκριμένης πηγής και τους κόμβους προορισμού, αποφεύγοντας τις συμφορημένες διαδρομές δέντρων. Αυτές οι εναλλακτικές διαδρομές θεωρούνται πιο σύντομες διαδρομές μεταξύ συστάδων, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο ενδιάμεσων κόμβων για τη μετάδοση μηνυμάτων κατά τις περιόδους ανενεργότητας τους στο δίκτυο συστάδων - δέντρων.

Ένα ακόμη σημαντικό θέμα στη λειτουργία του προτύπου DSME, είναι η αποδέσμευση των χρονο-θυρίδων που έχουν δεσμευτεί, ιδίως όταν αυτή αφορά σε κρυφούς κόμβους. Τα αποτελέσματα που προκαλούνται από κρυφά τερματικά και το MAC, μειώνουν τις δυνατότητες ανίχνευσης beacon και φέροντος.

Στην τυπική λειτουργία IEEE 802.15.4e του προτύπου DSME, όταν πολλές μη συσχετισμένες συσκευές εκτελούν ανεξάρτητα μια παθητική σάρωση και εντοπίζουν ένα συντονιστή (coordinator) ταυτόχρονα, στέλνουν γρήγορα αιτήματα συσχέτισης χρησιμοποιώντας CSMA/CA μετά τη λήψη του πλαισίου beacon. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα κανάλι με πολλές μεταδόσεις και σοβαρό πρόβλημα συγκρούσεων. Για τη μείωση του χρόνου συσχέτισης του δικτύου (συσχέτιση και συμμετοχή των συσκευών), οι ερευνητές

αξιολόγησαν την απόδοση του προτύπου DSME. Οι μελέτες έχουν επισημάνει ζητήματα και αναποτελεσματικότητα στη διαδικασία διαμόρφωσης του δικτύου. Προτείνεται ένα σύνολο κατευθυντήριων γραμμών για προσθήκη στο αρχικό πρότυπο DSME, ως προς το πρωτόκολλο MAC που χρησιμοποιεί και το οποίο έχει αποδειχθεί ότι επιδρά σημαντικά στην απόδοση σχηματισμού του δικτύου. Σε άλλη εργασία για την επίλυση του προβλήματος προτείνεται ένας αλγόριθμος Enhanced Fast Association (EFAA). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι το EFAA μπορεί να συσχετίσει εκατοντάδες συσκευές σε μικρή χρονική περίοδο με μέσο αριθμό αναμεταδόσεων που απαιτούνται για μια επιτυχημένη συσχέτιση στο 0.2% στο τυπικό DSME.

Τέλος η επίδραση όλων των ανοικτών θεμάτων αφορά στα χαρακτηριστικά ποιότητας QoS των συνδέσεων του συστήματος. Για την επίλυση αυτού του ανοικτού θέματος προτείνεται ένα νέο μοντέλο προγραμματισμού beacon στο πρότυπο DSME, το οποίο μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση και το QoS (Quality of Service) του δικτύου. Μια εναλλακτική λύση με συνδυασμό των μηχανισμών backoff και προσαρμογής CCA μπορεί να επιτύχει τη βελτίωση των χαρακτηριστικών απόδοσης σε ένα εξαιρετικά δυναμικό περιβάλλον δικτύου. Οι προτεινόμενες μέθοδοι ξεπερνούν το συμβατικό πρωτόκολλο CSMA-CA που χρησιμοποιεί το πρότυπο DSME. Μία άλλη προσέγγιση παρέχει μηχανισμούς προγραμματισμού και αρχιτεκτονικές πολλαπλών επιπέδων για μείωση της συνολικής καθυστέρησης και βελτίωση της αξιοπιστίας, στοχεύοντας στη μείωση της κατανάλωσης ισχύος του δικτύου. Σε άλλη προσέγγιση παρουσιάζεται το πλαίσιο, η ανάλυση και ο προγραμματισμός, μέσω συγκριτικών προσομοιώσεων και χρήση του πρωτοκόλλου LLDDN, για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών ποιότητας του προτύπου DSME. Η δυναμική χρονική εξέλιξη του δικτύου επιδρά επίσης σημαντικά στη διαμόρφωση των παραμέτρων QoS. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται μέσω μιας δυναμικής Τεχνικής συντονισμού πολλαπλών υπερπλαισίων που προσαρμόζει δυναμικά τη δομή των πολλαπλών υπερπλαισίων με βάση το μέγεθος του δικτύου.

Επομένως παρατηρούμε ένα σημαντικό αριθμό ανοικτών θεμάτων, που το πρότυπο DSME αφήνει ακάλυπτα. Ορισμένα από αυτά επιδρούν στην ποιότητα της επικοινωνίας, ενώ άλλα μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική μείωση της επιδοσης ενός ασύρματου δικτύου που βασίζεται στο πρότυπο DSME.

Προφανώς μελλοντικές επεκτάσεις του προτύπου DSME, λαμβάνοντας υπόψη τις ερευνητικές εργασίες αναμένεται να οδηγήσουν σε σημαντική κάλυψη αυτών των ανοικτών θεμάτων και κατά συνέπεια στη βελτίωση της λειτουργικότητας και αποδοτικότητας του προτύπου.

## **4.2. Περιοχές για περαιτέρω έρευνα**

Από την ανάλυση των ανοικτών θεμάτων για το πρότυπο DSME, προκύπτει ότι παρά το γεγονός ότι το πρότυπο χρησιμοποιεί αρκετά σύνθετους μηχανισμούς για την επίτευξη και διατήρηση της διασυνδεσιμότητας στα ασύρματα δίκτυα, το πρότυπο πρέπει να συμπληρωθεί και να βελτιωθεί. Ο χρονοπρογραμματισμός των θυρίδων που το πρότυπο χρησιμοποιεί για την επικοινωνία, συνεπάγεται τη δημιουργία και τον έλεγχο νέων τεχνικών ανάθεσης και διαχείρισης της επικοινωνίας (time scheduling). Κατά συνέπεια νέοι αλγόριθμοι για την λήψη απόφασης ανάθεσης θυρίδων επικοινωνίας, αναμένεται να συμβάλλουν καθοριστικά στην εξέλιξη του προτύπου. Ο έλεγχος και η επαλήθευση της διαλειτουργικότητας του προτύπου μπορεί να γίνει τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης των δομών του δικτύου όσο και με την εφαρμογή των νέων αλγορίθμων σε πιλοτικά ασύρματα δίκτυα. Επομένως η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, η μοντελοποίηση και η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων διαχείρισης χρονοθυρίδων, αναμένεται να συμβάλλουν καθοριστικά στην εξέλιξη των δικτυακών δομών που βασίζουν τη λειτουργία τους στο πρότυπο DSME.

Οι αρχιτεκτονικές των δικτύων επικοινωνίας παραδοσιακά διακρίνουν κεντρικοποιημένες (star topologies), ή απκεντρωμένες δομές (clusters) για την επίτευξη της διασύνδεσης των κόμβων επικοινωνίας. Τα σχήματα αυτών των αρχιτεκτονικών, έχουν αναλυθεί σε πολλές ερευνητικές εργασίες. Οι κεντρικοποιημένες δομές πάσχουν εξαιτίας ενδεχόμενης δυσλειτουργίας ενός κεντρικού κόμβου, ενώ οι αποκεντρωμένες δομές οδηγούν σε δίκτυα πολλαπλών αναπηδήσεων (multi-hops), γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση της καθυστέρησης μετάδοσης και σπατάλης του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Στην ίδια λογική και το πρότυπο DSME, μπορεί να αξιοποιήσει ένα υβριδικό σχήμα διασύνδεσης (coordinator – clusters), εναλλάσσοντας τα μοντέλα διασύνδεσης των συσκευών. Η αξιολόγηση των επιδόσεων τέτοιων υβριδικών αρχιτεκτονικών μπορεί να γίνει με εφαρμογή προσομοιώσεων καθώς και μετρήσεων σε πραγματικά δίκτυα. Επομένως η εξέλιξη των μηχανισμών – αρχιτεκτονικών διασύνδεσης αναμένεται να συμβάλλει σημαντικά σε ερευνητικό επίπεδο στην επίτευξη βέλτιστων χαρακτηριστικών διασύνδεσης.

Η δυναμικότητα της διασύνδεσης στα ασύρματα δίκτυα θα πρέπει να επιτρέπει τόσο τη δυναμική αποδοχή όσο και την απομάκρυνση ανενεργών συσκευών στο χρόνο. Νέοι αλγόριθμοι επικοινωνίας μπορούν να συμβάλλουν καθοριστικά στη συσχέτιση των συσκευών, διατηρώντας την επικοινωνία σε ένα δυναμικό και εξελισσόμενο στο χρόνο δίκτυο, μικρής ή και μεγάλης κλίμακας.

Επιπλέον, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην επικοινωνία των συσκευών που μετέχουν σε ασύρματα δίκτυα, είναι η ανίχνευση των συγκρούσεων (collisions) κατά τις φάσεις εγκατάστασης των διασυνδέσεων. Στο πρότυπο DSME αυτό συνιστά ένα ιδιαίτερο πρόβλημα κατά την εκπομπή των σημάτων φάρου (Beacon). Μία λύση στο συγκεκριμένο πρόβλημα θα μπορούσε να προκύψει με την εξέλιξη των αλγορίθμων ανίχνευσης των φαινομένων σύγκρουσης με την ακρόαση του διαύλου μετάδοσης. Επιπρόσθετα οι τύποι των διαμορφώσεων με χρήση ορθογωνικών κωδικών μπορεί να συμβάλλουν καθοριστικά, βελτιστοποιώντας την ικανότητα παράλληλης μετάδοσης (πολυπλεξία συχνότητας) χωρίς παρεμβολές, αξιοποιώντας κατά τον τρόπο αυτό το διαθέσιμο εύρος ζώνης στον ορισμό των καναλιών μετάδοσης – λήψης.

Στα επίπεδα ορισμού της διαστρωμάτωσης των συσκευών του προτύπου DSME, διαφαίνεται το ανοιχτό θέμα της προτυποποίησης για τα ανώτερα στρώματα. Κατά συνέπεια, η μελέτη νέων πρωτοκόλλων διαστρωμάτωσης (για τα επίπεδα δικτύου, μεταφοράς και εφαρμογής), αναμένεται να συμβάλλουν καθοριστικά στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του προτύπου DSME. Οι μηχανισμοί των στρωμάτων για την επέκταση του προτύπου θα πρέπει να λάβουν υπόψη, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του προτύπου, εμπλουτίζοντας τις υπηρεσίες από τα χαμηλότερα επίπεδα (φυσικό στρώμα και στρώμα μέσου). Η προσομοίωση και η μέτρηση των επιδόσεων των νέων πρωτοκόλλων μπορεί να επιτευχθεί με προσομοιώσεις σε υπολογιστικά συστήματα. Κατά συνέπεια η αύξηση της επεξεργαστικής ικανότητας, αναμένεται επίσης να συμβάλλει καθοριστικά στην εφαρμογή προσομοιώσεων για δίκτυα μεγάλης κλίμακας.

Η επίδοση του προτύπου DSME (καθώς και όλων των πρωτοκόλλων επικοινωνίας), μπορεί να κριθεί/αξιολογηθεί από τις μετρικές επίδοσης ποιότητας του δικτύου (QoS). Τα χαρακτηριστικά των δεικτών ποιότητας αναφέρονται κυρίως στον καθορισμό των καθυστερήσεων μετάδοσης, της απώλειας πακέτων δεδομένων, της ρυθμοαπόδοσης των κόμβων και του χρόνου εγκατάστασης/απεγκατάστασης μίας σύνδεσης στο δίκτυο. Οι μετρικές επιδόσεων είναι σημαντικό να ενσωματώνονται στις συναρτήσεις των στρωμάτων – επιπέδων της δικτυακής υποδομής, διαμορφώνοντας κατά τον τρόπο αυτό τα πρωτόκολλα που προορίζονται για τη διαστρωμάτωση. Νέοι τύποι πρωτοκόλλων μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στη βελτιστοποίηση των μετρικών επίδοσης δίνοντας στις διασυνδεόμενες συσκευές τη δυνατότητα για την επίτευξη σημαντικών ρυθμών μετάδοσης/λήψης δεδομένων. Αυτό με τη σειρά του επεκτείνει το είδος και τον τύπο των εφαρμογών που προορίζονται για

τις συσκευές και το δίκτυο. Η αξιολόγηση των επιδόσεων μπορεί να γίνει είτε με την εφαρμογή προσομοιώσεων είτε με μετρήσεις σε πραγματικά – πιλοτικά δίκτυα.

Η κατανάλωση ισχύος των συσκευών αποτελεί επίσης ένα σημαντικό πρόβλημα το οποίο περιορίζει τη διάρκεια διασύνδεσης και ενεργότητας των συσκευών καθώς και τη διαθέσιμη επεξεργαστική ισχύ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μία συσκευή. Όπως είδαμε αυτό περιορίζει ακόμη και την ασφάλεια της επικοινωνίας, δεδομένου ότι η απαίτηση για μείωση της ισχύος κατανάλωσης μπορεί να είναι σημαντική. Κατά συνέπεια η εξέλιξη των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν οι συσσωρευτές (μπαταρίες), μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση του χρόνου ενεργότητας και στην ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών από τις συσκευές ενός ασύρματου δικτύου.

Η εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων, η εξέλιξη και η ταχύτητα των αλγορίθμων, τα πρωτόκολλα μετάδοσης – λήψης, οι τεχνικές των προσομοιώσεων, αποτελούν τους επιστημονικούς τομείς, οι οποίοι μπορούν να συμβάλλουν καθοριστικά στην εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών και του προτύπου DSME.

## Βιβλιογραφία

- [1] Wireless Personal Area Networks, Performance Interconnections and Security with IEEE 802.15.4, Shen, Pan, Wiley, © 2008
- [2] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4, IEEE Computer Society 5 Sep 2011
- [3] IEEE 802.15.4e: Survey, Guglielmo, Brienza, Anastasi, Computer Communications 88 (2016), Elsevier
- [4] Di Marco, Fischione, Santucci, Johansson, Modeling IEEE 802.15.4 networks over fading channels, IEEE Trans. Wireless Commun. 13 (10) (2014) 5366–5381.
- [5] Guglielmo, Restuccia, Anastasi, Conti, Das, Accurate and efficient modeling of 802.15.4 unslotted CSMA-CA through event chains computation, IEEE Trans. Mobile Comput. (2016).
- [6] Yazdi, Willig, Pawlikowski, Frequency adaptation for interference mitigation in IEEE 802.15.4-based mobile body sensor networks, Comput. Commun. 53 (1) (2014) 102–119.
- [7] Brienza, Roveri, De Guglielmo, Anastasi, Just-in-time adaptive algorithm for optimal parameter setting in 802.15.4 WSNs, ACM Trans. Auton. Adapt. Syst. 10 (4) (2016) 26 Article 27.
- [8] Brienza, De Guglielmo, Anastasi, Conti, Neri, Strategies for optimal MAC parameter setting in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks: A performance comparison, in: Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), Split, 2013
- [9] Yedavalli, Krishnamachari, Enhancement of the IEEE 802.15.4 MAC protocol for scalable data collection in dense sensor networks, in: Proceedings of the 6th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops (WiOPT 20 08), 20 08, pp. 152–161.
- [10] Singh, Kumar, Ameer, Performance evaluation of an IEEE 802.15.4 sensor network with a Star Topology, Wireless Netw. 14 (4) (2008) 543–568.
- [11] Pollin, Ergen, Ergen, Bougard, Van der Perre, Moerman, Bahai, Varaiya, Cattoor, Performance analysis of slotted carrier sense IEEE 802.15.4 medium access layer, IEEE Trans. Wireless Commun. 7 (9) (2008) 3359–3371.
- [12] Anastasi, Conti, Di Francesco, A comprehensive analysis of the MAC unreliability problem in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks, IEEE Trans. Indus. Inf. 7 (1) (2011) 52–65.
- [13] IEEE std. 802.15.4e, Part. 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC sublayer, IEEE Computer Society, 2012.

- [14] Pala.ella, Acce.ura, Grieco, Boggia, Dohler, and Engel. 2013. On Optimal Scheduling in Duty-Cycled Industrial IoT Applications Using IEEE802.15.4e TSCH. *IEEE Sensors Journal* 13, 10 (Oct. 2013), 3655–3666. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2266417>
- [15] [26] [33] Pala.ella, Watteyne, Wang, Muraoka, Acce.ura, Dujovne, Grieco, and Engel. 2016. On-the-Fly Bandwidth Reservation for 6TiSCH Wireless Industrial Networks. *IEEE Sensors Journal* 16, 2 (Jan. 2016), 550–560. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2480886>
- [16] Pfahl, Randt, Meier, Zschke, Geurts, and Buselmeier. 2014. A Holistic Approach for LowCost Heliostat Fields. In *Proceedings of the 20th International Conference on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies (SolarPACES 2014)*. Peking, China. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.021>
- [17] Polastre, Hill, and Culler. 2004. Versatile Low Power Media Access for Wireless Sensor Networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '04)*. ACM, 95–107. <https://doi.org/10.1145/1031495.1031508>
- [18] P'oner, Seidel, Brown, Roedig, and Wolf. 2014. Constructing Schedules for Time-Critical Data Delivery in Wireless Sensor Networks. *ACM Transactions on Sensor Networks* 10, 3 (May 2014), 44:1–44:31. <https://doi.org/10.1145/2494528>
- [19] Ura, Vogli, Pala.ella, Grieco, Boggia, and Dohler. 2015. Decentralized Traffic Aware Scheduling in 6TiSCH Networks: Design and Experimental Evaluation. *IEEE Internet of things Journal* 2, 6 (Dec. 2015), 455–470. <https://doi.org/10.1109/IIOT.2015.2476915>
- [20] Tinka, Watteyne, Pister, and Bayen. 2011. A Decentralized Scheduling Algorithm for Time Synchronized Channel Hopping. *EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications* 11, 1 (Sept. 2011). <https://doi.org/10.4108/icst.trans.mca.2011.e5>
- [21] Hwang, Wang, and Wu-Bin Wang. 2017. A Distributed Scheduling Algorithm for IEEE 802.15.4e Wireless Sensor Networks. *Computer Standards & Interfaces* 52 (May 2017), 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2017.01.003>
- [22] Kauer and Turau. 2018. An Analytical Model for Wireless Mesh Networks with Collision-Free TDMA and Finite queues. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018 (June 2018), 149. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1146-x>
- [23] Duquennoy, Nahas, Landsiedel, and Watteyne. 2015. Orchestra: Robust Mesh Networks through Autonomously Scheduled TSCH. In *Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. 337–350. <https://doi.org/10.1145/2809695.2809714>
- [24] Kauer and Turau. 2018. An Analytical Model for Wireless Mesh Networks with Collision-Free TDMA and Finite queues. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2018 (June 2018), 149. <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1146-x>
- [25] Wan, Shane Eisenman, Campbell, and Crowcro. 2005. Siphon: Overload Traffic Management Using Multi-Radio Virtual Sinks in Sensor Networks. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2005)*. 116–129. <https://doi.org/10.1145/1098918.1098931>

- [26] Ella, Watteyne, Wang, Muraoka, Ura, Dujovne, Grieco, and Engel. 2016. On-the-Fly Bandwidth Reservation for 6TiSCH Wireless Industrial Networks. *IEEE Sensors Journal* 16, 2 (Jan. 2016), 550–560. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2480886>
- [27] Domingo-Prieto, Chang, Vilajosana, Watteyne. 2016. Distributed PID-Based Scheduling for 6TiSCH Networks. *IEEE Communications Letters* 20, 5 (May 2016), 1006–1009. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2546880>
- [28] Papadopoulos. 2016. Experimental Validation of a Distributed Self-Configured 6TiSCH with Traffic Isolation in Low Power Lossy Networks. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM 2016)*. 102–110. <https://doi.org/10.1145/2988287.2989133>
- [29] Ojo, Giordano, Portaluri, Adami, and Pagano. 2017. An Energy Efficient Centralized Scheduling Scheme in TSCH Networks. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. 570–575. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2017.7962719>
- [30] Lee, Exarchakos, and Lio.a. 2017. Distributed TSCH scheduling: A Comparative Analysis. In *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2017)*. 3517–3522. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8123176>
- [31] Anamalamudi, BiLiu, Zhang, Sangi, Perkins, and Anand. 2018. Scheduling Function One (SF1): Hop-by-Hop Scheduling with RSVP-TE in 6TiSCH Networks. <https://tools.ietf.org/html/dra.-satish-6tisch-6top-sf1-04>
- [32] Dujovne, Grieco, Pala.ella, and Acce.ura. 2018. 6TiSCH Experimental Scheduling Function (SFX). <http://www.ietf.org/internet-dra.s/dra.-ietf-6tisch-6top-sfx-01.txt>
- [33] Paladella, Watteyne, Wang, Muraoka, Ara, ujevne, Grieco, and Engel. 2016. On-the-Fly Bandwidth Reservation for 6TiSCH Wireless Industrial Networks. *IEEE Sensors Journal* 16, 2 (Jan. 2016), 550–560. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2480886>
- [34] Kauer, Ostler, L'ubkert, and Turau. 2016. Formal Analysis and Verification of the IEEE 802.15.4 DSME Slot Allocation. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWIM 2016)*. <https://doi.org/10.1145/2988287.2989148>
- [35] *Frontier and Innovation in Future Computing and Communications*, Park, Zomaya, Jeong, Obaidat, Springer © 2014
- [36] An Efficient Distributed Scheduling Algorithm for Mobility Support in IEEE 802.15.4e DSME-Based Industrial Wireless Sensor Networks Y-S Lee and S-H Chung, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Volume 2016, Article ID 9837625, <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9837625>
- [37] Toscano and Bello, “Multichannel superframe scheduling for IEEE 802.15.4 industrial wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 337–350, 2012.



- [38] Song, Huang, Shirazi, and LaHusen, "TreeMAC : localized TDMA MAC protocol for real-time high-data-rate sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom '09)*, pp. 1–10, Galveston, Tex, USA, March 2009.
- [39] Zhang, Yu, and Zhang, "A depth-based TDMA scheduling for clustering sensor networks," in *Proceedings of the 4th International Conference on Frontier of Computer Science and Technology (FCST '09)*, pp. 261–266, Shanghai, China, December 2009.
- [40] Ahn, Cho, and An, "Slotted beacon scheduling using ZigBee Cskip mechanism," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM'08)*, pp. 103–108, IEEE, August 2008.
- [41] Yeh, Pan, and Tseng, "Two-way beacon scheduling in ZigBee tree-based wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC '08)*, pp. 130–137, IEEE, Taichung, Taiwan, June 2008.
- [42] Rhee, Warrier, Min, and Xu, "DRAND : distributed randomized TDMA scheduling for wireless ad hoc networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, no. 10, pp. 1384–1396, 2009.
- [43] Hanzalek "Distributed Real Time TDMA Scheduling Algorithm for Tree Topology WSNs", See discussions, stats, and author profiles for this publication at : <https://www.researchgate.net/publication/316514698>
- [44] Palattella, Accettura, Dohler, Grieco, and Boggia, "Traffic aware scheduling algorithm for reliable lowpower multi-hop IEEE 802.15.4e networks," in *Proceedings of the IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '12)*, pp. 327–332, Sydney, Australia, September 2012.
- [45] Tinka, Watteyne, Pister, and Bayen, "A decentralized scheduling algorithm for time synchronized channel hopping," *EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications*, vol. 11, no. 1, article e5, 2011.
- [46] Koub^aa, Cunha, and Alves, "A time division beacon scheduling mechanism for IEEE 802.15.4/zigbee cluster-tree wireless sensor networks," in *Proceedings of the 19th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS '07)*, pp. 125–135, IEEE, Pisa, Italy, July 2007.
- [47] Kauer, Köstler, and Turau, "Reliable wireless multi-hop networks with decentralized slot management : An analysis of IEEE 802.15.4 DSME," 2018, *arXiv :1806.10521*. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1806.10521>
- [48] Enhanced Fast Association for 802.15.4e-2012 DSME MAC Protocol, Liu, XLi, Su, Z. Fan, Wang, Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE 2013)
- [49] Lee and Chung, "An efficient distributed scheduling algorithm for mobility

support in IEEE 802.15. 4e dsme-based industrial wireless sensor networks,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 12, no. 2, p. 9837625, 2016.

[50] Subramanya Bhat, Shwetha, and Devaraju, “A performance study of proactive, reactive and hybrid routing protocols using qualnet simulator,” *International Journal of Computer Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 10–17, 2011.

[51] Kwang-il and SungWook, “Analysis and enhancement of iee 802.15.4e dsme beacon scheduling model,” in *Journal of Applied Mathematics*, vol. 2014, Article ID 934610, April 2014, pp. 1–15.

[52] Improving network formation in IEEE 802.15.4e DSME, Vallati, Brienza, Palmieri, Anastasi, Elsevier, *Computer Communications* 114 (2017) 1–9

[53] An adaptive backoff and dynamic clear channel assessment mechanisms in IEEE 802.15.4 MAC for wireless body area networks Mkongwa, Liu, Wang, Elsevier, *Ad Hoc Networks* 120 (2021) 102554

[54] Enhanced Beacon Scheduling of IEEE802.15.4e DSME, Nam, Hwang, *Frontier and Innovation in Future Computing and Communications* [35] Chap. 60.

[55] Improving QoS for IEEE 802.15.4e DSME Networks, Kurunathan Programa Doutoral em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Jan 2021

[56] Formal Analysis and Verification of the IEEE 802.15.4 DSME Slot Allocation, Kauer, Lubkert, Turau, MSWiM '16, November 13 - 17, 2016, Malta

[57] A Framework to Support Real-Time Applications over IEEE802.15.4 DSME, Taneja, 2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Singapore, 7-9 April 2015

[58] A Priority-Aware Multichannel Adaptive Framework for the IEEE 802.15.4e-LLDN, Patti, Bello, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 63, NO. 10, OCTOBER 2016

[59] An Adaptive Superframe Duration Allocation Algorithm for Resource-Efficient Beacon Scheduling, Jeong, Choi, Kim, Hwang, *Journal of Internation Processing Systems*, Vol.11, No.2, pp.295~309, June 2015

[60] An Exact Scheduling Algorithm for Convergecast and Broadcast in Tree Topology WSNs -An Application to DSME-IEEE 802.15.4e-, Ahmad, Severino, Hanzalek, 15,2021 at 20:42:02 UTC from IEEE Xplore

[61] Delay-Bounded Scheduling in IEEE 802.15.4e DSME using Linear Programming, Meyer, Turau, 2018 15<sup>th</sup> International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)

[62] Distributed Fast Beacon Scheduling for Mesh Networks, Lee, Hwang, Jeon, Choi, 2011 Eighth IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems

- [63] DynaMO\_Dynamic Multisuperframe Tuning for Adaptive IEEE 802.15.4e DSME Networks, Kurunathan, Severino, Koubaa, Tovar, IEEE Access, Vol. 7, 2019
- [64] Novel Extensions to Enhance Scalability and Reliability of the IEEE 802.15.4-DSME Protocol, Battaglia, Collotta, Leonardi, Bello, Electronics 2020, 9, 126; doi:10.3390/electronics 9010126
- [65] Modeling and analysis of priority and range-based-deterministic and synchronous multichannel extension-guaranteed time slot allocation in IEEE 802.15.4e medium access control protocol, Asuti, Basarkod, © 2021 Wiley & Sons, Ltd.
- [66] Performance Analysis of IEEE 802.15.4e DSME MAC Protocol Under WLAN Interference, Lee, Jeong, 978-1-4673-4828-7/12/\$31.00 ©2012 IEEE
- [67] Comparison between Channel Hopping and Channel Adaptation for Industrial Wireless Sensor Networks, Gomes, Alencar, Queiroz, Fonseca, Peces, <https://www.researchgate.net/publication/313853257>
- [68] Alternative Path Communication in Wide-Scale Cluster-Tree Wireless Sensor Networks Using Inactive Periods, Leao, Montez, Portugal, Vasques, Sensors 2017, 17, 1049; doi:10.3390/s17051049