

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τμήμα Πληροφορικής



Πτυχιακή Εργασία

Υλοποίηση Αλγορίθμων Συγχρονισμού σε Ασύρματα
Δίκτυα Αισθητήρων σε Καλλιέργειες

Ευγενία Δημητρίου

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Κωνσταντίνος Οικονόμου

26 Σεπτεμβρίου 2019

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Θεόδωρος Ανδρόνικος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Μιχαήλ Στεφανιδάκης, Επίκουρος Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Αφιερώνω αυτή την πτυχιακή εργασία στην οικογένεια, τους φίλους και τους καθηγητές μου για όλη την υποστήριξη και την βοήθεια τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η καταμέτρηση του χρόνου υπήρξε ανέκαθεν ένα σημαντικό ζήτημα για τον άνθρωπο. Ο συγχρονισμός των ρολογιών αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη ζητήματα στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, καθώς αυτά αποτελούνται από πολλούς κόμβους αισθητήρων και καθένας από αυτούς λειτουργεί σύμφωνα με το δικό του ρολόι. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την αντιμετώπιση του προβλήματος, ωστόσο σύμφωνα με τη σχετική βιβλιογραφία, καμία δεν μπορεί να διατηρήσει ένα κατανεμημένο δίκτυο απόλυτα συγχρονισμένο και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι εφαρμογές αυτών των δικτύων σε τομείς όπως είναι η γεωργία, παρουσιάζουν επιτακτική την ανάγκη μιας κοινής αίσθησης του χρόνου σε ένα δίκτυο, για λόγους όπως είναι η παρακολούθηση μιας καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο, η συλλογή δεδομένων σχετικά με τα φυτά αλλά και το περιβάλλον με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων και την λήψη κρίσιμων αποφάσεων. Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποτελεί μια απόπειρα αντιμετώπισης των ασυγχρόνιστων ρολογιών ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, το οποίο και αποτελούν οι μικροεπεξεργαστές Arduino Uno, με τη χρήση των κεραιών XBee Pro S2C Zigbee RF Modules ως το μέσο για την ασύρματη επικοινωνία. Η υλοποίηση του αλγορίθμου για την αντιμετώπιση του προβλήματος, και στη συνέχεια ο πειραματισμός σε πραγματικές συνθήκες, επέφεραν ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων το πρόβλημα του συγχρονισμού χρήζει αντιμετώπισης, και σε καμία περίπτωση δεν θα έπρεπε να παραμένει άλυτο.

Abstract

Counting time has always been an important issue for man. Clock synchronization is one of the fundamental issues in Wireless Sensor Networks, as these are composed of many sensor nodes and each of them operates according to its own clock. There are several methods to address the problem, but according to the literature, none can maintain a distributed network perfectly synchronized and for a long period of time. The applications of these networks in areas such as agriculture show an urgent need for a common sense of time in a network for reasons such as monitoring a crop in real time, collecting data on plants and the environment in order to drawing conclusions and making critical decisions. This diploma thesis is an attempt to cope with the asynchronous clocks of a wireless sensor network, which is made up of the Arduino Uno microprocessors, using the XBee Pro S2C Zigbee RF Modules as the means of wireless communication. Implementing the algorithm to address the problem, and then experimenting in real-world conditions, has produced encouraging results. In a wireless sensor network, the synchronization problem needs to be addressed, and in no case should it remain unresolved.

Ευχαριστίες

Η εφαρμογή της παρούσας πτυχιακής εργασίας, υποστηρίχθηκε από το έργο ' Πιλοτικό Σύστημα Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων Συγχρονισμένης Παρακολούθησης Κλιματολογικών και Εδαφολογικών Παραμέτρων σε Ελαιώνες ' (Κωδικός MIS: 5007309), το οποίο χρηματοδοτήθηκε από το ΕΣΠΑ (ΠΕΠ Ιονίων Νήσων 2014-2020).

Περιεχόμενα

A´	Εισαγωγή	1
A´.1	Ασύρματα Δίκτυα και Εφαρμογές	2
A´.2	Το πρόβλημα του Συγχρονισμού	5
A´.3	Βιβλιογραφική Έρευνα	6
A´.4	Δομή της Πτυχιακής	16
B´	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και Καλλιέργειες	19
B´.1	Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων σε Καλλιέργειες . .	20
B´.2	Συγχρονισμός και Καλλιέργειες	28
Γ´	Περιγραφή Συστήματος	33
Γ´.1	IEEE 802.15.4	33
Γ´.2	Πρωτόκολλο CSMA/CA	34
Γ´.3	Πρωτόκολλο Zigbee	35
Γ´.4	XBee Pro S2C Zigbee RF Modules	37
Γ´.5	Arduino Uno	42
Γ´.6	Arduino Wireless SD Shield	45
Γ´.7	Το Σύστημα	46
Δ´	Αλγόριθμος Συγχρονισμού και Πειράματα	51
Δ´.1	Ο Αλγόριθμος Συγχρονισμού	51
Δ´.2	Δοκιμές και Πειράματα	54
Δ´.2.1	Πειράματα με Broadcast Μετάδοση	55
Δ´.2.2	Πειράματα με Unicast Μετάδοση	60

Περιεχόμενα	v
Ε' Σύνοψη και Συμπεράσματα	67
Βιβλιογραφία	69
Παράρτημα	74

Κατάλογος Σχημάτων

Γ'.1	Η στοίβα των επιπέδων του πρωτοκόλλου Zigbee.	37
Γ'.2	Κεραία XBee Pro S2C Zigbee RF Modules	38
Γ'.3	Arduino Uno με μικροελεγκτή ATmega328P	42
Γ'.4	Παράδειγμα από το το προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino IDE.	44
Γ'.5	Wireless SD Shield	45
Γ'.6	Συνδεδεμένο Arduino Uno με Wireless SD Shield και την κεραία Xbee Radio Module που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα της παρούσας εργασίας.	46
Γ'.7	Απεικόνιση ενός Coordinator και ενός Router στο πρόγραμμα XCTU.	47
Γ'.8	Παράδειγμα παραμετροποίησης των Xbee Radio Modules στο πρόγραμμα XCTU.	49
Δ'.1	Σχηματική απεικόνιση της ανταλλαγής μηνυμάτων συγχρονισμού βάσει της λογικής του αλγορίθμου	53
Δ'.2	Διαγραμματική Απεικόνιση Πειράματος με Broadcast Μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. MO = 470.625, Max = 948, Min = 106.	57
Δ'.3	Διαγραμματική Απεικόνιση Πειράματος με Broadcast Μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. MO = 468.375, Max = 1054, Min = 62.	58
Δ'.4	Η τοπολογία του δικτύου των 5 κόμβων	59
Δ'.5	Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν τις χρονικές αποκλίσεις στο πείραμα με το δίκτυο των 5 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα (α) αφορά την απόκλιση μεταξύ των κόμβων 0-1 και το (β) τους 0-2.	60
Δ'.6	Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν τις χρονικές αποκλίσεις στο πείραμα με το δίκτυο των 5 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα (γ) αφορά την απόκλιση μεταξύ των κόμβων 1-3 και το (δ) τους 1-4.	60

Δ'.7 Διαγραμματική Απεικόνιση Πειράματος με Unicast Μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. $MO = 423.75$, $Max = 936$, $Min = 23$	62
Δ'.8 Διαγραμματική Απεικόνιση Πειράματος με Unicast Μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. $MO = 548.5$, $Max = 1384$, $Min = 0$	62
Δ'.9 Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν τις χρονικές αποκλίσεις στο πείραμα με το δίκτυο των 5 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα (α) αφορά την απόκλιση μεταξύ των κόμβων 0-1 και το (β) τους 0-2. . .	63
Δ'.10 Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν τις χρονικές αποκλίσεις στο πείραμα με το δίκτυο των 5 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα (γ) αφορά την απόκλιση μεταξύ των κόμβων 1-3 και το (δ) τους 1-4. . .	64
Δ'.11 Σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων που έγιναν με Broadcast μετάδοση και Unicast μετάδοση.	64

Κατάλογος Πινάκων

Δ'.1	Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τους μέσους όρους, τις μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις των 10 πειραμάτων.	56
Δ'.2	Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τους μέσους όρους, τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των χρονικών αποκλίσεων των κόμβων στο πείραμα με τους 5 κόμβους.	58
Δ'.3	Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τους μέσους όρους, τις μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις των 10 πειραμάτων.	61
Δ'.4	Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τους μέσους όρους, τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των χρονικών αποκλίσεων των κόμβων στο πείραμα με τους 5 κόμβους.	63

Κεφάλαιο Α΄

Εισαγωγή

Η εποχή μας χαρακτηρίζεται ως η εποχή της πληροφορίας, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ραγδαία άνθηση και πρόοδο της τεχνολογίας και της επιστήμης των υπολογιστών. Κομμάτι αυτού του επιστημονικού τομέα, είναι και η τεχνολογία των δικτύων υπολογιστών, πάνω στην οποία βασίζεται ο σύγχρονος κόσμος, και οι εφαρμογές της κυμαίνονται από τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης μέχρι τις δορυφορικές επικοινωνίες. Υπάρχουν πολλά και διαφορετικά είδη δικτύων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά το καθένα, που αποσκοπούν και είναι χρήσιμα σε διάφορες πτυχές της καθημερινότητας, με γνωστότερο όλων το Διαδίκτυο (Internet) και τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Τα δίκτυα διακρίνονται σε ενσύρματα και ασύρματα, όροι που δηλώνουν το μέσο με το οποίο ανταλλάσσεται η πληροφορία, όπως για παράδειγμα τα καλώδια ethernet, οι οπτικές ίνες και ο ατμοσφαιρικός αέρας. Γενικότερα, ένα δίκτυο υπολογιστών αποτελούν αυτόνομοι ή μη αυτόνομοι υπολογιστές που είναι συνδεδεμένοι και είναι σε θέση να ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους. Εκτός από σταθερούς και φορητούς υπολογιστές, μπορούν να συνδέονται σε ένα δίκτυο και άλλοι τύποι συσκευών, όπως για παράδειγμα κινητά τηλέφωνα, τηλεοράσεις και άλλες περιφερειακές συσκευές.

Ένα δίκτυο, ενσύρματο ή ασύρματο [1], αποτελείται από κάποια βασικά δομικά υλικά στοιχεία τους κόμβους και τις ζεύξεις, ή αλλιώς συνδέσεις. Οι κόμβοι (nodes), είναι συνήθως υπολογιστές γενικής χρήσης όπως, επιτραπέζιοι και φορητοί υπολογιστές, ή συσκευές που υλοποιούν συγκεκριμένες λειτουργίες, όπως είναι οι δρομολογητές (routers), οι μεταγωγείς (switches), οι γέφυρες (bridges) και οι επαναλήπτες (repeaters). Προκειμένου να επικοινωνήσουν οι κόμβοι μεταξύ τους, χρησιμοποιούν τις ζεύξεις οι

οποίες αποτελούν το υλικό μέσο μεταφοράς της πληροφορίας, δηλαδή τη διάδοση σημάτων. Μία ζεύξη μπορεί να είναι τα ηλεκτρικά καλώδια όπως τα ομοαξονικά και τα σύστροφα ζεύγη, οι οπτικές ίνες και ο χώρος μέσα στον οποίο κινούνται τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα και οι υπέρυθρες ακτίνες.

Α΄.1 Ασύρματα Δίκτυα και Εφαρμογές

Ως Ασύρματο Δίκτυο [2] ορίζεται εκείνο το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο, στο οποίο τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, με συχνότητα φέροντος ανάλογη του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων που υποστηρίζει το δίκτυο. Η ασύρματη επικοινωνία, εν αντιθέσει με την ενσύρματη, δεν χρησιμοποιεί κάποιο τύπο καλωδίου για το μέσο μετάδοσης, αλλά ως φορέας μετάδοσης της πληροφορίας χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα κύματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, όπως τα ραδιοκύματα. Στα ασύρματα δίκτυα συμπεριλαμβάνονται τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, οι δορυφορικές επικοινωνίες, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής (WWAN), τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα (WMAN), τα ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN) και τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα (WPAN). Οι ασύρματες τεχνολογίες διαφέρουν αρκετά από τις ενσύρματες, σε σημεία όπως στην ποσότητα του εύρους ζώνης που παρέχουν, στην απόσταση των επικοινωνούντων κόμβων, στο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που χρησιμοποιούν και στη κατανάλωση ενέργειας. Τα μέσα μετάδοσης είναι μη κατευθυνόμενα και σε αυτά περιλαμβάνονται τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα οι υπέρυθρες ακτίνες και οι δορυφόροι. Σημαντικό ρόλο στην ασύρματη επικοινωνία παίζει το ίδιο το μέσο, δηλαδή ο ατμοσφαιρικός αέρας, στον οποίο μπορεί να μην ισχύουν πάντοτε οι ίδιες συνθήκες.

Ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων [2] (Wireless Sensor Network - WSN), αποτελείται από πολλούς σε αριθμό κόμβους, όπου κάθε κόμβος έχει σαν στόχο να παρακολουθεί μια γεωγραφική έκταση στη οποία και εκτείνεται. Κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με έναν ή περισσότερους τύπους αισθητήρων, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την καταγραφή και παρακολούθηση διαφόρων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία, η υγρασία, η ηλιακή ακτινοβολία, η σεισμική δραστηριότητα, η ανίχνευση κίνησης και ήχου, κ.α. Προκειμένου ένα δίκτυο αισθητήρων να είναι αποδοτικό, θα πρέπει και το κόστος του να είναι χαμηλό, κρίνοντας από το γεγονός ότι οι κόμβοι του είναι πολλοί και συνήθως η κατανάλωση ενέργειας και η τροφοδοσία γίνονται με τη χρήση μπαταριών. Για το λόγο αυτό, οι κόμβοι αυτού του τύπου δικτύου δεν είναι συχνά υπολογιστές, αλλά άλλου τύπου συσκευές.

Τα περισσότερα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνουν έναν σταθμό βάσης, που μπορεί να είναι ένας κόμβος (sink node) ο οποίος συλλέγει τα δεδομένα του δικτύου για να τα αποθηκεύσει, να τα επεξεργαστεί ή να τα προωθήσει κάπου αλλού. Λόγω της γεωγραφικής έκτασης που καλύπτουν αυτά τα δίκτυα, είναι φυσικό και επόμενο να μην μπορούν όλοι οι κόμβοι να είναι άμεσα συνδεδεμένοι με τον sink node, επομένως θα πρέπει με κάποιο τρόπο το δίκτυο να είναι συνεκτικό. Για την επίλυση τέτοιων ζητημάτων οι κόμβοι του δικτύου επικοινωνούν με τους γειτονικούς τους κόμβους, οι οποίοι με τη σειρά τους προωθούν τα δεδομένα στους δικούς τους γείτονες, μέχρις ότου τα δεδομένα φτάσουν είτε στον sink node, είτε σε έναν συγκεκριμένο κόμβο του δικτύου, αναλόγως την περίπτωση. Άλλα τέτοια ζητήματα παρόμοιας φύσης, που είναι κρίσιμα για αυτά τα δίκτυα είναι η τοπολογία του δικτύου, η κατανάλωση ενέργειας και η τροφοδοσία, ο συγχρονισμός των κόμβων, ο καθορισμός σε ποιον θα προωθούνται ή θα μεταδίδονται τα δεδομένα, η δυναμική προσθήκη κόμβων, κ.α. Τα δίκτυα αισθητήρων είναι προτιμότερο να είναι καταναμημένα, ώστε να αυξηθεί η αξιοπιστία τους. Σε περίπτωση που για κάποιο λόγο ο κεντρικός κόμβος υποστεί κάποια βλάβη και τεθεί ανίκανος εκπλήρωσης της εργασίας του, θα καταρρεύσει ολόκληρο το δίκτυο, εκτός και αν η αρχιτεκτονική του είναι καταναμημένη. Με τη χρήση καταναμημένων αλγορίθμων σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, ο κάθε κόμβος αυτό-οργανώνεται, η συλλογή των δεδομένων γίνεται καλύτερη και δεν καταρρέει ολόκληρο το σύστημα σε περιπτώσεις αποτυχίας κόμβων, είτε του κεντρικού είτε κάποιου γειτονικού.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμεύουν σε πολλά ζητήματα και έχουν πολλές πρακτικές εφαρμογές. Καταρχάς, χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση περιοχών, δηλαδή γεωγραφικών εκτάσεων όπου πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν διάφοροι παράμετροι, όπως για παράδειγμα σε στρατιωτικές επιχειρήσεις που πρέπει να παρακολουθούνται τυχόν εχθρικές εισβολές. Μία άλλη σημαντική εφαρμογή είναι η παρακολούθηση των περιβαλλοντικών συνθηκών για γεωλογικές έρευνες, δηλαδή παρακολούθηση, με τη χρήση αισθητήρων, ωκεανών, ηφαιστειών, δασικών εκτάσεων, και άλλων οικολογικών συστημάτων. Η παρακολούθηση του περιβάλλοντος έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς γίνονται ενέργειες καταμέτρησης της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, της μόλυνσης και της ποιότητας του νερού, ανιχνεύονται έγκαιρα δασικές πυρκαγιές, κατολισθήσεις και φυσικές καταστροφές, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ποιότητα ζωής και να προλαμβάνονται καταστροφικές καταστάσεις. Η δυνατότητα αυτών των δικτύων για καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, εφαρμόζεται και στον τομέα της βιομηχανίας όπου παρακολουθούνται χώροι περιορισμένης πρόσβασης από ανθρώπους, εργοστάσια και τα

παράγωγα τους, όπως για παράδειγμα τα επίπεδα του νερού σε δεξαμενές υπερχειλίσης για την παραγωγή ενέργειας. Τα δίκτυα αυτά έχουν σαν πλεονέκτημα την καταγραφή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και το χαμηλό κόστος, καθώς σε ήδη εγκατεστημένα ενσύρματα συστήματα η εγκατάσταση αισθητήρων και η καλωδίωση τους κοστίζει περισσότερο.

Ένας ακόμα τομέας που τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ιδιαίτερα χρήσιμα και αποδοτικά, είναι αυτός της υγείας. Οι εφαρμογές τους ποικίλουν, όμως οι κυριότερες περιλαμβάνουν την παρακολούθηση ασθενών με ειδικές ανάγκες ή ηλικιωμένων στα πλαίσια των Smart Homes, στη διάγνωση ασθενειών, στην διαχείριση των φαρμάκων και στον εντοπισμό γιατρών και ασθενών στα νοσοκομεία. Τα αισθητηριακά δεδομένα που λαμβάνονται, π.χ. οι καρδιακοί παλμοί και η πίεση του αίματος, μπορούν να βελτιώσουν την έγκαιρη διάγνωση μιας κατάστασης, αλλά και να αποθηκευτούν για περαιτέρω ιατρική έρευνα. Οι ασθενείς μπορούν να κουβαλούν μικρούς κόμβους αισθητήρων, με αποτέλεσμα να μειώνεται το κόστος των εξετάσεων και να αυξάνονται τα δεδομένα. Έτσι, οι έρευνες που χρειάζονται χρόνο για τη συλλογή αρκετών δεδομένων, επιταχύνονται με έναν απλό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Σχετικά με τον τομέα της γεωργίας και των έξυπνων καλλιεργειών, η χρήση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων ολοένα και αυξάνεται. Το ασύρματο μέσο βοηθάει τους αγρότες να παίρνουν δεδομένα από περιβάλλοντα που είναι δύσκολη τόσο η πρόσβαση, όσο και καλωδίωση τους. Μέσω ασύρματων δικτύων αισθητήρων, καθίσταται δυνατή η ακριβής παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών την στιγμή που αυτή συμβαίνει, επομένως οι αγρότες γνωρίζουν την κατάσταση σε κάθε της στάδιο, γεγονός που διευκολύνει την διαδικασία λήψης αποφάσεων προς όφελος τους. Με την επίγνωση της κατάστασης μια καλλιέργειας σε πραγματικό χρόνο, η έξυπνη γεωργία γίνεται μια αυτοματοποιημένη διαδικασία. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία του εδάφους και η ποσότητα του νερού, βοηθούν τον αγρότη να γνωρίζει παραδείγματος χάριν, την ακριβή ποσότητα ύδρευσης που χρειάζεται κάθε φυτό ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο παρακολούθησης της καλλιέργειας, βελτιώνεται η ποιότητα του τελικού προϊόντος με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Επιπλέον, με την διαδικασία της συνεχούς παρακολούθησης, ο υπεύθυνος της καλλιέργειας ενημερώνεται άμεσα σε περίπτωση που κάποια μέτρηση ξεφύγει από τα επιθυμητά όρια και μπορεί να επέμβει άμεσα. Εκτός αυτού, με την αυτοματοποίηση διαφόρων διαδικασιών, δεν είναι απαραίτητη η ανθρώπινη παρέμβαση, καθώς το σύστημα μπορεί να διορθώσει διάφορους παράγοντες, ενημερώνοντας πάντα τον υπεύθυνο με κάποιο email ή κάποια ειδοποίηση.

Α'.2 Το πρόβλημα του Συγχρονισμού

Η καταμέτρηση του χρόνου υπήρξε ανέκαθεν σημαντικό ζήτημα για τον άνθρωπο. Αποτελεί ένα θεμελιώδες στοιχείο του τρόπου σκέψης και της διαχείρισης της καθημερινότητας, που χωρίς αυτόν τα αποτελέσματα θα ήταν δραματικά. Το ζήτημα του συγχρονισμού για τα κατανεμημένα συστήματα [3] είναι δυσκολότερο να λυθεί σε σύγκριση με μονοεπεξεργαστικά ή πολυεπεξεργαστικά συστήματα.

Όλοι σχεδόν οι υπολογιστές διαθέτουν ενσωματωμένο ένα κύκλωμα που αποσκοπεί στον υπολογισμό του χρόνου, ένα ρολόι αλλά όχι με την συμβατική έννοια. Ένας όρος που ταιριάζει καλύτερα είναι το χρονόμετρο. Αυτό το χρονόμετρο τις περισσότερες φορές είναι ένας κρύσταλλος χαλαζία, ο οποίος ταλαντώνεται με τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος σε μια προκαθορισμένη συχνότητα, η οποία εξαρτάται από το είδος του κρυστάλλου, τον τρόπο κοπής και την ποσότητα του ρεύματος. Κάθε κρύσταλλος έχει δύο καταχωρητές, έναν μετρητή (counter) και έναν καταχωρητή διατήρησης (holding register). Με κάθε ταλάντωση, ο μετρητής μειώνεται κατά ένα, μέχρις ότου φτάσει στο μηδέν, όπου και κάνει μια διακοπή ώστε να επαναφορτωθεί από τον καταχωρητή διατήρησης. Αυτός είναι ο τρόπος που ένα χρονόμετρο μπορεί να προγραμματιστεί προκειμένου να προκαλεί 60 διακοπές το δευτερόλεπτο, ή σε κάποια άλλη ενδεχομένως επιθυμητή συχνότητα. Κάθε τέτοια διακοπή ονομάζεται χτύπος ρολογιού.

Όταν το σύστημα αποτελεί ένας υπολογιστής με ένα ρολόι, η ακρίβεια αυτού του ρολογιού δεν είναι πρόβλημα, εφόσον όλες οι διεργασίες χρησιμοποιούν το ίδιο ρολόι, θα είναι σύμφωνες με το σύστημα. Οι δυσκολίες ξεκινούν με τη χρήση πολλών υπολογιστών, καθένας από τους οποίους διαθέτει το δικό του ρολόι. Η συχνότητα με την οποία λειτουργεί ένας ταλαντωτής κρυστάλλου, είναι αρκετά σταθερή, ωστόσο είναι αδύνατο να λειτουργούν οι κρύσταλλοι πολλών διαφορετικών υπολογιστών με την ίδια ακριβώς συχνότητα. Πρακτικά σε ένα σύστημα με πολλούς υπολογιστές, κάθε κρύσταλλος θα ταλαντώνεται με ελαφρώς διαφορετικό ρυθμό από τους υπόλοιπους, επομένως το σύστημα θα οδηγηθεί σταδιακά σε αποσυντονισμό των ρολογιών και θα αποδίδονται διαφορετικές τιμές από τον καθένα. Αυτή η διαφορά στις τιμές ονομάζεται απόκλιση ρολογιού. Συνέπειες αυτού του φαινομένου είναι η αποτυχία προγραμμάτων που περιμένουν ότι η ώρα που είναι συσχετισμένη με ένα αρχείο, ένα αντικείμενο, μια διεργασία ή ένα μήνυμα, είναι σωστή και ανεξάρτητη από το ρολόι του μηχανήματος όπου δημιουργήθηκε.

Ο στόχος του συγχρονισμού είναι κάθε διεργασία να γίνεται την σωστή χρονική

στιγμή. Στα κατανεμημένα συστήματα και γενικότερα στα δίκτυα υπολογιστών, δεν υπάρχει κάποιο κοινόχρηστο ρολόι, με αποτέλεσμα διεργασίες σε διαφορετικά μηχανήματα έχουν τον δικό τους διαφορετικό χρόνο. Ο συγχρονισμός των ρολογιών ενός κατανεμημένου συστήματος επιτυγχάνονται με διάφορους τρόπους, ωστόσο όλες οι μέθοδοι βασίζονται στην ανταλλαγή των τιμών των ρολογιών, ενώ λαμβάνεται υπόψη και ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή και τη λήψη των μηνυμάτων. Η ακρίβεια των αλγορίθμων συγχρονισμού καθορίζεται από τις διακυμάνσεις στις καθυστερήσεις επικοινωνίας, σε συνδυασμό με τον τρόπο που αυτές αντιμετωπίζονται.

Για τα συστήματα πραγματικού χρόνου, όπως είναι και τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, η πραγματική ώρα που δίνει κάθε ρολόι είναι μείζονος σημασίας. Ένας τρόπος επίλυσης του προβλήματος αυτού, είναι η χρήση ενός εξωτερικού του συστήματος ρολογιού, λύση μη αποτελεσματική στα ασύρματα δίκτυα. Άλλο πρόβλημα είναι και το πως αυτά τα ρολόγια θα πρέπει να συγχρονιστούν με τα ρολόγια της καθημερινότητας, ωστόσο το βασικότερο είναι πως θα συγχρονιστούν μεταξύ τους.

Α΄.3 Βιβλιογραφική Έρευνα

Το ζήτημα του συγχρονισμού των ρολογιών σε πραγματικά συστήματα, απαιτεί αντιμετώπιση προτού οποιοδήποτε σύστημα τεθεί σε λειτουργία. Τα κατανεμημένα συστήματα, που κάνουν χρήση πολλών αυτόνομων συσκευών, αντιμετωπίζουν το πρόβλημα με κάποιον αλγόριθμο συγχρονισμού που εφαρμόζει η κάθε συσκευή. Όσον αφορά στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων, με σκοπό να βρεθεί μια λύση. Καθώς αυτού του τύπου τα ασύρματα δίκτυα, στοχεύουν στην καταμέτρηση συγκεκριμένων παραμέτρων ή στην παρακολούθηση μιας περιοχής, η χρονική ακρίβεια οποιουδήποτε γεγονότος είναι ιδιαίτερα κρίσιμη. Παρόλο που οι ασύρματες τεχνολογίες είναι αρκετά αξιόπιστες, δεν παύουν να υπάρχουν και οι περιπτώσεις που χάνονται πακέτα δεδομένων για λόγους όπως η συμφόρηση του δικτύου. Αυτά τα πακέτα συλλέγονται σε έναν σταθμό βάσης ώστε να προκύψουν κάποια αποτελέσματα. Αν οι μετρήσεις των αισθητήρων είναι ασύγχρονες μεταξύ τους, τότε τα αποτελέσματα αυτά θα είναι λανθασμένα. Οι αλγόριθμοι συγχρονισμού των ρολογιών έχουν ως στόχο να διατηρούν το δίκτυο συγχρονισμένο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αξιοπιστία και η απόδοση του.

Ο συγχρονισμός του χρόνου είναι ένα σημαντικό θέμα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και γενικότερα στη δικτύωση. Οι περισσότεροι από τους αλγορίθμους συγ-

χρονισμού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι sender-receiver πρωτόκολλα και περιλαμβάνουν κάποια ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ δύο κόμβων, και υπολογίζουν τη διαφορά ώρας στα τοπικά ρολόγια. Τέτοια πρωτόκολλα βασίζονται στη χρήση χρονοσφραγίδων στο επίπεδο MAC, ώστε να μειωθούν τα σφάλματα συγχρονισμού στο ελάχιστο. Παρόλο που αυτές οι προσεγγίσεις είναι αρκετά ακριβείς, απαιτούν παρέμβαση στα κατώτερα στρώματα της στοίβας του δικτύου, γεγονός που καθιστά τέτοιες προσεγγίσεις ιδιαίτερα δύσκολες έως και αδύνατες σε κάποιες πλατφόρμες.

Ανεξάρτητα από τον τρόπο λειτουργίας ενός WSN, η χρονική διάσταση της λειτουργίας αυτής είναι πρακτικής σημασίας. Αυτό συμβαίνει επειδή ο χρόνος απόκτησης των δεδομένων είναι κρίσιμος για την ορθή αναπαράσταση και ερμηνεία τους. Ο συγχρονισμός ενός δικτύου συχνά περιλαμβάνει την εκτίμηση της απόκλισης των ρολογιών όλων των κόμβων, σε σχέση με ένα ρολόι ως σημείο αναφοράς. Υπάρχουν δύο βασικές μεθοδολογίες συγχρονισμού [4], η sender-receiver και η receiver-receiver. Στην πρώτη, η χρονική απόκλιση εκτιμάται με την ανταλλαγή πακέτων που φέρουν χρονοσφραγίδες (timestamps), και στη δεύτερη, ένας κόμβος που λειτουργεί ως σημείο αναφοράς μεταδίδει ένα μήνυμα στους γειτονικούς κόμβους, οι οποίοι συγχρονίζονται ανταλλάσσοντας τον χρόνο παραλαβής του μηνύματος.

Ένας τύπος συγχρονισμού που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους κόμβους ενός δικτύου γίνεται σε πραγματικό χρόνο, ή αλλιώς στη Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα (Coordinated Universal Time (UTC)). Άλλος ένας τρόπος είναι η χρήση της λογικής ώρας, κατά την οποία οι κόμβοι συντονίζονται σε ένα κοινό σημείο αναφοράς. Στον λογικό συγχρονισμό ο πραγματικός χρόνος δεν είναι τόσο σημαντικός όσο η συμφωνία μεταξύ διαφορετικών κόμβων στο ίδιο σημείο αναφοράς.

Γενικά, όταν αποστέλλεται ένα πακέτο ασύρματα, συμβαίνουν αναπόφευκτα κάποιες χρονικές καθυστερήσεις. Ο χρόνος αποστολής είναι το διάστημα που χρειάζεται για τη δημιουργία του πακέτου και την αποστολή του στα χαμηλότερα επίπεδα, και ο χρόνος πρόσβασης είναι το διάστημα για την πρόσβαση στο ασύρματο μέσο. Στη συνέχεια, ακολουθεί ο χρόνος μετάδοσης που απαιτείται για την αποστολή του πακέτου από το φυσικό επίπεδο και ο χρόνος διάδοσης που χρειάζεται για να φτάσει το πακέτο από τον πομπό στον δέκτη. Τέλος, λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος παραλαβής του πακέτου από το φυσικό επίπεδο του δέκτη και ο χρόνος λήψης που απαιτείται για την αποστολή του πακέτου στο επίπεδο εφαρμογών. Μερικοί από αυτούς τους χρόνους, όπως ο χρόνος μετάδοσης, διάδοσης και παραλαβής είναι ντετερμινιστικοί. Ο χρόνος πρόσβασης είναι μη ντετερμινιστικός, διότι εξαρτάται από τον εκάστοτε backoff μηχανισμό του επιπέ-

δου MAC. Επίσης, οι χρόνοι αποστολής και λήψης δεν είναι ντετερμινιστικοί, καθώς εξαρτώνται από το λειτουργικό σύστημα και από το πόσο γρήγορα αντιλαμβάνεται το επίπεδο εφαρμογών ότι έλαβε κάποιο πακέτο.

Ένα προτεινόμενο πρωτόκολλο συγχρονισμού [4] χρησιμοποιεί τη μέθοδο timestamping και εφαρμόζεται στο επίπεδο εφαρμογών. Ουσιαστικά γίνεται ανταλλαγή SYNC και REPLY πακέτων ίσου μεγέθους, και το κάθενα εμπεριέχει χρονοσφραγίδες. Για τη δοκιμή του πρωτοκόλλου έγινε χρήση του Arduino Uno και των Xbee Redio Modules. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία ανάπτυξης και χρήσης, καθώς το επίπεδο εφαρμογών επιτρέπει τον προγραμματισμό του πρωτοκόλλου χωρίς να απαιτείται τίποτα από τα χαμηλότερα επίπεδα. Επίσης, παρόμοια πρωτόκολλα συγχρονισμού, παρόλο που δεν πετυχαίνουν την απόλυτη ακρίβεια, είναι περισσότερο από ικανά για την χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της βιομηχανίας ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο. Ο συγχρονισμός του χρόνου αποτελεί ένα σημαντικό ζήτημα για τα WSN, εξαιτίας της συνεργατικής και κατακεντρωμένης φύσης των εργασιών που εκτελούν. Μια τεχνική στα WSN για τον συγχρονισμό των ρολογιών ονομάζεται Συναινετικός Συγχρονισμός Ρολογιού και παρέχει έναν εσωτερικό συγχρονισμό μέσω ενός εικονικού συναινετικού ρολογιού.

Καθώς οι τεχνολογίες της ασύρματης επικοινωνίας εξελίσσονται, προκύπτει η ίδια ανάγκη για τις ασύρματες συσκευές ανίχνευσης. Η έρευνα της ακαδημαϊκής και της βιομηχανικής κοινότητας επικεντρώνονται, εκτός από τις τεχνικές συγχρονισμού, σε ειδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης αλλά και σε συστήματα διαχείρισης της ισχύος και του φορτίου. Μια τεχνική συγχρονισμού στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι ο Συναινετικός Συγχρονισμός Ρολογιού (Consensus Clock Synchronization (CCS)) [5], που ως σκοπό έχει τη μείωση των σφαλμάτων στα ρολόγια μεταξύ κόμβων του δικτύου που βρίσκονται γεωγραφικά κοντά, και όλοι οι κόμβοι συγκλίνουν σε έναν κοινό ρυθμό ώστε να επιτευχθεί μεγάλης διάρκειας συγχρονισμός. Είναι μια τεχνική υπολογιστικά ελαφριά, κλιμακωτή, ανθεκτική στην αποτυχία σύνδεσης και δεν απαιτείται να έχει τον έλεγχο ένας κεντρικός κόμβος.

Ο συγχρονισμός ρολογιού είναι κρίσιμος, καθώς απαιτείται χρονικός συντονισμός για πολλά από τα συνεργατικά καθήκοντα που εκτελούνται. Η σύντηξη των δεδομένων είναι ένα τέτοιο παράδειγμα, όπου οι κατακεντρωμένες πληροφορίες των αισθητήρων συγκεντρώνονται ώστε να προκύψει ένα σημαντικό αποτέλεσμα. Αν οι εμπλεκόμενοι κόμβοι δεν μοιράζονται μια κοινή άποψη του χρόνου, η συλλογή των δεδομένων από

κόμβους με αποκλίνοντα χρόνο, θα προκαλέσει σφάλματα στα αποτελέσματα.

Ορισμένα ασύρματα δίκτυα κάνουν χρήση μεθόδων όπως το TDMA (Time-Division Multiple Access) για την αποφυγή των συγχρούσεων των πακέτων και εξοικονόμησης ενέργειας. Για την αποτελεσματική λειτουργία τέτοιων μεθόδων χρειάζεται κάποιο πρωτόκολλο συγχρονισμού. Ο συγχρονισμός απαιτείται και για τις τεχνικές φασματικής εξάπλωσης συχνότητας FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum), όπου οι κόμβοι κάνουν μεταδόσεις μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων με ψευδοτυχαία σειρά. Επιπλέον, κάποιοι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης χρειάζονται ένα είδος συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων για τη διευκόλυνση της ασφαλούς μετάδοσης κλειδιών.

Σε πολλές εφαρμογές οι κόμβοι αισθητήρων πρέπει να εισέρχονται σε καταστάσεις εξοικονόμησης ενέργειας, κατά τις οποίες τα τμήματα των μικροελεγκτών, των αισθητήρων και των πομποδεκτών είναι απενεργοποιημένα. Αν οι κόμβοι δεν είναι σωστά συγχρονισμένοι τότε ενδέχεται να χάσουν εισερχόμενες μεταδόσεις και άλλα συμβάντα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος ο χρήστης μπορεί να αυξήσει τη περίοδο ενεργοποίησης, η οποία όμως μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του κόμβου. Η ελεγχόμενη ενεργοποίηση είναι άλλη μία κρίσιμη χρονική εφαρμογή των δικτύων αισθητήρων, όπου οι κόμβοι επιτελούν συγκεκριμένες εργασίες σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Αυτά τα δίκτυα απαιτούν συνεχή συγχρονισμό σε ολόκληρο το δίκτυο σε ένα συγκεκριμένο ελάχιστο επίπεδο ακρίβειας, καθιστώντας την εφαρμογή ιδιαίτερα δύσκολη.

Πολλές εφαρμογές και πρωτόκολλα των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων απαιτούν συγχρονισμό του χρόνου, ώστε η λειτουργία τους να είναι ακριβής και αποτελεσματική. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την επίτευξη του συγχρονισμού σε ένα ολόκληρο δίκτυο, και ένας από αυτούς περιλαμβάνει τον κατακλυσμό του δικτύου με μηνύματα της τρέχουσας ώρας από έναν κόμβο-σημείο αναφοράς. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται Πρωτόκολλο Συγχρονισμού Πλημμυρίδας (Flooding Time-Synchronization Protocol-FTSP) [6]. Στο FTSP η ταχύτητα διάδοσης των μηνυμάτων είναι αργή, επειδή κάθε κόμβος περιμένει ένα δεδομένο χρονικό διάστημα για να διαδώσει τις χρονικές πληροφορίες σχετικά με τον κόμβο-αναφορά.

Η πλημμυρίδα μπορεί να γίνει είτε με αργό, είτε με ταχύ ρυθμό. Τα μηνύματα που μεταδίδονται με αργό ρυθμό μειώνουν την ακρίβεια του συγχρονισμού και την επεκτασιμότητα του FTSP. Αντίθετα, η προσέγγιση της ταχείας πλημμυρίδας επιτρέπει στους κόμβους τη διάδοση χρονικών πληροφοριών όσο πιο γρήγορα γίνεται. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση είναι αρκετά δύσκολη και έχει πολλά μειονεκτήματα στα WSN. Η ταχεία

πλημμυρίδα μπορεί να καθυστερήσει επειδή οι κόμβοι δεν μεταδίδουν όσο πραγματοποιείται μια άλλη μετάδοση από κάποιο γειτονικό κόμβο, και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τοπολογία του δικτύου. Επιπλέον, στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παρατηρούνται συχνά απώλειες πακέτων που οδηγούν σε αναμεταδόσεις και συμφορίζουν το δίκτυο με ένα μεγάλο αριθμό μηνυμάτων.

Η ακρίβεια και η δυνατότητα κλιμάκωσης της αργής πλημμυρίδας μπορούν να βελτιωθούν δραστικά χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο συμφωνίας της ταχύτητας ρολογιών μεταξύ των κόμβων αισθητήρων. Έτσι, ένας αλγόριθμος Πλημμυρίδας με Πρωτόκολλο Συμφωνίας Ταχύτητας Ρολογιού (Flooding With Clock Speed Agreement-FCSA) αναγκάζει όλους τους κόμβους να λειτουργούν με την ίδια ταχύτητα και να συγχρονίζονται σύμφωνα με τον χρόνο του κόμβου-αναφορά που πλημμυρίζει το δίκτυο με μηνύματα συγχρονισμού ανά σταθερά χρονικά διαστήματα.

Οι κόμβοι των ασύρματων δικτύων αισθητήρων είναι εξοπλισμένοι με κρυστάλλους χαλαζία. Για κάθε κόμβο-αισθητήρα υπάρχει απόκλιση στις τιμές του ρολογιού σε σχέση με οποιονδήποτε άλλο κόμβο του δικτύου. Εξαιτίας αυτής της απόκλισης ενδέχεται τα ρολόγια να μην παραμένουν συγχρονισμένα, με αποτέλεσμα την αναποτελεσματική λειτουργία πολλών εφαρμογών αυτών των δικτύων. Η αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού επιτυγχάνεται με πρωτόκολλα και αλγορίθμους συγχρονισμού όπως είναι και η προαναφερομένη πλημμυρίδα, η οποία έχει σκοπό την μείωση της απόκλισης των ρολογιών.

Καθώς το ζήτημα του συγχρονισμού των ρολογιών είναι αρκετά κοινό στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, οι κόμβοι που συγχροτούν αυτά τα δίκτυα προσπαθούν να πετύχουν μια κοινή αίσθηση του χρόνου για όλους τους εμπλεκόμενους κόμβους. Μια προτεινόμενη προσέγγιση συγχρονισμού αποτελείται από δύο ασύγχρονους αλγορίθμους συναίνεσης, όπου ο πρώτος συγχρονίζει τις συχνότητες των ρολογιών και ο δεύτερος την αντιστάθμισή τους. Ο τρόπος αυτός προωθεί την σύγχρονη τεχνολογία παρέχοντας ανθεκτικότητα έναντι οριοθετημένων επικοινωνιακών καθυστερήσεων.

Γενικότερα, ένα δίκτυο αισθητήρων αποτελείται από κόμβους διασκορπισμένους σε ένα περιβάλλον με σκοπό να εκτελέσουν μια συγκεκριμένη λειτουργία. Κάθε κόμβος είναι συνήθως εξοπλισμένος με πομποδέκτη, έναν μικροελεγκτή και ένα σύνολο αισθητήρων, και όλοι οι κόμβοι μαζί συνεργάζονται προς έναν κοινό σκοπό. Η τεχνολογία των ασύρματων δικτύων αισθητήρων δεν αφορά μόνο τον τομέα της δικτύωσης, αλλά επιπρόσθετα έχει εφαρμογές σε πολλούς ερευνητικούς, επιστημονικούς και βιομηχανικούς τομείς. Οι περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές έχουν κάποια κοινά

χαρακτηριστικά ζητήματα, όπως για παράδειγμα ο αυτο-εντοπισμός, ο έλεγχος της τοπολογίας και ο συγχρονισμός των ρολογιών. Η κατανεμημένη φύση σε συνδυασμό με τους περιορισμούς του υλικού των WSN, καθιστούν την ανάπτυξη λύσεων σε αυτά τα ζητήματα μια απαιτητική διαδικασία.

Σχετικά με το κομμάτι του συγχρονισμού έχει αναπτυχθεί ένα πρωτόκολλο συγχρονισμού που χαρακτηρίζεται ως Robust Average TimeSynch (RoATS) [7], το οποίο ρυθμίζει τη συχνότητα και την αντιστάθμιση των ρολογιών με έναν ανθεκτικό τρόπο ως προς τις οριοθετημένες καθυστερήσεις μεταξύ των κόμβων που επικοινωνούν. Συγκεκριμένα, η χρονική απόκλιση (clock drift) και η χρονική αντιστάθμιση (clock offset) θεωρούνται ως δύο ανεξάρτητες και ασύγχρονες μεταξύ τους διαδικασίες, με αποτέλεσμα η ανάλυση της σύγκλισης τους να αναθεωρηθεί και να τεθούν νέα θεωρητικά όρια.

Η θεωρητική ανάλυση του αναφερόμενου πρωτοκόλλου που συνδυάζει δύο ασύγχρονους αλγορίθμους συναίνεσης για τον συγχρονισμό της συχνότητας και της μετατόπισης των ρολογιών, επιβεβαιώνεται με προσομοιώσεις αλλά και με πειραματικά αποτελέσματα. Η αξιολόγηση και η επεκτασιμότητα αυτής της μεθόδου συγχρονισμού των ρολογιών είναι επίσης αποτελεσματική και σε πραγματικά σενάρια.

Ένας ακόμη λόγος για τον οποίο απαιτείται συγχρονισμός των ρολογιών υψηλής ακρίβειας, είναι η διατήρηση της χρονικής συνοχής των δεδομένων που συλλέγονται, αλλά και η μείωση του χρόνου αδράνειας των κόμβων. Εξαιτίας της κατανεμημένης φύσης των δικτύων αισθητήρων, τα πρωτόκολλα συγχρονισμού είναι προτιμότερο να είναι επίσης κατανεμημένα. Ορισμένα προτεινόμενα από τη βιβλιογραφία πρωτόκολλα, βασίζονται σε αλγορίθμους συναίνεσης πολλαπλών παραγόντων και δεν απαιτούν κάποιον κόμβο συντονιστή. Οι κόμβοι του δικτύου εφαρμόζουν μια τακτική βασισμένη σε γεγονότα ώστε να ενισχύσουν την αποδοτικότητα της επικοινωνίας. Έτσι, ο συγχρονισμός των ρολογιών μπορεί να επιτευχθεί με λιγότερη επικοινωνία και ταυτόχρονα με εγγυημένη ακρίβεια.

Η πρόοδος της τεχνολογίας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων έχει οδηγήσει στην χρησιμότητα τους σε διάφορους σημαντικούς τομείς της καθημερινότητας, εξαιτίας του χαμηλού κόστους παρακολούθησης γεγονότων και περιοχών. Τα WSN καταγράφουν και συλλέγουν δεδομένα, ώστε αυτά στη συνέχεια να αναλυθούν για την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Τα ρολόγια που διαθέτουν οι κόμβοι αισθητήρων ενός οποιουδήποτε δικτύου έχουν μικρές διαφορές στην ταχύτητα με την οποία λειτουργούν. Επομένως, για την εξασφάλιση της συνεκτικότητας των καταγραφόμενων δεδομένων

από τους αισθητήρες, είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός των ρολογιών με μεγάλη ακρίβεια.

Συνήθως, οι κόμβοι τροφοδοτούνται με μπαταρίες και η πλειοψηφία της κατανάλωσης ενέργειας συμβαίνει κατά την επικοινωνία. Η μείωση του χρόνου αδράνειας κατά τον οποίο οι κόμβοι ακούνε το κανάλι για τυχόν μεταδόσεις, πρέπει να μειωθεί ώστε να εφαρμοστεί συγχρονισμός μέσω της επικοινωνίας σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές. Ένας συνηθισμένος τρόπος είναι με τον αλγόριθμο της πλημμυρίδας, όπου ένας κόμβος συντονιστής στέλνει πακέτα συγχρονισμού στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου [8]. Ωστόσο, η πλημμυρίδα καθίσταται αναποτελεσματική σε περιπτώσεις βλάβης σε κόμβους του δικτύου και ειδικότερα στον κόμβο συντονιστή. Μια άλλη κατηγορία μεθόδων συγχρονισμού αποτελείται από πλήρως κατανεμημένα πρωτόκολλα όπου ο συγχρονισμός γίνεται με την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ γειτονικών κόμβων. Έτσι, η προσθήκη και η απομάκρυνση κόμβων δεν αλλάζουν τη συμπεριφορά του συστήματος.

Τα πρωτόκολλα που βασίζονται σε γεγονότα, στοχεύουν στη μείωση των μη επιτακτικών μεταδόσεων. Οι κόμβοι πραγματοποιούν μεταδόσεις μόνο όταν είναι απαραίτητο και συγκεκριμένα όταν οι μεταβλητές τους έχουν αλλάξει επαρκώς από την τελευταία μετάδοση. Κατά τους αλγόριθμους αυτούς η δειγματοληψία γίνεται όταν συμβαίνει κάποιο γεγονός, αλλά η ανάλυση των δεδομένων είναι μια συνεχής διαδικασία.

Ο συγχρονισμός του χρόνου στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί ένα πρόβλημα που έχει απασχολήσει αρκετά την ερευνητική κοινότητα. Οι περισσότερες αξιολογήσεις της απόδοσης των προτεινόμενων λύσεων περιορίζονται είτε στη θεωρητική ανάλυση, είτε στη προσομοίωση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αγνοηθούν πρακτικά ζητήματα όπως η απώλεια των πακέτων, η απόκλιση των ρολογιών και οι περιορισμοί του υλικού, τα οποία επηρεάζουν την πρακτική εφαρμογή των κόμβων αισθητήρων. Υπάρχουν πολλές έρευνες στην σχετική βιβλιογραφία που συγκρίνουν διάφορα πρωτόκολλα συγχρονισμού καθώς και άλλες που ασχολούνται με τις μαθηματικές αποδείξεις και τα ζητήματα επεξεργασίας των σημάτων, ενώ λείπουν οι έρευνες πρακτικών εφαρμογών σε σύγκριση με τις υπόλοιπες.

Στα κατανεμημένα συστήματα ο συγχρονισμός του χρόνου ήταν ανέκαθεν ένα από τα βασικότερα προβλήματα. Οι εφαρμογές που απαιτούν συγχρονισμό ποικίλουν σύμφωνα με τις εφαρμογές των WSN. Στα κατανεμημένα συστήματα η έλλειψη μιας κοινόχρηστης μνήμης καθιστά αναπόφευκτη την κατασκευή πρωτοκόλλων για την ανταλλαγή μηνυμάτων στα υψηλότερα επίπεδα και σημάτων στα χαμηλότερα μεταξύ των

κόμβων [9]. Επιπλέον, η υψηλή διακύμανση στις επικοινωνιακές καθυστερήσεις και οι περιορισμοί των κόμβων, όπως η έλλειψη μνήμης, η καταναλώμενη ενέργεια και ο υπολογισμός, αυξάνουν την πολυπλοκότητα του ήδη υπάρχοντος προβλήματος. Τα πρωτόκολλα συγχρονισμού που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, σε αυτά που βασίζονται στην ανάλυση και στην αξιολόγηση βάσει προσομοίωσης και σε αυτά της εμπειρικής αξιολόγησης.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τη χρήση προσομοιώσεων του δικτύου, την μαθηματική ανάλυση και την μεταξύ τους σύγκριση, την εκτίμηση σφαλμάτων και τις παραλλαγές τους. Η μέθοδος αυτή παρέχει μια πρώιμη εκτίμηση για την απόδοση των πρωτοκόλλων, καθώς είναι σημαντικό να διερευνηθούν ζητήματα, όπως η δυνατότητα κλιμάκωσης, πριν τις πραγματικές δοκιμές. Παρόλα αυτά, δεν μπορεί να αντικατασταθεί ο πρακτικός πειραματισμός, διότι πολλές πτυχές παραμελούνται ή προσομοιώνονται υπό ιδανικές συνθήκες. Για παράδειγμα, οι διακυμάνσεις στις χρονικές καθυστερήσεις θεωρητικά ακολουθούν κάποια ιδανική κατανομή που μπορεί να παραμεληθεί, η απόκλιση των ρολογιών δεν μοντελοποιείται πλήρως και οι απώλειες πακέτων σπάνια λαμβάνονται υπόψιν.

Στην δεύτερη κατηγορία της εμπειρικής αξιολόγησης, εφαρμόζονται τα πρωτόκολλα σε πραγματικά δίκτυα αισθητήρων και με αυτό το τρόπο αξιολογούνται τα χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί κάθε πρωτοκόλλου. Οι ήδη υπάρχουσες εφαρμογές μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν και για άλλους σκοπούς σε ένα κοινό πλαίσιο, ωστόσο κάθε εφαρμογή πρωτοκόλλου είναι καταλληλότερη σε συγκεκριμένες περιπτώσεις.

Οι εφαρμογές των ασύρματων δικτύων αισθητήρων υποστηρίζουν πολλούς τομείς των δραστηριοτήτων της καθημερινής ζωής. Κάθε κόμβος, που συγκροτεί ένα τέτοιο δίκτυο, φέρει ένα σύνολο αισθητήρων και συλλέγει δεδομένα σχετικά με το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα η υγρασία και η θερμοκρασία. Οι μετρήσεις αυτές χρειάζεται να επισημαίνονται με έναν χρόνο αναφοράς, που συνήθως είναι του κεντρικού κόμβου, προκειμένου να αναλυθούν περαιτέρω. Το γεγονός ότι τα ρολόγια των κόμβων αποκλίνουν μεταξύ τους είναι γνωστό και αναπόφευκτο, με αποτέλεσμα η επίλυση του προβλήματος του συγχρονισμού σε ένα τέτοιο περιβάλλον να είναι αρκετά δύσκολη. Ένας προτεινόμενος αλγόριθμος συγχρονισμού βασίζεται στις χρονοσφραγίδες των πακέτων δεδομένων στο επίπεδο MAC [10]. Ουσιαστικά με αυτόν τον τρόπο συγχρονίζονται τα πακέτα δεδομένων καθώς μεταδίδονται προς τον κεντρικό κόμβο, αντί για τον κλασσικό συγχρονισμό των ρολογιών των κόμβων, χωρίς δηλαδή επιπλέον κόστος.

Η επέκταση των WSN στην καθημερινότητα οφείλεται στην ανάπτυξη συσκευών

χαμηλού κόστους που διαμορφώνουν ένα δίκτυο αισθητήρων. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ορισμένες ζητούμενες μετρήσεις, καταγράφει και την ακριβή χρονική στιγμή που αυτές έλαβαν χώρα, με σκοπό την ανάλυση τους. Όμως τα ρολόγια των κόμβων αποκλίνουν καθώς περνάει ο χρόνος λειτουργίας του δικτύου και έτσι η χρονική στιγμή που δίνεται από τον κόμβο που έλαβε τα δεδομένα ενδεχομένως να είναι λανθασμένη σε σχέση με το ρολόι του κεντρικού κόμβου, ο οποίος συλλέγει τα δεδομένα από τους αισθητήρες ολόκληρου του δικτύου. Πολλές προσεγγίσεις αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα με τον συγχρονισμό όλων των ρολογιών των κόμβων του δικτύου με την ανταλλαγή σχετικών μηνυμάτων μεταξύ γειτονικών κόμβων ή με τη χρήση GPS κ.α.

Μια εναλλακτική του συγχρονισμού όλων των κόμβων, είναι ο συγχρονισμός των μετρήσεων ανά hop καθώς τα πακέτα μεταδίδονται προς τον κεντρικό κόμβο. Συγκεκριμένα ο συγχρονισμός επιτυγχάνεται με την ενημέρωση της χρονικής σήμανσης των πακέτων ανά hop, χωρίς να ανταλλάσσονται επιπλέον μηνύματα συγχρονισμού. Κάθε πακέτο δεδομένων περιλαμβάνει ένα πεδίο χρονικών σημάνσεων που αντιστοιχεί στην εκτίμηση ρολογιού του κάθε κόμβου και για την κάθε μέτρηση.

Η ανάλυση του αλγορίθμου εστιάζει στην χρονική απόκλιση, η οποία ορίζεται από τη διαφορά της χρονικής σφραγίδας του πακέτου όταν λαμβάνεται από τον κεντρικό κόμβο και της χρονικής σφραγίδας της στιγμής που πραγματοποιήθηκε η μέτρηση. Η μέση χρονική διακύμανση εξαρτάται από το διάστημα παραμονής ενός πακέτου σε έναν κόμβο, από την απόσταση μεταξύ όλων των ενδιάμεσων κόμβων και του κεντρικού, δηλαδή των αριθμό των hops ανάμεσα τους, και την τιμή της μέσης χρονικής απόκλισης του υπό εξέταση μοντέλου. Όσο δηλαδή αυξάνεται ο αριθμός των hops, τόσο αυξάνεται και η μέση χρονική μεταβλητότητα.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων απαιτούν κάποιο είδος συγχρονισμού, καθώς αυτό αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη προβλήματα του τομέα. Πολλές φορές στην πράξη χρειάζεται ένας μηχανισμός κλιμακωτού συγχρονισμού, ώστε να “ξυπνάει” τους κόμβους αισθητήρων σε συγκεκριμένες και προγραμματισμένες χρονικές στιγμές. Μια τέτοια προσέγγιση βοηθά στην συντονισμένη επικοινωνία μεταξύ των κόμβων και ταυτόχρονα εξοικονομεί ενέργεια. Το πρωτόκολλο Low-Power Scheduling for Time Synchronization-LPSS [11] ελαχιστοποιεί την προκαθορισμένη επικοινωνία, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας και επιταχύνει τις δρομολογημένες διαδικασίες.

Τα τελευταία χρόνια τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων χρησιμεύουν σε πολλούς κλάδους όπως είναι οι ιατρικές εφαρμογές, η αυτοματοποίηση βιομηχανικών διαδικασιών, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος, κ.α. Τα εν λόγω δίκτυα αποτελούνται από ένα

σύνολο αισθητήρων που μπορούν να αλληλεπιδράσουν με το περιβάλλον, συλλέγουν δεδομένα, συνεργάζονται και επικοινωνούν για τη διάδοση πληροφοριών. Ωστόσο, οι κόμβοι αυτοί έχουν περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ και υπολογιστικούς πόρους, και συνήθως τροφοδοτούνται με μπαταρίες. Επομένως, είναι σημαντική η ελαχιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας ώστε να αυξηθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Επιπλέον, οι κόμβοι είναι εξοπλισμένοι με χαμηλού κόστους ρολόγια που οδηγούν στο πρόβλημα του συγχρονισμού. Κατά συνέπεια, ο συγχρονισμός των ρολογιών αυτών των κόμβων δεν μπορεί να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα, εκτός αν η διαδικασία του συγχρονισμού εκτελείται περιοδικά.

Ο στόχος πολλών πρωτοκόλλων συγχρονισμού είναι να συγχρονίσουν όλους τους κόμβους μεγάλων δικτύων αισθητήρων, μέσω της ανταλλαγής σχετικών μηνυμάτων. Πρακτικά όμως, τα πρωτόκολλα αυτά έχουν αδυναμίες όπως την απώλεια πακέτων μηνυμάτων λόγω συγκρούσεων, που επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας και οδηγεί στην απώλεια του συγχρονισμού. Καθώς αυτή η διαδικασία ανταλλαγής μηνυμάτων επαναλαμβάνεται επιλέγονται ορισμένοι κόμβοι που είναι υπεύθυνοι για τη διανομή των μηνυμάτων συγχρονισμού.

Το πρωτόκολλο συγχρονισμού βάσει πίνακα πυκνότητας (Density-Table-Based Synchronization-DTSync) [12] εισήγαγε μια αποτελεσματική τεχνική προγραμματισμού, όπου όλοι οι κόμβοι συγχρονίζονται χρησιμοποιώντας έναν ελάχιστο αριθμό κόμβων αναφοράς. Συνεπώς το DTSync απαιτεί λιγότερα μηνύματα σχετικά με το χρόνο, τα οποία με τη σειρά τους ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας. Για τη βέλτιστη απόδοση το πρωτόκολλο αυτό διεξάγει τη διαδικασία του συγχρονισμού μία φορά κατά την αρχικοποίηση του δικτύου ή όταν η τοπολογία του δικτύου υποστεί κάποια ουσιαστική τροποποίηση. Αν και μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας κατά την περιοδική διαδικασία συγχρονισμού και είναι ένας αρκετά ανθεκτικός τρόπος ενάντια σε συγκρούσεις πακέτων, έχει ορισμένους περιορισμούς. Όσο η πυκνότητα του δικτύου αυξάνεται ή η τοπολογία αλλάζει συχνά, το πρωτόκολλο προκαλεί τη μετάδοση ενός σχετικά μεγάλου αριθμού μηνυμάτων, που αυτό με τη σειρά του καταναλώνει υπερβολικά ποσά ενέργειας. Επομένως παρόμοια πρωτόκολλα με το DTSync δεν είναι κατάλληλα για δίκτυα που οι αλλαγές στην τοπολογία είναι συχνές και απαιτούν επανειλημμένη διαδικασία συγχρονισμού.

Η ταχεία τεχνολογική ανάπτυξη στον σχεδιασμό και την κατασκευή των ασύρματων δικτύων αισθητήρων, χρησιμεύει σε τομείς όπως η επιτήρηση περιοχών, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος και της κυκλοφορίας, ο βιομηχανικός αυτοματισμός,

κτλ. Αποτελούν τεχνολογία χαμηλού κόστους και συνήθως οι κόμβοι αισθητήρων είναι εξοπλισμένοι με χαμηλής ποιότητας ρολόγια και έχουν αυστηρούς περιορισμούς στην ενέργεια που καταναλώνουν. Η πρόκληση του συγχρονισμού των ρολογιών των αισθητήρων γίνεται όλο και δυσκολότερη όσο ένα τέτοιο δίκτυο επεκτείνεται και προστίθενται νέοι κόμβοι.

Υπάρχουν τρία πλαίσια κατά τα οποία γίνεται συνήθως ο συγχρονισμός, το master-slave, το peer-to-peer και ο κατανεμημένος. Στον master-slave συγχρονισμό επιλέγεται ένας master κόμβος του οποίου το ρολόι είναι καθολικό και λειτουργεί ως σημείο αναφοράς για τους υπόλοιπους slave κόμβους. Στα συστήματα συγχρονισμού σε peer-to-peer δίκτυα οποιοσδήποτε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με οποιοδήποτε άλλο κόμβο. Σε ένα κατανεμημένο σύστημα συγχρονισμού δεν υπάρχει ούτε κάποια ηγετική συσκευή, ούτε κάποιο ρολόι αναφοράς και κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τους γείτονες του. Κατά την κατανεμημένη προσέγγιση, κάθε κόμβος είναι αυτόνομος και επικρατούν ιδιότητες όπως η αλγοριθμική απλότητα, η ανθεκτικότητα ως προς εξωτερικά προβλήματα, οι αλλαγές στην τοπολογία μπορεί να είναι συχνές και χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα κλιμάκωσης σε μεγάλα δίκτυα.

Ένας αλγόριθμος συγχρονισμού ρολογιού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, είναι ένας γρήγορος αλγόριθμος συναίνεσης πεπερασμένου χρόνου και είναι πλήρως κατανεμημένος [13]. Κάθε κόμβος βασίζεται στο δικό του τοπικό ρολόι, αλλά και στις τιμές ρολογιού των γειτονικών κόμβων. Ο αλγόριθμος αυτός χαρακτηρίζεται από χαμηλή υπολογιστική και επικοινωνιακή πολυπλοκότητα και είναι ανθεκτικός ενάντια σε άλλες, μη σχετικές του συγχρονισμού, μεταδόσεις. Οι κόμβοι μπορούν να εκτελέσουν τον αλγόριθμο ασύγχρονα, ενώ δεν απαιτείται το ρολόι κάποιου συγκεκριμένου κόμβου ως αναφορά. Εξαιτίας της ταχείας σύγκλισης, ο αλγόριθμος είναι κατάλληλος για μεγάλης κλίμακας δίκτυα και ποικίλες τοπολογίες.

Α΄.4 Δομή της Πτυχιακής

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως κεντρικό θέμα την Υλοποίηση Αλγορίθμων Συγχρονισμού σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων σε Καλλιέργειες. Μέχρι στιγμής έγινε μια εισαγωγή στον τομέα και την τεχνολογία των Ασύρματων Δικτύων καθώς και των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων. Ακολούθησε η επεξήγηση του προβλήματος του Συγχρονισμού των ρολογιών σχετικά με το πως προκύπτει, αλλά και η σημαντικότητα του εν λόγω προβλήματος. Αφού έγινε η αναφορά στο κεντρικό πρόβλημα της παρού-

σας εργασίας, έγινε μια εκτεταμένη βιβλιογραφική αναφορά σε μεθόδους, πρωτόκολλα και αλγόριθμους που έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια ως τρόποι αντιμετώπισης του θεμελιώδους αυτού προβλήματος των ασύρματων δικτύων αισθητήρων.

Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθεί μια ακόμα βιβλιογραφική αναφορά περί καλλιέργειών και δικτύων αισθητήρων, που εμπεριέχει εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί σε καλλιέργειες στα πλαίσια της έξυπνης γεωργίας. Στη συνέχεια, ακολουθεί η περιγραφή του συστήματος με το οποίο υλοποιήθηκε η εν λόγω πτυχιακή εργασία, και περιέχει πληροφορίες σχετικά με την τεχνολογία πάνω στην οποία στηρίζεται. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων με σκοπό τη συλλογή χρονικών μετρήσεων. Παρακάτω, περιγράφεται εκτενώς ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας, και με βάση τον οποίο έγιναν τα πειράματα, ώστε να καταλήξουμε στα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατίθενται στο επόμενο κεφάλαιο, ανά κατηγορία και εξηγούνται εκτενώς. Τέλος, αναφέρονται τα συμπεράσματα της πτυχιακής εργασίας και αμέσως μετά οι βιβλιογραφικές αναφορές καθώς και το παράρτημα μου περιλαμβάνει τον κώδικα.

Κεφάλαιο Β΄

Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων και Καλλιέργειες

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων έχουν πολλαπλές εφαρμογές και χρήσεις σε πολλούς τομείς της σύγχρονης κοινωνίας. Ένας από αυτούς είναι και η έξυπνη γεωργία, που αποτελεί εξαιρετικά σημαντικό κομμάτι της βελτίωσης της οικονομικής απόδοσης και της παραγωγής τροφίμων. Ο γεωργικός τομέας αποτελεί για πολλά κράτη βασικό τομέα εσόδων, και η συνεχής βελτίωση του, φέρει πολλά πλεονεκτήματα. Τα τελευταία χρόνια γίνονται πολλές έρευνες με επίκεντρο την έξυπνη γεωργία, τη γεωργία ακρίβειας και τους γεωργικούς αυτοματισμούς. Οι εξελίξεις στα σύγχρονα πληροφοριακά συστήματα, την τεχνολογία των δικτύων και του αυτοματισμού κατέστησαν δυνατή την εν λόγω πρόοδο και συμβάλλουν στη συνεχή βελτίωση της ποιότητας και της αποδοτικότητας του γεωργικού τομέα. Η παρακολούθηση της ανάπτυξης μιας οποιασδήποτε καλλιέργειας είναι πλέον οικονομικά εφικτή και συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγής και των εσόδων και στην μείωση λαθών που συμβαίνουν εξαιτίας της φύσης της καλλιέργειας, όπως είναι η έγκαιρη πρόληψη και αντιμετώπιση ασθενειών καθώς και η εύρεση της κατάλληλης περιόδου συγκομιδής. Εκτός αυτού η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο συνεισφέρει στη πρόληψη και άμεση παρέμβαση σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, κλοπής και οποιουδήποτε συμβάντος θα μπορούσε να βάλει σε κίνδυνο την καλλιέργεια.

Β'.1 Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων σε Καλλιέργειες

Η αξιοποίηση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων στην γεωργία αναπτύσσεται με ταχύτατους ρυθμούς τα τελευταία χρόνια. Το ενδιαφέρον ερευνητών έχει στραφεί στην βέλτιστη και αποδοτικότερη χρήση τους στον τομέα αυτόν, ο οποίος περιλαμβάνει διάφορες πτυχές, και συνεπώς οι λύσεις ποικίλουν αναλόγως την περίπτωση. Οι τελευταίες έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα αυτό, επικεντρώνονται στην αποδοτικότερη συλλογή των δεδομένων και τη λήψη των κατάλληλων αυτοματοποιημένων αποφάσεων με το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Μια έρευνα που έγινε το 2011 [14], αφορά στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων Zigbee με εφαρμογή σε Καλλιέργειες. Στόχος της έρευνας είναι να τονίσει τη σημαντικότητα της ανάπτυξης της τεχνολογίας των δικτύων, στον τομέα της έξυπνης γεωργίας.

Τα τελευταία χρόνια η έξυπνη γεωργία αναπτύσσεται όλο και περισσότερο με ταχείς ρυθμούς και αποτελεί σημαντικό κομμάτι της οικονομίας. Ο λόγος που τα WSN είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε αυτόν το τομέα, είναι ότι τα αποτελέσματα της βελτίωσης της ποιότητας των προϊόντων είναι άμεσα. Με τη χρήση των Ασύρματων Δικτύων Zigbee, οι επαγγελματίες του τομέα της γεωργίας, έχουν στα χέρια τους πληροφορίες που δεν είχαν ποτέ ξανά στο παρελθόν. Τα δίκτυα Zigbee προσφέρουν μια οικονομική λύση στο πρόβλημα της παρακολούθησης μιας καλλιεργίσιμης έκτασης σε πραγματικό χρόνο.

Το πρωτόκολλο Zigbee και συγκεκριμένα το φυσικό επίπεδο του, παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στην έξυπνη γεωργία. Το φυσικό επίπεδο αποτελεί το υλικό μέσο από το οποίο αποτελείται το δίκτυο και επηρεάζεται από έναν μεγάλο αριθμό παραγόντων, όταν πρόκειται για καλλιέργειες. Για παράδειγμα, όταν οι κόμβοι τοποθετούνται σε ευρείες περιοχές ώστε να καλύψουν ένα μεγάλο κομμάτι αυτών, η ποιότητα του σήματος και της σύνδεσης δεν είναι πάντοτε η βέλτιστη. Το σήμα, ως μέσο μεταφοράς της πληροφορίας, εξαρτάται από διάφορους συντελεστές όπως είναι η πυκνότητα της βλάστησης σε μια καλλιέργεια, η γεωγραφική έκταση της, οι καιρικές συνθήκες, ακόμα και τα ίδια τα φυτά. Οι κόμβοι που φέρουν τους αισθητήρες θα πρέπει να είναι ικανοί να ανταπεξέλθουν και σε μεγάλες εκτάσεις, και σε ξηρό έδαφος και σε περιοχές με πυκνή βλάστηση. Η ισχύς του σήματος, εξαρτάται επίσης και από την απόσταση μεταξύ των κόμβων, οι οποίοι θα πρέπει να τοποθετηθούν σε τέτοιες αποστάσεις ώστε το δίκτυο να είναι αξιόπιστο.

Τα WSN χρησιμοποιούνται στην γεωργία τα τελευταία χρόνια, για να αυξήσουν την αποδοτικότητα, μέσω της συλλογής δεδομένων για την κάθε καλλιέργεια ξεχωριστά. Η συλλογή αυτή γίνεται σε έναν σταθμό ελέγχου (sink node) που στοχεύει στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την καλλιέργεια. Τα δεδομένα αυτά αφορούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες όπως ο καιρός, η θερμοκρασία, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, η υγρασία και το pH του εδάφους, η ανίχνευση ασθενειών και η ταυτοποίηση των καλλιεργειών έτοιμων προς αυτόματη συγκομιδή.

Μια ακόμα έρευνα που πραγματοποιήθηκε το 2014 [15], επικεντρώνεται στις εφαρμογές που έχουν τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων στην γεωργία. Σκοπός είναι η ανασκόπηση της ανάγκης χρήσης των WSN σε διαφορετικές πτυχές της γεωργίας. Οι σύγχρονοι αισθητήρες και τα δίκτυα στηρίζουν τις γεωργικές πρακτικές ως προς μία πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση. Χρησιμοποιούνται για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με το φυσικό περιβάλλον και τις μεταβολές του, και όταν χρειαστεί λαμβάνουν τον έλεγχο μιας κατάστασης.

Οι συσσωρευμένες πληροφορίες που αποθηκεύουν οι αισθητήρες χαρακτηρίζουν το αντικείμενο, την κατάσταση της καλλιέργειας και το περιεχόμενο αυτών συμβάλλει στην μοντελοποίηση των καταστάσεων. Ο λόγος που είναι χρήσιμα τα WSN στον γεωργικό τομέα είναι η συλλογή πληροφοριών για τις καιρικές συνθήκες, τις καλλιέργειες και το έδαφος, η παρακολούθηση πολλαπλών καλλιεργειών σε ένα κομμάτι γης και οι διαφορετικές απαιτήσεις όλων αυτών. Επιπλέον η επίγνωση μιας κατάστασης καθ'όλη τη διάρκεια ανάπτυξης της, προσφέρει προληπτικές και όχι δραστικές λύσεις. Οι απαιτήσεις αυτές συνεπάγονται μια κατανομημένη εφαρμογή και επεξεργασία για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Υπάρχουν διάφορα είδη ασύρματων δικτύων όπως το Bluetooth, το Wifi, το Wibree, αλλά προτεινόμενο είναι το Zigbee, εξαιτίας του χαμηλού κόστους και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Ζητήματα όπως η κατανάλωση ενέργειας, το χρονικό διάστημα ανά το οποίο θα στέλνονται τα πακέτα και η τοποθεσία κάθε κόμβου είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τις γεωργικές εφαρμογές. Πολλές φορές το περιβάλλον προς παρακολούθηση είναι δυσμενές και θα πρέπει να βρεθεί λύση σε αυτά τα ζητήματα, προτού διαμορφωθεί το δίκτυο. Οι πρακτικές εφαρμογές επεκτείνονται σε πτυχές όπως η αυτόματη άρδευση και ρίψη λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων, ο έλεγχος παρασίτων και ασθενειών, η κηπουρική, τα θερμοκήπια, οι αμπελώνες αλλά και η παρακολούθηση ζώων και βοσκοτόπων.

Τα προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση των WSN στην γεωργία, ενδεχομένως να απαιτούν περίπλοκες και μη οικονομικές απαντήσεις. Για τον λόγο αυτό,

προτείνεται η ανάπτυξη ανθεκτικών κόμβων αισθητήρων χαμηλού κόστους, που προσφέρουν γενικευμένες λύσεις σε διάφορα συναφή ζητήματα. Επίσης θα ήταν χρήσιμη η δημιουργία συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων και μοντελοποίησης με σκοπό την βέλτιστη αξιοποίηση και αναπαράσταση των δεδομένων που συλλέγει το δίκτυο.

Η εν λόγω έρευνα [16] παρουσιάζει την ανάπτυξη ενός Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων, βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.15.4. Στόχος της είναι η καταμέτρηση της θερμοκρασίας ώστε να εξακριβωθεί το πότε ο παγετός αποτελεί πρόβλημα. Απώτερος σκοπός υπήρξε η μείωση της κατανάλωσης ρεύματος στο ελάχιστο δυνατό, επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση εξ' αποστάσεως των κόμβων που είναι υπεύθυνοι για τις μετρήσεις. Για την διεπαφή της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων και των αισθητήρων, αναπτύχθηκε ένα σειριακό πρωτόκολλο εμπνευσμένο από το SDI-12.

Η γεωργία ακρίβειας χρησιμοποιεί συστήματα υποστήριξης αποφάσεων για την επίτευξη της διαχείρισης των καλλιεργειών. Οι μετρήσεις, όπως η θερμοκρασία ή η υγρασία, υπολογίζονται με αισθητήρες τοποθετημένους στην γεωργική έκταση. Τα WSN συγκροτούνται από κατανεμημένα προγραμματισμένους κόμβους, οι οποίοι είναι εξοπλισμένοι με τους θεμιτούς αισθητήρες, είναι αυτόνομοι και επικοινωνούν ασύρματα. Οι κόμβοι αυτοί είναι μικρές συσκευές ικανές να επικοινωνούν μεταξύ τους, να εκτελούν συγκεκριμένες διεργασίες και να καταναλώνουν χαμηλά ποσά ενέργειας. Ένα σημαντικό ζήτημα στον αγρονομικό τομέα είναι η χωρική και η χρονική ανάλυση που τα WSN παρέχουν, για την κατασκευή μοντέλων που προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια των δεδομένων.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου περιλαμβάνει το πρότυπο IEEE 802.15.4 που επιτρέπει τοπολογίες peer-to-peer και αστέρες στα δίκτυα προσωπικού χώρου. Οι κόμβοι του δικτύου αποτελούνται από FFD (Full Function Devices) και RFD (Reduced Function Devices) συσκευές, και για την αποφυγή των συγκρούσεων των πακέτων με τα δεδομένα χρησιμοποιείται το CSMA/CA πρωτόκολλο του επιπέδου MAC. Τα ζητήματα σε ένα δίκτυο αισθητήρων, εκτός από τη φυσική δημιουργία του, είναι αρχικά η λήψη των μετρήσεων από τους αισθητήρες και τα χαμηλά ποσά ενέργειας που απαιτούνται ώστε να γίνονται όλες οι απαιτούμενες εργασίες με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Επίσης, είναι εξίσου κρίσιμο το ζήτημα του συγχρονισμού, καθώς είναι σημαντική η πληροφορία της ακριβούς χρονικής στιγμής που καταγράφηκαν τα δεδομένα.

Το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων που αναπτύχθηκε για την εν λόγω γεωργική έρευνα, με την χρήση αισθητήρων θερμοκρασίας, επιτυγχάνει χαμηλό κόστος και τις απαιτήσεις ακρίβειας των μετρήσεων. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα αποτελέσματα η διάρκεια

B'.1. Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων σε Καλλιέργειες 23

ζωής του συστήματος ανέρχεται στα δύο χρόνια. Κύριος άξονας της έρευνας είναι οι μετρήσεις θερμοκρασίας με σκοπό την καταμέτρηση της, ώστε να αναπτυχθεί ένα σύστημα που θα προβλέπει τον παγετό και θα συμβάλλει στο ληφθούν μέτρα για την πρόληψη της καταστροφής των καλλιεργειών.

Στην ακόλουθη έρευνα του 2015 [17], αναπτύχθηκε ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων επίσης για την παρακολούθηση γεωργικών εκτάσεων. Ο γεωργικός τομέας οδεύει προς τα αυτοματοποιημένα συστήματα που κάνουν χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των αναπτυσσόμενων φυτών. Αυτός ο τρόπος παρακολούθησης βοηθάει τους εργαζομένους, προστατεύει το περιβάλλον και επιφέρει κέρδη μακροπρόθεσμα. Παρόλο που η συνεχής παρακολούθηση και ο έλεγχος μιας απομακρυσμένης τοποθεσίας είναι τεχνικά δύσκολος τα WSN παρέχουν μια απλή οικονομική λύση για τα ζητήματα αυτά.

Καθώς η βιομηχανία της γεωργίας αλλάζει, προκύπτουν νέες ανάγκες που απαιτούν αυτοματοποιημένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου των αναπτυσσόμενων καλλιεργειών. Στις γεωργικές και περιβαλλοντικές επιστήμες είναι σημαντική η εποπτεία και η συλλογή των δεδομένων από το περιβάλλον για μεγάλες χρονικές περιόδους. Στη σύγχρονη γεωργία ακριβείας χρησιμοποιούνται τα WSN για τους λόγους αυτούς, καθώς επιτρέπουν στον χρήστη την επίβλεψη και τον έλεγχο των περιβαλλοντικών παραμέτρων που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών. Ο ρόλος των WSN είναι να ανιχνεύουν τα απομακρυσμένα δεδομένα με διάφορους αισθητήρες και να μεταδίδουν τις ακριβείς πληροφορίες στον σταθμό βάσης και κατ' επέκτασιν στον χρήστη. Σε περιπτώσεις που κάποια τιμή αποκλίνει από τα ανάλογα όρια του εύρους της, αποστέλλεται συναγερμός στον χρήστη ώστε να δράσει άμεσα και να λάβει τα κατάλληλα μέτρα.

Το δίκτυο της έρευνας αποτελείται από την Zigbee τεχνολογία και περιλαμβάνει ένα σύνολο κόμβων και ένα σταθμό βάσης. Κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με έναν επεξεργαστή, μνήμη, αισθητήρες, μια κεραία και λειτουργεί με μπαταρία. Τα δεδομένα που λαμβάνονται αποστέλλονται στον σταθμό βάσης, όπου συλλέγονται και στη συνέχεια επεξεργάζονται. Οι Zigbee κεραίες είναι συνδεδεμένες με έναν μικροεπεξεργαστή Arduino/Freeduino (ATMega328) για τις ανάγκες του πρότζεκτ. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν είναι για την καταμέτρηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Σχετικά με σχεδιασμό του λογισμικού, αυτό αποτελείται από πομπούς και δέκτες. Η καλλιέργεια παρακολουθείται συνεχώς από τους αισθητήρες και τα δεδομένα στέλνονται, αποθηκεύονται και επεξεργάζονται στο σταθμό βάσης.

Τα WSN παρέχουν μια οικονομική λύση που καταναλώνει χαμηλά ποσά ενέργειας

για την παρακολούθηση και τον έλεγχο γεωργικών εκτάσεων. Η συμβολή τους, εκτός από την συλλογή πληροφοριών, είναι η υποστήριξη στη λήψη σημαντικών αποφάσεων από τους επαγγελματίες του χώρου, καθώς παρέχεται η ευρύτερη εικόνα της ανάπτυξης μιας καλλιέργειας.

Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων επεκτάθηκαν με γρήγορους ρυθμούς σε διάφορους τομείς όπως η ιατρική, η παρακολούθηση του περιβάλλοντος, βιοτεχνολογία, κ.α. Η χρησιμότητα τους διακρίνεται στη συλλογή δεδομένων μέσω αισθητήρων, στην αποθήκευση, την επεξεργασία τους και την αποστολή τους σε ένα σταθμό βάσης. Σύμφωνα με την παρούσα έρευνα [18], η γεωργία είναι ένας τομέας που τα WSN βοηθούν στο να μπορούν οι επαγγελματίες του χώρου να λαμβάνουν και να μεταδίδουν δεδομένα από αισθητήρες χωρίς καθυστερήσεις, σε πραγματικό χρόνο.

Τα WSN περιλαμβάνουν προηγμένη τεχνολογία που συμβάλλει στην ανάπτυξη της γεωργίας ακριβείας. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από RF Radio Modules, μικροεπεξεργαστές που επεξεργάζονται τα δεδομένα, μπαταρίες ή κάποια άλλη πηγή τροφοδοσίας και έναν σταθμό βάσης όπου αποστέλλονται τα δεδομένα. Οι κόμβοι με τους αισθητήρες τοποθετούνται σε μία ευρεία περιοχή καλύπτοντας της, και καταγράφουν δεδομένα πολλών παραμέτρων του περιβάλλοντος. Οι αισθητήρες είναι διαφόρων τύπων και διακρίνονται σε αισθητήρες υγρασίας εδάφους, LDR (Light Dependent Resistor), θερμίστορ και θερμοκρασίας. Επιπλέον υπάρχουν κι άλλοι τύποι όπως IR (Infared Sensor) και UV (Ultraviolet Radiaton Sensor), καθώς και αισθητήρες καταμέτρησης της απόστασης που χρησιμεύουν στην γεωργία ακριβείας. Μόλις τοποθετηθούν οι κόμβοι και σχηματιστεί το δίκτυο, τα δεδομένα μεταδίδονται αυτόματα. Αν κάποια συσκευή, λόγω βλάβης ή άλλης αιτίας, καταρρέει, δεν καταρρέει ολόκληρο το δίκτυο, αλλά αλλάζουν οι διαδρομές που ακολουθούν τα πακέτα προς τον προορισμό.

Για τις ανάγκες της έρευνας, το WSN που αναπτύχθηκε, κάνει χρήση της τεχνολογίας Zigbee, που κρίθηκε η καταλληλότερη μέθοδος για δυσμενείς κλιματικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Η τοπολογία του δικτύου παίζει σημαντικό ρόλο στην ανταλλαγή και την μετάδοση των δεδομένων, σε συνδυασμό με το πρωτοκόλλο δρομολόγησης. Οι κόμβοι απαρτίζονται από αισθητήρες καταμέτρησης υγρασίας της ατμόσφαιρας και του εδάφους, θερμοκρασίας και φωτεινότητας. Είναι συνδεδεμένοι με τον μικροελεγκτή Arduino/Genuino Uno που βασίζεται στον μικροεπεξεργαστή ATmega328P. Επίσης τα Xbee PRO S2B series που λειτουργούν στα 9600 baud rate, είναι συνδεδεμένα στις Arduino πλακέτες. Οι αισθητήρες που καταγράφουν τα δεδομένα τα στέλνουν στο Arduino και στη συνέχεια στέλνονται όλα στον Coordinator του

δικτύου με τη βοήθεια των Xbee Modules.

Το σύστημα αυτό στοχεύει στη συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες, ωστόσο μια χρήσιμη επέκταση θα μπορούσε να είναι η εγκατάσταση καμερών για streaming μετάδοση, ώστε να παρακολουθείται η υγεία των καλλιεργειών. Αναλόγως το είδος της καλλιέργειας απαιτούνται διάφορες ανάγκες, καθώς υπάρχουν είδη φυτών που χρειάζονται για παράδειγμα περισσότερο φως, ενώ κάποια άλλα περισσότερη ύδρευση. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο υπάρχουν πολλά είδη αισθητήρων, καθένas από αυτούς απευθύνεται σε διαφορετικές καλλιέργειες, γεγονός που δείχνει την ευελιξία των WSN στον γεωργικό τομέα.

Η χρήση των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων επεκτείνεται στον σχεδιασμό Συστημάτων Υποστήριξης Αποφάσεων για την επίλυση πραγματικών προβλημάτων. Για τα γεωργικά περιβάλλοντα είναι σημαντική η παρακολούθηση για τον έλεγχο, την προστασία και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο με το φυσικό περιβάλλον. Ένα έξυπνο σύστημα WSN συλλέγει και παρακολουθεί τις πληροφορίες εκείνες που σχετίζονται με το περιβάλλον ανάπτυξης καλλιεργειών, κάνοντας χρήση ειδικών αισθητήρων. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν τον αυτόματο έλεγχο ορισμένων συνθηκών, έτσι ώστε να βελτιώνεται η παραγωγικότητα των καλλιεργειών.

Τα WSN είναι ιδανικά για την παροχή αποτελεσματικών και οικονομικά βιώσιμων λύσεων, για μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Η ραγδαία ανάπτυξη των MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) [19] έχει συνεισφέρει στη δημιουργία μικρών και έξυπνων αισθητήρων. Τα δίκτυα που αποτελούνται από τέτοιους καταναμεμημένους κόμβους αισθητήρων, στοχεύουν στη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων του περιβάλλοντος, καθώς και στην επικοινωνία μεταξύ των κόμβων σχετικά με τα δεδομένα αυτά. Σκοπός του δικτύου που αναπτύχθηκε σε αυτή την έρευνα ήταν ο σχεδιασμός ενός συστήματος επίβλεψης καλλιεργειών, βασισμένος στην WSN τεχνολογία. Οι παράμετροι που παρακολουθούν οι αισθητήρες σε αυτή την περίπτωση είναι η θερμοκρασία, η υγρασία, η ένταση του φωτός, το επίπεδο των βροχοπτώσεων, η ατμοσφαιρική πίεση, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH.

Οι εφαρμογές παρακολούθησης του περιβάλλοντος μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επίβλεψη εσωτερικών και εξωτερικών χώρων. Οι πρώτες περιλαμβάνουν την καταμέτρηση θερμοκρασίας, φωτός, υγρασίας και της ποιότητας του αέρα, και εφαρμόζονται σε κτήρια και θερμοκήπια. Οι εξωτερικές ασχολούνται με τον εντοπισμό επικινδυνών χημικών, παρακολούθηση οικότοπων και της κυκλοφορίας στους δρόμους, ανίχνευση σεισμικής δραστηριότητας και πλημμύρων, καθώς και για την πρόγνωση του καιρού.

Σχετικά με τα γεωργικά περιβάλλοντα, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός παραγόντων που επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών και της ποιότητας τους. Πολλοί από αυτούς τους παράγοντες υποδηλώνουν τον κίνδυνο εμφάνισης ασθενειών και τα δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μελλοντική τους πρόβλεψη και αντιμετώπιση.

Οι εφαρμογές συστημάτων παρακολούθησης σε γεωργικά περιβάλλοντα, έχοντας χαμηλό κόστος και καταναλώνοντας χαμηλά ποσά ενέργειας, είναι ιδανικά για την παρακολούθηση των γεωργικών παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Αξιοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, μπορεί να αυξηθεί η αποδοτικότητα παραγωγής, η βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, η εξοικονόμηση ενέργειας και η συμβολή στην προστασία του περιβάλλοντος.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια έλλειψη στις γεωργικές εκτάσεις και ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές, γεγονός που οδηγεί στο πρόβλημα των κατεψυγμένων φρούτων και λαχανικών στα οποία προστίθενται επιβλαβή συντηρητικά για την υγεία. Πλέον, εκτός από τη συμβατική γεωργία, υπάρχει η δυνατότητα καλλιέργειας και σε εσωτερικούς χώρους, που μπορεί να λειτουργήσει ως μία από τις λύσεις στο πρόβλημα έλλειψης καλλιεργήσιμων εκτάσεων [20]. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να υποστηρίξουν αυτά τα είδη εσωτερικών γεωργικών καλλιεργειών.

Εφόσον τα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται ευρέως στην έξυπνη γεωργία και γενικότερα στην καλλιέργεια, αποδεικνύονται κατάλληλα για την εφαρμογή τους και σε κλειστούς χώρους για τους ίδιους λόγους. Με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν σε μια γεωργική έκταση, οι κόμβοι αισθητήρων παρακολουθούν την ανάπτυξη της καλλιέργειας συλλέγοντας δεδομένα, και στη συνέχεια αυτά αποστέλλονται σε έναν κεντρικό κόμβο διαχειριστή. Ένα σύστημα παρακολούθησης εσωτερικών γεωργικών εφαρμογών μπορεί να συγκροτηθεί από τους κόμβους αισθητήρων για τη συλλογή των δεδομένων, από έναν δρομολογητή και μία πύλη δικτύου. Καθώς τα δεδομένα παραλαμβάνονται από τη πύλη, ο χρήστης έχει πρόσβαση σε αυτά μέσω του προσωπικού του υπολογιστή και έτσι έχει ανά πάσα στιγμή την πλήρη εικόνα των αναπτυσσόμενων φυτών. Πέρα από την επιτήρηση και τη συλλογή δεδομένων, οι αισθητήρες με τον κατάλληλο προγραμματισμό βοηθούν τον χρήστη ώστε να παρθούν οι σωστές αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, όπως για παράδειγμα η παύση της άρδευσης όταν τα επίπεδα του νερού ξεπεράσουν μια συγκεκριμένη ανώτατη τιμή.

Οι παράμετροι που παρακολουθούνται τις περισσότερες φορές είναι η υγρασία, η θερμοκρασία, τα επίπεδα του νερού και η ένταση του φωτός. Αναλόγως την καλλιέργεια

B'.1. Εφαρμογές των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων σε Καλλιέργειες 27

αυτές οι παράμετροι πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ κάποιων ορίων, που καθιστούν την καλλιέργεια υγιή και τα προϊόντα κατάλληλα προς κατανάλωση. Οι αισθητήρες του δικτύου παρέχουν αυτές τις πληροφορίες και ορισμένες φορές λαμβάνουν αυτόματα αποφάσεις με σκοπό την παραγωγή μιας υγιούς σοδειάς. Τέτοια συστήματα, παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στα θερμοκήπια, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, αποδοτικά και με χαμηλό κόστος κατασκευής ώστε να εφαρμοστούν σε αστικά κέντρα που η καλλιέργεια φρέσκων τροφίμων είναι εξαιρετικά σπάνια.

Ένα από τα σημαντικότερα και κρίσιμότερα ζητήματα σχετικά με τις γεωργικές καλλιέργειες είναι η υγεία των φυτών και ο επιβλαβής πληθυσμός παρασίτων που αναπτύσσονται σε αυτές. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων προσαρμοσμένα προγραμματιστικά στην διατήρηση της υγείας μιας καλλιέργειας αποτελούν μια προσιτή, αποτελεσματική και οικονομική λύση. Σε αυτό το πλαίσιο, ένα WSN που βασίζεται σε γεγονότα συγκεκριμένων παραμέτρων κρίσιμων για τα φυτά και που ανιχνεύει την ανάπτυξη παρασίτων και εντόμων, συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων της έξυπνης γεωργίας.

Η σωστή λειτουργία ενός τέτοιου δικτύου αισθητήρων με αυτόν το σκοπό, εξαρτάται άμεσα από το είδος της καλλιέργειας. Κάθε ποικιλία φυτών απαιτεί διαφορετικές ποσότητες πόρων και ευδοκimei κάτω από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Επομένως το είδος της καλλιέργειας είναι το βασικό κριτήριο για την επιλογή του αριθμού των κόμβων, της τοπολογίας και των αισθητήρων ώστε να μπορούν να αποδώσουν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Το σύστημα είναι πλήρως κατανεμημένο και κάθε κόμβος είναι εξοπλισμένος με τους ανάλογους αισθητήρες, συλλέγει και αποστέλλει δεδομένα και δίνει τη δυνατότητα επιτήρησης της γεωργικής έκτασης εξ' αποστάσεως [21]. Τα δεδομένα καταλήγουν σε έναν σταθμό βάσης όπου και επεξεργάζονται με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων και στη συνέχεια στην αποθήκευσή τους.

Η διαφορά του εν λόγω συστήματος που ουσιαστικά λειτουργεί βάσει γεγονότων, με συστήματα συνεχούς επιτήρησης, είναι ότι στην προκειμένη περίπτωση μειώνεται η απόκτηση δεδομένων και οι δραστηριότητες μετάδοσης. Εφόσον το ζητούμενο και ο στόχος των WSN είναι η διατήρηση της υγείας των φυτών, τα μη σχετικά δεν είναι απαραίτητα για λόγους απόδοσης. Οι κόμβοι αισθητήρων αλληλεπιδρούν άμεσα με το περιβάλλον και η ανίχνευση που πραγματοποιούν είναι στοχευμένη σε συγκεκριμένες παραμέτρους.

Οι κλιματικές συνθήκες στις μέρες μας αλλάζουν και δεν είναι πλέον εύκολα προβλέψιμες. Τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων προσφέρουν διάφορες μεθόδους για την

ανάπτυξη υγείων καλλιεργειών σύμφωνα με αυτήν την έρευνα του 2016 [22]. Εξαιτίας των απρόβλεπτων κλιματικών αλλαγών, αυξάνεται το κόστος ζημιών και απωλειών στις καλλιέργειες, και μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η γεωργία ακριβείας. Αυτού του είδους η γεωργία περιλαμβάνει συλλογή, επεξεργασία και αποστολή δεδομένων μιας καλλιέργειας σε μια κεντρική συσκευή ώστε να ληφθούν κατάλληλες αποφάσεις.

Ο σχεδιασμός του ασύρματου δικτύου βασίζεται στα Arduino Uno. Κάθε κόμβος έχει ένα σύνολο αισθητήρων που συνδέονται με το Arduino και τα Xbee PRO S2B Series. Το δίκτυο είναι κεντριοποιημένο ως προς την coordinator συσκευή του, η οποία συνδέεται με το κεντρικό μηχάνημα. Οι παράμετροι για τις οποίες καταγράφονται μετρήσεις με τη χρήση των αισθητήρων είναι η υγρασία του εδάφους και της ατμόσφαιρας, η θερμοκρασία και η ένταση του φωτός. Για τον συντονισμό και τη συντήρηση του δικτύου αισθητήρων παίζουν σημαντικό ρόλο ο συγχρονισμός, η τοποθεσία και η κάλυψη που προσφέρουν οι κόμβοι. Με την χρήση των Xbee PRO S2B series, αυτά τα δεδομένα προωθούνται στην coordinator συσκευή και αυτή στη συνέχεια τα αποστέλλει στο κέντρο συγκέντρωσης των δεδομένων.

Στο εν λόγω δίκτυο της παρούσας έρευνας, ο coordinator του συστήματος είναι συνδεδεμένος με άλλους δύο κόμβους των οποίων τα ρολόγια είναι συγχρονισμένα σύμφωνα με του coordinator. Στη συνέχεια μεταδίδονται τα δεδομένα ανάλογα με αυτόν τον συγχρονισμό. Ένα τέτοιο δίκτυο είναι αξιόπιστο, και όλοι οι κόμβοι τοποθετούνται σε διαφορετικά σημεία, σχηματίζοντας μία τοπολογία πλέγματος. Στη γεωργία ακριβείας παρακολουθούνται οι τιμές των αισθητήρων συνεχώς και λαμβάνονται σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές, ενώ οι κόμβοι πρέπει να βρίσκονται σε σταθερό σημείο. Για την επίτευξη των ορθών αποτελεσμάτων μιας καλλιέργειας οι κόμβοι είναι αναγκαίο να είναι συγχρονισμένοι μεταξύ τους, για τη βέλτιστη απόδοση μιας καλλιέργειας.

Β'.2 Συγχρονισμός και Καλλιέργειες

Η καλλιέργεια της γης αποτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα θεμέλια της επιβίωσης και της εξέλιξης του ανθρώπου. Στη σημερινή εποχή η γεωργία έχει αλλάξει μορφή, καθώς η τεχνολογία επεκτάθηκε στον τομέα αυτό και πολλές αγροτικές διαδικασίες γίνονται με τη χρήση μηχανημάτων ή αυτοματοποιήθηκαν εντελώς, βελτιώνοντας την πολλές φορές δύσκολη εργασία των αγροτών.

Η ανάπτυξη εφαρμογών με βάση τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων στον τομέα της,

πλέον έξυπνης γεωργίας, είναι ένα θέμα που απασχόλησε και εξακολουθεί να απασχολεί πολλούς ερευνητές και επιχειρήσεις. Η τεχνολογία των WSN αξιοποιείται σε καθημερινή βάση σε γεωργικές εκτάσεις και επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα σε οικονομικό επίπεδο. Οι συνηθέστεροι λόγοι για τους οποίους αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα αποδοτική, είναι ότι ο υλικός εξοπλισμός είναι οικονομικός, προσφέρει την επιτήρηση και συλλογή δεδομένων εξ' αποστάσεως σε δύσβατες περιοχές και είναι ένα ευέλικτο εργαλείο που βοηθάει στη λήψη σημαντικών αποφάσεων. Πολλά από τα συστήματα που είναι βασισμένα στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων κινούνται σε παρόμοια πλαίσια. Οι παράμετροι για τις οποίες συλλέγονται τα δεδομένα από τους αισθητήρες είναι συγκεκριμένες και διαφοροποιούνται αναλόγως με την καλλιέργεια και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, αποθηκεύονται και επεξεργάζονται με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων και η επιτήρηση γίνεται σε πραγματικό χρόνο.

Οι κόμβοι αισθητήρων είναι εξοπλισμένοι ως επί το πλείστον με ρολόγια χαλαζία. Η κατανομημένη φύση σε συνδιασμό με τα χαμηλής ποιότητας ρολόγια, έχει σαν αποτέλεσμα το πρόβλημα του συγχρονισμού. Από τη στιγμή που οι κόμβοι αυτών των δικτύων δεν μοιράζονται ένα κοινό ρολόι, αλλά αντιθέτως έχει ο καθένας το δικό του, το δίκτυο δεν μπορεί να είναι ποτέ απόλυτα συγχρονισμένο. Ωστόσο υπάρχουν διάφορες κατηγορίες αλγορίθμων και πρωτοκόλλων συγχρονισμού, και αναλόγως το δίκτυο, την εφαρμογή και τις ανάγκες του συστήματος και του χρήστη, επιλέγεται η κατάλληλη προσέγγιση. Παρόλο που ο απόλυτος συγχρονισμός είναι πρακτικά αδύνατος, η απόδοση των προτεινόμενων, από τη σχετική βιβλιογραφία, λύσεων έχει σημαντικά αποτελέσματα ακριβείας. Η διαδικασία του συγχρονισμού ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων, θα πρέπει να γίνεται ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς τα τοπικά ρολόγια των κόμβων ξεσυγχρονίζονται αναπόφευκτα όσο το σύστημα είναι σε λειτουργία.

Το πρόβλημα του συγχρονισμού των ρολογιών, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελεί ένα από τα βασικότερα ζητήματα προς επίλυση στα κατανομημένα συστήματα. Η χρήση τους σε εφαρμογές στον αγρονομικό τομέα δεν διαφέρει από τις υπολοιπές και ο συγχρονισμός εξακολουθεί να είναι ένα ζήτημα μεγάλης βαρύτητας. Γενικότερα, ένα σύστημα όπως τα WSN, που αποτελούνται από πολλές συσκευές για την επίτευξη ενός στόχου, χρειάζονται απαραίτητα μια κοινή αίσθηση του χρόνου. Ο πρώτος λόγος και ο πιο προφανής που ο συγχρονισμός είναι αναγκαίος, είναι για την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Όταν οι κόμβοι αισθητήρων συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον μιας καλλιέργειας και στη συνέχεια τα στέλνουν στον κεντρικό κόμβο με

σκοπό την επεξεργασία τους για την κατάληξη σε συμπεράσματα, τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να έχουν ληφθεί μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Διαφορετικά, αν κάθε κόμβος καταγράφει τα δεδομένα σύμφωνα με το δικό του τοπικό ρολόι, τα αποτελέσματα που θα παραχθούν όχι μόνο δεν θα είναι ακριβή, αλλά θα είναι λανθασμένα και ενδεχομένως να ληφθούν οι λάθος και ταυτοχρόνα σοβαρές αποφάσεις.

Πολλές φορές τα WSN για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, μπαίνουν σε “λειτουργία ύπνου”. Όταν χρειαστεί να ενεργοποιηθούν για να συνεχίσουν με τις ανατεθειμένες εργασίες τους, τα ρολόγια μεταξύ τους θα έχουν αποκλίνει. Επίσης η ενεργοποίηση είναι μια διαδικασία που θα πρέπει να γίνει συγχρονισμένα, καθώς υπάρχει πιθανότητα να χαθούν πακέτα από κόμβους που ενεργοποιήθηκαν ετεροχρονισμένα σε σχέση με τους υπόλοιπους. Όσο οι κόμβοι είναι ενεργοί και συλλέγουν δεδομένα, η διαδικασία του συγχρονισμού θα πρέπει να επαναλαμβάνεται ανά τακτά χρονικά, και τις περισσότερες φορές, σταθερά διαστήματα. Αυτό συμβαίνει διότι τα τοπικά ρολόγια κάθε κόμβου, αποκλίνουν μετά από κάποιο χρονικό διάστημα. Επιπλέον πολλές από τις εργασίες που πρέπει να έρθουν εις πέρας είναι αυτοματοποιημένες. Για παράδειγμα σε ένα αυτόματο σύστημα άρδευσης, η παροχή νερού πρέπει να σταματήσει αφού η ποσότητα του νερού φτάσει σε ένα επιτρεπτό όριο. Αυτή η διαδικασία εφόσον είναι κατανεμημένη πρέπει να συμβεί ταυτόχρονα για όλη την έκταση του δικτύου και κατ’ επέκτασιν της καλλιέργειας.

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων όταν εφαρμόζονται σε γεωργικές εφαρμογές, επιτηρούν και καταγράφουν τιμές από τους αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο. Συνεπώς, οι επαγγελματίες του χώρου πρέπει να έχουν την πλήρη εικόνα της εκάστοτε καλλιέργειας επίσης σε πραγματικό χρόνο. Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται πολλές φορές και για την παρακολούθηση των φυτών με σκοπό την επιτήρηση του σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, όπως οι πυρκαγιές. Σε παρόμοιες επείγουσες καταστάσεις το δίκτυο πρέπει να είναι συγχρονισμένο ώστε να ενημερώνεται ο υπεύθυνος της καλλιέργειας έγκαιρα για να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας.

Η καλλιέργεια της γης ήταν ανέκαθεν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι της καθημερινότητας και της οικονομίας. Στη σύγχρονη εποχή, διατίθενται πλέον τα μέσα για την βελτίωση και την αύξηση της παραγωγής των γεωργικών προϊόντων. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων παίζουν έναν καθοριστικό ρόλο την διαδικασία της παραγωγής τροφίμων, που είναι άμεσα συνδεδεμένη με έναν υγιή τρόπο ζωής. Ο συγχρονισμός των ρολογιών αποτελεί βασικό πρόβλημα στα κατανεμημένα συστήματα, των οποίων η βέλτιστη και αποδοτική λειτουργία έχει άμεσο αντίκτυπο με το αποτέλεσμα των εφαρ-

μογών τους, ενώ η επίλυση του δεν θα έπρεπε να παραλείπεται.

Κεφάλαιο Γ΄

Περιγραφή Συστήματος

Η εν λόγω εργασία, όπως ήδη αναφέρθηκε, περιλαμβάνει και ένα μέρος που αποτελείται από έναν αλγόριθμο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της και την υλοποίησή του. Για αυτήν την υλοποίηση έγινε χρήση συγκεκριμένων συσκευών που δημιούργησαν ένα Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων με 5 κόμβους.

Το σύστημα, που συγκροτεί το δίκτυο των 5 κόμβων αποτελείται από 5 Arduino Uno πάνω στα οποία τοποθετείται ένα ειδικό Wireless SD Shield, ώστε να συνδεθούν οι κεραίες XBee Pro S2C Zigbee RF Modules. Παρακάτω αναλύεται λεπτομερώς κάθε τμήμα που αξιοποιήθηκε, ώστε όλα μαζί στο σύνολο τους να διαμορφώσουν ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, με σκοπό τις πρακτικές δοκιμές ενός αλγορίθμου συγχρονισμού ρολογιών. Εκτός από το υλικό κομμάτι του δικτύου, λειτουργούν και ορισμένα βασικά πρωτόκολλα, που χωρίς τη συμβολή αυτών η ασύρματη επικοινωνία δεν θα μπορούσε να επιτευχθεί.

Γ΄.1 IEEE 802.15.4

Το πρότυπο IEEE 802.15.4 [23], καθορίζει τον τρόπο λειτουργίας των ασύρματων προσωπικών δικτύων χαμηλής ταχύτητας (LR-WPANs). Η αρχιτεκτονική του βασίζεται στα επίπεδα του μοντέλου OSI, περιλαμβάνει δηλαδή τα δύο χαμηλότερα επίπεδα, το Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer-PHY) και το Επίπεδο MAC (Medium Access Control). Τα επόμενα δύο επίπεδα βασίζονται στο πρότυπο Zigbee, το οποίο αναλύεται λεπτομερώς παρακάτω.

Το φυσικό επίπεδο (PHY), είναι το αρχικό στο μοντέλο αναφοράς OSI που χρη-

σιμοποιείται παγκοσμίως. Παρέχει την υπηρεσία μεταφοράς δεδομένων, αποτελεί τη διεπαφή της οντότητας διαχείρισης του φυσικού επιπέδου που προσφέρει πρόσβαση στη διαχείριση λειτουργιών των υπόλοιπων στρωμάτων και διατηρεί μία βάση δεδομένων για τα προσωπικά δίκτυα. Επίσης διαχειρίζεται τον RF πομποδέκτη, εκτελεί την επιλογή καναλιού επικοινωνίας και διαχειρίζεται την ενέργεια και το σήμα.

Το Medium Access Control (MAC) επίπεδο, ακολουθεί το φυσικό επίπεδο, το οποίο και χρησιμοποιεί για τη μετάδοση των πλαισίων (frames). Εκτός της υπηρεσίας δεδομένων, διαθέτει και μια διεπαφή που διαχειρίζεται αυτόματα την πρόσβαση στο φυσικό επίπεδο και στο δίκτυο, ελέγχει την επικύρωση των πλαισίων, εγγυάται την τήρηση των χρονικών θυρίδων και χειρίζεται τις συνδέσεις των κόμβων. Τα πλαίσια αποτελούν τη βασική μονάδα μεταφοράς δεδομένων, που περιέχουν διάφορες πληροφορίες, χρήσιμες για την αποδοτικότητα του δικτύου και για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των κόμβων.

Γ'.2 Πρωτόκολλο CSMA/CA

Σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, με πολλούς κόμβους και πολλά πλαίσια προς μετάδοση, είναι φυσικό να μην φτάνουν όλα τα πλαίσια στον προορισμό τους εξαιτίας διαφόρων παραγόντων. Ένας συνήθης παράγοντας είναι οι συγχρούσεις των πακέτων, λόγω συμφόρησης του δικτύου ή η ταυτόχρονη μετάδοση πλαισίου από δύο κόμβους στο ίδιο κανάλι. Για την αποφυγή των συγχρούσεων, λειτουργεί στο επίπεδο MAC ένα πρωτόκολλο που ονομάζεται Carrier-sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) [1]. Το πρωτόκολλο αυτό, βασίζεται στην ανίχνευση κίνησης στο μέσο, δηλαδή γίνεται έλεγχος αν το κανάλι είναι αδρανές πριν την αποστολή του πλαισίου. Εφόσον είναι αδρανές και διαθέσιμο, γίνεται η αποστολή του πλαισίου, ενώ αν είναι κατειλημμένο, ο κόμβος που θέλει να κάνει τη μετάδοση αναμένει μέχρις ότου ολοκληρωθεί η τρέχουσα μετάδοση. Σκοπός της αποφυγής των συγχρούσεων, είναι η βελτίωση της απόδοσης του πρωτοκόλλου CSMA, διαιρώντας το κανάλι μεταξύ όλων των κόμβων που σκοπεύουν να κάνουν μια μετάδοση. Κάθε κόμβος πριν ξεκινήσει μια μετάδοση, ακούει το κανάλι ώστε να προσδιορίσει αν γίνεται κάποια άλλη μετάδοση. Αν ανιχνευτεί κάποια άλλη μετάδοση, ο κόμβος θα περιμένει ένα τυχαίο χρονικό διάστημα ώστε να ακούσει ξανά το κανάλι, μέχρι αυτό να είναι αδρανές ώστε να πραγματοποιήσει τη δική του μετάδοση.

Το πρωτόκολλο CSMA/CA δεν έχει αποτέλεσμα στις περιπτώσεις του κρυμμέ-

νου κόμβου και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ο μηχανισμός RTS/CTS. Αυτός ο μηχανισμός προβλέπει πως αν ένας κόμβος θέλει να κάνει μια μετάδοση προς έναν άλλο κόμβο, τότε προτού γίνει αυτή η μετάδοση θα πρέπει να στείλει προς όλες τις κατευθύνσεις ένα μήνυμα RTS (Ready to Send), ώστε με αυτό το τρόπο να δηλώσει την επιθυμία του να κάνει τη μετάδοση. Στη συνέχεια αυτό το μήνυμα θα ληφθεί από όλους τους γείτονες, αλλά και από αυτόν στον οποίο πρόκειται να γίνει η μετάδοση του μηνύματος. Αν δεν γίνεται κάποια άλλη μετάδοση, τότε ο δεύτερος κόμβος θα απαντήσει στον πρώτο ένα μήνυμα CTS (Clear to Send), που δηλώνει ότι η μετάδοση πλαίσίων μεταξύ αυτών των δύο κόμβων μπορεί να πραγματοποιηθεί. Οι υπόλοιποι κόμβοι που είναι εντός της εμβέλειας των δύο προηγούμενων θα αποφύγουν να μεταδώσουν κάποιο μήνυμα όσο γίνεται αυτή η διαδικασία. Σε περίπτωση που κάποιος άλλος τρίτος κόμβος αποφασίσει να στείλει εκείνη τη στιγμή, τότε μπορεί να χαθεί το RTS μήνυμα, με αποτέλεσμα να μην ληφθεί ούτε το CTS. Εκτός από το πρόβλημα του κρυμμένου κόμβου, με τον ίδιο μηχανισμό RTS/CTS μπορεί να αντιμετωπιστεί και το πρόβλημα του εκτεθειμένου κόμβου.

Γ'.3 Πρωτόκολλο Zigbee

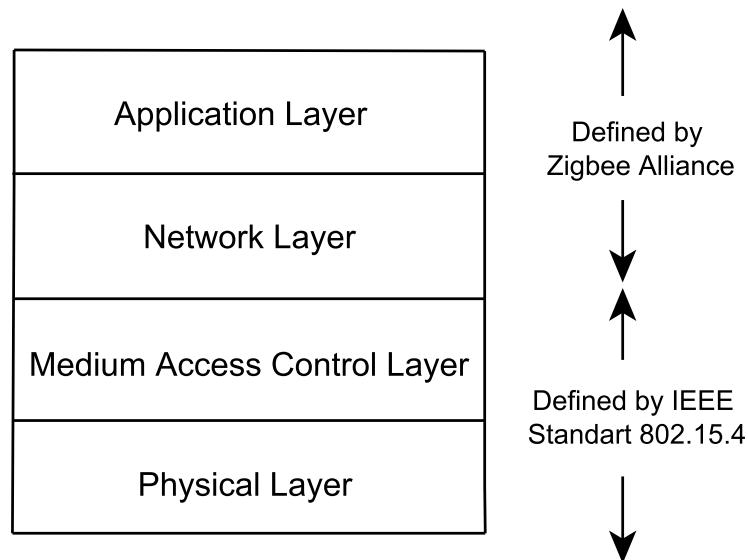
Το Zigbee [24] είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας υψηλού επιπέδου, που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4, και χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δικτύων προσωπικών περιοχών (PAN) μέσω μικρών ψηφιακών ραδιοφώνων χαμηλής ισχύος. Το Zigbee, είναι ένα ασύρματο ad hoc δίκτυο χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και ταχύτητας δεδομένων, στενής εγγύτητας και είναι σχεδιασμένο για έργα μικρής κλίμακας που χρειάζονται ασύρματη επικοινωνία. Η τεχνολογία που ορίζεται από τις προδιαγραφές του Zigbee, είναι απλούστερη και λιγότερο δαπανηρή σε σχέση με άλλα ασύρματα δίκτυα προσωπικής περιοχής, όπως είναι για παράδειγμα το Bluetooth. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, περιορίζει τις αποστάσεις μετάδοσης από τα 10 έως τα 100 μέτρα, ανάλογα με την ισχύ αλλά και κάποια περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Οι συσκευές του δικτύου μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα σε μεγάλες αποστάσεις, μέσω μιας τοπολογίας τύπου πλέγματος, από συσκευή σε συσκευή μέχρι και στις πιο απομακρυσμένες του δικτύου. Αυτά τα δίκτυα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλού ρυθμού δεδομένων, που απαιτούν μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και ασφαλή δικτύωση.

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, το πρωτόκολλο Zigbee βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4, από το οποίο και χρησιμοποιεί το φυσικό επίπεδο αλλά και το επίπεδο

MAC. Το Zigbee αποτελείται από τέσσερα επίπεδα, και πάνω από το φυσικό και το MAC, ακολουθούν το επίπεδο δικτύου (Network Layer) και το επίπεδο εφαρμογών (Application Layer).

Το επίπεδο δικτύου βρίσκεται ανάμεσα στο επίπεδο MAC και το επίπεδο εφαρμογών, και συνεπώς αποτελεί τη διεπαφή ανάμεσα σε αυτά τα δύο. Η λειτουργία αυτού του επιπέδου, εκτός από τη δρομολόγηση, είναι κυρίως η σύνδεση, η αποσύνδεση και ρύθμιση του δικτύου. Είναι υπεύθυνο για την κατανομή των διευθύνσεων, για την αφαίρεση ή την πρόσθεση συσκευών στο δίκτυο και για να το πετύχει αυτό χρησιμοποιεί κάποια στοιχεία της τοπολογίας. Επίσης μπορεί να καθορίσει αν μία γειτονική συσκευή ανήκει σε αυτό το δίκτυο ή σε κάποιο άλλο, ανακαλύπτει νέους γείτονες και δρομολογητές. Το πρωτόκολλο δρομολόγησης που χρησιμοποιεί το επίπεδο δικτύου είναι το AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing). Για να βρεθεί μια συσκευή-προορισμός, το AODV μεταδίδει με broadcast μετάδοση ένα μήνυμα αιτήματος σε όλους τους γείτονες. Στη συνέχεια οι γείτονες το προωθούν στους δικούς τους γείτονες μέχρι το μήνυμα να φτάσει στον προορισμό. Μόλις η συσκευή-προορισμός το λάβει, αποστέλλει την απάντηση στη πηγή με unicast μετάδοση, ακολουθώντας το μονοπάτι με το χαμηλότερο κόστος προς την πηγή. Τη στιγμή που θα ληφθεί η απάντηση, η συσκευή-πηγή θα ενημερώσει τον πίνακα δρομολόγησης σχετικά με τη διεύθυνση του προορισμού και το κόστος της διαδρομής.

Το επίπεδο εφαρμογών (Application Layer), είναι το υψηλότερο επίπεδο του πρωτοκόλλου και αποτελεί την διεπαφή του συστήματος Zigbee με τον χρήστη. Κομμάτι του επιπέδου αυτού είναι τα στοιχεία που προέρχονται από τον κατασκευαστή σχετικά με τα ZDO (Zigbee Device Objects) και τις διαδικασίες διαχείρισης τους, καθώς και τα αντικείμενα εφαρμογών. Το υποεπίπεδο που ονομάζεται Application Support Sublayer (APS) είναι υπεύθυνο για τα προφίλ των εφαρμογών, τα cluster IDs και τα τελικά σημεία. Επίσης το επίπεδο αυτό είναι υπεύθυνο για την δέσμευση των πινάκων, για την αποστολή μηνυμάτων μεταξύ συζευγμένων συσκευών, διαχειρίζεται τις διευθύνσεις, συνθέτει τα πακέτα, μεταφέρει τα δεδομένα και παρέχει τις υπηρεσίες για τα προφίλ των συσκευών Zigbee.



Σχήμα Γ'.1: Η στοίβα των επιπέδων του πρωτοκόλλου Zigbee.

Γ'.4 XBee Pro S2C Zigbee RF Modules

Οι κεραίες XBee Pro S2C Zigbee RF Modules [25] παράγονται από την εταιρεία Digi International και βασίζονται στο πρότυπο 802.15.4 της IEEE που αναπτύχθηκε το 2003. Χρησιμοποιούνται για τοπολογίες σημείο προς σημείο, αστέρες και πλέγματα, με baud rate στα 250 kbit/s και κάθε Xbee radio module έχει το δικό του προφίλ, προσαρμοσμένο στις ανάγκες του δικτύου.



Σχήμα Γ'.2: Κεραία XBee Pro S2C Zigbee RF Modules

Υπάρχουν δύο σειριακά πρωτόκολλα διεπαφής που μπορούν να υποστηρίξουν τα Xbee radio modules, το Transparent Operating Mode και το Application Programming Interface (API) Operating Mode. Οι κεραίες από προεπιλογή βρίσκονται σε Transparent Mode, και λειτουργούν ως αντικατάσταση της σειριακής επικοινωνίας. Η συσκευή αποθηκεύει σε μια ουρά τα δεδομένα που λαμβάνει από RF(Radio Frequency) μεταδόσεις, UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) ή SPI(Serial Peripheral Interface), μέσω από τους ακροδέκτες DIN ή MOSI. Όταν σε ένα δίκτυο υπάρχουν πολλές συσκευές σε transparent mode, προτού σταλεί ένα μήνυμα θα πρέπει πρώτα τα radios να εισέλθουν σε Command Mode και να οριστεί η διεύθυνση προορισμού. Σε αυτό το mode είναι πολύ εύκολη η επικοινωνία μεταξύ δύο Xbee radios, που υποστηρίζουν σειριακή επικοινωνία, επειδή ό,τι στέλνει η μία συσκευή, αυτό θα ακριβώς θα λάβει κι η άλλη.

Το API Operating Mode είναι μια εναλλακτική του transparent, είναι frame-based και επεκτείνεται στο σημείο που μπορεί να αλληλεπιδράσει με τις δυνατότητες δικτύωσης της συσκευής. Όταν ένα Xbee βρίσκεται σε API mode, περιέχει όλα τα δεδομένα που εισέρχονται και εξέρχονται από τα frames, που ορίζουν τις λειτουργίες και τα συμβάντα μέσα στη συσκευή. Το API παρέχει εναλλακτικά μέσα διαμόρφωσης των συσκευών και δρομολόγησης των δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογών. Το επίπεδο ε-

φαρμογών μπορεί να στείλει frames στη συσκευή που περιέχουν τη διεύθυνση και το payload, σε αντίθεση με το command mode που χρησιμοποιεί το transparent mode για να τροποποιήσει τις διευθύνσεις. Τα frames που λαμβάνει μια συσκευή τα στέλνει στο επίπεδο εφαρμογών, και συμπεριλαμβάνουν το status packet, το payload και τη διεύθυνση της πηγής. Άλλες λειτουργίες του API είναι η μετάδοση δεδομένων χωρίς να χρειαστεί η λειτουργία εντολών (command mode), λαμβάνει την κατάσταση κάθε RF πακέτου που μεταδίδεται, αν δηλαδή η μετάδοση είναι επιτυχημένη ή αποτυχημένη και αναγνωρίζει τη διεύθυνση της πηγής κάθε ληφθέντος πακέτου.

Γενικότερα το API είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται υπό κάποιες προϋποθέσεις που απαιτεί το δίκτυο. Όταν η συσκευή στέλνει ή λαμβάνει RF δεδομένα από πολλούς κόμβους στο δίκτυο και πρέπει να γνωρίζει ποιος έστειλε ποιο πακέτο, όπως και όταν χρειάζεται να στείλει εντολές διαμόρφωσης για τη διαχείριση των υπόλοιπων συσκευών στο δίκτυο. Επίσης είναι προτιμότερο από το transparent mode όταν πρέπει να υποστηριχτούν πολλαπλά endpoints, cluster IDs, profile IDs και όταν χρησιμοποιούνται οι υπηρεσίες προφίλ των συσκευών Zigbee. Το API είναι απαραίτητο στις περιπτώσεις που γίνεται χρήση Smart Energy firmware, όταν λαμβάνονται I/O δείγματα από απομακρυσμένες συσκευές, για την δρομολόγηση πηγής και όταν χρησιμοποιείται το SPI για σειριακή θύρα. Σε άλλες περιπτώσεις απλών εφαρμογών μπορεί η χρήση του transparent να είναι καταλληλότερη, ενώ ένα δίκτυο μπορεί να αποτελείται από συσκευές που είναι σε διαφορετικό mode.

Τα Zigbee δίκτυα αποτελούνται από δύο τύπους συσκευών, τις Full Function Devices (FFD) και τις Reduced Function Devices (RFD). Οι FFD συσκευές είναι οι συσκευές πλήρους λειτουργικότητας, είναι πάντα ενεργοποιημένες και η κατανάλωση ενέργειας φτάνει σε υψηλά επίπεδα. Όσον αφορά τις RFD συσκευές είναι μειωμένης λειτουργικότητας και δεν είναι πάντα ενεργοποιημένες. Τίθενται αυτόματα σε αναμονή (sleep mode) και τα δεδομένα μεταδίδονται μόνο με την ύπαρξη κάποιου συμβάντος. Λειτουργούν αποκλειστικά ως τερματικά σημεία και χρειάζονται πάντα μια FFD μητρική συσκευή για την ύπαρξη της επικοινωνίας.

Οι συσκευές Zigbee μπορούν να είναι τριών ειδών: Coordinator, Routers και End Devices. Αρχικά για να υπάρξει ένα Zigbee δίκτυο, θα πρέπει να υπάρχει οπωσδήποτε ένας Συντονιστής (Coordinator), ο οποίος ξεκινάει το δίκτυο επιλέγοντας το κανάλι επικοινωνίας, το PAN ID, την 64-bit και την 16-bit διεύθυνση. Αποθηκεύει ασύρματα πακέτα δεδομένων για τα παιδιά-End Devices όσο αυτά βρίσκονται σε sleep mode και διαχειρίζεται διάφορες λειτουργίες που καθορίζουν τη διατήρηση και την ασφάλεια του

δικτύου. Ο coordinator θα πρέπει να είναι FFD, καθώς δεν μπορεί να μπει σε sleep mode, ενώ η τροφοδοσία του θα πρέπει να είναι συνεχής.

Οι Δρομολογητές (Routers) μπορούν να συμμετέχουν σε ήδη υπάρχοντα δίκτυα, να στέλνουν να λαμβάνουν και να δρομολογούν πληροφορίες. Η δρομολόγηση επιτυγχάνει την επικοινωνία μεταξύ κόμβων που βρίσκονται εκτός εμβέλειας, ο ένας από τον άλλο, με τη βοήθεια ενός ενδιάμεσου δρομολογητή. Επιπλέον, αποθηκεύουν ασύρματα πακέτα δεδομένων για τις συσκευές παιδιά που κοιμούνται και επιτρέπουν σε άλλους δρομολογητές και end devices να ενταχθούν στο δίκτυο. Όπως και ο coordinator, πρέπει να είναι FFD, δεν μπορούν να κοιμηθούν και χρειάζονται συνεχώς τροφοδοσία. Μπορούν να υπάρχουν πολλές router συσκευές σε ένα δίκτυο, με αποτέλεσμα να επεκτείνουν το βεληνεκές του δικτύου.

Οι Τελικές Συσκευές (End Devices), μοιάζουν με τους δρομολογητές αλλά έχουν λιγότερες λειτουργίες από αυτούς, και είναι RFD συσκευές. Έχουν τη δυνατότητα να εντάσσονται σε υπάρχοντα δίκτυα, να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα, αλλά δεν μπορούν να κάνουν δρομολόγηση, ούτε επιτρέπουν την είσοδο άλλων συσκευών στο δίκτυο. Εξοικονομούν ενέργεια, αφού τροφοδοτούνται περιοδικά διότι μπορούν να εισάγονται προσωρινά σε κατάσταση ύπνου. Ένας δρομολογητής ή ο συντονιστής, θα πρέπει να είναι η συσκευή-πατέρας ενός end device, για την επίτευξη της ένταξης στο δίκτυο και για την αποθήκευση των δεδομένων, όσο οι συσκευές αυτές είναι σε sleep mode. Τα δίκτυα Zigbee γενικά μπορούν να αποτελούνται πάντα από έναν coordinator, με πολλούς routers και end devices, αλλά μπορεί να υπάρξει και δίκτυο αποτελούμενο μόνο από routers ή end devices, μαζί με τον coordinator.

Σχετικά με τις τοπολογίες που μπορούν να σχηματίσουν τα Zigbee δίκτυα είναι τοπολογίες αστέρα, τοπολογίες πλέγματος και τοπολογίες δένδρου. Αναλόγως τα χαρακτηριστικά της περιοχής, στην οποία εκτείνεται το δίκτυο, επιλέγεται η κατάλληλη και αποδοτικότερη τοπολογία. Για παράδειγμα, σε μία καλλιέργεια η επιλογή της τοποθεσίας του coordinator που είναι και ο sink node, είναι πολύ σημαντική, καθώς αυτός είναι ο κόμβος που συλλέγει τα δεδομένα του δικτύου, χρειάζεται συνεχώς τροφοδοσία και θα πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμος.

Ο τρόπος μετάδοσης των πακέτων δεδομένων που υποστηρίζουν οι Xbee κεραίες είναι είτε με broadcast μετάδοση, είτε με unicast μετάδοση. Γενικότερα, οι unicast μεταδόσεις δρομολογούν τα δεδομένα σύμφωνα με μία διεύθυνση πηγής και μία προορισμού, σε αντίθεση με τις broadcast μεταδόσεις που μπορούν να σταλούν σε πολλούς ή και σε όλους τους κόμβους του δικτύου.

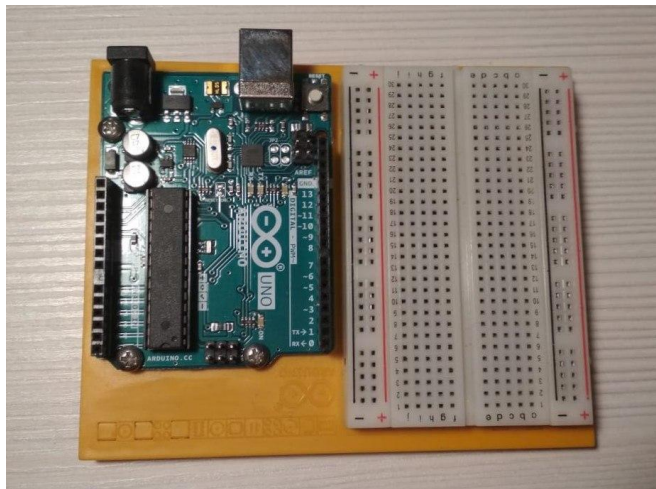
Πιο συγκεκριμένα, το broadcast στο πρωτόκολλο Zigbee, έχει ως στόχο η μετάδοση να διαδοθεί σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Για να συμβεί αυτό, ο coordinator και οι routers ενός δικτύου μόλις λάβουν μία broadcast μετάδοση, αναμεταδίδουν το ίδιο πακέτο τρεις φορές. Όταν πρόκειται για ένα broadcast σε ένα end device, ο coordinator ή κάποιος router, στέλνει το πακέτο μόνο μία φορά, αφού αφυπνιστεί πρώτα η συσκευή ώστε να λάβει τα νέα δεδομένα. Κάθε κόμβος που στέλνει ένα broadcast, δημιουργεί μια καταχώρηση σε έναν τοπικό πίνακα broadcast μεταδόσεων. Οι καταχωρήσεις αυτές, παρακολουθούν κάθε πακέτο που λαμβάνεται, ώστε να εξασφαλιστεί ότι το ίδιο πακέτο δεν θα μεταδίδεται ατελείωτα. Ο πίνακας διαθέτει οκτώ θέσεις και κάθε καταχώρηση παραμένει εκεί για οκτώ δευτερόλεπτα, με αποτέλεσμα να περιορίζονται οι μεταδόσεις σε μία ανά δευτερόλεπτο. Για κάθε μετάδοση, ανάλογα με τις ανάγκες, διατηρείται ένα αντίγραφο κάθε μετάδοσης στον buffer και τα μεγαλύτερα πακέτα χρειάζονται περισσότερο χώρο στη μνήμη. Ο χρήστης δεν μπορεί να αλλάξει τον χώρο της μνήμης, ωστόσο η κεραία χειρίζεται τον χώρο αυτό αυτόματα. Εφόσον το broadcast, αναμεταδίδεται τρεις φορές και επομένως προκαλεί συμφόρηση στο δίκτυο εξαιτίας του μεγάλου αριθμού των πακέτων, είναι προτιμότερο να γίνεται σπανιότερα.

Οι μεταδόσεις unicast, λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο από τις broadcast. Προκειμένου να γίνει μια τέτοια μετάδοση, το πακέτο αποστέλλεται από έναν κόμβο-πηγή σε έναν άλλο κόμβο-προορισμό. Ο προορισμός μπορεί να είναι ένας άμεσος γείτονας της πηγής, ή μπορεί να βρίσκεται αρκετά hop μακριά. Οι μεταδόσεις που αποστέλλονται σε απομακρυσμένους κόμβους, δηλαδή πολλαπλά hop μακριά, χρειάζονται κάποια μέσα για τη δημιουργία μιας διαδρομής δρομολόγησης για τη διεύθυνση του προορισμού. Για την δρομολόγηση αυτή υπάρχουν διαθέσιμες τρεις διαφορετικές μέθοδοι, και καθεμία είναι κατάλληλη για διαφορετικές περιπτώσεις. Η πρώτη μέθοδος είναι η δρομολόγηση AODV, κατά την οποία οι διαδρομές δρομολόγησης δημιουργούνται μεταξύ του πομπού και του δέκτη, καθώς το πακέτο περνάει από πολλούς κόμβους. Εν τέλει με αυτό το τρόπο, κάθε συσκευή γνωρίζει που να προωθήσει το πακέτο, ώστε αυτό να φτάσει στον προορισμό του. Η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική όταν το δίκτυο δεν ξεπερνάει τους 40 κόμβους. Η επόμενη μέθοδος ονομάζεται Many-to-One Routing, όπου οι συσκευές που έχουν λάβει μήνυμα broadcast έχουν τη δυνατότητα να δρομολογήσουν πακέτα προς την συσκευή-πομπό του τλβροαδαστ και χρησιμεύει όταν πολλές απομακρυσμένες συσκευές πρέπει να στείλουν πολλά δεδομένα σε μία συσκευή. Η τρίτη και τελευταία μέθοδος είναι το Source Routing, στην οποία τα πακέτα δεδομένων περιλαμβάνουν ολόκληρη τη διαδρομή του πακέτου, που αυτό θα πρέπει να

διασχίσει από τη την πηγή μέχρι τον προορισμό, και βελτιώνει την αποδοτικότητα, όσον αφορά στη δρομολόγηση, σε μεγάλα δίκτυα, άνω των 40 κόμβων. Για να αλλάξει η μέθοδος της δρομολόγησης σε κάθε δίκτυο, θα πρέπει πρώτα αυτό να κάνει reset. Τα end devices, εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν κάνουν δρομολόγηση, δεν κάνουν και χρήση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Αντιθέτως, στέλνουν τα δεδομένα τους με unicast στον πατέρα τους, που είναι είτε router είτε ο coordinator, και στη συνέχεια ο πατέρας αναλαμβάνει να τα προωθήσει εκ μέρους τους.

Γ'.5 Arduino Uno

Το Arduino Uno [26] είναι ένας πίνακας μικροελεγκτών ανοιχτού κώδικα, βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328P και προγραμματίζεται με το IDE του Arduino μέσω USB τύπου B. Το ATmega328P έχει μνήμη 32 KB με 0.5 KB κατεχόμενα από το bootloader, και έχει επίσης 2 KB SRAM και 1 KB EEPROM.



Σχήμα Γ'.3: Arduino Uno με μικροελεγκτή ATmega328P

Η πλακέτα μπορεί να συνδεθεί με διάφορα κυκλώματα και πλακέτες επέκτασης (shields). Διαθέτει 14 ψηφιακούς αχροδέκτες εισόδου και εξόδου (I/O pins), 6 από τους οποίους χρησιμοποιούνται ως έξοδοι PWM, 6 αναλογικές εισόδους, έναν κρύσταλλο quartz 16 MHz, σύνδεση USB, υποδοχές τροφοδοσίας, μια κεφαλίδα ICSP

και ένα reset κουμπί. Κάθε ένας από τους 14 ακροδέκτες μπορεί να λειτουργήσει είτε ως είσοδος είτε ως έξοδος στα 5V, χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις `pinMode()`, `digitalWrite()` και `digitalRead()`. Κάθε pin μπορεί να παρέχει ή να λαμβάνει 20 mA, που είναι και η προτεινόμενη κατάσταση λειτουργίας, με μέγιστη τιμή τα 40 mA, ενώ διαθέτουν ενσωματωμένη αντίσταση της τάξης των 20-50kohm. Ορισμένα pins έχουν συγκεκριμένες λειτουργίες, όπως τα σειριακά 0 (RX) και 1 (TX), που χρησιμοποιούνται για τη λήψη και τη μετάδοση σειριακών δεδομένων αντίστοιχα. Στη συνέχεια, οι ακροδέκτες 2 και 3 μπορούν να ρυθμιστούν με τρόπο ώστε να προκαλούν διακοπή, πτώση, άνοδο και αλλαγή σε διάφορες τιμές. Οι ακροδέκτες PWM που είναι οι 3, 5, 6, 9, 10, και 11 παρέχουν 8-bit έξοδο με τη χρήση της συνάρτησης `analogWrite()`. Ακολουθώντας τα SPI pins, στα οποία ανήκουν το 10 (SS), το 11 (MOSI), το 12 (MISO) και το 13 (SCK), είναι υπεύθυνα για την SPI επικοινωνία για την οποία χρησιμοποιείται η βιβλιοθήκη SPI. Επιπλέον υπάρχει ένα ενσωματωμένο LED που συνδέεται με το pin 13, και ανάβει όταν η αντίστοιχη τιμή είναι στο HIGH, ενώ απενεργοποιείται όταν είναι στο LOW. Για την TWI επικοινωνία αντιστοιχούν τα pins A4 ή SDA και A5 ή SCL, μαζί με τη Wire βιβλιοθήκη.

Το Arduino διαθέτει 6 αναλογικούς ακροδέκτες που αριθμούνται από το A0 μέχρι το A5, καθένα από τα οποία παρέχει ανάλυση 10 bit, δηλαδή 1024 χαρακτήρες. Επιπλέον, υπάρχουν ακόμα δύο ακόμα ακροδέκτες, το AREF που αφορά την τάση αναφοράς για τις αναλογικές εισόδους, και το RESET που επαναφέρει τον μικροελεγκτή. Συνήθως, χρησιμοποιείται για τη προσθήκη ενός επιπλέον κουμπιού reset το οποίο ακυρώνει το ήδη υπάρχον κουμπί του μικροελεγκτή.

Η τροφοδοσία μπορεί να γίνει είτε μέσω της σύνδεσης USB, είτε μέσω εξωτερικής παροχής ρεύματος, δηλαδή μιας μπαταρίας ή ενός προσαρμογέα AC to DC. Το εύρος της εξωτερικής τροφοδοσίας κυμαίνεται από 6 έως 12 Volt, ενώ γενικά το συνιστώμενο εύρος τιμών είναι από 7 έως 12 Volt, καθώς σε περιπτώσεις που αυτές οι τιμές ξεπεραστούν μπορεί να προκληθεί αστάθεια και βλάβη στην πλακέτα. Η τροφοδοσία γίνεται μέσω συγκεκριμένων ακροδεκτών, ο καθένας με τα δικά του χαρακτηριστικά. Ο ακροδέκτης Vin χρησιμοποιεί εξωτερική πηγή τροφοδοσίας, σε αντίθεση με τον ακροδέκτη 5V που τροφοδοτείται μέσω σύνδεσης USB (5V), μέσω της υποδοχής συνεχούς ρεύματος (7-12V), είτε μέσω του ακροδέκτη Vin(7-12V) της πλακέτας. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και ο ακροδέκτης 3V3, ο οποίος τροφοδοτείται από τον ρυθμιστή (regulator) της πλακέτας και στη συνέχεια υπάρχουν οι ακροδέκτες GND που χρησιμοποιούνται για τη γείωση, καθώς και ο IOREF ακροδέκτης που παρέχει την αναφορά

της τάσης με την οποία λειτουργεί ο μικροελεγκτής.

Ο μικροελεγκτής Arduino Uno, διαθέτει μέσα επικοινωνίας για υπολογιστές, για ένα άλλο Arduino, και για άλλους μικροελεγκτές. Το ATmega328 παρέχει σειριακή επικοινωνία UART TTL (5V), η οποία διατίθεται μέσω των pins 0 (RX) και 1 (TX), και για το λογισμικό του υπολογιστή η σειριακή αυτή επικοινωνία μέσω USB, εμφανίζεται ως μια εικονική θύρα COM. Όταν μεταδίδονται δεδομένα μέσω της USB-to-serial επικοινωνίας, τα LED RX και TX της πλακέτας αναβοσβήνουν, ως ένδειξη μετάδοσης των δεδομένων. Επιπλέον για σειριακή επικοινωνία με οποιονδήποτε ψηφιακό ακροδέκτη της πλακέτας, υπάρχει η βιβλιοθήκη SoftwareSerial που την επιτρέπει να συμβεί. Το ATmega328, υποστηρίζει επίσης και την I2C (TWI) και την SPI επικοινωνία, και για τις δύο διατίθενται οι αντίστοιχες βιβλιοθήκες για το Arduino IDE.



```
parartima
1 #include <MyFrame.h>
2 #include <XBee.h>
3
4 #define INTERVAL 15
5 #define NUMOFNODES 5
6 #define NEXTFRAME TIME 500
7 #define DATA PER NODE 20
8
9 // create the XBee object
10 XBee xbee = XBee();
11
12 const uint32_t zigbeeAddressHigh = 0x0013A200;
13
14 uint8_t neighboursCount = 0;
15 uint32_t neighboursLow[NUMOFNODES] = {};
16
17 bool isCoordinatorEnabled = false;
18
19 bool didReceive = false;
20
21 uint32_t parentAddressLow = 0x0;
22
23 uint8_t sData[4];
24 uint16_t sDataLength = 0;
25
26 MyFrame receiveFrame = MyFrame();
27
28 MyFrame sendFrame = MyFrame();
29
```

Σχήμα Γ'.4: Παράδειγμα από το το προγραμματιστικό περιβάλλον του Arduino IDE.

Γ'.6 Arduino Wireless SD Shield

Το Arduino, δεν μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με το Xbee Radio Module, και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται ένα Wireless SD Shield [27], που αποτελεί το μέσο επικοινωνίας καθώς διαθέτει συγκεκριμένα pins ώστε να συνδέεται το Xbee Module, αλλά και άλλα παρόμοια modules, με το Arduino.



Σχήμα Γ'.5: Wireless SD Shield

Το συγκεκριμένο Shield, καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο η σειριακή επικοινωνία του Xbee συνδέεται με την σειριακή επικοινωνία του μικροελεγκτή ATmega328. Αφού τοποθετηθεί το Xbee στα ανάλογα pins, το Shield διαθέτει έναν διακόπτη, και όταν αυτός είναι γυρισμένος στο micro, το pin DOUT του Xbee συνδέεται με το pin RX του μικροελεγκτή, το DIN με το TX, και έτσι επικοινωνεί η κεραία με τον μικροελεγκτή. Εφόσον ο μικροελεγκτής συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB, τα δεδομένα μπορούν να μεταφέρονται και στην κεραία, ώστε από εκεί και πέρα να γίνεται εφικτή η ασύρματη επικοινωνία, όμως δεν μπορεί να προγραμματιστεί περαιτέρω. Όταν ο διακόπτης είναι γυρισμένος στο USB, η κεραία μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με τον υπολογιστή, ώστε να προγραμματιστεί η λειτουργία της.

Εφόσον γίνει η σύνδεση των τριών αυτών κομματιών, δηλαδή του Arduino με το Shield και τα Xbee Radio Modules, ακολουθεί ο προγραμματισμός και οι παραμετροποίηση τους. Για αυτή την εργασία, χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο το Arduino IDE, και για τον προγραμματισμό της κεραίας απαιτείται η βιβλιοθήκη Xbee.h. Η παραμετρο-

ποίηση των Xbee μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Είτε μέσω του προγράμματος XCTU, είτε με τη χρήση AT Commands μέσω του κώδικα. Οι AT εντολές είναι μία γλώσσα εντολών που αποσκοπούν σε διάφορες λειτουργίες. Σκοπός τους είναι η ανάγνωση ή η αλλαγή της διαμόρφωσης μιας Xbee συσκευής. Κάθε module έχει διάφορες ρυθμίσεις, όπως το ID του δικτύου ή του καναλιού επικοινωνίας, που όλα μαζί καθορίζουν τη συμπεριφορά της κεραίας. Για την αλλαγή ή ρύθμιση, των χαρακτηριστικών των Xbee modules, χρησιμοποιούνται αυτές οι AT εντολές.

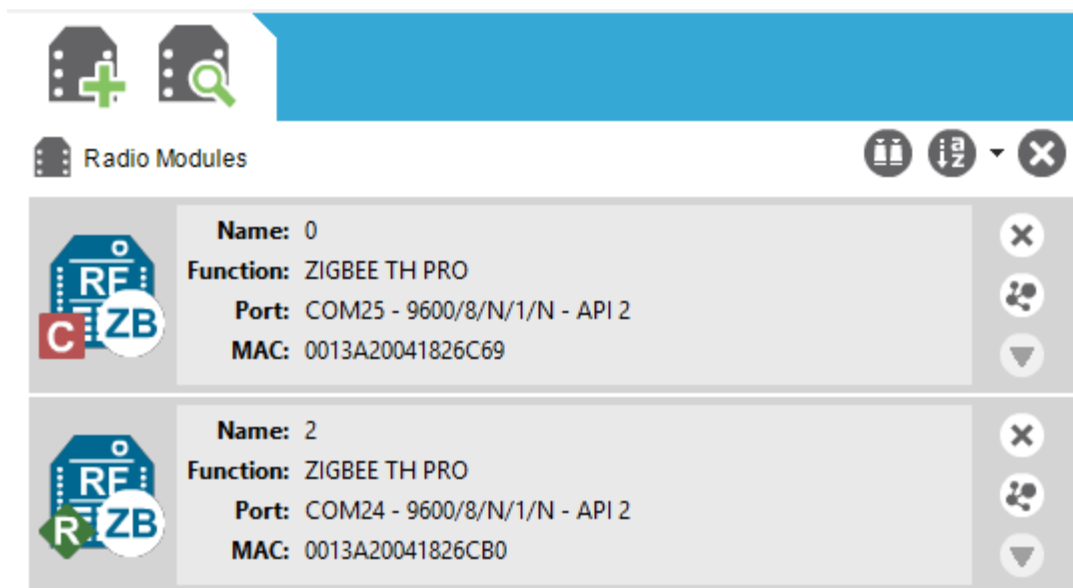


Σχήμα Γ΄.6: Συνδεδεμένο Arduino Uno με Wireless SD Shield και την κεραία Xbee Radio Module που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα της παρούσας εργασίας.

Γ΄.7 Το Σύστημα

Το σύστημα που απαρτίζει το δίκτυο Zigbee και χρησιμοποιεί τον μικροεπεξεργαστή ATmega328P του Arduino Uno λειτουργεί στα 9600 baud rate, ενώ τα Xbee Radio Modules διαμορφώνονται με τις κατάλληλες παραμέτρους. Το πρώτο βήμα αποτελεί η συναρμολόγηση του Arduino με το Wireless Shield και το Xbee Radio Module και στη συνέχεια ακολουθεί η παραμετροποίηση των Xbee [25] [28]. Αρχικά πρέπει να οριστεί ένας κόμβος ως ο Coordinator του δικτύου, ο οποίος και το διαμορφώνει με το PAN ID (Personal Area Network Identifier). Σε ένα δίκτυο Zigbee, είναι πολύ σημαντικό το κομμάτι του PAN ID, το οποίο πρέπει να είναι κοινό για όλους του κόμβους, διαφορετικά δεν μπορούν να ανήκουν στο δίκτυο. Το Zigbee υποστηρίζει ταυτόχρονα διευθύνσεις

PAN ID 64-bit και 16-bit. Και οι δύο διευθύνσεις PAN ID χρησιμοποιούνται για την μοναδική αναγνώριση ενός δικτύου και όλες οι συσκευές πρέπει να μοιράζονται και τις δύο. Το PAN ID 16-bit χρησιμοποιείται ως διευθυνσιοδότηση των RF πακέτων δεδομένων στο επίπεδο MAC και μπορεί να μην είναι μοναδικό, ενώ το PAN ID 64-bit είναι μια μοναδική μη διπλότυπη τιμή.



Σχήμα Γ'.7: Απεικόνιση ενός Coordinator και ενός Router στο πρόγραμμα XCTU.

Όσον αφορά την παραμετροποίηση των συσκευών, αυτή γίνεται με τη χρήση των AT Commands μέσω του κώδικα που ανεβαίνει στο Arduino. Δεδομένου ότι πρώτα πρέπει να οριστεί ο Coordinator του δικτύου, η πρώτη εντολή είναι η CE. Αν η συσκευή είναι ο Coordinator η τιμή της εντολής είναι 1, ενώ αν η συσκευή είναι ένας Router η τιμή της είναι 0. Η παράμετρος AP2 ορίζει τη λειτουργία των συσκευών στο API Operation-With Escaped Characters, που είναι διαθέσιμη μόνο για UART. Στη συνέχεια η τιμή της παραμέτρου BH ορίζεται στο 1, δηλαδή ο αριθμός των broadcast hops ανέρχεται σε ένα 1 hop, το ID παίρνει τη τιμή του PAN ID του δικτύου και το AO παραμένει στη default τιμή του, το 0, και υποδηλώνει τον τύπο του API frame για τα RF πακέτα

δεδομένων. Ακολουθεί η παράμετρος JV που παίρνει τη τιμή 1, όπου οι routers επαληθεύουν το κανάλι επικοινωνίας με τον coordinator, το PL που είναι υπεύθυνο για το power level των μεταδόσεων της συσκευής είναι στο 0, δηλαδή περίπου στα 0 dBm, και η εντολή DB είναι επίσης στο 0 ώστε να καταργεί την ισχύ του σήματος του τελευταίου πακέτου με σκοπό να ληφθεί το επόμενο. Αυτή η εντολή αναφέρει την ισχύ του λαμβανόμενου σήματος του τελευταίου πακέτου δεδομένων που έλαβε η συσκευή κατά το τελευταίο hop.

Παράλληλα, μία ακόμα παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι το SL, το οποίο εμφανίζει τα χαμηλότερα 32 bits της διεύθυνσης RF IEEE 64-bit που έχει αντιστοιχιστεί στο XBee κατά την εργοστασιακή του κατασκευή. Η 64-bit διεύθυνση είναι πάντα ενεργοποιημένη, είναι μόνο για ανάγνωση και δεν μπορεί να αλλάξει. Η επόμενη παράμετρος ονομάζεται NI και αποθηκεύει το αναγνωριστικό αλφαριθμητικό της συσκευής, το οποίο είτε καθορίζεται από τον χρήστη ως το όνομα της, είτε από της περιγραφή της ίδιας της συσκευής. Για την αναγνώριση της συσκευής με βάση το όνομα της χρησιμοποιείται η εντολή ND (Network Discovery), που ουσιαστικά εντοπίζει όλες τις συσκευές που έχουν συνδεθεί στο δίκτυο. Η εντολή ND αποστέλλει ένα broadcast εντοπισμού σε ολόκληρο το δίκτυο, και οι συσκευές που το λαμβάνουν στέλνουν πίσω μια απάντηση που περιλαμβάνει τις πληροφορίες της διεύθυνσης τους, το αναγνωριστικό αλφαριθμητικό τους όνομα και άλλες σχετικές πληροφορίες που ζητήθηκαν. Για να αλλάξουν όλες οι αναφερόμενες παράμετροι γίνεται χρήση της εντολής WR, η οποία καταγράφει όλες αυτές τις τιμές στη μνήμη, ώστε οι τροποποιήσεις των παραμέτρων να παραμείνουν όπως ζητήθηκε μετά από ακόλουθες επανεκκινήσεις.

Πολλές τροποποιήσεις των παραμέτρων αυτών γίνονται μέσω του κώδικα που τρέχει στο Arduino. Αυτός δεν είναι ο μοναδικός τρόπος καθώς αυτές οι συσκευές διαμορφώνονται και μέσω του προγράμματος XCTU. Για παράδειγμα αν η συσκευή είναι ο Coordinator ή κάποιος Router καθορίστηκε με τη χρήση αυτού το προγράμματος. Επίσης άλλη μια παράμετρος που άλλαξε με τον ίδιο τρόπο, είναι και τα αναγνωριστικά ονόματα των συσκευών. Όλες αυτές οι τιμές των παραμέτρων αποτελούν το προφίλ των συσκευών και θέτουν το δίκτυο στην επιθυμητή λειτουργία, με σκοπό να γίνουν κάποια πειράματα και δοκιμές πάνω σε αυτό. Ο λόγος που το προφίλ αυτό διαμορφώθηκε ως εξής, είναι για τη δοκιμή ενός αλγορίθμου συγχρονισμού των ρολογιών των συσκευών, που μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων και αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Change networking settings

Parameter	Value	Unit/Format	Read	Write	Profile
ID PAN ID	31				
SC Scan Channels	7FFF	Bitfield			
SD Scan Duration	3	exponent			
ZS ZigBee Stack Profile	0				
NJ Node Join Time	FF	x 1 sec			
NW Network Watchdog Timeout	0	x 1 minute			
JV Channel Verification	Enabled [1]				
JN Join Notification	Disabled [0]				
OP Operating PAN ID	5				
OI Operating 16-bit PAN ID	609F				
CH Operating Channel	15				
NC Number of Remaining Children	14				
CE Coordinator Enable	Disabled [0]				
DO Device Options	0	Bitfield			
DC Device Controls	0	Bitfield			

Σχήμα Γ'.8: Παράδειγμα παραμετροποίησης των Xbee Radio Modules στο πρόγραμμα XCTU.

Κεφάλαιο Δ΄

Αλγόριθμος Συγχρονισμού και Πειράματα

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου συγχρονισμού, ο οποίος είναι κατάλληλος για εφαρμογή σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων σε καλλιέργειες. Στα παραπάνω κεφάλαια επισημάνθηκε η αναγκαιότητα του συγχρονισμού στα καταναμημένα συστήματα και ειδικότερα στον γεωργικό τομέα, γεγονός που οδήγησε στην προσπάθεια επίλυσης του ζητήματος αυτού. Ο κύριος σκοπός του αλγορίθμου είναι ο συγχρονισμός των μετρήσεων που καταγράφουν οι αισθητήρες, ούτως ώστε τα αποτελέσματα των δεδομένων μιας καλλιέργειας να είναι ορθά και να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση. Πολλές φορές τα αποτελέσματα των δεδομένων που προέρχονται από καλλιέργειες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το περιβάλλον και τις συνθήκες στο οποίο και αναπτύσσονται, γεγονός που αποσκοπεί σε διαφορετικού τύπου έρευνας. Επιπλέον, ο συγχρονισμός είναι ένα μέσο που μπορεί να διατηρήσει ένα καταναμημένο σύστημα σε τάξη, καθώς εξασφαλίζεται μια κοινή αίσθηση του χρόνου μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Δ΄.1 Ο Αλγόριθμος Συγχρονισμού

Ο αλγόριθμος, πάνω στον οποίο βασίστηκε η υλοποίηση αυτής της πτυχιακής, ακολουθεί τη λογική της μεθόδου των χρονοσφραγίδων, οι οποίες και χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόκλισης των ρολογιών των κόμβων αισθητήρων. Έφωσον ο

απόλυτα ακριβής συγχρονισμός των ρολογιών είναι αδύνατος εξαιτίας των περιορισμών του υλικού, αρκεί η γνώση απόκλισης της τιμής κάθε ρολογιού σε σχέση με ένα άλλο. Έτσι, γνωρίζοντας αυτή τη διαφορά και έχοντας μια χρονοσφραγίδα σε κάθε μέτρηση των αισθητήρων, το σύνολο των δεδομένων που συλλέγονται κινούνται σε ένα κοινό χρονικό πλαίσιο.

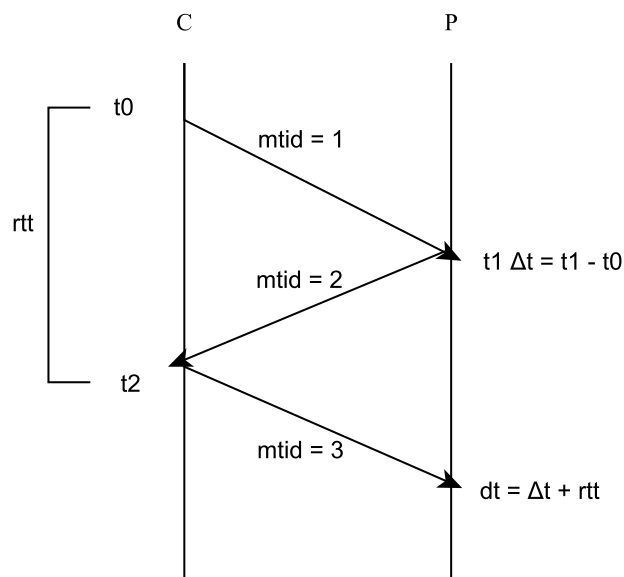
Καταρχάς, πριν γίνει οποιαδήποτε άλλη ενέργεια, πρέπει πρώτα να διαμορφωθεί το δίκτυο. Ο coordinator του δικτύου είναι υπεύθυνος για αυτή την ενέργεια και στη συνέχεια οι κόμβοι χωρίζονται σε “πατέρες” και “παιδιά”. Κάθε κόμβος παιδί μπορεί να έχει μόνο έναν πατέρα, ενώ το αντίθετο δεν ισχύει. Τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ παιδιών και πατέρων για τον συγχρονισμό του συστήματος στέλνονται ανά συγκεκριμένα και τακτά χρονικά διαστήματα. Το διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στα μηνύματα συγχρονισμού δεν είναι σταθερό και ποικίλλει ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής του WSN. Τα μηνύματα συγχρονισμού δεν χρειάζεται να στέλνονται σε στιγμές που το δίκτυο είναι αδρανές, καθώς αυτό συνεπάγεται μη απαραίτητη κατανάλωση ενέργειας. Κάθε χρονική στιγμή τα ρολόγια των κόμβων αποκλίνουν το ένα από το άλλο, επομένως οι χρονικές στιγμές που χρειάζεται να συγχρονιστούν εξαρτάται άμεσα από το είδος και τις ανάγκες της εφαρμογής. Η χρήση των δικτύων αισθητήρων στον τομέα της έξυπνης γεωργίας δεν είναι ίδια σε κάθε περίπτωση. Ορισμένες περιπτώσεις απαιτούν συνεχή επιτήρηση και συλλογή δεδομένων, ενώ άλλες εστιάζουν σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές μέσα σε ένα 24ωρο.

Έστω λοιπόν ότι ο συγχρονισμός απαιτείται να γίνεται ανά χ χρονικά διαστήματα. Τότε ανά χ seconds κάθε παιδί κρατάει το timestamp εκείνη τη στιγμή και το στέλνει στον πατέρα του χωρίς χρονικές καθυστερήσεις με τύπο μηνύματος 1 (mtid = 1). Μόλις ο κάθε πατέρας λάβει μήνυμα τύπου 1 από κάποιο παιδί, κρατάει το δικό του τρέχον timestamp και το στέλνει απευθείας στο παιδί με τύπο μηνύματος 2 (mtid = 2). Στη συνέχεια υπολογίζει τη διαφορά (Δt) αυτών των δύο timestamps και την αποθηκεύει. Όταν ο κόμβος παιδί λάβει μήνυμα τύπου 2, κρατάει ξανά ένα τελικό timestamp και υπολογίζει μία rtt μεταβλητή:

$$rtt = \frac{timestamp_{t_2} - timestamp_{t_0}}{2} \quad (\Delta'.1)$$

και τη στέλνει στον πατέρα με τύπο μηνύματος 3 (mtid = 3). Τέλος, όταν ο πατέρας λάβει μήνυμα τύπου 3, υπολογίζει το τελικό $dt = \Delta t + rtt$. Αυτή η rtt μεταβλητή δηλώνει τον χρόνο μετ' επιστροφής (round-trip time) των πακέτων μεταξύ των δύο κόμβων. Ο κάθε κόμβος πατέρας μετά από αυτή τη διαδικασία μπορεί να εκτιμήσει τη

διαφορά του δικού του τοπικού ρολογιού σε σχέση με του παιδιού, προσθέτοντας στον δικό του χρόνο το τελικό dt . Με την χρήση αυτής της εκτίμησης, οι κόμβοι του δικτύου γνωρίζουν την απόκλιση των ρολογιών των παιδιών τους και επιτυγχάνεται ένας σχετικός συγχρονισμός, ώστε οι μετρήσεις των αισθητήρων να είναι όσο το δυνατόν πιο έγκυρες.



Σχήμα Δ'.1: Σχηματική απεικόνιση της ανταλλαγής μηνυμάτων συγχρονισμού βάσει της λογικής του αλγορίθμου

Αυτή είναι η λογική του αλγορίθμου, ο οποίος είναι ευέλικτος σε προσαρμογές ώστε να ταιριάζει σε ποικίλες εφαρμογές με περισσότερες ή και λιγότερες απαιτήσεις. Αποτελεί μία μέθοδο συγχρονισμού ρολογιών στο επίπεδο εφαρμογών της στοίβας του δικτύου. Οι αλλαγές σε χαμηλότερα επίπεδα μπορεί να γίνουν αρκετά πολύπλοκες έως και αδύνατες, καθώς λειτουργούν άλλα πρωτόκολλα, όπως το CSMA/CA, που αποσκοπούν σε άλλες λειτουργίες, για παράδειγμα στην αποφυγή των συγχρούσεων. Επιπλέον δεν έχει υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πρακτικές εφαρμογές, ώστε να συγχρονίζονται οι κόμβοι του δικτύου αισθητήρων ανά δύο, και οι μετρήσεις να είναι έγκυρες ως προς την χρονική στιγμή που καταγράφηκαν. Η λογική του αλγορίθμου δεν στοχεύει αποκλειστικά σε γεωργικές εφαρμογές, καθώς

είναι ένας απλός τρόπος συγχρονισμού μέσω της ανταλλαγής πακέτων.

Η επαλήθευση της λογικής του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκε πειραματικά. Ως κόμβοι αισθητήρων χρησιμοποιήθηκαν οι μικροελεγκτές Arduino Uno και οι κεραίες XBee Pro S2C Zigbee RF Modules για την επικοινωνία. Πιο συγκεκριμένα, ένας κόμβος πατέρας και ένας κόμβος παιδί, συνδέθηκαν μεταξύ τους με ένα κοινό κουμπί στο Pin 8 του Shield στο Arduino. Ουσιαστικά, η χρήση του κουμπιού παίζει το ρόλο ενός εξωτερικού του συστήματος συμβάντος, και το πάτημα του συμβαίνει ακριβώς την ίδια χρονική στιγμή και για τους δύο. Μετά από κάθε μετάδοση μηνυμάτων συγχρονισμού, πατιέται το κουμπί και το παιδί εμφανίζει το τρέχον ρολόι του εκείνη τη στιγμή. Ο πατέρας εμφανίζει το δικό του τρέχον ρολόι συν το τελικό dt , και αυτό το άθροισμα αποτελεί την εκτίμηση του πατέρα για τον χρόνο του παιδιού. Η απόκλιση μεταξύ της εκτίμησης του πατέρα και του πραγματικού ρολογιού του παιδιού, είναι διαφορετική κάθε φορά και αρκετά μικρή, της τάξης των *microsecond*. Σε αυτά τα μs διαφοράς, περιλαμβάνονται αναπόφευκτες χρονικές καθυστερήσεις όπως ο χρόνος μετάδοσης και επεξεργασίας των μηνυμάτων, το τυχαίο διάστημα καθυστέρησης λόγω του CSMA/CA στο επίπεδο MAC, τυχόν επαναμεταδόσεις των πακέτων λόγω συγχρούσεων, κ.α. Επομένως, έχοντας υπόψιν τέτοιου είδους καθυστερήσεις, και γνωρίζοντας είτε το μέσο όρο χρονικής απόκλισης, είτε την κάθε τιμή ξεχωριστά, επιτυγχάνεται ένας απλός και αποτελεσματικός αλγόριθμος συγχρονισμού για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων.

Δ'.2 Δοκιμές και Πειράματα

Η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου δοκιμάστηκε πειραματικά σε ένα Zigbee δίκτυο 5 κόμβων. Τα περισσότερα πειράματα διεξήχθησαν μεταξύ δύο κόμβων, καθώς η ανταλλαγή μηνυμάτων συγχρονισμού γίνεται βάσει του αλγορίθμου ανάμεσα σε έναν κόμβο που έχει τον ρόλο του “πατέρα” και σε έναν δεύτερο που έχει το ρόλο του “παιδιού”. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η επίτευξη της χαμηλότερης δυνατής απόκλισης των ρολογιών των δύο κόμβων, έτσι ώστε ο συγχρονισμός να γίνει όσο το δυνατόν πιο ακριβής. Ωστόσο πρακτικά υπάρχουν αναπόφευκτες χρονικές καθυστερήσεις κατά την ανταλλαγή πακέτων, όπως είναι ο χρόνος μετάδοσης και επεξεργασίας του μηνυματος, το πρωτόκολλο CSMA/CA που ο κάθε κόμβος περιμένει ένα τυχαίο διάστημα πριν τη μετάδοση, ο χρόνος αναμονής των acknowledgements, οι επαναμεταδόσεις των πακέτων εξαιτίας συγχρούσεων, κ.α. Επομένως, για την επίλυση του προβλήματος του συγχρονισμού, ούτως ώστε τα αποτελέσματα των αισθητήρων να είναι ορθά, μπορεί

να χρησιμοποιηθεί ο μέσος όρος απόκλισης των μετρήσεων και να υπάρχει μια κοινή αίσθηση του χρόνου κατά προσέγγιση. Ο χώρος στον οποίο πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα είχε διάφορες παρεμβολές όπως δίκτυα WiFi και Bluetooth, κινητά τηλέφωνα και υπολογιστές. Όλες αυτές οι παρεμβολές δυσχεραίνουν την επίδοση του δικτύου, και ταυτόχρονα δημιουργούν ένα απαιτητικό περιβάλλον για πειραματισμούς αλγορίθμων, ώστε να εξεταστεί εκτενώς η απόδοσή τους.

Δ'.2.1 Πειράματα με Broadcast Μετάδοση

Κατά κύριο λόγο τα πειράματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που γίνονται οι μεταδόσεις των πακέτων, και καθεμία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Ο πρώτος τρόπος μετάδοσης πακέτων είναι το broadcast κατά το οποίο, στα πλαίσια του πρωτοκόλλου Zigbee, σκοπός είναι η μετάδοση να γίνει σε ολοκλήρο το δίκτυο ώστε όλοι οι κόμβοι να τη λάβουν. Για να συμβεί αυτό, ο coordinator και όλοι οι routers που λαμβάνουν μια broadcast μετάδοση, αναμεταδίδουν το πακέτο αυτό τρεις φορές. Κάθε κόμβος που μεταδίδει ένα broadcast δημιουργεί μια καταχώρηση σε έναν τοπικό πίνακα μεταδόσεων broadcast, ώστε κάθε καταχώρηση να παρακολουθεί τα πακέτα και να εξασφαλιστεί ότι αυτά δεν θα μεταδίδονται αδιάκοπα. Κάθε καταχώρηση παραμένει για 8 δευτερόλεπτα, ενώ και ο πίνακας διαθέτει 8 θέσεις, περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις μεταδόσεις σε μία ανά δευτερόλεπτο. Δεδομένου ότι κάθε πακέτο επαναμεταδίδεται τρεις φορές, αυτού του τύπου οι μεταδόσεις είναι προτιμότερο να γίνονται σπανιότερα ώστε να αποφευχθεί η συμφόρηση του δικτύου.

Ο αλγόριθμος συγχρονισμού, που αναφέρεται λεπτομερώς στην προηγούμενη ενότητα, μεταφράστηκε ως κώδικας για Arduino και με την κατάλληλη παραμετροποίηση του συστήματος που απαρτίζει το δίκτυο έγιναν οι δοκιμές. Τα πρώτα πειράματα πραγματοποιήθηκαν μεταξύ δύο κόμβων, ενός Coordinator-πατέρα και ενός Router-παιδί. Αφού πρώτα τρέξουν τα απαιτούμενα AT Commands και διαμορφωθεί το δίκτυο, ο κόμβος παιδί ξεκινάει την ανταλλαγή μηνυμάτων περί συγχρονισμού η οποία γίνεται κάθε 15 sec. Το χρονικό διάστημα των 15 sec επιλέχθηκε επίσης πειραματικά, καθώς έγιναν δοκιμές όπου ο συγχρονισμός συνέβαινε ανά 10 sec, 15 sec, 20 sec και 30 sec, και τα πιο ακριβή αποτελέσματα συγχρονισμού σημειώθηκαν σε αυτό το διάστημα. Τα 15 sec δεν είναι ο σταθερός χρόνος συγχρονισμού με βάση τον αλγόριθμο, καθώς αυτό το διάστημα μεταβάλλεται ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Έτσι, κάθε 15 sec οι δύο συσκευές επικοινωνούν με σκοπό να συγχρονιστούν, και η επαλήθευση γίνεται

με τη χρήση ενός κουμπιού που είναι συνδεδεμένο και στους κόμβους και αποτελεί ένα εξωτερικό κομμάτι του συστήματος. Με το πάτημα του κουμπιού το παιδί εμφανίζει στην οθόνη τον τρέχον χρόνο του ρολογιού σε microsecond, και ο πατέρας την εκτίμηση που υπολόγησε για το παιδί, επίσης σε microsecond.

Η διαφορά των δύο αυτών τιμών αποτελεί την απόκλιση των ρολογιών των δύο κόμβων. Ο πατέρας έχοντας γνώση της απόκλισης του ρολογιού του παιδιού του είναι σε θέση να υπολογίσει για παράδειγμα την χρονική στιγμή που καταγράφηκε μια μέτρηση, και με αυτή τη χρονική πληροφορία γνωρίζει κατά προσέγγιση την στιγμή που έγινε το συμβάν. Με αυτό το τρόπο, οι κόμβοι ενός δικτύου ανά δύο, γνωρίζουν την διαφορά των ρολογιών τους, και εφόσον οι μετρήσεις έχουν και μια χρονική πληροφορία, υπάρχει μια κοινή αίσθηση του χρόνου και το σύστημα είναι συγχρονισμένο.

Τα πρώτα 10 πειράματα για τον αλγόριθμο συγχρονισμού έγιναν μεταξύ δύο κόμβων, ώστε να εξεταστούν τα χρονικά αποτελέσματα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα.

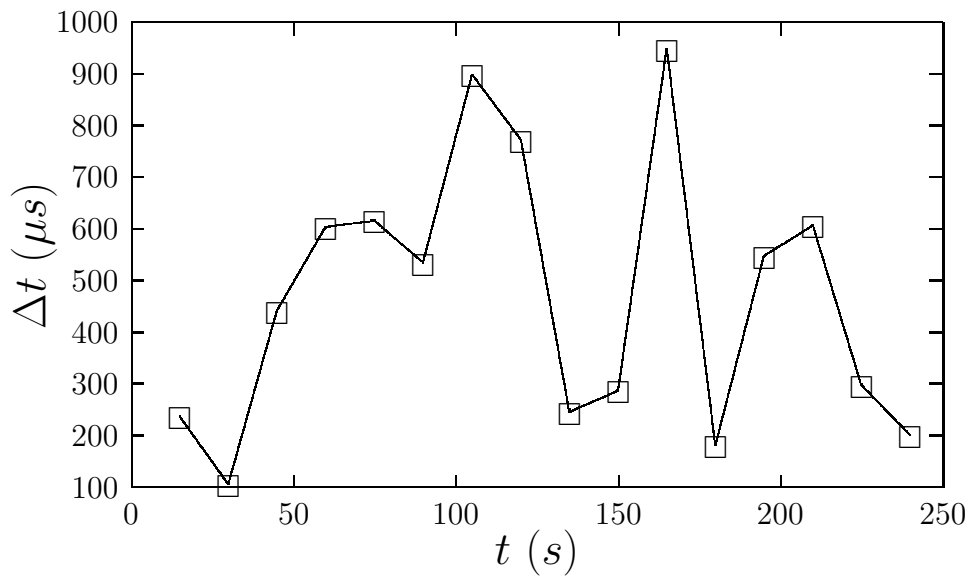
Experiment	MO	MAX	MIN
1	524.75	1246	62
2	547	1228	86
3	468.375	1054	62
4	496.375	1304	20
5	503.875	1082	32
6	421.5	1252	48
7	506.625	1232	72
8	467.875	1230	70
9	540.125	1094	12
10	470.625	948	106

Πίνακας Δ'.1: Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τους μέσους όρους, τις μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις των 10 πειραμάτων.

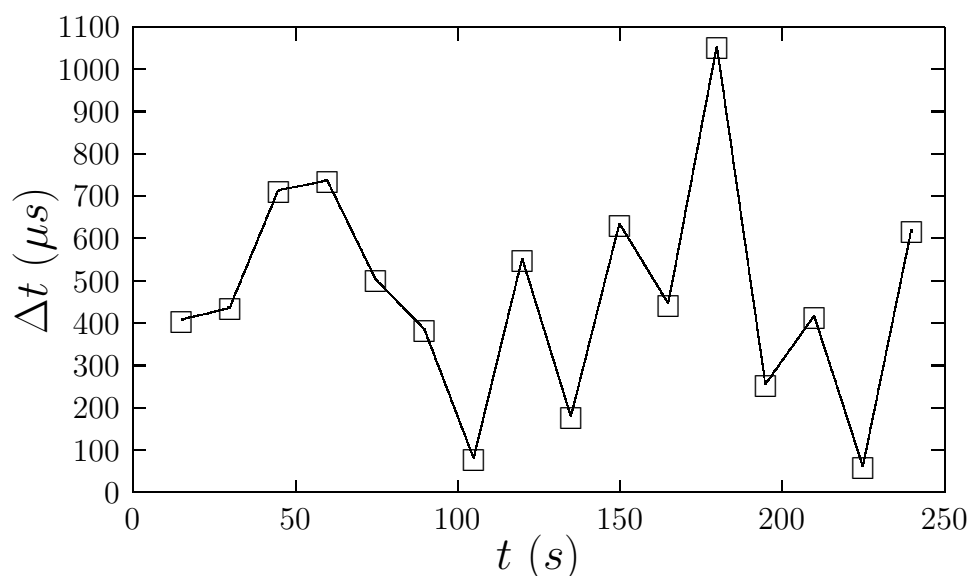
Κατά μέσο όρο και σύμφωνα με τα πειράματα που έγιναν, η απόκλιση μεταξύ δύο κόμβων κυμαίνεται από 547 μ s έως 431,5 μ s. Η μέγιστη τιμή που καταγράφηκε είναι στα 1304 μ s, ενώ η χαμηλότερη είναι τα 12 μ s. Η απόκλιση που παρατηρείται είναι της τάξης των microsecond, όπου γενικά ισχύει ότι 1 second ισούται με 1000 millisecond

και 1 millisecond ισούται επίσης με 1000 microsecond. Επομένως 1 second ισούται με 1.000.000 microsecond. Ωστόσο, παρόλο που η απόκλιση των ρολογιών είναι σχετικά μικρή, έχει ένα εύρος τιμών που μπορεί να πάρει και αυτό εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό συνθηκών. Η επίγνωση της απόκλισης όμως, μπορεί να διατηρήσει ένα δίκτυο συγχρονισμένο και τις τιμές των αισθητήρων επίσης συγχρονισμένες, με αναπόφευκτες μικρές διαφορές.

Τα παρακάτω δύο διαγράμματα απεικονίζουν την διαγραμματική κατανομή της χρονικής απόκλισης των ρολογιών μεταξύ 2 κόμβων. Στον άξονα x φαίνεται ο χρόνος διεξαγωγής του πειράματος, όπου ανά 15 sec συμβαίνει το συμβάν με το πάτημα του κουμπιού, ενώ στον άξονα y φαίνονται οι χρονικές αποκλίσεις των ρολογιών των κόμβων σε microsecond.



Σχήμα Δ'.2: Διαγραμματική Απεικόνιση Πειράματος με Broadcast Μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. MO = 470.625, Max = 948, Min = 106.



Σχήμα Δ'.3: Διαγραμματική Απεικόνιση Πειράματος με Broadcast Μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. MO = 468.375, Max = 1054, Min = 62.

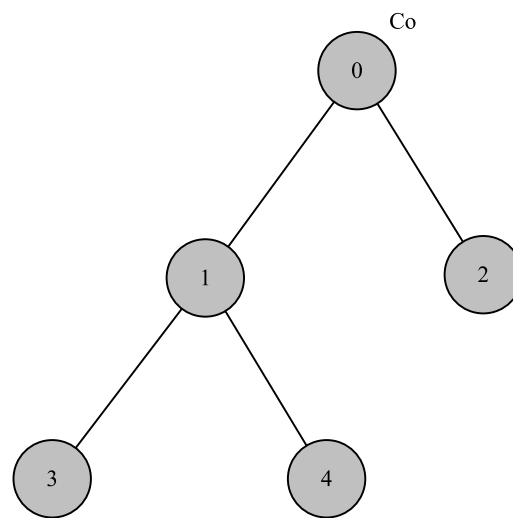
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων μεταξύ των δύο κόμβων η χρονική απόκλιση τους είναι αρκετά μικρή και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέα. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ένα πείραμα σε ένα δίκτυο 5 κόμβων με σταθερή τοπολογία. Η διαδικασία έγινε με τον ίδιο τρόπο και σύμφωνα με τον αλγόριθμο, με διαφορά ότι ορισμένοι κόμβοι είχαν περισσότερα από ένα παιδιά. Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα του πειράματος μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

Nodes	MO	MAX	MIN
0-2	588.25	1322	12
0-1	591.375	1356	32
1-3	631.75	1344	68
1-4	629	2732	90

Πίνακας Δ'.2: Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τους μέσους όρους, τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των χρονικών αποκλίσεων των κόμβων στο πείραμα με τους 5 κόμβους.

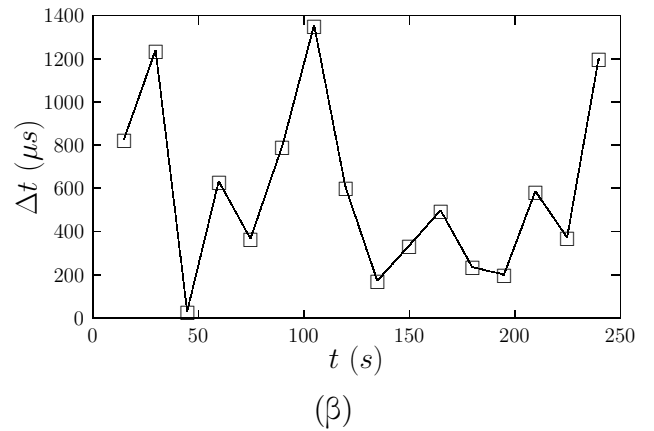
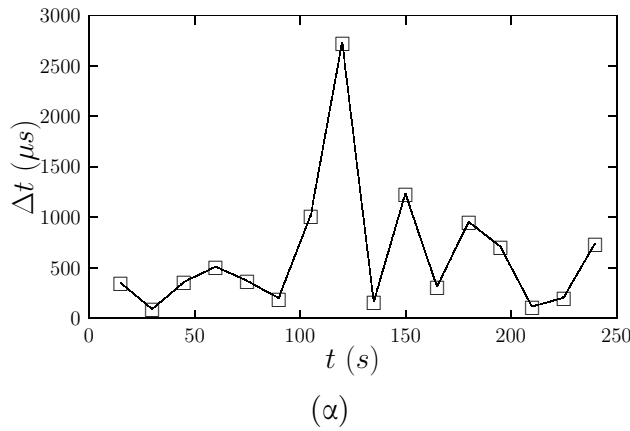
Στη περίπτωση αυτού του πειράματος με τους 5 κόμβους, οι αποκλίσεις αυξήθηκαν

κατά μέσο όρο, ωστόσο σημειώθηκαν και αρκετά μικρές χρονικές αποκλίσεις. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό σε ένα δίκτυο με περισσότερους κόμβους, είναι ότι κάθε παιδί ξεκινάει τη διαδικασία του συγχρονισμού κάθε 15 sec, με αποτέλεσμα να μεταδίδονται περισσότερα μηνύματα, να αυξάνεται ο κίνδυνος των συγχρούσεων των πακέτων και η συμφόρηση του δικτύου να είναι μεγαλύτερη. Η τοπολογία των κόμβων του πειράματος αυτού φαίνεται σχηματικά στην επόμενη εικόνα.

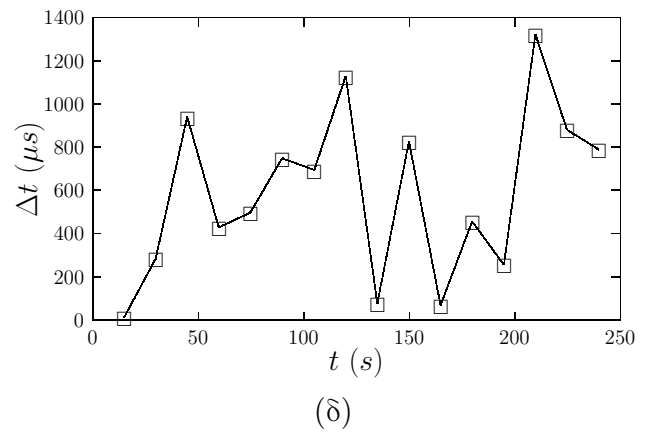
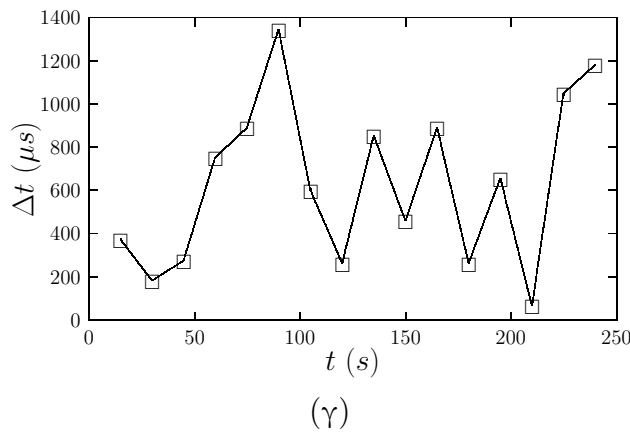


Σχήμα Δ'.4: Η τοπολογία του δικτύου των 5 κόμβων

Επομένως στο δίκτυο των 5 κόμβων ο κόμβος 0 είναι ο Coordinator, ενώ όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι είναι Routers. Ο Coordinator έχει παιδιά τους κόμβους 1 και 2, και ο 1 έχει παιδιά τους 3 και 4. Τα μηνύματα συγχρονισμού ανταλλάσσονται μεταξύ τους αναλόγα με τη σχέση πατέρας-παιδί. Αν η τοπολογία του δικτύου ήταν διαφορετική και τρεις κόμβοι ήταν συνδεδεμένοι μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένας κύκλος, τότε το πρόβλημα του ποιος κόμβος θα αναλάβει το ρόλο του πατέρα και του παιδιού μπορεί να λυθεί με τυχαίο τρόπο, ή αξιωματικά ο κόμβος από τον οποίο λαμβάνεται το πρώτο μήνυμα παίρνει το ρόλο του πατέρα. Τα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζουν την μεταβολή της χρονικής απόκλισης των ρολογιών κατά τη διεξαγωγή του πειράματος αυτού.



Σχήμα Δ'.5: Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν τις χρονικές αποκλίσεις στο πείραμα με το δίκτυο των 5 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα (α) αφορά την απόκλιση μεταξύ των κόμβων 0-1 και το (β) τους 0-2.



Σχήμα Δ'.6: Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν τις χρονικές αποκλίσεις στο πείραμα με το δίκτυο των 5 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα (γ) αφορά την απόκλιση μεταξύ των κόμβων 1-3 και το (δ) τους 1-4.

Δ'.2.2 Πειράματα με Unicast Μετάδοση

Ο δεύτερος τρόπος μετάδοσης είναι το unicast, όπου ουσιαστικά οι μεταδόσεις αποστέλλονται από μια συσκευή “πηγή” σε μία άλλη συσκευή “προορισμό”. Η δεύτερη συσκευή μπορεί να είναι άμεσος γείτονας της πρώτης ή να βρίσκεται αρκετά hops μακριά. Οι unicast μεταδόσεις που αποστέλλονται κατά μήκος μιας διαδρομής πολλαπλών

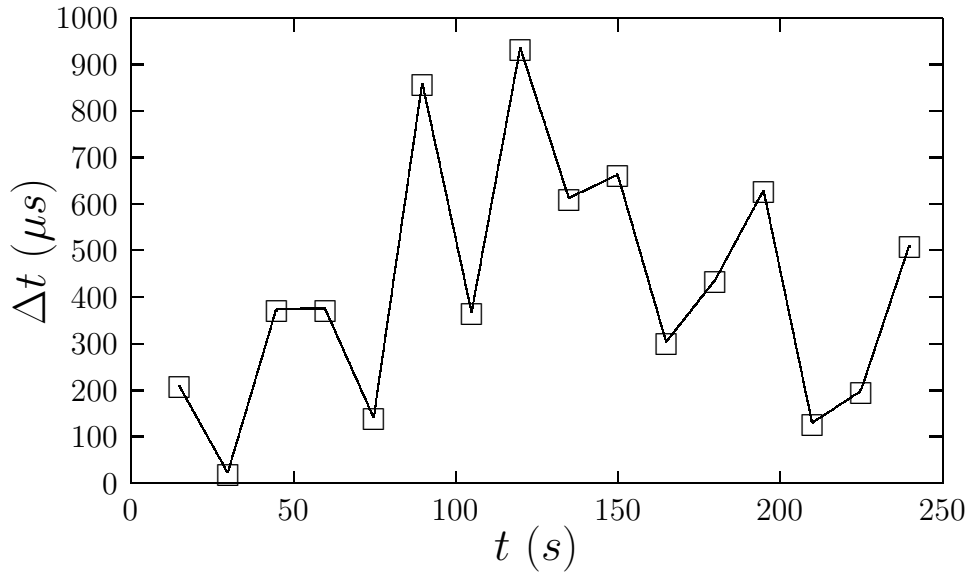
hop απαιτούν πρώτα κάποια μέσα δημιουργίας της δρομολόγησης αυτής της διαδρομής προς τον προορισμό, που το πρωτόκολλο Zigbee συμπεριλαμβάνει.

Ομοίως με τα πειράματα που έγιναν με την broadcast μετάδοση, τα πρώτα από αυτά πραγματοποιήθηκαν μεταξύ του coordinator και ενός router. Σε αυτή τη σειρά πειραμάτων ο μέσος όρος της απόκλισης είναι ανάμεσα στα 584,875 μs και στα 423,75 μs . Η μέγιστη τιμή απόκλισης που καταγράφηκε με την unicast μετάδοση των πακέτων είναι 2872 μs , ενώ για μία μόνο μέτρηση στα 10 πειράματα, η απόκλιση ήταν μηδενική, δηλαδή δεν υπήρχε απόκλιση και ο πατέρας εκτίμησε σωστά την τιμή του ρολογιού του παιδιού. Η επόμενη μικρότερη μέτρηση είναι στα 8 μs . Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται αναλυτικά οι μέσοι όροι καθώς και η μέγιστη και ελάχιστη τιμή που καταγράφηκε κατά τα 10 αυτά πειράματα.

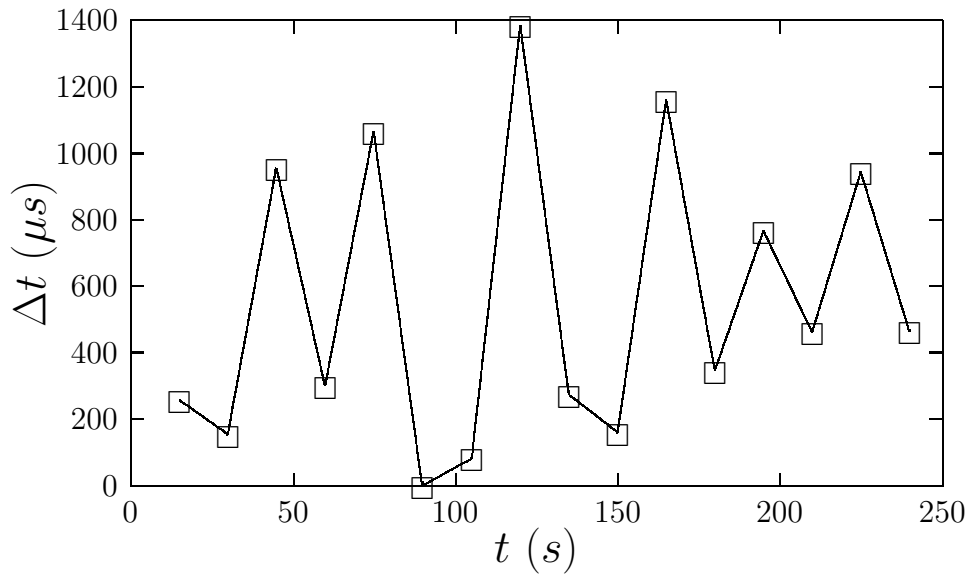
Experiment	MO	MAX	MIN
1	537.375	1152	26
2	576.375	1332	160
3	444.375	934	72
4	423.75	936	24
5	568.375	1398	16
6	537.625	1196	16
7	451.25	750	214
8	575.5	1398	14
9	569.875	2872	8
10	548.5	1384	0

Πίνακας Δ'.3: Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τους μέσους όρους, τις μέγιστες και ελάχιστες αποκλίσεις των 10 πειραμάτων.

Με τον ίδιο τρόπο διεξαγωγής των προηγούμενων 10 πειραμάτων της Broadcast μετάδοσης, πραγματοποιήθηκε μια παρόμοια σειρά πειραμάτων με μόνη διαφορά των τρόπο μετάδοσης των πακέτων με τις χρονοσφραγίδες. Τα δύο επόμενα διαγράμματα απεικονίζουν την χρονική απόκλιση των ρολογιών όπου στον άξονα x βρίσκεται ο χρόνος διεξαγωγής του πειράματος, και στον άξονα y η χρονική απόκλιση.



Σχήμα Δ'.7: Διαγραμματική Απεικόνιση Πειράματος με Unicast Μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. MO = 423.75, Max = 936, Min = 23



Σχήμα Δ'.8: Διαγραμματική Απεικόνιση Πειράματος με Unicast Μετάδοση μεταξύ δύο κόμβων. MO = 548.5, Max = 1384, Min = 0

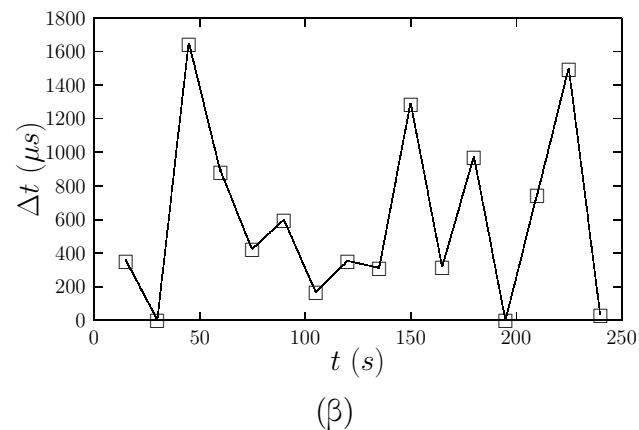
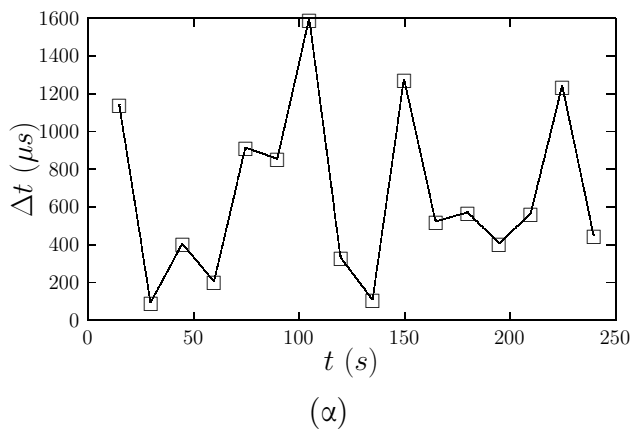
Στη συνέχεια πραγματοποιηθήκε ένα ακόμα πείραμα σε ένα δίκτυο 5 κόμβων που βασίστηκε και πάλι στη λογική του αλγορίθμου. Η τοπολογία του εν λόγω δικτύου

παραμένει η ίδια με τα παραπάνω πειράματα. Ο ακόλουθος πίνακας περιέχει επίσης τον μέσο όρο, τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές μεταξύ όλων των κόμβων. Στην περίπτωση του περάματος αυτού ο μέσος όρος κυμαίνεται ανάμεσα στα 691.375 μs , η μέγιστη τιμή που σημειώθηκε είναι στα 1650 μs και η ελάχιστη μόλις 4 μs .

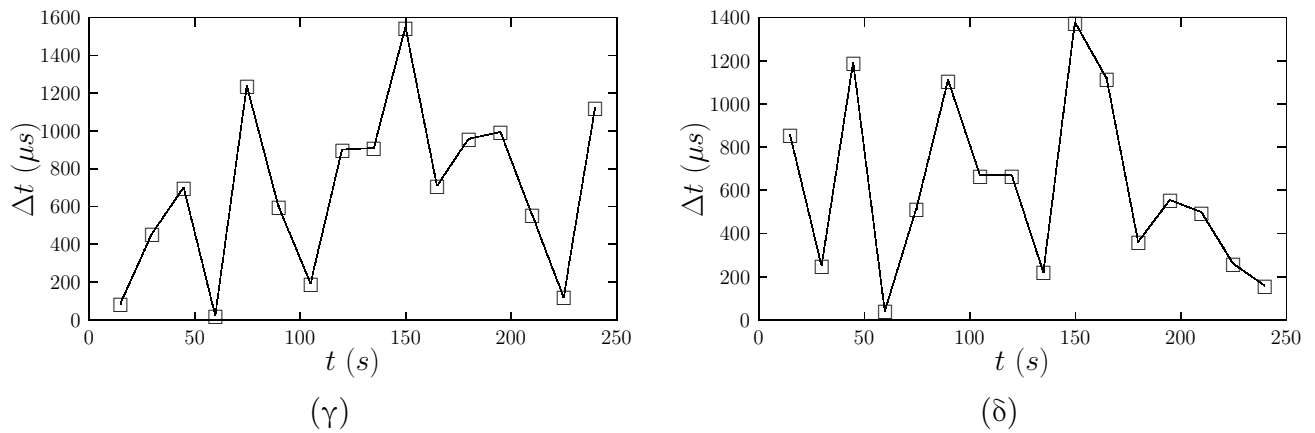
Nodes	MO	MAX	MIN
0-2	602.5	1650	4
0-1	691.375	1548	26
1-3	667.625	1594	96
1-4	616.875	1378	42

Πίνακας Δ'.4: Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τους μέσους όρους, τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των χρονικών αποκλίσεων των κόμβων στο πείραμα με τους 5 κόμβους.

Τα επόμενα 4 διαγράμματα απεικονίζουν τα αποτελέσματα του εν λόγω πειράματος στο δίκτυο των 5 κόμβων.

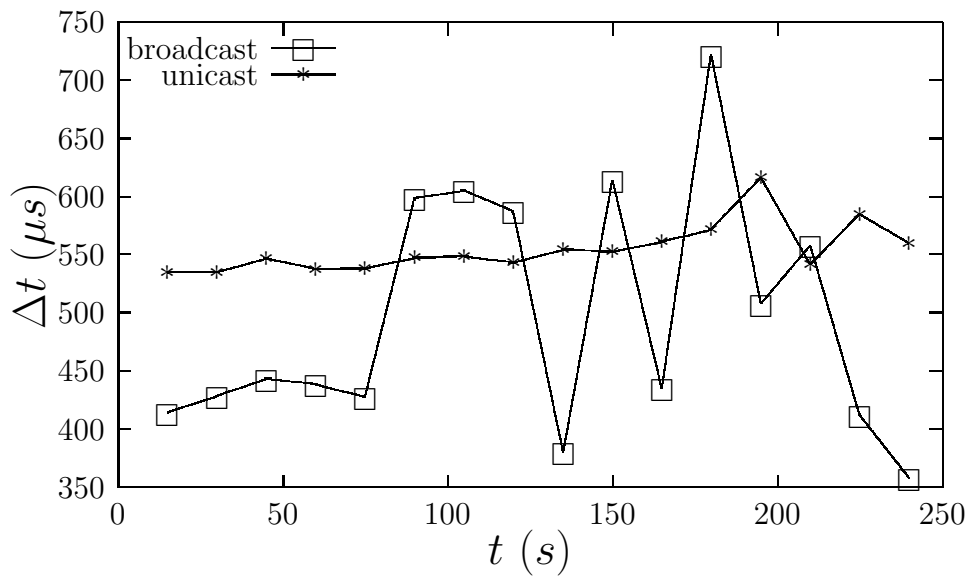


Σχήμα Δ'.9: Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν τις χρονικές αποκλίσεις στο πείραμα με το δίκτυο των 5 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα (α) αφορά την απόκλιση μεταξύ των κόμβων 0-1 και το (β) τους 0-2.



Σχήμα Δ'.10: Τα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζουν τις χρονικές αποκλίσεις στο πείραμα με το δίκτυο των 5 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα το διάγραμμα (γ) αφορά την απόκλιση μεταξύ των κόμβων 1-3 και το (δ) τους 1-4.

Τέλος, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η σύγκριση μεταξύ των δύο τρόπων μετάδοσης των μηνυμάτων, δηλαδή του Broadcast και του Unicast. Για να γίνει αντιληπτή η χρονική διαφορά των δύο τρόπων, το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τους μέσους όρους όλων των πειραμάτων που έγιναν με Broadcast αλλά και αυτά που έγιναν με Unicast.



Σχήμα Δ'.11: Σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων που έγιναν με Broadcast μετάδοση και Unicast μετάδοση.

Όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω διαγραμματική απεικόνιση, ο συγχρονισμός που έγινε με Unicast μετάδοση, φαίνεται να είναι πιο σταθερός ως προς τον χρόνο διεξαγωγής των πειραμάτων σε αντίθεση με τον Broadcast συγχρονισμό. Ο δεύτερος, έχει μεγαλύτερες χρονικές αποκλίσεις και αλλάζει από πείραμα σε πείραμα. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτή η καθυστέρηση με την Broadcast μετάδοση είναι το γεγονός ότι όταν μια Zigbee συσκευή λάμβανει μια μετάδοση τέτοιου τύπου επαναμεταδίδει το πακέτο 3 φορές με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να γνωρίζουμε ποια από τις μεταδόσεις χρησιμοποιείται εν τέλη για τον υπολογισμό της τελικής χρονικής απόκλισης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου της προηγούμενης ενότητας, ο χρόνος και η απόκλιση των ρολογιών των κόμβων έχουν πολλές διακυμάνσεις. Η απόκλιση αυτή μπορεί να είναι απειροελάχιστα μικρή, αλλά ύστερα από σύντομο χρονικό διάστημα να αυξάνεται. Επιπλέον, παρουσιάζονται σημαντικές χρονικές διαφορές όσον αφορά στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η ανταλλαγή των πακέτων μεταξύ των κόμβων. Γενικότερα, ο τρόπος που προτείνεται για την ανταλλαγή των μηνυμάτων είναι η Unicast μετάδοση, εξαιτίας της σταθερότητας των καταγραφόμενων τιμών που προέκυψαν πειραματικά. Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε είναι αρκετά ευέλικτος ως προς αλλαγές που στοχεύουν στην εφαρμογή του σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων, στο οποίο είναι και απαραίτητος. Η επίγνωση της εν λόγω χρονικής απόκλισης είναι μια πολύ σημαντική πληροφορία για την βέλτιστη απόδοση ενός δικτύου αισθητήρων που έχει ως σκοπό τη συλλογή δεδομένων, την εξαγωγή συμπερασμάτων και την επιτήρηση γεωγραφικών περιοχών.

Κεφάλαιο Ε΄

Σύνοψη και Συμπεράσματα

Το κύριο αντικείμενο ανάλυσης και επεξεργασίας αυτής της πτυχιακής εργασίας, υπήρξε το πρόβλημα του συγχρονισμού στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και συγκεκριμένα στον τομέα της έξυπνης γεωργίας. Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια αυτής της εργασίας, το πρόβλημα αυτό του συγχρονισμού αποτελεί ένα από τα βασικότερα στον τομέα των κατανεμημένων δικτύων και συστημάτων, και κατέπécτασιν στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Υπάρχουν ορισμένες εφαρμογές που το πρόβλημα αυτό δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό, ωστόσο στο μεγαλύτερο ποσοστό των περιπτώσεων χρήζει άμεσης επίλυσης και αντιμετώπισης για ποικίλους και διαφορετικούς λόγους. Το ζητημά αυτό έχει προβληματίσει πολλούς ειδικούς στον τομέα και στην σχετική βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις, μέθοδοι και αλγόριθμοι που δίνουν λύσεις, οι οποίες όμως δεν είναι ποτέ απόλυτα ακριβείς.

Η παρούσα πτυχιακή αποτέλεσε μια απόπειρα επίλυσης του συγχρονισμού των ρολογιών των κόμβων σε ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης ανάπτυχθηκε ένας αλγόριθμος που βασίζεται στη μέθοδο των χρονοσφραγίδων, οι οποίες συμπεριλαμβάνονται στα ανταλλάσσομενα πακέτα μεταξύ δύο κόμβων ενός δικτύου. Η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου επαληθεύτηκε πειραματικά με τη χρήση του μικροελεγκτή Arduino Uno και των XBee Pro S2C Zigbee RF Modules τα οποία συνδέονται με ένα ειδικό Wireless SD Shield. Συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκαν συνολικά 20 πειράματα μεταξύ δύο κόμβων, τα 10 εκ των οποίων έγιναν με Broadcast μετάδοση και τα άλλα 10 με Unicast, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν ακόμα δύο πειράματα σε ένα δίκτυο 5 κόμβων και με τους 2 τρόπους μετάδοσης των πακέτων. Η καταγραφόμενη χρονική απόκλιση των ρολογιών είναι της τάξης των microsecond (μs)

και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτή η απόκλιση κυμαίνεται από τα 2872 μs έως 0 μs . Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι τιμές απόκλισης που καταγράφηκαν για τους δύο τρόπους μετάδοσης, καθώς και στις δύο η απόκλιση είναι αρκετά χαμηλή, και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέα, ενώ μεγαλύτερη σταθερότητα παρουσιάζει η Unicast.

Τα αποτελέσματα της υλοποίησης του αλγορίθμου και των πειραμάτων είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά για περαιτέρω έρευνα και δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες καλλιέργειας και σε δίκτυα με μεγαλύτερο αριθμό κόμβων. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του εν λόγω αλγορίθμου είναι η ευελιξία και προσαρμοστικότητα του, και η ακριβής υλοποίηση του γίνεται σε αναλογία των αναγκών και περιορισμών της εκάστοτε εφαρμογής. Αναφορικά με την έξυπνη γεωργία, αυτή αποτελεί έναν τομέα στον οποίο ο συγχρονισμός του δικτύου είναι απαραίτητος και απαιτείται η υψηλότερη δυνατή ακρίβεια. Κάθε εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων σε ένα περιβάλλον οποιουδήποτε τύπου καλλιέργειας, χρειάζεται να πληροί κάποιες προϋποθέσεις, όπως για παράδειγμα τη κάλυψη όλης της καλλιεργήσιμης περιοχής, και μέσα σε αυτές συμπεριλαμβάνεται και ο συγχρονισμός. Οι αλγόριθμοι συγχρονισμού έχουν μια συγκεκριμένη λειτουργία, ωστόσο η υλοποίησή τους σε πραγματικές συνθήκες συχνά απαιτεί ορισμένες προσαρμογές οι οποίες είναι εφικτές.

Η επιτακτική ανάγκη για την επίλυση του προβλήματος του συγχρονισμού στα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία η οποία είναι όμως απαραίτητη. Καθώς ο συγχρονισμός είναι ένα από τα βασικότερα προβλήματα γενικά στα κατανεμημένα συστήματα, έχει απασχολήσει πολλές έρευνες και ειδικούς οι οποίοι επικεντρώνονται στην επίλυση του. Η χρονική ακρίβεια τόσο διαφόρων συμβάντων, όσο και συντονισμένων εργασιών που χρειάζεται να επιτελέσει ένα δίκτυο αισθητήρων, καθίσταται εξαιρετικά σημαντική συνιστώσα του συστήματος που καλείται να επιτελέσει μια λειτουργία. Το ζήτημα του συγχρονισμού, μεταξύ άλλων, χρειάζεται αντιμετώπιση και σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να παραβλέπεται.

Βιβλιογραφία

- [1] A. S. Tanenbaum and D. J. Wetherall, *Computer Networks*. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press, 5th ed., 2010.
- [2] L. L. Peterson and B. S. Davie, *Computer networks: a systems approach*. Elsevier, 2007.
- [3] A. S. Tanenbaum and M. Van Steen, *Distributed systems: principles and paradigms*. Prentice-Hall, 2007.
- [4] O. Al-Kofahi, “Evaluating time synchronization using application-layer time-stamping,” in *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [5] M. K. Maggs, S. G. O’keefe, and D. V. Thiel, “Consensus clock synchronization for wireless sensor networks,” *IEEE sensors Journal*, vol. 12, no. 6, pp. 2269–2277, 2012.
- [6] K. S. Yildirim and A. Kantarci, “Time synchronization based on slow-flooding in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 244–253, 2013.
- [7] E. Garone, A. Gasparri, and F. Lamonaca, “Clock synchronization protocol for wireless sensor networks with bounded communication delays,” *Automatica*, vol. 59, pp. 60–72, 2015.
- [8] Y. Kadowaki and H. Ishii, “Event-based distributed clock synchronization for wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 60, no. 8, pp. 2266–2271, 2014.

- [9] D. Djenouri and M. Bagaa, “Synchronization protocols and implementation issues in wireless sensor networks: A review,” *IEEE Systems Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 617–627, 2014.
- [10] 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 (BalkanCom’18), Podgorica, Montenegro*, pp. 1–5, 2018.
- [11] M. Elsharief, M. A. A. El-Gawad, and H. Kim, “Low-power scheduling for time synchronization protocols in a wireless sensor networks,” *IEEE Sensors Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 1–4, 2019.
- [12] M. Elsharief, M. A. A. El-Gawad, and H. Kim, “Density table-based synchronization for multi-hop wireless sensor networks,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1940–1953, 2017.
- [13] K. Xie, Q. Cai, and M. Fu, “A fast clock synchronization algorithm for wireless sensor networks,” *Automatica*, vol. 92, pp. 133–142, 2018.
- [14] T. Kalaivani, A. Allirani, and P. Priya, “A survey on zigbee based wireless sensor networks in agriculture,” in *3rd International Conference on Trendz in Information Sciences & Computing (TISC2011)*, pp. 85–89, IEEE, 2011.
- [15] A. Z. Abbasi, N. Islam, Z. A. Shaikh, *et al.*, “A review of wireless sensors and networks’ applications in agriculture,” *Computer Standards & Interfaces*, vol. 36, no. 2, pp. 263–270, 2014.
- [16] A. L. Diedrichs, G. Tabacchi, G. Grünwaldt, M. Pecchia, G. Mercado, and F. G. Antivilo, “Low-power wireless sensor network for frost monitoring in agriculture research,” in *2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pp. 525–530, IEEE, 2014.
- [17] R. Udaykumar *et al.*, “Development of wsn system for precision agriculture,” in *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, pp. 1–5, IEEE, 2015.

- [18] G. Sahitya, N. Balaji, C. Naidu, and S. Abinaya, “Designing a wireless sensor network for precision agriculture using zigbee,” in *2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC)*, pp. 287–291, IEEE, 2017.
- [19] M. R. M. Kassim and A. N. Harun, “Applications of wsn in agricultural environment monitoring systems,” in *2016 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pp. 344–349, IEEE, 2016.
- [20] G. Panda and T. Saha, “Building of low cost reliable wireless sensor network for smart indoor agriculture products,” in *2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nano-Technology (IEMENTech)*, pp. 1–5, IEEE, 2018.
- [21] A. Sabo, S. Qaisar, A. Subasi, and K. Rambo, “An event driven wireless sensors network for monitoring of plants health and larva activities,” in *2018 21st Saudi Computer Society National Computer Conference (NCC)*, pp. 1–7, IEEE, 2018.
- [22] G. Sahitya, N. Balaji, and C. Naidu, “Wireless sensor network for smart agriculture,” in *2016 2nd International Conference on Applied and Theoretical Computing and Communication Technology (iCATccT)*, pp. 488–493, IEEE, 2016.
- [23] “Ieee: 802.15.4.” https://standards.ieee.org/standard/802_15_4v-2017.html. Τελευταία Ανακτση: 04-09-2019.
- [24] “Zigbee alliance.” <https://web.archive.org/web/20130627172453/http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/FAQ.aspx>. Τελευταία Ανακτση: 04-09-2019.
- [25] “Xbee pro s2c zigbee rf modules, user guide.” <https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90002002.pdf?fbclid=IwAR3CEMUqlpSS3lqABjhkdM5CuxwJimqGw9M9PNu200wuC5scsZIryvPRvxQ>. Τελευταία Ανακτση: 04-09-2019.
- [26] “Arduino uno.” <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. Τελευταία Ανακτση: 04-09-2019.

- [27] “Arduino wireless sd shield.” <https://store.arduino.cc/arduino-wireless-sd-shield>. Τελευταία Ανακτση: 04-09-2019.
- [28] “Xctu next generation configuration platform for xbee/rf solutions.” <https://www.digi.com/products/iot-platform/xctu>. Τελευταία Ανακτση: 04-09-2019.

Παράρτημα

```
1 #include <MyFrame.h>
2 #include <XBee.h>
3
4 #define INTERVAL 15
5 #define NUMOFNODES 5
6 #define NEXTFRAME TIME 500
7 #define DATAPERNODE 20
8
9 // create the XBee object
10 XBee xbee = XBee();
11
12 const uint32_t zigbeeAddressHigh = 0x0013A200;
13
14 bool isCoordinatorEnabled = false;
15
16 uint32_t parentAddressLow = 0x0;
17
18 uint8_t sData[4];
19 uint16_t sDataLength = 0;
20
21 MyFrame receiveFrame = MyFrame();
22
23 MyFrame sendFrame = MyFrame();
24
25 uint8_t dBmValue = 0;
26
27 uint8_t myID = 255;
28
29 uint32_t lastSenderAddress = 0;
30
31 uint32_t children[NUMOFNODES] = {};
32
33 uint8_t childrenCount = 0;
34
35 long childrenDT[NUMOFNODES] = {};
36
37 unsigned long sendTimer = 0;
38
39 unsigned long myButtonMicros = 0;
40
41 unsigned long buttonTimer = 0;
```

```
42
43 unsigned long myTimestampInit = 0;
44
45 unsigned long rtt = 0;
46
47 unsigned long dt = 0;
48
49 void setup() {
50
51     Serial.begin(9600);
52     xbee.setSerial(Serial);
53
54     pinMode(8,INPUT);
55
56     sendATCommand("CE");
57
58     sendATCommand("AP2");
59
60     sendATCommand("BH1");
61
62     sendATCommand("ID19");
63
64     sendATCommand("AO0");
65
66     sendATCommand("JV1");
67
68     sendATCommand("PL0");
69
70     sendATCommand("WR");
71
72     sendATCommand("SL");
73
74     sendATCommand("NI");
75
76     getChildren();
77
78     delay(5000);
79
80     sendTimer = millis();
81 }
82
```

```

83
84
85 void loop() {
86
87     checkForPacketDelivery(); // Updates receiveFrame
88     FrameType type = receiveFrame.getType();
89
90     if (type != 0) {
91         Serial.print(F("\nMessage's type is: "));
92         Serial.println(receiveFrame.getType());
93     }
94     if (type == 1) {
95         unsigned long myMicros = micros();
96
97         sendFrame.setType(2);
98
99         XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(zigbeeAddressHigh,
100 lastSenderAddress);
101
102         memcpy(sData, &myMicros, 4);
103         sendFrame.setData(sData, 4);
104
105         ZBTxRequest zbTx = ZBTxRequest(addr64, sendFrame.serialize(),
106 sendFrame.getLength());
107
108         zbTx.setBroadcastRadius( 1 );
109
110         xbee.send(zbTx);
111
112         sendFrame.defaultInit();
113
114         uint8_t childExists = search(children, childrenCount,
115 lastSenderAddress);
116
117         if (childExists != 255) {
118             unsigned long childMicros = 0;
119             memcpy(&childMicros, receiveFrame.getData(), 4);
120
121             childrenDT[childExists] = childMicros - myMicros;
122             Serial.print(F("childMicros"));
123             Serial.println(childMicros);

```

```
121         Serial.print(F("myMicros"));
122         Serial.println(myMicros);
123         Serial.print(F("Dt : "));
124         Serial.println(childrenDT[childExists]);
125     }
126 } else if (type == 2) {
127
128     unsigned long myTimestampFin = micros();
129
130     rtt = (myTimestampFin - myTimestampInit) / 2;
131
132     sendFrame.setType(3);
133
134     XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(zigbeeAddressHigh,
parentAddressLow);
135
136     memcpy(sData, &rtt, 4);
137     sendFrame.setData(sData, 4);
138
139     ZBTxRequest zbTx = ZBTxRequest(addr64, sendFrame.serialize(),
sendFrame.getLength());
140
141     zbTx.setBroadcastRadius(1);
142
143     xbee.send(zbTx);
144
145     sendFrame.defaultInit();
146
147 } else if (type == 3) {
148
149     uint8_t childExists = search(children, childrenCount,
lastSenderAddress);
150
151     memcpy(&rtt, receiveFrame.getData(), 4);
152
153     dt = childrenDT[childExists] + rtt;
154
155     Serial.print(F("Father's final Dt: "));
156     Serial.println(dt);
157 }
158
```

```

159     if ( millis() - sendTimer >= INTERVAL * 1000 && parentAddressLow !=
160         0x0) {
161
162         myTimestampInit = micros();
163
164         sendTimer = millis();
165         sendFrame.setType(1);
166
167         XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(zigbeeAddressHigh,
168         parentAddressLow);
169
170         memcpy(sData, &myTimestampInit, 4);
171         sendFrame.setData(sData, 4);
172
173         ZBTxRequest zbTx = ZBTxRequest(addr64, sendFrame.serialize(),
174         sendFrame.getLength());
175
176         zbTx.setBroadcastRadius( 1 );
177
178         xbee.send(zbTx);
179
180         sendFrame.defaultInit();
181
182         Serial.print(F("my timestamp: "));
183         Serial.println(myTimestampInit);
184         Serial.print(F("Sent to: "));
185         Serial.println(zbTx.getAddress64().getLsb(), HEX);
186     }
187
188     if (digitalRead(8) == HIGH && millis()-buttonTimer>=1000) {
189
190         unsigned long myButtonMicros = micros();
191
192         if (myID == 0) {
193             Serial.print(F("Parent's Estimation: "));
194             Serial.println(myButtonMicros + dt);
195         }
196         if (myID == 2) {
197             Serial.print(F("Child's micros: "));
198             Serial.println(myButtonMicros);
199         }
200     }

```

```
197     }
198
199     buttonTimer = millis();
200 }
201 }
202
203 void getChildren() {
204     if (myID == 0) {
205         children[childrenCount++] = 0x41826cb0;
206         children[childrenCount++] = 0x41826c95;
207         parentAddressLow = 0;
208     } else if (myID == 1) {
209         children[childrenCount++] = 0x41826893;
210         children[childrenCount++] = 0x418268c6;
211         parentAddressLow = 0x41826896;
212     } else if (myID == 2) {
213         parentAddressLow = 0x41826c69;
214     } else if (myID == 3) {
215         parentAddressLow = 0x41826c6c;
216     } else if (myID == 4) {
217         parentAddressLow = 0x41826c6c;
218     } else {
219         Serial.println (F("incorrect ID"));
220     }
221 }
222
223
224
225
226
227 void sendZBTxFrame(uint8_t BH, uint32_t addrHigh, uint32_t addrLow) {
228
229     XBeeAddress64 addr64 = XBeeAddress64(addrHigh, addrLow);
230
231     //Here we create a frame of type ZBTxRequest
232     ZBTxRequest zbTx = ZBTxRequest(addr64, sendFrame.serialize(),
233     sendFrame.getLength());
234
235     //Here we create a frame of type ZBTxRequest
236     zbTx.setBroadcastRadius( BH );
```

```
237 xbee.send(zbTx);
238
239 sendFrame.defaultInit();
240 Serial.print(F("Sent to: "));
241 Serial.println(zbTx.getAddress64().getLsb(), HEX);
242
243 }
244
245
246 void checkForPacketDelivery() {
247
248     if (receiveFrame.getType() != OTHER) {
249         receiveFrame.defaultInit();
250     }
251
252     xbee.readPacket();
253
254     if (xbee.getResponse().isAvailable()) {
255
256         XBeeAddress64 remoteAddress = XBeeAddress64();
257         Serial.println(F("\nGot "));
258
259         if (xbee.getResponse().getApiId() == ZB_TX_STATUS_RESPONSE) {
260             ZBTxStatusResponse txStatus = ZBTxStatusResponse();
261             xbee.getResponse().getZBTxStatusResponse(txStatus);
262
263             Serial.println(txStatus.getDeliveryStatus(), HEX);
264
265             if (txStatus.getDeliveryStatus() == SUCCESS) {
266
267                 Serial.print(F("Success\n"));
268             } else {
269
270                 Serial.print(F("Unsuccess\n"));
271             }
272         } else if (xbee.getResponse().getApiId() == ZB_RX_RESPONSE) {
273             ZBRxResponse rxResponse = ZBRxResponse();
274
275             xbee.getResponse().getZBRxResponse(rxResponse);
276             Serial.print(F("From: "));
277
```

```

278         Serial.println(rxResponse.getRemoteAddress64().getLsb(),
HEX);
279         lastSenderAddress = rxResponse.getRemoteAddress64().getLsb
();
280
281         if (rxResponse.getOption() == ZBPACKET_ACKNOWLEDGED) {
282             Serial.println(F("ACK"));
283         } else {
284             Serial.println(F("NO ACK"));
285         }
286
287         receiveFrame.deserialize(rxResponse.getData(), rxResponse.
getDataLength());
288         return;
289
290     }
291
292     } else if (xbee.getResponse().isError()) {
293         Serial.print(F("Error code: "));
294         Serial.println(xbee.getResponse().getErrorCode());
295     }
296     if (receiveFrame.getType() != OTHER) {
297         receiveFrame.setType(OTHER);
298     }
299 }
300 }
301
302
303 void sendATCommand(String command) {
304
305     uint8_t commandSplit[2];
306     uint8_t commandValue[1] = {0x0};
307     bool needsValue = false;
308
309     commandSplit[0] = command[0];
310     commandSplit[1] = command[1];
311     Serial.print("\nCommand: ");
312     Serial.print((char)commandSplit[0]);
313     Serial.print((char)commandSplit[1]);
314     Serial.println();
315

```

```
316     if (command.length() > 2) {
317         needsValue = true;
318         String tmp = command.substring(2, command.length());
319         commandValue[0] = (uint8_t) tmp.toInt();
320         command = command.substring( 0, 2 );
321         Serial.print("Command Value: 0x");
322         Serial.print(commandValue[0], HEX);
323         Serial.println();
324     }
325
326
327     //Below we have the request for the AT Command
328     AtCommandRequest atRequest = AtCommandRequest();
329
330     //And here we have the response of the AT Command Request.
331     AtCommandResponse atResponse = AtCommandResponse();
332
333     //Set atRequest's parameters
334     atRequest.setCommand(commandSplit);
335
336     if (needsValue) {
337
338         atRequest.setCommandValue(commandValue);
339         atRequest.setCommandValueLength(sizeof(commandValue));
340
341     }
342
343
344     // send the command
345     xbee.send(atRequest);
346
347     //This while loop will run at most for 5 second from the last
348     //ATCOMMANDRESPONSE we get. If the command is Broadcast Hops it
349     //will take at most 5 seconds for the while to stop.
350     while (1) {
351         // wait up to 5 seconds for the status response.
352         if (xbee.readPacket(4000)) {
353             // got a response!
354
355             // should be an AT command response
```



```

391                                     neighLow += (uint32_t)atResponse.
392         getValue()[i] << (8 * (9 - i));
393     }
394
395     } else if (command == "BH") {
396
397         break;
398
399     } else if (command == "DB") {
400
401         dBmValue = atResponse.getValue()[0];
402
403         break;
404     } else if (command == "SL") {
405
406         break;
407
408     }
409     else if (command == "NI") {
410
411         String id="";
412         for (uint8_t i=0; i<atResponse.
413         getValueLength(); i++) {
414             id += (char)atResponse.getValue()[i];
415         }
416         myID = id.toInt();
417         break;
418     }
419
420
421     } else if (atResponse.getValueLength() == 0) {
422         break;
423     }
424 }
425 else {
426     Serial.print(F("AT Error code: "));
427     Serial.println(atResponse.getStatus(), HEX);
428 }
429 } else {

```

```
430         Serial.print(F("Expected AT, got "));
431         Serial.print(xbee.getResponse().getApiId(), HEX);
432     }
433 } else {
434     // at command failed
435     if (xbee.getResponse().isError()) {
436         Serial.print(F("Error code: "));
437         Serial.println(xbee.getResponse().getErrorCode());
438     }
439     else {
440
441         Serial.println(F("No response from radio"));
442
443         break;
444     }
445 }
446 }
447
448 }
449 }
450
451
452 uint8_t search(uint32_t* arr, uint8_t arrLength, uint32_t key) {
453     for (uint8_t i=0; i<arrLength; i++) {
454         if (arr[i] == key) {
455             return i;
456         }
457     }
458
459     return 255;
460 }
```

