

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τμήμα Πληροφορικής



Πτυχιακή Εργασία

Υλοποίηση Αλγορίθμων Εκτίμησης Δομικής Υγείας
Με Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων

Κωνσταντίνος Μπέζας Π2013026

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Κωνσταντίνος Οικονόμου

22/05/2019

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Δημήτριος Τσουμάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Μιχαήλ Στεφανιδάκης, Επίκουρος Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Περίληψη

Οι τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων δεκαετιών και πιο συγκεκριμένα η συρρίκνωση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας των υπολογιστικών μηχανών αλλά και οι ασύρματες τεχνολογίες που ολοένα και αυξάνουν οι δυνατότητές τους, επέτρεψαν την ανάπτυξη των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων ή . Οι εφαρμογές αυτών των συστημάτων ποικίλουν δεδομένου ότι η ευελιξία τους δίνει τη δυνατότητα χρήσης πολλαπλών αισθητήρων που καταγράφουν περιβαλλοντικές παραμέτρους. Η παρούσα διατριβή εστιάζει στην ανάπτυξη ενός συστήματος βασισμένου σε τεχνολογίες WSN, το οποίο σκοπό του έχει την Παρακολούθηση και ή ιστορικών κτηρίων.

Η εκτίμηση της μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πολλαπλών αισθητήρων και τη σύγκριση μετρήσεων που αφορούν στις παλμικές δονήσεις του κτηρίου. Τα πρώτα συστήματα παρακολούθησης της χρησιμοποιούσαν τεχνολογίες βασισμένες σε καλωδίωση. Δηλαδή, η ανάπτυξη ενός ενσύρματου συστήματος είχε ως προαπαιτούμενο την εγκατάσταση καλωδιακής υποδομής μέσω της οποίας συνδέονταν και επικοινωνούσαν οι διαφορετικοί κόμβοι που αποτελούσαν ένα δίκτυο. Επίσης, η καλωδιακή υποδομή κάλυπτε τις ενεργειακές ανάγκες όλων των κόμβων. Οι εργασίες εγκατάστασης και συντήρησης όπως και τα υλικά που απαιτούνται για ένα ενσύρματο δίκτυο αισθητήρων, ανεβάζουν το κόστος σε χρήμα και χρόνο. Επίσης, προβάλλονται υψηλά επίπεδα επικινδυνότητας για την ακεραιότητα των κτηρίων.

Η αρχιτεκτονική των ενσύρματων δικτύων αισθητήρων σαφώς και δεν είναι η βέλτιστη λύση, ιδιαίτερα για ιστορικά κτήρια τα οποία έχουν εκτεθεί στην φθορά του χρόνου. Για την παρούσα διατριβή αναπτύχθηκε ένα σύστημα βασισμένο στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Τα θετικά των συστημάτων αυτών είναι τα εξής: 1) οι κόμβοι βασίζονται για τις ενεργειακές τους ανάγκες σε μπαταρίες· 2) οι επικοινωνίες των κόμβων γίνεται με τη χρήση ασύρματων μεταδόσεων και έτσι εξαλείφεται η ανάγκη χρήσης καλωδιακής υποδομής· και 3) οι εργασίες εγκατάστασης δεν είναι απαιτητικές. Γενικότερα, τα συστήματα ασύρματων δικτύων αισθητήρων παρέχουν περισσότερη ευελιξία προβάλλουν

όμως ένα νέο ζήτημα προς επίλυση, αυτό του συγχρονισμού των μετρήσεων.

Το ζήτημα του συγχρονισμού προκύπτει από την ασύγχρονη εγκατάσταση και ενεργοποίηση των διαφορετικών κόμβων του δικτύου. Στην περίπτωση που οι κόμβοι του δικτύου λάμβαναν μετρήσεις κατά την ενεργοποίησή τους το αποτέλεσμα θα ήταν χρονικά ασυσχέτιστες τιμές και κανένας τρόπος συσχέτισής τους και εξαγωγή συμπερασμάτων. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια διαδικασία συγχρονισμού η οποία έχει προδιαγραφές για λειτουργία σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων με διάμετρο μεγαλύτερη του ενός. Η διαδικασία βασίζεται για τη μετάδοση των απαραίτητων πληροφοριών, σε διαδικασία πλημμυρίδας ή Flooding με τη χρήση Broadcast μεταδόσεων.

Τα πειράματα που διεξήχθησαν είναι τρία σε αριθμό και χρησιμοποιήθηκε στατική τοπολογία με τέσσερις κόμβους που αποτελούσαν το ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Το πρώτο έχει ως σκοπό την εκτίμηση της απόδοσης της διαδικασίας συγχρονισμού. Αξιοποιεί λειτουργίες διακοπής εκτέλεσης κώδικα ή Interrupt και τα αποτελέσματά του έδειξαν πως η διαδικασία συγχρονισμού έχει την ικανότητα να συγχρονίσει τους απομακρυσμένους κόμβους με ακρίβεια που κυμαίνεται μεταξύ τεσσάρων και 5012 microsecond.

Παρ όλη τη διαδικασία του συγχρονισμού είναι αδύνατο οι κόμβοι να συμβαδίζουν απόλυτα όσο περνάει ο χρόνος. Έτσι, το δεύτερο πείραμα κάνει μια εκτίμηση της απόκλισης των ρολογιών των κόμβων. Για το παρόν πείραμα έγινε η κατάλληλη παραμετροποίηση στο δίκτυο ώστε οι κόμβοι με τη χρήση αισθητήρων να μετρούν ελεγχόμενα γεγονότα κρούσης και να συνδέουν τα γεγονότα αυτά με ένα κοινό ρολόι που έλαβαν από τον συγχρονισμό. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν ότι όντως τα ρολόγια αποκλίνουν έπειτα από λίγη ώρα. Για την ακρίβεια η μεγαλύτερη χρονική απόκλιση μεταξύ δύο κόμβων κατά το τελευταίο γεγονός κρούσης είναι 290 millisecond.

Στο τελευταίο πείραμα γίνεται χρήση των εσωτερικών γεγονότων του συστήματος, Interrupts. Σκοπό του έχει την εκτίμηση της απόκλισης των ρολογιών με τη χρήση διαφορετικής προσέγγισης από το δεύτερο πείραμα. Η διάρκεια του πειράματος ήταν μικρότερη από το προηγούμενο (12 λεπτά έναντι 110 λεπτά) όμως η μέγιστη απόκλιση των ρολογιών μεταξύ δύο κόμβων ήταν αρκετά μεγαλύτερη αναλογικά, 177 milliseconds. Ενώ οι κόμβοι παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά, δηλαδή είχαν απόκλιση στην καταμέτρηση του χρόνου, η απόκλιση στο παρόν πείραμα συνέβη πολύ γρηγορότερα.

Abstract

Technological advances in the latest decades, especially the development of the microprocessor and the continuous advance in wireless technologies, have opened way for the development of (WSNs). These systems offer the ability to employ a variety of sensors that can measure environmental conditions, make decisions and derive results based on the collected information. The main focus of the current study is the development of a system based on the WSN technology that has the ability to Monitor and Evaluate the of historical buildings.

(SHM) can be achieved by using multiple sensors connected in a common network, that collect information related to the structure's ambient vibrations and compare them in order to determine its condition. This process can provide information related to recent changes made on the materials that comprise the structure. The first systems that employed a sensory network for the purpose of SHM, required a cabling infrastructure that connected all nodes in a common network that was used to transfer information between the different nodes. This means that the deployment of such a network requires works and materials that up the cost for the final system. These works pose a threat to the structure's integrity especially if it is a historical building that has been exposed to the wear of time.

Using a wired sensor network architecture for SHM in historical building does not seem to be the ideal solution. The system developed for the current study uses the architecture. The nodes that comprise these networks do not require any cables to communicate with each other and they are usually powered by batteries. These factors lower the required cost compared to a wired sensor network. Also, minimal works are required for the node installation process effectively making these systems a safe solution for monitoring the of historical buildings. Despite the benefits these systems have to offer, there are some drawbacks they have, the main one being the node .

The issue comes from the asynchronous installation works of the different nodes of the network. The of a WSN is a crucial process for collecting timely correlated data, otherwise the system would provide inaccurate information and there would no way to accurately predict the structure's health. The process developed for the current thesis relies on well known processes such as flooding using broadcast transmissions to transfer the required information to all nodes of the network. It is a two phase process and three experiments were conducted in order to determine its effectiveness.

Due to differences in the construction of the different nodes, the time measurement rates differ creating deviations in between them. The experiments conducted aim to evaluate both the effectiveness and the show time deviations created after some time had passed since the took place. The first experiment aims to evaluate the performance of the process. It uses code execution Interrupt events in order to measure the time upon the event. Before each interrupt took place the network was synchronized. The results showed a performance that ranged between 4 and 5012 microseconds.

The second experiment aims to evaluate the amount of time the clocks remained synchronized. For this experiment external percussion events were executed on equal distances from all nodes placed on a common surface. The measurements are time stamped. The results showed that the clocks deviated after a certain amount of time. More precisely the biggest deviation between two nodes after about 110 minutes passed since the was 290 milliseconds.

The third and final experiment the software interrupt events were used. The network was only synchronized once at the beginning of the experiment and interrupt events took place periodically. The experiment lasted for twelve (12) minutes but the deviations accumulated over time were much more rapid compared to the previous experiment that lasted for 110 minutes. The largest deviation between two nodes of the network was 177 milliseconds.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Οικονόμου καθώς οι συμβουλές και η καθοδήγηση που μου παρείχε όπως και η υπομονή που έδειξε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου εργασίας με βοήθησαν να την φέρω εις πέρας επιτυχώς.

Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε η συμβολή του Επίκουρου καθηγητή κ. Βασιλείου Κομιανού στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη του συστήματος της παρούσας διατριβής. Επίσης σημαντική υπήρξε η συμβολή του κ. Γεωργίου Τσουμάνη στην αρχική ανάπτυξη του συστήματος καθώς με την υπομονή που τον διακρίνει μου έμαθε τα αρχικά στάδια προγραμματισμού της πλατφόρμας Arduino. Τέλος καίριας σημασίας για το αποτέλεσμα της παρούσας διατριβής υπήρξε η συμβολή του κ. Γεωργίου Κουφουδάκη ο οποίος βοήθησε στην έρευνα και την ανάπτυξη του αλγορίθμου συγχρονισμού.

Κατά τη διάρκεια της χρονιάς που αναπτύχθηκε η παρούσα διατριβή μου δόθηκε η ευκαιρία να συνδεθώ με εξαιρετικούς συνεργάτες και συμφοιτητές με την συμβολή των οποίων κατάφερα να βελτιώσω το αποτέλεσμα της πτυχιακής μου εργασίας. Πιο συγκεκριμένα αναφέρομαι στα παρόντα άτομα τα οποία ευχαριστώ ιδιαιτέρως για την στήριξή τους: Αλέξανδρος Ζερβόπουλος, Αστέριος Παπαμιχαήλ, Αικατερίνη Γεωργία Αλβανού, Σπυρίδωνας Βέργης, Ανδρεάνα Στυλλίδου και Ευγενία Δημητρίου.

Τελειώνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς και την οικογένειά οι οποίοι με τους κόπους και τις θυσίες τους με στήριζαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου και πολλά περισσότερα πριν από αυτές.

Η εργασία στηρίχθηκε εν μέρει από το έργο Έπιλοτικό Σύστημα Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων Συγχρονισμένης Παρακολούθησης Κλιματολογικών και Εδαφολογικών Παραμέτρων σε Ελαιώνες το οποίο υλοποιείται στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ 2014-2020 Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ίονια Νησιά 2014-2020.

Περιεχόμενα

A´	Εισαγωγή	1
A´.1	Βιβλιογραφική Έρευνα	3
A´.2	Αποτελέσματα και Συνεισφορά	4
A´.3	Δομή Διατριβής	5
B´	Περιγραφή Συστήματος - Υλικό	6
B´.1	Πλατφόρμα Arduino	7
B´.2	Κεραία XBee-Pro S2C	9
B´.2.1	Λογισμικό Λειτουργίας	10
B´.2.2	Λειτουργίες Δικτύωσης Κεραίας	12
B´.2.3	Πρωτόκολλα Σειριακής Διεπαφής	14
B´.2.4	Συνοδευτικό Λογισμικό - Digi XCTU	16
B´.3	Accelerometer - MPU-6050	17
B´.4	Δευτερεύοντα εξαρτήματα	19
Γ´	Περιγραφή συστήματος - Λογισμικό	22
Γ´.1	Εργαλεία Ανάπτυξης	23
Γ´.2	Ενέργειες Αρχικοποίησης Δικτύου	24
Γ´.3	Συγχρονισμός WSN και συλλογή δεδομένων	26
Δ´	Πειράματα και Αποτελέσματα	30
Δ´.1	Πείραμα Α': Καταμέτρηση Απόδοσης Συγχρονισμού Ρολογιών	31
Δ´.2	Πείραμα Β': Καταμέτρηση Ελεγχόμενων Γεγονότων Κρούσης	35
Δ´.3	Πείραμα Γ': Καταμέτρηση της Χρονικής Απόκλισης με Interrupt	37

Περιεχόμενα	vii
Ε' Σύνοψη και Συμπεράσματα	41
Βιβλιογραφία	42
Παραρτήματα	48
Πίνακας Δημοσιεύσεων	49
Γλωσσάρι Ξενικών Όρων	50
Συντομογραφίες	51
Ευρετήριο	52

Κατάλογος Σχημάτων

B'.1 Το τελικό σύστημα συναρμολογημένο.	7
B'.2 Η πλατφόρμα Arduino Mega.	8
B'.3 Η κεραία XBee-Pro S2C.	10
B'.4 Arduino Wireless SD Shield.	11
B'.5 Ενδεικτική οθόνη του συνοδοευτικού λογισμικού XCTU.	17
B'.6 Το επιταχυνσιόμετρο MPU-6050.	18
B'.7 Ο δευτερεύον εξοπλισμός. Οι λαμπτήρες και το κουμπί για τον έλεγχο του συστήματος και το breadboard όπου συνδέονται.	20
Γ'.1 Το προγραμματιστικό περιβάλλον του Visual Studio Code.	24
Γ'.2 Η συλλογή δεδομένων από το WSN πριν και μετά τον συγχρονισμό. . .	27
Γ'.3 Η γραφική αναπαράσταση της τοπολογίας του δικτύου για το παράδειγμα του σχήματος Γ'.2.	27
Γ'.4 Η διαδικασία συγχρονισμού του WSN και η εκκίνηση συλλογής δεδομένων.	28
Δ'.1 Η τοπολογία που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων. . . .	31
Δ'.2 Τα πρώτα έξι (6) γεγονότα μετά τον συγχρονισμό του WSN.	36
Δ'.3 Τα πρώτα έξι (6) τελευταία γεγονότα του πειράματος.	37
Δ'.4 Ο υπολογισμός του χρόνου από τους κόμβους με τη χρήση των Interrupts. .	38

Κατάλογος Πινάκων

<i>Δ'.1 Πέντε κύκλοι συγχρονισμού με τις μικρότερες αποκλίσεις ρολογιών. . .</i>	<i>33</i>
<i>Δ'.2 Πέντε κύκλοι συγχρονισμού με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις ρολογιών. .</i>	<i>34</i>
<i>Δ'.3 Οι χρονικές αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν από τον Coordinator κατά τη διάρκεια του πειράματος των Interrupts. Η καταμέτρηση γίνεται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου ή millisecond.</i>	<i>39</i>

Κεφάλαιο Α΄

Εισαγωγή

Η οικοδόμηση του σύγχρονου πολιτισμού έχει επηρεαστεί καθοριστικά από τις τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών. Τεχνολογίες όπως η ανάπτυξη του διαδικτύου και των Προσωπικών Υπολογιστών και η εκτεταμένη χρήση τους έχουν διαμορφώσει τον σύγχρονο τρόπο ζωής. Τα πρώτα υπολογιστικά συστήματα έκαναν την εμφάνισή τους στις αρχές της δεκαετίας του 1950 [1]. Η εγκατάσταση των συστημάτων αυτών απαιτούσε πολύ χώρο και το κόστος συντήρησής τους καθιστούσε την ευρεία χρήση τους αδύνατη. Στο πέρασμα των επόμενων είκοσι (20) ετών έγιναν προσπάθειες σμίχυνσης των συστημάτων, καταλήγοντας στο τέλος της δεκαετίας του 1960 στην ανάπτυξη των πρώτων μικροεπεξεργαστών, τεχνολογία που συγκέντρωσε την επεξεργασία της πληροφορίας σε μία Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (Central Processing Unit, CPU) και χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα σε Προσωπικούς Υπολογιστές και σε όλα τα υπολογιστικά συστήματα.

Το διαδίκτυο έκανε την εμφάνισή του στα τέλη της δεκαετίας του 1980 [2, 3] στις ερευνητικές εγκαταστάσεις του CERN στη Γενεύη όπου χρησιμοποιήθηκε από την επιστημονική κοινότητα για τον διαμοιρασμό γνώσεων μεταξύ των μελών της. Έκτοτε, η κάλυψη του διαδικτύου έχει εξαπλωθεί σε παγκόσμιο επίπεδο και έχει μεταστρέψει καθημερινές δραστηριότητες όπως η κοινωνικοποίηση και η διασκέδαση αλλά και τις τρόπους συνεργασίας των επιχειρήσεων.

Το διαδίκτυο σε συνδυασμό με την ραγδαία ανάπτυξη των μικροεπεξεργαστών έδωσαν χώρο στην ανάπτυξη εφαρμογών του *Διαδικτύου των Πραγμάτων* ή Internet of Things (IoT) [4] που αφορά στην ενσωμάτωση αισθητήρων σε αντικείμενα καθημερινής χρήσης αλλά και στην κατασκευή συστημάτων που αποτελούνται από *Ασύρματα*

Δίκτυα Αισθητήρων ή [5] . Αυτές οι τεχνολογίες έχουν αναβαθμίσει την ζωή των ανθρώπων με μικροεπεξεργαστές και αισθητήρες οι οποίοι ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους δίνοντάς τους την ικανότητα να διαχειριστούν συσκευές καθημερινής χρήσης και να παρέχουν άμεσα σημαντικές πληροφορίες με μικρή ή και μηδενική ανθρώπινη παρέμβαση. Χαρακτηριστικές εφαρμογές των WSN αποτελούν οι εξής:

- Οικιακοί αυτοματισμοί όπως ρύθμιση της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος χώρου, αυτόματο ξεκλείδωμα εισόδων
- Στρατιωτικές εφαρμογές που εστιάζουν στον γεωγραφικό εντοπισμό των στρατευμάτων και σε αμυντικά συστήματα [6],
- Βιομηχανικές εφαρμογές αυτοματοποίησης, ιδιαίτερη χρηστικότητα σε επαναληπτικές εργασίες
- Οχήματα με πλήρη αυτονομία οδήγησης
- Παρακολούθηση καιρικών συνθηκών
- Αγροτοδιατροφή παραγωγή
- Εκτίμηση δομικής υγείας κτισμάτων

Τα ιστορικά κτήρια φανερώνουν πολιτισμικά στοιχεία αρχαίων πολιτισμών και η διαφύλαξη της ακεραιότητάς τους διευκολύνει τη μελέτη τους και την εξαγωγή γνώσης για τους αρχαίους χρόνους. Η αξιοποίηση τεχνολογιών όμοιες με τις άνωθεν περιγραφόμενες μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη διαδικασία της ή [7, 8] επιτρέποντας τη συλλογή πληροφοριών σχετικές με τις παλμικές δονήσεις του κτηρίου. Για την αποδοτικότερη συντήρηση των ιστορικών κτηρίων οι πληροφορίες θα πρέπει να συλλέγονται με σύντομο και ακριβή τρόπο. Τα αρχικά συστήματα που αναπτύχθηκαν με σκοπό την [9] χρησιμοποιούσαν ενσύρματες υποδομές δικτύων οι οποίες συνέδεαν έναν αριθμό αισθητήρων σε ένα κοινό δίκτυο απαρτίζοντας ένα ή *Wired Sensor Network*. Αυτό χρησιμοποιούνταν για την αποστολή όλων των δεδομένων σε έναν κεντρικό υπολογιστή. Η συγκεκριμένη προσέγγιση παρεμβαίνει στη φυσιολογική λειτουργία του κτηρίου δεδομένου ότι για τη λειτουργία του συστήματος απαιτείται η εγκατάσταση καλωδιακής υποδομής. Η εγκατάσταση αυτή καθεαυτή περιλαμβάνει εργασίες οι οποίες αυξάνουν το κόστος του τελικού συστήματος και ενδέχεται να επηρεάσουν τη λειτουργία των

δομικών στοιχείων του κτηρίου που υποστηρίζουν το βάρος του. Αυτός ο παράγοντας είναι ιδιαίτερα σημαντικός στη συντήρηση των ιστορικών κτηρίων καθότι έχουν υποστεί τη φθορά του χρόνου και ακόμη και η παραμικρή παρέμβαση θα αποτελούσε κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητά του.

Με σκοπό τη μείωση του κόστους και την ελαχιστοποίηση της παρεμβατικής μεθόδου της εγκατάστασης ενσύρματων αισθητήρων στην παρούσα διατριβή γίνεται αξιοποίηση συστημάτων με ασύρματες τεχνολογίες, ονομάζονται *Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων* ή [5]. Η αποδέσμευση που προσφέρουν τα WSN από την ανάγκη εγκατάστασης καλωδιακής υποδομής μειώνει το άλλοτε υψηλό κόστος, την πολυπλοκότητα και τον κίνδυνο της εγκατάστασης. Παρά τα οφέλη που προσφέρει η παρούσα μέθοδος, η με τη χρήση παρουσιάζει νέες προκλήσεις. Η παρούσα διατριβή εστιάζει στη συλλογή συγχρονισμένων μετρήσεων από όλους τους κόμβους του δικτύου. Ο του είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για τη χρονική συσχέτιση των δεδομένων που συλλέγονται από πολλαπλούς αισθητήρες. Η απουσία της διαδικασίας αυτής θα παρήγαγε ακατάλληλα δεδομένα για τον εντοπισμό παλμικών διαταραχών που επηρεάζουν το κτήριο, έτσι δεν θα ήταν δυνατή η εκτίμηση της υγείας των δομικών του στοιχείων.

Α'.1 Βιβλιογραφική Έρευνα

Τα τελευταία χρόνια η εκτίμηση της δομικής υγείας γνώρισε πρωτοφανή ανάπτυξη λόγω της διαδεδομένης χρήσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων [10]. Ο Anastasi και τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας στο άρθρο [11] περιγράφουν το σύστημα εκτίμησης δομικής υγείας που ανέπτυξαν με τη χρήση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων. Είναι ένα σύστημα που χρησιμοποίησαν για ιστορικά κτήρια στην πόλη της Σικελίας το οποίο λαμβάνει περιοδικά μετρήσεις που σχετίζονται με τις παλμικές δονήσεις των κτηρίων.

Στο άρθρο [12] ο Kim και η ομάδα του ανέπτυξαν ένα σύστημα της γέφυρας Golden Gate του San Francisco αξιοποιώντας τη τεχνολογία Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων. Το δίκτυο εγκαταστάθηκε σε μια έκταση 4200ft στο κυρίως μέρος της γέφυρας χωρίς να παρεμβαίνει στην κανονική λειτουργία της. Το δίκτυο αποτελείται από 64 κόμβους και η πληροφορίες που αφορούν στις παλμικές δονήσεις είναι αξιόπιστες.

Ο Xu και τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας στο άρθρο τους [13] περιγράφουν τη λειτουργία και την εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος Wisden το οποίο αποτελεί ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων. Σε αυτό οι μετρήσεις που καταγράφονται από τους αισθητήρες συγχρονίζονται χωρίς να υπάρχει ανάγκη χρήσης ενός πανγκόσμιου

ρολογιού

Προκειμένου να δοθεί λύση στο ζήτημα του συγχρονισμού του WSN είναι επιτακτική ανάγκη η αποδόμηση του προβλήματος στα επιμέρους κομμάτια του. Ο Sadler και ο Swami [14] αποδίδουν αναλυτικά το ζήτημα του συγχρονισμού προβάλλοντας λεπτομερώς τα επιμέρους ζητήματά του. Στη προσπάθεια επίλυσής του έχει προταθεί πλήθος αλγορίθμων στο πέρασμα των τελευταίων 15 ετών [15]. Ο Elson [16] και η ομάδα του προτείνουν ένα αλγόριθμο συγχρονισμού ο οποίος χρησιμοποιεί για τον συγχρονισμό των κόμβων μεταδόσεις Broadcast. Δεν γίνεται χρήση κάποιου κοινού ρολογιού αλλά κατά την λήψη του πακέτου συγχρονισμού οι κόμβοι μηδενίζουν τα ρολόγια τους. Χρησιμοποιούν την χρονική στιγμή της λήψης ως κοινό χρόνο για όλο το δίκτυο.

Σε μία δημοσίευση [17] του 2008 ο Noh και η ομάδα του προτείνουν έναν διαφορετικό τρόπο συγχρονισμού για ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων. Κατά τον αλγόριθμο αυτόν ένα ζεύγος από κόμβους ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους και οι γειτονικοί κόμβοι που μπορούν να λαμβάνουν και αυτοί τα μεταδιδόμενα πακέτα που αφορούν στο συγχρονισμό έχουν την δυνατότητα να συγχρονιστούν και εκείνοι. Έτσι δημιουργείται ένα δίκτυο συγχρονισμού που αποτελεί υποδίκτυο του αρχικού δικτύου.

Η Φαναριώτη και η ομάδα της στο άρθρο [18] αξιοποιούν πληροφορίες του επιπέδου Medium Access Control (MAC) με σκοπό τη συσχέτιση μετρήσεων με τη χρονική στιγμή της καταμέτρησής της. Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται επειδή βρίσκεται πλησίον του φυσικού επιπέδου έτσι ωφελεί στην απαλοιφή όσο το δυνατόν περισσότερων καθυστερήσεων για τη μετάδοση του πακέτου ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη χρονική ακρίβεια στις μετρήσεις.

Για τις ανάγκες του συστήματος στην παρούσα διατριβή, αναπτύχθηκε διαδικασία συγχρονισμού η οποία εκτελείται σε δύο (2) φάσεις. Για την εκτέλεση του χρησιμοποιούνται μεταδόσεις Broadcast και η πρώτη φάση του συγχρονισμού εκτελείται μόνο μία φορά. Η διαδικασία είναι κεντριοποιημένη γεγονός που παρέχει καλύτερο έλεγχο της πληροφορίας που μεταδίδεται μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Α΄.2 Αποτελέσματα και Συνεισφορά

Η διαδικασία του συγχρονισμού που αναπτύχθηκε βασίζεται σε ήδη γνωστά και ευρέως διαδεδομένες τεχνικές μετάδοσης πληροφορίας σε όλο το δίκτυο όπως είναι το flooding με χρήση broadcast μεταδόσεων. Έτσι η κατανόηση και ανάπτυξη της διαδικασίας για εναλλακτικά συστήματα από αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα

διατριβή, απλοποιείται. Τα πειράματα που διεξήχθησαν έδειξαν πως η διαδικασία του συγχρονισμού παρέχει αρκετά καλή απόδοση μιας και οι τιμές απόκλισης των ρολογιών από το κοινό ρολόι με το οποίο συγχρονίζουν αγγίζουν τα τέσσερα microsecond. Τέλος, η διαδικασία συγχρονισμού είναι ανεξάρτητη τοπολογίας και έχει την ικανότητα να εκτελεστεί σε δίκτυα με διάμετρο μεγαλύτερη του ενός.

Α΄.3 Δομή Διατριβής

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα γίνει απόδοση του λογισμικού που αναπτύχθηκε για τα πειράματα όπως και του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο Β΄ γίνεται αναλυτική περιγραφή του υλικού που επιλέχθηκε για την ανάπτυξη του συστήματος και αποδίδονται οι λόγοι της επιλογής αυτής. Ακολούθως στο κεφάλαιο Γ΄ γίνεται ανάλυση των αναγκών του συστήματος και των διαδικασιών που αναπτύχθηκαν για τον συγχρονισμό και τη γενικότερη λειτουργία του. Το κεφάλαιο Δ΄ περιέχει τα πειράματα και τα αποτελέσματα που διεξήχθησαν για την εκτίμηση της απόδοσης του συγχρονισμού. Τέλος, στο κεφάλαιο Ε΄ γίνεται σύνοψη των όσων αναπτύχθηκαν σε όλη τη διατριβή.

Κεφάλαιο Β΄

Περιγραφή Συστήματος - Υλικό

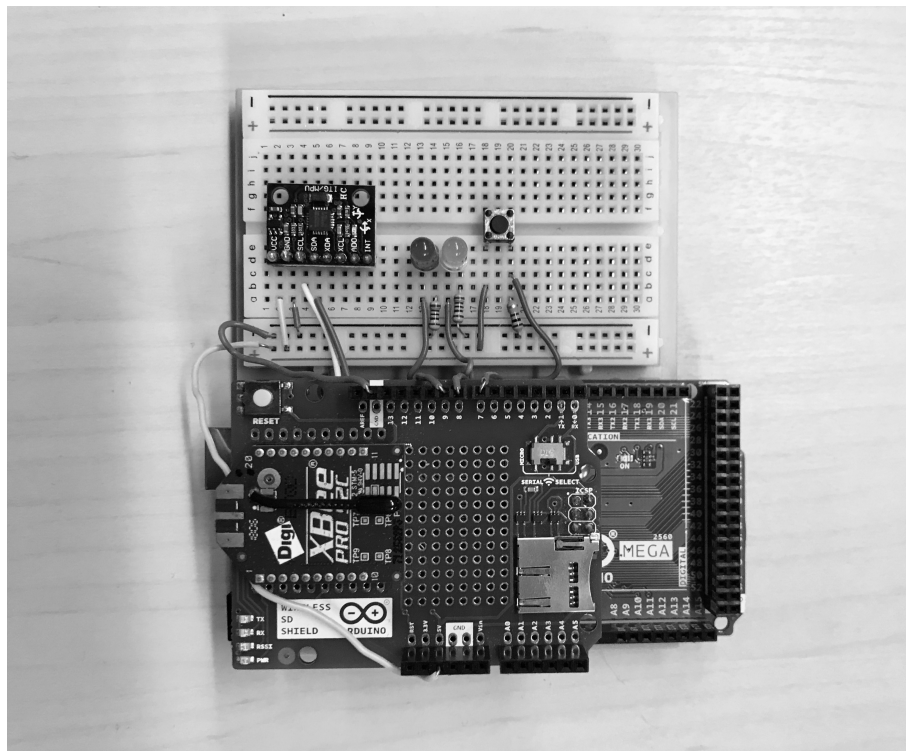
Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει την ανάλυση του υλικού ή hardware του συστήματος, όπως αυτό αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής. Γίνεται ενδελεχής παρουσίαση των επιμέρους εξαρτημάτων, δίδονται οι λόγοι που αυτά επιλέχθηκαν και ποιες ανάγκες καλύπτονται από αυτά.

Τα υλικά που αποτελούν το σύστημα επελέγησαν με γνώμονα το χαμηλό κόστος και τη μεγιστοποίηση της απόδοσής του. Σκοπός είναι η εξαγωγή δεδομένων παλμικών δονήσεων από πολλαπλούς αισθητήρες με ακρίβεια, ώστε να χρησιμοποιηθούν στην ιστορικών κτηρίων. Το σύστημα που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής αποτελείται από χαμηλού κόστους εξαρτήματα που παρέχουν επαρκή ακρίβεια για τον εντοπισμό παλμικών δονήσεων που φανερώνουν την κατάσταση του κτηρίου. Για την αποφυγή των μειονεκτημάτων που προβάλλονται από τα ενσύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, η ανάπτυξη του συστήματος βασίστηκε στα WSN. Τα συστήματα που βασίζονται στις ασύρματες επικοινωνίες, ιδιαίτερα όταν αυτές λαμβάνουν χώρα σε ιστορικά κτήρια που η κατασκευή τους βασίστηκε σε υλικά όπως η πέτρα, είναι επιρρεπή σε απώλεια δεδομένων. Έτσι οι κεραίες που επελέγησαν για τις ασύρματες επικοινωνίες των κόμβων είχαν ως βασικό κριτήριο την ικανότητά τους να εκπέμπουν με επαρκή ισχύ ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια δεδομένων κατά τη μετάδοσή τους.

Το σύστημα αποτελείται από τέσσερα (4) κυρίως εξαρτήματα και τρία (3) δευτερεύοντα. Τα εξαρτήματα που αποτελούν το πλήρες σύστημα διατεταγμένα από τα κυρίως προς τα δευτερεύοντα είναι τα εξής:

- Πλατφόρμα ή Πλακέτα Arduino [19]
- Arduino Wireless SD Shield [20]

- XBee Pro S2C [21]
- Accelerometer MPU-6050 [22]
- Raspberry Pi 3 [23]
- Λαμπτήρες ένδειξης κατάστασης και κουμπί



Σχήμα B'.1: Το τελικό σύστημα συναρμολογημένο.

B'.1 Πλατφόρμα Arduino

Η πλατφόρμα Arduino αποτελεί έναν συνδυασμό υλικού και λογισμικού ανοιχτού κώδικα που έχει δημιουργηθεί από την Ιταλική ομώνυμη εταιρεία [24]. Η πρώτη πλακέτα αναπτύχθηκε και κυκλοφόρησε στην αγορά το 2005. Η πλατφόρμα έκτοτε έχει γνωρίσει ευρεία διάδοση γεγονός που ώθησε πολλές εταιρείες στην ανάπτυξη μιας μεγάλης ποικιλίας συμβατών αισθητήρων συνοδευόμενων από το κατάλληλο λογισμικό

ή την προγραμματιστική βιβλιοθήκη, που επιτρέπει τη διασύνδεση τους με την πλατφόρμα. Έτσι δόθηκε η δυνατότητα ανάπτυξης καινοτόμων εφαρμογών του Διαδικτύου των Πραγμάτων κορυφαίοι τομείς αυτών είναι οι εξής παιδικά παιχνίδια, έξυπνες οικιακές συσκευές, αυτόνομα οχήματα, παρακολούθηση περιβαλλοντικών και εδαφολογικών συνθηκών σε αγροτικές περιοχές κ.α.



Σχήμα Β΄.2: Η πλατφόρμα Arduino Mega.

Η εταιρεία παρέχει εργαλεία λογισμικού και υλικού τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη των εφαρμογών. Όλες οι πλακέτες περιλαμβάνουν έναν κεντρικό επεξεργαστή ή μικροελεγκτή, μνήμη και αποθηκευτικό χώρο για την εκτέλεση και αποθήκευση προγραμμάτων, υποδοχές Εισόδου/Εξόδου ή pins οι οποίες χρησιμοποιούνται για την διασύνδεση εξωτερικών αισθητήρων και συσκευών και τουλάχιστον μία (1) συριακή υποδοχή για την επικοινωνία της πλακέτας με έναν Ηλεκτρονικό Υπολογιστή. Για τη διευκόλυνση της συγγραφής του κώδικα των εφαρμογών η εταιρεία έχει αναπτύξει το Arduino IDE. Μέσω του λογισμικού αυτού ο προγραμματιστής έχει επίσης τη δυνατότητα να αναζητά τις βιβλιοθήκες για τους αισθητήρες που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει. Η ανάπτυξη εφαρμογών συμβατών με τις πλακέτες γίνεται με την χρήση των γλωσσών προγραμματισμού C/C++.

Η πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε ως κεντρική μονάδα επεξεργασίας για ανάπτυξη του παρόντος συστήματος είναι η Arduino Mega 2560 Rev3. Τα βασικά χαρακτηριστικά της πλακέτας είναι τα εξής:

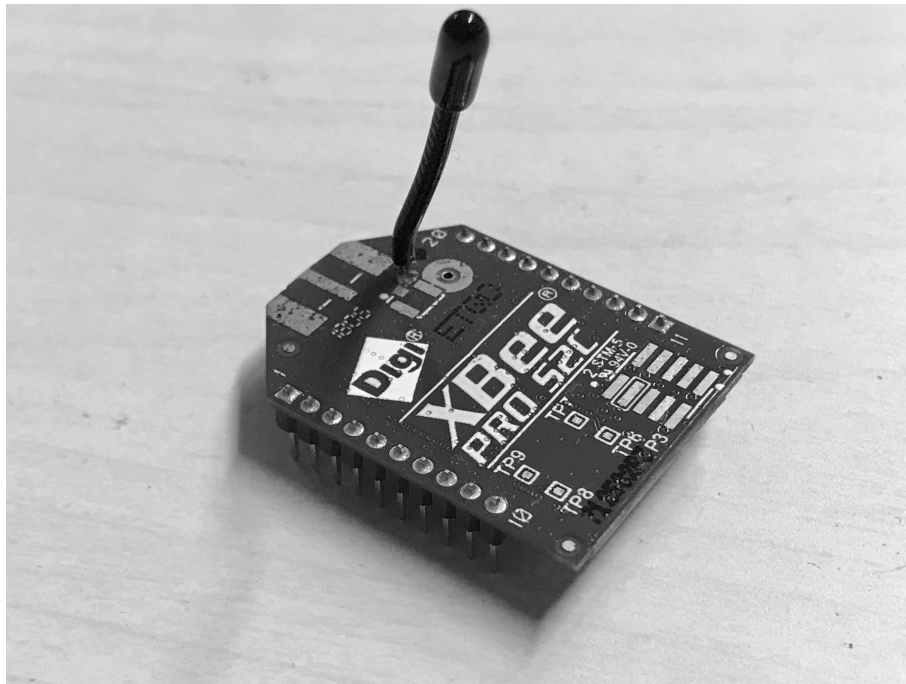
- Μικροελεγκτής ATmega2560 χρονισμένος στα 16MHz,
- Αποθηκευτικός χώρος μεγέθους 256KB,
- Μνήμη τύπου SRAM μεγέθους 8KB,
- 54 pin ψηφιακού σήματος και 16 pin αναλογικού σήματος για τη σύνδεση εξωτερικών συσκευών ή αισθητήρων

B'.2 Κεραία XBee-Pro S2C

Η κεραία XBee-Pro S2C [21, 25] είναι ένα χαμηλού κόστους εξάρτημα κατασκευασμένο από την εταιρεία Digi που χρησιμοποιείται για εφαρμογές IoT. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλούς χρόνους απόκρισης και μεταφορά δεδομένων. Η χρήση πολλαπλών κεραιών δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας Δικτύου Πλέγματος ή Mesh Network, όπου όλοι οι διαφορετικοί κόμβοι μπορούν να επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους χωρίς να διαμεσολάβηση κάποιου κεντρικού δρομολογητή που διαχειρίζεται τις επικοινωνίες, μειώνοντας έτσι τους χρόνους απόκρισης του δικτύου. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για ανάπτυξη εφαρμογών WSN.

Για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων η κεραία αξιοποιεί το εύρος συχνοτήτων μεταξύ 2.4 και 2.5GHz και έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί σε δεκαπέντε (15) διαφορετικά συνοπτικά κανάλια. Κατά την αρχικοποίηση του δικτύου επιλέγεται το Αναγνωριστικό του Προσωπικού Τοπικού Δικτύου ή Personal Area Network Identification (PAN ID) και το κανάλι επικοινωνίας που θα χρησιμοποιούν όλες οι κεραίες για την επικοινωνία τους. Η ταχύτητα μετάδοσης ανέρχεται στα 250kB/s. Η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας της κεραίας είναι 63mW ή +18dBm δίνοντάς της τη δυνατότητα να μεταδίδει δεδομένα σε απόσταση έως και 3.2χλμ σε εξωτερικό χώρο χωρίς εμπόδια και έως 90μ σε εσωτερικό χώρο.

Στο σύστημα που αναπτύχθηκε για την παρούσα διατριβή, η κεραία επικοινωνεί με την κεντρική πλακέτα Arduino με τη χρήση του Arduino Wireless SD Shield. Το εξάρτημα αυτό δίνει τη δυνατότητα επέκτασης των δυνατοτήτων της κεντρικής πλακέτας και, όπως υποδεικνύει το όνομά του, επιτρέπει τη σύνδεση: 1) εξοπλισμού χρήσιμο για

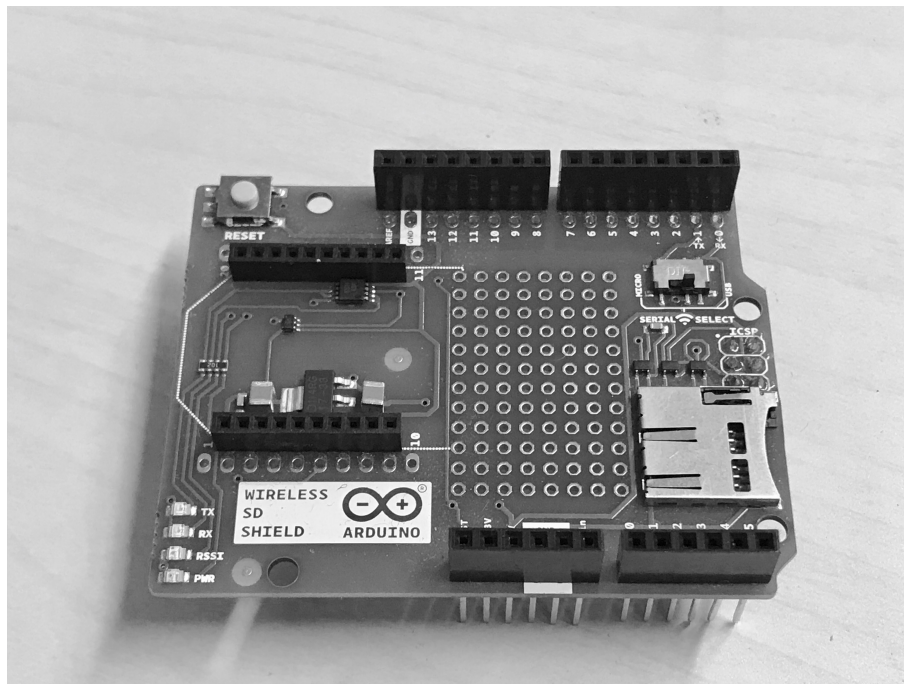


Σχήμα Β΄.3: Η κεραία XBee-Pro S2C.

ασύρματη μεταφορά δεδομένων· και 2) κάρτας μαζικής αποθήκευσης δεδομένων τύπου microSD. Επιπλέον, διαθέτει έναν διακόπτη ο οποίος εναλλάσσει την επικοινωνία της συνδεδεμένης κεραίας μεταξύ του εσωτερικού μικροελεγκτή της κεντρικής πλακέτας και της σειριακής σύνδεσης. Ένα ακόμη χρήσιμο χαρακτηριστικό που ενσωματώνει είναι το κουμπί επαναφοράς ή reset το οποίο επανεκκινεί τη λειτουργία της κεντρικής πλακέτας και κατ' επέκτασιν και όλων των συνδεδεμένων εξαρτημάτων. Τέλος, το Arduino Wireless SD Shield επεκτείνει τα pin της κεντρικής πλακέτας ούτως ώστε να μην χαθεί η πρόσβαση σε αυτά κατά τη σύνδεση του.

Β΄.2.1 Λογισμικό Λειτουργίας

Οι τεχνικές δικτύωσης με σε Τοπολογία Πλέγματος ή Mesh Networking δίνουν τη δυνατότητα ανάπτυξης εκτεταμένων δυναμικών δικτύων τα οποία έχουν την ικανότητα να μεταφέρουν πακέτα δεδομένων μεταξύ κόμβων που δεν επικοινωνούν άμεσα, αλλά χρησιμοποιούν ενδιάμεσους κόμβους οι οποίοι δρομολογούν τα πακέτα προς τον προορισμό τους. Επιπλέον, τα δίκτυα αυτά έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν εναλλακτικούς δρόμους για τη μετάδοση πακέτων, διαδικασία που χρησιμοποιείται σε



Σχήμα Β'.4: Arduino Wireless SD Shield.

περιπτώσεις που έχει σταματήσει να λειτουργεί κάποιος ενδιαμέσος κόμβος. Για τη λειτουργία της κεραίας η εταιρεία διανέμει συνολικά τρία (3) λογισμικά τα οποία παρέχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά που προσαρμόζουν την κεραία στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Αυτά είναι 1) Το 802.15.4· 2) Το DigiMesh· και 3) Το ZigBee. Τα δύο τελευταία αποτελούν Mesh Networking πρωτόκολλα.

802.15.4

Αποτελεί ένα πρωτόκολλο επιπέδου Έλεγχος Πρόσβασης Μέσου ή *Medium Access Control (MAC)*. Αυτό το επίπεδο διαχειρίζεται τη σύνδεση και την ανταλλαγή πακέτων του κάθε κόμβου με τους γείτονές του. Επίσης, διαθέτει υπηρεσίες αναμετάδοσης μη ληφθέντων πακέτων και αποφυγή συγκρούσεων κατά τη μετάδοση.

DigiMesh

Είναι ένα πρωτόκολλο που παρέχει ευελιξία και επεκτασιμότητα στο δίκτυο. Οι κόμβοι που λειτουργούν με βάση το DigiMesh μπορούν να εισέρχονται σε λειτουργία ύπνου ώστε να μειώνουν τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας. Σε αυτό το πρωτόκολλο

γίνεται χρήση μίας λειτουργίας δικτύωσης και βάση αυτής ενεργούν όλες οι κεραίες.

ZigBee

Είναι πρωτόκολλο κατάλληλο για που για την ανάπτυξή του βασίστηκε στο IEEE 802.15.4 πρωτόκολλο και ενεργεί σε υψηλότερα επίπεδα, ενσωματώνοντας το επίπεδο Δικτύου ή Network Layer και το επίπεδο Εφαρμογής ή Application Layer. Έτσι παρέχεται πρόσβαση σε πληροφορίες δικτύωσης και η μεταφορά πακέτων μεταξύ μη γειτονικών κόμβων μπορεί να γίνει άμεσα με τη χρήση της διεύθυνσης του παραλήπτη. Η ανάπτυξη του συστήματος για την παρούσα διατριβή έχει βασιστεί στο ZigBee πρωτόκολλο.

Β'.2.2 Λειτουργίες Δικτύωσης Κεραίας

Το ZigBee πρωτόκολλο δίνει τη δυνατότητα στον προγραμματιστή να προσαρμόσει τη λειτουργία δικτύωσης ή το ρόλο της κάθε κεραίας ώστε να καλύψει τις ανάγκες του εκάστοτε ανακηρυχθέντος συστήματος. Διατίθενται τρεις (3) λειτουργίες: 1) Coordinator· 2) Router· και 3) End Device. Όλες οι κεραίες, ανεξαρτήτως ρόλου, έχουν τη δυνατότητα να αποστέλλουν και να λαμβάνουν πακέτα όμως ο κάθε ρόλος αναθέτει διαφορετικές αρμοδιότητες στην κεραία.

Coordinator

Ο ρόλος του Coordinator αφορά στην αρχικοποίηση του δικτύου δηλαδή στην επιλογή των παραμέτρων λειτουργίας του. Σε αυτές περιλαμβάνεται η επιλογή του συχνοτικού καναλιού και το PAN ID του δικτύου. Το συχνοτικό κανάλι είναι αυτό που χρησιμοποιείται για όλες τις ασύρματες επικοινωνίες του δικτύου και η επιλογή του καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα επικοινωνίας των συσκευών. Προκειμένου να γίνει επιλογή ενός αξιόπιστου καναλιού ο Coordinator, αρχικά, σαρώνει όλα τα συχνοτικά κανάλια και συλλέγει πληροφορίες σχετικές με την ενέργεια του καθενός. Τέλος, διατηρεί μια λίστα των καναλιών με χαμηλά επίπεδα ενέργειας. Ακολούθως, γίνεται αναζήτηση των PAN ID που χρησιμοποιούνται στα κανάλια της λίστας. Κατά την ολοκλήρωση των παραπάνω ενεργειών ο Coordinator επιλέγει ένα τυχαίο συχνοτικό κανάλι για το δίκτυο και ένα PAN ID που δεν χρησιμοποιείται.

Η ύπαρξή του Coordinator είναι απαραίτητη για τη δημιουργία του δικτύου και σε αυτό μπορεί να υπάρξει μόνο ένας. Όταν ολοκληρωθεί η αρχικοποίηση του δικτύου

μπορεί να επιτρέψει σε νέες συσκευές να εισέλθουν στο δίκτυο. Ο Coordinator μπορεί να είναι αποστολέας και παραλήπτης μηνυμάτων. Ολοκληρώνοντας τις εργασίες αρχικοποίησης ενεργεί πλέον ως Router.

Router

Ο Δρομολογητής ή *Router*, όπως το όνομά του υποδεικνύει, έχει ως βασική αρμοδιότητα τη δρομολόγηση πακέτων μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Η διαδικασία της δρομολόγησης πρέπει να έχει υψηλή αξιοπιστία, έτσι οι Δρομολογητές Για την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου συνολικά, οι κόμβοι που αναλαμβάνουν το ρόλο του Router δημιουργούν και διατηρούν πληροφορίες δικτύωσης ώστε να μεταφέρουν πακέτα δεδομένων χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη διαδρομή. Ένας Router συνδεδεμένος σε ένα δίκτυο, έχει τη δυνατότητα να προσθέτει και αυτός νέες συσκευές Router ή End Devices. Επίσης, μπορεί να λειτουργεί και ο ίδιος ως παραλήπτης και αποστολέας πακέτων.

Ομοίως με τον Coordinator κατά την αρχική ενεργοποίηση του ένας Router εντοπίζει τα συχνοτικά κανάλια και αποστέλλει ένα μήνυμα εντοπισμού στο πρώτο κανάλι της λίστας του. Όταν λάβει το μήνυμα ένας Coordinator ή ένας Router που συμμετέχουν ήδη σε ένα δίκτυο, απαντούν με ένα αντίστοιχο μήνυμα. Το τελευταίο περιέχει πληροφορίες που αφορούν στο δίκτυο οι οποίες περιλαμβάνουν τα εξής: 1) αν επιτρέπεται η ένταξη νέων κόμβων στο δίκτυο· και 2) Το PAN ID του δικτύου.

End Device

Οι κεραίες σε λειτουργία δικτύωσης *End Device* βρίσκονται στα άκρα του δικτύου και λόγω των ιδιοτήτων τους, είναι κατάλληλες για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Σε ένα δίκτυο μπορεί να υπάρχουν συνδεδεμένες πολλαπλές End Devices. Η κάθε κεραία που βρίσκεται σε αυτή τη λειτουργία επικοινωνεί αποκλειστικά και μόνο με έναν κόμβο, αυτός ονομάζεται γονέας ή Parent Node και είναι ο κόμβος που την συνέδεσε στο δίκτυο. Μία κεραία που λειτουργεί ως End Device έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει και να αποστέλλει πακέτα δεδομένων, όχι όμως να δρομολογεί μηνύματα τρίτων κόμβων. Για αυτόν το λόγο ο γονέας πρέπει να είναι Router ή Coordinator. Οι End Devices μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες από μία μπαταρία για μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς διαθέτουν λειτουργίες χαμηλής ισχύος. Επίσης, ενώ έχουν την ικανότητα να συνδέονται σε ένα δίκτυο ZigBee, δεν

μπορούν να επιτρέψουν την είσοδο νέων συσκευών σε αυτό. Σημαντικό χαρακτηριστικό, που συμβάλλει στη μείωση κατανάλωσης ενέργειας, είναι η *Λειτουργία Ύπνου* ή *Sleep Mode*. Τη χρονική περίοδο κατά την οποία μία End Device βρίσκεται σε αυτήν, δεν έχει δραστηριότητα και ως φυσικό επακόλουθο δεν μπορεί να λάβει κανένα πακέτο δεδομένων. Έτσι, ο κόμβος που έχει την ιδιότητα του γονέα της, λαμβάνει ενημέρωση από την End Device προτού εισέλθει σε κατάσταση ύπνου και έπειτα αποθηκεύει τα μηνύματα που πρέπει να της αποστείλει έως ότου επανέλθει σε κανονική λειτουργία.

Η διαδικασία της εύρεσης και σύνδεσης μιας End Device σε ένα νέο δίκτυο ZigBee περιλαμβάνει τις ίδιες ενέργειες που εκτελεί και ένας Router. Για να γίνει με επιτυχία η σύνδεση της συσκευής σε ένα νέο δίκτυο πρέπει να τηρούνται οι κάτωθι προϋποθέσεις:

- Το ληφθέν PAN ID να έχει μέγεθος 64-bit και να είναι μεγαλύτερο του μηδενός (0).
- Να γίνονται δεκτές νέες συσκευές στο δίκτυο.
- Το ZigBee stack profile με το οποίο λειτουργεί η κεραία να είναι ίδιο με αυτό που έλαβε.
- Το δίκτυο να έχει χωρητικότητα για νέες End Devices.

Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται για όλα τα συχνοτικά κανάλια, έως ότου βρεθεί ένα έγκυρο δίκτυο στο οποίο μπορεί να ενταχθεί η κεραία. Στην περίπτωση που δεν βρεθεί τότε εισέρχεται σε κατάσταση ύπνου για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και μετά το πέρας αυτού εκτελεί και πάλι τη διαδικασία εύρεσης δικτύου.

Β'.2.3 Πρωτόκολλα Σειριακής Διεπαφής

Η κεραία, όπως περιγράφηκε παραπάνω, αποτελεί εξάρτημα του συστήματος που χρησιμοποιείται για να μεταδώσει πακέτα δεδομένων σε απομακρυσμένους κόμβους. Ο κεντρικός διαχειριστής ενός κόμβου είναι η πλατφόρμα Arduino και αυτή όποτε χρειαστεί να αποστείλει δεδομένα θα πρέπει να επικοινωνήσει με την κεραία με τη χρήση ενός πρωτοκόλλου σειριακής διεπαφής. Η Digi παρέχει δύο τέτοια πρωτόκολλα για την επικοινωνία της κεραίας με την πλατφόρμα Arduino: 1) Transparent και 2) Application Programming Interface (API).

Transparent

Η κεραίες που ρυθμίζονται να λειτουργούν σε λειτουργία Transparent αποστέλλουν άμεσα τα δεδομένα που παρέχονται σε αυτές. Ο προγραμματιστής δεν έχει τη δυνατότητα να επιλέξει τον κόμβο προορισμού καθώς η κεραία σε αυτή τη λειτουργία δεν εισάγει λεπτομέρειες στο πακέτο δεδομένων, παραμόνο τα δεδομένα που είναι για μετάδοση. Η ασύρματη αποστολή μπορεί να γίνει Broadcast δηλαδή το πακέτο δεδομένων που μεταδίδεται δεν έχει ορισμένο αποστολέα αλλά αφορά όλους τους κόμβους που μπορούν να το λάβουν τη στιγμή της μετάδοσης, είτε Unicast δηλαδή τα δεδομένα αποστέλλονται σε μία μόνο διεύθυνση MAC. Προκειμένου να γίνει εναλλαγή του παραλήπτη των δεδομένων η κεραία θα πρέπει να εισαχθεί σε *Λειτουργία Παραμετροποίησης* ή *Command Mode* όπου εκτός από τη διεύθυνση το αποστολέα μπορεί να παραμετροποιηθεί η λειτουργία όλης της κεραίας. Όταν είναι ενεργοποιημένη η Λειτουργία Παραμετροποίησης η κεραία δεν έχει τη δυνατότητα να λάβει και να αποστείλει δεδομένα. Τέλος, η κεραία που λαμβάνει δεδομένα σε Transparent λειτουργία τα μεταφέρει στο Arduino άμεσα χωρίς να τα οργανώνει σε πακέτα.

Application Programming Interface (API)

Η λειτουργία Application Programming Interface (API) αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας της κεραίας με την κεντρική πλακέτα Arduino κατά το οποίο τα δεδομένα που μεταφέρονται αποτελούν ένα μέρος οργανωμένου πακέτου όπου περιέχονται επιπλέον πληροφορίες σχετικές με τη μετάδοση. Οι πληροφορίες που περιέχονται σε αυτό το πακέτο δίνουν τη δυνατότητα παραμετροποίησης της εφαρμογής αναπτύσσοντας συμπεριφορά για την κάθε κεραία. Η λειτουργία API δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής πληροφοριών στο πακέτο προς μετάδοση που αφορούν τον παραλήπτη, τον αποστολέα, το μέγεθός του, κ.α. δίνοντας έτσι τις εξής δυνατότητες: 1) Αποστολή πακέτου πληροφοριών σε πολλαπλούς παραλήπτες χωρίς να χρειάζεται να μπει η κεραία σε λειτουργία παραμετροποίησης· 2) Γνώση για την επιτυχία ή αποτυχία μετάδοσης ενός πακέτου· και 3) Ο παραλήπτης μπορεί να γνωρίζει τον αποστολέα.

Για την παρούσα διατριβή έγινε χρήση της λειτουργίας API. Προκειμένου να γίνει αξιοποίηση των πληροφοριών που παρέχονται από αυτήν τη λειτουργία έγινε χρήση της βιβλιοθήκης [26] η οποία είναι συμβατή με την κεντρική πλακέτα που χρησιμοποιήθηκε και παρέχει μια προγραμματιστική διεπαφή που διευκολύνει την διαχείριση της κεραίας μέσω του κώδικα.

Β'.2.4 Συνοδευτικό Λογισμικό - Digi XCTU

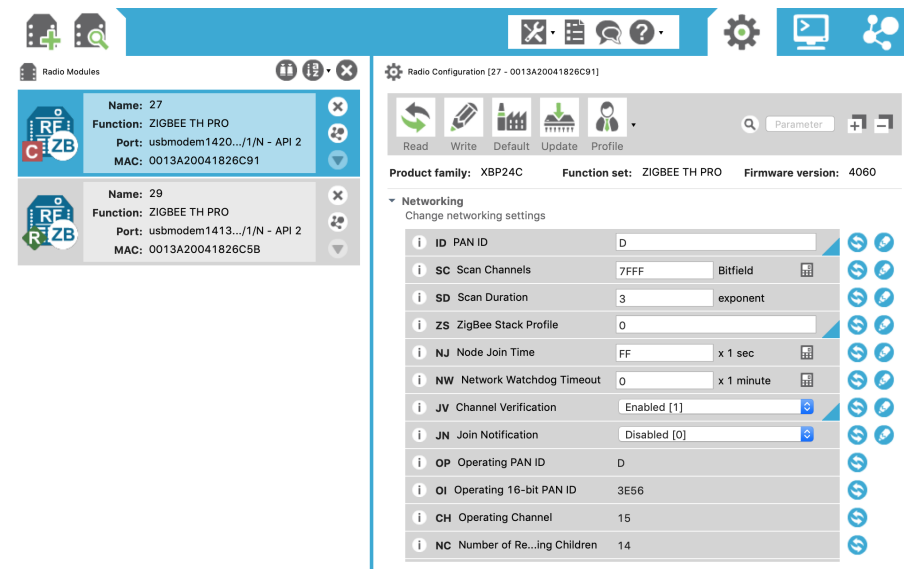
Τα λογισμικά που αναπτύχθηκαν με σκοπό τη διαχείριση και την παροχή των υπηρεσιών της κεραίας XBee παρέχουν δυνατότητες τροποποίησης της λειτουργικότητάς της ώστε αυτή να προσαρμοστεί στις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Η εταιρεία για την διαχείριση της κεραίας έχει αναπτύξει την εφαρμογή XCTU [27] η οποία είναι συμβατή με τις πλατφόρμες λειτουργικών συστημάτων MacOS, Windows, Linux. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε προκειμένου να διευκολύνει τη διαδικασία της παραμετροποίησης μιας κεραίας με τη χρήση της Διεπαφή Χρήστη ή User Interface (UI) που παρέχει. Οι δυνατότητες της εφαρμογής XCTU περιλαμβάνουν: 1) Εγκατάσταση ενός από τα Λογισμικά Λειτουργίας που περιγράφηκαν παραπάνω· 2) Εντοπισμό δικτύου· 3) Εντοπισμό απομακρυσμένων κεραίων οι οποίες δεν είναι συνδεδεμένες στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή· 4) Έλεγχος ποιότητας σύνδεσης δύο κεραίων και άλλα.

Τα βήματα σύνδεσης της κεραίας με το λογισμικό XCTU είναι τα εξής:

- Σύνδεση μεταξύ των pin GND - RST,
- Εναλλαγή του διακόπτη σειριακής σύνδεσης στην επιλογή USB,
- Σύνδεση του κόμβου στον Ηλεκτρονικό Υπολογιστή μέσω σειριακού διαύλου,
- Εκτέλεση αναζήτησης με το δεύτερο κουμπί που βρίσκεται στο επάνω αριστερό μέρος της εφαρμογής,
- Προσθήκη των συσκευών που ανιχνεύθηκαν,
- Επιλογή και παραμετροποίηση της κεραίας.

Για την εύρυθμη λειτουργία του ανακηρυχθέντος συστήματος έγινε τροποποίηση ορισμένων παραμέτρων που αφορούν στη δημιουργία του δικτύου με τη χρήση του XCTU και η διαχείριση των παραγόμενων πληροφοριών έγινε μέσω κώδικα. Οι παράμετροι είναι: 1) PAN ID κοινό για όλους τους κόμβους του δικτύου ώστε να μπορούν να συμμετέχουν σε ένα κοινό Personal Area Network· 2) Channel Verification ενεργοποιημένο ώστε οι νέοι κόμβοι που εισέρχονται στο δίκτυο να ελέγχουν για την ύπαρξη του Coordinator· 3) TX Power Level στο μέγιστο, αυτή η εντολή καθορίζει την ένταση με την οποία εκπέμπει η κεραία· και 4) Baud Rate ρυθμισμένο στα 115200, αυτή η παράμετρος καθορίζει την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων μεταξύ της κεραίας και του Arduino· και 5) API Enable με τιμή 2, η επιλογή της λειτουργίας 2 έγινε για

λόγους συμβατότητας της προγραμματιστικής βιβλιοθήκης που χρησιμοποιήθηκε. Για τους χρήστες που χρειάζονται να εξάγουν πληροφορίες από την εφαρμογή, εγκαθίστανται παράλληλα προγραμματιστικά εργαλεία για τερματικό ή Command Line Interface Tools. Στην εικόνα B'.5 υπάρχει μια ενδεικτική εικόνα του λογισμικού XCTU.

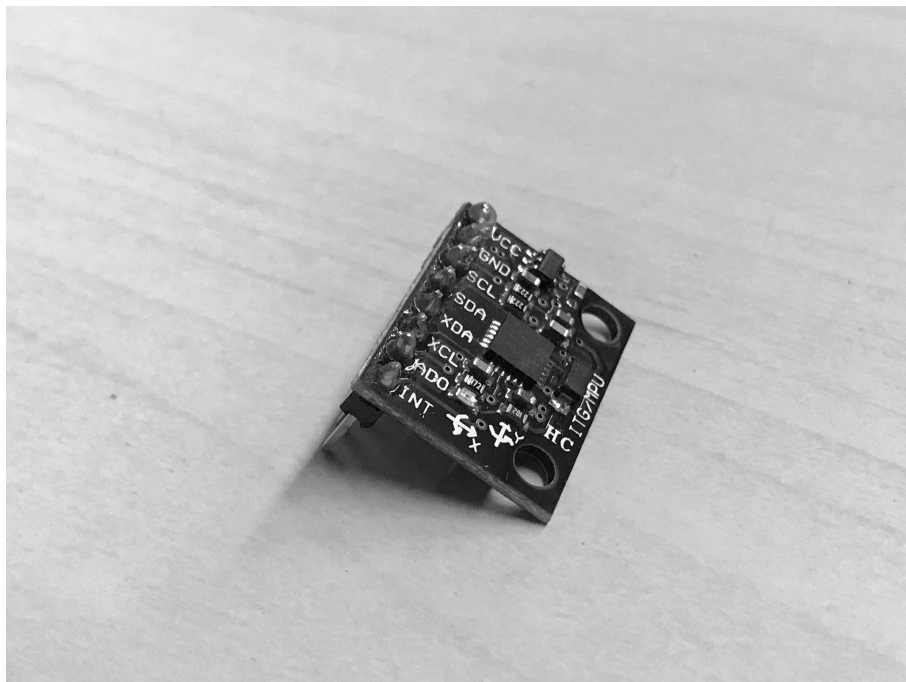


Σχήμα B'.5: Ενδεικτική οθόνη του συνοδοευτικού λογισμικού XCTU.

B'.3 Accelerometer - MPU-6050

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και πιο συγκεκριμένα η σμίκρυνση των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, άνοιξε νέους ορίζοντες για τη δημιουργία αισθητήρων μικροσκοπικού μεγέθους. Έτσι αναπτύχθηκαν αισθητήρες οι οποίοι ενσωματώθηκαν με τα χρόνια σε πλήθος ηλεκτρονικών συσκευών επαυξάνοντας τις δυνατότητές τους. Ένας από αυτούς είναι το επιταχυνσιόμετρο ή Accelerometer το οποίο έχει την ικανότητα να υπολογίζει το βαθμό της επιτάχυνσής του. Συνήθης τακτική είναι ο συνδυασμός αυτού με αισθητήρες που υπολογίζουν την γωνία περιστροφής. Έτσι τα εξαρτήματα που κατασκευάζονται με τους δύο αυτούς αισθητήρες μπορούν να εξάγουν ακριβέστερα αποτελέσματα που βοηθούν στην υλοποίηση διαφόρων εφαρμογών. Ενδεικτικές εφαρμογές που ωφελούνται από την ενσωμάτωση τέτοιων αισθητήρων είναι: 1) Βιομηχανίες αυτοματοποιημένων γραμμών παραγωγής προϊόντων· 2) Οχήματα αυτόνομης

οδήγησης· 3) Συσκευές οικιακής χρήσης αυτόνομης λειτουργίας, όπως σκούπες καθαρισμού δαπέδων, με ικανότητες ψηφιακής χαρτογράφησης εσωτερικών χώρων· 4) Ηλεκτρονικά παιχνίδια κινητών συσκευών, χειρισμός των χαρακτήρων του παιχνιδιού με κατάλληλη περιστροφή της συσκευής· 5) Κάσκες εικονικής και γυαλιά επαυξημένης πραγματικότητας, χρησιμοποιούν τους αισθητήρες για περιήγηση μέσω περιστροφής του κεφαλιού· και 6) Ιπτάμενες συσκευές μικρού μεγέθους ή Drone, εξισορρόπηση της συσκευής στον αέρα.



Σχήμα Β'.6: Το επιταχυνσιόμετρο MPU-6050.

Στις παραπάνω εφαρμογές μπορεί να ενταχθεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής. Οι αισθητήρες επιτάχυνσης έχουν την ικανότητα να εντοπίζουν μικροσκοπικές μετατοπίσεις υλικών δηλαδή τις ανέπαφες παλμικές δονήσεις στις οποίες υπόκεινται τα κτίσματα. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκε για να καλύψει τις ανάγκες του ανακηρυχθέντος συστήματος είναι ο MPU-6050 [22, 28]. Είναι ένα χαμηλού κόστους εξάρτημα το οποίο παρέχει επαρκή απόδοση για την εξαγωγή αποτελεσμάτων για το παρόν σύστημα. Η ενσωμάτωσή του και η συγκέντρωση της πληροφορίας που είναι ικανό να παρέχει στο σύστημα, επιτυγχάνεται με τη χρήση της βιβλιοθήκης MPU6050 Arduino Library [29] η οποία αναπτύχθηκε από την ομάδα ElectronicCats

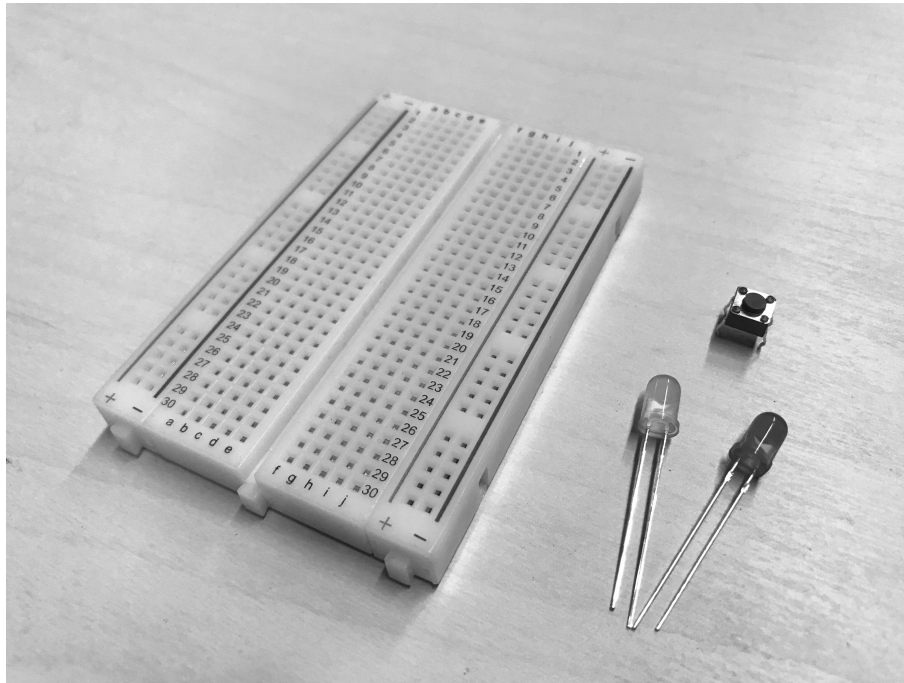
και διανέμεται μέσω του GitHub. Το εξάρτημα περιέχει τεχνολογίες μεταβλητής κατανάλωσης ενέργειας, σημαντικές για εφαρμογές που βασίζονται για τις λειτουργικές τους ανάγκες σε μπαταρίες. Παράλληλα ενσωματώνει έναν κεντρικό επεξεργαστή με ικανότητα υπολογισμού μαθηματικών πράξεων εννέα (9) διαστάσεων και μία ουρά αποθήκευσης νέων μετρήσεων. Εάν η ουρά είναι ενεργοποιημένη τότε η κεντρική πλακέτα Arduino λαμβάνει τα δεδομένα με σειρά που εγγράφηκαν σε αυτήν εναλλακτικά η μέτρηση που εκτελείται από τα επιμέρους εξαρτήματα αποστέλλεται άμεσα στην κεντρική πλακέτα. Οι απαραίτητες πληροφορίες για το σύστημα, που σχετίζονται με τις παλμικές δονήσεις, συλλέγονται από το ενσωματωμένο επιταχυνσιόμετρο. Στα χαρακτηριστικά του περιλαμβάνονται και τα εξής: 1) Εξαγωγή ψηφιακής πληροφορίας επιτάχυνσης τριών (3) διαστάσεων, με προγραμματιζόμενο εύρος ευαισθησίας (± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 16). 2) Ακρίβεια ψηφιακής ανάλυσης βάθους 16-bit. 3) Λειτουργία χαμηλής ισχύος. και 4) Λειτουργία αδιάγνωστης για την κατάσταση του αισθητήρα.

B'.4 Δευτερεύοντα εξαρτήματα

Το σύστημα που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει πληθώρα διαφορετικών εξαρτημάτων τα οποία είναι βιομηχανικού επιπέδου. Αυτό σημαίνει πως χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη εφαρμογών και έτσι δεν παρέχουν φιλικά προς το χρήστη βοηθήματα, αλλά ούτε περιλαμβάνουν κάποιο ήδη ανεπτυγμένο λογισμικό πέραν της βασικής λειτουργικότητας του υλικού. Έτσι η εργασία ανάπτυξης του συστήματος θα ήταν εξαιρετικά δυσκολότερες χωρίς τη χρήση επιπλέον εξαρτημάτων τα οποία έχουν την ικανότητα να εισάγουν και να προκαλέσουν γεγονότα στο σύστημα ή να προβάλλουν πληροφορίες που αφορούν στην κατάσταση του συστήματος. Τα εξαρτήματα αυτά συνδέονται στην κεντρική πλακέτα, όπου στο παρόν σύστημα είναι η Arduino, και αυτή τα χειρίζεται με βάση τον κώδικα που αναπτύχθηκε για τη λειτουργία της.

Ένα σύστημα, στη διάρκεια της ανάπτυξής του, προβάλλει διαφορετικές ανάγκες οι οποίες προκύπτουν από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά που θα αποτελούν το τελικό αποτέλεσμα. Έτσι, είναι απαραίτητη προϋπόθεση εύρυθμης λειτουργίας, η εκτίμηση της πολυπλοκότητας της πληροφορίας που θα πρέπει να προβάλλεται από το σύστημα, ώστε να παρέχεται ενημέρωση σχετικά με την κατάστασή του, όπως επίσης και να εκτιμάται η απαραίτητη πληροφορία προς εισαγωγή σε αυτό. Η πλακέτα Arduino συνοδεύεται από μία πληθώρα εξαρτημάτων που διευκολύνουν την ανάπτυξη συστημάτων και εφαρμογών IoT. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται τα εξής: 1) Οθόνη LCD που περιλαμβάνει

χαμηλής ανάλυσης γραφικά με έκταση δύο (2) σειρές και δυνατότητα προβολής δεκαέξι χαρακτήρων ανά σειρά· 2) Μονοχρωματικοί λαμπτήρες φωτεινής ένδειξης πέντε (5) χρωμάτων, τύπου (LED)· 3) Λαμπτήρας προγραμματιζόμενου χρώματος με εύρος χρωμάτων RGB· 4) Ηχείο χαμηλής έντασης· και 5) Προγραμματιζόμενα κουμπιά.



Σχήμα Β'.7: Ο δευτερεύον εξοπλισμός. Οι λαμπτήρες και το κουμπί για τον έλεγχο του συστήματος και το breadboard όπου συνδέονται.

Αρχικά, κατά την ανάλυση των αναγκών του συστήματος και τον πειραματισμό με τα διαφορετικά εξαρτήματα είχε χρησιμοποιηθεί η οθόνη LCD στην οποία προβάλλονταν κάποια βασικά δεδομένα που αφορούσαν την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Αργότερα όμως και όσο η πολυπλοκότητα, προερχόμενη από την εισαγωγή νέων λειτουργιών και δυνατοτήτων, αυξάνονταν, την ίδια πορεία ακολουθούσε και η πολυπλοκότητα της πληροφορίας που έπρεπε να προβληθεί για τις ανάγκες της ανάλυσης και αποσφαλμάτωσης ή Debug του λογισμικού του συστήματος. Έτσι, η πληροφορία έπρεπε να μεταφέρεται μέσω της σειριακής σύνδεσης της πλακέτας Arduino στον ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου υπάρχει η δυνατότητα προβολής εκτενέστερης πληροφορίας. Χρησιμοποιήθηκαν, όμως και δευτερεύοντα εξαρτήματα για που συνδέθηκαν άμεσα στην κεντρική πλακέτα. Πιο συγκεκριμένα, συνδέθηκαν δύο (2) μονοχρωματι-

κοί λαμπτήρες φωτεινής ένδειξης τύπου LED οι οποίοι προγραμματίστηκαν να ενεργοποιούνται ή να απενεργοποιούνται έπειτα από ορισμένα γεγονότα που συνέβαιναν στο σύστημα. Επίσης, έγινε χρήση ενός (1) προγραμματιζόμενου κουμπιού προκειμένου να προκαλούνται συγκεκριμένα γεγονότα που βοηθούν στη λειτουργία του συστήματος. Τέλος, η κεντρική πλακέτα συνοδευόταν από ένα breadboard οποίο παρέχει επέκταση των pin της ώστε να μπορεί να συνδέεται ένα πλήθος από αισθητήρες ευκολότερα. Στο σύστημα της παρούσας διατριβής συνδέθηκε στο breadboard το επιταχυνσιόμετρο και ο δευτερεύον εξοπλισμός. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, θα αποδοθεί αναλυτικότερα η χρήση και η λειτουργία των δευτερευόντων εξαρτημάτων.

Κεφάλαιο Γ΄

Περιγραφή συστήματος - Λογισμικό

Η ανάπτυξη του συστήματος βασίστηκε σε χαμηλού κόστους υλικά, το καθένα από τα οποία κατασκευάστηκε από διαφορετικές εταιρείες αλλά με τρόπο τέτοιο ώστε να έχουν την ικανότητα να προγραμματιστούν με τη γλώσσα που χρησιμοποιείται για την πλακέτα Arduino. Το κάθε εξάρτημα ξεχωριστά διαθέτει ένα συνοδευτικό λογισμικό για τον προγραμματισμό του. Το επιταχυνσιόμετρο όπως και οι κεραία συνοδεύονται από βιβλιοθήκες οι οποίες διευκολύνουν τη διεπαφή με την κεντρική πλακέτα Arduino. Η κεντρική πλακέτα ενσωματώνει πολλαπλά εξαρτήματα όπως μνήμη, pin για τη διεπαφή με εξωτερικούς αισθητήρες και έναν μικροελεγκτή με τα οποία έχει την ικανότητα να εκτελέσει υπολογισμούς, να αποστέλλει εντολές και να λάβει δεδομένα από τα συνδεδεμένα εξαρτήματα και τους αισθητήρες έτσι ώστε να γίνει εκτέλεση των εφαρμογών που αναπτύσσονται για αυτήν. Για την εύρυθμη λειτουργία της κεντρικής πλακέτας η κατασκευάστρια εταιρεία έχει αναπτύξει ένα λογισμικό το οποίο διαχειρίζεται σε χαμηλό επίπεδο τις λειτουργίες του βασικού υλικού της πλακέτας.

Οι προγραμματιστές που επιθυμούν να αναπτύξουν εφαρμογές βασισμένες στην πλακέτα Arduino μπορούν να επικεντρώνονται μόνο στην ανάπτυξη της αξιοποιώντας το ήδη αναπτυχθέν λογισμικό της εταιρείας. Η ανάπτυξη εφαρμογών για Arduino βασίζεται σε έναν συνδυασμό των γλωσσών προγραμματισμού C/C++. Η εταιρεία παρέχει στους προγραμματιστές δύο τρόπους [30] για την ανάπτυξη εφαρμογών: 1) Διαδικτυακή πλατφόρμα ανάπτυξης, δημιουργώντας έναν διαδικτυακό λογαριασμό μπορεί οποιοσδήποτε να την χρησιμοποιήσει δωρεάν· και 2) Προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino IDE, διανέμεται και αυτό δωρεάν από την εταιρεία αλλά για τη χρήση του δεν

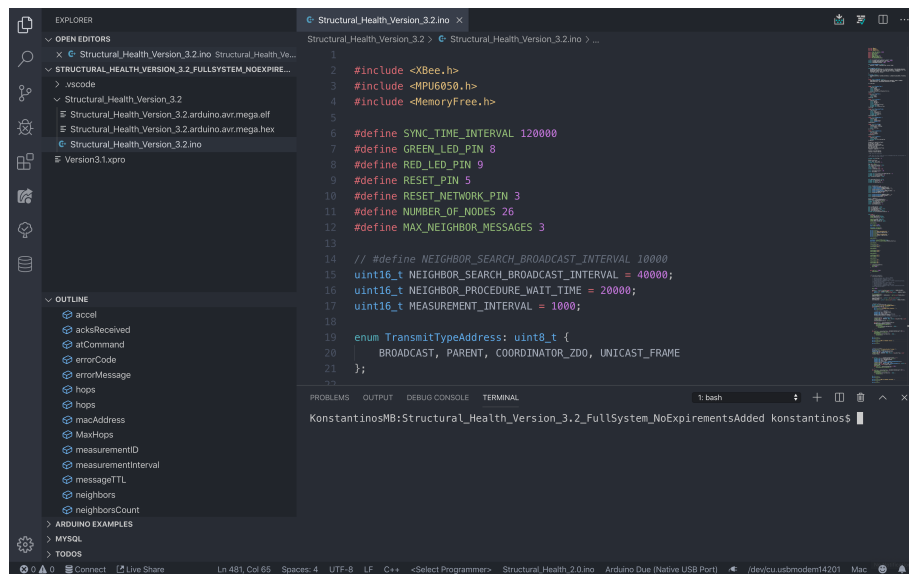
υπάρχει ανάγκη δημιουργίας λογαριασμού, το μόνο που απαιτείται είναι η μεταφόρτωση της εφαρμογής από την διαδικτυακή πύλη της εταιρείας και η εγκατάστασή της στον τοπικό δίσκο του προγραμματιστή.

Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε προσαρμοσμένο λογισμικό το οποίο περιέχει δύο βασικές λειτουργίες: 1) Αλγόριθμος συγχρονισμού όλων των κόμβων του WSN· και 2) Μέθοδος συγχρονισμένης συλλογής δεδομένων από όλους τους αισθητήρες του WSN. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα γίνει ανάλυση των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του λογισμικού της παρούσας διατριβής. Επίσης, γίνεται περιγραφή του αλγορίθμου συγχρονισμού του ασύρματου δικτύου όπως και η μέθοδος συλλογής δεδομένων από τους αισθητήρες. Τέλος, θα γίνει ανάλυση της διαδικασίας ανάπτυξης όπως επίσης και των δυσκολιών που αντιμετωπίστηκαν.

Γ'.1 Εργαλεία Ανάπτυξης

Η ανάπτυξη του λογισμικού για το παρόν σύστημα, έγινε αρχικά στο προγραμματιστικό περιβάλλον που παρέχει η εταιρεία, το Arduino IDE. Οι δυνατότητες που παρέχει είναι περιορισμένες στα απολύτως απαραίτητα, δηλαδή: 1) Παρέχει χρωματισμό του κώδικα κάνοντάς τον ευανάγνωστο· 2) Δίνει τη δυνατότητα μεταφόρτωσης του κώδικα στις πλακέτες Arduino με ρυθμό μία τη φορά· και 3) Παρέχει δυνατότητες διαχείρισης των προγραμματιστικών βιβλιοθηκών. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη χρήσης μίας εφαρμογής η οποία θα παρείχε περισσότερες δυνατότητες κάνοντας έτσι τη διαδικασία ανάπτυξης του λογισμικού για τις πλακέτες ταχύτερη. Η εφαρμογή που επελέγη είναι το Visual Studio Code (VSCode) [31], ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα κατασκευασμένο από την εταιρεία Microsoft το οποίο έχει την ικανότητα να επεκτείνει τις δυνατότητές του μέσω των επεκτάσεων ή Extentions που μπορεί να δεχτεί.

Σημαντικός παράγοντας για τη χρήσης του VSCode υπήρξε η δυνατότητα εκτέλεσης τερματικού εντός της εφαρμογής. Για την ταχύτερη ανάπτυξη του συστήματος δημιουργήθηκε ένα εκτελέσιμο πρόγραμμα ή script γραμμένο σε γλώσσα Python 3 το οποίο είχε τη ικανότητα να εντοπίζει όλες τις συνδεδεμένες πλακέτες Arduino, να συντάσσει ή compile τον κώδικα για αυτές και να τον μεταφορτώνει στις πλακέτες αυτόματα. Αυτή η διαδικασία εάν γινόταν με τη χρήση του Arduino IDE θα διαρκούσε περισσότερο και θα απαιτούσε τη διαμεσολάβηση του προγραμματιστή ο οποίος θα επέλεγε χειροκίνητα την κάθε πλακέτα.



Σχήμα Γ'.1: Το προγραμματιστικό περιβάλλον του Visual Studio Code.

Γ'.2 Ενέργειες Αρχικοποίησης Δικτύου

Για την εύρυθμη λειτουργία του συστήματος αναπτύχθηκαν απαραίτητες ενέργειες με τις οποίες το σύστημα αποκτά πληροφορίες που αφορούν στην τοπολογία του δικτύου που δημιουργείται. Προκειμένου να γίνεται καλύτερη διαχείριση των πληροφοριών του δικτύου, οι ενέργειες αρχικοποίησης όπως και όλες οι διαδικασίες που εκτελούνται είναι κεντρικοποιημένες. Όλες οι ενέργειες εκκινούνται από τον Coordinator λαμβάνοντας έτσι την ιδιότητα του *Initiator*. Βάση της λειτουργικότητας του ZigBee δικτύου σε αυτό μπορεί να υπάρξει μόνο ένας Coordinator, έτσι αποφεύγεται η ανάγκη εύρεσης κεντρικού κόμβου. Οι ενέργειες που εκτελούνται για την αρχικοποίηση του δικτύου είναι οι εξής:

- Εύρεση γειτονικών κόμβων και τοπολογίας του δικτύου,
- Εύρεση κόμβου γονέα και υπολογισμός εκκεντρότητας του Coordinator.

Εύρεση γειτονικών κόμβων και τοπολογίας του δικτύου

Κατά την αρχικοποίηση του δικτύου ο Coordinator αποστέλλει ένα πακέτο δεδομένων στο σύνολο του δικτύου με τη χρήση Broadcast πακέτων και δίνει έτσι την εντολή σε όλους τους κόμβους να εκκινήσουν τη διαδικασία εντοπισμού των γειτονικών κόμβων. Σε αυτήν συμμετέχει και ο ίδιος. Κατά τη λήψη της εντολής οι Routers επιλέγουν μια τυχαία χρονική στιγμή για τα επόμενα 40 δευτερόλεπτα κατά την οποία αποστέλλουν το πρώτο πακέτο Broadcast από μία σειρά τριών (3) πακέτων. Έπειτα γίνεται μετάδοση και των υπολοίπων διαδοχικά ανά δέκα (10) δευτερόλεπτα. Οι πλησιέστεροι κόμβοι που λαμβάνουν τουλάχιστον ένα (1), διατηρούν τη διεύθυνση MAC του κόμβου που μετέδωσε και τον αριθμό των πακέτων που έλαβε από αυτόν.

Ο Coordinator αναμένει για ένα χρονικό διάστημα και έπειτα αποστέλλει εκ νέου μια εντολή με την οποία εκκινείται η διαδικασία ανταλλαγής αριθμού μηνυμάτων. Σύμφωνα με αυτήν, κάθε κόμβος R_i αποστέλλει ένα μήνυμα σε κάθε κόμβο R_j από τον οποίο είχε λάβει τουλάχιστον ένα (1) πακέτο κατά τη διάρκεια της προηγούμενης διαδικασίας. Έπειτα, γίνεται συμφηφισμός του αριθμού των πακέτων που ελήφθησαν από τον κόμβο R_i με τον αριθμό των επιτυχημένων μεταδόσεων από τον R_i προς τον R_j . Εάν το αποτέλεσμα του συμφηφισμού είναι μεγαλύτερο ή ίσο με πέντε (5) τότε οι κόμβοι R_i και R_j προσθέτουν ο ένας τον άλλον στους γείτονές τους. Τέλος, ο Coordinator αναμένει για ένα χρονικό διάστημα και ζητάει από όλους τους κόμβους να του αποστείλουν τους γείτονες τους ώστε να δημιουργήσει τον *Πίνακα Γειτνίασης* ή *Adjacency Matrix* που περιγράφει την τοπολογία του δικτύου.

Εύρεση κόμβου γονέα και υπολογισμός εκκεντρότητας Coordinator

Η επόμενη διαδικασία που εκτελεί ο Coordinator συνδέει όλους τους κόμβους του δικτύου με έναν κόμβο γονέα ή *Parent Node* και επίσης γίνεται υπολογισμός της εκκεντρότητας ή *Eccentricity* του Coordinator. Αρχικά, αποστέλλεται από τον Coordinator ένα Broadcast πακέτο το οποίο περιέχει μια μεταβλητή με τον αριθμό ένα (1). Αυτή χρησιμοποιείται ως μετρητής για το πλήθος των μεταδόσεων που έχει γίνει για το συγκεκριμένο πακέτο. Ο κόμβος που το λαμβάνει αποθηκεύει την διεύθυνση του αποστολέα ως κόμβο γονέα. Ο γονέας στο παρόν σύστημα χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δενδρικής δομής για τη μεταφορά των πακέτων δεδομένων προς τον Coordinator ο οποίος ενεργεί και ως Sink κόμβος, δηλαδή σε αυτόν συγκεντρώνονται οι πληροφορίες όλου του δικτύου. Επίσης, διατηρεί τον αριθμό που περιλαμβάνεται στο πακέτο ως απόσταση από τον Coordinator. Στην περίπτωση όπου κάποιος κόμβος

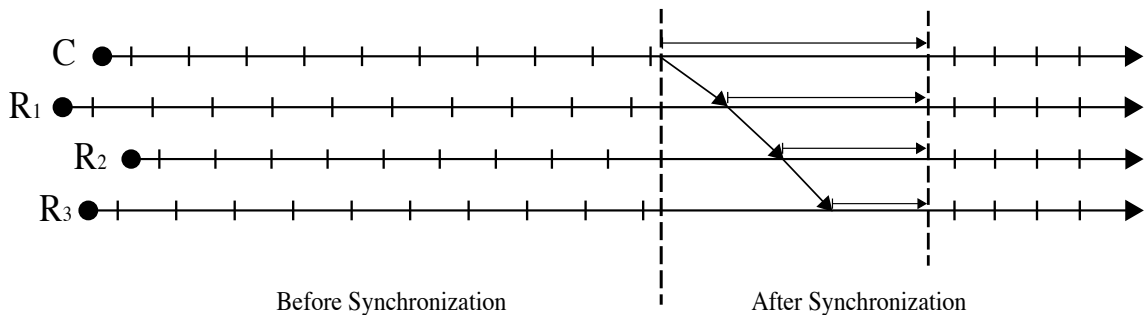
λάβει πακέτο με μικρότερο αριθμό μεταδόσεων τότε ενημερώνει τις παραπάνω πληροφορίες με τις τρέχουσες. Η τελευταία ενέργεια που εκτελεί ο Coordinator είναι να ζητήσει από όλους τους κόμβους να του στείλουν την απόστασή τους από αυτόν που υπολογίστηκε προηγουμένως ώστε συγχρύνοντάς όλες τις αποστάσεις να διατηρήσει την μέγιστη ως την εκκεντρότητα του. Αυτή για το παρόν σύστημα ορίζεται ως Ε.

Γ'.3 Συγχρονισμός WSN και συλλογή δεδομένων

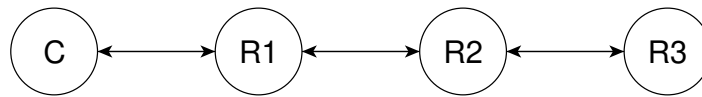
Ο των κόμβων ενός WSN είναι διαδικασία καίριας σημασίας για την αξιοπιστία των δεδομένων που συλλέγονται. Ειδικότερα σε εφαρμογές η απόδοση του αλγορίθμου συγχρονισμού καθορίζει την πυκνότητα λήψης μετρήσεων από τους αισθητήρες. Αυτό συμβαίνει καθώς η μετάδοση των κυμάτων των παλμικών δονήσεων στα δομικά υλικά ενός κτίσματος γίνεται σε πολύ χαμηλούς χρόνους και έτσι η ταχύτητα δειγματοληψίας του συστήματος καθορίζει το επίπεδο ανάλυσης που μπορεί να επιτύχει.

Το σχήμα Γ'.2 περιγράφει τη λειτουργία του συστήματος πριν και μετά την εκτέλεση του αλγορίθμου του συγχρονισμού. Σε αυτό αναπαρίσταται ένα δίκτυο που αποτελείται από τέσσερις (4) κόμβους, τον Coordinator ο οποίος συμβολίζεται με το γράμμα C και τρεις (3) κόμβους σε λειτουργία Router (R1, R2, R3). Η τοπολογία του δικτύου για το παρόν παράδειγμα φαίνεται στο σχήμα Γ'.3. Το σύστημα βασίστηκε για την κατασκευή του σε ασύρματες τεχνολογίες και πιο συγκεκριμένα σε αρχιτεκτονική WSN προκειμένου να αποφευχθούν οι εργασίες εγκατάστασης που απαιτεί ένα ενσύρματο δίκτυο αισθητήρων. Έτσι, οι κόμβοι ενεργοποιούνται ετεροχρονισμένα και η οποιαδήποτε προσπάθεια συλλογής μετρήσεων θα κατέληγε σε χρονικά ασυσχέτιστα δεδομένα η αναπαράσταση των οποίων φαίνεται στην αριστερή πλευρά του σχήματος Γ'.2. Τέλος στην δεξιά πλευρά αναπαρίσταται η συγχρονισμένη συλλογή δεδομένων του συστήματος έπειτα από την εκτέλεση του αλγορίθμου συγχρονισμού.

Η διαδικασία συγχρονισμού που αναπτύχθηκε για το παρόν σύστημα αποτελείται από κεντριοποιημένες διαδικασίες η εκτέλεση των οποίων ρυθμίζει τη λειτουργία των ρολογιών όλων των κόμβων σε ένα κοινό ρολόι. Για την μετάδοση των πληροφοριών σε όλο το WSN με μειωμένα μηνύματα, χρησιμοποιείται η λειτουργία Broadcast του ZigBee κατά την οποία πολλαπλοί κόμβοι μπορούν να λαμβάνουν τις απαραίτητες πληροφορίες ταυτόχρονα. Προκειμένου να αποφευχθεί η ανάγκη εκτέλεσης διαδικασίας



Σχήμα Γ'.2: Η συλλογή δεδομένων από το WSN πριν και μετά τον συγχρονισμό.



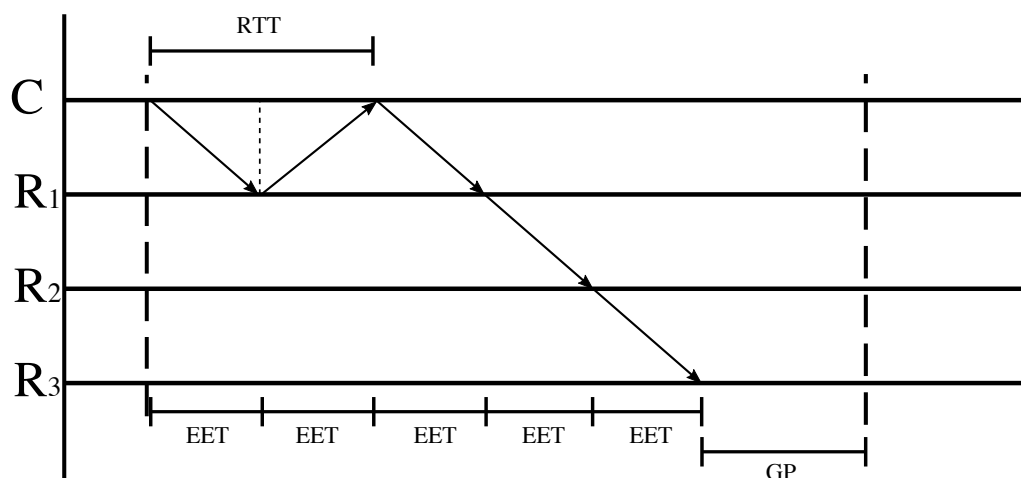
Σχήμα Γ'.3: Η γραφική αναπαράσταση της τοπολογίας του δικτύου για το παράδειγμα του σχήματος Γ'.2.

εύρεσης κεντρικού κόμβου για το WSN αυτός ορίστηκε να είναι ο Coordinator δεδομένου ότι το κάθε ZigBee δίκτυο μπορεί να περιλαμβάνει μόνο έναν. Επίσης, αυτός χρησιμοποιείται ως Sink κόμβος, δηλαδή σε αυτόν συγκεντρώνονται οι μετρήσεις από όλους τους κόμβους του δικτύου.

Η διαδικασία του συγχρονισμού χωρίζεται σε δύο (2) φάσεις οι οποίες αναπαρίστανται στο σχήμα: 1) Υπολογισμός του χρόνου μετάδοσης ενός πακέτου δεδομένων από κόμβο σε κόμβο ή End to End Time (EED)· και 2) Μετάδοση των απαραίτητων πληροφοριών για τον υπολογισμό του κοινού ρολογιού για όλους τους κόμβους μέσω διαδικασίας Broadcast.

Φάση Α': Υπολογισμός χρόνου μετάδοσης

Η διαδικασία υπολογισμού του χρόνου μετάδοσης εκκινείται από το Coordinator. Αρχικά, αποστέλλεται ένα (1) πακέτο δεδομένων Broadcast το οποίο λαμβάνουν οι γειτονικοί κόμβοι Router. Ο Coordinator διατηρεί την χρονική στιγμή ακριβώς πριν τη μετάδοση, t_1 . Αμέσως όσοι το λάβουν το αναμεταδίδουν με Broadcast προκειμένου να το λάβει ο Coordinator ο οποίος κατά τη χρονική στιγμή της λήψης t_2 υπολογίζει τη διαφορά $t_2 - t_1$ η οποία αντιστοιχεί στον χρόνο που χρειάζεται ένα πακέτο να μεταδοθεί δύο (2) φορές, αυτός ονομάζεται Round Trip Time (RTT). Η διαίρεση του RTT χρόνου με το δύο (2) έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό του χρόνου που



Σχήμα Γ'.4: Η διαδικασία συγχρονισμού του WSN και η εκκίνηση συλλογής δεδομένων.

απαιτείται για τη μετάδοση ενός πακέτου ο οποίος ονομάζεται End to End Time (EET). Ο Coordinator διατηρεί τον χρόνο EET για όλες τις μεταδόσεις που αφορούν το συγχρονισμό του δικτύου και η διαδικασία υπολογισμού του εκτελείται μόνο μία φορά πριν τον πρώτο συγχρονισμό του δικτύου.

Φάση Β': Μετάδοση των πληροφοριών σε όλο το δίκτυο

Η δεύτερη φάση του συγχρονισμού είναι η διαδικασία κατά την οποία όλοι οι κόμβοι του δικτύου λαμβάνουν τις απαραίτητες πληροφορίες προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός του κοινού ρολογιού για όλο το δίκτυο. Αρχικά, ο Coordinator εκκινεί μια διαδικασία Πλημμυρίδας ή Flooding, στο πακέτο που μεταδίδει περιλαμβάνονται οι εξής πληροφορίες: 1) Η εκκεντρότητα του Coordinator, E· 2) Μετρητής που αυξάνεται με κάθε μετάδοση του πακέτου ή Time To Leave (TTL)· 3) Ο χρόνος μετάδοσης ενός πακέτου που υπολογίστηκε κατά την πρώτη φάση του συγχρονισμού· 4) Η χρονική στιγμή της μετάδοσης του πρώτου πακέτου συγχρονισμού από τον Coordinator η οποία ορίζεται ως t_c · 5) Η ταχύτητα δειγματοληψίας του συστήματος· και 6) Έναν μετρητή S_i που δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των πακέτων από κόμβο σε κόμβο και δείχνει τον αριθμό των συγχρονισμών που έχουν γίνει στο δίκτυο.

Η τελευταία πληροφορία συμπεριλαμβάνεται στο πακέτο καθότι ο διεκπεραιώνεται με μηνύματα Broadcast και έτσι οι κόμβοι του δικτύου που έχουν παραπάνω από έναν γείτονες λαμβάνουν το πακέτο του συγχρονισμού πολλαπλές φορές. Για αυτόν το λόγο

ο Coordinator όταν εκκινεί έναν νέο κύκλο συγχρονισμού για το δίκτυο, προσθέτει έναν μετρητή τον οποίο οι κόμβοι ελέγχουν προκειμένου να γνωρίζουν εάν έχουν συγχρονιστεί σε εκείνον τον κύκλο συγχρονισμού. Ως κύκλος συγχρονισμού ορίζεται η διαδικασία του συγχρονισμού που εκκινείται από τον Coordinator έως το συγχρονισμό του πιο απομακρυσμένου κόμβου.

Ο κόμβος που λαμβάνει το πακέτο εκτελεί τις παρακάτω ενέργειες: 1) Ελέγχει εάν έχει ήδη συγχρονιστεί στον τρέχον κύκλο συγχρονισμού με βάση τον μετρητή S_i . 2) Αποθηκεύει τη χρονική στιγμή της λήψης t_l όπου του πακέτου συγχρονισμού για μετέπειτα επεξεργασία, αυτό γίνεται προκειμένου να μην δαπανηθεί χρόνος στην επεξεργασία του πακέτου. 3) Αυξάνει το μετρητή TTL κατά ένα (1). 4) Μεταδίδει το πακέτο ώστε να το λάβουν και οι υπόλοιποι κόμβοι. 5) Υπολογίζει τη διαφορά του τοπικού ρολογιού από το κοινό ρολόι όλων των κόμβων σύμφωνα με τη συνάρτηση Γ'.1. και 6) Υπολογίζει τη χρονική στιγμή εκκίνησης λήψης μετρήσεων παλμικών δονήσεων σύμφωνα με τη συνάρτηση Γ'.2, όπου GP είναι μία επιπλέον χρονική περίοδος η οποία προσθέτει επιπλέον καθυστέρηση στην εκκίνηση μετρήσεων με σκοπό να αυξηθούν οι πιθανότητες να γίνει ταυτόχρονη εκκίνηση μετρήσεων από όλους τους κόμβους και MST είναι τα αρχικά της φράσης Measurement Start Time. Ο υπολογισμός της χρονικής στιγμής εκκίνησης για όλους τους κόμβους συναρτήσει της απόστασης από τον Coordinator, φαίνεται στο σχήμα Γ'.2.

Η κάθε μέτρηση που λαμβάνουν οι κόμβοι συνοδεύεται από τη χρονική στιγμή της μέτρησης η οποία υπολογίζεται αφαιρώντας από την τρέχουσα χρονική στιγμή τη διαφορά TD από το κοινό ρολόι. Η συνάρτηση υπολογισμού της διαφοράς TD, χρησιμοποιεί τον αριθμό των μεταδόσεων του πακέτου TTL σε συνδυασμό με την εκτίμηση χρόνου για τη μετάδοση ενός πακέτου EET, ώστε να μειωθεί το ποσοστό απόκλισης των κόμβων από το κοινό ρολόι.

$$TD = t_l - t_c - (EET * TTL) \quad (\Gamma'.1)$$

$$MST = EET * (E - TTL) + GP \quad (\Gamma'.2)$$

Κεφάλαιο Δ΄

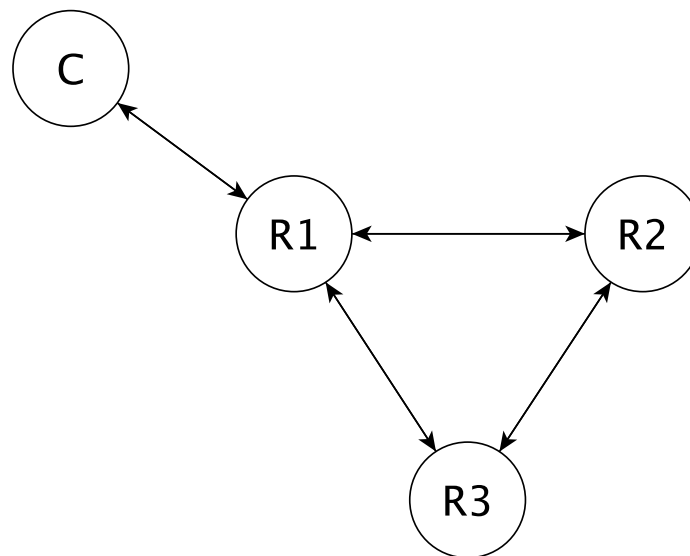
Πειράματα και Αποτελέσματα

Ο υπολογισμός του χρόνου στο σύστημα που αναπτύχθηκε γίνεται από την κεντρική πλακέτα Arduino. Περιβαλλοντικές συνθήκες όπως η θερμοκρασία αλλά και η κατασκευή της κάθε πλακέτας επηρεάζουν τη διαδικασία υπολογισμού του χρόνου και έτσι ο ρυθμός μεταβολής του χρόνου μεταξύ διαφορετικών πλακετών διαφέρει. Η διαδικασία του συγχρονισμού θα πρέπει να εκτελείται παραπάνω από μία (1) φορές κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος καθώς ο υπολογισμός του χρόνου από τους διαφορετικούς κόμβους του δικτύου, επηρεάζεται από πολλές συνθήκες και έτσι, έπειτα από ένα χρονικό διάστημα λειτουργίας, παρατηρούνται χρονικές αποκλίσεις μεταξύ των διαφορετικών κόμβων. Αυτός ο παράγοντας επηρεάζει τη δειγματοληπτική ικανότητα (ταχύτητα λήψης μετρήσεων, χρονική ταύτιση και σύγκριση των δεδομένων).

Προκειμένου να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα του συγχρονισμού που αναπτύχθηκε για το παρόν σύστημα, διεξήχθησαν τρία (3) πειράματα. Το πρώτο πείραμα δείχνει τις χρονικές αποκλίσεις που έχουν οι κόμβοι αμέσως μετά τη διαδικασία του συγχρονισμού. Για το δεύτερο πείραμα γίνεται καταμέτρηση ελεγχόμενων γεγονότων κρούσεων και σύγκριση των χρονικών τιμών κατά τις οποίες ο κάθε κόμβος εντόπισε το γεγονός ώστε να αποδοθεί μια εκτίμηση για την εξέλιξη των ρολογιών των κόμβων έπειτα από το πέρασμα του χρόνου χωρίς νέο συγχρονισμό. Το τρίτο πείραμα χρησιμοποιεί λειτουργίες διακοπής εκτέλεσης κώδικα προκειμένου να γίνει ταυτόχρονη καταμέτρηση των ρολογιών όλων των κόμβων.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων οι κόμβοι που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτά λειτουργούσαν σε κοινό χώρο. Έτσι, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα δίκτυο στο οποίο

η εκκεντρότητα του Coordinator, όπως επίσης και η διάμετρός του, είναι μεγαλύτερη του ενός, αναπτύχθηκε λογισμικό το οποίο απέδιδε διαφορετικούς γείτονες στον κάθε κόμβο. Με αυτόν τον τρόπο ενώ όλοι οι κόμβοι μπορούσαν και λάμβαναν όλα τα μεταδιδόμενα πακέτα, αγνοούσαν αυτά που δεν προέρχονταν από κάποιον από τους γειτονικούς. Η τοπολογία του δικτύου είναι αυτή της εικόνας Δ'.1.



Σχήμα Δ'.1: Η τοπολογία που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων.

Δ'.1 Πείραμα Α': Καταμέτρηση Απόδοσης Συγχρονισμού Ρολογιών

Για το παρόν πείραμα έγινε χρήση της λειτουργίας διακοπής εκτέλεσης κώδικα ή Interrupt της κεντρικής πλακέτας Arduino. Η λειτουργία Interrupt παρέχει τη δυνατότητα διακοπής της σειριακής εκτέλεσης του κώδικα με σκοπό την εκτέλεση ενός κώδικα ο οποίος δεν αποτελεί μέρος του κυρίως προγράμματος. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης ενός Interrupt, δεν υπάρχει δυνατότητα καταμέτρησης του χρόνου και έτσι για την παρούσα εφαρμογή δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην έκταση του κώδικα του Interrupt καθώς η καταμέτρηση του χρόνου αποτελεί το κυρίως ζήτημα. Εάν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του Interrupt γίνει καταμέτρηση του χρόνου το αποτέλεσμα θα

είναι η χρονική στιγμή πριν την εισαγωγή του προγράμματος σε αυτό. Κατά τον τερματισμό του κώδικα του Interrupt, συνεχίζεται η εκτέλεση του κυρίως προγράμματος από τη γραμμή στην είχε σταματήσει προηγουμένως.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων δημιουργήθηκε δίκτυο από τέσσερις (4) κόμβους με στατική τοπολογία η οποία φαίνεται στο σχήμα Δ'.1. Σε αυτήν ο Coordinator βρίσκεται στο άκρο του δικτύου και συνδέεται σε αυτό μόνο με τον Router 1 (R_1). Επίσης, οι τρεις Routers μεταξύ τους αποτελούν έναν πλήρη γράφο.

Το παρόν πείραμα διεξήχθη με σκοπό την εκτίμηση της απόδοσης της διαδικασίας του συγχρονισμού που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Οι κόμβοι είναι διατεταγμένοι σύμφωνα με την τοπολογία που περιγράφηκε παραπάνω. Αρχικά ο Coordinator έπειτα από την αρχικοποίηση του δικτύου, συγχρονίζει το δίκτυο σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο Γ'.3. Όλοι οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι σε ένα κοινό καλώδιο το οποίο διεγείρει ο Coordinator ένα (1) δευτερόλεπτο έπειτα από κάθε συγχρονισμό ώστε να προκληθεί ένα γεγονός Interrupt. Ο κύκλος του πειράματος που αποτελείται από έναν συγχρονισμό του δικτύου και ένα γεγονός Interrupt εκτελείται πολλές φορές κατά τη διάρκειά του. Έπειτα, εντός του Interrupt, ο Coordinator διατηρεί την τρέχουσα χρονική στιγμή του t_c και οι Routers υπολογίζουν τη χρονική στιγμή t_r αφαιρώντας από το τρέχον ρολόι τους τη διαφορά από το ρολόι του Coordinator σύμφωνα με το οποίο συγχρονίστηκαν νωρίτερα.

Προκειμένου να γίνει σύγκριση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων για τη διαδικασία συγχρονισμού, οι κόμβοι Router πρέπει να αποστείλουν τη χρονική στιγμή που υπολόγισαν στον Coordinator. Η διαδικασία αποστολής ενός πακέτου δεδομένων υπολογίστηκε πως είναι τουλάχιστον 35 χιλιοστά του δευτερολέπτου ή millisecond (ms) ανάλογα με το μέγεθος των δεδομένων. Η λειτουργικότητα του Interrupt δεν επιτρέπει την καταμέτρηση του χρόνου για τη διάρκεια εκτέλεσης του και έτσι στην περίπτωση που οι κόμβοι μετέδιδαν το πακέτο δεδομένων κατά την εκτέλεση του Interrupt, θα δημιουργούνταν μεγάλη χρονική απόκλιση μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Για αυτόν τον λόγο, η αποστολή του πακέτου εκτελείται μετά το πέρας της εκτέλεσης του κώδικα του Interrupt. Όταν ο Coordinator λαμβάνει τα δεδομένα, υπολογίζει τη διαφορά των ρολογιών t_c και t_r και μεταφέρει όλες τις πληροφορίες μέσω της σειριακής σύνδεσης σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν: 1) τη διεύθυνση MAC του απομακρυσμένου κόμβου· 2) την απόσταση του εκάστοτε κόμβου από τον Coordinator η οποία μετράτε σε Hop· 3) τα ρολόγια t_c και t_r · και 4) τη διαφορά των ρολογιών αυτών. Οι μετρήσεις και ο υπολογισμός του χρόνου γίνονται σε εκατομ-

μυριοστά του δευτερολέπτου ή microsecond ώστε να υπάρχει αρκετά υψηλή ακρίβεια στις υπολογιζόμενες αποκλίσεις χρόνου. Η συνολική διάρκεια του πειράματος ανέρχεται στα 34 λεπτά. Λόγω του μεγάλου όγκου πληροφορίας που συλλέχθηκε από την εκτέλεση του παρόντος πειράματος, έχει γίνει επιλογή ενός μέρους αυτών για σκοπούς επίδειξης.

Πίνακας Δ'.1: Πέντε κύκλοι συγχρονισμού με τις μικρότερες αποκλίσεις ρολογιών.

R_i	Hops	t_c	t_r	t_r - t_c
1	1	256055416	256055802	386
2	2	256055416	256055764	348
3	2	256055416	256055420	4
1	1	1768242300	1768242310	10
2	2	1768242300	1768243296	996
3	2	1768242300	1768243128	828
1	1	3156664444	3156664462	18
2	2	3156664444	3156665496	1052
3	2	3156664444	3156665340	896
1	1	3912758396	3912758650	254
2	2	3912758396	3912758480	84
3	2	3912758396	3912758368	28
1	1	1562263328	1562263706	34
2	2	1562263328	1562263328	344
3	2	1562263328	1562263706	34

Οι αποκλίσεις στον χρόνο που υπολογίζουν οι Router οφείλονται στα πρωτόκολλα που εκτελούνται στα χαμηλότερα επίπεδα της κεραίας. Πιο συγκεκριμένα, στο επίπεδο MAC εκτελείται, αυτόματα από την κεραία, ο αλγόριθμος Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) κατά την οποία η κεραία ακούει το κανάλι στο οποίο επρόκειτο να μεταδώσει το πακέτο, εάν εκτελούνται μεταδόσεις εκείνη τη στιγμή. Στην περίπτωση που γίνεται μετάδοση εκείνη τη στιγμή, η κεραία επιλέγει μία τυχαία χρονική στιγμή προκειμένου να προσπαθήσει εκ νέου να μεταδώσει, διαφορετικά εκκινεί τη μετάδοση. Αυτό σημαίνει πως ο χρόνος μετάδοσης EET που υπολογίζεται κατά τη πρώτη φάση του συγχρονισμού του δικτύου, αποτελεί μία εκτίμηση του πραγματικού

Πίνακας Δ'.2: Πέντε κύκλοι συγχρονισμού με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις ρολογιών.

R_i	Hops	t_c	t_r	$t_r - t_c$
1	1	768032892	768030274	2618
2	2	768032892	768030740	2152
3	2	768032892	768029168	3724
1	1	868053108	868050478	2630
2	2	868053108	868050248	2860
3	2	868053108	868048624	4484
1	1	2956621944	2956618910	3034
2	2	2956621944	2956619072	2872
3	2	2956621944	2956617448	4496
1	1	1962348668	1962345786	2882
2	2	1962348668	1962345744	2924
3	2	1962348668	1962344044	4624
1	1	211980408	211977442	2966
2	2	211980408	211977036	3372
3	2	211980408	211975396	5012

χρόνου μετάδοσης.

Ο συγχρονισμός κάθε κόμβου εξαρτάται από την κατάσταση στην οποία βρίσκεται κατά τη χρονική στιγμή λήψης του πακέτου συγχρονισμού από τη δεύτερη φάση του συγχρονισμού. Πιο συγκεκριμένα, οι κόμβοι έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν μία εντολή τη φορά έτσι όταν λαμβάνει ένα νέο πακέτο εάν εκείνη τη στιγμή εκτελεί κάποια άλλη διεργασία τότε θα πρέπει να την ολοκληρώσει ώστε να κάνει διαχείριση του ληφθέντος πακέτου. Το γεγονός αυτό προκαλεί επιπλέον καθυστερήσεις και κατ'επέκτασιν χρονικές αποκλίσεις από το ρολόι του Coordinator σύμφωνα με το οποίο συγχρονίζονται οι κόμβοι.

Το παρόν πείραμα έδειξε πως ο που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, έχει απόδοση από τέσσερα (4) microsecond έως 5012 microsecond. Ο πίνακας Δ'.2 περιέχει πέντε κύκλους συγχρονισμού κατά τους οποίους μετρήθηκαν οι μικρότερες χρονικές αποκλίσεις και ο πίνακας Δ'.1 περιέχει τις μεγαλύτερες. Ο χρόνος EET που υπολογίστηκε από τη διαδικασία του συγχρονισμού στο παρόν πείραμα είναι

ίσος με 13210 microsecond. Τέλος, τα δεδομένα των πινάκων είναι διατεταγμένα κατά αύξουσα σειρά και ανά τριάδες (κύκλος συγχρονισμού) σύμφωνα με τα έντονα (bold) δεδομένα.

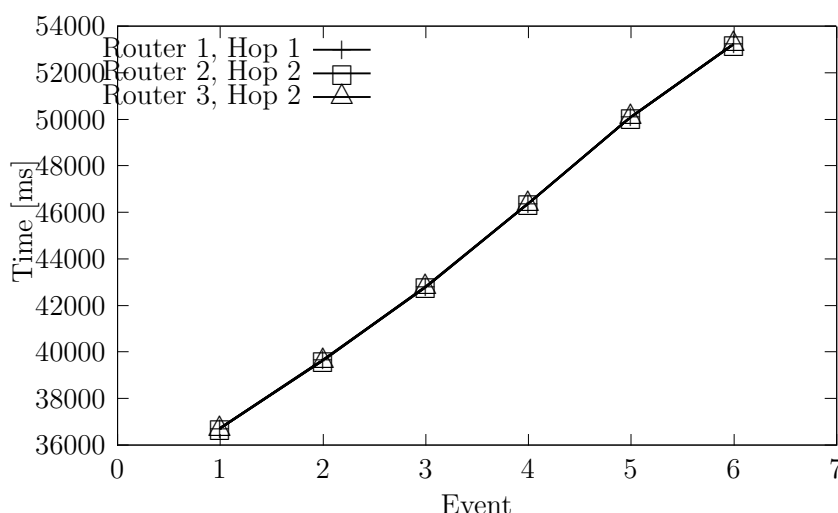
Δ'.2 Πείραμα Β': Καταμέτρηση Ελεγχόμενων Γεγονότων Κρούσης

Το παρόν πείραμα διεξήχθη με σκοπό την εκτίμηση του χρονικού διαστήματος για τον οποίο οι κόμβοι παραμένουν συγχρονισμένοι. Η τοπολογία του δικτύου είναι αυτή που αναπαρίσταται στο σχήμα Δ'.1. Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά τέσσερις (4) κόμβοι, ένας από αυτούς είναι ο Coordinator. Οι τρεις Router, για τις ανάγκες του πειράματος, τοποθετήθηκαν σε κοινή επιφάνεια με ίσες αποστάσεις από ένα κεντρικό σημείο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των γεγονότων κρούσης. Επίσης, όλοι οι Router έχουν συνδεδεμένο ένα επιταχυνσιόμετρο που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των ελεγχόμενων γεγονότων.

Για τις ανάγκες του πειράματος, αναπτύχθηκε μία ορισμένη συμπεριφορά για το WSN βάση της οποίας οι κόμβοι συνέλεξαν τα απαραίτητα δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, τα βήματα που ακολουθούν καθόρισαν τη διαδικασία συλλογής των απαραίτητων δεδομένων από το πείραμα: 1) Ο Coordinator συγχρόνισε το δίκτυο· 2) οι Router συγχρονίζουν και εκκινούν τη διαδικασία λήψης μετρήσεων όπως αυτή περιγράφηκε στο κεφάλαιο Γ'.3 στην Φάση Β' του συγχρονισμού· και 3) Ξεκίνησαν να πραγματοποιούνται γεγονότα κρούσης.

Το πείραμα διήρκεσε περίπου για δύο ώρες και κατά τη διάρκεια αυτή πραγματοποιήθηκαν συνολικά 90 ελεγχόμενα γεγονότα κρούσης. Η ταχύτητα δειγματοληψίας του κάθε κόμβου ανέρχεται στα 100Hz και η μέτρηση του χρόνου γίνεται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου ή millisecond. Είναι φανερό πως τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν αρκετά ογκώδη καθώς για κάθε λεπτό που εκτελούνταν το πείραμα ο κάθε κόμβος παρήγαγε περίπου 6000 μετρήσεις από το επιταχυνσιόμετρο οι οποίες συνοδεύονταν από τη χρονική στιγμή της μέτρησής τους. Σε μια προσπάθεια μείωσης των δεδομένων έγινε η κατάλληλη επεξεργασία τους προκειμένου να διατηρηθούν αποκλειστικά οι τιμές που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των γεγονότων.

Για λόγους επίδειξης επελέγησαν δώδεκα (12) από τα συνολικά 90 γεγονότα κρούσης, έξι (6) από τα οποία πραγματοποιήθηκαν στα πρώτα στάδια του πειράματος και

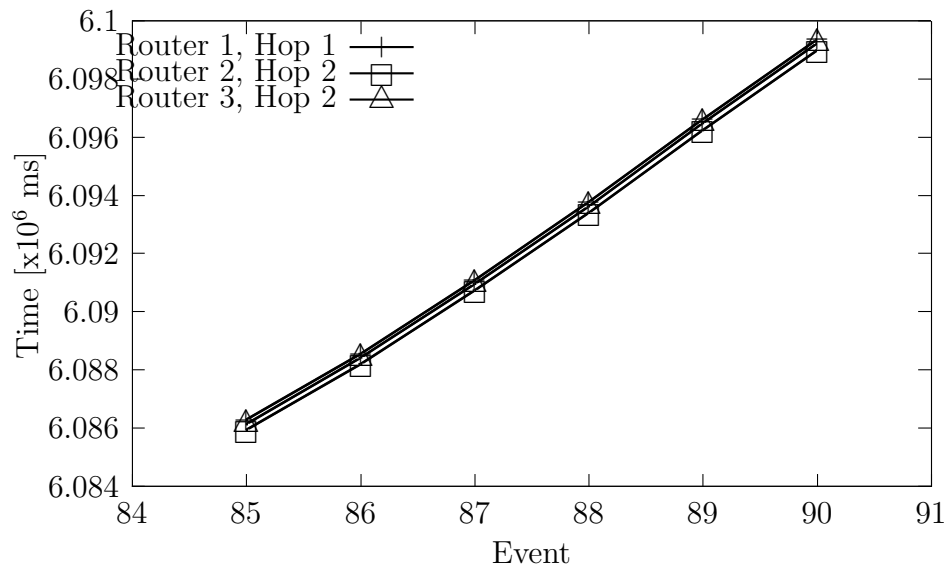


Σχήμα Δ'.2: Τα πρώτα έξι (6) γεγονότα μετά τον συγχρονισμό του WSN.

μερικές στιγμές μετά το συγχρονισμό του WSN και τα υπόλοιπα έξι (6) είναι τα γεγονότα που συνέβησαν λίγο πριν το τέλος του πειράματος. Για κάθε γεγονός που αναπαρίσταται έχει γίνει επιλογή της πρώτης τιμής της διαταραχής. Ο άξονας των x περιέχει τον αριθμό του γεγονότος και ο άξονας των y τη χρονική στιγμή. Το σχήμα 1 αναπαριστά τα πρώτα γεγονότα χρούσης που ανίχνευσαν οι τρεις Router και το σχήμα 2 αναπαριστά τα γεγονότα πριν τη λήξη του πειράματος.

Στο σχήμα Δ'.2 παρατηρείται πως οι χρονικές στιγμές των γεγονότων που καταμετρήθηκαν συμπίπτουν ή βρίσκονται εξαιρετικά κοντά, αυτό συμβαίνει καθώς το WSN σε εκείνες τις στιγμές συγχρονίστηκε και οι υπολογισμός του χρόνου μεταξύ των κόμβων διαφέρει λίγο ή καθόλου. Έτσι τα ευθύγραμμα τμήματα του σχήματος κινούνται παράλληλα. Στο σχήμα Δ'.3 διακρίνονται οι πρώτες τιμές του κάθε γεγονότος χρούσης λίγο πριν το πέρας του πειράματος. Παρατηρείται πως σε αυτήν τη περίπτωση τα ευθύγραμμα τμήματα δείχνουν να αποκλίνουν μεταξύ τους. Αυτό σημαίνει πως η καταμέτρηση του χρόνου από τον κάθε κόμβο διαφέρει και έτσι ενώ το κάθε γεγονός της συνέβη την ίδια χρονική στιγμή για όλους τους κόμβους, ο χρόνος που μετρήθηκε από τον καθένα ατομικά διαφέρει και προκαλούνται αποκλίσεις μεταξύ τους. μέγιστη απόκλιση μεταξύ δύο κόμβων του δικτύου στο τελευταίο γεγονός χρούσης είναι ίση με 290millisecond. Το γεγονός των αποκλίσεων της καταμέτρησης χρόνου αποφέρει ως επακόλουθο την αδυναμία σύγκρισης και εξαγωγής συμπερασμάτων για την με ακρίβεια.

Δ'.3. Πείραμα Γ': Καταμέτρηση της Χρονικής Απόκλισης με Interrupt³⁷

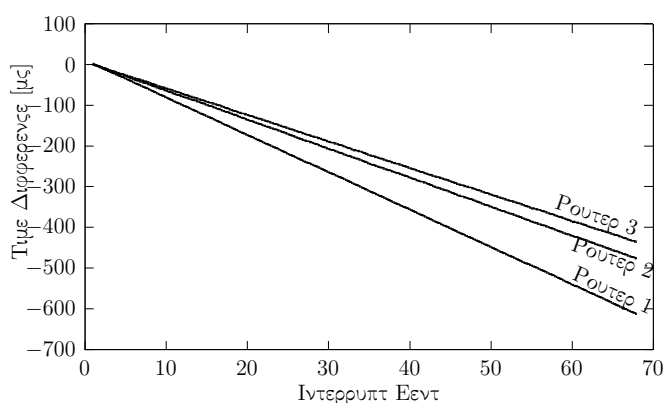


Σχήμα Δ'.3: Τα πρώτα έξι (6) τελευταία γεγονότα του πειράματος.

Δ'.3 Πείραμα Γ': Καταμέτρηση της Χρονικής Απόκλισης με Interrupt

Το τρίτο πείραμα διεξήχθη με σκοπό την καταμέτρηση των αποκλίσεων με εναλλακτικό τρόπο από αυτόν του πειράματος που περιγράφηκε παραπάνω. Για το παρόν πείραμα έγινε αξιοποίηση μιας λειτουργίας του Arduino που λέγεται Interrupt. Αυτή η λειτουργία σκοπό της έχει την εκτέλεση ενός κώδικα που δεν αποτελεί μέρος του βασικού κώδικα της εφαρμογής ώστε να προκληθεί κάποιο γεγονός. Προκειμένου να γίνει εκτέλεση ενός Interrupt οι κόμβοι θα πρέπει να είναι συνδεδεμένοι σε ένα κοινό καλώδιο το οποίο στην περίπτωση του πειράματος αυτού, διεγείρει ο Coordinator. Έτσι οι κόμβοι λαμβάνοντας το σήμα αυτό εκτελούν το Interrupt ταυτόχρονα. Η λειτουργία αυτή για τη διάρκεια των υπολογισμών/εντολών που εκτελούνται, σταματά τον υπολογισμό του χρόνου, έτσι οι εντολές αυτές θα πρέπει να είναι σύντομες και ίδιες σε όλους τους κόμβους προκειμένου να αποφευχθεί μεγάλη απώλεια χρόνου και αποκλίσεις μεταξύ τους.

Για το πείραμα αναπτύχθηκε η τοπολογία που φαίνεται στο σχήμα Δ'.1. Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις κόμβοι ένας εκ των οποίων είναι ο Coordinator και τρεις Router. Οι διαδικασίες που αναπτύχθηκαν είναι κεντριοποιημένες και ελέγχονται από αυτόν.



Σχήμα Δ'.4: Ο υπολογισμός του χρόνου από τους κόμβους με τη χρήση των Interrupts.

Ο του δικτύου εκτελέστηκε μία φορά μόνο ώστε να παρατηρηθεί η εξέλιξη των ρολογιών του κάθε κόμβου. Η διάρκεια του πειράματος ήταν δώδεκα (12) λεπτά και συνολικά έγινε καταμέτρηση 68 γεγονότων Interrupt από τον κάθε Router.

Οι ενέργειες που εκτελέστηκαν είναι οι εξής: 1) Ο Coordinator συγχρόνισε το δίκτυο κατά την αρχικοποίηση του· 2) οι κόμβοι έλαβαν τον συγχρονισμό και έπειτα δεν εκτέλεσαν καμία ενέργεια· 3) Ο Coordinator ξεκίνησε την εκτέλεση των Interrupt ανά τακτά χρονικά διαστήματα, με δέκα (10) δευτερόλεπτα διαφορά μεταξύ των γεγονότων· 4) κατά τη λήψη του σήματος που ενεργοποιούσε τον κώδικα του Interrupt οι Router υπολόγιζαν τη χρονική στιγμή t_r με βάση τη διαφορά τους από τον Coordinator που υπολόγισαν κατά τη διαδικασία του συγχρονισμού και ο Coordinator διατηρούσε την τρέχουσα χρονική στιγμή t_c · 5) έπειτα οι Router έστειλαν τα δεδομένα στον Coordinator μέσω της κεραίας· 6) ο Coordinator υπολόγιζε τη διαφορά των ρολογιών t_c και t_r · και 7) μετέφερε τα δεδομένα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου ήταν συνδεδεμένος.

Παρατηρήθηκε πως ο υπολογισμός του χρόνου από τους κόμβους άρχισε να παρουσιάζει αποκλίσεις αρκετά γρήγορα σε σύγκριση με το πείραμα Β' που περιγράφηκε παραπάνω. Για την ακρίβεια στο πείραμα Β' στα έξι πρώτα λεπτά δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αποκλίσεις στον υπολογισμό του χρόνου από τους κόμβους (όχι μεγαλύτερη των 2 millisecond) ενώ στο παρόν πείραμα η μέγιστη απόκλιση μεταξύ δύο Router στα έξι λεπτά του πειράματος είναι 87millisecond. Οι τιμές των αποκλίσεων των ρολογιών φαίνονται στον πίνακα Δ'.3. Ο πίνακας περιέχει ένα μέρος των δεδομένων για λόγους επίδειξης. Το διάγραμμα Δ'.4 αναπαριστά την εξέλιξη του χρόνου του κάθε κόμβου στη διάρκεια του πειράματος.

Δ'.3. Πείραμα Γ': Καταμέτρηση της Χρονικής Απόκλισης με Interrupt³⁹

Πίνακας Δ'.3: Οι χρονικές αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν από τον Coordinator κατά τη διάρκεια του πειράματος των Interrupts. Η καταμέτρηση γίνεται σε χιλιοστά του δευτερολέπτου ή millisecond.

Εντ	Ρουτερ 1	Ρουτερ 2	Ρουτερ 3
1	2	0	0
34	-301	-235	-214
68	-613	-477	-436

Κεφάλαιο Ε΄

Σύνοψη και Συμπεράσματα

Το κύριο αντικείμενο ανάλυσης και επεξεργασίας αυτής της διατριβής υπήρξε η ανίχνευση της υγείας ιστορικών κτηρίων. Ο εντοπισμός της υγείας των κτηρίων είναι η διαδικασία ανίχνευσης και καταμέτρησης των παλμικών δονήσεων του με τη χρήση ενός δικτύου αισθητήρων. Τα δύο είδη των συστημάτων αυτών είναι Ενσύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων. Η χρήση ενσύρματων τεχνολογιών απαιτεί την εγκατάσταση καλωδιακής υποδομής γεγονός που αυξάνει το κόστος σε χρήμα και χρόνο για την εγκατάσταση. Επίσης, η εγκατάσταση συστημάτων που χρησιμοποιούν καλωδιακή υποδομή για την επικοινωνία των κόμβων του δικτύου προβάλλει κινδύνους για την εγκατάσταση τους σε κτήρια καίρια σημασίας όπως είναι τα ιστορικά τα οποία έχουν υποστεί φθορά λόγω παλαιότητας. Έτσι παρουσιάζεται η ανάγκη χρήσης τεχνολογιών που μειώνουν τις πιθανότητες φθοράς ή και καταστροφής των κτηρίων αυτών.

Για την παρούσα διατριβή έγινε επιλογή χαμηλού κόστους υλικών τα οποία αξιοποιούν τις ασύρματες τεχνολογίες για την επικοινωνία και διασύνδεση των κόμβων σε ένα κοινό τοπικό προσωπικό δίκτυο. Έτσι αναπτύχθηκε ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων ή . Τα οφέλη των τεχνολογιών αυτών είναι η ευκολία εγκατάστασης των κόμβων και αποδέσμευση από την ανάγκη εγκατάστασης καλωδιακής υποδομής για τη λειτουργία του δικτύου. Τα συστήματα, όμως, που για την ανάπτυξη και λειτουργία τους βασίζονται σε τεχνολογίες ασύρματων μεταδόσεων έχουν την ανάγκη συγχρονισμού των κόμβων προκειμένου τα δεδομένα για που συλλέγονται να υπάρχει χρονική συσχέτιση. Διαφορετικά το σύστημα δεν θα είχε την ικανότητα να εξάγει έγκυρα συμπεράσματα για την κατάσταση ενός κτηρίου.

Ο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής βασίζεται στη διαδικασία του flooding με τη χρήση broadcast μεταδόσεων. Όλες οι διαδικασίες που εκτελούνται για τον συγχρονισμό είναι κεντριοποιημένες και για την εκκίνησή τους επιλέγει ο Coordinator, έτσι δίνεται η δυνατότητα βέλτιστου ελέγχου των πληροφοριών που μεταδίδονται στο δίκτυο. Τέλος, η ολοκλήρωση του συγχρονισμού του δικτύου γίνεται σε δύο (2) φάσεις από τις οποίες η πρώτη εκτελείται μία (1) φορά κατά την αρχικοποίηση του δικτύου με σκοπό τον υπολογισμό των απαραίτητων παραμέτρων που χρησιμοποιούνται από όλους τους κόμβους για να συγχρονιστούν με βάση το ρολόι του Coordinator αλλά και να εκκινήσουν τη διαδικασία συλλογής δεδομένων με συγχρονισμένο τρόπο.

Από τα πειράματα που διεξήχθησαν το πρώτο είχε ως σκοπό την εκτίμηση της απόδοσης της διαδικασίας του συγχρονισμού. Το αποτέλεσμα του πειράματος έδειξε πως ο έχει απόδοση που κινείται ανάμεσα στο εύρος τιμών μεταξύ του τέσσερα (4) και του 5012. Οι τιμές αυτές μετρώνται σε microsecond και υποδηλώνουν την απόκλιση των ρολογιών των κόμβων που συγχρονίζουν τα ρολόγια τους με βάση το ρολόι του κεντρικού κόμβου (Coordinator). Το δεύτερο πείραμα όπως και το τρίτο σκοπό είχαν να δείξουν ότι τα ρολόγια των κόμβων λόγω κατασκευής υπολογίζουν τον χρόνο λίγο διαφορετικά και έτσι προκαλούνται χρονικές αποκλίσεις μεταξύ τους έπειτα από ένα χρονικό διάστημα από την εκτέλεση του συγχρονισμού. Και τα δύο πειράματα παρήγαγαν ίδια αποτελέσματα με τη διαφορά ότι στο πείραμα που αξιοποιούσε τη διαδικασία διακοπής εκτέλεσης κώδικα ή Interrupt χρονικές αποκλίσεις έγιναν εμφανείς αρκετά ταχύτερα. Αυτό συμβαίνει καθώς το Interrupt επηρεάζει την εκτέλεση του κυρίως κώδικα των συσκευών προκαλώντας απώλειες χρόνου.

Συνοψίζοντας, η διαδικασία του εντοπισμού της υγείας κτηρίων απαιτεί την καταμέτρηση των παλμικών δονήσεων του και αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση συστημάτων που αξιοποιούν τεχνολογίες δικτύων αισθητήρων. Για την προστασία των ιστορικών κτηρίων και τη διαφύλαξη της ακεραιότητάς τους είναι συνετό να γίνει χρήση ασύρματων δικτύων αισθητήρων τα οποία δεν απαιτούν αυξημένη τροποποίηση του κτηρίου για την εγκατάστασή τους. Τα ασύρματα δίκτυα όμως προβάλλουν την ανάγκη εκτέλεσης μιας διαδικασίας συγχρονισμού ώστε οι πληροφορίες που συλλέγονται να είναι χρονικά συσχετισμένες.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Campbell-Kelly, *Computer, Student Economy Edition: A History of the Information Machine*. Routledge, 2018.
- [2] T. Berners-Lee, D. Dimitroyannis, A. J. Mallinckrodt, and S. McKay, “World wide web,” *Computers in Physics*, vol. 8, no. 3, pp. 298–299, 1994.
- [3] T. Berners-Lee and M. Fischetti, *Weaving the Web: The Original Design and Ultimate Destiny of the World Wide Web by Its Inventor*. DIANE Publishing Company, 2001.
- [4] I. Lee and K. Lee, “The internet of things (iot): Applications, investments, and challenges for enterprises,” *Business Horizons*, vol. 58, no. 4, pp. 431 – 440, 2015.
- [5] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer Networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393 – 422, 2002.
- [6] M. P. Douride, Z. Tafa, G. Dimidi, and V. Milutinovic, “A survey of military applications of wireless sensor networks,” in *2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, pp. 196–199, June 2012.
- [7] C. R. Farrar and K. Worden, “An introduction to structural health monitoring,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, 2006.
- [8] G. Anastasi, G. L. Re, and M. Ortolani, “Wsns for structural health monitoring of historical buildings,” in *2009 2nd Conference on Human System Interactions*, pp. 574–579, May 2009.

- [9] M. Celebi, “Seismic instrumentation of buildings (with emphasis on federal buildings),” tech. rep., Citeseer, 2002.
- [10] A. B. Noel, A. Abdaoui, T. Elfouly, M. H. Ahmed, A. Badawy, and M. S. Shehata, “Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, pp. 1403–1423, thirdquarter 2017.
- [11] G. Anastasi, G. L. Re, and M. Ortolani, “Wsns for structural health monitoring of historical buildings,” in *2009 2nd Conference on Human System Interactions*, pp. 574–579, IEEE, 2009.
- [12] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Fenves, S. Glaser, and M. Turon, “Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 6th international conference on Information processing in sensor networks*, pp. 254–263, ACM, 2007.
- [13] N. Xu, S. Rangwala, K. K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan, and D. Estrin, “A wireless sensor network for structural monitoring,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 13–24, ACM, 2004.
- [14] B. M. Sadler and A. Swami, “Synchronization in sensor networks: an overview,” in *MILCOM 2006-2006 IEEE Military Communications conference*, pp. 1–6, IEEE, 2006.
- [15] S. M. Lasassmeh and J. M. Conrad, “Time synchronization in wireless sensor networks: A survey,” in *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon)*, pp. 242–245, March 2010.
- [16] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, “Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts,” *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 36, no. SI, pp. 147–163, 2002.
- [17] K. Noh, E. Serpedin, and K. Qaraqe, “A new approach for time synchronization in wireless sensor networks: Pairwise broadcast synchronization,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, pp. 3318–3322, Sep. 2008.

- [18] S. Fanarioti, A. Tsipis, K. Giannakis, G. Koufoudakis, E. Christopoulou, K. Oikonomou, and I. Stavrakakis, “A proposed algorithm for data measurements synchronization in wireless sensor networks,” in *Second International Balkan Conference on Communications and Networking 2018 (BalkanComG’Ab●●b’A18)*, Podgorica, Montenegro, pp. 1–5, 2018.
- [19] Arduino, “Arduino Mega 2560 Rev3.” Accessed: 24 Jun 2019.
- [20] Arduino, “Arduino Wireless SD Shield.” Accessed: 24 Jun 2019.
- [21] Digi, “XBee-PRO Zigbee Through-Hole (Wire Antenna).” Accessed: 24 Jun 2019.
- [22] InvenSense, “MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS Motion Tracking Devices.” Accessed: 28 Aug 2019.
- [23] Raspberry, “Raspberry Pi 3.” Accessed: 17 August 2019.
- [24] Arduino, “Arduino Homepage.” Accessed: 17 August 2019.
- [25] Digi, “XBee/XBee-PRO S2C Zigbee Documentation Page.” Accessed: 19 Aug 2019.
- [26] Andrewrapp, “andrewrapp/xbec-arduino.” Accessed: 24 Jun 2019.
- [27] Digi, “Digi xctu software webpage.” Accessed: 19 Aug 2019.
- [28] InvenSense, “MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer), Documentation.” Accessed: 28 Aug 2019.
- [29] ElectronicCats, “MPU-6050 Arduino Library.” Accessed: 29 Aug 2019.
- [30] Arduino, “Arduino IDE.” Accessed: 31 August 2019.
- [31] Microsoft, “Visual Studio Code.” Accessed: 31 Aug 2019.

Παραρτήματα

Πίνακας Δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια (με κρίση)

- Konstantinos Bezas, Konstantinos Oikonomou, George Koufoudakis, Vasileios Komianos, Georgios Toumanis, "Structural Health Monitoring In Historical Buildings Using A Low Cost Wireless Sensor Network", South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference, Piraeus, Greece, 2019

Γλωσσάρι Ξενικών Όρων

Structural Health Monitoring	Παρακολούθηση Δομικής Υγείας
Wired Sensor Networks	Ενσύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
Wireless Sensor Networks	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων
Flooding	Πλυμμυρίδα
Synchronization	Συγχρονισμός
Interrupt	Διακοπή Εκτέλεσης Κώδικα

Συντομογραφίες

SHM	Structural Health Monitoring
WSN	Wireless Sensor Network
IoT	Internet of Things

Ευρετήριο

Ενσύρματο Δίκτυο Αισθητήρων, 2
Παρακολούθηση της Δομικής Υγείας,
2

Structural Health Monitoring (SHM),
2

Wireless Sensor Networks (WSN), 2, 3
WSN, 3

Wireless Sensor Networks, 2

Wireless Sensor Network, 41

εκτίμηση της δομικής υγείας, 36

εκτίμησης της δομικής υγείας, 26

Παρακολούθηση της Δομικής Υγείας,
2, 3, 6

παρακολούθηση της δομικής υγείας, 3

συγχρονισμός, 3, 26, 28, 34, 38, 42