

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τμήμα Πληροφορικής



Διπλωματική Εργασία

ΠΜΣ: Ερευνητικές Κατευθύνσεις στην Πληροφορική

Ζητήματα Χρονοπρογραμματισμού για Υποστήριξη

Internet of Medical Things Δικτυακών

Περιβαλλόντων

Αικατερίνη Γεωργία Αλβανού – ΠΜΕ201902

Επιβλέπων: Καθηγητής Κωνσταντίνος Οικονόμου

Ιούνιος 2021

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Θεόδωρος Ανδρόνικος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Ιωάννης Καρύδης, Επίκουρος Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Στη γιαγιάκα μου...

Περίληψη

Το Διαδίκτυο των Ιατρικών Πραγμάτων βρίσκει εφαρμογή στον κλάδο της υγείας και επικεντρώνεται στην εξυπηρέτηση ιατρικών αναγκών, μέσω της συλλογής δεδομένων για το ανθρώπινο σώμα από ποικίλους αισθητήριους κόμβους. Τα δεδομένα αυτά σχετίζονται με πλήθος ζωτικών ενδείξεων και φυσιολογικών παραμέτρων του οργανισμού και προκύπτουν από συνεχή παρακολούθηση και δειγματοληψία. Ο ακρογωνιαίος λίθος του Διαδικτύου των Ιατρικών Πραγμάτων είναι ένα Wireless Body Area Network (WBAN), το οποίο καθιστά δυνατή τη σύνδεση μεταξύ των αισθητήριων κόμβων και τη μετάδοση των συλλεχθέντων δεδομένων τους.

Μια ενεργή ερευνητική περιοχή ενός WBAN είναι ο σχεδιασμός αποδοτικών Medium Access Control (MAC) πρωτοκόλλων που να εξασφαλίζουν υψηλό Quality of Service (QoS), με δεδομένο, όμως, ότι ανταποκρίνεται στις ιδιαιτερότητες ενός τέτοιου είδους δικτύων. Στις ιδιαιτερότητες αυτές, αρχικά συγκαταλέγεται ο καθορισμός διαφορετικών προτεραιοτήτων στους κόμβους, ανάλογα με τη σημασία των ανιχνεύσιμων από αυτούς δεδομένων στην υγεία του ατόμου. Επιπρόσθετα, πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν οι χρονικοί περιορισμοί των δεδομένων, καθώς αυτά παραμένουν αντιπροσωπευτικά για την υγεία του ατόμου για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ένα ακόμα ιδιαίτερο και συνάμα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό ενός WBAN αποτελεί η εμφάνιση περιπτώσεων εκτάκτου ανάγκης, όταν τα δεδομένα κυμαίνονται σε μη φυσιολογικά και επιτρεπτά για την υγεία όρια.

Με δεδομένο πως σε ένα WBAN πρωταγωνιστούν πρωτόκολλα τύπου Time-Division Multiple Access (TDMA) και χρησιμοποιείται τοπολογία αστέρα, εξαιτίας του περιορισμένου πλήθους κόμβων που μπορεί να τοποθετηθούν στο ανθρώπινο σώμα, σχεδιάζεται και χρησιμοποιείται ένα σύστημα που βρίσκεται σε απόλυτη συμφωνία με τα χαρακτηριστικά αυτά, συμβαδίζοντας παράλληλα με τη δομή του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4, το οποίο συναντάται συχνά στη βιβλιογραφία. Απαραίτητος για την ομαλή λειτουργία του συστήματος, την αποφυγή τυχόν συγκρούσεων και την έγκαιρη μετάδο-

ση των δεδομένων κρίνεται ένας αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού.

Στην εν λόγω διπλωματική εργασία μελετώνται και αξιολογούνται πειραματικά τέσσερις συνολικά αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού. Για την ακρίβεια, δύο εξ αυτών εντοπίζονται στη βιβλιογραφία και αξιοποιούνται για την ανάπτυξη δύο νέων αλγορίθμων που προτείνονται στα πλαίσια της εργασίας. Με απώτερο σκοπό την προτεραιοποίηση των κόμβων, ενσωματώνονται τα Differentiated Services στο χρονοπρογραμματισμό των μεταδόσεων, τα οποία ταξινομούν το traffic του δικτύου σε διαφορετικές κλάσεις και διαθέτουν μηχανισμούς για την εξασφάλιση QoS σε αυτές, με έναν όσο το δυνατό πιο δίκαιο (fair) τρόπο.

Με στόχο τη δυναμική ανάθεση των slots κατά το χρονοπρογραμματισμό της μετάδοσης των δεδομένων, αξίζει να σημειωθεί πως αυτός λαμβάνει χώρα στην αρχή κάθε frame βάσει των χαρακτηριστικών του traffic στο προηγούμενο frame. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, όπου το δίκτυο είναι πιο πιθανό να βρεθεί σε κατάσταση συμφόρησης, καθώς ο ρυθμός παραγωγής δεδομένων αυξάνεται και ελαχιστοποιούνται οι χρονικοί περιορισμοί. Σε μία τέτοια κατάσταση, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού θα πρέπει να καθορίσει ποιοι κόμβοι δε θα έχουν δυνατότητα μετάδοσης στο frame, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα διάφορα χαρακτηριστικά τους.

Ο πρώτος αλγόριθμος που προτείνεται είναι ο Class-based Prioritized Proportional Allocation (CPPA), ο οποίος επεκτείνει τη λογική του αλγορίθμου Prioritized Proportional Allocation (PPA), ώστε να λαμβάνει υπ' όψιν διαφορετικές κλάσεις του traffic. Για την ακρίβεια, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος οριοθετεί το μέγιστο πλήθος των επιτρεπτών slots, στα οποία μπορεί να μεταδώσουν κόμβοι μίας κλάσης, χρησιμοποιώντας ένα κοινό μηχανισμό με τον PPA. Έχοντας υπολογίσει αυτά, αναθέτει slots στους κόμβους κάθε κλάσης με τρόπο όμοιο με τον PPA, τοποθετώντας, όμως, πρώτα στο frame τα slots της κλάσης που θεωρείται σημαντικότερη, προτού συνεχίσει με αυτά της αμέσως επόμενης.

Ο δεύτερος αλγόριθμος που προτείνεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι ο Proportionally Prioritized Expedited Forwarding (PPEF), ο οποίος συνδυάζει στοιχεία του CPPA και του αλγορίθμου Expedited Forwarding (EF), που συναντάται στα Differentiated Services. Συγκεκριμένα, στον PPEF αξιοποιείται και πάλι ο μηχανισμός οριοθέτησης του μέγιστου αριθμού των slots κάθε κλάσης, ενώ σε κάθε κόμβο ανατίθενται slots, όπως στο EF. Επίσης, κοινή και στους τρεις αλγορίθμους είναι η διάταξη των slots εντός του frame με βάση τη σημαντικότητα της κλάσης. Σε αντίθεση, όμως, με τον CPPA, ο PPEF διαθέτει ένα μηχανισμό αναπροσαρμογής του μέγιστου

επιτρεπτού ορίου των slots κάθε κλάσης, σε περίπτωση που αυτός έχει υπερεκτιμηθεί, ώστε να μην μένουν slots αναξιοποίητα.

Οι τέσσερις αλγόριθμοι αξιολογούνται πειραματικά στο περιβάλλον προσομοίωσης OMNeT++ για τρία διαφορετικά σενάρια πειραματισμού, τα οποία διαφοροποιούνται στο ρυθμό παραγωγής δεδομένων και στην κατανομή του traffic των διαφορετικών κλάσεων. Οι αλγόριθμοι αξιολογούνται με βάση ένα πλήθος μετρικών που σχετίζεται με το QoS και συμπεριλαμβάνει τη ρυθμαπόδοση (throughput) του συστήματος, το πλήθος των πακέτων που ξεπερνούν τους χρονικούς περιορισμούς χωρίς να μεταδοθούν, κ.ά.

Από τα εξαγόμενα αποτελέσματα φαίνεται πως ο προτεινόμενος αλγόριθμος PPEF αποδίδει καλύτερα σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους, αφού προσαρμόζεται και στα τρία διαφορετικά σενάρια, επιτυγχάνοντας με τον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων την υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τους άλλους στην πλειονότητα των μετρικών. Μέσω του πειραματισμού, προκύπτουν πρακτικά συμπεράσματα σχετικά με την παραμετροποίηση των τεσσάρων αλγορίθμων, αλλά και εντοπίζονται συνθήκες υπό τις οποίες οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν ελλείψεις.

Abstract

The Internet of Medical Things finds application in the health industry and focuses on serving medical needs, through the collection of data from the human body through a variety of sensory nodes. These data are related to a number of vital signs and physiological parameters of the organism and result from continuous monitoring and sampling. The cornerstone of the Internet of Medical Things is a Wireless Body Area Network (WBAN), which enables the communication between sensory nodes and the transmission of their collected data.

An active research area revolving around WBANs is the design of efficient Medium Access Control (MAC) protocols that ensure a high Quality of Service (QoS), but also attempt to address the network's requirements, which arise due to the environment's intricacies. These intricacies include the determination of different node priorities, depending on the importance of the data detected by them in regards to the health of the individual. In addition, the time constraints of the data must be taken into account, as the collected data remain representative of the individual's health only for a limited period of time. Another special and at the same time very important feature of a WBAN is the occurrence of emergencies, when it is detected that sensed values are in an abnormal range, indicating that the patient's health is in critical condition.

Given that in a WBAN, Time Division Multiple Access (TDMA)-based MAC protocols are considered promising and the fact that the star topology is often encountered, due to the limited number of nodes that can be placed in the human body, a system is designed and used that is in complete agreement with these characteristics, while also being in accordance with the structure of the IEEE 802.15.4 protocol, which is prominent in the relevant literature. For the avoidance of any collisions and the timely transmission of data, a scheduling algorithm is considered necessary to enable the system's seamless operation.

In this dissertation, a total of four scheduling algorithms are studied and evaluated experimentally. To be precise, two of them are located in the literature and they are used to develop two new algorithms proposed in the context of the present work. With the ultimate goal of prioritizing between nodes, the Differentiated Services architecture is integrated to aid in transmission scheduling, which classifies network traffic into different classes and has mechanisms to ensure QoS provision to each of them, in the fairest possible way.

In order to dynamically assign the slots during the data transmission scheduling, it is worth noting that this process takes place at the beginning of each frame based on the characteristics of the traffic observed in the previous frame. This is especially useful in emergencies, where the network is more likely to be congested, as data generation rates increase and time constraints are even tighter. In such a situation, the scheduling algorithm will have to determine which nodes will not be allowed to transmit during the frame, taking into account their various characteristics.

The first algorithm proposed is Class-based Prioritized Proportional Allocation (CPPA), which extends the logic of the Prioritized Proportional Allocation (PPA) algorithm to take into account different classes of traffic. To be precise, this algorithm limits the maximum number of allowed slots, during which the nodes of a given class can transmit, using a mechanism that is utilized by PPA. Having calculated these limits, it assigns slots to the nodes within each class in a manner similar to the PPA, but it differs in that the slots of the class that is considered most important are placed first within the frame, before continuing with those of the next most important class.

The second algorithm proposed in this dissertation is Proportionally Prioritized Expedited Forwarding (PPEF), which combines elements of CPPA and the Expedited Forwarding (EF) algorithm typically found in Differentiated Services. Specifically, in PPEF, the mechanism of limiting the maximum number of slots of each class is used again, while slots are assigned to each node in a manner similar to EF. Common to all three algorithms is the arrangement of slots within the frame based on the importance of the corresponding class. However, unlike CPPA, PPEF has a mechanism for adjusting the limit of maximum slots given to each class, in case it has been overestimated, so that no slots are left unused.

The four algorithms are experimentally evaluated in the OMNeT++ simulation environment for three different experimentation scenarios, which differ in the rate

of data generation and the distribution of traffic among the different classes. Algorithms are evaluated based on a number of metrics related to QoS and include system throughput, the number of packets for which transmission does not take place within the time constraints, etc.

According to the acquired results, the proposed PPEF algorithm performs better compared to the other algorithms, since it adapts to all three different scenarios, achieving the highest performance among the compared algorithms for the majority of the considered metrics, while utilizing the same combination of parameters across all scenarios. Through experimentation, practical conclusions are drawn about the parameterization of the four algorithms, but also conditions are identified under which the algorithms underperform.

Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, ο κύκλος των μεταπτυχιακών σπουδών ολοκληρώνεται, γεγονός άκρως σημαντικό για την ατομική σταδιοδρομία. Κρίνω, λοιπόν, απαραίτητο να ευχαριστήσω όσους με βοήθησαν, καθ' όλη την διάρκεια ανάπτυξής της έως και την διεκπεραίωση της.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Κωνσταντίνο Οικονόμου που με τις πολύτιμες συμβουλές του και την καθοδήγησή του, με βοήθησε να φέρω εις πέρας αυτή την εργασία. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω συμφοιτητές μου Αλέξανδρο, Κωνσταντίνο, Αστέριο, Σπύρο, Ανδρεάνα και Γιάννη για τις συμβουλές και την στήριξή τους. Τέλος, κρίνω απαραίτητο να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που όπως σε κάθε μου επιλογή, βρισκόταν δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού μου.

Περιεχόμενα

A´	Εισαγωγή	1
A´.1	Ασύρματα Δίκτυα Περιοχής Σώματος	4
A´.2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	6
A´.3	Συνεισφορά Εργασίας	9
A´.4	Δομή Εργασίας	12
B´	Περιγραφή Συστήματος	14
B´.1	Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Περιοχής Σώματος	14
B´.1.1	Είδη Κόμβων	15
B´.1.2	Τοπολογία	16
B´.1.3	Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας	17
B´.2	Differentiated Services	18
B´.3	Διαμόρφωση Χρησιμοποιηθέντος Συστήματος	19
B´.4	Μαθηματική Μοντελοποίηση Συστήματος	23
Γ´	Αλγόριθμοι Χρονοπρογραμματισμού	31
Γ´.1	Αλγόριθμος Prioritized Proportional Allocation	31
Γ´.2	Class-based Prioritized Proportional Allocation Αλγόριθμος	34
Γ´.3	Expedited Forwarding Αλγόριθμος	36
Γ´.4	Proportionally Prioritized Expedited Forwarding Αλγόριθμος	38
Δ´	Αξιολόγηση Αλγορίθμων Χρονοπρογραμματισμού	41
Δ´.1	Παράμετροι Πειραμάτων	41
Δ´.2	Αποτελέσματα Αξιολόγησης	45
Δ´.2.1	Πρώτο Σενάριο Πειραματισμού	45

Περιεχόμενα	ix
Δ'.2.2 Δεύτερο Σενάριο Πειραματισμού	52
Δ'.2.3 Τρίτο Σενάριο Πειραματισμού	58
Δ'.3 Συμπεράσματα Αξιολόγησης	65
Ε' Σύνοψη και Συμπεράσματα	69
Βιβλιογραφία	71
Παραρτήματα	80
Γλωσσάρι Ξενικών Όρων	81
Συμβολισμοί Μεγεθών	83
Συντομογραφίες	85
Ευρετήριο	86

Κατάλογος Σχημάτων

B'.1 Το superframe του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4.	22
B'.2 Το χρησιμοποιηθέν σύστημα.	23
Δ'.1 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency ανά αλγόριθμο, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.	46
Δ'.2 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση topK ανά αλγόριθμο, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.	47
Δ'.3 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση normal ανά αλγόριθμο, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.	48
Δ'.4 Το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων για το σύστημα ανά αλγόριθμο, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.	49
Δ'.5 Το μέσο waiting time όλων των μηνυμάτων, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.	50
Δ'.6 Το throughput (α) και το ποσοστό των served μηνυμάτων (β), για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.	50
Δ'.7 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για κάθε κλάση και για το σύστημα συνολικά, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.	51
Δ'.8 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency ανά αλγόριθμο, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.	52
Δ'.9 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση topK ανά αλγόριθμο, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.	53
Δ'.10 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση normal ανά αλγόριθμο, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.	54
Δ'.11 Το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων για το σύστημα ανά αλγόριθμο, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.	55

Δ'.12 Το μέσο waiting time για όλες τις κλάσεις του συστήματος, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.	56
Δ'.13 Το throughput (α) και το ποσοστό των served μηνυμάτων (β), για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.	57
Δ'.14 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για κάθε κλάση και για το σύστημα συνολικά, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.	57
Δ'.15 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency ανά αλγόριθμο, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.	59
Δ'.16 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση topK ανά αλγόριθμο, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.	60
Δ'.17 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση normal ανά αλγόριθμο, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.	61
Δ'.18 Το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων για το σύστημα ανά αλγόριθμο, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.	62
Δ'.19 Το μέσο waiting time για όλες τις κλάσεις του συστήματος, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.	63
Δ'.20 Το throughput (α) και το ποσοστό των served μηνυμάτων (β), για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.	64
Δ'.21 Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για κάθε κλάση και για το σύστημα συνολικά, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.	64

Κατάλογος Πινάκων

<i>Δ.1 Οι παράμετροι των πειραμάτων.</i>	44
--	----

Κεφάλαιο Α΄

Εισαγωγή

ΤΑ Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, γνωστά και ως *Wireless Sensor Networks (WSNs)* αποτελούν μια τεχνολογία αιχμής για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (*Internet of Things (IoT)*), αποφέροντας σημαντικές ωφέλειες στη καθημερινή ζωή και επιτρέποντας την παρακολούθηση, τον εντοπισμό, τον έλεγχο και την αυτοματοποίηση πλήθους διαδικασιών [1, 2]. Τα τελευταία χρόνια γνωρίζουν μεγάλη ανάπτυξη για ποικιλία εφαρμογών, γι' αυτό και η επέκταση και η ανάμειξή τους σε ιατρικούς σκοπούς θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως αναπόφευκτη [3, 4, 5].

Κατ' επέκτασιν και με σκοπό την εξυπηρέτηση αναγκών στον τομέα της υγείας και των ιατρικών περιβαλλόντων, διατίθεται ένα σύνολο αισθητήριων συσκευών που συλλέγουν πληροφορίες για το ανθρώπινο σώμα, το οποίο συντελεί το Διαδίκτυο των Ιατρικών Πραγμάτων, ευρέως διαδεδομένο ως *Internet of Medical Things (IoMT)*. Για το IoMT έχει δημιουργηθεί μια ειδική κατηγορία WSNs, τα λεγόμενα *Ασύρματα Δίκτυα Περιοχής Σώματος* ή *Wireless Body Area Networks*, στο εξής WBANs [6]. Με άλλα λόγια, ένα WBAN αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο του IoMT, βελτιώνοντας την αποδοτικότητά του.

Τα WBANs γνωρίζουν ιδιαίτερη άνθιση χάρη στην διαρκή εξέλιξη των ασύρματων τηλεπικοινωνιών και της τεχνολογίας των αισθητήρων, τα οποία επιτρέπουν την ανάπτυξη έξυπνων ιατρικών αισθητήριων συσκευών με χαμηλό κόστος, μικρό μέγεθος και φορητότητα, οι οποίες μπορούν να τοποθετηθούν στο ανθρώπινο σώμα. Ακόμα, επιτρέπουν τη σύνδεση των αισθητήρων και τη μετάδοση των συλλεχθέντων δεδομένων [7]. Οι αισθητήρες αυτοί, λοιπόν, παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης, δειγματοληψίας και επεξεργασίας των ζωτικών ενδείξεων, ανατροφοδοτώντας τόσο το

χρήστη όσο και το ιατρικό προσωπικό [6].

Η ιατρική παρακολούθηση ενός ανθρώπινου σώματος, μέσω ενός WBAN, μπορεί να εξυπηρετήσει από κοινού τους επαγγελματίες υγείας, το σύστημα υγείας και τους ίδιους τους ασθενείς [8]. Για την ακρίβεια, το συγκεκριμένο είδος δικτύου καθιστά δυνατή τη κινητικότητα των ασθενών, κάτι που έως τώρα ήταν σχεδόν αδύνατο, καθώς οι ασθενείς συναντούσαν πολλούς περιορισμούς ως προς τη μετακίνηση και την άνεσή τους, για την παρακολούθηση των ζωτικών τους ενδείξεων. Ακόμη, επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των ασθενών και την άμεση διάχυση των ευαίσθητων ιατρικών δεδομένων που προκύπτουν στους θεράποντες ιατρούς, χωρίς υψηλές απαιτήσεις σε κόστη και εξασφαλίζοντας μια καλύτερη ποιότητα ζωής.

Ένα από τα κυριότερα προτερήματα ενός WBAN είναι το γεγονός ότι προσφέρει δεδομένα για πλήθος παραμέτρων της ανθρώπινης φυσιολογίας, η δειγματοληψία των οποίων πραγματοποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα και σε βάθος χρόνου. Αυτό έχει ως συνέπεια οι ειδικοί της υγείας να αποκτούν μια πληρέστερη και σαφέστερη εικόνα για την υγεία του ατόμου, καθώς δεν έχουν στη διάθεσή τους μόνο μεμονωμένα στιγμιότυπα [9].

Όλα τα δεδομένα που παράγονται από τους διαφορετικούς αισθητήριους κόμβους είναι χρήσιμα και αντιπροσωπεύουν την κατάσταση της υγείας του ατόμου, ωστόσο κάποια εξ αυτών προσφέρουν πληροφορίες για πιο κρίσιμες οργανικές λειτουργίες κι έτσι μπορούν να χαρακτηριστούν πιο σημαντικά. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται τον καθορισμό διαφορετικών προτεραιοτήτων για κάθε αισθητήρα, ανάλογα με τη σημασία των ανιχνεύσιμων από αυτόν δεδομένων για την υγεία και ορίζεται ως ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό *Medium Access Control (MAC)* πρωτοκόλλων [10, 11].

Επιπλέον, υπάρχει περίπτωση κάποια από τα δεδομένα που έχουν ανιχνεύσει οι αισθητήριοι κόμβοι, να κυμαίνονται σε μη φυσιολογικά και επιτρεπτά όρια, με αποτέλεσμα ο οργανισμός να τίθεται σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης, γεγονός που με τη σειρά του πρέπει να επηρεάζει τη λειτουργία και την κυκλοφορία (traffic) του δικτύου. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν η ανίχνευση ακανόνιστου ρυθμού των καρδιακών παλμών, πολύ υψηλή ή χαμηλή πίεση του αίματος ή η υπερβολική αύξηση ή μείωση του επιπέδου της γλυκόζης στο αίμα ενός ατόμου που πάσχει από διαβήτη, κ.ά. [12].

Αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι τα δεδομένα που έχει ανιχνεύσει ένας αισθητήριος κόμβος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή είναι αντιπροσωπευτικά για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, η συγκέντρωση της γλυκόζης στο αίμα,

δηλαδή το σάκχαρο, μεταβάλλεται λεπτό προς λεπτό¹. . Αν, λοιπόν, η μετάδοση αυτών των δεδομένων δεν πραγματοποιηθεί εντός ενός επιτρεπτού χρονικού ορίου, μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα για την υγεία του ατόμου. Κατά συνέπεια σε ένα WBAN, προκύπτει η ανάγκη για εγγύτητα και ανταπόκριση στους χρονικούς περιορισμούς ή αλλιώς time constraints.

Κατ' επέκτασιν, οι παραπάνω ιδιαιτερότητες ενός WBAN είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψιν, τόσο για την αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου και κυρίως για την εξασφάλιση της προστασίας της ανθρώπινης υγείας. Εξάλλου, η βιβλιογραφία τονίζει την ανάγκη για σχεδιασμό πρωτοκόλλων και αλγορίθμων που να ανταπεξέρχονται σε αυτές τις ιδιαιτερότητες [11].

Παρά τις ωφέλειες, η υιοθέτηση και πρακτική εφαρμογή τους στην καθημερινή ζωή απέχει, εξαιτίας πλήθους προκλήσεων από κοινωνική και τεχνική σκοπιά που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Αναφορικά με τις πρώτες, αυτές κυρίως επικεντρώνονται σε ζητήματα που αφορούν την ευχρηστία των συσκευών, την προστασία της ιδιωτικότητας και την εξασφάλιση της ασφάλειας και ακεραιότητας των χρηστών [13].

Συνεχίζοντας με κάποιες τεχνικές προκλήσεις, πρέπει να διευθετηθούν διάφορα ζητήματα για το σχεδιασμό του δικτύου και την υλοποίηση του με τρόπο τέτοιο, ώστε να εξασφαλιστούν η ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση (delay), η μέγιστη δυνατή ρυθμopόδοση (throughput) και η μέγιστη διάρκεια ζωής των κόμβων του δικτύου (network lifetime). Εκ παραλλήλου, πρέπει να αποφευχθούν στο μέτρο του δυνατού φαινόμενα, όπως οι συγχρούσεις (collisions), οι οποίες προκαλούνται όταν υπάρχει ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων και απαιτείται αναμετάδοση αυτών, οι περιπτώσεις idle listening, κατά τις οποίες ο κόμβος ακούει σε ένα άδειο κανάλι για να λάβει δεδομένα, κ.ά. [13]. Τέτοια φαινόμενα οδηγούν στην απώλεια ενέργειας, γι' αυτό και χρήζουν επίλυσης, κάτι που επιτυγχάνεται, μέσω των πρωτοκόλλων Ελέγχου Πρόσβασης στο Μέσο, γνωστά και ως MAC protocols.

Τα πρωτόκολλα MAC διακρίνονται σε contention-based και schedule-based πρωτόκολλα. Στα πρώτα, όπως είναι το Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA), αν το κανάλι είναι απασχολημένο, ο κόμβος αποτρέπει την μετάδοσή του μέχρι το κανάλι να είναι άδειο. Στα δεύτερα, όπως είναι το Time-Division Multiple Access (TDMA), ο χρόνος διακρίνεται σε slots, το καθένα από τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί από έναν κόμβο για μετάδοση. Ένας προκαθορισμένος αριθμός από slots ομαδοποιείται σε ένα frame και ο χρονοπρογραμματισμός λαμβάνει χώρα στην αρχή

¹<https://tinyurl.com/v82w4zvk>

κάθε frame [12]. Αξίζει να αναφερθεί πως τα πρωτόκολλα τύπου TDMA προτιμώνται στα WBANs, καθώς ικανοποιούν τις απαιτήσεις ως προς την ετερογένεια του traffic του δικτύου [12].

Συνεπώς, η μελέτη και ο σχεδιασμός αποδοτικών MAC πρωτοκόλλων για WBANs αποτελεί μια μεγάλη πρόκληση και ερευνητική περιοχή για το βέλτιστο έλεγχο της διαδικασίας πρόσβασης των αισθητήριων κόμβων στο κανάλι επικοινωνίας και τη καλύτερη δέσμευση των πόρων του δικτύου [14, 11]. Εκ παραλλήλου, ο αλγόριθμος του χρονοπρογραμματισμού των πακέτων δεδομένων που πρόκειται να μεταδοθούν σε κάθε χρονική στιγμή, πρέπει να ανταποκρίνεται στις ιδιαίτερες ανάγκες αυτού του είδους δικτύων, δηλαδή την προτεραιοποίηση των πακέτων δεδομένων και την κατάλληλη διαχείριση χρονικών περιορισμών και περιπτώσεων εκτάκτου ανάγκης.

Α΄.1 Ασύρματα Δίκτυα Περιοχής Σώματος

Πρωτίστως, άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός ότι στο WBAN συναντάται μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν να τοποθετηθούν με διάφορους τρόπους στο σώμα [15, 6]. Πιο συγκεκριμένα, κάποιοι εξ αυτών είναι δυνατό να εμφυτευτούν μέσα στο ανθρώπινο σώμα, είτε κάτω από την επιδερμίδα είτε μέσα στον ιστό και στη ροή του αίματος. Από την άλλη, μια άλλη μερίδα αισθητήρων μπορούν να τοποθετηθούν πάνω στο σώμα και είναι γνωστοί ως φορετοί (wearable) αισθητήρες, ή μπορούν να τοποθετηθούν έως και δύο εκατοστά μακριά από το σώμα. Επίσης, υπάρχουν και αισθητήρες που δεν βρίσκονται στο σώμα, αλλά απέχουν από αυτό από μερικά εκατοστά έως και πέντε μέτρα απόστασης.

Ανεξάρτητα από την τοποθέτηση τους, το σύνολο των αισθητήρων συντελεί ένα WBAN. Πέραν τούτου, το εν λόγω είδος δικτύου μπορεί να εξυπηρετήσει μια ποικιλία σκοπών, ιατρικών και μη. Ξεκινώντας από τους μη ιατρικούς σκοπούς, ένα τέτοιο δίκτυο είναι σε θέση να εκπληρώσει και άλλες ανάγκες, όπως αναγράφονται στη συνέχεια [6].

Πιο λεπτομερώς, κάποιες συσκευές που συναντώνται σε ένα WBAN και δεν σχετίζονται τόσο με ιατρικά δεδομένα, όπως οι κάμερες, τα μικρόφωνα, συσκευές αναπαραγωγής MP3, έξυπνα τηλέφωνα κ.ά., επιτρέπουν τη ψυχαγωγία των χρηστών, για παράδειγμα μέσω του ελέγχου ροής ενός παιχνιδιού εικονικής πραγματικότητας με διάφορες χειρονομίες. Επιπλέον, είναι σε θέση να ανιχνεύσουν εξωγενείς κινδύνους, όπως η εκδήλωση μιας πυρκαγιάς στο σπίτι, προφυλάσσοντας το χρήστη.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ανίχνευση της συναισθηματικής κατάστασης του χρήστη. Ένα τέτοιο εγχείρημα είναι δυνατό, καθώς κάθε συναίσθημα μπορεί να εκδηλωθεί στο ανθρώπινο σώμα. Λόγου χάριν, το αίσθημα του φόβου εκδηλώνεται μέσω της εφίδρωσης των άκρων και της αύξησης των καρδιακών χτύπων. Μεταξύ αυτών, αξίζει να αναφερθεί και η εξασφάλιση υψηλότερων επιπέδων ασφάλειας σε διαδικασίες ελέγχου ταυτότητας, με τη βοήθεια βιομετρικών δεδομένων.

Συνεχίζοντας με τους ιατρικούς σκοπούς κι όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης των φυσιολογικών παραμέτρων, μέσω φορετών αισθητήρων ή μέσω εμφυτευμένων στο σώμα αισθητήρων. Οι φορετοί αισθητήρες, λοιπόν, μπορούν να συμβάλλουν στο σχεδιασμό και την διεκπεραίωση σωστών προγραμμάτων γυμναστικής και προπόνησης επαγγελματιών αθλητών και ερασιτεχνών. Για την ακρίβεια, μπορούν να αποδώσουν περισσότερο εξατομικευμένα προγράμματα, συνδυάζοντας επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων και αποφυγή τραυματισμών από λανθασμένες ασκήσεις γυμναστικής [16].

Μία σημαντική μερίδα του πληθυσμού πάσχει από διαταραχές του ύπνου, μία εκ των βασικότερων αναγκών για ζωή. Οι συμβατικές μέθοδοι για παρακολούθηση του ύπνου ενός ατόμου και αντιμετώπιση των διαταραχών πραγματοποιείται σε ειδικά διαμορφωμένα εργαστήρια και απαιτεί τη σύνδεση πολυάριθμων καλωδιώσεων στο ανθρώπινο σώμα, προκαλώντας μια δυσφορία. Ένα WBAN, λοιπόν, μπορεί να συνδράμει στην αντιμετώπιση τέτοιων δυσφοριών και εν γένει στη βελτίωση της ποιότητας του ύπνου, εφόσον οι φορετοί αισθητήρες που το αποτελούν δεν περιλαμβάνουν καλώδια [17].

Εκτός των διαταραχών ύπνου, συχνά τα άτομα εμφανίζουν προβλήματα υγείας που αφορούν το διαβήτη ή το άσθμα. Με τη βοήθεια των αισθητήρων που το συντελούν, ένα WBAN είναι ικανό να παρακολουθεί διάφορες παραμέτρους, όπως η γύρη, τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στον αέρα και τα επίπεδα γλυκόζης στο αίμα και να βοηθήσουν στην πρόληψη πιθανής επιδείνωσης και στη συνολική βελτίωση τους ασθενούς [6].

Επιπρόσθετα, είναι δυνατή η ικανοποίηση στρατιωτικών αναγκών, ιδιαίτερα εάν το WBAN περιλαμβάνει και κάμερες και συσκευές Global Positioning System (GPS), καθώς μπορεί να συνεισφέρει στην καλύτερη παρακολούθηση και κατ'επέκτασιν ιατρική φροντίδα ενός τραύματος, αλλά και στη μείωση της πιθανότητας τραυματισμού από πιθανή ενέδρα [18, 6].

Ωστόσο, και οι εμφυτευμένοι αισθητήρες στο σώμα μπορούν να αποφανθούν καθοριστικές για την υγεία ενός ασθενούς. Πιο συγκεκριμένα και με δεδομένο ότι οι αι-

σθητήρες αυτοί παρακολουθούν ‘εκ των έσω’ τον οργανισμό, μπορούν να συνδράμουν σε πολύ σοβαρές ασθένειες και νόσους. Κάποιες εξ αυτών είναι οι καρδιοαγγειακές παθήσεις και ο καρκίνος, οι οποίες αποτελούν δύο από τις κυριότερες αιτίες θανάτου στην Ευρωπαϊκή Ένωση².

Επί παραδείγματι, οι εν λόγω αισθητήρες παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης της αναπαραγωγής καρκινικών κυττάρων, διαδικασία που μπορεί να προκαλέσει την δημιουργία κακοήθειας, χωρίς την απαίτηση για βιοψία. Ακόμη, ενημερώνουν εγκαίρως για επικίνδυνα επίπεδα ουσιών που ενοχοποιούνται για έμφραγμα, ενώ είναι ικανές να βοηθήσουν και στην εξάλειψη κινδύνων λιποθυμίας και τύφλωσης από διαβήτη, ορίζοντας και τις κατάλληλες δοσολογίες [6]. Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι μέσω της παρακολούθησης στρεσογόνων παραμέτρων, είναι δυνατή και η αποτροπή ασθενειών που οφείλονται στο άγχος [19].

Σε γενικότερα, λοιπόν, πλαίσια ένα WBAN αναμένεται να προσφέρει παρακολούθηση ζωτικών ενδείξεων και φυσιολογικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο, ενημερώνοντας το ιατρικό προσωπικό και δίνοντας άνεση στο χρήστη/ασθενή, ενώ μπορεί και να παρέμβει στον οργανισμό με χορήγηση της απαιτούμενης δόσης φαρμάκων.

Ωστόσο, προκειμένου να εξασφαλιστεί η όσο το δυνατό καλύτερη λειτουργία των ιατρικών εφαρμογών, θα πρέπει να υπάρχει μια κατάλληλη υποστήριξη από τα αντίστοιχα πρωτόκολλα, ώστε να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις ενός WBAN για *Quality of Service (QoS)*. Συνεπώς, τα πρωτόκολλα MAC, με τη βοήθεια των οποίων καθορίζεται η διαχείριση της επικοινωνίας σε ένα κανάλι, το οποίο διαμοιράζεται μεταξύ πολλών κόμβων, έχουν μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία.

Α΄.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στη βιβλιογραφία συναντάται μια ποικιλία MAC πρωτοκόλλων για WBANs. Ξεκινώντας από το IEEE 802.15.4, αυτό αποτελεί ένα πρωτόκολλο χαμηλής ισχύος που έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές χαμηλού ρυθμού δεδομένων και λειτουργεί σε τρεις ζώνες συχνοτήτων. Παρέχει δύο τρόπους λειτουργίας: (i) beacon-enabled mode και (ii) non-beacon enabled mode.

Στο beacon-enabled mode, ο συντονιστής (coordinator) του δικτύου ελέγχει το συγχρονισμό, τη συσχέτιση και τη μετάδοση των δεδομένων με τη χρήση περιοδικών

²https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Causes_of_death_statistics

beacons, ενώ το κανάλι οριοθετείται από ένα superframe, το οποίο αποτελείται από ενεργές και ανενεργές περιόδους. Οι ενεργές περιόδους περιέχουν τρία στοιχεία: ένα beacon, μια Contention Access Period (CAP) και μια Contention Free Period (CFP). Κατά τη διάρκεια των ανενεργών περιόδων, ο coordinator κοιμάται [20]. Ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας προτιμάται όταν τα μηνύματα είναι συχνά και περιοδικά και δεν παρατηρείται κάποια σποραδικότητα στο traffic του δικτύου [21].

Στο non-beacon enabled mode συνήθως χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο unslotted CSMA/CA, κατά το οποίο αν ένας κόμβος θέλει να μεταδώσει, αναμένει για μια τυχαία περίοδο στο τέλος της οποίας βλέπει αν το κανάλι είναι άδειο. Σε περίπτωση που το κανάλι είναι κατειλημμένο, αναμένει και πάλι για μια τυχαία περίοδο, έως ότου καταφέρει να μεταδώσει [21]. Σχετική μελέτη καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο πρωτόκολλο αποδίδει πολύ ικανοποιητικά ως προς το throughput και το latency, αλλά οδηγεί σε μεγάλη κατανάλωση της ενέργειας [22]. Ωστόσο, σύμφωνα με τους Timmons και Scanlon φαίνεται πως το non-beacon enabled mode, με χαμηλό ρυθμό δεδομένων και σποραδικό traffic, μπορεί να εξασφαλίσει 10 με 15 χρόνια ζωής για τους αισθητήριους κόμβους [23].

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και το Medical Medium Access Control (MedMAC) πρωτόκολλο που παρουσιάζεται στο [24], το οποίο στηρίζεται στο TDMA και αποτρέπει τις συγκρούσεις, παρέχοντας slots διαφορετικού μήκους, τα οποία προσαρμόζονται στις απαιτήσεις των αισθητήριων κόμβων. Χρησιμοποιεί ένα superframe, το οποίο περιλαμβάνει beacons που αποσκοπούν στο συγχρονισμό των κόμβων με τη βοήθεια του Adaptive Guard Band αλγορίθμου. Η αξιολόγηση αυτού του πρωτοκόλλου φανερώνει πως μπορεί να ξεπεράσει το IEEE 802.15.4 αναφορικά με την κατανάλωση ενέργειας, ωστόσο ενδείκνυται για WBANs, όταν το traffic τους είναι χαμηλό.

Οι Kwak et al. προτείνουν ένα πρωτόκολλο για την εξυπηρέτηση τριών διαφορετικών ειδών traffic [25]. Οι αισθητήριοι κόμβοι που αποσκοπούν στην απλή παρακολούθηση φυσιολογικών παραμέτρων και τη περιοδική μετάδοση δεδομένων, δημιουργούν ένα κανονικό traffic. Σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, οι οποίες προκαλούνται από αισθητήρες που βρίσκονται πάνω στο σώμα, το traffic είναι περισσότερο απρόβλεπτο, ενώ το τρίτο είδος traffic προκαλείται όποτε ο coordinator απαιτεί την απόκτηση πληροφοριών από κάποιους αισθητήριους κόμβους. Το superframe τους έχει την εξής δομή: ένα beacon μήνυμα, ένα CAP που διαμορφώνεται με τρόπο τέτοιο, ώστε να υποστηρίξει μια έκρηξη των δεδομένων και ένα CFP κατά το οποίο δίνονται συγκεκριμένα slots στους κόμβους, προκειμένου να μεταδώσουν χωρίς συγκρούσεις. Παράλληλα, με

τη δυνατότητα περιοδικού ύπνου των κόμβων που προσφέρει, εξασφαλίζει μικρότερη κατανάλωση ενέργειας.

Σε αντίθεση με το πρωτόκολλο των Kwak et al., το Preamble-based TDMA πρωτόκολλο, που αξιολογείται από σχετική έρευνα, αν και φαίνεται να αποδίδει ικανοποιητικά και μάλιστα να ξεπερνά το IEEE 802.15.4 ως προς την κατανάλωση ενέργειας, λαμβάνει υπ' όψιν μόνο περιπτώσεις κανονικού traffic [26]. Για την ακρίβεια, σε αυτό το πρωτόκολλο υπάρχει ένα frame που αποτελείται από ένα preamble slot και ένα slot για μετάδοση δεδομένων. Το preamble slot χωρίζεται σε subslots, ένα για κάθε κόμβο. Αν κάποιος κόμβος λάβει ένα μήνυμα κατά τη διάρκεια του subslot του και ταυτοποιήσει πώς το μήνυμα προορίζεται για αυτόν, κάνοντας χρήση του ID του, αναγνωρίζει τον αποστολέα του μηνύματος και ενεργοποιεί το ραδιοπομπό του. Ο ραδιοπομπός ενός κόμβου ενεργοποιείται και όποτε αυτός επιθυμεί να μεταδώσει δεδομένα, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση παραμένει ανενεργός.

Συνεχίζοντας με το priority-guaranteed MAC πρωτόκολλο, αυτό προσδίδει υψηλότερη προτεραιότητα σε εφαρμογές του WBAN που αφορούν την υγεία, σε σχέση με εφαρμογές άλλων σκοπών. Ανάλογα με την εφαρμογή προσφέρει ένα διαφορετικό κανάλι ελέγχου (control channel), ενώ έχει ως βασικό μειονέκτημα το ότι δεν λαμβάνει υπ' όψιν περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης [27]. Ομοίως, και το BodyMAC πρωτόκολλο δεν παρέχει κάποιο μηχανισμό για τη διαχείριση του traffic σε έκτακτες περιπτώσεις [28]. Παρά ταύτα, σε περίπτωση που οι αισθητήριοι κόμβοι παραμένουν ανενεργοί, όπως όταν δεν έχουν κάτι προς μετάδοση, τότε εισάγονται σε λειτουργία ύπνου, γεγονός που εξοικονομεί ενέργεια. Για την ακρίβεια, σε σύγκριση με το 802.15.4 πλεονεκτεί κατά 18% στην εξοικονόμηση ενέργειας [28, 11].

Επιπλέον, οι Kunr Yun et al. προτείνουν ένα TDMA πρωτόκολλο με πολλαπλά κανάλια, το οποίο στηρίζεται σε τοπολογία αστέρα και προσφέρει μικρή καθυστέρηση, υψηλή αξιοπιστία, ενώ είναι ενεργειακά αποδοτικό [29]. Σε τοπολογία αστέρα στηρίζεται και η μελέτη των Khaled et al., οι οποίοι παρουσιάζουν ένα πρωτόκολλο, το οποίο παρέχει υψηλότερη προτεραιότητα σε αισθητήριους κόμβους που παράγουν πιο κρίσιμα για την υγεία δεδομένα. Για το σκοπό αυτό, μειώνουν τις αναμεταδόσεις των κόμβων εκείνων που δεν παράγουν τόσο κρίσιμα δεδομένα [30].

Οι Choi and Kim, θεωρώντας ως κόμβο εκείνον τον αισθητήρα που ανιχνεύει δεδομένα σχετικά με το ανθρώπινο σώμα και ως master μια συσκευή που συλλέγει τα δεδομένα των κόμβων, υλοποιούν ένα MAC πρωτόκολλο που στοχεύει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης. Πιο συγκεκριμένα και χρησιμοποιώντας τοπολογία αστέρα,

θέτουν σε λειτουργία ύπνου τον master, όταν δεν πρόκειται να λάβει δεδομένα από τους υπόλοιπους κόμβους, ενώ επαναφέρεται σε κανονική λειτουργία όταν έπεται μια προγραμματισμένη μετάδοση [31].

Το Heartbeat-driven πρωτόκολλο φαίνεται να ξεχωρίζει στη βιβλιογραφία, καθώς χρησιμοποιεί το ρυθμό του καρδιακού παλμού για την επίτευξη συγχρονισμού και όχι ένα beacon. Κατ' επέκτασιν, δεν απαιτείται η ενεργοποίηση των ραδιοπομπών των κόμβων για τη λήψη περιοδικών μηνυμάτων για το χρόνο, γι' αυτό και μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση της ενέργειας [32].

Εκ παραλλήλου, σχετική μελέτη συστήνει τη χρήση των τεχνολογιών Bluetooth, Bluetooth LE και Zigbee [33]. Αναφορικά με το Bluetooth, υποστηρίζεται από το σύνολο των συσκευών και είναι κατάλληλο για εφαρμογές με υψηλούς ρυθμούς και μικρές αποστάσεις, σε αντίθεση με το Bluetooth LE που δεν συναντάται συχνά σε συσκευές, αλλά χρησιμοποιείται σε διάφορες συσκευές για την υγεία και δεν καταναλώνει πολλή ενέργεια. Ως προς το Zigbee, αυτό καλύπτει ένα μεγαλύτερο εύρος, υποστηρίζει διάφορες τοπολογίες και προτείνεται για εφαρμογές με χαμηλό ρυθμό δεδομένων.

Το πρωτόκολλο, όμως, το οποίο προορίζεται για το συγκεκριμένο είδος δικτύων είναι το IEEE 802.15.6. Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο που λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες, είναι μικρής εμβέλειας και προσφέρει αξιοπιστία και αποδοτική διαχείριση της ενέργειας. Το superframe είναι προκαθορισμένου μήκους και περιέχει beacon περιόδους ίσου μήκους, ενώ περιέχει εννέα στοιχεία: δύο beacon, δύο exclusive access phases (EAP1, EAP2), δύο random access phases (RAP1, RAP2), δύο managed access phases και ένα (CAP) [34].

Το ένα beacon εστιάζει στο συγχρονισμό και την διαχείριση της ενέργειας από τον coordinator, ενώ το άλλο υποδεικνύει την έναρξη και τη λήξη ενός CAP και διατηρεί πληροφορίες σχετικά με acknowledgements, reservations, κ.ά. Τα EAP1, EAP2 χρησιμοποιούνται για περιπτώσεις traffic από καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, όπου η αποτυχία παράδοσης εντός ενός επιτρεπτού χρονικού ορίου μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την υγεία του ατόμου. Τα RAP1, RAP2, CAP χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις κανονικού traffic, ενώ τα managed access phases αφορούν τα uplink, downlink, bilink [35].

Α΄.3 Συνεισφορά Εργασίας

Όπως θα έχει ήδη γίνει αντιληπτό, ένα WBAN χαρακτηρίζεται από πολλές ιδιαιτερότητες, οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν για το σχεδιασμό αποδοτικών πρωτοκόλλων

MAC, στα οποία ξεχωρίζουν schedule-based προσεγγίσεις, όπως η TDMA που προτιμάται ιδιαίτερα στο εν λόγω περιβάλλον. Η προτίμηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η εν λόγω προσέγγιση μπορεί να εξασφαλίσει επιτυχημένες μεταδόσεις εντός χρονικών περιορισμών, γι' αυτό και χρησιμοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, με απώτερο στόχο τη μελέτη και ανάπτυξη αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού.

Για τη μελέτη και την ανάπτυξη των αλγορίθμων κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός συστήματος, το οποίο να ανταποκρίνεται στις ιδιαιτερότητες ενός WBAN. Για τη λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιείται μια δομή παρόμοια με αυτή του beacon-enabled mode του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4, ενώ προτιμάται η τοπολογία αστέρα, η οποία και πρωταγωνιστεί σε αυτού του είδους τα δίκτυα [36]. Με δεδομένο ότι κύριος σκοπός του συστήματος είναι η επιτυχής και έγκαιρη μετάδοση των δεδομένων, καθοριστικό ρόλο για την αποδοτικότητα του συστήματος παίζει ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού για να αποφευχθούν συγκρούσεις.

Οι κύριες προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και σχετίζονται με τη μετάδοση των δεδομένων είναι: (i) ο καθορισμός διαφορετικών προτεραιοτήτων στους αισθητήριους κόμβους, (ii) η ανταπόκριση στους χρονικούς περιορισμούς των δεδομένων και (iii) η διαχείριση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης, κατά τις οποίες αυξάνεται το traffic του δικτύου, η προτεραιότητα των αισθητήριων κόμβων και στενεύουν οι χρονικοί περιορισμοί [37, 38]. Ακόμη, τίθεται το ερώτημα σχετικά με το ποιοι αισθητήριοι κόμβοι θα επιλεγούν και ποιοι θα παραλειφθούν κατά το χρονοπρογραμματισμό των μεταδόσεων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις, όπου το δίκτυο ενδέχεται να βρεθεί σε κατάσταση συμφόρησης, αφού ο όγκος της πληροφορίας μεταβάλλεται από frame σε frame, ανάλογα με την κατάσταση της υγείας του ατόμου.

Κατ' επέκτασιν, προτείνονται δύο αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού των μεταδόσεων, που επιδιώκουν την εξυπηρέτηση των αισθητήριων κόμβων με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα, προσπαθώντας παράλληλα να καλύψουν τις ανάγκες και των υπολοίπων κόμβων, εξασφαλίζοντας μια ισορροπία μεταξύ της προτεραιοποίησης και της δικαιοσύνης (fairness) στο δίκτυο. Ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται στην αρχή κάθε frame, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα χαρακτηριστικά του traffic του προηγούμενου frame, παρέχοντας το στοιχείο της δυναμικότητας. Επιπλέον, οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι υιοθετούν τη λογική των Differentiated Services, καθώς διαχωρίζουν το traffic του δικτύου σε κλάσεις, προκειμένου να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις για QoS. Μεταξύ των Differentiated Services ξεχωρίζει ο μηχανισμός Expedited Forwarding (EF), ο οποίος εξυπηρετεί πλήρως την κλάση με την υψηλότερη προτεραιότητα, προτού προβεί

στην εξυπηρέτηση των εναπομεινουσών κλάσεων, θέτοντας ένα όριο στη δέσμευση των πόρων του δικτύου για κάθε κλάση.

Ο ένας εκ των δύο αλγορίθμων που προτείνονται, ο οποίος ονομάζεται ‘Class-based Prioritized Proportional Allocation (CPPA)’, επεκτείνει τον αλγόριθμο Prioritized Proportional Allocation (PPA) της βιβλιογραφίας [39], ώστε να ανταπεξέρχεται σε διαφορετικές κλάσεις από traffic και όχι μόνο σε μεμονωμένους κόμβους. Συγκεκριμένα, ακολουθώντας μία όμοια προσέγγιση με τον PPA, υπολογίζεται ένα όριο στο μέγιστο πλήθος των slots που μπορεί να ανατεθεί σε κάθε κλάση, προτού προβεί στην ανάθεση των slots εντός αυτής. Η διαδικασία του υπολογισμού αυτού πραγματοποιείται με τρόπο τέτοιο, ώστε να εξασφαλίζει ένα βαθμό fairness για κάθε κλάση. Ακόμη, η διάταξη των slots στο frame πραγματοποιείται ανάλογα με το πόσο σημαντική θεωρείται κάθε κλάση, ώστε οι κόμβοι αυτής να εξυπηρετούνται πιο άμεσα, αντίστοιχα με τον EF.

Αναφορικά με τον δεύτερο αλγόριθμο που προτείνεται, εν ονόματι ‘Proportionally Prioritized Expedited Forwarding (PPEF)’, αυτός επικεντρώνεται στην αυτοματοποίηση του υπολογισμού των παραμέτρων που ορίζουν το μέγιστο επιτρεπτό όριο χρήσης των slots από κάθε κλάση, όπως και ο CPPA. Σε αντίθεση, όμως, με τον CPPA, η ανάθεση των slots στους αισθητήριους κόμβους κάθε κλάσης μοιάζει περισσότερο με τον EF. Με τον τρόπο αυτό, είναι ευκολότερο να ανιχνευτεί πότε υπερεκτιμούνται οι ανάγκες για slots από κάθε κόμβο, πιθανώς λόγω αυξημένης προτεραιότητας, οπότε και τα μέγιστα επιτρεπτά όρια χρήσης των slots κάθε κλάσης μπορούν να επαναπροσαρμοστούν, προκειμένου να μην μείνουν αναξιοποίητα κάποια slots. Συνεπώς, ο αλγόριθμος PPEF συνδυάζει χαρακτηριστικά των CPPA και EF, ενώ δεν απαιτεί μία τόσο στατική παραμετροποίηση όσο ο EF, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε παροχή καλύτερου QoS για τις διαφορετικές κλάσεις του traffic, ιδιαίτερα σε απότομες μεταβολές στην κατανομή του traffic στις διαφορετικές κλάσεις.

Από κοινού και οι δύο προτεινόμενοι αλγόριθμοι αξιολογούνται πειραματικά στο περιβάλλον προσομοίωσης OMNeT++ [40] και συγκρίνονται με τους αλγορίθμους PPA και EF. Η αξιολόγηση λαμβάνει χώρα σε τρία διαφορετικά σενάρια πειραματισμού, τα οποία εξετάζουν διαφορετικούς ρυθμούς παραγωγής δεδομένων και απότομες μεταβολές του traffic στις αντίστοιχες κλάσεις. Η αξιολόγηση γίνεται με βάση διαφορετικές μετρικές που σχετίζονται με το QoS και συμπεριλαμβάνουν το πλήθος των πακέτων που δεν έχουν μεταδοθεί εντός των καθορισμένων χρονικών περιορισμών, το throughput του συστήματος, κ.ά. Τα αποτελέσματα φανερώνουν την καταλληλότητα των προτει-

νόμενων αλγορίθμων, αφού εντοπίζονται σενάρια, στα οποία και οι δύο ξεχωρίζουν. Παρά ταύτα, ο ένας εκ των δύο προτεινόμενων αλγορίθμων, και συγκεκριμένα ο PPEF φαίνεται να ξεχωρίζει, αφού σε όλα τα διαφορετικά σενάρια επιτυγχάνει την υψηλότερη απόδοση στην πλειονότητα των μετρικών.

Α΄.4 Δομή Εργασίας

Η εργασία οργανώνεται ως εξής. Στο Κεφάλαιο Β΄ παρουσιάζονται κάποια κύρια χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του χρησιμοποιηθέντος συστήματος. Συγκεκριμένα, περιγράφονται τα δομικά στοιχεία μίας αρχιτεκτονικής W-BAN, συμπεριλαμβανομένων των κατηγοριών των κόμβων που συνιστούν ένα τέτοιο δίκτυο, τις τοπολογίες που συναντώνται σε αυτά, αλλά και η κατηγοριοποίηση της επικοινωνίας που λαμβάνει χώρα στα πλαίσια αυτής. Ακόμη, περιγράφεται αναλυτικά η λογική της TDMA προσέγγισης για τον έλεγχο πρόσβασης στο κανάλι επικοινωνίας και η ανάγκη που προκύπτει για χρονοπρογραμματισμό σε αυτή. Επιπλέον, εισάγεται η έννοια των Differentiated Services και περιγράφονται οι μηχανισμοί που αυτά ενσωματώνουν για την παροχή QoS σε διαφορετικές κατηγορίες από traffic. Τέλος, περιγράφεται η προσέγγιση που προτείνεται για να καλύψει τις ανάγκες του χρησιμοποιηθέντος συστήματος, η οποία προσαρμόζει τη λογική των Differentiated Services για το χρονοπρογραμματισμό μεταδόσεων σε ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στο TDMA, ενώ ορίζονται ρητά οι συμβολισμοί που κρίνονται απαραίτητοι για το υπόλοιπο της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο Γ΄ αναλύονται οι τέσσερις συνολικά αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού που μελετώνται, εκ των οποίων οι δύο συναντώνται στη βιβλιογραφία και οι υπόλοιποι έχουν προκύψει και αναπτυχθεί, στα πλαίσια της έρευνας για την διεξαγωγή της παρούσας εργασίας. Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούνται για την ανάθεση των slots στους κόμβους που συνιστούν το δίκτυο, η οποία πραγματοποιείται δυναμικά από frame σε frame. Κατά το χρονοπρογραμματισμό, οι αλγόριθμοι ενσωματώνουν διάφορους μηχανισμούς, οι οποίοι περιγράφονται αναλυτικά, ώστε να λαμβάνουν υπό όψιν τα διάφορα χαρακτηριστικά των αισθητήρων, συμπεριλαμβανομένου του ρυθμού παραγωγής μηνυμάτων, την προτεραιότητα κάθε κόμβου, κ.ά. Ακόμη, για κάθε αλγόριθμο παρέχονται κάποιες ιδιότητες ως προς την ορθότητά τους, με την έννοια ότι οι αναθέσεις στους κόμβους δεν υπερβαίνουν το πλήθος των slots ενός frame. Τέλος, περιγράφονται κάποια χαρακτηριστικά των αλγορίθμων, τα οποία διαφοροποιούν τη

συμπεριφορά τους, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα.

Στο Κεφάλαιο Δ΄ πραγματοποιείται μία εκτενής πειραματική αξιολόγηση των τεσσάρων αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιείται ένα περιβάλλον προσομοίωσης, στο οποίο υλοποιείται το χρησιμοποιηθέν σύστημα, ώστε να πραγματοποιηθεί πειραματισμός με διαφορετικές παραμέτρους. Για την αξιολόγηση χρησιμοποιούνται διάφορες μετρικές, που συναντώνται συχνά σε αντίστοιχα περιβάλλοντα και σχετίζονται με το QoS, ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των αλγορίθμων υπό διαφορετικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, η αξιολόγηση γίνεται σε τρία διαφορετικά σενάρια πειραματισμού, τα οποία αποσκοπούν στο να αναδείξουν την καταλληλότητα των αλγορίθμων σε διαφορετικές συνθήκες.

Τέλος, στο Κεφάλαιο Ε΄ γίνεται μία σύνοψη της παρούσας εργασίας, ενώ εξάγονται συμπεράσματα που προκύπτουν από τον πειραματισμό με το σύστημα και τους αλγορίθμους που μελετώνται στα πλαίσια της εργασίας. Τα συμπεράσματα είναι κυρίως πρακτικά και αφορούν κυρίως στην παραμετροποίηση και εφαρμογή των αλγορίθμων, καθώς και σε μελλοντικές κατευθύνσεις για βελτίωσή του συστήματος στο μέλλον.

Κεφάλαιο Β΄

Περιγραφή Συστήματος

ΠΙΝ τον καθορισμό των βημάτων ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού, πρέπει να προηγηθεί η αποσαφήνιση του τρόπου λειτουργίας και των αρχών του συστήματος, βάσει των οποίων μπορεί να αναπτυχθεί ο εκάστοτε αλγόριθμος. Έτσι, το παρόν κεφάλαιο αποσκοπεί στη σταδιακή παρουσίαση του χρησιμοποιηθέντος συστήματος, όπως αυτό διαμορφώνεται με την αξιοποίηση όλων των θεωρητικών στοιχείων που πρωτίστως παρατίθενται για την αρχιτεκτονική ενός WBAN και εν συνεχεία για υπάρχοντες μηχανισμούς που μπορούν να υιοθετηθούν και να ικανοποιήσουν τις ανάγκες του WBAN. Επιπλέον και για την καλύτερη κατανόηση του συστήματος, παρέχεται μια μαθηματική μοντελοποίηση σχετικά με βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το σύστημα, καθώς και απαιτούνται για το σχεδιασμό και την υλοποίηση του αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού.

Β΄.1 Αρχιτεκτονική Ασύρματων Δικτύων Περιοχής Σώματος

Στην αρχιτεκτονική ενός WBAN συγκαταλέγονται τα είδη των κόμβων που μπορεί να το συντελέσουν, οι οποίοι μπορούν να ενωθούν μεταξύ τους με την εφαρμογή των αντίστοιχων τοπολογιών, καθεμία από τις οποίες έχει κάποια προτερήματα. Επιπροσθέτως, συναντώνται διαφορετικά επίπεδα επικοινωνίας, ανάλογα με το σκοπό αυτής. Όλα αυτά τα στοιχεία είναι δομικά για την κατανόηση του συγκεκριμένου περιβάλλοντος και αναλύονται στο παρόν Κεφάλαιο.

B'.1.1 Είδη Κόμβων

Πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη ενός WBAN διαδραματίζουν οι κόμβοι του δικτύου. Ένας τρόπος διάκρισης των κόμβων σε αυτό το δίκτυο είναι με βάση τη λειτουργικότητά τους. Έτσι, προκύπτουν οι εξής τύποι κόμβων: (i) *Personal Device*, (ii) *Sensor* και (iii) *Actuator*. Το *Personal Device* (PD) αποτελεί μια συσκευή που συλλέγει όλες τις πληροφορίες από τους υπόλοιπους κόμβους, είτε αυτοί είναι *Sensors*, είτε *Actuators*, και αναλαμβάνει την αλληλεπίδραση με άλλους χρήστες [9].

Αναφορικά με τους *Sensors*, ουσιαστικά αποτελούν τους προαναφερόμενους αισθητήριους κόμβους ή αλλιώς αισθητήρες και είναι υπεύθυνοι για την μέτρηση διαφόρων παραμέτρων, την ανταπόκριση σε δεδομένα από φυσικά ερεθίσματα, αλλά και την επεξεργασία των δεδομένων. Οι αισθητήρες σε ένα WBAN μπορούν να ανιχνεύουν παραμέτρους που σχετίζονται με την ανθρώπινη φυσιολογία, τον περιβάλλοντα χώρο και τη βιοκινητική. Επίσης, πολλοί από αυτούς τους αισθητήρες μπορεί να βρίσκονται ενσωματωμένοι σε κάποιο έξυπνο ρολόι χειρός, σε κινητό, κ.ο.κ [9]. Τέλος, ο *Actuator* ενεργεί σύμφωνα με τα δεδομένα των αισθητήρων, ανατροφοδοτώντας το δίκτυο. Επί παραδείγματι, μπορεί να χορηγήσει τη σωστή δόση φαρμάκου στον οργανισμό [41, 6].

Στο εμπόριο συναντάται μια λίστα από αισθητήρες που ενδείκνυνται για WBAN [36], μεταξύ των οποίων:

- Αισθητήρας ηλεκτροεγκεφαλογραφίας, ευρέως διαδεδομένος ως EEG sensor (Electroencephalography sensor), ο οποίος τοποθετείται στο κεφάλι.
- Αισθητήρας ηλεκτροκαρδιογραφήματος, ευρέως διαδεδομένος ως ECG sensor (Electrocardiogram sensor), ο οποίος τοποθετείται στο στήθος.
- Αισθητήρας κορεσμού οξυγόνου, ο οποίος τοποθετείται στον ώμο.
- Αισθητήρας θερμοκρασίας, ο οποίος τοποθετείται στον αριστερό καρπό του χεριού.
- Αισθητήρας καρδιακών παλμών, ο οποίος τοποθετείται στον δεξιό καρπό του χεριού.
- Αισθητήρας κίνησης (π.χ. γυροσκόπιο, επιταχυνσιόμετρο, κ.ά.), ο οποίος τοποθετείται στο δεξιό πόδι και στο αριστερό μπράτσο.
- Αισθητήρας παλμικής οξυμετρίας

- Σπειρόμετρο
- Αισθητήρας για τη πίεση του αίματος
- Αισθητήρας για τη γλυκόζη στο αίμα, κ.ά.

Μπορεί εύκολα να γίνει αντιληπτό, το γεγονός ότι κάποιοι εκ των προαναφερόμενων αισθητήρων ανιχνεύουν δεδομένα που αφορούν λειτουργίες και όργανα ζωτικής σημασίας για την ανθρώπινη ζωή. Για παράδειγμα, τα δεδομένα από τον αισθητήρα ηλεκτροκαρδιογραφήματος είθισται να έχουν υψηλότερη σημασία, σε σύγκριση με έναν αισθητήρα θερμοκρασίας [10].

Ως προς το ρόλο τους στο δίκτυο, οι προαναφερόμενοι κόμβοι διακρίνονται σε: (i) Coordinator, (ii) End Nodes και (iii) Relays. Το ρόλο του Coordinator διαδραματίζει το PD, με τη βοήθεια του οποίου επικοινωνούν όλοι οι άλλοι κόμβοι. Οι End Nodes δεν εκτελούν περαιτέρω λειτουργίες και δε μεταδίδουν μηνύματα από άλλους κόμβους. Τέλος, οι Relays είναι οι κόμβοι εκείνοι που λειτουργούν ως ενδιάμεσοι, προκειμένου οι περισσότερο απομακρυσμένοι κόμβοι να μεταδώσουν στο PD μέσω αυτών. Ακόμη, κάθε Relay έχει ένα πατρικό και ένα θυγατρικό κόμβο, προκειμένου να αναμεταδώσουν τα μηνύματα [6].

Άξιος αναφοράς είναι και ο συνολικός αριθμός των κόμβων που μπορούν να συντελέσουν ένα WBAN. Πιο λεπτομερώς, μόνο ένας Coordinator μπορεί να υπάρχει στο δίκτυο, μαζί με έως 64 ακόμη κόμβους. Ωστόσο, με δεδομένο ότι βάσει του πρωτοκόλλου 802.15.6 μπορούν να συνυπάρχουν σε ένα ανθρώπινο σώμα από δύο έως τέσσερα WBANs, τότε το όριο των κόμβων μπορεί να φτάσει τους 256 [6].

Β'.1.2 Τοπολογία

Η τοπολογία που πρωταγωνιστεί και συναντάται συχνότερα σε ένα τέτοιο περιβάλλον είναι αυτή του αστέρα [36]. Σε αυτή την τοπολογία υπάρχει ένας κόμβος στη μέση, ο οποίος στο εξής θα ονομάζεται Hub, και γύρω του οι υπόλοιποι, σχηματίζοντας έναν αστέρα. Ένα μέρος στο οποίο θα μπορούσε να τοποθετηθεί ο Hub στο ανθρώπινο σώμα είναι η μέση [42]. Όλοι οι κόμβοι απέχουν από τον Hub ένα hop, οπότε δε συναντώνται Relays. Υπάρχουν δύο τύποι μετάδοσης στη τοπολογία αυτή, με τον έναν να αφορά στη μετάδοση δεδομένων από τους υπόλοιπους κόμβους στο Hub και τον άλλον να αφορά το αντίστροφο, δηλαδή από το Hub στους κόμβους [6].

Παράλληλα παρατηρούνται δύο μέθοδοι επικοινωνίας, που έχουν ήδη αναφερθεί: (i) beacon mode και (ii) non-beacon mode [43]. Στο beacon mode, ο Hub ελέγχει όλη την επικοινωνία, μεταδίδοντας περιοδικά beacons, με σκοπό να καθορίσει την έναρξη και τη λήξη ενός frame, καθώς και να συγχρονίσει τους κόμβους. Να τονιστεί πως το frame διακρίνεται σε slots, τα οποία ανατίθενται στους κόμβους ώστε να μεταδώσουν, ακολουθώντας τη λειτουργία του TDMA. Το μήκος της περιόδου ενός beacon μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη σύμφωνα με κάποιο πρωτόκολλο, όπως το IEEE 802.15.6. Από την άλλη, στο non-beacon mode ένας οποιοσδήποτε κόμβος του δικτύου μπορεί να στείλει δεδομένα στον Hub, χρησιμοποιώντας το CSMA/CA.

Ωστόσο, υπάρχουν και τοπολογίες με περισσότερα hops, όπου οι κόμβοι επικοινωνούν με εκείνον που έχει την ευθύνη του συντονισμού του δικτύου, μέσω τρίτων. Τέτοιες τοπολογίες προσφέρουν υψηλότερο delay, αλλά μικρότερη κατανάλωση της ενέργειας. Βέβαια η κατανάλωση της ενέργειας επηρεάζεται και από την απόσταση μεταξύ προορισμού και πηγής ενός μηνύματος. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των hops μεταξύ δύο κόμβων, τόσο αυξάνεται και η πολυπλοκότητα [44]. Έτσι, το 802.15.6 πρωτόκολλο υποστηρίζει ένα δίκτυο με έως δύο hops.

B'.1.3 Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας

Σε γενικά πλαίσια, τα δεδομένα των αισθητήρων αποστέλλονται στο Hub, τον ρόλο του οποίου θα μπορούσε να έχει ένα κινητό τηλέφωνο. Το κινητό τηλέφωνο, λοιπόν, μπορεί να λειτουργήσει ως μια πύλη, η οποία με τη σειρά της στέλνει τα δεδομένα, μέσω ενός κυψελωτού δικτύου ή του Διαδικτύου, σε κάποιο γιατρό ή ιατρικό κέντρο. Βάσει των δεδομένων που λαμβάνει, το ιατρικό προσωπικό μπορεί να αποφασίσει για τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την υγεία του ατόμου [15].

Πιο λεπτομερώς, σε ένα WBAN παρατηρούνται διαφορετικά επίπεδα επικοινωνίας, στα οποία συμπεριλαμβάνονται [6]:

1. Intra-WBAN Επικοινωνία

Σε αυτό το πρώτο επίπεδο επικοινωνίας οι μεταδόσεις πραγματοποιούνται εντός δύο περίπου μέτρων εντός και γύρω από το ανθρώπινο σώμα. Εδώ ανήκουν οι επικοινωνίες μεταξύ των αισθητήριων κόμβων και του Hub. Έπειτα, τα δεδομένα μεταδίδονται σε κάποιο σημείο πρόσβασης στο δεύτερο επίπεδο.

2. Inter-WBAN Επικοινωνία

Στο δεύτερο επίπεδο, ο Hub, αφού έχει προβεί στην κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων, τα προωθεί σε ένα ή περισσότερα σημεία πρόσβασης. Τα σημεία πρόσβασης μπορεί να αποτελούν κομμάτι της υποδομής ή μπορεί να τοποθετηθούν με τρόπο τέτοιο, ώστε να χειρίζονται περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης. Κύριος σκοπός αυτού του επιπέδου είναι η διασύνδεση ενός WBAN με άλλα δίκτυα, τα οποία συναντώνται στην καθημερινότητα, όπως το Διαδίκτυο.

3. Beyond-WBAN Επικοινωνία

Στο επίπεδο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα PD προκειμένου να ενώσει το δεύτερο και το τρίτο επίπεδο. Ουσιαστικά από το Διαδίκτυο μπορούν να μεταδοθούν τα δεδομένα σε κάποιον ιατρικό εξυπηρετητή. Στο επίπεδο αυτό, ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία είναι η Βάση Δεδομένων, στην οποία αποθηκεύεται όλο το ιατρικό ιστορικό ενός χρήστη και το προφίλ του. Μέσω αυτού, από κοινού ιατρικό προσωπικό και χρήστες μπορούν να ενημερωθούν για κάποια έκτακτη ανάγκη.

B'.2 Differentiated Services

Τα Differentiated Services, ευρέως διαδεδομένα ως DiffServ, αποσκοπούν στην καλύτερη διαχείριση του traffic ενός δικτύου και την παροχή υψηλού QoS. Για το σκοπό αυτό, ταξινομούν τη ροή του traffic του δικτύου σε κλάσεις [45]. Κυρίως χρησιμοποιούνται για δρομολόγηση πακέτων στο Διαδίκτυο, όπου παρατηρούνται ποικίλοι και διαφορετικοί τύποι υπηρεσιών, όπως φωνή, βίντεο, streaming, ιστοσελίδες, email, κ.ά. Όπως είναι λογικό, ορισμένοι τύποι traffic υπερσχύουν συγκριτικά με άλλους, όπως για παράδειγμα η φωνή, η οποία απαιτεί μια σχετικά αδιάκοπη ροή δεδομένων.

Εφόσον έχει ταξινομηθεί το πακέτο σε μία κλάση, ο στόχος είναι να καθοριστεί το Per Hop Behavior (PHB), σύμφωνα με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η προώθηση του πακέτου από δρομολογητή σε δρομολογητή. Για την ακρίβεια, τα PHBs προδιαγράφουν συγκεκριμένους κανόνες διαχείρισης των πακέτων σε ένα δρομολογητή, ανάλογα με την κλάση αυτών. Στην ονομασία τους, ο όρος Per Hop υποδηλώνει, ότι δεν είναι βέβαιο πως όλοι οι δρομολογητές κατά το μήκος της διαδρομής θα υποστηρίζουν τα DiffServ, οπότε αυτοί οι μηχανισμοί θα ισχύουν για μερικά συνήθως hops [46].

Αναφορικά με τα PHBs, συνήθως διακρίνονται σε τρεις διαφορετικούς μηχανισμούς [45, 46]:

- Default Forwarding

Είναι ο πιο συνήθης μηχανισμός, αφού δεν παρέχει κάποια εγγύηση για τα πακέτα, αναφορικά με το QoS. Για το λόγο αυτό, συνήθως χαρακτηρίζεται ως best-effort traffic.

- Expedited Forwarding

Παρέχει χαμηλά επίπεδα σε μετρικές, μεταξύ των οποίων: delay, loss και jitter. Αυτό συμβαίνει, διότι τα πακέτα που φέρουν αυτή την κλάση έχουν υψηλότερη προτεραιότητα από κάθε άλλη κλάση, με αποτέλεσμα να προωθούνται όσο πιο άμεσα γίνεται. Παρά ταύτα, αν ο ρυθμός άφιξης των πακέτων αυτής της κλάσης είναι αρκετά μεγάλος, ενδέχεται να παρουσιαστούν καθυστερήσεις στη δρομολόγηση, το οποίο μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας rate limiters.

- Assured Forwarding

Παρέχει την εγγύηση πως τα πακέτα που φέρουν αυτή την κλάση θα φτάσουν με επιτυχία στον προορισμό τους, δεδομένου ότι ο ρυθμός άφιξης αυτών των πακέτων δεν θα ξεπεράσει κάποιο όριο. Παρέχει μεγαλύτερο fairness μεταξύ κλάσεων απ' ότι το Expedited Forwarding.

Ως προς την ταξινόμηση των πακέτων στην αντίστοιχη κλάση, αυτή συνήθως πραγματοποιείται καθώς αυτά εισέρχονται σε ένα DiffServ domain, δηλαδή στο σύνολο των δρομολογητών που βρίσκονται υπό τον έλεγχο ενός παρόχου που υποστηρίζει τα Diff-Serv. Για την ταξινόμηση, συνήθως λαμβάνονται υπ' όψιν χαρακτηριστικά των πακέτων, όπως η διεύθυνση του αποστολέα και του παραλήπτη ή το είδος του traffic που μεταφέρουν. Ακόμη, καθώς ένα πακέτο μεταβαίνει από ένα DiffServ domain σε ένα άλλο, είναι ζήτημα πολιτικής του νέου domain το αν θα διατηρηθεί η υπάρχουσα κλάση του πακέτου ή αν θα αντικατασταθεί με κάποια νέα [47].

B'.3 Διαμόρφωση Χρησιμοποιηθέντος Συστήματος

Η παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, επικεντρώνεται στο σχεδιασμό ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού που να ανταποκρίνεται στις ιδιαιτερότητες και στα

χαρακτηριστικά ενός WBAN. Ο σχεδιασμός αυτός περιλαμβάνει τόσο την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού, όσο και τον καθορισμό των κατάλληλων συνθηκών λειτουργίας του συστήματος για τη μεγιστοποίηση της απόδοσής του.

Αναφορικά με τις ιδιαιτερότητες του περιβάλλοντος, σε αυτές συγκαταλέγονται η ανάγκη για άμεση και έγκαιρη αποστολή δεδομένων, η προτεραιοποίηση των κόμβων και η διαχείριση καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης. Ιδιαίτερα λόγω των τελευταίων, είναι πιθανό να υπάρχουν απότομες αλλαγές στο traffic του δικτύου, γεγονός στο οποίο θα πρέπει να ανταπεξέλθει ο αλγόριθμος του χρονοπρογραμματισμού.

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω, μελετάται κυρίως η Intra-WBAN επικοινωνία, δηλαδή αυτή που λαμβάνει χώρα μεταξύ του Hub και των αισθητήριων κόμβων. Λόγω της ετερογένειας του traffic και της περιοδικότητας των μετρήσεων που παράγουν οι αισθητήρες, το TDMA κρίνεται η καταλληλότερη επιλογή για το διαμοιρασμό του καναλιού επικοινωνίας στους κόμβους. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του TDMA είναι πως, σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις (π.χ. CSMA), υπάρχει μεγαλύτερος έλεγχος του μέσου, οπότε είναι δυνατό να υπάρχουν εγγυήσεις για επιτυχείς μεταδόσεις εντός time constraints. Βάσει, λοιπόν, της TDMA προσέγγισης, ο χρόνος διακρίνεται σε ένα πλήθος από frames, καθένα από τα οποία αποτελείται από slots.

Εκ παραλλήλου, μελετώνται τοπολογίες αστέρα, αφού αυτές συναντώνται πιο συχνά στη βιβλιογραφία και παρέχουν καλύτερες συνθήκες λειτουργίες για πρωτόκολλα τύπου TDMA. Πιο συγκεκριμένα, δεν υπάρχει κέρδος από το να προσπαθήσουν να μεταδώσουν πολλοί κόμβοι ταυτόχρονα, αφού θα προκαλούσαν σύγκρουση στο Hub, κάτι που δεν θα ίσχυε σε πιο σύνθετες τοπολογίες. Έτσι, ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που αξιοποιείται από το TDMA, μπορεί να επιτύχει το μέγιστο δυνατό throughput αναθέτοντας ακριβώς ένα slot ανά κόμβο, παρακάμπτοντας ταυτόχρονα πλήρως το πρόβλημα των συγκρούσεων.

Για να γίνει αυτό πλήρως αντιληπτό, αρκεί κανείς να αναλογιστεί την περίπτωση, όπου οι αισθητήριοι κόμβοι του συστήματος έχουν ακριβώς τόσες μετρήσεις προς μετάδοση, ώστε να απαιτούνται όλα τα slots ενός frame. Σε αυτή την περίπτωση, ακόμη οι πιο απλοί αλγόριθμοι (π.χ. Round Robin) μπορούν να επιτύχουν το μέγιστο δυνατό throughput [48]. Όμως, με δεδομένο ότι τα μηνύματα υπόκεινται σε time constraints, υπάρχει το ενδεχόμενο ένα μήνυμα να λήξει, προτού φτάσει η στιγμή που θα μεταδοθεί εντός του frame. Έτσι, τίθενται ζητήματα διάταξης των μηνυμάτων των αισθητήριων κόμβων, ακόμη κι αν επαρκούν τα slots ενός frame, με τέτοιο τρόπο ώστε να μην προλάβουν να λήξουν.

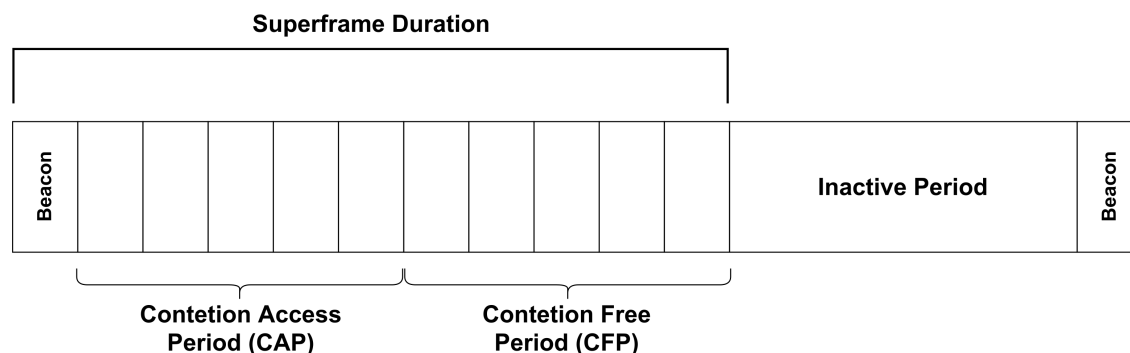
Ωστόσο, σε περιπτώσεις που οι αισθητήρες του συστήματος παράγουν μετρήσεις με μεγαλύτερο ρυθμό από αυτόν που μπορεί να εξυπηρετηθεί εντός ενός frame, προκύπτει το ζήτημα της προτεραιοποίησης, με την έννοια της επιλογής του ποιοι κόμβοι θα προτιμηθούν για μετάδοση και ποιοι όχι. Η επιλογή αυτή εξαρτάται κυρίως από το είδος κάθε αισθητήρα και των μετρήσεων που αυτός παράγει, χωρίς όμως να είναι επιθυμητό να αγνοηθούν πλήρως οι υπόλοιποι.

Στο σύνολο, όλοι οι αισθητήρες, ανεξάρτητα από τα χαρακτηριστικά τους, επιθυμούν να μεταδώσουν τα μηνύματά τους στο Hub. Στην προσπάθεια μετάδοσης, είναι πολύ πιθανό να προκληθούν συγκρούσεις, με αποτέλεσμα να αποτυγχάνει. Για την αποφυγή αυτού του κινδύνου και όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι απαραίτητος ο χρονοπρογραμματισμός, ώστε να εξασφαλιστούν όσο το δυνατό περισσότερες επιτυχημένες μεταδόσεις.

Επιπροσθέτως, δεδομένης της ετερογένειας του traffic του δικτύου και της ανάγκης για προτεραιοποίηση, τα DiffServ μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλα για την αποδοτική διαχείρισή τους, ιδιαίτερα λαμβάνοντας υπ' όψιν την αποτελεσματική εφαρμογή τους στο Διαδίκτυο. Συνεπώς, η λογική των DiffServ μπορεί να προσαρμοστεί, ώστε να αξιοποιηθεί για χρονοπρογραμματισμό μεταδόσεων, αντί για δρομολόγηση πακέτων, και να ενσωματωθεί στο PD, που αποτελεί το Hub ενός WBAN. Για να γίνει αυτό, ο Hub θα πρέπει να αναλάβει τα καθήκοντα της ταξινόμησης, αλλά και άλλων απαραίτητων λειτουργιών (π.χ. rate limiting).

Συγκεκριμένα, με στόχο την αξιοποίηση και ενσωμάτωση των DiffServ, το traffic διακρίνεται σε διαφορετικές κλάσεις. Για την ακρίβεια, ανάλογα με το είδος των δεδομένων που παράγει ο κάθε αισθητήριος κόμβος, την προτεραιότητα αυτού αλλά και το αν βρίσκεται σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, κατατάσσεται σε μία από τρεις κλάσεις: normal, topK και emergency. Οι K σημαντικότεροι αισθητήριοι κόμβοι, δηλαδή αυτοί με την υψηλότερη προτεραιότητα, οι οποίες καθορίζονται στην αρχή της λειτουργίας του δικτύου κατατάσσονται στην κλάση topK, ενώ στην κλάση emergency αυτοί που βρίσκονται σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης. Στην κλάση normal κατατάσσονται όλοι οι υπόλοιποι αισθητήρες.

Κατ' επέκταση, οι κλάσεις αυτές θα πρέπει να συμπεριληφθούν και στη δομή του frame και μάλιστα με τέτοιο τρόπο, ώστε να συμβαδίζουν με τις προτεραιότητές τους. Πρωτίστως, το frame αποτελείται από ένα beacon slot, μερικά request slots και κάποια data slots. Στη διάρκεια ενός request ή ενός data slot, μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μία μετάδοση, αλλιώς προκαλείται σύγκρουση.



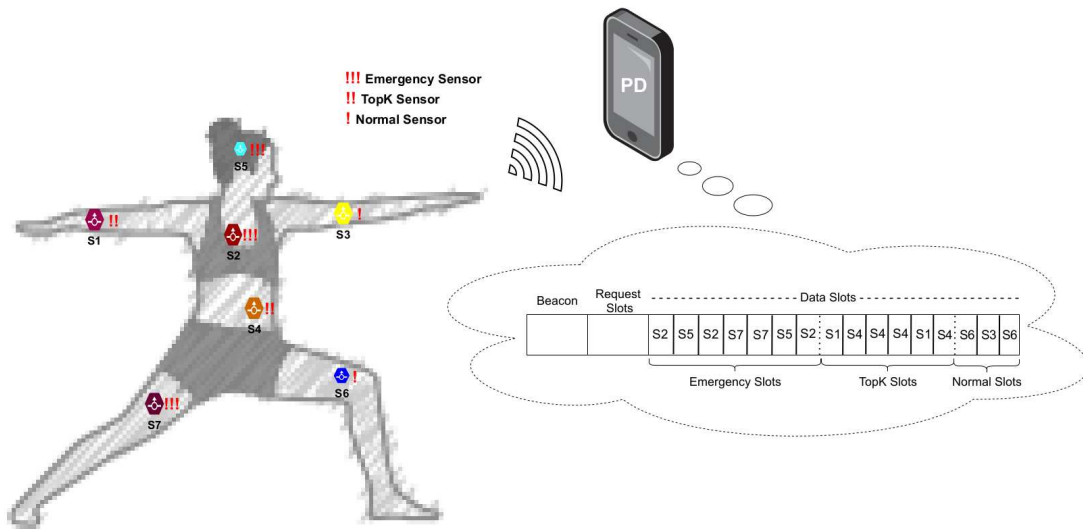
Σχήμα Β'.1: Το superframe του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4.

Κατά τη διάρκεια ενός data slot, ένας αισθητήρας μπορεί να στείλει ένα μήνυμα με μετρήσεις προς το Hub. Για να μπορέσει να μεταδώσει ένας αισθητήρας σε ένα data slot, θα πρέπει πρώτα να έχει ενημερώσει το Hub μέσω αιτήματος (REQUEST) κατά τη διάρκεια ενός request slot ότι έχει δεδομένα προς αποστολή. Εφόσον ο Hub έχει λάβει μήνυμα REQUEST από έναν αισθητήρα μπορεί να του αναθέσει ένα πλήθος από data slots στο επόμενο frame στα οποία μπορεί να μεταδώσει, τα οποία ανακοινώνονται σε κάθε αισθητήρα κατά τη διάρκεια του beacon. Να σημειωθεί πως ο χρονοπρογραμματισμός επαναλαμβάνεται στην αρχή κάθε frame, κάτι που επιτρέπει στο σύστημα να ανταπεξέλθει δυναμικά σε απότομες μεταβολές του traffic (π.χ. λόγω καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης).

Πέρα από αυτό, κατά τη διάρκεια του beacon slot, ο Hub πραγματοποιεί άλλες λειτουργίες που είναι απαραίτητες για την ορθή λειτουργία του δικτύου, όπως είναι ο συγχρονισμός μεταξύ των αισθητήρων. Να αποσαφηνιστεί, ακόμα, πως το πλήθος των data slots που ανατίθενται από το Hub πραγματοποιείται με κριτήριο την κλάση του αισθητήρα, με τη κλάση emergency να προηγείται της κλάσης topK, η οποία με τη σειρά της προηγείται της κλάσης normal.

Σε γενικότερα πλαίσια, η δομή του frame παρουσιάζει αρκετά κοινά χαρακτηριστικά με το superframe του beacon-enabled mode του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα Β'.1. Το ρόλο του CAP διαδραματίζουν τα request slots, ενώ το CFP τα προαναφερόμενα data slots. Η κύρια διαφορά είναι ότι στο frame που προδιαγράφεται για τη παρούσα εργασία δεν περιλαμβάνει κάποιο inactive period.

Στο Σχήμα Β'.2 απεικονίζεται το χρησιμοποιηθέν σύστημα. Πιο αναλυτικά, παρατηρείται ένα σύνολο διαφορετικών αισθητήρων στο ανθρώπινο σώμα, με τον καθένα να κατατάσσεται σε μία από τις κλάσεις: normal, topK και emergency. Στόχος των αισθη-



Σχήμα Β'.2: Το χρησιμοποιηθέν σύστημα.

τήρων είναι η μετάδοση των δεδομένων τους σε ένα PD, το οποίο στην πραγματικότητα αποτελεί ένα κινητό τηλέφωνο και λειτουργεί ως ο Hub του δικτύου. Για τη μετάδοση, λοιπόν, λαμβάνει χώρα ο χρονοπρογραμματισμός μέσω μιας TDMA προσέγγισης, με τη δομή του frame να συμπεριλαμβάνεται.

B'.4 Μαθηματική Μοντελοποίηση Συστήματος

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται και ορίζονται τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιηθέντος συστήματος, τα οποία καθορίζουν τη λειτουργία των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού που αναπτύσσονται και αξιολογούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Το σύνολο των συμβολισμών και των σχέσεων μεταξύ τους χρησιμοποιούνται για το υπόλοιπο της εργασίας.

Το δίκτυο WBAN μοντελοποιείται ως ένας μη-κατευθυνόμενος γράφος $G(V, E)$, όπου V το σύνολο των κόμβων και E το σύνολο των ακμών. Το σύνολο των κόμβων αποτελείται τόσο από το σύνολο των αισθητήρων, S , όσο και από το PD το οποίο στο εξής αναφέρεται ως Hub, δηλαδή $V = S \cup \{Hub\}$. Μιας και το δίκτυο έχει τοπολογία αστέρα, μια τοπολογία που έχει επιλεγεί βάσει της σχετικής βιβλιογραφίας, υπάρχει ακριβώς μία ακμή μεταξύ κάθε κόμβου και του Hub, οπότε $|S| = |E|$.

Κάθε κόμβος διαθέτει έναν buffer στον οποίο αποθηκεύει προσωρινά τα μηνύματα με τις μετρήσεις που παράγει. Κάθε αισθητήρας $i \in S$ έχει ένα συγκεκριμένο ρυθμό παραγωγής μετρήσεων (rate) r_i , ο οποίος υποδηλώνει το πλήθος των μετρήσεων που παράγονται σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Να σημειωθεί πως το rate είναι ντετερμινιστικό, με την έννοια ότι μεσολαβεί ένα σταθερό χρονικό διάστημα μεταξύ των μετρήσεων και δε βασίζεται σε κάποια πιθανότητα. Το rate αυτό αντιστοιχεί, επίσης, στο ρυθμό άφιξης μηνυμάτων στον buffer του αισθητήρα. Το συνολικό πλήθος των μηνυμάτων στον buffer του αισθητήρα i συμβολίζεται ως L_i .

Ακόμη, σε κάθε αισθητήρα $i \in S$ αντιστοιχεί μία τιμή προτεραιότητας $P_i \in \mathbb{R}$, η οποία καθορίζεται με βάση το είδος των δεδομένων που καταγράφει αυτός. Η τιμή αυτή μπορεί να υπολογίζεται με κάποιον αυτοματοποιημένο τρόπο, όπως με κάποιο σύστημα Τεχνητής Νοημοσύνης ή το διαχειριστή του δικτύου. Ο ακριβής υπολογισμός της τιμής της προτεραιότητας P_i δεν αποτελεί επίκεντρο της παρούσας εργασίας, αλλά αρκεί η διάταξη των τιμών $P_i, \forall i \in S$, να αντιστοιχεί στη θεμιτή προτεραιότητα του κάθε αισθητήρα στο δίκτυο. Δηλαδή, αν ο αισθητήρας i θεωρείται σημαντικότερος, τότε $P_i > P_j$.

Συνολικά, όλες οι παραγόμενες μετρήσεις θα σταλούν στο Hub του δικτύου, ο οποίος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν αποτελεί αισθητήριο κόμβο και κατ' επέκτασιν δεν παράγει μετρήσεις. Έτσι, ο buffer του Hub θα περιέχει τα μηνύματα όλων των αισθητήρων του δικτύου και σε αυτόν θα φτάνουν μηνύματα με ρυθμό $R = \sum_{i \in S} r_i$. Αντίστοιχα, το συνολικό πλήθος των μηνυμάτων που βρίσκονται στον buffer του Hub θα είναι $L = \sum_{i \in S} L_i$.

Κάθε μήνυμα που παράγεται στους αισθητήρες φέρει και μία χρονική ένδειξη $t^{creation}$ που υποδεικνύει την ώρα δημιουργίας του μηνύματος. Μιας και στο Hub είναι επιθυμητό να φθάνουν σχετικά πρόσφατες μετρήσεις από τους αισθητήρες, ώστε να διαμορφώνεται μία αντιπροσωπευτική κατάσταση για τον ασθενή, ορίζεται ένας χρονικός περιορισμός (time constraint) για την εγκυρότητα μίας μέτρησης, ο οποίος μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το είδος του αισθητήρα. Για την ακρίβεια, το time constraint του αισθητήρα $i \in S$ συμβολίζεται ως $t_i^{constraint}$ και ένα μήνυμα θεωρείται λήξαν (obsolete) εφόσον το σύστημα βρίσκεται σε χρονική στιγμή που έπεται του $t^{creation} + t_i^{constraint}$ και αυτό δεν έχει ληφθεί από το Hub. Αν ένα μήνυμα είναι obsolete, αφαιρείται από το buffer του αισθητήρα.

Ανάλογα με την εξέλιξη της κατάστασης του ασθενή, υπάρχει η δυνατότητα ένα υποσύνολο των αισθητήρων $M \subseteq S$ να τεθεί σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, όταν

οι μετρήσεις κυμαίνονται σε μη επιτρεπτά για την υγεία όρια. Όταν οι αισθητήρες εισέλθουν σε αυτή την κατάσταση, αλλάζουν κάποια από τα χαρακτηριστικά τους και, για την ακρίβεια, μειώνεται το time constraint τους, ενώ αυξάνεται το rate τους [37, 38]. Επίσης, η προτεραιότητα ενός αισθητήρα πολλαπλασιάζεται με μία σταθερά $c_{emergency}$, η οποία είναι κοινή για το σύνολο του συστήματος.

Συγκεντρωτικά, κατά τη διάρκεια της κατάστασης εκτάκτου ανάγκης, για τους αισθητήρες $i \in M$ που επηρεάζονται από αυτή, οι νέες τιμές (που συμβολίζονται με τονούμενες μεταβλητές) καθενός από τα χαρακτηριστικά: rate, time constraint και priority χαρακτηριστικού προκύπτει ως

$$\begin{aligned} r'_i &= 2r_i, \\ t'^{constraint}_i &= t^{constraint}_{emergency}, \\ P'_i &= c_{emergency}P_i. \end{aligned} \quad (B'.1)$$

Ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται βάσει μιας TDMA προσέγγισης, γι' αυτό και ο χρόνος διακρίνεται σε ένα πλήθος από frames $F = 0, 1, \dots$. Κάθε frame $f \in F$ αποτελείται από μία ακολουθία από N slots, τα οποία αποτελούνται από ένα beacon slot, n^{req} request slots, n^{data} data slots. Φυσικά, θα πρέπει να ισχύει πως

$$N = 1 + n^{req} + n^{data}.$$

Κάθε κατηγορία των slots μπορεί να διαφέρει σε διάρκεια, όπου η διάρκεια ενός beacon slot συμβολίζεται ως t^{beacon} , η διάρκεια ενός request slot είναι $t^{request}$, ενώ η διάρκεια ενός data slot είναι t^{data} . Έτσι, η συνολική διάρκεια ενός frame $f \in F$ συμβολίζεται ως

$$T = t^{beacon} + n^{req}t^{req} + n^{data}t^{data}.$$

Το πλήθος των data slots που αναθέτει ο Hub σε ένα αισθητήρα $i \in S$ στο επόμενο frame, αφού πρώτα λάβει REQUEST μήνυμα από αυτόν, συμβολίζεται με B_i . Κατά συνέπεια, εάν ένας αισθητήρας στείλει σε ένα request slot στο Hub κατά το frame f , θα ανατεθούν σε αυτόν B_i data slots του επόμενου frame $f + 1$, τα οποία θα του ανακοινωθούν κατά το beacon του frame $f + 1$. Έτσι, ο Hub θα πρέπει να είναι σε θέση να προβλέψει το πλήθος των μηνυμάτων που θα έχει ο κάθε αισθητήρας i κατά το επόμενο frame $\hat{L}_i$, δεδομένου ότι αυτοί θα εξακολουθούν να παράγουν μετρήσεις αφού στείλουν το αίτημά τους. Για το λόγο αυτό, οι αισθητήρες $i \in S$ συμπεριλαμβάνουν στο αίτημά τους τις τιμές $L_i, r_i, P_i, t^{constraint}_i$ και τα $t^{creation}$ κάθε μηνύματος.

Έχοντας λάβει τις πληροφορίες που συμπεριλαμβάνονται στα αιτήματα των αισθητήρων, ο Hub έχει επαρκή δεδομένα για να αποκτήσει μία εικόνα του πλήθους των μηνυμάτων στους αισθητήρες του δικτύου, αλλά και άλλων χαρακτηριστικών, όπως τα time constraints και η προτεραιότητα, που θα φανούν χρήσιμα για τον χρονοπρογραμματισμό. Συνεπώς, το προβλεπόμενο πλήθος μηνυμάτων $\hat{L}_i$ στον buffer του αισθητήρα $i \in S$ κατά το frame $f + 1$, δεδομένων των L_i και r_i που έχει λάβει ο Hub κατά το frame f , προκύπτει ως

$$\hat{L}_i = L_i + r_i T.$$

Να σημειωθεί πως όταν στέλνουν τα αιτήματά τους, οι αισθητήρες παραλείπουν τα μηνύματα που θα λήξουν μέχρι το επόμενο data slot.

Κατά τη διάρκεια των request slots, κάθε αισθητήρας επιλέγει τυχαία ένα από τα n^{req} slots, ώστε να μεταδώσει σε αυτό, εφόσον έχει τουλάχιστον ένα μήνυμα στο buffer του. Αν δεν προσπαθήσει να μεταδώσει κάποιος άλλος αισθητήρας στο ίδιο slot, η μετάδοση θεωρείται επιτυχής. Διαφορετικά, οι αισθητήρες που έχουν εμπλακεί στη σύγκρουση περιμένουν ένα τυχαίο αριθμό από slots μεταξύ $[0, n^{max_delay}]$. Το εύρος των slots μεταβάλλεται σύμφωνα με τον αλγόριθμο εκθετικής οπισθοχώρησης, όπου με κάθε προσπάθεια μετάδοσης διπλασιάζεται το μέγιστο πλήθος των slots προς αναμονή¹. Αν ένας αισθητήρας δεν καταφέρει να στείλει εντός των n^{req} slots του frame, τότε θα αποπειραθεί να μεταδώσει και πάλι στο επόμενο frame.

Λόγω του γεγονότος ότι μπορεί να μεταδώσει το πολύ ένας αισθητήρας ανά data slot, προκύπτουν κάποιες ενδιαφέρουσες ιδιότητες. Αρχικά, δεδομένου ότι μηνύματα με δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μόνο κατά τα data slots και αυτά καταλαμβάνουν ένα συγκεκριμένο ποσοστό του frame, καθορίζεται το μέγιστο δυνατό throughput του συστήματος ως

$$throughput^{max} = n^{data} / T.$$

Να σημειωθεί, βέβαια, πως εδώ το throughput εκφράζει το πλήθος των επιτυχημένων μεταδόσεων (κι όχι το μέγεθος της πληροφορίας, π.χ. bits) ως προς κάποια μονάδα χρόνου, που εδώ είναι ίση με τη διάρκεια ενός frame.

Αναφορικά με τα request slots, αξίζει να σημειωθεί πως το πλήθος τους πρέπει να καθοριστεί με βάση το πλήθος των αισθητήρων $|S|$ και μάλιστα $n^{req} > |S|$, ώστε να έχουν όλοι οι αισθητήρες τη δυνατότητα να στείλουν. Αν τα request slots δεν επαρκούν για το πλήθος των αισθητήρων, τότε προκύπτουν συγκρούσεις και τα αιτήματά τους

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Exponential_backoff

δεν θα ληφθούν από το Hub, με αποτέλεσμα να περιοριστεί σημαντικά το throughput του συστήματος.

Το ζήτημα του χρονοπρογραμματισμού, αν και σχετικά απλό, λόγω της τοπολογίας αστέρα, αρχίζει να παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον, στην περίπτωση, όπου οι αισθητήρες έχουν έναν τέτοιο αριθμό από δεδομένα, ώστε να απαιτούνται περισσότερες από n^{data} μεταδόσεις σε ένα frame. Σε αυτές τις περιπτώσεις, θα αρχίσουν να παραμένουν μηνύματα εντός των buffers των αισθητήρων για πάνω από ένα frame, μέχρι αυτά να λήξουν ή να καταφέρουν να μεταδοθούν επιτυχώς σε κάποιο επόμενο frame. Βέβαια, το throughput θα εξακολουθήσει να παραμένει στο μέγιστο, αλλά κάποια μηνύματα θα αρχίσουν να γίνονται obsolete. Έτσι, προκύπτει το πρόβλημα του να αποφασίσει ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού ποια μηνύματα και κατ' επέκτασιν ποιοι αισθητήρες θα έχουν προτεραιότητα στην ανάθεση data slots εντός του frame.

Παρά ταύτα, ένα ακόμα ερώτημα το οποίο προκύπτει είναι με ποια σειρά θα σταλούν τα καθορισμένα από τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού μηνύματα εντός του frame. Το ερώτημα αυτό προκύπτει διότι κάποια μηνύματα ενδεχομένως να έχουν πολύ περιοριστικά time constraints, οπότε και θα θεωρηθούν obsolete εντός του frame στο οποίο θα έπρεπε να σταλούν. Με κατάλληλη αναδιάταξη της σειράς αποστολής των μηνυμάτων, είναι δυνατό να σταλούν επιτυχώς όλα τα μηνύματα, προτού γίνουν obsolete. Μία πιθανή προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτού θα ήταν, για παράδειγμα, η αύξουσα ταξινόμηση των μηνυμάτων που έχουν ανατεθεί εντός του frame με βάση τον υπολειπόμενο χρόνο λήξης τους.

Με στόχο την παροχή ικανοποιητικού QoS για τους αισθητήρες του δικτύου, το traffic διακρίνεται, όπως έχει ήδη ανφερθεί σε τρεις διαφορετικές κλάσεις (normal, topK και emergency). Για την ακρίβεια, έστω $Q = \{normal, topK, emergency\}$ μία οικογένεια από σύνολα, όπου $normal, topK, emergency \subseteq S$ είναι οι αισθητήρες που ανήκουν σε κάθε κλάση του traffic. Η συνάρτηση $C : S \rightarrow Q$ επιστρέφει την κλάση $q \in Q$ στην οποία ανήκει ο αισθητήρας $i \in S$. Μιας και κάθε αισθητήρας μπορεί να ανήκει μόνο σε μία κλάση τη φορά, το Q αποτελεί διαμερισμό (partition) του S , αφού $normal \cup topK \cup emergency = S$ και τα σύνολα είναι ξένα μεταξύ τους.

Να σημειωθεί πως αν ένας αισθητήρας που αρχικά ανήκε στην κλάση topK εισέλθει σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, δεν θα πάρει κάποιος άλλος τη θέση του στην κλάση topK. Φυσικά, με τη λήξη της κατάστασης εκτάκτου ανάγκης, ο αισθητήρας θα επανέλθει στην κλάση topK. Μια αντίστοιχη λογική ακολουθείται και για τους αισθητήρες της κλάσης normal.

Μιας και οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται και με βάση την κλάση στην οποία ανήκουν, θα φανεί χρήσιμο να επεκταθούν κάποιοι ορισμοί για τους αισθητήρες μίας κλάσης. Συγκεκριμένα, το συνολικό πλήθος μηνυμάτων που κατατάσσονται στην κλάση $q \in Q$ υπολογίζεται ως

$$\mathbb{L}_q = \sum_{i \in q} L_i,$$

ως δηλαδή το αθροιστικό πλήθος των μηνυμάτων των αισθητήρων της κλάσης q . Ακόμη, η προτεραιότητα μίας κλάσης ορίζεται ως ο μέσος όρος των προτεραιοτήτων των αισθητήρων που ανήκουν στην κλάση $q \in Q$, δηλαδή

$$\mathbb{P}_q = \frac{1}{|q|} \sum_{i \in q} P_i,$$

όπου $|q|$ είναι το πλήθος των αισθητήρων που ανήκουν στην κλάση q . Επιπλέον, όπως ισχύει και για τους αισθητήρες, ορίζεται αντίστοιχα το $\hat{\mathbb{L}}_q$, το οποίο αναπαριστά το προβλεπόμενο πλήθος των μηνυμάτων που βρίσκονται στους buffers των αισθητήρων της κλάσης q και προκύπτει ως

$$\hat{\mathbb{L}}_q = \sum_{i \in q} \hat{L}_i, q \in Q. \quad (\text{B'.2})$$

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και σύμφωνα με την (B'.1), για τους αισθητήρες που τίθενται σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, οπότε οι αισθητήρες που ανήκουν στην κλάση *emergency*, αυξάνεται η προτεραιότητά τους και για την ακρίβεια πολλαπλασιάζεται με μία σταθερά $c_{\text{emergency}}$. Αντίστοιχα, για τους αισθητήρες που ανήκουν στην κλάση *topK*, αυξάνεται η προτεραιότητά τους, αφού πολλαπλασιάζεται με μία σταθερά c_{topK} , δηλαδή

$$P'_i = c_{\text{topK}} P_i, i \in \text{topK}.$$

Κατά συνέπεια, αφού αυξάνεται η προτεραιότητα των επιμέρους αισθητήρων, θα αυξηθεί και η προτεραιότητα των κλάσεων στις οποίες ανήκουν αυτοί, με αποτέλεσμα οι προτεραιότητες των κλάσεων να διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους. Γενικά, είναι επιθυμητό, δεδομένης της φύσης των δεδομένων, να ισχύει ότι:

$$\mathbb{P}_{\text{normal}} < \mathbb{P}_{\text{topK}} < \mathbb{P}_{\text{emergency}}.$$

Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να εξασφαλιστεί η εξυπηρέτηση των αισθητήρων που το έχουν περισσότερο ανάγκη.

Ακόμη, με βάση την κλάση του αισθητήρα, προσδιορίζεται και το time constraint αυτού. Για την ακρίβεια, όσο πιο σημαντική θεωρείται μία κλάση, τόσο πιο σύντομο σύντομο θα είναι το time constraint του και εξαρτάται από την παράμετρο $t_q^{constraint}$, $q \in Q$. Έτσι, όπως έχει ήδη αναφερθεί, όταν ένας αισθητήρας της κλάσης normal εισέλθει σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης και, ταυτόχρονα, ταξινομηθεί στην κλάση emergency, το time constraint του θα μεταβεί από $t_i^{constraint} = t_{normal}^{constraint}$ σε $t_i^{constraint} = t_{emergency}^{constraint}$.

Κεφάλαιο Γ΄

Αλγόριθμοι Χρονοπρογραμματισμού

ΣΤΟ εν λόγω Κεφάλαιο αναλύεται το σύνολο των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Να σημειωθεί πως οι δύο εξ αυτών συναντώνται στη βιβλιογραφία, ενώ οι υπόλοιποι έχουν σχεδιαστεί εκ νέου, λαμβάνοντας υπ΄ όψιν τον τρόπο λειτουργίας των προηγούμενων. Επιπρόσθετα, διευκρινίζεται πως ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται στα data slots, γι΄ αυτό και στο παρόν Κεφάλαιο, όπου slots εννοείται data slots.

Γ΄.1 Αλγόριθμος Prioritized Proportional Allocation

Όπως θα έχει ήδη γίνει αντιληπτό, στο περιβάλλον ενός WBAN παίζει καθοριστικό ρόλο η προτεραιότητα κάθε αισθητήρα. Το στοιχείο της προτεραιοποίησης γενικότερα σε ασύρματα δίκτυα λαμβάνει υπ΄ όψιν ο αλγόριθμος Prioritized Proportional Allocation (PPA) [39].

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο αυτόν, ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται δυναμικά από frame σε frame, με την ανάθεση slots στους αντίστοιχους κόμβους για μετάδοση των δεδομένων τους, ακολουθώντας έτσι μια TDMA προσέγγιση. Κάθε κόμβος έχει μια διαφορετική προτεραιότητα, ανάλογα με το είδος του traffic που παράγει, καθώς εξυπηρετεί διαφορετικές εφαρμογές είτε φωνής είτε δεδομένων. Έτσι, προκύπτουν τρεις κλάσεις προτεραιοτήτων: (i) High Priority, (ii) Medium Priority και (iii) Low Priority.

Η λογική του αλγορίθμου PPA βασίζεται στον αλγόριθμο Weighted Fair Queueing

(WFQ [49], ο οποίος είναι από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού και συναντάται συχνά στο Assured Forwarding. Ο αλγόριθμος αυτός έχει σχεδιαστεί για το διαμοιρασμό της χωρητικότητας μιας ζεύξης σε A ροές δεδομένων, με κύριο κριτήριο το fairness. Αυτό το επιτυγχάνει ο WFQ αναθέτοντας σε κάθε ροή δεδομένων i ένα βάρος w_i , το οποίο μπορεί να υπολογιστεί με διάφορους τρόπους, ανάλογα με την εφαρμογή. Έπειτα, σε κάθε ροή δεδομένων i θα ανατεθεί ένα ποσοστό του συνολικού rate της ζεύξης, το οποίο θα προκύπτει ως

$$\frac{w_i}{w_1 + \dots + w_A}. \quad (\Gamma'.1)$$

Έτσι, το ποσοστό που αναλογεί σε κάθε ροή θα είναι ανάλογο του βάρους αυτής προς όλων των υπολοίπων, επιτυγχάνοντας ένα ικανοποιητικό fairness, ανάλογα με τον τρόπο υπολογισμού του βάρους.

Ο αλγόριθμος PPA ουσιαστικά υιοθετεί τον αλγόριθμο WFQ και τον προσαρμόζει για ένα ασύρματο περιβάλλον, το οποίο αποτελείται από κόμβους. Στο εξής, προκειμένου να προσαρμοστεί η λειτουργία του PPA στο σχεδιασμό του αλγορίθμου, ο οποίος αποτελεί το επίκεντρο μελέτης της παρούσας εργασίας, οι συμβολισμοί και η ερμηνεία τους τροποποιούνται αναλόγως.

Κύριος στόχος είναι να καθοριστεί το πλήθος των slots B_i που θα ανατεθούν σε κάθε αισθητήρα $i \in S$. Ο υπολογισμός του B_i προκύπτει από την εξίσωση (Γ'.1), χρησιμοποιώντας ως βάρος ένα συνδυασμό της προτεραιότητας P_i και το προβλεπόμενο πλήθος των μηνυμάτων $\hat{L}_i$ στο buffer κάθε κόμβου $i \in S$. Για την ακρίβεια, το πλήθος των slots B_i που θα ανατεθούν στον κόμβο i κατά το frame $f + 1$ καθορίζεται από την εξίσωση

$$B_i(f + 1) = \frac{P_i \hat{L}_i}{\sum_{j \in S} P_j \hat{L}_j} n^{data}, \quad i \in S, f \in F. \quad (\Gamma'.2)$$

Σύμφωνα, λοιπόν, με την εξίσωση (Γ'.2) το βάρος που αντιστοιχεί σε κάθε αισθητήρα προκύπτει ουσιαστικά ως το γινόμενο της προτεραιότητας P_i επί του προβλεπόμενου πλήθους των μηνυμάτων στον buffer αυτού $\hat{L}_i$, το οποίο προκύπτει βάσει της (Β'.4). Έτσι, συνυπολογίζονται τα εξής χαρακτηριστικά:

- Η προτεραιότητα P_i κάθε αισθητήρα i , ώστε να παρέχεται ένας βαθμός προτεραιοποίησης ατομικά για κάθε αισθητήρα.
- Το πλήθος των υπαρχόντων μηνυμάτων L_i στον buffer κάθε αισθητήρα i , ώστε να έχουν προτίμηση οι αισθητήρες που για κάποιο λόγο έχουν συσσωρεύσει μεγάλο

πλήθος μηνυμάτων L_i .

- Ο ρυθμός παραγωγής μετρήσεων r_i κάθε αισθητήρα i , ώστε οι αισθητήρες με υψηλότερο ρυθμό να λάβουν και περισσότερα data slots.

Συνεπώς, το ποσοστό που αντιστοιχεί σε κάθε αισθητήρα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπ' όψιν όλα τα χαρακτηριστικά που αφορούν τα μηνύματα και την παραγωγή αυτών από κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, αλλά και από το σύνολο του συστήματος, δηλαδή όλων των αισθητήρων που το συντελούν.

Ένας περιορισμός που πρέπει να ισχύει για όλους τους αλγορίθμους χρονοπρογραμματισμού είναι ότι το συνολικό πλήθος των slots που ανατίθενται στους αισθητήρες πρέπει να μην υπερβαίνει το πλήθος των data slots που περιλαμβάνονται σε ένα frame, δηλαδή

$$\sum_{i \in S} B_i(f) \leq n^{data}. \quad (\Gamma'.3)$$

Αυτό εξασφαλίζεται από τον αλγόριθμο PPA, αφού, σύμφωνα με την Εξίσωση (Γ'.2), θα ισχύει πως

$$\sum_{i \in S} B_i(f) = \sum_{i \in S} \left[\frac{P_i \hat{L}_i}{\sum_{j \in S} P_j \hat{L}_j} n^{data} \right] = \frac{n^{data}}{\sum_{j \in S} P_j \hat{L}_j} \sum_{i \in S} P_i \hat{L}_i = n^{data}.$$

Όμως, κατά πάσα πιθανότητα, το B_i που προκύπτει από την Εξίσωση (Γ'.2) θα είναι ένας δεκαδικός αριθμός. Εφόσον, όμως, το πλήθος των slots που ανατίθεται σε έναν αισθητήρα πρέπει να είναι ακέραιος, προκύπτει η ανάγκη για κάποια μέθοδο που θα επιστρέφει το ακέραιο μέρος του B_i , χωρίς, όμως, ιδανικά να σπαταλώνται slots ή να υπερβαίνουν το n^{data} . Για να επιτευχθεί αυτό, οι πρώτες επιλογές που έρχονται κατά νου θα ήταν να ανατεθεί είτε το $\lceil B_i \rceil$ είτε το $\lfloor B_i \rfloor$, δηλαδή το ceiling ή το floor του B_i . Όμως, η πρώτη επιλογή δεν εξασφαλίζει ότι θα ισχύει ο περιορισμός της Εξίσωσης (Γ'.3), ενώ η δεύτερη πιθανώς δεν θα αξιοποιήσει όλα τα slots του frame.

Για το λόγο αυτό, το B_i που τελικά χρησιμοποιείται προκύπτει ως η στρογγυλοποίηση του B_i της Εξίσωσης (Γ'.2), δηλαδή $B_i \leftarrow \lfloor B_i \rfloor$. Δυστυχώς και πάλι δεν εγγυάται πως θα ισχύει ο περιορισμός της Εξίσωσης (Γ'.3), αν και είναι λιγότερο πιθανό να ξεπεραστεί το όριο των n^{data} slots. Για την αντιμετώπιση αυτού, αν τελικά το άθροισμα των slots ξεπεράσει το n^{data} , επιλέγονται τυχαία μηνύματα από αισθητήρες, ώστε να παραλειφθούν, έως ότου ισχύει ο περιορισμός της Εξίσωσης (Γ'.3).

Ένα τελευταίο ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η διάταξη των μηνυμάτων των αισθητήρων. Στον αλγόριθμο PPA, αυτό επιτυγχάνεται ταξινομώντας απλώς τα

μηνύματα με αύξουσα σειρά σύμφωνα με το χρόνο λήξης τους. Ο χρόνος λήξης υπολογίζεται ως ο χρόνος που υπολείπεται από μία χρονική στιγμή t , που συμπίπτει με το beacon κάποιου frame, μέχρι το μήνυμα να γίνει οβσολετε, δηλαδή $t - (t^{creation} + t^{constraint})$.

Γ'.2 Class-based Prioritized Proportional Allocation Αλγόριθμος

Ο αλγόριθμος PPA αποσκοπεί κυρίως στο να παρέχει ένα fairness μεταξύ των αισθητήρων, χωρίς όμως να λαμβάνει τόσο ρητά υπ' όψιν του την κλάση στην οποία ανήκει κάθε μήνυμα, πέρα από την προτεραιότητα του κάθε κόμβου. Έτσι, είναι δύσκολο να παράσχει εγγυήσεις για τις διαφορετικές κλάσεις του traffic και πιθανά οι αισθητήρες που ανιχνεύουν πιο κρίσιμα για την υγεία δεδομένα να μην εξυπηρετηθούν. Η εξυπηρέτηση αφορά από κοινού το πλήθος των slots που θα τους ανατεθεί, αλλά και την αμεσότητα της εξυπηρέτησής τους.

Στην αντιμετώπιση αυτών των μειονεκτημάτων επικεντρώνεται ο πρώτος αλγόριθμος που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο οποίος φέρει το όνομα 'Class-based Prioritized Proportional Allocation (CPPA)'. Όπως υποδηλώνει και το όνομά του, ο αλγόριθμος αυτός στηρίζεται κατά κόρον στο τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου PPA.

Πιο αναλυτικά, η κύρια ιδέα του CPPA είναι η ενσωμάτωση των DiffServ στη λογική του PPA. Για την ακρίβεια, μιας και το traffic του χρησιμοποιηθέντος συστήματος κατατάσσεται σε τρεις κλάσεις, ο CPPA αποσκοπεί στην καλύτερη προτεραιοποίηση μεταξύ αυτών, αναθέτοντας slots πρώτα στις κλάσεις του traffic που συναντώνται στο εκάστοτε frame και στη συνέχεια στους αισθητήρες εντός αυτών.

Επί της ουσίας, ο αλγόριθμος CPPA επαναχρησιμοποιεί την Εξίσωση (Γ'.2), όμως, αυτή τη φορά για την προτεραιότητα $\mathbb{P}_q$ και το προβλεπόμενο πλήθος των μηνυμάτων $\mathbb{L}_q$ κάθε κλάσης. Συγκεκριμένα, το πλήθος των slots που ανατίθεται για τους αισθητήρες της κλάσης q , $\mathbb{B}_q$, κατά το frame f υπολογίζεται ως

$$\mathbb{B}_q(f) = \frac{\mathbb{P}_q \hat{\mathbb{L}}_q}{\sum_{j \in Q} \mathbb{P}_j \hat{\mathbb{L}}_j} n^{data}, \quad q \in Q, f \in F. \quad (\Gamma'.4)$$

Ακόμη, ο αλγόριθμος CPPA μεταβάλλει τη διάταξη των αισθητήρων που θα μεταδώσουν, τοποθετώντας τα slots που ανήκουν στην κλάση emergency στην αρχή των

data slots, αυτά που ανήκουν στην κλάση topK αμέσως μετά και τελευταία αυτά που ανήκουν στην κλάση normal.

Έχοντας υπολογίσει με την Εξίσωση (Γ'.4) το πλήθος των slots που ανατίθενται σε κάθε κλάση, ακολουθεί ο υπολογισμός των slots που ανατίθενται στους αισθητήρες που ανήκουν σε καθεμία από αυτές. Για αυτόν, προσαρμόζεται και πάλι η Εξίσωση (Γ'.2), όμως εδώ γίνεται διαμοιρασμός των slots $\mathbb{B}_q$ στους αισθητήρες, αντί για όλα τα n^{data} slots. Δηλαδή, το πλήθος των slots που ανατίθεται σε κάθε αισθητήρα i κατά το frame $f + 1$ υπολογίζεται ως

$$B_i(f + 1) = \frac{P_i \hat{L}_i}{\sum_{j \in C(i)} P_j \hat{L}_j} \mathbb{B}_{C(i)}, \quad i \in S, f \in F. \quad (\Gamma'.5)$$

Με πιο απλά λόγια, από την Εξίσωση (Γ'.4) προκύπτει ένα ποσοστό του frame που θα δοθεί σε καθεμία από τις τρεις κλάσεις και στη συνέχεια, το ποσοστό αυτό μοιράζεται στους αισθητήρες, σε καθέναν από τους οποίους ανατίθεται ένα διαφορετικό πλήθος slots που καθορίζεται από την Εξίσωση (Γ'.5). Μέσω αυτής της διαφοροποίησης, αρχικά υπάρχει πιο άμεση εξυπηρέτηση στις σημαντικότερες κλάσεις, αφού η διάταξη εντός του frame γίνεται με βάση την κλάση. Επιπλέον, είναι ευκολότερη η παραμετροποίηση του συστήματος, ώστε να επιτυγχάνεται η προτεραιοποίηση των κλάσεων, μεταβάλλοντας τις τιμές των παραμέτρων c_{topK} και $c_{emergency}$, αφού αυτές μεταβάλλουν άμεσα τα $\mathbb{P}_{topK}$ και $\mathbb{P}_{emergency}$, αντίστοιχα.

Όπως και με τον αλγόριθμο PPA, έτσι κι εδώ είναι αρκετά εύκολο να δείξει κανείς πως το συνολικό πλήθος των slots που ανατίθενται στους αισθητήρες δεν θα ξεπεράσει ούτε το n^{data} ούτε το $\mathbb{B}_q, q \in Q$. Αλλά και πάλι, πρέπει να επιλεγεί κατάλληλα το ακέραιο μέρος των $B_i, i \in S$, και $\mathbb{B}_q, q \in Q$. Η μεθοδολογία εδώ μοιάζει με αυτή που ακολουθείται και στο PPA είναι όμοια, αν και λίγο πιο σύνθετη καθώς πρέπει να ισχύει κι ότι

$$\sum_{i \in S} B_i \leq \mathbb{B}_C(i), \quad (\Gamma'.6)$$

δηλαδή οι αναθέσεις στους κόμβους να μην υπερβαίνουν τα slots που ανατίθενται στις αντίστοιχες κλάσεις.

Για να ικανοποιηθεί ο περιορισμός των Εξισώσεων (Γ'.3) και (Γ'.6), ακολουθείται η μεθοδολογία που περιγράφεται στη συνέχεια.

$$\mathbb{B}_{emergency} \leftarrow \min(n^{data}, \lceil \mathbb{B}_{emergency} \rceil), \quad (\Gamma'.7)$$

$$\mathbb{B}_{topK} \leftarrow \min(n^{data} - \mathbb{B}_{emergency}, \lceil \mathbb{B}_{topK} \rceil), \quad (\Gamma'.8)$$

$$\mathbb{B}_{normal} \leftarrow \min(n^{data} - \mathbb{B}_{emergency} - \mathbb{B}_{topK}, \lceil \mathbb{B}_{normal} \rceil). \quad (\Gamma'.9)$$

Σύμφωνα με τις Εξισώσεις (Γ'.7), (Γ'.8) και (Γ'.9), ο υπολογισμός της ανάθεσης των slots αρχικά γίνεται για τους αισθητήρες της κλάσης emergency. Αυτοί θα πάρουν slots που αντιστοιχούν στο ελάχιστο μεταξύ του πλήθους των slots για το frame και του ceiling του πλήθους των slots για την κλάση emergency. Στην κλάση topK θα αντιστοιχεί και πάλι το ελάχιστο μεταξύ των slots που υπολείπονται από την ανάθεση του emergency και του ceiling του πλήθους των slots για την κλάση topK. Επιπλέον, στην κλάση normal αντιστοιχεί το ελάχιστο μεταξύ των slots που υπολείπονται από τις αναθέσεις των προηγούμενων κλάσεων και του ceiling του πλήθους των slots για την κλάση normal.

Τέλος, για τις αναθέσεις slots στους κόμβους, χρησιμοποιείται η στρογγυλοποίηση του B_i , δηλαδή $B_i \leftarrow \lfloor B_i \rfloor$. Σε περίπτωση τα slots μιας κλάσης $q \in Q$ ξεπεράσουν το επιτρεπτό όριο $\mathbb{B}_q$, αφαιρούνται και πάλι τυχαία slots, μέχρι να ισχύει η Εξίσωση (Γ'.6).

Γ'.3 Expedited Forwarding Αλγόριθμος

Ένας κλασικός αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού που ανήκει στην κατηγορία των DiffServ είναι ο Expedited Forwarding (EF) [50]. Η λογική του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα απλή αλλά και αποδοτική, σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται άμεση εξυπηρέτηση των μηνυμάτων των αισθητήρων σε μία κλάση.

Επί της ουσίας, ο EF εξυπηρετεί πρώτα όλα τα μηνύματα της σημαντικότερης κλάσης του συστήματος, προτού προχωρήσει στην αμέσως επόμενη. Αυτό συχνά υλοποιείται ως μία ουρά προτεραιότητας, που αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες δομές δεδομένων. Στα DiffServ ουσιαστικά υπάρχει μόνο μία κλάση, στην οποία δίνεται μεγαλύτερη προτεραιότητα, όμως εδώ επεκτείνεται και για περισσότερες.

Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος EF προσαρμόζεται στο σύστημα, ώστε να εξυπηρετεί και τις τρεις κλάσεις emergency, topK και normal. Χρονικά, πρώτοι εξυπηρετούνται οι αισθητήρες που ανήκουν στην κλάση emergency, έπειτα αυτοί στην κλάση topK και στη συνέχεια οι υπόλοιποι της κλάσης normal.

Το πλήθος των slots κάθε κλάσης q για το frame $f+1$ θα μπορούσε να καθοριστεί, απλώς, ως

$$\mathbb{B}_q(f+1) = \hat{\mathbb{L}}_q, \quad f \in F, q \in Q.$$

Όμως, δεδομένου ότι οι κόμβοι μπορεί να έχουν στους buffers περισσότερα μηνύματα από όσα slots υπάρχουν, πρέπει να τεθεί ένα όριο στο πλήθος των slots κάθε κλάσης. Ακόμη, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο Β', ο EF μπορεί να εγγυηθεί ικανοποιητική απόδοση, εφόσον το πλήθος των μηνυμάτων μίας κλάσης δεν ξεπερνά κάποιο επιτρεπτό όριο. Έτσι, ορίζονται οι μεταβλητές $n_{max}^q, q \in Q$, οι οποίες υποδηλώνουν το μέγιστο πλήθος των slots που μπορεί να ανατεθεί σε κάθε κλάση q . Φυσικά, θα πρέπει να ισχύει ότι $n_{max}^q \leq n^{data}, \forall q \in Q$.

Συνεπώς, ο τρόπος ανάθεσης των slots σε ένα frame¹ προς τις κλάσεις πρέπει να υπόκειται στους εξής περιορισμούς:

$$\sum_{q \in Q} \mathbb{B}_q \leq n^{data}, \quad (\Gamma'.10)$$

$$\mathbb{B}_q \leq n_{max}^q, \quad \forall q \in Q. \quad (\Gamma'.11)$$

Για να ισχύουν οι περιορισμοί των Εξισώσεων (Γ'.10) και (Γ'.11), ο αλγόριθμος EF προσαρμόζεται για τις ανάγκες του συστήματος. Για την ακρίβεια, σύμφωνα με την υλοποίηση που χρησιμοποιείται, το πλήθος των slots που ανατίθεται σε κάθε κλάση υπολογίζεται ως εξής

$$\mathbb{B}_{emergency} = \min(n_{max}^{emergency}, \hat{\mathbb{L}}_{emergency}), \quad (\Gamma'.12)$$

$$\mathbb{B}_{topK} = \min(n_{max}^{topK}, \hat{\mathbb{L}}_{topK}, n^{data} - \mathbb{B}_{emergency}), \quad (\Gamma'.13)$$

$$\mathbb{B}_{normal} = \min(n_{max}^{normal}, \hat{\mathbb{L}}_{normal}, n^{data} - \mathbb{B}_{emergency} - \mathbb{B}_{topK}). \quad (\Gamma'.14)$$

Με πιο απλά λόγια, σύμφωνα με τις Εξισώσεις (Γ'.12), (Γ'.13) και (Γ'.14), ο υπολογισμός της ανάθεσης των slots αρχικά γίνεται για τους αισθητήρες της κλάσης emergency. Αυτοί θα πάρουν slots που αντιστοιχούν στο ελάχιστο μεταξύ του μέγιστου επιτρεπτού ορίου της κλάσης για το frame και του πλήθους των μηνυμάτων που θα υπάρχουν για την κλάση emergency. Στην κλάση topK θα αντιστοιχεί και πάλι το ελάχιστο μεταξύ του μέγιστου επιτρεπτού ορίου της κλάσης και του πλήθους των μηνυμάτων της κλάσης, εφόσον όμως αυτό δεν υπερβαίνει τα slots που υπολείπονται από την ανάθεση του emergency. Τέλος, στην κλάση normal αντιστοιχεί το ελάχιστο μεταξύ των μηνυμάτων που υπολείπονται από τις αναθέσεις των προηγούμενων

¹Στο υπόλοιπο της περιγραφής της λειτουργίας του αλγορίθμου EF, παραλείπεται ο συμβολισμός του frame f κατά την ανάθεση των slots για λόγους απλότητας. Εφόσον ο χρονοπρογραμματισμός πραγματοποιείται κατά το beacon, εννοείται πως πάντα γίνεται αναφορά στα data slots που έπονται στο ίδιο frame.

κλάσεων και του πλήθους των μηνυμάτων των αισθητήρων της κλάσης, εφόσον αυτό δεν υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό όριο. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται τόσο η προτεραιοποίηση των κλάσεων, όσο και η ανάθεση του επιτρεπτού πλήθους slots σε κάθε κλάση.

Έχοντας επιλέξει το πλήθος των slots κάθε κλάσης, πρέπει να οριστεί και το πλήθος των slots που θα ανατεθεί στον εκάστοτε αισθητήρα της κλάσης. Η ανάθεση αυτή πραγματοποιείται βάσει της ακόλουθης συλλογιστικής. Αρχικά, γίνεται ταξινόμηση με αύξουσα σειρά των $\hat{\mathbb{L}}_q$ μηνυμάτων των αισθητήρων που ανήκουν στην κλάση $q \in Q$ με βάση τον υπολειπόμενο χρόνο έως ότου θεωρηθεί *obsolete*, που υπολογίζεται ως $t - (t^{creation} + t^{constraint})$, όπου t η χρονική στιγμή κατά το beacon που πραγματοποιείται ο χρονοπρογραμματισμός. Έπειτα, επιλέγονται τα πρώτα $\mathbb{B}_q$ μηνύματα εξ αυτών, τα οποία αντιστοιχίζονται στα πρώτα $\mathbb{B}_q$ slots της κλάσης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε κλάση κι, έτσι, το πλήθος των slots που ανατίθεται σε κάθε αισθητήρα δεν υπολογίζεται ρητά, αλλά προκύπτει με βάση την προηγούμενη διαδικασία.

Γ'.4 Proportionally Prioritized Expedited Forwarding Αλγόριθμος

Αξιοποιώντας το τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου CPPA και του αλγορίθμου EF και συγκεκριμένα, τη διαδικασία υπολογισμού των αναθέσεων για μία κλάση μέσω της Εξίσωσης (Γ'.4) από τον πρώτο και τον τρόπο ανάθεσης των slots σε κάθε αισθητήρα από το δεύτερο, προτείνεται ο αλγόριθμος Proportionally Prioritized Expedited Forwarding (PPEF).

Ο αλγόριθμος PPEF, που αποτελεί τον δεύτερο προτεινόμενο αλγόριθμο της παρούσας εργασίας, προσφέρει μία δυναμική προσέγγιση στην παραμετροποίηση του αλγορίθμου EF και συγκεκριμένα στα μέγιστα επιτρεπτά όρια των slots κάθε κλάσης $n_{max}^q, q \in Q$. Η δυναμικότητα αυτή προκύπτει, καθώς το n_{max}^q υπολογίζεται από frame σε frame χρησιμοποιώντας την Εξίσωση (Γ'.4), δηλαδή

$$n_{max}^q = \mathbb{B}_q(f + 1) = \frac{\mathbb{P}_q \hat{\mathbb{L}}_q}{\sum_{j \in Q} \mathbb{P}_j \hat{\mathbb{L}}_j} n^{data}, \quad q \in Q, f \in F. \quad (\Gamma'.15)$$

Εφόσον έχουν υπολογιστεί τα μέγιστα επιτρεπτά όρια κάθε κλάσης, η ανάθεση των slots σε κάθε αισθητήρα γίνεται ομοίως με τον EF, δηλαδή σύμφωνα με τις Εξισώσεις (Γ'.12), (Γ'.13) και (Γ'.14).

Γ'.4. *Proportionally Prioritized Expedited Forwarding* Αλγόριθμος 39

Επιπλέον, ο αλγόριθμος PPEF αξιοποιεί έναν ακόμη μηχανισμό για την καλύτερη διαχείριση των slots κάθε κλάσης. Συγκεκριμένα, ένα μειονέκτημα που παρατηρείται στην πράξη από την Εξίσωση (Γ'.15) είναι πως συχνά υπερεκτιμούνται οι ανάγκες μίας κλάσης q , αν η προτεραιότητά της $\mathbb{P}_q$ είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτές των υπόλοιπων κλάσεων. Αυτό οδηγεί στην ανάθεση πολλών slots σε μία κλάση, τα οποία δεν θα αξιοποιηθούν, καθώς οι αισθητήρες που ανήκουν σε αυτή δεν παράγουν μετρήσεις με τόσο υψηλό ρυθμό. Στην περίπτωση του CPPA, αυτό ήταν εύκολο να λυθεί, διότι η ανάθεση των slots σε κάθε αισθητήρα πραγματοποιούνταν μέσω της Εξίσωσης (Γ'.5), η οποία αποσκοπεί στην πρόβλεψη του κατάλληλου πλήθους slots.

Όμως, ενσωματώνοντας το μηχανισμό πρόβλεψης των slots που θα ανατεθούν σε κάθε αισθητήρα, όπως αυτός περιγράφεται από τις Εξισώσεις (Γ'.12), (Γ'.13) και (Γ'.14), είναι ευκολότερα εφικτό να κρίνει κανείς πότε τα slots που ανατίθενται στην κλάση υπερεκτιμούνται σε σχέση με τις ανάγκες των αισθητήρων αυτής. Υπενθυμίζεται πως από τον EF, διαισθητικά, το πλήθος των slots που θα ανατεθεί σε κάθε αισθητήρα $i \in S$ θα ισούται με $\hat{L}_i$, αν παραβλεφθούν οι περιορισμοί που περιγράφονται στις Εξισώσεις (Γ'.10) και (Γ'.11). Έτσι, αν φανεί, έπειτα από την ανάθεση των slots σε κάθε αισθητήρα, ότι υπολείπονται αναξιοποίητα slots μίας κλάσης q σε σχέση με αυτά που έχουν ανατεθεί στους αισθητήρες αυτής, τότε τα αναξιοποίητα αυτά slots παραχωρούνται στην αμέσως επόμενη πιο σημαντική κλάση.

Πιο ρητά, ο μηχανισμός παραχώρησης των slots μπορεί να περιγραφεί με τον τρόπο που ακολουθεί. Αρχικά, για την κλάση emergency, υπολογίζεται η διαφορά $\Delta_{emergency}$ μεταξύ των slots που ανατίθενται σε αυτή και των slots που ανατίθενται στους αισθητήρες αυτής ως

$$\Delta_{emergency} = \mathbb{B}_{emergency} - \sum_{i \in emergency} B_i.$$

Εφόσον έχει υπολογιστεί η διαφορά $\Delta_{emergency}$ που αντιστοιχεί στα αναξιοποίητα slots της κλάσης q , αυτή προστίθεται στο όριο των slots της κλάσης topK n_{max}^{topK} , δηλαδή

$$n_{max}^{topK} \leftarrow n_{max}^{topK} + \Delta_{emergency}.$$

Έτσι, αφού προσαρμοστεί το μέγιστο επιτρεπτό όριο της κλάσης topK, μπορούν να υπολογιστούν τα slots που ανατίθενται στους αισθητήρες που ανήκουν σε αυτήν, όπως και στον EF. Έπειτα, υπολογίζεται η διαφορά Δ_{topK} , βάσει της οποίας προσαρμόζεται το n_{max}^{normal} και τελικά υπολογίζονται τα slots που ανατίθενται στους αισθητήρες της κλάσης normal.

Συνεπώς, δίνονται slots πρώτα στους αισθητήρες της κλάσης emergency, ύστερα σε αυτούς της κλάσης topK και τέλος σε αυτούς της normal, ενώ η διάταξη των μηνυμάτων εντός κάθε κλάσης πραγματοποιείται βάσει ταξινόμησης σύμφωνα με το χρόνο λήξης τους και με αύξουσα σειρά. Ο χρόνος λήξης προκύπτει ως ο υπολειπόμενος χρόνος έως ότου θεωρηθεί obsolete, που υπολογίζεται ως $t - (t^{creation} + t^{constraint})$, όπου t η χρονική στιγμή κατά το beacon που πραγματοποιείται ο χρονοπρογραμματισμός.

Κεφάλαιο Δ΄

Αξιολόγηση Αλγορίθμων Χρονοπρογραμματισμού

Σ

ΤΟ Κεφάλαιο αυτό αξιολογούνται πειραματικά σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο Γ΄.

Δ΄.1 Παράμετροι Πειραμάτων

Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων του Κεφαλαίου Γ΄ απαιτείται η πειραματική αξιολόγησή τους σε ένα περιβάλλον προσομοίωσης. Το περιβάλλον προσομοίωσης που προτιμάται, είναι το OMNeT++ [40], στο οποίο και υλοποιείται το σύνολο του χρησιμοποιηθέντος συστήματος, όπως αυτό περιγράφεται στο Κεφάλαιο Β΄.3.

Οι αλγόριθμοι αξιολογούνται κατά κύριο λόγο ως προς τέσσερις διαφορετικές μετρικές: waiting time, obsolete μηνύματα, throughput και το ποσοστό των served μηνυμάτων. Το waiting time υπολογίζεται ως ο χρόνος που έχει μεσολαβήσει από τη στιγμή δημιουργίας κάθε μηνύματος $t^{creation}$ έως τη στιγμή t που θα ληφθεί το μήνυμα από το Hub, δηλαδή

$$\text{Waiting Time} = t - t^{creation}.$$

Μιας και τα μηνύματα που γίνονται obsolete δεν καταφθάνουν ποτέ στο Hub, δε συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό του waiting time. Το throughput υπολογίζεται συγκριτικά με το $throughput^{max}$, δηλαδή το throughput για ένα frame ορίζεται ως

$$throughput = \frac{n^{utilized}/T}{throughput^{max}} = \frac{n^{utilized}}{n^{data}},$$

όπου $n^{utilized}$ το πλήθος των data slots, κατά τη διάρκεια των οποίων πραγματοποιήθηκε επιτυχώς μετάδοση. Το ποσοστό των served μηνυμάτων υπολογίζεται ως το πηλίκο μεταξύ των μηνυμάτων των αισθητήρων που εξυπηρετήθηκαν επιτυχώς (δεν έγιναν obsolete προς το συνολικό πλήθος μηνυμάτων που παρήγαγαν.

Η αξιολόγηση των αλγορίθμων λαμβάνει χώρα για τρία διαφορετικά σενάρια. Τα σενάρια αυτά διαφέρουν κυρίως ως προς τα χαρακτηριστικά του traffic του δικτύου, με στόχο να αξιολογηθεί η ικανότητα κάθε αλγορίθμου να αντεπεξέλθει σε διαφορετικές συνθήκες. Οι ακριβείς τιμές των παραμέτρων ανά σενάριο παρουσιάζονται στον Πίνακα Δ'.1 Τα σενάρια αυτά είναι:

1. Πρώτο Σενάριο Πειραματισμού

Στο σενάριο αυτό, κάθε αισθητήρας παράγει ένα μήνυμα ανά 14 με 30 slots, με την ακριβή τιμή του rate για κάθε αισθητήρα να επιλέγεται τυχαία, μέσω ομοιόμορφης κατανομής, στην αρχή του πειράματος. Έτσι, κατά μέσο όρο, κάθε αισθητήρας θα παράγει ένα μήνυμα ανά 22 slots. Επομένως, ο συνολικός αριθμός των μηνυμάτων που παράγονται ανά frame θα ισούται με $|S| \times N/22 = 87.27$. Δεδομένου ότι σε ένα frame υπάρχουν 91 slots, ο συγκεκριμένος ρυθμός παραγωγής μηνυμάτων απαιτεί σχεδόν όλο το frame, με εξαίρεση τις καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης, όπου τα slots ενός frame δεν θα αρκούν, καθώς ο ρυθμός παραγωγής μηνυμάτων θα αυξηθεί. Σε τέτοιες περιπτώσεις, θα φανεί η ικανότητα κάθε αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού να προτεραιοποιήσει τις κλάσεις, ενώ σε όλες τις υπόλοιπες θα φανεί η αποτελεσματικότητά τους στην ανάθεση του κατάλληλου πλήθους slots, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους χρονικούς περιορισμούς των μηνυμάτων.

2. Δεύτερο Σενάριο Πειραματισμού

Η κύρια διαφορά του συγκεκριμένου σεναρίου με το προηγούμενο είναι ότι αυξάνεται σημαντικά ο ρυθμός παραγωγής των αισθητήρων. Έτσι, υπάρχει μία συνεχής ανάγκη προτεραιοποίησης των διαφορετικών κλάσεων, η οποία γιγαντώνεται κατά τις καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Το συνολικό πλήθος μηνυμάτων που παράγονται κατά τη διάρκεια ενός frame, στο οποίο κανένας αισθητήρας δεν είναι σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, ισούται κατά μέσο όρο με 120.0 μηνύματα.

3. Τρίτο Σενάριο Πειραματισμού

Το σενάριο αυτό δεν αποσκοπεί τόσο στη μελέτη της απόδοσης των αλγορίθμων με κριτήριο τη μεταβολή του ρυθμού παραγωγής δεδομένων, ο οποίος παραμένει κοινός με το πρώτο σενάριο, αλλά κυρίως στην επιτυχία προσαρμογής τους, σε περιπτώσεις ακραίων μεταβολών, όπως όταν όλοι οι αισθητήρες του δικτύου εισαχθούν σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης. Αν και μία τέτοια μεταβολή είναι σημαντική, δεν είναι απαραίτητα μη ρεαλιστική, αφού ένα άτομο μπορεί να έχει ένα περιορισμένο πλήθος αισθητήρων, το οποίο να ανιχνεύει στοχευμένες ζωτικές ενδείξεις, για την παρακολούθηση κάποιας συγκεκριμένης ασθένειας. Συνεπώς, σε ακραίες καταστάσεις υγείας, δεν θα ήταν απίθανο να χρειαστεί η μέγιστη δυνατή ανταπόκριση από όλους τους αισθητήρες. Έτσι, με το σενάριο αυτό δοκιμάζεται η δυναμικότητα του κάθε αλγορίθμου, ώστε να ανταπεξέρχεται σε τέτοιου είδους ακραίες καταστάσεις.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί μία σημαντική λεπτομέρεια που αφορά στην υλοποίηση των καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι στα πλαίσια της προσομοίωσης οι αισθητήρες δεν αντλούν ρεαλιστικές ζωτικές ενδείξεις, αλλά παράγουν απλά τα αντίστοιχα μηνύματα, δεν είναι εφικτή η παρακολούθηση της κατάστασης του ασθενή. Έτσι, το σύστημα τίθεται σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης ανά τυχαία χρονικά διαστήματα που καθορίζονται από την παράμετρο $\mathcal{F}^{emergency}$ κι έχουν διάρκεια $\mathcal{T}^{emergency}$. Το σύνολο των αισθητήρων που εισέρχεται σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης καθορίζεται τυχαία, με κάθε αισθητήρα να επηρεάζεται με πιθανότητα $p_{emergency}$. Τα χαρακτηριστικά αυτά της κατάστασης εκτάκτου ανάγκης καθορίζονται από το Hub και οι εμπλεκόμενοι αισθητήρες ενημερώνονται στο αμέσως επόμενο beacon slot. Λόγω αυτού, θα υπάρχει μία μικρή καθυστέρηση μέχρι οι αισθητήρες να ενημερωθούν για την κατάσταση εκτάκτου ανάγκης.

Για την ορθότητα και αξιοπιστία της διαδικασίας πειραματισμού, κάθε σενάριο εκτελείται πολλαπλά για κάθε συνδυασμό παραμέτρων των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται δέκα επαναλήψεις, καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιεί διαφορετικό seed για την παραγωγή τυχαίων αριθμών, ενώ οι μετρικές που παρουσιάζονται υπολογίζονται ως οι μέσοι όροι κάθε τιμής που προκύπτει από τις μεμονωμένες επαναλήψεις.

Πίνακας Δ'.1: Οι παράμετροι των πειραμάτων.

Παράμετρος	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3
$ S $		15	
N		128	
n^{req}		32	
n^{data}		91	
T		983.04ms	
t^{beacon}		38.4ms	
t^{req}		7.68ms	
t^{data}		7.68ms	
r_i	$\frac{1}{\text{uniform}(14,30) \times t^{data}}$	$\frac{1}{\text{uniform}(12,20) \times t^{data}}$	$\frac{1}{\text{uniform}(14,30) \times t^{data}}$
P_i		$\text{uniform}(0,1)$	
K		5	
$p_{emergency}$		34%	
$\mathcal{F}_{emergency}$		$\text{uniform}(50, 100) \times T$	
$\mathcal{T}_{emergency}$		$7 \times T$	
c_{topK}		$\{2, 4, 8\}$	
$c_{emergency}$		$\{2, 4, 100\}$	
$t_{normal}^{constraint}$		$\text{uniform}(3.5, 4.5)\text{s}$	
$t_{topK}^{constraint}$		$\text{uniform}(2.5, 3.5)\text{s}$	
$t_{emergency}^{constraint}$		$\text{uniform}(1.5, 2.5)\text{s}$	
n^{max_delay}		4	

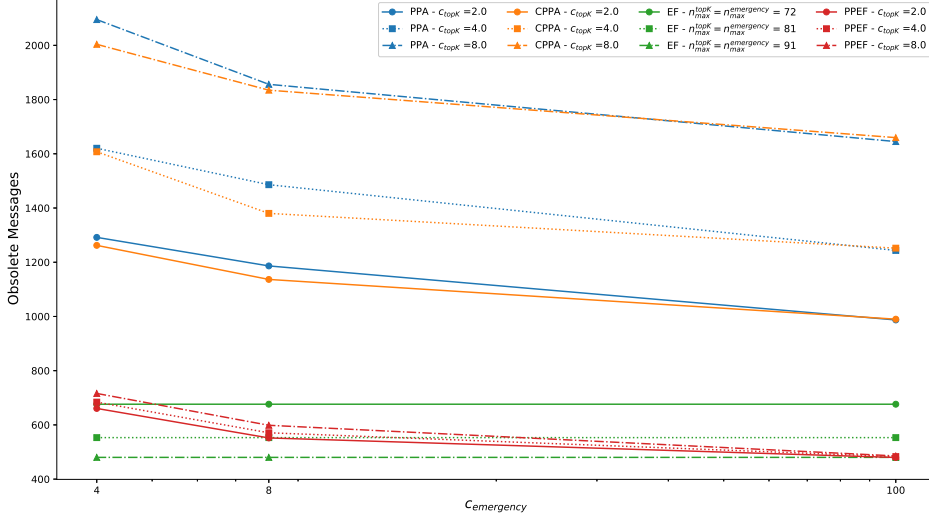
Δ'.2 Αποτελέσματα Αξιολόγησης

Το σύνολο των εξαγόμενων αποτελεσμάτων συγκρίνει την απόδοση των τεσσάρων αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού, ως προς την εξυπηρέτηση που παρέχουν σε κάθε κλάση, καθώς και στο σύνολο του συστήματος. Η απόδοσή τους εξετάζεται με κριτήριο τις μετρικές: (i) Obsolete μηνύματα (ii) Waiting Time και (iii) Throughput. Το υπόλοιπο του παρόντος Κεφαλαίου δομείται βάσει της απόδοσης των αλγορίθμων σε κάθε ένα σενάριο, όπως αυτά περιγράφονται στο Κεφάλαιο Δ'.1. Κατά τη διάρκεια των πειραματισμών, αξιολογείται η απόδοση των διαφορετικών αλγορίθμων για τους συνδυασμούς των διαφορετικών τιμών των σταθερών c_{topK} και $c_{emergency}$. Εκ παραλλήλου, να διευκρινιστεί πως στην περίπτωση του αλγορίθμου EF, αυτός δεν επηρεάζεται καθόλου από τις τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} , με τις τιμές των οποίων διεξάγεται πλήθος πειραμάτων. Η κύρια παράμετρος που επηρεάζει την απόδοση του EF είναι το n_{max}^q , που υποδηλώνει το πλήθος των data slots που θα δοθεί στην αντίστοιχη κλάση $q \in Q$, γεγονός που γίνεται ορατό σε όλα τα σενάρια.

Δ'.2.1 Πρώτο Σενάριο Πειραματισμού

Ξεκινώντας από το Σχήμα Δ'.1, εκεί παρουσιάζεται το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency που προκύπτει από κάθε αλγόριθμο και για διαφορετικές τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} . Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό πως σε για τους αλγορίθμους PPA, CPPA, PPEF, ο αριθμός των obsolete μειώνεται, όσο το $c_{emergency}$ αυξάνεται και το c_{topK} μειώνεται. Αυτό θα μπορούσε να χαρακτηριστεί αναμενόμενο, εφόσον για την καλύτερη εξυπηρέτηση της κλάσης emergency, χρειάζεται μία υψηλότερη προτεραιότητα των αισθητήρων που ανήκουν σε αυτή. Όσο για τον EF, φαίνεται πως τα λιγότερα δυνατά obsolete μηνύματα επιτυγχάνονται στην περίπτωση που η παράμετρος $n_{max}^{emergency}$ πάρει τη μέγιστη τιμή, η οποία ισούται με $n^{data} = 91$, εξυπηρετεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, αφού ουσιαστικά διαθέτει όλα τα data slots του frame στην κλάση emergency.

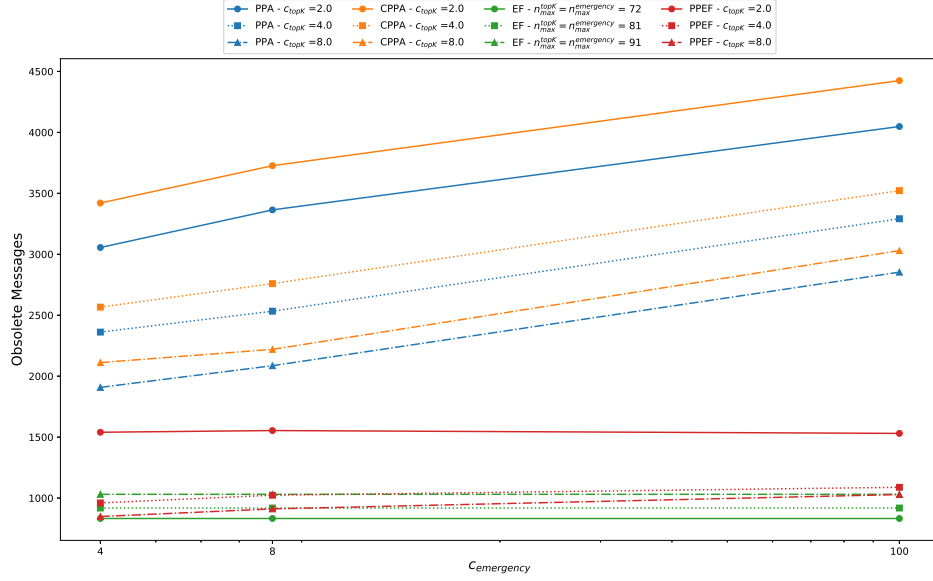
Αξίζει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος PPEF συμπεριφέρεται κοινά με τον EF στην περίπτωση που το $c_{emergency}$ πάρει τη μέγιστη τιμή για το πείραμα, δηλαδή όταν $c_{emergency} = 100$ και το c_{topK} πάρει την ελάχιστη, δηλαδή $c_{topK} = 2$. Αντίθετα, αν και ο CPPA αναθέτει επίσης με τον ίδιο μηχανισμό στην κλάση emergency όπως και ο PPEF, φαίνεται πως υστερεί αρκετά σε σχέση με τους EF και PPEF. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στο μηχανισμό ανάθεσης slots στους αισθητήρες εντός της κλάσης, όπου



Σχήμα Δ'.1: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency ανά αλγόριθμο, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.

λόγω μεγάλης διαφοράς μεταξύ των P_i γίνεται ανομοιόμορφη κατανομή των slots στους αισθητήρες της κλάσης. Η διαφορά αυτή μεταξύ των P_i γίνεται ακόμη πιο έντονη για μεγάλες τιμές του $c_{emergency}$, οπότε και δεν υπάρχει το αναμενόμενο όφελος από την αύξησή του αφού ευνοούνται οι αισθητήρες που έχουν υψηλό priority, χωρίς όμως να έχουν ανάγκη τόσα slots του συστήματος.

Συνεχίζοντας με το Σχήμα Δ'.2, σε αυτό παρουσιάζεται το σύνολο των obsolete μηνυμάτων που προκύπτει από κάθε αλγόριθμο και για διαφορετικές τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} για την κλάση topK. Όπως είναι εμφανές, καθώς αυξάνεται το $c_{emergency}$ σε όλες τις περιπτώσεις, με εξαίρεση τον EF και τον PPEF για $c_{topK} = 2$, υπάρχει μία αύξηση στο πλήθος των obsolete μηνυμάτων, όπως είναι αναμενόμενο. Αντίθετα, στην περίπτωση του PPEF για $c_{topK} = 2$ δεν υπάρχει σημαντική αύξηση στο πλήθος των obsolete μηνυμάτων, πιθανώς διότι υπάρχει ήδη μεγάλη διαφορά μεταξύ των c_{topK} και $c_{emergency}$, οπότε τα περισσότερα ανατίθενται στην emergency. Ταυτόχρονα, το c_{topK} είναι αρκετά χαμηλά, ώστε να ανατίθενται περισσότερα slots στην αμέσως επόμενη κλάση, δηλαδή τη normal, εξού και η διαφορά σε σχέση με τις άλλες τιμές του c_{topK} για τον PPEF.

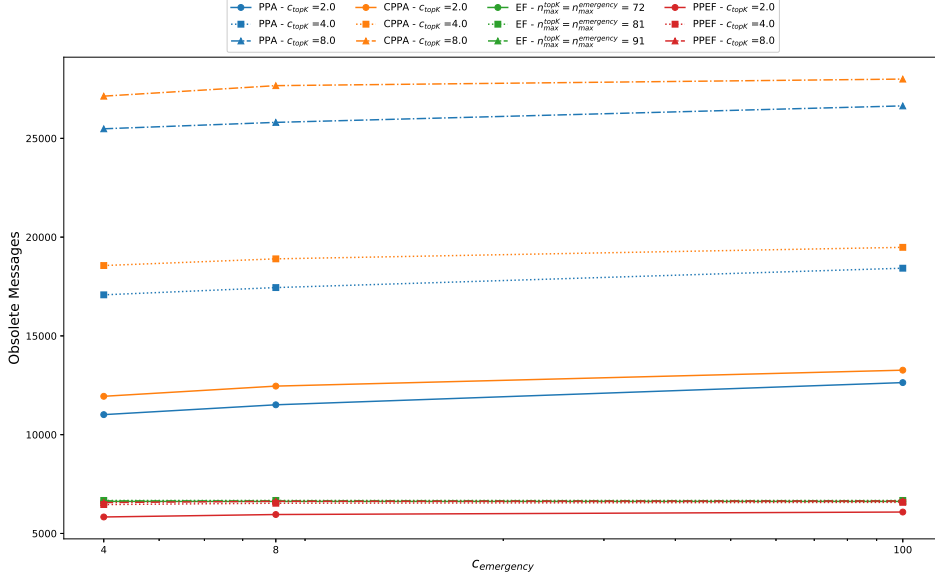


Σχήμα Δ'.2: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση topK ανά αλγόριθμο, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.

Ο EF παρουσιάζει τη βέλτιστη απόδοση για $n_{max}^{topK} = 80\%n^{data} = 72$. Αν και θα περίμενε κανείς η απόδοση να είναι βέλτιστη όταν το n_{max}^{topK} ισούται με το n^{data} , καθώς το όριο μεταβάλλεται συνδυαστικά με το $n_{max}^{emergency}$, αυτό δεν ισχύει, αφού αν δοθούν όλα τα slots στην κλάση emergency, τότε δε θα μείνουν αρκετά για την κλάση topK. Έτσι, όταν το $n_{max}^{emergency} = 72$, υπολείπονται περισσότερα slots για την κλάση topK, οπότε και υπάρχουν λιγότερα obsolete μηνύματα.

Στο Σχήμα Δ'.3 παρουσιάζεται το σύνολο των obsolete μηνυμάτων που προκύπτει από κάθε αλγόριθμο και για διαφορετικές τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} για την κλάση normal. Αρχικά, ένα αξιοσημείωτο σχόλιο αποτελεί το γεγονός ότι το πλήθος των obsolete μηνυμάτων είναι κατά πολύ μεγαλύτερο, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κλάσεις, γεγονός λογικό αφού ως κλάση κατέχει τη μικρότερη προτεραιότητα. Κατά συνέπεια και για τους αλγόριθμους PPA και CPPA, το πλήθος των obsolete μηνυμάτων αυξάνεται, όσο αυξάνονται και οι τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} . Για την περίπτωση του PPEF, όπου το $c_{topK} = 2$, φαίνεται να αποδίδει καλύτερα από κάθε άλλη περίπτωση και αλγόριθμο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην αμέσως προηγούμενη κλάση (topK), για την ίδια τιμή του c_{topK} παρατηρούνται τα περισσότερα obsolete μηνύματα για τον

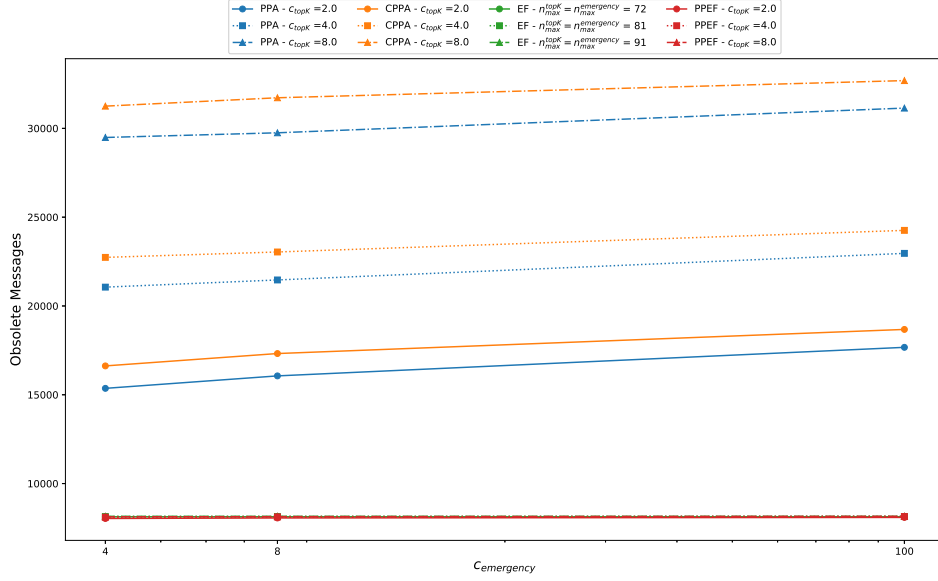
PPEF, ευνοώντας την κλάση normal. Ακόμη, φαίνεται πως οι χαμηλότερες τιμές του $c_{emergency}$ προκαλούν μια μικρή μείωση στον αριθμό των obsolete μηνυμάτων.



Σχήμα Δ'.3: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση normal ανά αλγόριθμο, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.

Το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων, ανεξαρτήτου κλάσης, απεικονίζεται στο Σχήμα Δ'.4. Από αυτό προκύπτει ότι η απόδοση των αλγορίθμων EF και PPEF συμπίπτει απόλυτα, ικανοποιώντας παράλληλα το σύστημα με τον καλύτερο τρόπο. Επιπλέον, προκύπτει εύλογα, πως το σύστημα παρουσιάζει τα περισσότερα obsolete μηνύματα για τις περιπτώσεις με τις υψηλότερες τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} , καθώς σε αυτές παρατηρούνται τα περισσότερα obsolete μηνύματα για την κλάση normal.

Το μέσο waiting time όλων των μηνυμάτων που μεταδίδονται επιτυχώς στο Hub απεικονίζεται στο Σχήμα Δ'.5. Όπως είναι φανερό, η απόδοση όλων των αλγορίθμων ως προς αυτή τη μετρική είναι αρκετά κοινή, με το waiting time να βρίσκεται γύρω στα 2s. Το waiting time για τον PPEF φαίνεται να συμπίπτει με αυτό τον EF, ιδιαίτερα για μεγάλες τιμές του c_{topK} και $c_{emergency}$. Διαφορετική συμπεριφορά φαίνεται να παρουσιάζουν οι PPA και CPPA που φαίνεται να αποδίδουν καλύτερα για χαμηλές τιμές c_{topK} , επιτυγχάνοντας καλύτερο waiting time σε σχέση με τους υπόλοιπους για $c_{topK} = 2$. Ιδιαίτερα ο PPA είναι αναμενόμενο να έχει καλύτερο μέσο waiting time,

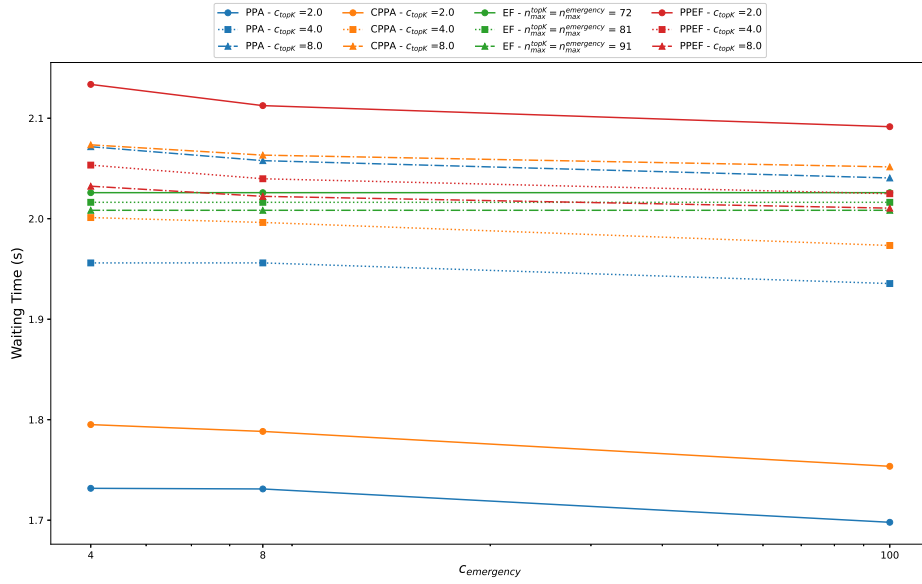


Σχήμα Δ'.4: Το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων για το σύστημα ανά αλγόριθμο, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.

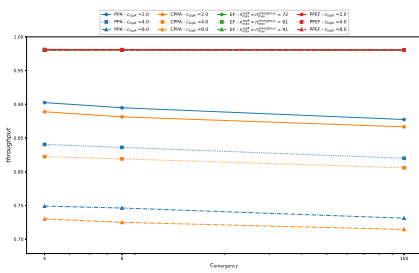
αφού δεν εξυπηρετεί πρώτα τους αισθητήρες κάποιας κλάσης, με αποτέλεσμα να είναι πιο fair στη διάταξη εντός του frame.

Και στο Σχήμα Δ'.6 παρατηρείται μια όμοια συμπεριφορά μεταξύ των αλγορίθμων EF και PPEF, οι οποίοι παρέχουν το υψηλότερο δυνατό throughput, πλησιάζοντας το 100%. Επιπρόσθετα, για υψηλές τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} φαίνεται πως το throughput μειώνεται, κάτι το οποίο οφείλεται στο μηχανισμό ανάθεσης slots των αλγορίθμων PPA και CPPA, ο οποίος υπερεκτιμά τις ανάγκες των αισθητήρων με υψηλό P_i , με αποτέλεσμα κάποια slots να μην αξιοποιούνται. Εξαιτίας του throughput, το ποσοστό των served μηνυμάτων για τους αλγορίθμους EF και PPEF είναι το υψηλότερο, αφού εξυπηρετούν επιτυχώς περισσότερο από το 90% των παραγόμενων μηνυμάτων. Αντίστοιχα, οι αλγόριθμοι PPA και CPPA έχουν υψηλότερο ποσοστό served μηνυμάτων για χαμηλές τιμές του c_{topK} και $c_{emergency}$.

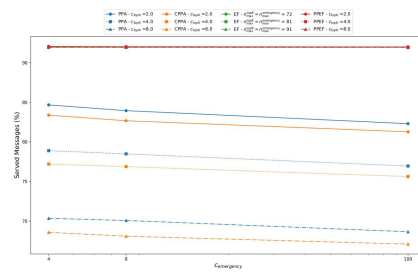
Έχοντας παρουσιάσει τη συμπεριφορά των αλγορίθμων για διαφορετικές τιμές των c_{topK} και $c_{emergency}$, γίνεται μία σύγκριση της συνολικής απόδοσης των αλγορίθμων ως προς το πλήθος των obsolete μηνυμάτων στο Σχήμα Δ'.7, για τις τιμές των παραμέτρων αυτών, όπου παρουσιάζουν τη βέλτιστη συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, οι τιμές



Σχήμα Δ'5: Το μέσο waiting time όλων των μηνυμάτων, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.



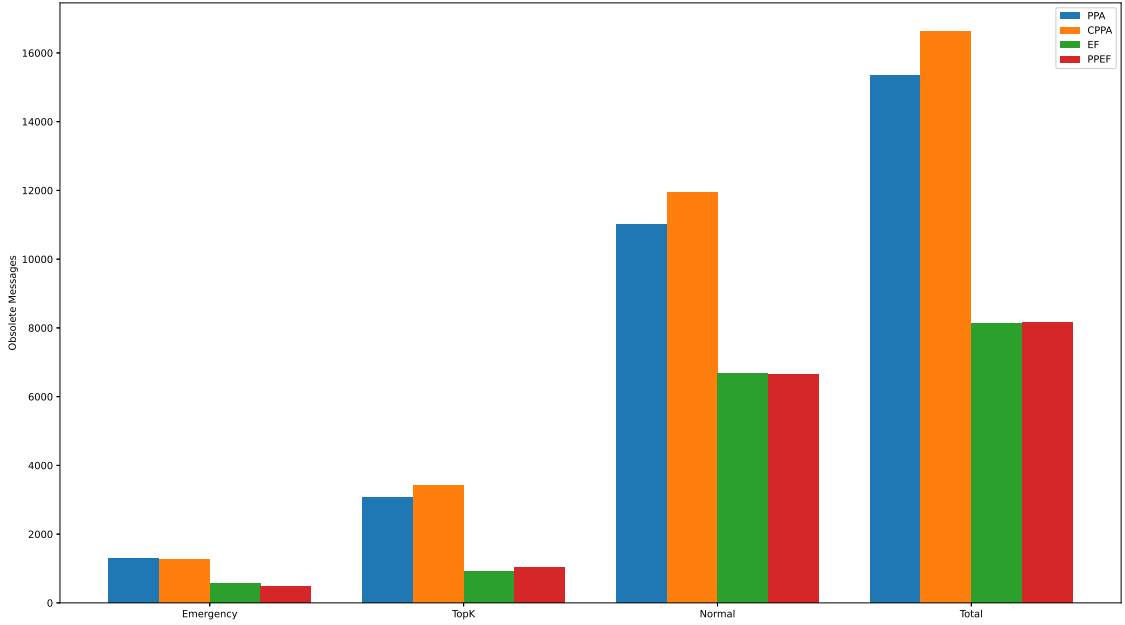
(α)



(β)

Σχήμα Δ'6: Το throughput (α) και το ποσοστό των served μηνυμάτων (β), για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.

των παραμέτρων επιλέγονται με κύριο κριτήριο οι αλγόριθμοι να παρουσιάζουν μία κατάλληλη προτεραιοποίηση μεταξύ των κλάσεων, επιτυγχάνοντας κοντά στο ελάχιστο δυνατό πλήθος obsolete μηνυμάτων. Έτσι, για τους αλγόριθμους PPA και CPPA επιλέγονται οι τιμές $c_{topk} = 2$ και $c_{emergency} = 4$. Για τον PPEF, επιλέγονται οι τιμές $c_{topK} = 8$ και $c_{emergency} = 100$, ενώ για τον EF οι τιμές $n_{max}^{emergency} = n_{max}^{topK} = 82$.

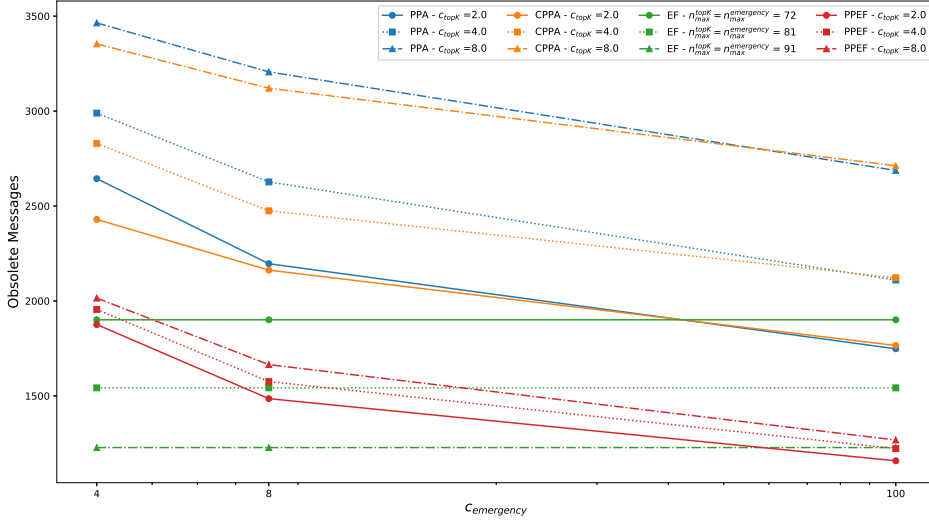


Σχήμα Δ'.7: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για κάθε κλάση και για το σύστημα συνολικά, για το πρώτο σενάριο πειραματισμού.

Όπως είναι εμφανές, οι αλγόριθμοι EF και PPEF παρουσιάζουν μακράν τα λιγότερα obsolete μηνύματα σε όλες τις κλάσεις, ενώ μεταξύ τους παρουσιάζουν μικρές διαφορές στην προτεραιοποίηση των κλάσεων. Για την ακρίβεια, ο PPEF έχει λίγα περισσότερα obsolete μηνύματα στην κλάση topK, ενώ υπερτερεί στις κλάσεις emergency και normal, με το συνολικό πλήθος (Total) να παραμένει ίδιο και στους δύο. Αναφορικά με τον CPPA, αυτός παρουσιάζει λιγότερα obsolete μηνύματα στην κλάση emergency συγκριτικά με τον PPA, αλλά σε όλες τις άλλες περιπτώσεις παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση από όλους τους αλγόριθμους. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο μηχανισμό ανάθεσης slots ο οποίος υπερεκτιμά το πλήθος των slots που χρειάζονται οι διαφορετικές κλάσεις—εξού και η καλύτερη απόδοση στην κλάση emergency— αλλά και το πλήθος των slots που χρειάζονται οι αισθητήρες εντός αυτών.

Δ'.2.2 Δεύτερο Σενάριο Πειραματισμού

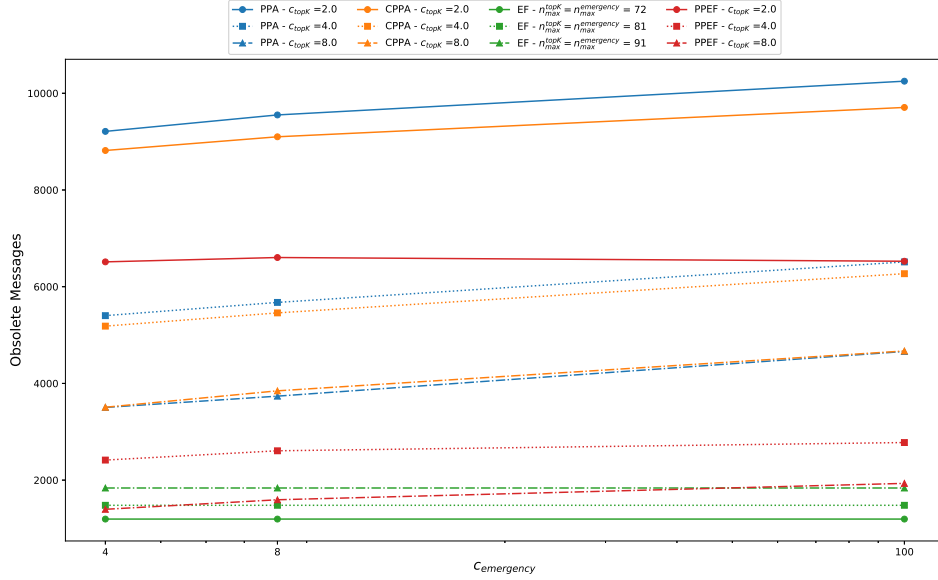
Περνώντας στο δεύτερο σενάριο πειραματισμού και στο Σχήμα Δ'.8, αυτό απεικονίζει το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency ανά αλγόριθμο. Προκύπτει, λοιπόν, πως όσο μεγαλύτερη η τιμή του c_{topK} και όσο μικρότερη η τιμή του $c_{emergency}$, τόσο μεγαλύτερο και το πλήθος των obsolete μηνυμάτων. Επίσης, ομοίως με το Σχήμα Δ'.1 και για την περίπτωση του αλγορίθμου EF, όσο μικρότερη είναι η τιμή του $n_{max}^{emergency}$, τόσο περισσότερα θα είναι και τα obsolete μηνύματα. Ακόμη, φαίνεται πως για μεγάλες τιμές του $c_{emergency}$ και ανεξαρτήτου των τιμών του c_{topK} , οι αλγόριθμοι PPA και CPPA συμπίπτουν.



Σχήμα Δ'.8: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency ανά αλγόριθμο, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.

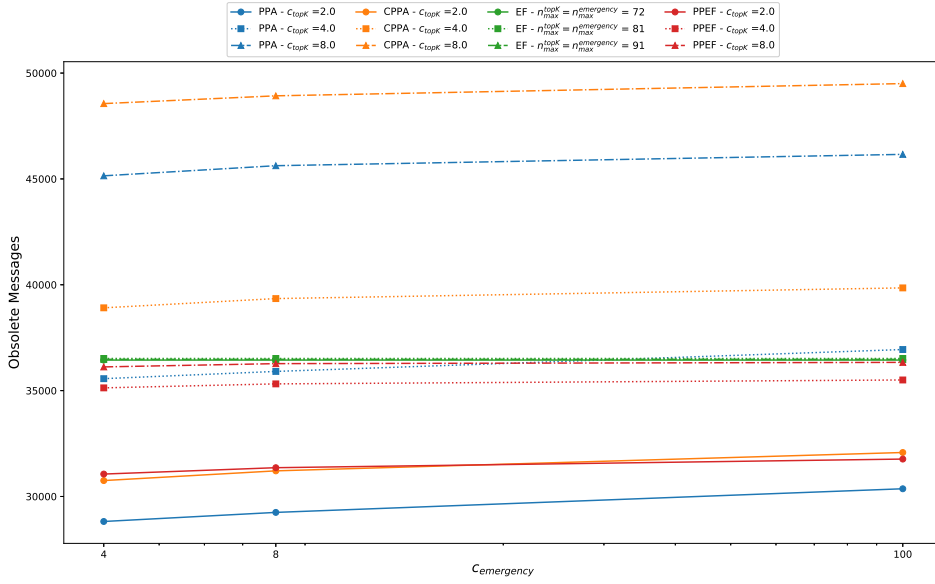
Στο Σχήμα Δ'.9 παρουσιάζονται τα obsolete μηνύματα της κλάσης topK για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού. Όπως είναι εμφανές, η απόδοση των αλγορίθμων PPEF, PPA και CPPA εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του c_{topK} , με τον PPEF να παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση από τους 3 και τον CPPA τη χειρότερη, στις περισσότερες περιπτώσεις. Από την άλλη, ο EF παρουσιάζει μία σχετικά σταθερή απόδοση που μεταβάλλεται βάσει των n_{max}^{topK} και $n_{max}^{emergency}$, έχοντας το μικρότερο πλήθος obsolete πακέτων για $n_{max}^{topK} = n_{max}^{emergency} = 72$, όπως φάνηκε και στο Σχήμα Δ'.2. Συνεπώς,

ο αλγόριθμος EF παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση, εκτός από περιπτώσεις όπου το $c_{topK} > c_{emergency}$ για τον PPEF, που αποτελεί μία κατάσταση μη επιθυμητή, αφού δεν θα δίνεται τόσο μεγάλη προτεραιότητα στην κλάση emergency.



Σχήμα Δ'.9: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση topK ανά αλγόριθμο, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.

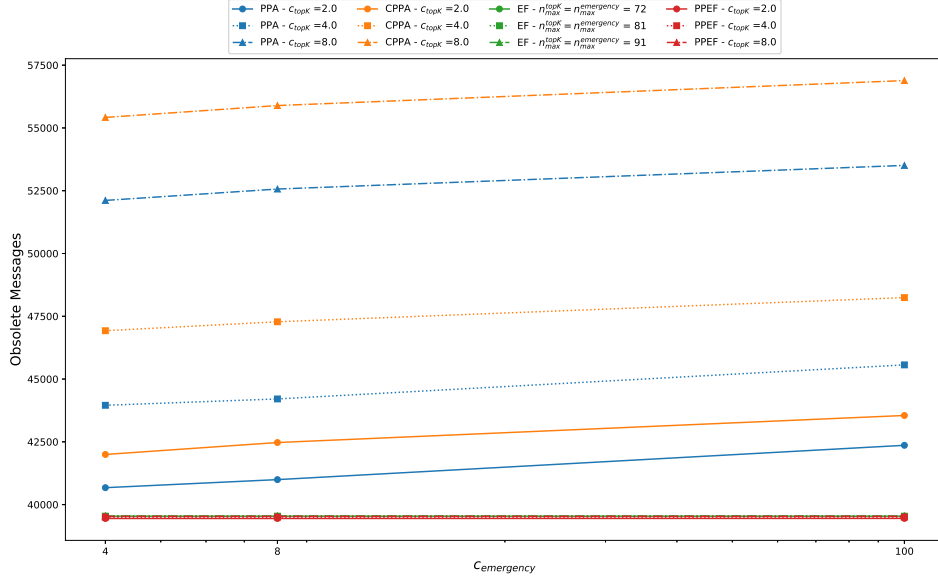
Η κλάση normal με τα αντίστοιχα obsolete μηνύματα απεικονίζεται στο Σχήμα Δ'.10. Για το Σχήμα αυτό αξίζει να αναφερθεί πως την καλύτερη απόδοση παρουσιάζει ο αλγόριθμος PPA, σε αντίθεση με το αντίστοιχο Σχήμα του πρώτου σεναρίου πειραματισμού (βλ. Σχήμα Δ'.3). Υπενθυμίζεται πως ο PPA αναθέτει slots με έναν πιο fair τρόπο σε όλους τους αισθητήρες, μη λαμβάνοντας υπ' όψιν την κλάση τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο συγκεκριμένο σενάριο πειραματισμού έχει αυξηθεί ο ρυθμός παραγωγής των μηνυμάτων και εφόσον δεν δίνεται προτεραιότητα από τον PPA σε κάποια κλάση, αλλά στον αισθητήρα καθ' αυτόν μπορεί να ευνοηθεί η κλάση normal, κάτι που από τους υπόλοιπους αλγορίθμους θα ήταν απίθανο, εφόσον δίνουν μεγαλύτερη προτεραιότητα στην κλάση topK και emergency. Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται, ο αλγόριθμος EF, ο οποίος δεν διαθέτει κάποιον μηχανισμό για να εξασφαλίσει έναν αριθμό από slots που θα δοθεί στις λιγότερο σημαντικές κλάσεις, όπως η normal, για αυτό και έχει μια μέτρια απόδοση.



Σχήμα Δ'.10: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση normal ανά αλγόριθμο, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.

Το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων που προκύπτει αθροιστικά για όλες τις κλάσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα Δ'.11. Σύμφωνα με αυτό, οι αλγόριθμοι EF και PPEF παρουσιάζουν τα λιγότερα obsolete πακέτα, ανεξάρτητα από την επιλογή των παραμέτρων, οι PPA και CPPA έχουν λίγο χειρότερη απόδοση, ιδιαίτερα καθώς αυξάνονται τα $c_{emergency}$ και c_{topK} . Σε αντίθεση με το Σχήμα Δ'.4 του πρώτου σεναρίου, οι διαφορές μεταξύ των αλγορίθμων δεν είναι τόσο μεγάλες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, λόγω του αυξημένου ρυθμού παραγωγής μετρήσεων, ακόμη κι αν ένας αλγόριθμος υπερεκτιμήσει το πλήθος των slots που απαιτούνται, δε θα χαθούν τόσα πολλά slots για τους υπόλοιπους αισθητήρες. Ως αποτέλεσμα, το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων μένει σχετικά σταθερό αλλά διαφέρει η κατανομή τους από κλάση σε κλάση.

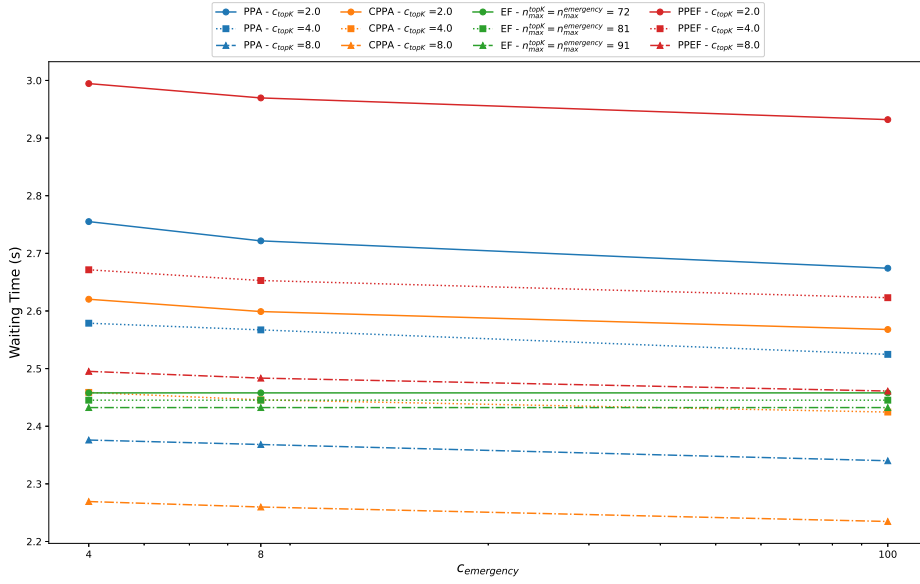
Το μέσο waiting time για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού, το οποίο υπενθυμίζεται πως αφορά μόνο τα served μηνύματα, φαίνεται στο Σχήμα Δ'.12, με τον αλγόριθμο CPPA να απαιτεί το μικρότερο χρόνο για τις υψηλότερες τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} και για την ακρίβεια για $c_{emergency} = 100$ και $c_{topK} = 8$ και τον αλγόριθμο PPA να ακολουθεί με μια πολύ μικρή χρονική απόκλιση για τις ίδιες τιμές. Το γεγονός αυτό,



Σχήμα Δ'.11: Το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων για το σύστημα ανά αλγόριθμο, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.

μπορεί να επεξηγηθεί συνδυάζοντας τα στοιχεία του Σχήματος Δ'.11, όπου για τις συγκεκριμένες τιμές παρατηρούνται τα περισσότερα obsolete μηνύματα. Κατά συνέπεια, οι αλγόριθμοι αυτοί, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, αναθέτουν πολλά slots σε αισθητήρες, τα οποία δεν αξιοποιούνται, αλλά όσους αισθητήρες αποφασίσουν να εξυπηρετήσουν, θα τους εξυπηρετήσουν στο μικρότερο δυνατό χρόνο. Επιπλέον, ο αλγόριθμος PPEF συμπίπτει με τον EF για τις προαναφερόμενες τιμές των $c_{emergency}$ και c_{topK} . Τέλος, για όλους τους αλγορίθμους ο χρόνος κυμαίνεται σε μικρά εύρη και δεν ξεπερνά τα 3s. Αυτά τα εύρη προκύπτουν για κάθε αλγόριθμο ανάλογα με την προτίμηση που δείχνει στις κλάσεις και από το μέσο όρο των time constraints αυτών.

Στο Σχήμα Δ'.13 παρουσιάζεται συνδυαστικά το throughput και το ποσοστό των served μηνυμάτων ανά αλγόριθμο. Όπως είναι αναμενόμενο, οι δύο μετρικές συσχετίζονται έντονα μεταξύ τους και φαίνεται πως κι εδώ οι μόνοι αλγόριθμοι που αξιοποιούν πλήρως τα slots ενός frame είναι οι PPEF και EF. Οι μετρικές αυτές φαίνεται να είναι αντιστρόφως ανάλογες με το πλήθος των obsolete μηνυμάτων. Συνεπώς, η χειρότερη απόδοση των PPA και CPPA αποδίδεται και πάλι στην υπερεκτίμηση των slots που χρειάζονται οι αισθητήρες και οι κλάσεις από τους αλγορίθμους PPA. Σε σχέση με

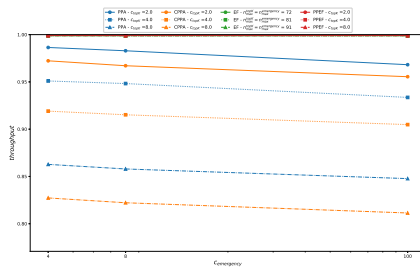


Σχήμα Δ'.12: Το μέσο waiting time για όλες τις κλάσεις του συστήματος, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.

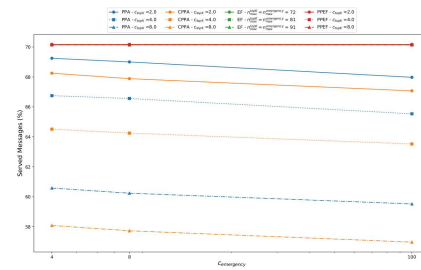
το Σχήμα Δ'.6, το throughput είναι πιο κοντά στο 1, λόγω του αυξημένου ρυθμού παραγωγής μετρήσεων. Συνολικά, φαίνεται πως παρόλο που αυξάνεται σημαντικά το traffic του δικτύου, το σύστημα εξακολουθεί να είναι σε θέση να εξυπηρετήσει περίπου το 70% των παραγόμενων μηνυμάτων.

Έχοντας παρουσιάσει τη συμπεριφορά των αλγορίθμων για διαφορετικές τιμές των C_{topk} και $C_{emergency}$, γίνεται μία σύγκριση της συνολικής απόδοσης των αλγορίθμων ως προς το πλήθος των obsolete μηνυμάτων στο Σχήμα Δ'.14, όπως και στο πρώτο σενάριο. Συγκεκριμένα, οι τιμές των παραμέτρων κάθε αλγορίθμου επιλέγονται με κύριο κριτήριο οι αλγόριθμοι να παρουσιάζουν μία κατάλληλη προτεραιοποίηση μεταξύ των κλάσεων, επιτυγχάνοντας κοντά στο ελάχιστο δυνατό πλήθος obsolete μηνυμάτων. Έτσι, για τον αλγόριθμο PPA επιλέγονται οι τιμές $C_{topk} = 2$ και $C_{emergency} = 8$, ενώ για τον CPPA οι τιμές $C_{topk} = 2$ και $C_{emergency} = 4$. Για τον PPEF, επιλέγονται οι τιμές $C_{topk} = 8$ και $C_{emergency} = 100$, ενώ για τον EF οι τιμές $n_{max}^{emergency} = n_{max}^{topk} = 82$.

Όπως είναι εμφανές, οι αλγόριθμοι με τα λιγότερα obsolete μηνύματα παραμένουν οι EF και PPEF, οι οποίοι έχουν μία όμοια συμπεριφορά με το πρώτο σενάριο. Όμως, η μεγαλύτερη διαφορά που παρουσιάζεται για τις συγκεκριμένες επιλογές των παραμέτρων

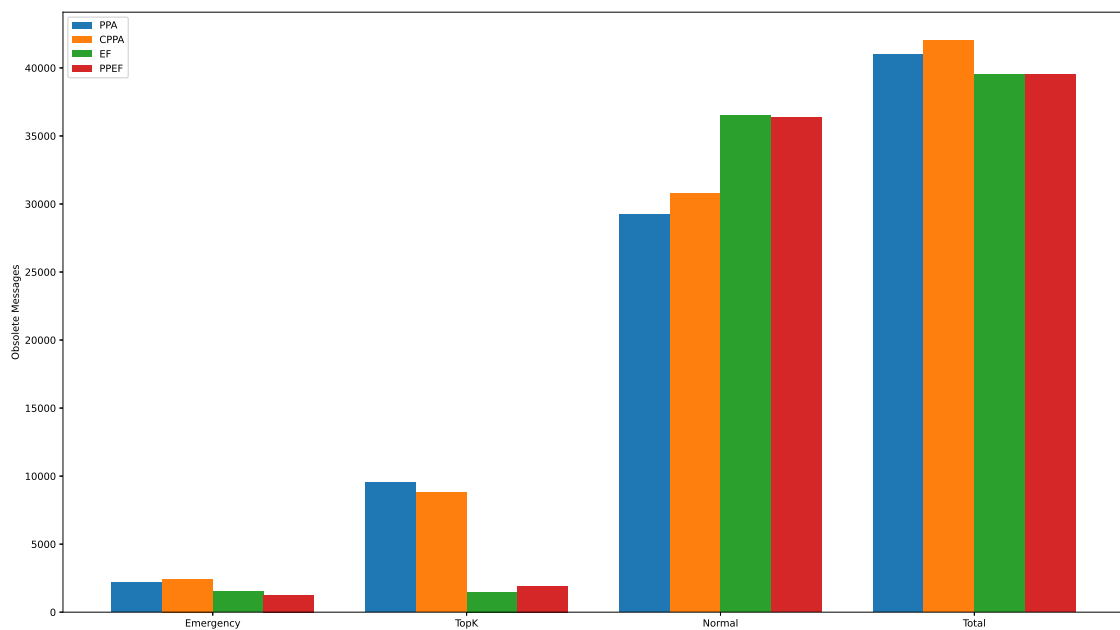


(α)



(β)

Σχήμα Δ'.13: Το throughput (α) και το ποσοστό των served μηνυμάτων (β), για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.



Σχήμα Δ'.14: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για κάθε κλάση και για το σύστημα συνολικά, για το δεύτερο σενάριο πειραματισμού.

των αλγορίθμων είναι πως, για να εξασφαλιστεί η εξυπηρέτηση των σημαντικότερων κλάσεων, οι δύο αυτοί αλγόριθμοι έχουν αρκετά περισσότερα obsolete μηνύματα στην κλάση normal σε σχέση με τους PPA και CPPA. Παρά ταύτα, αξίζει να σημειωθεί πως τόσο EF όσο κι ο PPEF είναι ικανοί να καταναείμουν τα slots στις κλάσεις με έναν πιο ομοιόμορφο τρόπο, αν τεθούν οι κατάλληλες παράμετροι.

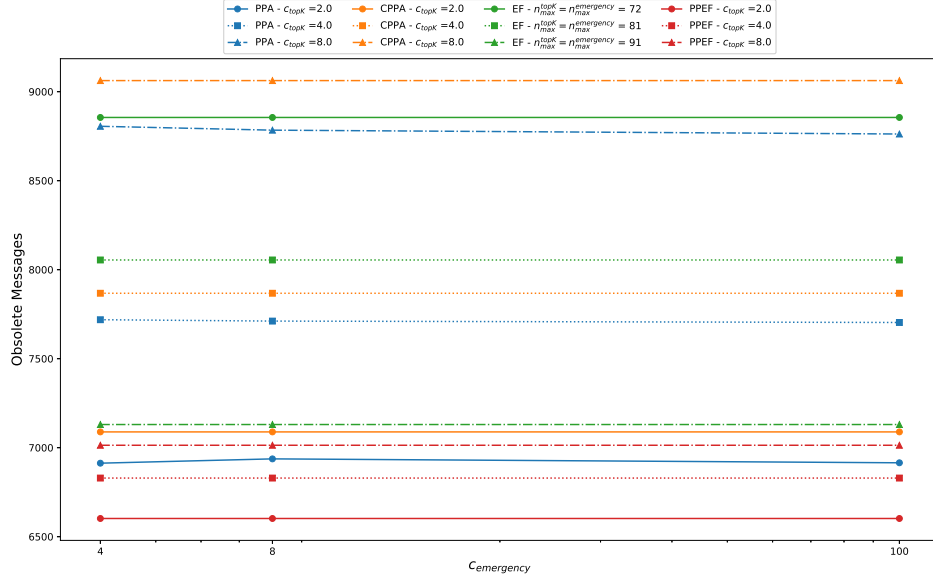
Μία βασική διαφορά, όμως, είναι ότι αν τεθούν αρκετά χαμηλά οι τιμές των $n_{max}^{emergency}$ και n_{max}^{topK} , ώστε ο EF να παραμερίσει αρκετά slots και στους αισθητήρες της κλάσης normal, υπάρχει περίπτωση σε ακραίες περιπτώσεις, όπως αυτές που εξετάζονται στο τρίτο σενάριο πειραματισμού, να μείνουν πολλά slots αχρησιμοποίητα. Σε αντίθεση, ο PPEF μπορεί να επιτύχει μία αρκετά ομοιόμορφη κατανομή των slots στις κλάσεις, χωρίς να υπάρχει ο προαναφερόμενος κίνδυνος, αφού τα μέγιστα επιτρεπτά όρια των κλάσεων καθορίζεται με βάση τα αιτήματα των αισθητήρων του προηγούμενου frame και δεν παραμένουν στατικά, όπως στον EF.

Δ'.2.3 Τρίτο Σενάριο Πειραματισμού

Συνεχίζοντας με το τρίτο και τελευταίο σενάριο πειραματισμού, πρέπει να αποσαφηνιστεί πως ο αλγόριθμος EF για τις σημαντικότερες κλάσεις emergency και topK δεν αποδίδει στο μέγιστο δυνατό, εφόσον η παράμετρος n_{max}^q , $q \in Q$, παίρνει τιμή από την αρχή διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας, η οποία δεν αλλάζει κατά την εκτέλεση αυτής. Έτσι, αν έχει τεθεί εξ αρχής $n_{max}^q < n^{data}$ και όλοι οι αισθητήρες, κατά την εκτέλεση του πειράματος, εισέλθουν στην κλάση emergency, τότε δεν θα ανατεθούν σε αυτούς τα απαραίτητα slots και θα περισσέψει ένας αριθμός εξ αυτών, ο οποίος θα παραμείνει αναξιοποίητος. Κατά συνέπεια, αναμένεται η απόδοση του EF να είναι μέτρια.

Στο Σχήμα Δ'.15 παρουσιάζεται η απόδοση των τεσσάρων αλγορίθμων, αναφορικά με το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency. Από αυτό διακρίνεται πως την καλύτερη απόδοση έχει ο αλγόριθμος PPEF, ιδιαίτερα για τις τιμές του $c_{topK} = 2$ και $c_{topK} = 4$, ενώ η συμπεριφορά για τον αλγόριθμο EF είναι η αναμενόμενη, εκτός από την περίπτωση που το $n_{max}^{emergency} = 91$, δηλαδή παίρνει τη μέγιστη δυνατή τιμή. Στην περίπτωση αυτή, θα έπρεπε ο EF να έχει την καλύτερη απόδοση από όλους, εφόσον αναθέτει όλα τα slots του frame στους αισθητήρες που είναι πιο σημαντικοί και συγκεκριμένα αυτούς που ανήκουν στην κλάση emergency.

Το γεγονός αυτό οφείλεται σε μία λεπτομέρεια υλοποίησης των καταστάσεων ε-

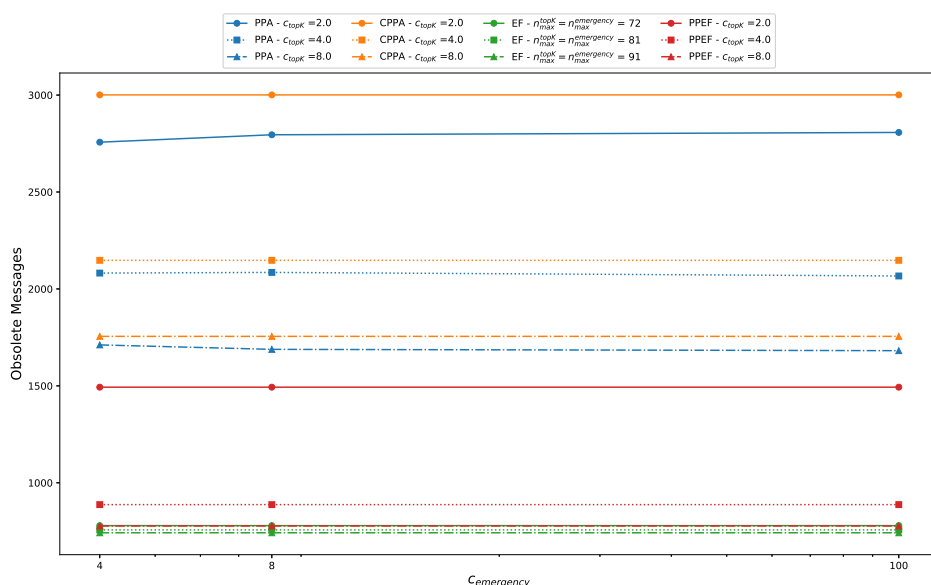


Σχήμα Δ'.15: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση emergency ανά αλγόριθμο, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.

κτάχτου ανάγκης. Για την ακρίβεια, στο σύστημα που υλοποιείται, τη στιγμή που ένας αισθητήρας εισέρχεται σε μία τέτοια κατάσταση, επηρεάζονται άμεσα και όλα τα μηνύματα που βρίσκονται ήδη στον buffer του, δηλαδή μειώνονται άμεσα τα time constraints τους από $t_q^{\text{constraint}}$, όπου q η κλάση τους προτού εισέλθουν στην emergency, σε $t_{\text{emergency}}^{\text{constraint}}$. Όμως, οι αισθητήρες αυτοί δεν έχουν προλάβει ακόμη να ενημερώσουν το Hub με τα νέα τους χαρακτηριστικά, αφού τα λαμβάνουν κατά το beacon slot και θα στείλουν τα νέα τους αιτήματα στα αμέσως επόμενα request slots. Ως αποτέλεσμα, για αυτό το ένα frame αφού ενημερωθούν πως έχουν εισέλθει στην κλάση emergency, τα μηνύματα τους θα θεωρούνται emergency χωρίς, όμως, να έχουν λάβει την αντίστοιχη αντιμετώπιση από το Hub κατά την ανάθεση των slots.

Από τα προαναφερόμενα, προκύπτουν δύο συνέπειες. Πρώτον, μόλις μειωθεί το time constraint ενός αισθητήρα, υπάρχει πιθανότητα κάποια από τα μηνύματα στον buffer του αισθητήρα να θεωρηθούν απευθείας obsolete, καθώς στο χρησιμοποιηθέν σύστημα το time constraint αφορά τον κάθε αισθητήρα κι όχι το κάθε μήνυμα. Η συμπεριφορά αυτή παραμένει ίδια στο σύνολο των αλγορίθμων, αλλά δεν είναι ιδιαίτερα αντιληπτή διαισθητικά. Δεύτερον, για το ένα frame αμέσως μόλις οι αισθητήρες

εισέλθουν σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, σημασία για το πόσα και ποια μηνύματα θα εξυπηρετηθούν έχει η ανάθεση του προηγούμενου frame. Με άλλα λόγια, αν ο αλγόριθμος και οι αντίστοιχες παράμετροι που χρησιμοποιούνται, δε διαχειρίζεται ικανοποιητικά την ανάθεση των slots, όταν δεν υπάρχει κατάσταση εκτάκτου ανάγκης και αφήνει κάποια slots αναξιοποίητα, τότε αναμένεται να διαχειριστεί με τον ίδιο μη ικανοποιητικό τρόπο τα μηνύματα emergency του τρέχοντος frame.

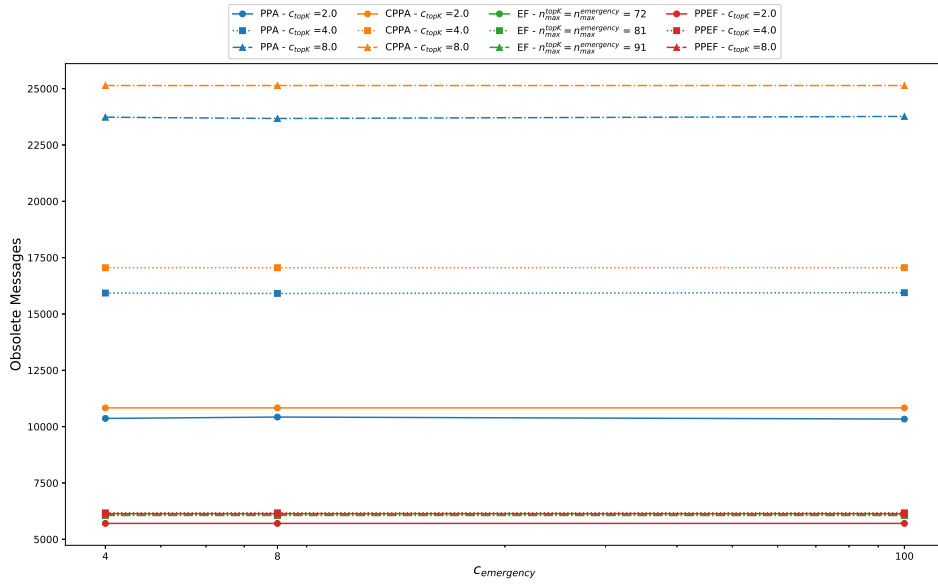


Σχήμα Δ'.16: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση topK ανά αλγόριθμο, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.

Ακόμη, αν ο αλγόριθμος δείχνει προτίμηση σε μηνύματα της κλάσης topK, τα οποία έχουν χαμηλότερα time constraints, τότε τα μηνύματα της κλάσης normal είναι πιο πιθανό να περιμένουν αρκετή ώρα μέχρι να εξυπηρετηθούν, με αποτέλεσμα να λήξουν αυτόματα, μόλις εισέλθουν στην κλάση emergency και μειωθεί το time constraint. Δηλαδή, η προτίμηση στην κλάση topK οδηγεί σε αυξημένη πιθανότητα να λήξουν περισσότερα μηνύματα, μόλις οι αισθητήρες εισέλθουν στην emergency. Με βάση τα προαναφερόμενα, δικαιολογείται και η συμπεριφορά που συναντάται στο Σχήμα Δ'.15, όπου κάποιοι αλγόριθμοι παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση από τον EF για $n_{max}^{emergency} = 91$. Εν τέλει, και για τις υπόλοιπες τιμές του $n_{max}^{emergency}$, όλοι οι αλγόριθμοι αποδίδουν καλύτερα από τον EF, εφόσον ο EF αφήνει αχρησιμοποίητα κάποια από τα παρεχόμενα

slots.

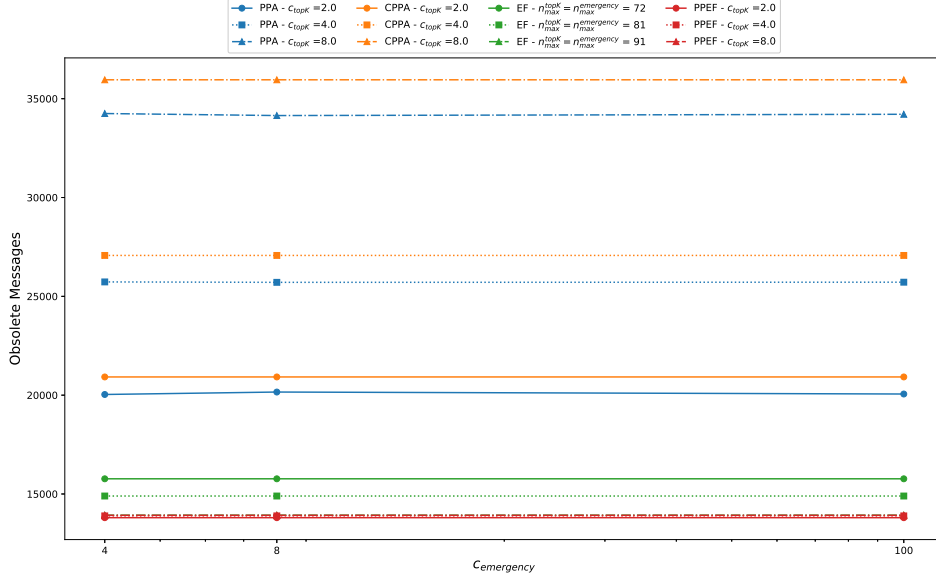
Στο Σχήμα Δ'.16 απεικονίζονται τα obsolete μηνύματα της κλάσης topK, όπου η συμπεριφορά των αλγορίθμων είναι η πλήρως αναμενόμενη. Συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι EF και PPEF επιτυγχάνουν τη χαμηλότερη τιμή των obsolete μηνυμάτων, αφού σε αυτό το σενάριο όλοι οι αισθητήρες εισέρχονται σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης και δεν τίθεται το ζήτημα προτεραιοποίησης με μία τρίτη κλάση. Επομένως, το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση topK δεν επηρεάζεται από το $c_{emergency}$ και η απόδοση των PPA και CPPA εξαρτάται μόνο από το c_{topK} . Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται και στο Σχήμα Δ'.17 για την κλάση normal.



Σχήμα Δ'.17: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για την κλάση normal ανά αλγόριθμο, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.

Αναφορικά με το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα Δ'.18. Σύμφωνα με αυτό, τα λιγότερα obsolete μηνύματα παρουσιάζονται για τον αλγόριθμο PPEF. Εξίσου καλή απόδοση έχει κι ο EF όταν το $n_{max}^{emergency} = 91$, όμως, όπως έγινε φανερό στο δεύτερο σενάριο, αυτή η τιμή της παραμέτρου δεν είναι ιδανική αν απαιτείται μία πιο ομοιόμορφη κατανομή των slots στις διαφορετικές κλάσεις. Συγκριτικά, λοιπόν, με όλες τις υπόλοιπες επιλογές, ο PPEF παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση από όλους, αφού τόσο ο PPA όσο κι ο

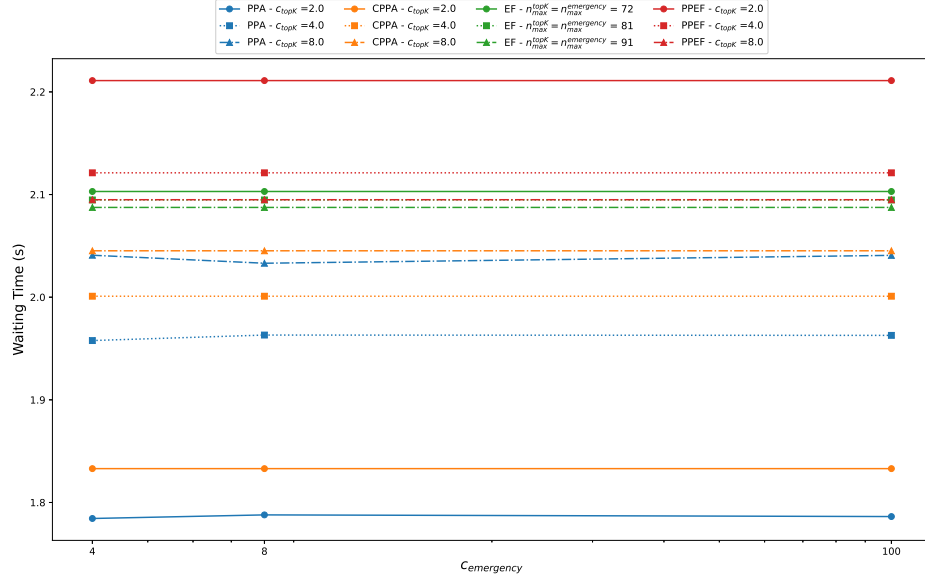
CPPA έχουν αρκετά κακή απόδοση, λόγω αναξιοποίητων slots.



Σχήμα Δ.18: Το συνολικό πλήθος των obsolete μηνυμάτων για το σύστημα ανά αλγόριθμο, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.

Ως προς το μέσο waiting time, όπως αυτό απεικονίζεται το Σχήμα Δ.19, διακρίνεται μια όμοια συμπεριφορά με τα Σχήμα Δ.5, με τους αλγορίθμους PPA και CPPA να κατέχουν το μικρότερο χρόνο, με τη διαφορά ότι η απόδοση των αλγορίθμων διαφέρει χρονικά περισσότερο. Πιο λεπτομερώς, οι PPA και CPPA έχουν την καλύτερη απόδοση για την τιμή $c_{topK} = 2$, για την οποία παρουσιάζουν και τα λιγότερα συνολικά obsolete μηνύματα, σε αντίθεση με το Σχήμα Δ.12.

Το throughput και το ποσοστό των served μηνυμάτων απεικονίζεται συνδυαστικά στο Σχήμα Δ.20. Σύμφωνα με αυτό, το throughput των αλγορίθμων κυμαίνεται περίπου μεταξύ των τιμών 75% και 98%. Οι μόνοι αλγόριθμοι που είναι σε θέση να αξιοποιήσουν όλο το frame, άρα και τα περισσότερα μηνύματα, είναι οι EF και PPEF, ενώ οι PPA και CPPA υστερούν λόγω του μη αποτελεσματικού μηχανισμού ανάθεσης slots. Όπως και στις προηγούμενες μετρικές, η μόνη περίπτωση, στην οποία καταφέρνει ο EF να έχει ίδια απόδοση με τον PPEF, είναι το $n_{max}^{emergency} = 91$, το οποίο, όπως έχει ήδη αναφερθεί πολλαπλώς, δεν είναι ιδανικό για τα υπόλοιπα σενάρια. Έτσι, φαίνεται πως το στοιχείο της δυναμικότητας από frame σε frame που χαρακτηρίζει το

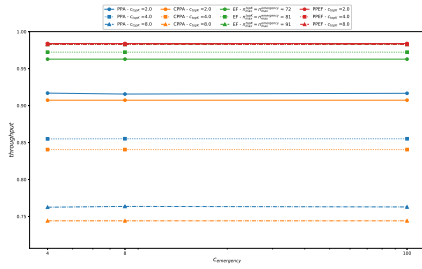


Σχήμα Δ'.19: Το μέσο waiting time για όλες τις κλάσεις του συστήματος, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.

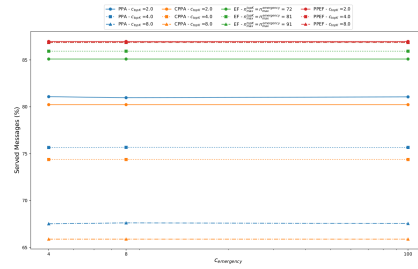
μηχανισμό του PPEF, τον καθιστά κατάλληλο για μεγαλύτερη ποικιλία από πιθανά σενάρια.

Τέλος, παρουσιάζεται και πάλι η συνολική σύγκριση των αλγορίθμων ως προς το πλήθος των obsolete μηνυμάτων. Σε αυτό το σενάριο, οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για κάθε αλγόριθμο επιλέγονται να είναι ίδιες με το πρώτο σενάριο, αφού κι εδώ πρόκειται για το ίδιο ακριβώς ρυθμό παραγωγής μηνυμάτων και η συμπεριφορά των αλγορίθμων είναι όμοια, αν εξαιρέσει κανείς τις καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Έτσι, για τους αλγορίθμους PPA και CPPA επιλέγονται οι τιμές $c_{topk} = 2$ και $c_{emergency} = 4$. Για τον PPEF, επιλέγονται οι τιμές $c_{topk} = 8$ και $c_{emergency} = 100$, ενώ για τον EF οι τιμές $n_{max}^{emergency} = n_{max}^{topk} = 82$.

Από το Σχήμα Δ'.21, όπου παρουσιάζεται η συνολική σύγκριση, είναι εμφανές πως ο EF παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση στην κλάση emergency, αφού αξιοποιεί μόνο το 90% του frame, λόγω του $n_{max}^{emergency}$, το οποίο είναι κοινό με τα προηγούμενα σενάρια. Σε αντίθεση, χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους σε όλα τα σενάρια, ο PPEF αποδίδει ικανοποιητικότερα από όλους τους αλγορίθμους, ανεξάρτητα από την κλάση. Οι αλγόριθμοι PPA και CPPA, από την άλλη, αποδίδουν αρκετά καλά στην

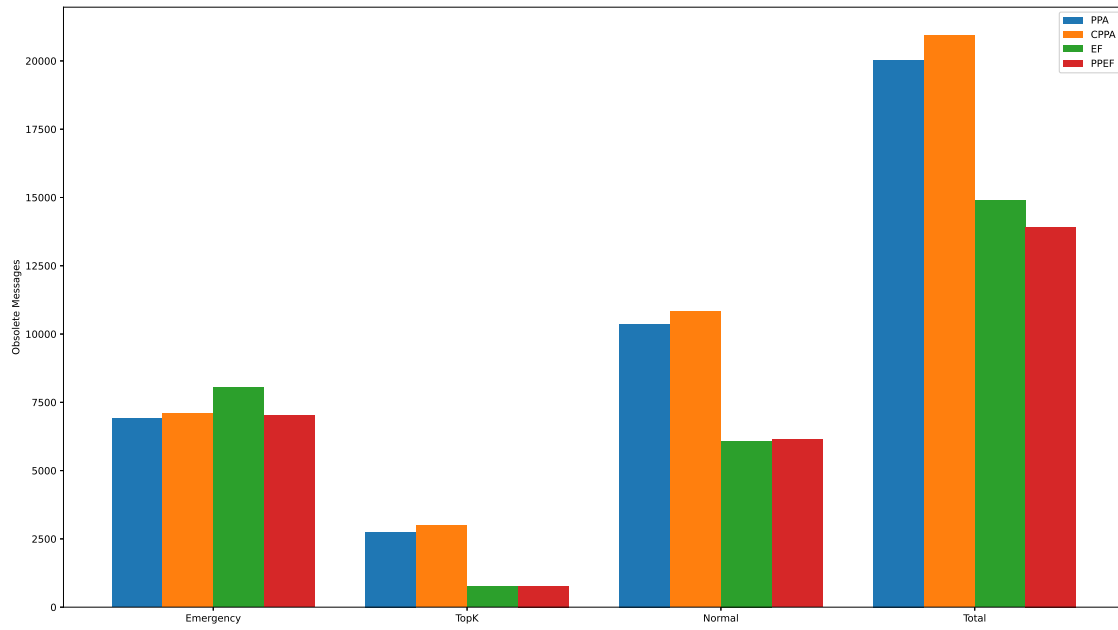


(α)



(β)

Σχήμα Δ'.20: Το throughput (α) και το ποσοστό των served μηνυμάτων (β), για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.



Σχήμα Δ'.21: Το πλήθος των obsolete μηνυμάτων για κάθε κλάση και για το σύστημα συνολικά, για το τρίτο σενάριο πειραματισμού.

κλάση emergency, όμως υστερούν και πάλι στις υπόλοιπες, λόγω του υψηλού αριθμού αναξιοποίητων slots.

Δ'.3 Συμπεράσματα Αξιολόγησης

Βάσει της συμπεριφοράς και των αποτελεσμάτων που καταγράφονται στα τρία σενάρια πειραματισμού, είναι δυνατό να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή των αλγορίθμων και τη σύγκριση της απόδοσής τους.

Ξεκινώντας με τον PPA, παρατηρείται πως σε όλα τα σενάρια παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο της υπερεκτίμησης των slots που χρειάζεται στην πραγματικότητα κάθε κλάση. Αυτό αποδίδεται κυρίως στις διαφορές μεταξύ της προτεραιότητας P_i των αισθητήρων, αφού φαίνεται πως, σε όλα τα σενάρια, η απόδοση του PPA αυξάνεται, καθώς οι παράμετροι c_{topK} και $c_{emergency}$ πλησιάζουν την τιμή 1. Αυτό, άλλωστε, είναι λογικό, αφού, σύμφωνα με την Εξίσωση (Γ'.2) αν ένας αισθητήρας έχει διπλάσια προτεραιότητα από έναν άλλον, αλλά ίδιο ρυθμό παραγωγής πακέτων και ίδιο πλήθος μηνυμάτων στον buffer του, τότε θα του ανατεθούν τα διπλάσια slots, ενώ υπάρχει η ίδια ανάγκη ως προς τα slots για τις μεταδόσεις τους. Συνεπώς, κρίνεται πως ο μηχανισμός του PPA δεν αρκεί μόνος του για τις ανάγκες του συστήματος, αφού για να ταιριάζει η ανάθεση των slots με τις ανάγκες των αισθητήρων, δεν θα πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η προτεραιότητα κάθε αισθητήρα, με αποτέλεσμα να μην παρέχεται κάποιος μηχανισμός για την προτεραιοποίηση των αισθητήρων ή των κλάσεων.

Κατ' επέκταση, ο αλγόριθμος CPPA επίσης αντιμετωπίζει το ίδιο πρόβλημα κατά την ανάθεση των slots τόσο στους αισθητήρες όσο και στις κλάσεις. Μάλιστα, φαίνεται πως στις περισσότερες περιπτώσεις, ο εν λόγω αλγόριθμος παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση όλων. Αν και θα ήταν αναμενόμενο να αποδίδει καλύτερα στις σημαντικές κλάσεις, στην πράξη φαίνεται πως λόγω των c_{topK} και $c_{emergency}$ υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των προτεραιοτήτων των αισθητήρων εντός της κλάσης. Έτσι, υπολείπονται πολλά αναξιοποίητα slots, αφού δεν είναι αποδοτικός ο μηχανισμός πρόβλεψης των slots ούτε για τις κλάσεις, αλλά ούτε για τους αισθητήρες. Ωστόσο, ίσως αυτό θα μπορούσε εν μέρει να επιλυθεί για τους αισθητήρες εντός της κλάσης αν δεν λαμβανόταν υπ' όψιν η προτεραιότητά τους εντός κάθε κλάσης, ώστε ο μηχανισμός πρόβλεψης να συνυπολογίζει μόνο τα χαρακτηριστικά του traffic. Με αυτόν τον τρόπο, η προτεραιότητα θα χρησιμοποιούνταν μόνο για την προτεραιοποίηση των κλάσεων.

Εν αντιθέσει, ο αλγόριθμος EF φαίνεται να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην

ανάθεση των slots, αφού δε λαμβάνει υπ' όψιν την προτεραιότητα κάθε αισθητήρα, αλλά μόνο τον προβλεπόμενο αριθμό μηνυμάτων στο επόμενο frame. Επίσης, η απλότητά του κατά την υλοποίηση είναι ένα ιδιαίτερα χρήσιμο χαρακτηριστικό σε ένα τόσο σύνθετο περιβάλλον, συνεισφέροντας στην κατανόηση της συμπεριφοράς του traffic του συστήματος. Το κυριότερο ελάττωμα του EF είναι η απουσία κάποιου μηχανισμού fairness, όπως φάνηκε αρκετά έντονα στο δεύτερο σενάριο πειραματισμού. Ακόμη, η ανάγκη για στατική παραμετροποίηση των μέγιστων επιτρεπτών ορίων των slots n_{max}^q , $q \in Q$, κάθε κλάσης, δεν αποτελεί επιθυμητό χαρακτηριστικό για ένα δυναμικό περιβάλλον, όπως είναι τα WBANs, κάτι που επηρέασε ιδιαίτερα την απόδοσή του στο τρίτο σενάριο πειραματισμού. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί πως η παραμετροποίηση των n_{max}^q είναι και ο μόνος τρόπος να τεθεί εφικτός ένας βαθμός fairness κατά τη διαχείριση των διαφορετικών κλάσεων, που καθιστά τη στατική παραμετροποίηση μία ακόμη λιγότερο ρεαλιστική επιλογή.

Φθάνοντας, τελικά, στον PPEF, ο εν λόγω αλγόριθμος φαίνεται να αποδίδει αντίστοιχα με τον EF στις περισσότερες των περιπτώσεων. Το σημαντικότερο του προτέρημα, πέρα από τη σταθερά υψηλή του απόδοση, είναι ότι κατάφερε να προσαρμοστεί σε όλα τα σενάρια με τις ίδιες ακριβώς παραμέτρους. Η δυναμικότητα αυτή είναι ένα αξιόλογο χαρακτηριστικό, όμως στην πράξη η συμπεριφορά του ίσως φανεί ανεξέλεγκτη, αν το σύστημα βρεθεί σε απροσδόκητες καταστάσεις. Ως προς την παραμετροποίηση, οι τιμές των παραμέτρων c_{topK} και $c_{emergency}$ δε φάνηκε να επηρεάζουν σημαντικά τη συνολική του απόδοση, αλλά είχαν αντίκτυπο στην προτεραιοποίηση μεταξύ των κλάσεων. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως, στην πράξη, ακόμη κι αν η παραμετροποίησή του δε γίνει στην εντέλεια, η απόδοσή του αλγορίθμου δε θα υποβαθμιστεί σημαντικά και οι κατάλληλες τιμές των παραμέτρων μπορούν να εντοπιστούν κατά τη λειτουργία του συστήματος. Ακόμη, από τον πειραματισμό φαίνεται πως για να υπάρχει η επιθυμητή προτεραιοποίηση, θα πρέπει να ισχύει γενικά πως $\mathbb{P}_{emergency} > \mathbb{P}_{topK} > \mathbb{P}_{normal}$, ενώ οι ακριβείς τιμές των παραμέτρων θα καθορίσουν το βαθμό προτίμησης κάθε κλάσης.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα με βάση τα παραπάνω είναι πως η προτεραιότητα κάθε αισθητήρα δε θα έπρεπε να διαδραματίζει τόσο σημαντικό ρόλο κατά την ανάθεση των slots σε αυτόν. Δεδομένου ότι οι αλγόριθμοι EF και PPEF αφήνουν λιγότερα αναξιοποίητα slots στο frame, χρησιμοποιώντας μόνο το $\hat{L}_i$, θα μπορούσε να τροποποιηθεί η Εξίσωση (Γ'.2) ως εξής

$$B_i(f) = \frac{\hat{L}_i}{\sum_{j \in S} \hat{L}_j} n^{data}, \quad i \in S, f \in F.$$

Πιθανώς έτσι η ανάθεση των slots να είναι εξίσου αποδοτική με αυτή των EF και PPEF, παρέχοντας ταυτόχρονα μία πιο δίκαιη κατανομή των slots μεταξύ των αισθητήρων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου το traffic δεν είναι τόσο υψηλό. Ο μηχανισμός αυτός θα μπορούσε να αξιοποιηθεί κι από τους τέσσερις αλγορίθμους που μελετώνται, επιφέροντας, πιθανώς, αύξηση στην απόδοση.

Κεφάλαιο Ε΄

Σύνοψη και Συμπεράσματα

ΤΑ WBANs αποτελούν ένα τεχνολογικό επίτευγμα, το οποίο αναμένεται να προκαλέσει μια δραματική αλλαγή στη διαχείριση της υγείας ενός ατόμου και στον τρόπο σκέψης και δράσης του. Μάλιστα, η αλλαγή αυτή χαρακτηρίζεται ως παρόμοια με αυτή που έχει επιφέρει το Διαδίκτυο στην καθημερινότητα και συγκεκριμένα στην ανθρώπινη επικοινωνία και την διαδικασία αναζήτησης πληροφοριών [51].

Πιο λεπτομερώς, αποσκοπούν στην ανάπτυξη ενός έξυπνου και οικονομικού συστήματος υγείας, καθώς μπορούν να αποτελέσουν μέρος μιας διαγνωστικής διαδικασίας, της συντήρησης μιας χρόνιας κατάστασης, μιας εποπτευόμενης ανάρρωσης από χειρουργική επέμβαση και μπορούν να αντεπεξέλθουν στη διαχείριση επειγόντων συμβάντων. Επιπλέον, τα WBANs παρέχουν μακροχρόνια παρακολούθηση της υγείας ενός ασθενούς χωρίς κανένα περιορισμό στις κανονικές του δραστηριότητες.

Στο σύνολό τους, τα WBANs παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες. Οι αισθητήρες που τα συντελούν είναι ποικίλοι και ανιχνεύουν δεδομένα για ζωτικές ενδείξεις και φυσιολογικές παραμέτρους, τα οποία παραμένουν αντιπροσωπευτικά για την υγεία εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος. Ωστόσο κάποια εξ αυτών των δεδομένων έχουν μεγαλύτερη σημασία για την υγεία του ατόμου, με αποτέλεσμα να τίθεται το ζήτημα της προτεραιοποίησης μεταξύ των δεδομένων. Παράλληλα, σε περιπτώσεις που οι τιμές των δεδομένων ξεπερνούν κάποια επιτρεπτά όρια, που έχουν οριστεί από τους ειδικούς της υγείας, το άτομο τίθεται σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης.

Μια σημαντική, λοιπόν, πρόκληση είναι η διαχείριση και ανταπόκριση σε αυτές τις ιδιαιτερότητες, καθώς και η εξασφάλιση υψηλού QoS, αφού πρωτίστως εξασφαλιστεί η

επιτυχία μετάδοσης των δεδομένων, με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου χρονοπρογραμματισμού με δεδομένη μία TDMA προσέγγιση. Για την ανάπτυξη και την αξιολόγηση ενός τέτοιου αλγορίθμου, είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός κατάλληλου συστήματος.

Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα που συνάδει με τα χαρακτηριστικά και τις ιδιαιτερότητες ενός WBAN. Πιο αναλυτικά, για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων χρησιμοποιήθηκε μία δομή frame που είναι παρόμοια με το beacon-enabled mode του πρωτοκόλλου IEEE 802.15.4, ενώ η τοπολογία που μελετήθηκε είναι η τοπολογία αστέρα. Με σκοπό την προτεραιοποίηση των κόμβων, αξιοποιήθηκε η λογική των DiffServ, τα οποία επιτρέπουν την ταξινόμηση του traffic σε διαφορετικές κλάσεις και προσφέρουν μηχανισμούς για την παροχή QoS σε καθεμία από αυτές.

Με κύριο σκοπό την εξυπηρέτηση των κόμβων με την υψηλότερη προτεραιότητα και κατά κόρον την επιτυχή και έγκαιρη μετάδοση των δεδομένων τους, προτάθηκαν δύο αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού, ο CPPA και ο PPEF, οι οποίοι προέκυψαν, συνδυάζοντας στοιχεία από άλλες προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας. Συγκεκριμένα, συνδυάζουν το μηχανισμό προτεραιοποίησης των διαφορετικών κλάσεων που διαθέτει ο EF και την οριοθέτηση του μέγιστου επιτρεπτού πλήθους των slots κάθε κλάσης, προσαρμόζοντας το μηχανισμό που αξιοποιεί ο PPA.

Οι τέσσερις προαναφερόμενοι αλγόριθμοι αξιολογήθηκαν πειραματικά στο περιβάλλον προσομοίωσης OMNeT++ σε τρία διαφορετικά σενάρια, τα οποία διαφέρουν ως προς τα χαρακτηριστικά του traffic. Οι μετρικές βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση σχετίζονται με το QoS και συμπεριλαμβάνουν το throughput του συστήματος, το waiting time των μηνυμάτων, το πλήθος των obsolete μηνυμάτων, κ.ά.

Σύμφωνα με την αξιολόγηση, ο αλγόριθμος PPEF φάνηκε να ξεχωρίζει, αντιμετωπίζοντας τα μειονεκτήματα των υπολοίπων, αφού φάνηκε να προτεραιοποιεί σε ικανοποιητικό βαθμό τα μηνύματα κάθε κλάσης, χωρίς να αγνοούνται πλήρως τα μηνύματα των λιγότερο σημαντικών κλάσεων, όπως το EF. Ταυτόχρονα, έγινε φανερό ότι δεν αφήνει αναξιοποίητα slots λόγω υπερεκτίμησης των αναγκών των αισθητήρων, κάτι που παρουσιάστηκε έντονα στους αλγορίθμους PPA και CPPA. Ακόμη, ο αλγόριθμος PPEF φάνηκε να μην είναι τόσο ευαίσθητος κατά την παραμετροποίηση, αφού φάνηκε πως μπορεί να προσαρμοστεί και στα τρία διαφορετικά σενάρια με τις ίδιες παραμέτρους, επιτυγχάνοντας την καλύτερη απόδοση στην πλειονότητα των μετρικών. Επιπλέον, φάνηκε να ανταποκρίνεται σε πιο δυναμικά σενάρια και συγκεκριμένα όταν

όλοι οι αισθητήρες κρίνεται πως πρέπει να εισέλθουν σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης. Σε αντίθεση, σε τέτοιες περιπτώσεις, ο EF δεν παρείχε βέλτιστη απόδοση, χρησιμοποιώντας τον ίδιο συνδυασμό παραμέτρων που απέδιδαν στα υπόλοιπα σενάρια.

Αναφορικά με την παραμετροποίηση, ο πειραματισμός έδειξε πως ο αλγόριθμος PPEF αποδίδει καλύτερα όταν $\mathbb{P}_{emergency} > \mathbb{P}_{topK} > \mathbb{P}_{normal}$. Όταν οι τιμές των παραμέτρων ικανοποιούν αυτή τη σχέση, ο μηχανισμός οριοθέτησης των μέγιστων επιτρεπτών slots ανά κλάση θυμίζει αυτόν του EF, εφόσον επιτρέπεται σε κάθε κλάση να αξιοποιήσει όλο το frame, δηλαδή $n_{max}^q = N, \forall q \in Q$. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα όρια αυτά επαναπροσδιορίζονται σε κάθε frame με βάση τις ανάγκες του δικτύου, κάτι που δεν είναι εφικτό στον EF, ο PPEF παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία σε απότομες μεταβολές της κατανομής του traffic στις διαφορετικές κλάσεις. Οι αλγόριθμοι PPA και CPPA, από την άλλη, φάνηκαν να επηρεάζονται σημαντικά από τις μεγάλες διαφορές προτεραιοτήτων μεταξύ τόσο των αισθητήρων όσο και των κλάσεων, με αποτέλεσμα να αφήνουν αναξιοποίητα slots και να μειώνεται το throughput του συστήματος.

Χάρη στον εκτενή πειραματισμό που πραγματοποιήθηκε, προέκυψε τροφή για σκέψη σχετικά με μελλοντικές κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα, φάνηκε πως ο μηχανισμός ανάθεσης των slots μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω, με μία πιθανή κατεύθυνση την προσαρμογή του μηχανισμού του PPA, ώστε να μη λαμβάνει υπ' όψιν την προτεραιότητα των αισθητήρων. Ακόμη, διάφορα τμήματα του χρησιμοποιηθέντος συστήματος θεωρούνται δεδομένα, όπως η ανάθεση προτεραιοτήτων στους αισθητήρες, για τα οποία μπορούν να διερευνηθούν αυτοματοποιημένες κι ευφυείς λύσεις που να συνάδουν με τις ανάγκες του περιβάλλοντος και να παρέχουν τις απαραίτητες συνθήκες λειτουργίας.

Βιβλιογραφία

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] L. Selavo, A. Wood, Q. Cao, T. Sookoor, H. Liu, A. Srinivasan, Y. Wu, W. Kang, J. Stankovic, D. Young, *et al.*, “Luster: wireless sensor network for environmental research,” in *Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 103–116, 2007.
- [3] M. P. Đurišić, Z. Tafa, G. Dimić, and V. Milutinović, “A survey of military applications of wireless sensor networks,” in *2012 Mediterranean conference on embedded computing (MECO)*, pp. 196–199, IEEE, 2012.
- [4] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, and I. Robla, “A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends,” *sensors*, vol. 9, no. 6, pp. 4728–4750, 2009.
- [5] T. J. Dishongh and M. McGrath, *Wireless sensor networks for healthcare applications*. Artech House, 2010.
- [6] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, “Wireless body area networks: A survey,” *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1658–1686, 2014.
- [7] A. Rajput and T. Brahim, “Characterizing iomt/personal area networks landscape,” *arXiv preprint arXiv:1902.00675*, 2019.
- [8] T. Hayajneh, G. Almashaqbeh, S. Ullah, and A. V. Vasilakos, “A survey of wireless technologies coexistence in wban: analysis and open research issues,” *Wireless Networks*, vol. 20, no. 8, pp. 2165–2199, 2014.

- [9] B. Latré, B. Braem, I. Moerman, C. Blondia, and P. Demeester, “A survey on wireless body area networks,” *Wireless networks*, vol. 17, no. 1, pp. 1–18, 2011.
- [10] N. Yessad, M. Omar, A. Tari, and A. Bouabdallah, “Qos-based routing in wireless body area networks: A survey and taxonomy,” *Computing*, vol. 100, no. 3, pp. 245–275, 2018.
- [11] D. D. Olatinwo, A. M. Abu-Mahfouz, and G. P. Hancke, “Towards achieving efficient mac protocols for wban-enabled iot technology: a review,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2021, no. 1, pp. 1–47, 2021.
- [12] S. Ullah, B. Shen, S. Riazul Islam, P. Khan, S. Saleem, and K. Sup Kwak, “A study of mac protocols for wbans,” *Sensors*, vol. 10, no. 1, pp. 128–145, 2010.
- [13] M. A. Hanson, H. C. Powell Jr, A. T. Barth, K. Ringgenberg, B. H. Calhoun, J. H. Aylor, and J. Lach, “Body area sensor networks: Challenges and opportunities,” *Computer*, vol. 42, no. 1, pp. 58–65, 2009.
- [14] J. Liu, M. Li, B. Yuan, and W. Liu, “A novel energy efficient mac protocol for wireless body area network,” *China Communications*, vol. 12, no. 2, pp. 11–20, 2015.
- [15] J. Xing and Y. Zhu, “A survey on body area network,” in *2009 5th international conference on wireless communications, networking and mobile computing*, pp. 1–4, IEEE, 2009.
- [16] D. Lewis, “802.15. 6 call for applications in body area networksresponse summary,” ,” *15-08-0407-05-0006*, 2008.
- [17] N. de Vicq, F. Robert, J. Penders, B. Gyselinckx, and T. Torfs, “Wireless body area network for sleep staging,” in *2007 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, pp. 163–166, IEEE, 2007.
- [18] S. Ullah, H. Higgins, B. Braem, B. Latre, C. Blondia, I. Moerman, S. Saleem, Z. Rahman, and K. S. Kwak, “A comprehensive survey of wireless body area networks,” *Journal of medical systems*, vol. 36, no. 3, pp. 1065–1094, 2012.

- [19] M. Anwar, A. H. Abdullah, K. N. Qureshi, and A. H. Majid, "Wireless body area networks for healthcare applications: An overview," *Telkomnika*, vol. 15, no. 3, pp. 1088–1095, 2017.
- [20] A. Rahim, N. Javaid, M. Aslam, Z. Rahman, U. Qasim, and Z. A. Khan, "A comprehensive survey of mac protocols for wireless body area networks," in *2012 Seventh International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*, pp. 434–439, IEEE, 2012.
- [21] C. Buratti and R. Verdone, "Performance analysis of ieee 802.15. 4 non beacon-enabled mode," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 7, pp. 3480–3493, 2009.
- [22] C. Li, H.-B. Li, and R. Kohno, "Performance evaluation of ieee 802.15. 4 for wireless body area network (wban)," in *2009 IEEE International conference on communications workshops*, pp. 1–5, IEEE, 2009.
- [23] N. F. Timmons and W. G. Scanlon, "Analysis of the performance of ieee 802.15. 4 for medical sensor body area networking," in *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004.*, pp. 16–24, IEEE, 2004.
- [24] N. F. Timmons and W. G. Scanlon, "An adaptive energy efficient mac protocol for the medical body area network," in *2009 1st international conference on wireless communication, vehicular technology, information theory and aerospace & electronic systems technology*, pp. 587–593, IEEE, 2009.
- [25] K.-S. Kwak, S. Ullah, D.-H. Kwak, C.-H. Lee, and H.-S. Lee, "A power-efficient mac protocol for wban," *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, vol. 8, no. 6, pp. 131–140, 2009.
- [26] S. Ullah, H. Higgins, S. R. Islam, P. Khan, and K. S. Kwak, "On phy and mac performance in body sensor networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2009, pp. 1–7, 2009.
- [27] Y. Zhang and G. Dolmans, "A new priority-guaranteed mac protocol for emerging body area networks," in *2009 Fifth International Conference on Wireless and Mobile Communications*, pp. 140–145, IEEE, 2009.

- [28] G. Fang and E. Dutkiewicz, "Bodymac: Energy efficient tdma-based mac protocol for wireless body area networks," in *2009 9th international symposium on communications and information technology*, pp. 1455–1459, IEEE, 2009.
- [29] K. Cho, Z. Jin, and J. Cho, "Design and implementation of a single radio multi-channel mac protocol on ieee 802.15. 4 for wban," in *Proceedings of the 8th international conference on ubiquitous information management and communication*, pp. 1–8, 2014.
- [30] K. A. Ali, J. H. Sarker, and H. T. Mouftah, "Urgency-based mac protocol for wireless sensor body area networks," in *2010 IEEE international conference on communications workshops*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [31] J. S. Choi and J. G. Kim, "An improved mac protocol for wban through modified frame structure," *Int. j. smart home*, vol. 8, no. 2, p. 65, 2014.
- [32] H. Li and J. Tan, "Heartbeat-driven medium-access control for body sensor networks," *IEEE transactions on information technology in biomedicine*, vol. 14, no. 1, pp. 44–51, 2009.
- [33] E. Georgakakis, S. A. Nikolidakis, D. D. Vergados, and C. Douligeris, "An analysis of bluetooth, zigbee and bluetooth low energy and their use in wbans," in *International Conference on Wireless Mobile Communication and Healthcare*, pp. 168–175, Springer, 2010.
- [34] K. S. Kwak, S. Ullah, and N. Ullah, "An overview of ieee 802.15. 6 standard," in *2010 3rd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies (ISABEL 2010)*, pp. 1–6, IEEE, 2010.
- [35] N. Bradai, L. C. Fourati, and L. Kamoun, "Investigation and performance analysis of mac protocols for wban networks," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 46, pp. 362–373, 2014.
- [36] M. M. Alam and E. B. Hamida, "Surveying wearable human assistive technology for life and safety critical applications: Standards, challenges and opportunities," *Sensors*, vol. 14, no. 5, pp. 9153–9209, 2014.

- [37] M. Salayma, A. Al-Dubai, I. Romdhani, and Y. Nasser, "Reliability and energy efficiency enhancement for emergency-aware wireless body area networks (wbans)," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 2, no. 3, pp. 804–816, 2018.
- [38] N. Bradai, E. Charfi, L. C. Fourati, and L. Kamoun, "Priority consideration in inter-wban data scheduling and aggregation for monitoring systems," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 27, no. 4, pp. 589–600, 2016.
- [39] T. ElBatt and B. Ryu, "Priority-based dynamic packet reservation for tdma wireless networks," in *2001 MILCOM Proceedings Communications for Network-Centric Operations: Creating the Information Force (Cat. No. 01CH37277)*, vol. 2, pp. 833–837, IEEE, 2001.
- [40] A. Varga, "Omnet++," in *Modeling and tools for network simulation*, pp. 35–59, Springer, 2010.
- [41] S. Wang and J.-T. Park, "Modeling and analysis of multi-type failures in wireless body area networks with semi-markov model," *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 6–8, 2009.
- [42] R. C. Shah and M. Yarvis, "Characteristics of on-body 802.15. 4 networks," in *2006 2nd IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks*, pp. 138–139, IEEE, 2006.
- [43] M. Sukor, S. Ariffin, N. Fisal, S. S. Yusof, and A. Abdallah, "Performance study of wireless body area network in medical environment," in *2008 Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS)*, pp. 202–206, IEEE, 2008.
- [44] A. Natarajan, M. Motani, B. de Silva, K.-K. Yap, and K. C. Chua, "Investigating network architectures for body sensor networks," in *Proceedings of the 1st ACM SIGMOBILE international workshop on Systems and networking support for healthcare and assisted living environments*, pp. 19–24, 2007.
- [45] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, "An architecture for differentiated services," 1998.

- [46] K. Kilkki, *Differentiated services for the Internet*. Macmillan Publishing Co., Inc., 1999.
- [47] C. LIN, Z.-G. Shan, L.-J. Sheng, and J.-P. Wu, “Differentiated services in the internet: a survey,” *CHINESE JOURNAL OF COMPUTERS-CHINESE EDITION*-, vol. 23, no. 4, pp. 419–433, 2000.
- [48] R. V. Rasmussen and M. A. Trick, “Round robin scheduling—a survey,” *European Journal of Operational Research*, vol. 188, no. 3, pp. 617–636, 2008.
- [49] A. Demers, S. Keshav, and S. Shenker, “Analysis and simulation of a fair queueing algorithm,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 19, no. 4, pp. 1–12, 1989.
- [50] L. L. Peterson and B. S. Davie, *Computer networks: a systems approach*. Elsevier, 2007.
- [51] C. Otto, A. Milenkovic, C. Sanders, and E. Jovanov, “System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring,” *Journal of mobile multimedia*, vol. 1, no. 4, pp. 307–326, 2006.

Παραρτήματα

Γλωσσάρι Ξενικών Όρων

Wireless Sensor Network	Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων
Internet of Things	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
Internet of Medical Things	Διαδίκτυο των Ιατρικών Πραγμάτων
Wireless Body Area Network	Ασύρματο Δίκτυο Περιοχής Σώματος
Medium Access Control	Έλεγχος Πρόσβασης στο Μέσο
Traffic Delay	Κυκλοφορία σε ένα δίκτυο Καθυστέρηση
Throughput	Ρυθμαπόδοση
Collision	Σύγκρουση
Quality of Service	Ποιότητα της Υπηρεσίας
Wearable	Φορετός
Coordinator	Συντονιστής
Frame	Πλαίσιο
Superframe	Υπερπλαίσιο
Personal Device	Προσωπική Συσκευή

Control	Κανάλι Ελέγχου
Channel	
Emergency Situation	Κατάσταση Εκτάκτου Ανάγκης
Rate	Ρυθμός
Time Constraint	Χρονικός Περιορισμός
Obsolete	Λήξαν
Buffer	Μνήμη
Waiting Time	Χρόνος Αναμονής
Served	Επιτυχώς Εξυπηρετημένο
Fairness	Δικαιοσύνη

Συμβολισμοί Μεγεθών

G	Ο γράφος που αναπαριστά ένα δίκτυο WBAN
V	Το σύνολο όλων των κόμβων ενός δικτύου WBAN
E	Το σύνολο των ζεύξεων ενός δικτύου WBAN
S	Το σύνολο των αισθητήρων ενός δικτύου WBAN
r_i	Ο ρυθμός παραγωγής μηνυμάτων ενός αισθητήρα $i \in S$
L_i	Το σύνολο των μηνυμάτων εντός του buffer ενός αισθητήρα $i \in S$
P_i	Η προτεραιότητα ενός αισθητήρα $i \in S$
R	Ο συνολικός ρυθμός παραγωγής δεδομένων των αισθητήρων του δικτύου
L	Το σύνολο όλων των μηνυμάτων που βρίσκονται εντός των buffers των αισθητήρων του δικτύου
$t^{creation}$	Η χρονική στιγμή κατά την οποία παράγεται ένα μήνυμα
$t_i^{constraint}$	Ο χρονικός περιορισμός ενός αισθητήρα $i \in S$, ο οποίος, συνδυαστικά με το $t^{creation}$, προσδιορίζει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ένα μήνυμα δεν θεωρείται λήξαν
F	Το σύνολο των TDMA frames κατά τη λειτουργία του συστήματος
N	Το πλήθος των slots εντός ενός frame
n^{req}	Το πλήθος των request slots εντός ενός frame
n^{data}	Το πλήθος των data slots εντός ενός frame
T	Η συνολική διάρκεια ενός TDMA frame
t^{beacon}	Η διάρκεια ενός beacon slot
t^{req}	Η διάρκεια ενός request slot
t^{data}	Η διάρκεια ενός data slot
B_i	Το πλήθος των data slots ενός frame που ανατίθεται στον αισθητήρα $i \in S$
$\hat{L}_i$	Το προβλεπόμενο πλήθος των μηνυμάτων εντός του buffer ενός αισθητήρα $i \in S$ για το επόμενο frame

n^{max_delay}	Το μέγιστο πλήθος των slots για τα οποία θα περιμένει ένας αισθητήρας αν υπάρξει σύγκρουση σε ένα request slot
$throughput^{max}$	Το μέγιστο throughput εντός ενός frame που εκφράζει το μέγιστο πλήθος μεταδόσεων n^{data} προς τη διάρκεια T του frame
Q	Το σύνολο των κλάσεων στις οποίες κατανέμεται το traffic και συμπεριλαμβάνει τις κλάσεις <i>normal</i> , <i>topK</i> και <i>emergency</i>
$\mathbb{L}_q$	Το συνολικό πλήθος των μηνυμάτων των αισθητήρων που κατατάσσονται στην κλάση $q \in Q$ εντός του buffer τους
$\mathbb{P}_q$	Η μέση προτεραιότητα των αισθητήρων που κατατάσσονται στην κλάση $q \in Q$
$\hat{\mathbb{L}}_q$	Το συνολικό πλήθος των μηνυμάτων που προβλέπεται να έχουν οι αισθητήρες που κατατάσσονται στην κλάση $q \in Q$ εντός του buffer τους στο επόμενο frame
C_{topK}	Η σταθερά με την οποία πολλαπλασιάζεται η προτεραιότητα των αισθητήρων που κατατάσσονται στην κλάση <i>topK</i>
$C_{emergency}$	Η σταθερά με την οποία πολλαπλασιάζεται η προτεραιότητα των αισθητήρων που κατατάσσονται στην κλάση <i>emergency</i>
$t_q^{constraint}$	Το time constraint των αισθητήρων που κατατάσσονται στην κλάση $q \in Q$
n_{max}^q	Το μέγιστο επιτρεπτό πλήθος των slots που μπορούν να ανατεθούν σε μία κλάση $q \in Q$ σε ένα frame
$\mathbb{B}_q(f)$	Το πλήθος των slots που ανατίθενται στην κλάση $q \in Q$ σε ένα frame $f \in F$
$C(i)$	Συνάρτηση που επιστρέφει την $q \in Q$ στην οποία κατατάσσεται ένας αισθητήρας $i \in S$
Δ_q	Το πλήθος των slots που έχουν υπερεκτιμηθεί για την κλάση $q \in Q$ σε ένα frame
$p_{emergency}$	Η πιθανότητα ένας αισθητήρας να καταταχθεί στην κλάση <i>emergency</i> σε περίπτωση κατάστασης εκτάκτου ανάγκης
$\mathcal{F}_{emergency}$	Η συχνότητα με την οποία προκύπτει μία κατάσταση εκτάκτου ανάγκης κατά τον πειραματισμό
$\mathcal{T}_{emergency}$	Η διάρκεια μίας κατάστασης εκτάκτου ανάγκης κατά τον πειραματισμό

Συντομογραφίες

WSN	Wireless Sensor Network
IoT	Internet of Things
IoMT	Internet of Medical Things
WBAN	Wireless Body Area Network
MAC	Medium Access Control
QoS	Quality of Service
TDMA	Time-Division Multiple Access
DiffServ	Differentiated Services
PPA	Prioritized Proportional Allocation
CPPA	Class-based Prioritized Proportional Allocation
EF	Expedited Forwarding
PPEF	Proportionally Prioritized Expedited Forwarding
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
GPS	Global Positioning System
CAP	Contention Access Period
CFP	Contention Free Period
PD	Personal Device
EEG	Electroencephalography
ECG	Electrocardiogram
PHB	Per Hop Behavior

Ευρετήριο

- Beacon Mode, 17
- Beacon, 22
- Class-based Prioritized Proportional Allocation, 11
- Collisions, 3
- Contention Access Period, 7
- Contention Free Period, 7
- Data Slot, 22
- Differentiated Services, 10, 18
- Expedited Forwarding, 10, 19
- Fairness, 10
- Frame, 20
- Hub, 16
- IEEE 802.15.4, 6
- Internet of Medical Things, 1
- Internet of Things, 1
- Intra-WBAN Επικοινωνία, 17
- Medium Access Control, 2, 3
- OMNeT++, 41
- Obsolete, 24
- Obsolete Μήνυμα, 41
- Per Hop Behavior, 18
- Prioritized Proportional Allocation, 11
- Proportionally Prioritized Expedited Forwarding, 11
- Quality of Service, 6
- Request Slot, 22
- Served Μήνυμα, 41
- Slots, 20
- Time Constraints, 3
- Time-Division Multiple Access, 3
- Waiting Time, 41
- Wireless Body Area Network, 1, 9
- Wireless Sensor Network, 1
- throughput, 41
- Κατάσταση Εκτάκτου Ανάγκης, 4, 10
- Κλάση Emergency, 27
- Κλάση Normal, 27
- Κλάση TopK, 27
- Προτεραιοποίηση, 4, 10
- Προτεραιότητα, 10
- Τοπολογία Αστέρα, 16
- Χρονικοί Περιορισμοί, 4, 10
- Χρονοπρογραμματισμός, 10, 20