

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τμήμα Πληροφορικής



Πτυχιακή Εργασία

Υλοποίηση Αλγορίθμων Πρόσβασης Μέσου
Ανεξάρτητων της Τοπολογίας σε Ασύρματα Δίκτυα

Αστέριος Παπαμιχαήλ Π2015059

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Κωνσταντίνος Οικονόμου

27 Σεπτεμβρίου 2019

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Δημήτριος Τσουμάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Μιχαήλ Στεφανιδάκης, Επίκουρος Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Αφιέρωση...

Περίληψη

Με το πέρασμα των τελευταίων αιώνων από την απαρχή του ανθρώπου ξεχωρίζει η τάση του για συνεχή ανάπτυξη και εξέλιξη, με αποκορύφωμα του τελευταίους υπήρξε άνθηση στα μεγάλα συστήματα, στην ατμομηχανή, στην πληροφορία και τέλος στο Internet. Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα δημιουργήθηκε ο ορισμός του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων. Επικεντρώνεται κυρίως στην κατανεμημένη και συγχρονισμένη παρακολούθηση των περιβαλλοντολογικών συνθηκών (υγρασία, θερμοκρασία κτλ). Με την καθημερινή χρήση του διαδικτύου και της υποβοηθούμενης καθημερινότητας από το Διαδίκτυο των Πραγμάτων οι απαιτήσεις αυξάνονται σε ατομικό και τεχνολογικό επίπεδο.

Τα Δίκτυα Οχημάτων δημιουργήθηκαν εφαρμόζοντας τις αρχές των κινητών δικτύων στην βιομηχανία των οχημάτων. Τα Δίκτυα Οχημάτων αφορούν εφαρμογές που απευθύνονται στους τομείς της ασφάλειας, της εύρεσης βέλτιστης διαδρομής σε πραγματικό χρόνο και της μεταφοράς πληροφοριών. Οι εφαρμογές ασφάλειας συστήνουν χρονικούς περιορισμούς στο δίκτυο, αυτό επιλύεται μέσω των αλγορίθμων πρόσβασης μέσου που βασίζονται στην διαίρεση χρόνου.

Σε εφαρμογές όπου δεν είναι γνωστή η τοπολογία του δικτύου και υπάρχουν χρονικοί περιορισμοί σε αυτό όπως τα Δίκτυα Οχημάτων και τα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, αυτά σε περιπτώσεις όπου η εγκατάσταση γίνεται με εναέρια μέσα, χρησιμοποιούνται Αλγόριθμοι Πρόσβασης Μέσου που είναι Ανεξάρτητοι της Τοπολογίας. Λόγω της λογικής διαίρεσης χρόνου δεν απαιτείται η ανίχνευση του καναλιού με αποτέλεσμα οι κόμβοι να μένουν για περισσότερο χρόνο ενεργοί.

Abstract

Over the past centuries stands out the tendency of human kind for constant development at many technologies, such as steam engine, electricity, information and finally the Internet. At the beginning of 21st century the Wireless Sensor Network was designated. It is focused on distributed and synchronized monitoring of environmental conditions (i.e. humidity, temperature). With the use of the internet on daily basis and the contribution of Internet of Things the requirements are increasing in individual and technological level.

Vehicular Networks were created utilizing the principles of mobile networks in the automobile industry. Vehicular Networks are related to the fields of safety, of routing in real time and transmitting information. The Safety Applications introduce limitations of time in a network, which can be resolved through the Medium Access Control algorithms, that are based on time division.

In applications like Vehicular Networks and Wireless Sensor Networks, where the topology of the network is unknown and there are time restrictions, in cases that the deployment of the later one is done using aerial means, Medium Access Control algorithms that are independent of the underline topology are employed. Due to the fact that the time is divided the detection of the channel is not required, resulting in the sustainability of the network.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Οικονόμου για όλη την καθοδήγηση που μου παρείχε, για τις ευκαιρίες που μου δόθηκαν κατά την διάρκεια του τελευταίου έτους, καθώς και την εμπιστοσύνη και υπομονή που μου έδειξε κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Επιπλέον, σημαντική συνδρομή κατά τη συγγραφή αποτέλεσαν οι οδηγίες και συμβουλές που προσέφερε ο υποψήφιος διδάκτορας κ. Βασίλειος Δραγώνας, ο οποίος έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην κατεύθυνση της εργασίας. Επίσης η εμπειρία του διδάκτορα κ. Γιώργου Κουφουδάκη έπαιξε καθοριστικό ρόλο, καθώς ήταν πάντα πρόθυμος να ακούσει και να βοηθήσει σε κάθε είδους τεχνικό ζήτημα που προέκυπτε, αλλά και στην υλοποίηση του συγχρονισμού που περιγράφεται. Ο κ. Γεώργιος Τσουμάνης παρείχε αμέτρητες ώρες υποστήριξης και εκμάθησης των εργαλείων και συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Αξίζουν ευχαριστίες σε όλους για τη συμβολή τους και τους είμαι ειλικρινά ευγνώμων.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους συμφοιτητές μου: Αλέξανδρο Ζερβόπουλο, Κωνσταντίνο Μπέζα, Αικατερίνη Γεωργία Αλβάνου, Ανδρεάνα Στυλίδου, Ευγενία Δημητρίου και Σπύρο Βέργη για όλες τις αξέχαστες ώρες συνεργασίας που είχαμε φέτος και χωρίς την αλληλοϋποστήριξη των οποίων, ο τελευταίος χρόνος θα ήταν εξαιρετικά δυσκολότερος.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη που έλαβα κατά την διάρκεια των σπουδών μου, χωρίς την στήριξη της οποίας δεν θα τα είχα καταφέρει.

Τέλος, η εργασία στηρίχθηκε εν μέρει από το έργο «Πιλοτικό Σύστημα Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων Συγχρονισμένης Παρακολούθησης Κλιματολογικών και Εδαφολογικών Παραμέτρων σε Ελαιώνες» το οποίο υλοποιείται στο πλαίσιο του Ε-ΣΠΑ 2014-2020 - Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ιόνια Νησιά 2014-2020».

Περιεχόμενα

A´	Εισαγωγή	1
A´.1	Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων	1
A´.1.1	Έλεγχο Περιβαλλοντολογικών Συνθηκών	2
A´.1.2	Σε βιομηχανικό περιβάλλον	3
A´.2	Δίκτυα οχημάτων	4
A´.3	Η Πολιτική Πρόσβασης	4
A´.4	Δομή	5
B´	Η Πολιτική Πρόσβασης	7
B´.1	Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου	7
B´.2	Πολιτική Πρόσβασης Μέσου Ανεξάρτητου της Τοπολογίας	8
Γ´	Περιγραφή Τλικού	11
Γ´.1	Η πλατφόρμα Arduino	11
Γ´.2	Κεραίες	13
Γ´.3	Η διεπαφή των κεραιών με το Arduino	14
Γ´.3.1	Η Δομή ενός μηνύματος	15
Γ´.3.2	Οι μέθοδοι της βιβλιοθήκης	16
Δ´	Περιγραφή Λογισμικού	19
Δ´.1	Εργαλεία Ανάπτυξης	20
Δ´.2	Ειδή μηνυμάτων	22
Δ´.3	Ο Συγχρονισμός του Δικτύου	22
Δ´.4	Παράμετροι του TDMA	24
Δ´.5	Η Υλοποίηση του TiMAC	24

Περιεχόμενα	v
Ε΄ Πειράματα και Αποτελέσματα	27
Ε΄.1 Μεθοδολογία	27
Ε΄.2 Αποτελέσματα	28
Γ΄ Σύνοψη και Συμπεράσματα	31
Βιβλιογραφία	32
Παραρτήματα	38
Ι Απόδειξη του $\Xi\Xi\Xi\Xi$	39
Πίνακας Δημοσιεύσεων	40
Γλωσσάρι Ξενικών Όρων	41
Συμβολισμοί Μεγεθών	42
Συντομογραφίες	43
Ευρετήριο	44

Κατάλογος Σχημάτων

B'.1	Η δομή ενός TDMA frame με n time slots	8
B'.2	Μία τοπολογία αλυσίδας εννέα κόμβων.	10
B'.3	Η ανάθεση των χρονοθυρίδων με το TDMA και το TiMAC εφαρμόζοντας τους σε τοπολογία του σχήματος B'.2.	10
Γ'.1	Το Arduino Uno Rev. 3	13
Γ'.2	Ο πομπός	14
Γ'.3	Ο δέκτης	14
Γ'.4	Η συνδεσμολογία του Arduino με τις δύο συσκευές τον δέκτη στην μέση και τον πομπό στα δεξιά	14
Γ'.5	Το σύστημα πλήρως συναρμολογημένο αποτελούμενο από το Arduino Uno, τον πομπό πάνω αριστερά, τον δέκτη πάνω δεξιά και την LCD οθόνη κάτω από τα εξαρτήματα	15
Γ'.6	Η Δομή που φτιάχνει η βιβλιοθήκη κατά την αποστολή του μηνύματος. Αρχικά στέλνει μία ακολουθία από 0 και 1 tr_preamble (36 bits) στην συνέχεια στέλνει το start symbol (st_s) μεγέθους 12 bit στην συνέχεια το μέγεθος του μηνύματος (8 bit), το μήνυμα όπου το μέγεθος του καθορίζεται από τον προγραμματιστή και τέλος το FCS (12 bit)	16
Δ'.1	Το γραφικό περιβάλλον του Arduino IDE	21

Δ'.2	Απεικόνιση του μηχανισμού συγχρονισμού εντός της περιόδου συγχρονισμού st , μεταξύ των κόμβων r , u και v συνδεδεμένους σε τοπολογία αλυσίδας. Οι κόμβοι περιμένουν για ορισμένο χρόνο (π.χ., t_{dr} , t_{du} ανδ t_{dv} αντίστοιχα) πριν την μεταδώσουν τον χρόνο που απομένει για την αρχή του frame (π.χ., t_0 , t_1 ανδ t_2 αντίστοιχα). Επίσης απεικονίζονται τα εσωτερικά ρολόγια των κόμβων (c_u , c_v) μαζί με την διάρκεια αποστολής του μηνύματος συγχρονισμού t_{tx}	23
Δ'.3	Η απεικόνιση του υλοποιημένου TDMA frame. Με κάθε timeslot (ts_i) να τελειώνει με guard period (t_g). Επίσης στο σχήμα απεικονίζεται ο χρόνος συγχρονισμού (st) και το frame guard period (t_{fg})	25
Δ'.4	Πλήρη τοπολογία 5 κόμβων	25
Ε'.1	Το throughput συναρτήσει των διαφόρων ομάδων από πολυώνυμα. Σε όλες τις περιπτώσεις βρίσκεται μεταξύ της μέγιστης 0.2 και ελάχιστης 0.04 τιμής.	29
Ε'.2	Ο Μέσος Αριθμός Επιτυχημένων Μεταδόσεων ανά κόμβο ανά frame συναρτήσει των διαφόρων ομάδων από πολυώνυμα. Σε όλες τις περιπτώσεις βρίσκεται μεταξύ της μέγιστης 5 και ελάχιστης 1 τιμής.	30

Κατάλογος Πινάκων

Κατάλογος Αλγορίθμων

1	Ο Αλγόριθμος των Chlámtac-Farago (GRAND)	9
---	--	---

Κεφάλαιο Α΄

Εισαγωγή

ΜΕ το πέρασμα των τελευταίων αιώνων από την απαρχή του ανθρώπου ξεχωρίζει η τάση του για συνεχή ανάπτυξη και εξέλιξη, με αποκορύφωμα τους τελευταίους, όπου ευδοκίμησε η άνθηση των τεχνολογιών. Αν ξεκινήσει κάποιος από τον 18^ο θα αντιληφθεί ότι κάθε αιώνας από τότε κυριαρχήθηκε και από μία τεχνολογία. Αρχικά ξεκίνησε από τα μεγάλα μηχανικά συστήματα που έφεραν τη Βιομηχανική Επανάσταση. Ο 19^{ος} αιώνας ήταν η εποχή της ατμομηχανής. Στην συνέχεια ακολούθησε η ‘πρωταρχική’ εποχή της πληροφορίας καθώς ξεκίνησε η συλλογή, η επεξεργασία και η διανομή της, μέσω των πολέμων. Επίσης στον 20^ο αιώνα υπήρχε και εξέλιξη των τεχνολογιών στον τομέα των δικτύων καθώς εγκαθιδρύθηκε το πρώτο παγκόσμιο τηλεφωνικό δίκτυο. Μεταξύ τους ακολούθησε η τηλεόραση, το ραδιόφωνο, η ανάπτυξη της βιομηχανίας των υπολογιστών και φυσικά το διαδίκτυο. Κάθε ένα από τα παραπάνω διαδραμάτισε έναν μοναδικό ρόλο στην διαμόρφωση της σύγχρονης εποχής της πληροφορίας με την συνύπαρξή της με το διαδίκτυο, στον 21^ο αιώνα.

Α΄.1 Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Επιπλέον στις αρχές του 21^{ου} αιώνα διατυπώθηκε από τον Akyildiz και τους υπολοίπους [1] το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων¹ (Wireless Sensor Network). Το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων επικεντρώνεται στην παρακολούθηση των περιβαλλοντολογικών συνθηκών, όπως την θερμοκρασία, την υγρασία, την ατμοσφαιρική πίεση κτλ. Για

¹στο εξής το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων θα αναφέρεται ως: WSN

αυτήν την παρακολούθηση συνεργάζονται αναμεταξύ τους, ένας μεγάλος αριθμός από αισθητήριες συσκευές, προκειμένου να μεταδοθεί η πληροφορία από το δίκτυο αισθητήρων στο διαδίκτυο μέσω του gateway κόμβου. Οι εφαρμογές των WSNs περιέχουν έλεγχο περιβαλλοντολογικών συνθηκών, εμπορικές ή ανθρωπιστικές εφαρμογές, καθώς και εφαρμογές στην ρομποτική [2].

Α΄.1.1 Έλεγχος Περιβαλλοντολογικών Συνθηκών

Ο έλεγχος περιβαλλοντολογικών συνθηκών μπορεί να διεξαχθεί σε εσωτερικό χώρο όπου χρησιμοποιείται για έλεγχο του περιβάλλοντος και για υπηρεσίες εκτατής ανάγκης. Επίσης μπορεί να διεξαχθεί και σε εξωτερικό χώρο που περιλαμβάνει έλεγχο βιοτόπων και της γεωργίας.

Όσο αφορά τους εσωτερικούς χώρους, τα WSNs μπορούν να βελτιώσουν την κατανάλωση ενέργειας ενός κτηρίου χρησιμοποιώντας αισθητήριες συσκευές που ελέγχουν τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες, πιο συγκεκριμένα μπορούν να μετρήσουν:

- θερμοκρασία,
- σχετική υγρασία,
- φως,
- κατάσταση των πλαισίων (σε πόρτες και παράθυρα),
- ρεύματα αέρα,
- και την ρύπανση αέρα.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω πληροφορίες είναι δυνατή η βελτιστοποίηση του ελέγχου του εσωτερικού περιβάλλοντος. Επιπλέον σπαταλώνται μεγάλα πόσα ενέργειας με αχρείαστη ψύξη ή θέρμανση των κτιρίων. Οι αισθητήριες συσκευές μπορούν να ελέγχουν τον απαραίτητο εξοπλισμό με ορθό και οικονομικό τρόπο, που αποσκοπεί σε ένα υγιεινό περιβάλλον και σε μεγαλύτερο επίπεδο άνεσης για τους χρήστες του κτηρίου.

Στα μεγάλα κτήρια υπάρχουν αισθητήρες καπνού και φωτιάς προκειμένου να προειδοποιήσουν τους ανθρώπους για φωτιά. Επιπλέον υπάρχουν φωτεινές ενδείξεις προς τις εξόδους. Αυτά τα δύο συστήματα δεν επικοινωνούν με αποτέλεσμα οι φωτεινές ενδείξεις να μην δείχνουν την πιο ασφαλή διαδρομή προς την έξοδο. Εδώ είναι που παίρνουν

μέρος τα WSNs γιατί μπορούν να καθοδηγούν τους ανθρώπους από την ασφαλέστερη διαδρομή έχοντας υπόψιν, τους χώρους που υπάρχει φωτιά ή υψηλό ποσοστό διοξειδίου του άνθρακα.

Στη βιβλιογραφία υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από δημοσιεύσεις πάνω στην παρακολούθηση βιοτόπων. Μία δουλειά που διακρίθηκε είναι αυτή του Mainwaring και των υπόλοιπων [3], που δημιούργησαν ένα WSN στο Great Duck Island τριάντα δύο κόμβων. Η παραπάνω είχε στόχο την παρακολούθηση του φυσικού περιβάλλοντος ενός είδους πτηνού και πως οι κλιματικές αλλαγές το επηρεάζουν.

Οι ερευνητές από το πανεπιστήμιο της Χαβάης [4] επικεντρώθηκαν στο Εθνικό Πάρκο Ηφαιστίων για την εύρεση των λόγων, γιατί κάποια ήδη ζώη μπορούν να υπάρξουν μόνο σε μία συγκεκριμένη περιοχή. Κάθε αισθητήρια συσκευή του WSN παίρνει μετρήσεις της υγρασίας, της θερμοκρασίας, του φωτός και της κατεύθυνσης του ανέμου, μερικές από αυτές είναι εξοπλισμένες με κάμερες υψηλής ανάλυσης. Το χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου δικτύου είναι ότι έχει χωριστεί σε δύο υποδίκτυα όπου, το πρώτο είναι στην περιοχή παρακολούθησης και το δεύτερο χρησιμεύει ως σύνδεσμος προς τον gateway κόμβο.

Ένας ακόμα τομέας δραστηριότητας των WSNs με πολλές προτάσεις από την επιστημονική κοινότητα είναι και αυτή της γεωργίας, για την βελτίωση της απόδοσης και της ανάπτυξης καλλιεργειών.

Α΄.1.2 Σε βιομηχανικό περιβάλλον

Η εταιρία British Petroleum (BP) και η Accenture Technology Labs χρηματοδότησαν έρευνα για να επιλύσουν το πρόβλημα που έχει η πρώτη με την παρακολούθηση των αποθεμάτων, πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζουν όλες οι εταιρίες ανεξαρτήτου μεγέθους, πόσο μάλλον και πολυεθνικές. Η επίλυση του προβλήματος αφορά την παρακολούθηση των κέντρων διανομής και αποθήκευσης βαρελιών, μέσω αισθητήρων που βρίσκονται πάνω στα βαρέλια. Οι ενέργειες που εκτελούν οι αισθητήρες είναι η ανίχνευση του περιεχομένου των βαρελιών και ο έλεγχος της συμβατότητας με αυτά.

Μία ακόμα εφαρμογή που αναπτύχθηκε από αυτούς χρησιμοποιώντας WSNs, αφορούσε την παρακολούθηση του στόλου της BP. Ειδικότερα η ανίχνευση των φορτηγών και των σιδηροδρομικών οχημάτων της και η παρακολούθηση των παραμέτρων σχετικά με τα μεταφερόμενα εμπορεύματα έγινε δυνατή μέσω των κόμβων και του συστήματος GPS.

Α΄.2 Δίκτυα οχημάτων

Πλέον, στα πλαίσια της απόλυτης κυριαρχίας του διαδικτύου στο καθημερινό βίο ανά τον κόσμο και της υποβοηθούμενης δράσης του ανθρώπου μέσω, του Διαδικτύου των Πραγμάτων, οι απαιτήσεις σε ατομικό και τεχνολογικό επίπεδο, αλλά και η διαρκής ανάγκη για λύσεις ολοένα και αυξάνονται. Σε ότι αφορά το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, λόγω του μεγάλου αριθμού συσκευών και χρηστών που το κατακλύζουν (αναμένεται να φτάσει τις 25 δισεκατομμύρια συσκευές μέχρι το 2020 [5]), έτσι απαιτείται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση λύσεων, σε τέτοιου είδους περιβάλλοντα, με απώτερο στόχο την μείωση του κόστους και των ποσών ενέργειας που καταναλώνουν. Ένας κρίσιμος παράγοντας για την επιτυχία και την καθιέρωση αυτών είναι η δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας σε συνδυασμό με χρονικούς περιορισμούς, σε περιπτώσεις εφαρμογών ασφάλειας σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπως τα Δίκτυα Οχημάτων[6].

Τα Δίκτυα Οχημάτων ή αλλιώς VANETs² (Vehicular ad hoc Networks) δημιουργήθηκαν εφαρμόζοντας τις αρχές των κινητών δικτύων στην βιομηχανία των οχημάτων. Τα VANETs αφορούν εφαρμογές που απευθύνονται στους τομείς της ασφάλειας, της εύρεσης βέλτιστης διαδρομής σε πραγματικό χρόνο και της μεταφοράς πληροφοριών όπως για παράδειγμα εξ αποστάσεως παρακολούθηση για την ορθή λειτουργία ενός οχήματος καθώς και την αντιμετώπιση προβλημάτων. Οι εφαρμογές ασφάλειας προσθέτουν μία χρονική πολυπλοκότητα στο δίκτυο που επιλύεται από αλγόριθμους πρόσβασης μέσου και πιο συγκεκριμένα από αυτούς που βασίζονται στη διαίρεση χρόνου.

Α΄.3 Η Πολιτική Πρόσβασης

Λόγο των χρονικών περιορισμών της ασύρματης επικοινωνίας καθώς και της δυναμικότητας της τοπολογίας στις προαναφερόμενες περιπτώσεις, είναι συνετό να χρησιμοποιηθεί αλγόριθμος Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου³ (Time Division Multiple Access) αντί για αλγόριθμους που βασίζονται στην σύνδεση όπως το (Carrier Sense Multiple Access - CSMA). Πιο συγκεκριμένα σε εφαρμογές που σχετίζονται με την άμεση ανίχνευση πύρινου μετώπου σε δασικές περιοχές [7] που είναι αδύνατη η πρόσβαση με επίγεια μέσα για την εγκατάσταση των κόμβων του WSN, δεν είναι εύκολη η εκτίμηση των παραμέτρων του δικτύου που καθορίζουν τον αλγόριθμο πρόσβασης

²έτσι θα αναφέρονται παρακάτω

³ο αλγόριθμος Πολλαπλής Πρόσβασης Διαίρεσης Χρόνου θα αναγράφεται ως: TDMA

μέσου.

Χρησιμοποιώντας TDMA λογική δεν είναι απαραίτητη η ανίχνευση του καναλιού επικοινωνίας πριν την μετάδοση του μηνύματος έχοντας ωστόσο θετική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας. Επίσης η ντετερμινιστική φύση της, εγγυάται την απόδοση του αλγορίθμου. Αντιθέτως μία τέτοια λογική έχει τις δυσκολίες της όπου είναι η πραγματοποίηση συγχρονισμού αναμεταξύ των κόμβων καθώς και το χρονικό διάστημα αναμεταξύ τους και αυτό διότι τα ρολόγια από την φύση τους αποκλίνουν [8][9]. Επίσης ένα ακόμα πρόβλημα το οποίο πρέπει να επιλυθεί είναι η ανάθεση των χρονοθυρίδων.

Ένα πρόβλημα που δεν αντιμετωπίζεται από τέτοιου είδους αλγόριθμους είναι η δυναμικότητα του δικτύου. Για παράδειγμα σε ένα Δίκτυο Οχημάτων όπου γίνονται συνέχεια αλλαγές στην τοπολογία του, παραδείγματος χάριν προσθήκη νέου κόμβου, πρέπει να αυξηθούν οι χρονοθυρίδες και να γίνει καινούρια ανάθεσή τους που προσθέτει περισσότερη κινητικότητα στο δίκτυο. Για αυτό τον λόγο είναι συνετή η χρήση μίας Πολιτικής Πρόσβασης Μέσου που είναι Ανεξάρτητης της Τοπολογίας ⁴ (Topology independent Medium Access Control) του δικτύου. Το TiMAC εγγυάται τουλάχιστον μία επιτυχημένη μετάδοση ανά πλαίσιο, γνωρίζοντας μόνο μερικές παραμέτρους από το δίκτυο, περισσότερα στο Κεφάλαιο Β΄.

Για την υλοποίηση της παραπάνω πολιτικής χρησιμοποιήθηκαν συσκευές μικρού κόστους όπως τα Arduino, σε συνδυασμό με RF κεραίες που μεταδίδουν στα 433MHz που είναι κατάλληλες για υλοποίηση αλγορίθμων πρόσβασης μέσου, καθώς δεν υπάρχει υλοποιημένη κάποια τέτοια λογική να τις χρησιμοποιεί.

Α΄.4 Δομή

Η δομή της παρούσας διατριβής έχει ως εξής: Στο Κεφάλαιο Β΄ παρουσιάζεται αναλυτικά το TDMA που βασίζεται σε αυτό το TiMAC. Επίσης γίνεται εκτενής περιγραφή του TiMAC σε αυτό το κεφάλαιο. Στο Κεφάλαιο Γ΄ περιγράφονται τα διάφορα εξαρτήματα του συστήματος, η διεπαφή που έχουν με το βασικό εξάρτημα της παρούσας διατριβής το Arduino. Στην συνέχεια ακολουθεί το Κεφάλαιο Δ΄ που περιέχει τα εργαλεία ανάπτυξης που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα, τα μηνύματα που κατασκευάστηκαν, η διαδικασία του συγχρονισμού των κόμβων, καθώς και τους παραμέτρους με τους οποίους χρησιμοποιείται το TDMA. Στο Κεφάλαιο Ε΄ γίνεται αναφορά στα πειράματα που

⁴ στο εξής η Πολιτική Πρόσβασης Μέσου Ανεξάρτητου της Τοπολογίας θα αναγράφεται ως: TiMAC

πραγματοποιήθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα που βρέθηκαν. Τέλος στο Κεφάλαιο Γ΄ γίνεται η σύνοψη του περιεχομένου της εργασίας αλλά και πιθανές βελτιώσεις που μπορεί να γίνουν στο μέλλον.

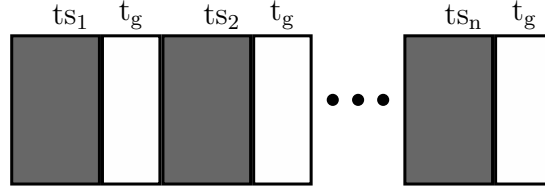
Κεφάλαιο Β΄

Η Πολιτική Πρόσβασης

Σε όλους τους τύπους των δικτύων είναι απαραίτητος ο Έλεγχος Προσπέλασης Μέσου Medium Access Control (MAC) για την ορθή μετάδοση πληροφορίας. Το MAC βρίσκεται μαζί με το Στρώμα Σύνδεσης Δεδομένων Data Link Layer στο δεύτερο επίπεδο της στοίβας πρωτοκόλλων OSI. Για να υπάρξει ορθή μετάδοση πληροφορίας πρέπει να μην υπάρχουν ταυτόχρονες μεταδόσεις πακέτων σε κεραίες παραληπτών, αυτές ορίζονται ως συγκρούσεις στο κανάλι επικοινωνίας. Στον ασύρματο κόσμο των δικτύων υπάρχει μεγάλος αριθμός από ερευνητικές προσπάθειες [10, 11, 12, 13] για την εύρεση κατάλληλου πρωτοκόλλου πρόσβασης μέσου. Η συγκεκριμένη διατριβή επικεντρώνεται στο TiMAC όπου βασίζεται TDMA.

Β΄.1 Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρόνου

Το TDMA είναι ένα πρωτόκολλο που δίνει πρόσβαση στο ίδιο κανάλι επικοινωνίας (ίδια συχνότητα) σε πολλαπλούς χρήστες, διαιρώντας τον χρόνο σε πλαίσια(frames) και αυτά σε χρονοθυρίδες ή αλλιώς time slots. Τα frames αποτελούνται από έναν σταθερό αριθμό από time slots όπου και αυτά έχουν σταθερή διάρκεια. Αναμεταξύ των time slots υπάρχει μία διάρκεια όπου κανένας κόμβος δεν επιτρέπεται να μεταδώσει, αυτή η διάρκεια ονομάζεται guard period. Το Σχήμα Β΄.1 παρουσιάζει την δομή ενός TDMA frame με n time slots (ts_i), επίσης παρατηρούνται και τα guard periods (t_g) που βρίσκονται μετά από κάθε time slot.



Σχήμα Β'.1: Η δομή ενός TDMA frame με n time slots

Β'.2 Πολιτική Πρόσβασης Μέσου Ανεξάρτητου της Τοπολογίας

Η πολιτική πρόσβασης που υλοποιήθηκε στην παρούσα πτυχιακή, χρησιμοποιεί μερικές παραδοχές που έχουν να κάνουν με την τοπολογία του δικτύου. Οι παραδοχές που κάνει το συγκεκριμένο πρωτόκολλο έχει να κάνει με τον αριθμό των κόμβων στο δίκτυο (που συμβολίζεται με N), καθώς και τον μέγιστο αριθμό γειτόνων που μπορεί να έχει ένας κόμβος στο δίκτυο (που συμβολίζεται με D).

Το TiMAC βασίζεται στο TDMA που έχει σταθερό μέγεθος πλαισίου και η διάρκεια μίας χρονοθυρίδας αρκεί για την αποστολή ενός πακέτου δεδομένων. Σε κάθε κόμβο έχει ανατεθεί ένα σύνολο από χρονοθυρίδες, σύμφωνα με ένα αυθαίρετα επιλεγμένο πολυώνυμο από τα πεδία Γκαλουά. Το παραπάνω σύνολο είναι μοναδικό για κάθε κόμβο, που εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος μεταδίδει σύμφωνα με ένα μοναδικό μοτίβο που επαναλαμβάνεται. Επιπρόσθετα αυτή η μοναδικότητα εγγυάται τουλάχιστον μία επιτυχημένη μετάδοση ανά πλαίσιο ακόμα και αν το φορτίο του δικτύου είναι αυξημένο, δηλαδή κάθε κόμβος έχει πάντα πακέτο προς αποστολή.

Ο αλγόριθμος των Chlámtac-Farago [14] χρησιμοποιώντας τις δύο προαναφερθείσες παραμέτρους εξάγει άλλες δύο που είναι η παράμετρος q που σχετίζεται με το μέγεθος του πλαισίου, καθώς και η παράμετρος k που είναι ο βαθμός των Γκαλουά πολυωνύμων της τάξης q . Ειδικότερα το μέγεθος του πλαισίου είναι ίσο με q^2 , δηλαδή αποτελείται από q^2 χρονοθυρίδες, όπου μπορεί να χωριστεί σε q υποπλάισια των q χρονοθυρίδων το καθένα. Σε κάθε κόμβο ανατίθεται και μία θυρίδα από κάθε υποπλάισιο ενός πλαισίου για αυτό και κάθε κόμβος μεταδίδει σε q θυρίδες ανά πλαίσιο.

Δεδομένου του υπολογισμού των δύο παραμέτρων είναι δυνατών να εξαχθούν οι δείκτες των χρονοθυρίδων που θα επιτρέπεται η μετάδοση για κάθε κόμβο v . Για αυτό σε κάθε κόμβο v ανατίθεται ένα πολυώνυμο βαθμού k με συντελεστές από πεπερασμένο

πεδίο Γκαλουά τάξης q ($GF(q)$) που αντιπροσωπεύεται ως: $f_u(x) = \sum_{i=0}^k a_i x^i$, όπου $a_i \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$. Αυτό όμως προσθέτει και τον περιορισμό που είναι ότι ο αριθμός των διαθέσιμων πολυωνύμων πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον μέγιστο αριθμό κόμβων στο δίκτυο ($q^{k+1} \geq N$). Η θυρίδα του υποπλαισίου που επιτρέπεται η μετάδοση για κάθε κόμβο u υπολογίζεται από τον τύπο: $f_u(s) \bmod q$, όπου το $s \in \{0, 1, 2, \dots, q-1\}$ και είναι ο δείκτης του υποπλαισίου.

Algorithm 1: Ο Αλγόριθμος των Chlámtac-Farago (GRAND)

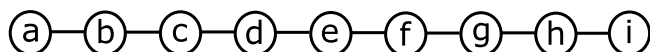
```

1  $i = 0$ ;
2 repeat
3    $i = i + 1$ ;
4    $q = i$ ;
5    $k = \lfloor (q - 1) / D \rfloor$ ;
6 until ( $k \geq 1$  and  $q^{k+1} \geq N$ );
7 for all nodes  $v \in V$  do
8    $S(v) = \emptyset$ ;
9   Επέλεξε ένα μοναδικό πολυώνυμο  $a_v$  για τον κόμβο  $v$ ;
10  for  $i = 0$  to  $q - 1$  do
11     $slot(i) = \sum_{l=0}^{k-1} a_l i^l \bmod q$ ; /* υπολογισμός του index του subframe
      */
12     $S(v) = S(v) \cup \{iq + slot(i) + 1\}$ ; /* υπολογισμός του global index
      του timeslot */

```

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η παρόν πολιτική πρόσβασης μέσου εγγυάται τουλάχιστον μία επιτυχημένη μετάδοση ανά πλαίσιο, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η κινητικότητα του δικτύου είναι υψηλή, λόγω χάριν κάθε κόμβος έχει πάντα δεδομένα προς αποστολή. Από την στιγμή που κάθε κόμβος μεταδίδει σύμφωνα με το πολυώνυμο βαθμού k που του έχει ανατεθεί τότε, υπάρχουν το πολύ k ταυτόχρονες μεταδόσεις με κάποιον γείτονα, που σημαίνει ότι θα γίνουν συγκρούσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί δύο πολυώνυμα βαθμού k έχουν k το πολύ κοινές ρίζες. Δεδομένου του μέγιστου αριθμού των γειτόνων ενός κόμβου στο δίκτυο D και ότι υπάρχουν το πολύ k κοινές μεταδόσεις αναμεταξύ δύο κόμβων, συνεπάγεται η ύπαρξη kD συγκρούσεων. Από τα παραπάνω, για να είναι μία μετάδοση επιτυχής θα πρέπει ο αριθμός των μεταδόσεων ενός κόμβου

σε ένα πλαίσιο να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των συγκρούσεων σε ένα πλαίσιο ($q \geq kD + 1$). Και οι δύο προϋποθέσεις επιτεύχθηκαν από τον αλγόριθμο μέσω του υπολογισμού των δύο νέων παραμέτρων του δικτύου.



Σχήμα Β'.2: Μία τοπολογία αλυσίδας εννέα κόμβων.

Standard TDMA Frames											TiMAC TDMA Frame								
Nodes	0	1	2	0	1	2	0	1	2	Polynomials	Subframe 0			Subframe 1			Subframe 2		
											0	1	2	0	1	2	0	1	2
a	x			x			x			$0x+0$	x			x			x		
b		x			x			x		$0x+1$		x			x			x	
c			x			x			x	$0x+2$			x			x			x
d	x			x			x			$1x+0$	x				x				x
e		x			x			x		$1x+1$		x				x	x		
f			x			x			x	$1x+2$			x	x				x	
g	x			x			x			$2x+0$	x					x		x	
h		x			x			x		$2x+1$		x		x					x
i			x			x			x	$2x+2$			x		x		x		

Σχήμα Β'.3: Η ανάθεση των χρονοθυρίδων με το TDMA και το TiMAC εφαρμόζοντας τους σε τοπολογία του σχήματος Β'.2.

Από την τοπολογία του σχήματος Β'.2 παρατηρείται ότι, ο αριθμός γειτόνων στο δίκτυο ($D = 2$) και αυτό διότι η τοπολογία είναι αλυσίδα. Επίσης από το σχήμα φαίνεται και ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο ($N = 9$). Γνωρίζοντας τα παραπάνω είναι εφικτός ο υπολογισμός του βαθμού k των Γκαλουά πολυωνύμων καθώς και η τάξη q αυτών. Από το πρώτο κομμάτι του αλγορίθμου προκύπτει ότι η τάξη των πολυωνύμων είναι ίση με 3, που σημαίνει ότι ο αριθμός των subframes είναι ίσος με 3 όπου το καθένα περιέχει 3 time slots, με αυτά υπολογίζεται το μέγεθος του frame που είναι 9 (ο αριθμός των time slots * τον αριθμό των subframes ή αλλιώς q^2). Στην συνέχεια, γίνεται αυθαίρετα η ανάθεση των πολυωνύμων στους κόμβους. Τέλος, οι κόμβοι υπολογίζουν το index του timeslot που τους επιτρέπεται η μετάδοση δίνοντας ως είσοδο, το index του subframe που βρίσκεται το δίκτυο, στο πολυώνυμο που τους ανατέθηκε.

Κεφάλαιο Γ΄

Περιγραφή Υλικού

Για την υλοποίηση της πολιτικής πρόσβασης και την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι απαραίτητη κατασκευή ενός ασύρματου δικτύου. Κάθε κόμβος στο δίκτυο απαρτίζεται από ένα Arduino Uno Rev. 3 [15], από έναν RF receiver RWS-371 [16] που λειτουργεί στα 433 MHz καθώς και έναν RF transmitter TWS-BS [17] που όμοιος λειτουργεί στα 433 MHz. Οι προδιαγραφές τους και τα οφέλη που προσφέρει το καθένα από αυτά, παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Επίσης παρουσιάζεται και η διεπαφή των δύο κεραιών με το Arduino.

Γ΄.1 Η πλατφόρμα Arduino

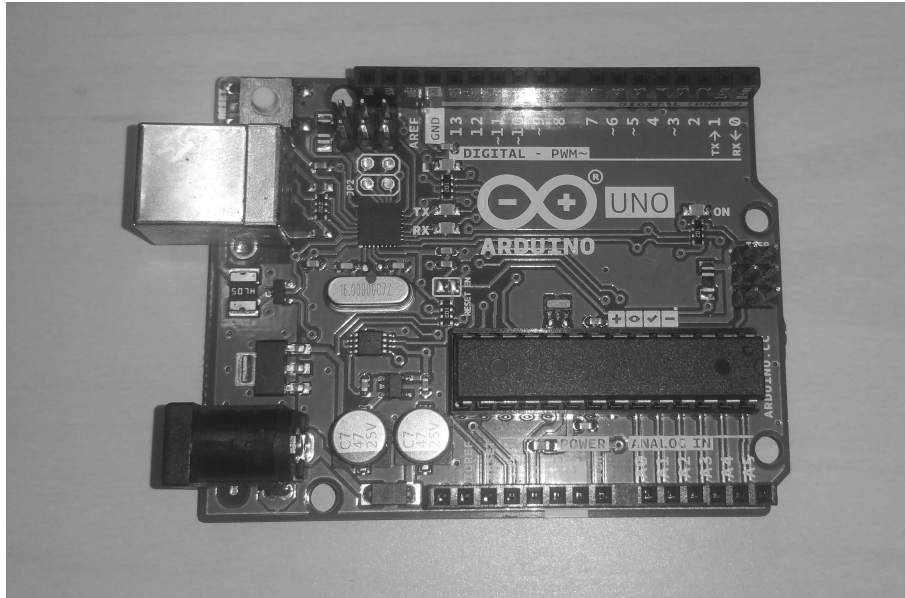
Τα Arduino είναι μία πλατφόρμα που στηρίζεται τόσο σε προσβάσιμο και φθηνό υλικό όσο και λογισμικό, που αποσκοπεί στην αλληλεπίδραση των χρηστών με το φυσικό περιβάλλον. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά οδήγησαν στην ευρεία χρήση τους στην εκπαίδευση καθώς και σε αμέτρητα πρότζεκτ διαφορετικής δυσκολίας και πολυπλοκότητας. Η πλατφόρμα των Arduino βασίζεται στην ιδέα του ανοιχτού λογισμικού και υλικού δηλαδή ότι μπορεί να γίνει επαναχρησιμοποίηση του υλικού και του λογισμικού που έχει χρησιμοποιηθεί σε άλλο project εφόσον δημοσιευθεί με τον ίδιο τρόπο σε ανοιχτή πλατφόρμα. Αυτό έχει συμβάλει στην δημιουργία μίας μεγάλης κοινότητας που είναι ανοιχτή σε προβλήματα στο υλικό όσο και στο λογισμικό που μπορεί να έχει κάποιος χρήστης.

Η πλατφόρμα του Arduino χαρακτηρίζεται από τη γκάμα συσκευών που την απαρτίζει καθώς και την υποστήριξη που έχει με ένα πλήθος από εξαρτήματα όπως:

αισθητήρες, κινητήρες, κεραίες, κτλ. Η επεξεργασία των πληροφοριών και ο έλεγχος των εξαρτημάτων πραγματοποιείται μέσω του μικροελεγκτή που βρίσκεται πάνω στην πλακέτα, σε αυτήν υπάρχουν συγκολλημένα pins όπου δίνουν την δυνατότητα διασύνδεσης του μικροελεγκτή με τα εξαρτήματα. Επίσης τα pins χρησιμοποιούνται για την μεταφορά σημάτων αναλογικών ή ψηφιακών ως είσοδο ή έξοδο, καθώς και για σειριακή επικοινωνία μεταξύ συσκευών. Σε περιπτώσεις όπου τα συγκολλημένα pins δεν αρκούν για τα modules μίας εφαρμογής χρησιμοποιούνται breadboards για την σύνδεση αυτών στο Arduino.

Εκτός από το υλικό της πλατφόρμας ένα μεγάλο κομμάτι αυτής είναι το λογισμικό που έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι φιλικό προς τον χρήστη, ακόμα και σε αυτόν που δεν είναι εξοικειωμένος με τον χώρο των ηλεκτρονικών ή του προγραμματισμού. Η γλώσσα προγραμματισμού των Arduino είναι βασισμένη πάνω στις γλώσσες C και C++, αναμενόμενο, λόγω των περιορισμών που εισάγει το υλικό, για αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η σωστή διαχείριση του υλικού (των πόρων) στο επίπεδο της εφαρμογής, που την πραγματοποιεί ο προγραμματιστής. Δύσκολη θα ήταν άλλη επιλογή εφόσον οι παραπάνω γλώσσες προγραμματισμού είναι ευρέως διαδεδομένες για την διαχείριση πόρων και λειτουργικότητας στα λειτουργικά συστήματα και στα ενσωματωμένα συστήματα.

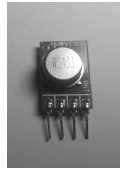
Ο κώδικας που έχει αναπτυχθεί από τον προγραμματιστή πρέπει να περάσει από έλεγχο για συντακτικά λάθη, το πρόγραμμα που είναι υπεύθυνο για αυτήν την λειτουργία λέγεται μεταγλωττιστής. Μία ακόμα λειτουργία που είναι υπεύθυνος ο μεταγλωττιστής είναι η δημιουργία του εκτελέσιμου αρχείου, που μεταφέρεται στο Arduino μέσω σειριακής επικοινωνίας. Το εκτελέσιμο αποθηκεύεται πλέον στην μνήμη flash ώστε να εκτελεστεί από τον μικροελεγκτή που βρίσκεται πάνω στην πλακέτα του Arduino. Τα προσωρινά δεδομένα του προγράμματος αποθηκεύονται την στατική μνήμη τυχαίας προσπέλασης SRAM. Εκτός από αυτούς τους δύο τύπους μνήμης η πλατφόρμα διαθέτει και ακόμα έναν τύπο μνήμης τον EEPROM που είναι non-volatile μνήμη που σημαίνει ότι οι πληροφορίες που γράφονται εκεί μένουν και μετά την απενεργοποίηση της πλακέτας, εν αντιθέσει της SRAM που είναι volatile μνήμη και τα δεδομένα που βρίσκονται εκεί κατά την απενεργοποίηση της συσκευής σβήνονται. Στην παρούσα διατριβή έγινε χρήση του Arduino Uno Rev. 3, (απεικονίζεται στο σχήμα Γ'.1) που έχει τον ATMEL ATMEGA328 μικροελεγκτή με 2KB SRAM, 16MHz ρολόι, 32KB Flash memory και 1KB EEPROM.



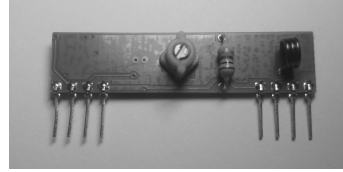
Σχήμα Γ'.1: Το Arduino Uno Rev. 3

Γ'.2 Κεραίες

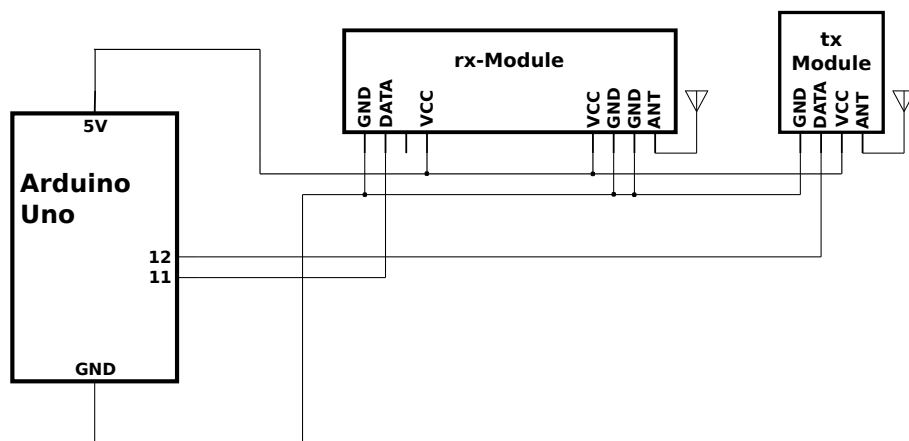
Οι κεραίες που χρησιμοποιήθηκαν για την ασύρματη επικοινωνία μικρής εμβέλειας των Arduino κάνουν χρήση της Βιομηχανικής, Επιστημονικής και Ιατρικής μπάντας (Industrial, Scientific and Medical - ISM) που εκπέμπει στο εύρος: 433.050 - 434.790 MHz. Δύο διαφορετικά εξαρτήματα χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη της ασύρματης επικοινωνίας ένα για τη μετάδοση (transmission - Tx) των πακέτων και ένα άλλο για την λήψη (reception - Rx) αυτών, ειδικότερα το TWS-BS-V1.0.3 [17] και το RWS-371-V1.0.3 [16] αντίστοιχα. Στο σχήμα Γ'.2 απεικονίζεται ο πομπός, αυτός που μεταδίδει τα πακέτα και στο σχήμα Γ'.3 απεικονίζεται ο δέκτης των πακέτων. όπως παρατηρείται από τις εικόνες δεν υπάρχει κάποια έτοιμη διεπαφή για να συνδεθούν στο Arduino, για αυτό πρέπει να συνδεθούν μέσω του breadboard σε αυτό. Στο σχήμα Γ'.4 απεικονίζεται σχηματικά η συνδεσμολογία που ακολουθήθηκε για την παρούσα διατριβή και στο σχήμα Γ'.5 απεικονίζεται ένας κόμβος πλήρως συναρμολογημένος. Στο σχήμα Γ'.5 επίσης παρατηρείται και μία LCD οθόνη (Liquid Crystal Display) που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας του συστήματος.



Σχήμα Γ'.2: Ο πομπός



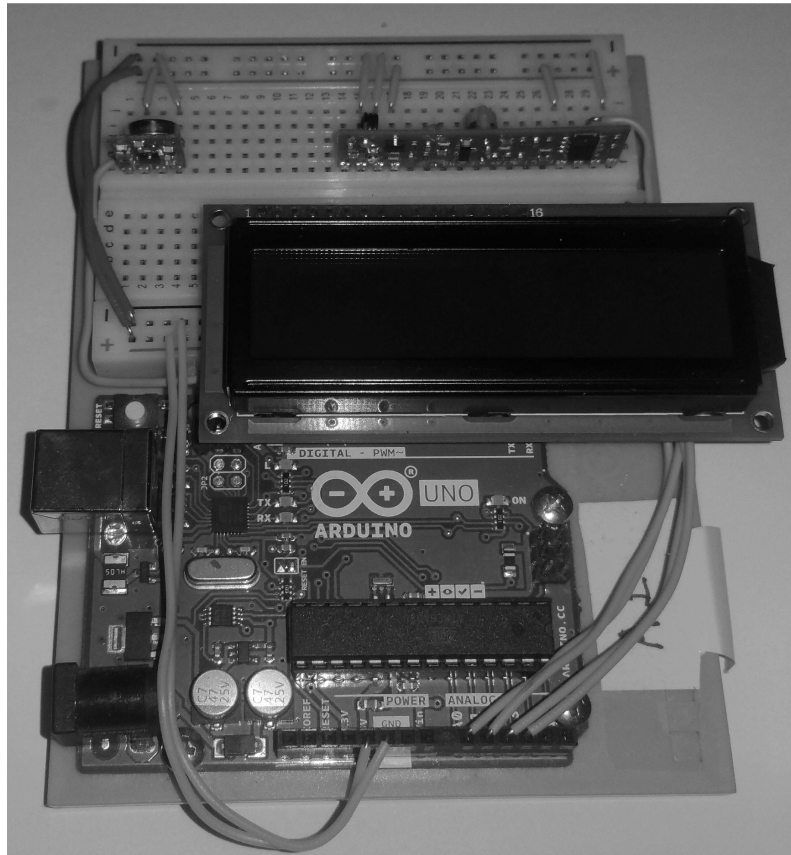
Σχήμα Γ'.3: Ο δέκτης



Σχήμα Γ'.4: Η συνδεσμολογία του Arduino με τις δύο συσκευές τον δέκτη στην μέση και τον πομπό στα δεξιά

Γ'.3 Η διεπαφή των κεραιών με το Arduino

VirtualWire [18] είναι μία βιβλιοθήκη για Arduino που δίνει την δυνατότητα αποστολής μικρών μηνυμάτων χωρίς διευθυνσιοδότηση, αναμεταδόσεις ή εγγύηση ορθής μετάδοσης στην πλευρά του αποστολέα, όλα αυτά χρησιμοποιώντας ASK (Amplitude Shift Keying). Η βιβλιοθήκη υποστηρίζει μία μεγάλη ομάδα από φθηνούς πομπούς και δέκτες συμπεριλαμβανομένων και των [16] [17]. Τα μηνύματα στέλνονται με μία ακολουθία από 0 ή 1 στην αρχή τους για τον συγχρονισμό των δύο συσκευών, το μέγεθος του μηνύματος και τέλος το άθροισμα ελέγχου (checksum). Επίσης προσφέρει έτοιμη προγραμματιστική διεπαφή μεταξύ του Arduino με τις συσκευές που ευθύνονται για την μετάδοση και την λήψη μηνυμάτων.



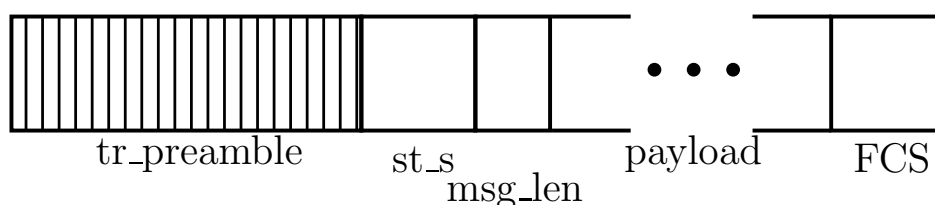
Σχήμα Γ'.5: Το σύστημα πλήρως συναρμολογημένο αποτελούμενο από το Arduino Uno, τον πομπό πάνω αριστερά, τον δέκτη πάνω δεξιά και την LCD οθόνη κάτω από τα εξαρτήματα

Γ'.3.1 Η Δομή ενός μηνύματος

Για την ορθή λειτουργία των Arduino και των συσκευών πρέπει να προστεθεί στην αρχή του μηνύματος μία ακολουθία από 0 και 1 που ονομάζεται *training preamble* για τον συγχρονισμό των συσκευών όπου το μέγεθος του ανέρχεται στα 36 bits. Έπειτα ακολουθεί το start symbol μεγέθους 12 bits που υποδηλώνει την αρχή του μηνύματος-payload του χρήστη. Στην συνέχεια 8 bit το μέγεθος του payload. Το payload μεταβαλλόμενου μεγέθους που εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και μπορεί να φτάσει μέχρι τα 77 bytes. Και τέλος προστίθεται το Frame Check Sequence με μέγεθος 2 byte. Το FCS είναι ένας κώδικας ανίχνευσης σφαλμάτων τοποθετημένος στο τέλος ενός μηνύματος. Όλα τα μηνύματα είναι ευαίσθητα σε σφάλματα από μία ποικιλία πη-

γών, στην παρούσα περίπτωση η ευρέος διαδεδομένη μπάντα ISM έχει μεγάλα ποσά θορύβου. Το FCS είναι ένας αριθμός όπου έχει υπολογιστεί από τον αποστολέα βασισμένος από το payload. Όταν ο παραλήπτης λαμβάνει το μήνυμα και υπολογίζει τον δικό του αριθμό FCS με βάση το μήνυμα που έλαβε και τον συγκρίνει με αριθμό που έλαβε με το μήνυμα, αν οι δύο αριθμοί είναι διαφορετικοί τότε θεωρείται ότι το μήνυμα δεν έχει ληφθεί σωστά και απορρίπτεται. Για την παραγωγή των FCS χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του Κυκλικού Ελέγχου Πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check - CRC) στα 16 bits.

Για την ορθή και ασφαλή μετάδοση και λήψη ενός μηνύματος, χωρίζεται το μήνυμα, εκτός του training preamble, σε λέξεις των τεσσάρων bits και στην συνέχεια αυτές οι λέξεις μετατρέπονται σε έξι bit λέξεις και στην συνέχεια αποστέλλονται. Η μετατροπή πραγματοποιείται ώστε το μέσο πλάτος της κυματομορφής που παράγεται να είναι ίσο με το μηδέν, τέτοιου είδους σήματα ονομάζονται DC Balanced.



Σχήμα Γ'.6: Η Δομή που φτιάχνει η βιβλιοθήκη κατά την αποστολή του μηνύματος. Αρχικά στέλνει μία ακολουθία από 0 και 1 tr_preamble (36 bits) στην συνέχεια στέλνει το start symbol (st_s) μεγέθους 12 bit στην συνέχεια το μέγεθος του μηνύματος (8 bit), το μήνυμα όπου το μέγεθος του καθορίζεται από τον προγραμματιστή και τέλος το FCS (12 bit)

Γ'.3.2 Οι μέθοδοι της βιβλιοθήκης

Η βιβλιοθήκη VirtualWire περιέχει συναρτήσεις που διαχειρίζονται τις κεραίες, ώστε ο προγραμματιστής να έχει πιο εύκολο τρόπο χρήσης αυτών. Αρχικά πρέπει να δηλωθούν τα digital πινάκια του Arduino που θα χρησιμοποιηθούν για την σύνδεση του με τον πομπό και τον δέκτη, αυτό γίνεται με τις εντολές:

```
vw_set_tx_pin (uint8_t pin=12); //for transmitter
vw_set_rx_pin (uint8_t pin=11); //for receiver
```

Έπειτα αρχικοποιείται η βιβλιοθήκη με την παρακάτω εντολή παίρνοντας ως όρισμα την ταχύτητα μετάδοσης ενός μηνύματος σε bit το δευτερόλεπτο(bps). Συχνές ταχύτητες που χρησιμοποιούνται είναι οι ακόλουθες: 500, 2000 και 4000.

```
vw_setup(uint6_t speed); //initializes VW to operate at speed bits per second
```

Για να είναι δυνατή μια λήψη ενός μηνύματος πρέπει να ξεκινήσει ο Βρόχος Κλειδωμένης Φάσης (Phase Locked Loop) που ακούει τον δέκτη, διαφορετικά δεν θα είναι δυνατή η λήψη ενός μηνύματος. Υπάρχει και η δυνατότητα να σταματήσει ο βρόχος αυτό για να είναι σωστή η μετάδοση ενός μηνύματος. Αυτό γίνεται με τις εντολές:

```
vw_rx_start(); // start the receiver  
vw_rx_stop(); // stop the receiver
```

Στον Βρόχο του Arduino μπορεί κανείς να μεταδώσει μηνύματα. Για την αποστολή των μηνυμάτων πρέπει να γνωρίζουμε το μέγεθος του μηνύματος και φυσικά το μήνυμα. Η συνάρτηση που στέλνει μηνύματα παίρνει ως είσοδο τον pointer του πίνακα που περιέχει το μήνυμα και το μέγεθος του μηνύματος σε bytes, όπως φαίνεται παρακάτω. Επίσης η συνάρτηση επιστρέφει σχεδόν αμέσως και ο συγχρονισμός της μετάδοσης ελέγχεται μέσω των interrupts. Interrupt είναι ένα σήμα εισόδου στον επεξεργαστή (στην προκειμένη περίπτωση στον microcontroller) που υποδεικνύει ένα συμβάν μείζονος σημασίας [19] [20]. Μετά την αποστολή ενός μηνύματος συνήθως χρησιμοποιείται συνάρτηση που σταματάει την εκτέλεση του βρόχου του Arduino, μέχρι το πέρας της αποστολής του μηνύματος, φαίνεται επίσης παρακάτω.

```
vw_send(*msg, len);  
vw_wait_tx();
```

Από την άλλη μεριά κάποιος είναι ο παραλήπτης του μηνύματος. Αρχικά πρέπει να γνωρίζει πότε ένα μήνυμα είναι διαθέσιμο για λήψη αυτό γίνεται όταν η πρώτη συνάρτηση επιστρέφει true, σε διαφορετική περίπτωση δεν υπάρχει κάτι για λήψη. Στην συνέχεια πρέπει να πάρει τα δεδομένα του μηνύματος από την κεραία, αυτό γίνεται με την δεύτερη συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή παίρνει ως είσοδο τον pointer τον πίνακα που θα μεταφερθούν τα δεδομένα του μηνύματος, καθώς και το μέγεθός του με αναφορά. Με το πέρας της συνάρτησης η μεταβλητή που περάστηκε με αναφορά έχει ως τιμή, το μέγεθος του μηνύματος που έλαβε σε bytes. Επίσης επιστρέφει true το εάν υπάρχει διαθέσιμο μήνυμα για λήψη και αν το FCS είναι ίδιο με το CRC που παράχθηκε κατά την λήψη, σε διαφορετική περίπτωση επιστρέφει false.

```
vw_have_message();  
vw_get_message(buff, &len);
```

Κεφάλαιο Δ΄

Περιγραφή Λογισμικού

Η ανάπτυξη του συστήματος βασίστηκε πάνω σε εξαρτήματα χαμηλού κόστους, όπου το καθένα κατασκευάστηκε από διαφορετικές εταιρείες με τέτοιο τρόπο ώστε να προγραμματίζονται με την γλώσσα που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη εφαρμογών πάνω στο Arduino, δηλαδή C/C++. Με κάθε εξάρτημα που χρησιμοποιείται με το Arduino έρχεται μαζί και μία βιβλιοθήκη που διευκολύνει την διεπαφή του. Η εταιρεία παρέχει στους προγραμματιστές δύο τρόπους διαχείρισης και ανάπτυξης εφαρμογών:

- 1) Διαδικτυακή πλατφόρμα ανάπτυξης, όπου παρέχεται δωρεάν από την εταιρεία. Για να χρησιμοποιηθεί από κάποιον απαιτείται εγγραφή σε αυτήν, ένα θετικό που έχει αυτός ο τρόπος ανάπτυξης είναι ότι η εφαρμογή που αναπτύσσεται βρίσκεται σε ασφαλές μέρος.
- 2) Προγραμματιστικό περιβάλλον (Arduino IDE), επίσης διανέμεται δωρεάν από την εταιρεία αλλά για την χρήση του δεν απαιτείται από τον χρήστη δημιουργία λογαριασμού, αυτό που απαιτείται όμως είναι η μεταφόρτωση και η εγκατάσταση της στον υπολογιστή που πραγματοποιείται η ανάπτυξη της εφαρμογής.

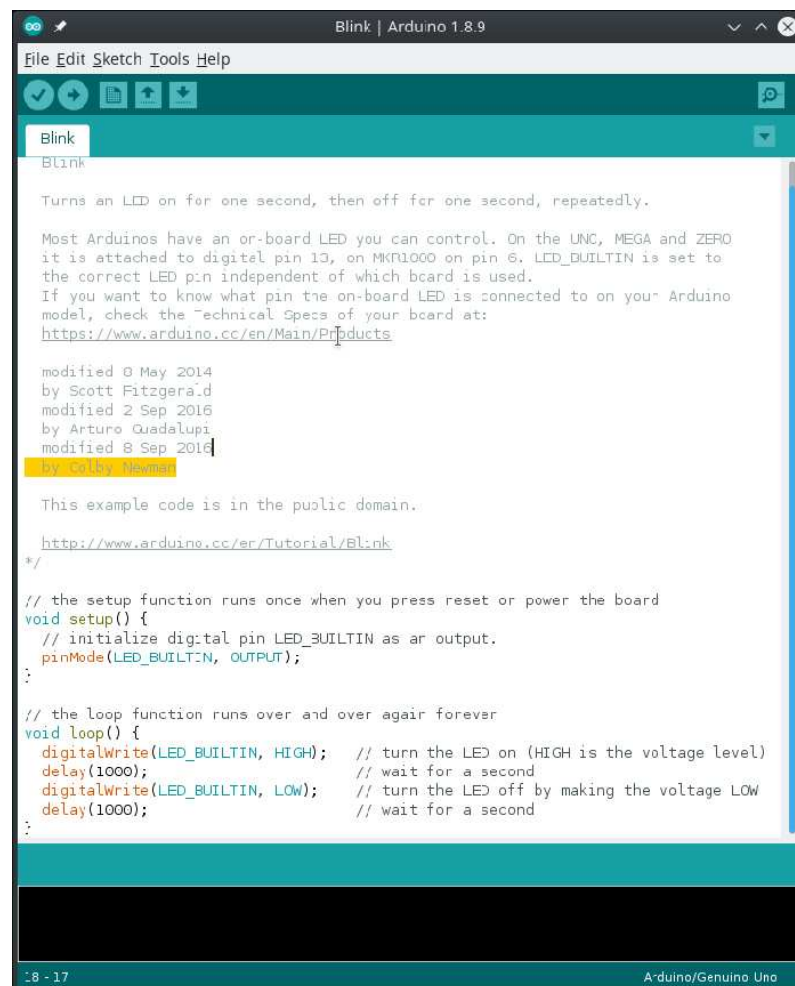
Για της ανάγκες της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε εξατομικευμένο λογισμικό το οποίο μπορεί να χωριστεί σε δύο βασικές λειτουργίες: 1) συγχρονισμός των κόμβων του δικτύου προκειμένου να έχουν την ίδια πραγματική χρονική αναφορά για την αρχή ενός frame· και 2) την αποστολή μηνυμάτων μονό στα timeslots που επιτρέπεται από το πρωτόκολλο η μετάδοση. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα γίνει λεπτομερής ανάλυση των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του συστήματος της

παρούσας διατριβής. Επίσης περιγράφονται οι βασικές λειτουργίες του συστήματος, καθώς και το λογισμικό που αναπτύχθηκε για την διευκόλυνση του στησίματος των πειραμάτων.

Δ'.1 Εργαλεία Ανάπτυξης

Η ανάπτυξη του λογισμικού του παρόντος συστήματος ξεκίνησε αρχικά στο Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης λογισμικού του Arduino (Arduino IDE) [21]. Οι δυνατότητες που παρέχει είναι περιορισμένες, δηλαδή παρέχει χρωματισμό του κώδικα για την διευκόλυνση του προγραμματιστή, επιτρέπει τη μεταφορά του κώδικα στις συσκευές μία τη φορά που σημαίνει ότι ο προγραμματιστής είναι υπεύθυνος για το ανέβασμα του κώδικα σε όλες τις συσκευές, επίσης δίνει την δυνατότητα διαχείρισης των εγκατεστημένων βιβλιοθηκών καθώς και σειριακή επικοινωνία με τα Arduino. Λόγο των περιορισμένων δυνατοτήτων του Arduino IDE, δημιουργήθηκε ανάγκη εύρεσης εφαρμογής (IDE) με περισσότερες δυνατότητες, ώστε να κάνει την διαδικασία ανάπτυξης του λογισμικού ταχύτερη. Η εφαρμογή που επιλέχθηκε είναι το Visual Studio Code (VSCode) [22], ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα ανεπτυγμένο από την Microsoft. Το VSCode προσφέρει περισσότερες δυνατότητες από το Arduino IDE, μέσω των extensions που μπορούν να εγκατασταθούν σε αυτό.

Μερικοί από τους παράγοντες που επιτέλεσαν για την επιλογή του VSCode είναι η δυνατότητα εκτέλεσης τερματικού στην διεπαφή της εφαρμογής και πρόβλεψης της υπόλοιπης λέξης κατά την διάρκεια πληκτρολόγησης της λέξης αυτής. Για την γρηγορότερη ανάπτυξη του συστήματος αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα στην γλώσσα προγραμματισμού Python 3 το οποίο εντοπίζει τις συνδεδεμένες συσκευές Arduino, και για κάθε μία από αυτές κάνει compile τον κώδικα και στην συνέχεια μεταφορτώνει το εκτελέσιμο στις συσκευές που εντοπίστηκαν. Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε έγινε χρήση του ανοιχτού κώδικα εργαλείου: arduino-cli [23]. Το arduino-cli είναι ένα πρόγραμμα που τρέχει στην γραμμή εντολών ενός λειτουργικού. Η διαδικασία του compile και της μεταφόρτωσης ενός κώδικα διαρκεί περισσότερο στην περίπτωση του Arduino IDE γιατί συμβάλει ο ανθρώπινος παράγοντας σε αυτήν.



Σχήμα Δ'.1: Το γραφικό περιβάλλον του Arduino IDE

Δ'.2 Ειδή μηνυμάτων

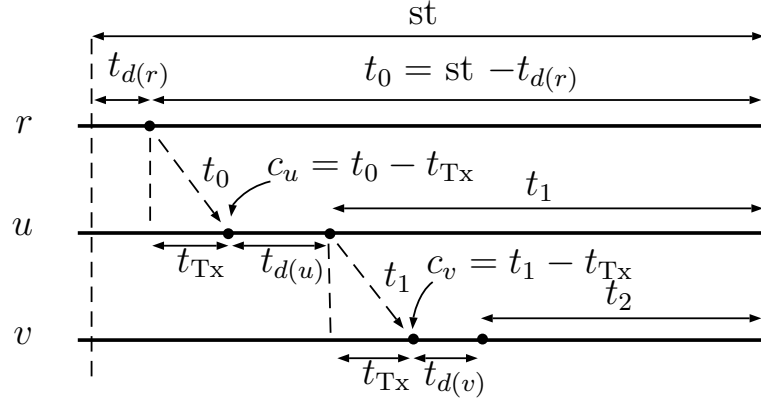
Για την υλοποίηση του TDMA και των πειραμάτων που διεξήχθησαν χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι μηνυμάτων: συγχρονισμού (SYNC) και δεδομένων (DATA). Και οι δύο τύποι μηνυμάτων περιέχουν στην αρχή τον τύπο τους, το ID του αποστολέα και τέλος το ID του παραλήπτη. Το ID του παραλήπτη παίρνει την τιμή 255 σε περίπτωση όπου πρέπει να επεξεργαστεί από όλους το άκουσαν. Μηνύματα συγχρονισμού στέλνονται από τους κόμβους πριν την αρχή κάθε frame, για συγχρονισμό των ρολογιών. Τα μηνύματα συγχρονισμού περιέχουν τον χρόνο που απομένει από την αρχή του πρώτου timeslot. Κάθε κόμβος που έχει δεδομένα προς αποστολή κατασκευάζει ένα μήνυμα δεδομένων, το οποίο μεταδίδεται στο timeslot που έχει ανατεθεί σε αυτόν τον κόμβο. Η ύπαρξη των δύο διαφορετικών τύπων μηνυμάτων είναι απαραίτητη για την ορθή λειτουργία του TDMA πρωτοκόλλου. Τα μηνύματα συγχρονισμού στέλνονται πριν από κάθε frame για τον συγχρονισμό των ρολογιών των κόμβων, ενώ τα μηνύματα δεδομένων αποστέλλονται από του κόμβους στα κατάλληλα timeslots.

Δ'.3 Ο Συγχρονισμός του Δικτύου

Σε περιβάλλοντα όπου δουλεύουν στο TDMA είναι απαραίτητη η παρακολούθηση του χρόνου από τους κόμβους για την αρχή του κάθε frame. Επί πλέον η υλοποίηση του TDMA σε multi-hop δίκτυα απαιτεί και κατανομημένο τρόπο συγχρονισμού που μπορεί να λειτουργήσει σε multi-hop δίκτυα.

Πόλοι αλγόριθμοι συγχρονισμού προτάθηκαν από την βιβλιογραφία για χρονική σήμανση (timestamping) στο επίπεδο του MAC [24, 25, 26]. Λόγο του θέματος της παρούσας διατριβής που εστιάζει στην υλοποίηση αλγορίθμων πρόσβασης μέσου, ο ακόλουθος μηχανισμός συγχρονισμού αναπτύχθηκε. Ο συγχρονισμός του δικτύου τρέχει για 2000ms πριν την αρχή κάθε frame. Οι κόμβοι του δικτύου μεταδίδοντας μηνύματα συγχρονισμού που αναφέρθηκαν παραπάνω αποκτούν κοινή χρονική αναφορά για την αρχή του frame. Πιο συγκεκριμένα ο κόμβος αναφοράς ξεκινάει την διαδικασία συγχρονισμού μεταδίδοντας ένα μήνυμα συγχρονισμού στους γείτονες του που περιέχει τον χρόνο που απομένει για την αρχή του frame. Στην συνέχεια όποιος κόμβος λαμβάνει το μήνυμα για πρώτη φορά προσαρμόζει το ρολόι του σύμφωνα με το μήνυμα που έλαβε.

Στο Σχήμα Δ'.2 παρουσιάζεται ο μηχανισμός του συγχρονισμού μεταξύ ενός κόμ-



Σχήμα Δ'.2: Απεικόνιση του μηχανισμού συγχρονισμού εντός της περιόδου συγχρονισμού st , μεταξύ των κόμβων r , u και v συνδεδεμένους σε τοπολογία αλυσίδας. Οι κόμβοι περιμένουν για ορισμένο χρόνο (π.χ., t_{dr} , t_{du} ανδ t_{dv} αντίστοιχα) πριν την μετάδωσουν τον χρόνο που απομένει για την αρχή του frame (π.χ., t_0 , t_1 ανδ t_2 αντίστοιχα). Επίσης απεικονίζονται τα εσωτερικά ρολόγια των κόμβων (c_u , c_v) μαζί με την διάρκεια αποστολής του μηνύματος συγχρονισμού t_{tx} .

βου r που χρησιμοποιείται ως αναφορά και του κόμβους u και v συνδεδεμένους σε τοπολογία αλυσίδας. Στην αρχή της περιόδου του συγχρονισμού (st), ο κόμβος αναφοράς r περιμένει για συγκεκριμένο πόσο χρόνου t_{dr} και στην συνέχεια μεταδίδει τον εναπομείναντα χρόνο $t_0 = st - t_{dr}$ στον κόμβο u . Όταν το μήνυμα του συγχρονισμού παραλειφθεί ο κόμβος u αφαιρεί τον χρόνο αποστολής από το t_0 έτσι έχει τον χρόνο που υπολείπεται για την αρχή του frame. Έπειτα ο κόμβος u περιμένει για κάποιο χρόνο και στην συνέχεια μεταδίδει τον υπολειπόμενο χρόνο στον κόμβο v και αυτός αυτός με την σειρά του θα κάνει την διαδικασία που έκανε ο κόμβος u .

Η προσαρμογή του ρολογιού έχει ως εξής: με την έναρξη της πρώτης μετάδοσης του μηνύματος συγχρονισμού, η στιγμή που ξεκινάει το frame για τον κόμβο που μεταδίδει είναι γνωστή καθώς είναι: $millis() + st$, όπου st η διάρκεια συγχρονισμού. Αφού λάβει ο κόμβος u το μήνυμα με τον υπολειπόμενο χρόνο για την αρχή του frame αφαιρεί από αυτόν την διάρκεια αποστολής του μηνύματος t_{Tx} , που παράγεται γνωρίζοντας το μέγεθος του μηνύματος (length of message) που αποστέλλεται από την κεραία και μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$length\ of\ message = |preamble| + |start\ symbol| + |msg\ lenght| + |payload| + |FCS|$$

και απαλείφοντας τα γνωστά μεγέθη βγαίνει:

$$\text{length of message} = 12 \times |\text{payload}| + 84$$

Γνωρίζοντας πλέον το μέγεθος του μηνύματος παράγεται η διάρκεια αποστολής του t_{Tx} σε ms:

$$t_{Tx} = \frac{\text{length of message}}{\text{speed}}$$

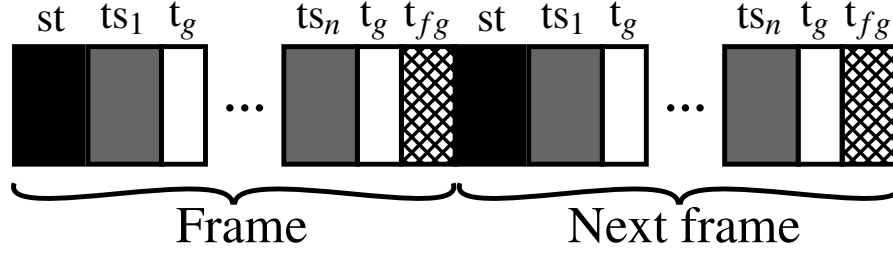
Δ'.4 Παράμετροι του TDMA

Η υλοποίηση του TDMA πρωτοκόλλου στην ISM μπάντα των 433.050 - 434.790 MHz, χρησιμοποιώντας συσκευές χαμηλού κόστους προσθέτει περιορισμούς όσο αφορά τον χρόνο έναρξης του frame. Πιο συγκεκριμένα, το εσωτερικό ρολόι των κόμβων μπορεί να αποκλίνει σε μεγάλο βαθμό [27], ο θόρυβος στο συγκεκριμένο κανάλι μπορεί να είναι υψηλός [28, 29] και η ακρίβεια των εξαρτημάτων μπορεί να είναι χαμηλή.

Συμπεριλαμβάνοντας τους παραπάνω περιορισμούς, κάθε timeslot ts_i του TDMA frame έχει διάρκεια 500ms και χωρίζονται από 300ms guard time (t_g) για αποφυγή συγχρούσεων λόγω της απόκλισης των ρολογιών. Επιπρόσθετα στην αρχή των frames δίνεται η δυνατότητα στους κόμβους να συγχρονίζονται για 2000ms. Στο τέλος κάθε frame προστέθηκε χρόνος ($t_{fg} = 500ms$) για να εγγυηθεί το πρωτόκολλο την έξοδο όλων των κόμβων από το προηγούμενο frame πριν την έναρξη της διαδικασίας του συγχρονισμού.

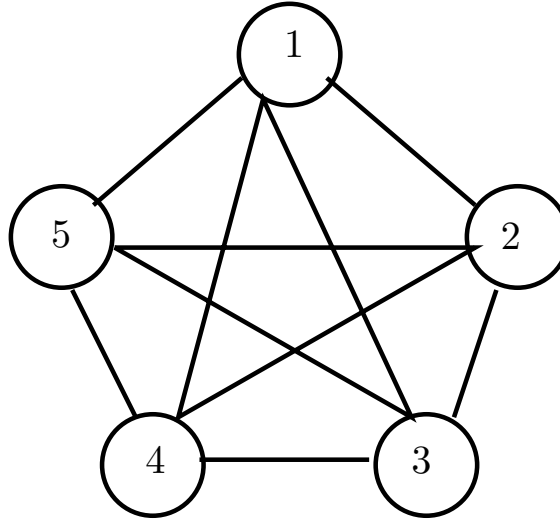
Δ'.5 Η Υλοποίηση του TiMAC

Η Υλοποίηση του TiMAC βασίζεται στο TDMA που αναφέρθηκε παραπάνω. Το δίκτυο αποτελείται από πέντε κόμβους σε πλήρη τοπολογία, η συγκεκριμένη τοπολογία μπορεί να θεωρηθεί ως κομμάτι ενός δικτύου που αποτελείται το πολύ από $N = 25$ κόμβους, όπου ο μέγιστος αριθμός γειτόνων είναι $D = 5$. Η τοπολογία του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα Δ'.4. Έχοντας τις παραπάνω τιμές από τον αλγόριθμο [14] προκύπτει ο βαθμός των Γκαλουά πολυωνύμων ($k = 1$) και η τάξη τους ($q = 5$). Τελικά,



Σχήμα Δ'.3: Η απεικόνιση του υλοποιημένου TDMA frame. Με κάθε timeslot (ts_i) να τελειώνει με guard period (t_g). Επίσης στο σχήμα απεικονίζεται ο χρόνος συγχρονισμού (st) και το frame guard period (t_{fg})

θα προκύψουν πρώτου βαθμού πολυώνυμα για την ανάθεση των timeslots και το μέγεθος του TDMA frame θα είναι ίσο με ($q^2 = 25$), που χωρίζεται σε πέντε sub-frames όπου το καθένα έχει $q = 5$ timeslots. Σε κάθε κόμβο του δικτύου ανατίθεται ένα πολυώνυμο πρώτου βαθμού με συντελεστές από $GF(5)$ σύμφωνα με το οποίο εξάγεται πότε κάθε κόμβος επιτρέπεται να μεταδώσει σε κάθε sub-frame. Έτσι στους κόμβους γίνεται ανάθεση πέντε timeslots ανά frame. Η λειτουργία της ανάθεσης των timeslots πραγματοποιείται με την βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Python.



Σχήμα Δ'.4: Πλήρη τοπολογία 5 κόμβων

Κεφάλαιο Ε΄

Πειράματα και Αποτελέσματα

Για το πείραμα δημιουργήθηκε μία πλήρης τοπολογία πέντε κόμβων, έτσι ώστε κάθε κόμβος έχει ακριβώς τέσσερις γείτονες. Συγκρούσεις είναι πιθανόν να συμβούν ωστόσο, η πολιτική του TiMAC εγγυάται τουλάχιστον μία επιτυχημένη μετάδοση ανά κόμβο και ανά frame. Παίρνοντας υπόψιν το γεγονός ότι μη επιτυχημένες μεταδόσεις μπορεί να συμβούν και από εξωτερικούς παράγοντες όπως την φύση της μπάντας των κεραίων που έχει υψηλά ποσά θορύβου ακόμα και σε απομονωμένα μέρη (π.χ. τις υπόγειες εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου).

Ε΄.1 Μεθοδολογία

Έντεκα διαφορετικές ομάδες από πολυώνυμα χρησιμοποιήθηκαν ως έντεκα διαφορετικά σενάρια λειτουργίας του παρόντος συστήματος, συνεπώς διαφορετικά timeslots ανατέθηκαν σε κάθε κόμβο ανά σενάριο λειτουργίας και τα αποτελέσματα εξάχθηκαν μετά την περάτωση 100 frame. Για την διεξαγωγή των πειραμάτων θεωρήθηκε ότι όλοι οι κόμβοι έχουν πάντα δεδομένα προς μετάδοση, αυτό έγινε για να τεσταριστεί η πολιτική σε αυξημένο φορτίο (στην προκειμένη περίπτωση το μέγιστο φορτίο που μπορεί να έχει ένα δίκτυο). Για κάθε κόμβο επιλέχθηκε αυθαίρετα ένας γειτονικός κόμβος ως ο παραλήπτης των μηνυμάτων που μεταδίδει και έμεινε σταθερός για όλα τα πειράματα.

Από τα αποτελέσματα η πρώτη ομάδα πολυωνύμων επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχουν συγκρούσεις από την μεριά της πολιτικής. Οι υπόλοιπες δέκα ομάδες πολυωνύμων επιλέχθηκαν τυχαία.

Το throughput του συστήματος παράγεται ως το κλάσμα του μέσου αριθμού ε-

πιτυχημένων μεταδόσεων (δηλαδή, ο αριθμός των επιτυχημένων μεταδόσεων δια τον αριθμό των κόμβων) δια τον αριθμό των timeslots,

$$throughput = \frac{total\ successful\ transmissions}{total\ nodes \times total\ timeslots}$$

Για την χρονική διάρκεια των 100 frames, κάθε κόμβος μεταδίδει σε 500 timeslots, όπου ο συνολικός αριθμός αυτών είναι 2500. Επομένως το μέγιστο throughput του συστήματος δίνεται από:

$$maximum\ throughput = \frac{500}{2500} = 0.2$$

Το μέγιστο throughput δεν είναι αναμενόμενο να επιτευχθεί διότι το κανάλι επικοινωνίας έχει πολύ θόρυβο, η ακρίβεια του πομπού και η ευαισθησία του δέκτη είναι μικρή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Από την άλλη μεριά, το TiMAC εγγυάται μία επιτυχημένη μετάδοση ανά κόμβο ανά frame. Συνεπώς το ελάχιστο throughput δίνεται από την σχέση:

$$minimum\ throughput = \frac{100}{2500} = 0.04$$

Ε΄.2 Αποτελέσματα

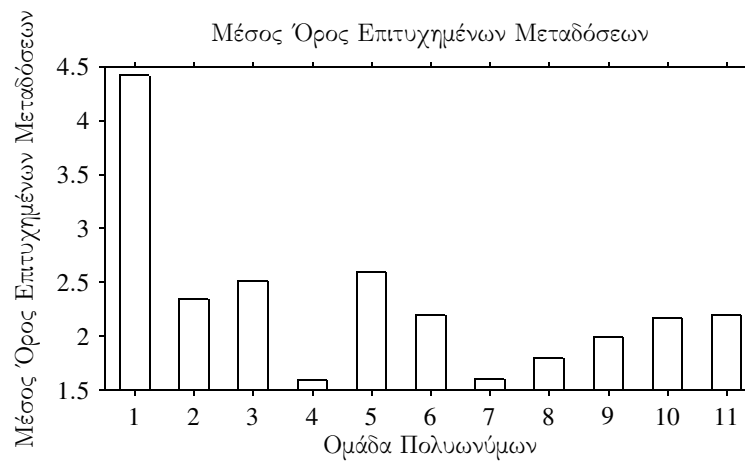
Το Σχήμα Ε΄.1 αναπαριστά το throughput του συστήματος για τις έντεκα διαφορετικές ομάδες πολυωνύμων. Παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις είναι μεγαλύτερο του ελάχιστου που εγγυάται το TiMAC (0.04). Επίσης παρατηρείται ότι η πρώτη ομάδα πολυωνύμων έχει το μεγαλύτερο throughput, όμως είναι μικρότερη από την θεωρητικά μέγιστη τιμή. Αυτή η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη διότι, από την μία η ομάδα που επιλέχθηκε δεν προκαλεί συγκρούσεις, από την άλλη το είδος του καναλιού και η ποιότητα κατασκευής των εξαρτημάτων μπορεί να επιδρά στα αποτελέσματα.

Το Σχήμα Ε΄.2 αναπαριστά τον μέσο αριθμό επιτυχημένων μεταδόσεων ανά κόμβο ανά frame για τις έντεκα διαφορετικές ομάδες πολυωνύμων. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν αυτό που εγγυάται η πολιτική πρόσβασης ότι θα υπάρχει του



Σχήμα Ε'.1: Το throughput συναρτήσει των διαφόρων ομάδων από πολυώνυμα. Σε όλες τις περιπτώσεις βρίσκεται μεταξύ της μέγιστης 0.2 και ελάχιστης 0.04 τιμής.

τουλάχιστον μία επιτυχημένη μετάδοση ανά κόμβο ανά frame. Η πρώτη ομάδα πολυώνυμων έχει σημαντικά περισσότερες επιτυχημένες μεταδόσεις από τα υπόλοιπα και πάλι δεν έχει ξεπεράσει την μέγιστη θεωρητική τιμή της πολιτικής για τον μέσο αριθμό επιτυχημένων μεταδόσεων ανά frame.



Σχήμα Ε΄.2: Ο Μέσος Αριθμός Επιτυχημένων Μεταδόσεων ανά κόμβο ανά frame συναρτήσει των διαφόρων ομάδων από πολυώνυμα. Σε όλες τις περιπτώσεις βρίσκεται μεταξύ της μέγιστης 5 και ελάχιστης 1 τιμής.

Κεφάλαιο Γ΄

Σύνοψη και Συμπεράσματα

Το κύριο αντικείμενο ανάλυσης και επεξεργασίας αυτής της διατριβής υπήρξε η υλοποίηση αλγορίθμων πρόσβασης μέσου ανεξάρτητων της τοπολογίας σε Ασύρματα δίκτυα. Αρχικά ο αλγόριθμος πρόσβασης μέσου που αναπτύχθηκε για αυτήν την εργασία είναι το TDMA και έπειτα αναπτύχθηκε στο TiMAC. Αυτό έγινε γιατί το TiMAC χρησιμοποιεί το TDMA ως βασική μέθοδο προσπέλασης μέσου, αυτό όμως που προσθέτει σε αυτό είναι η ανάθεση των timeslots στους κόμβους με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει τουλάχιστον μία επιτυχημένη μετάδοση ανά κόμβο ανά frame.

Η υλοποίηση της πολιτικής του TiMAC που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή, βασίστηκε πάνω στην συσκευή του Arduino Uno και σε κεραίες χαμηλού κόστους που λειτουργούν στα 433MHz της ISM μπάντας. Για την επίλυση των προβλημάτων της παρουσιάζει η διαίρεση χρόνου αναπτύχθηκε κατανεμημένος αλγόριθμος συγχρονισμού που λειτουργεί σε multi-hop περιβάλλοντα. Οι κεραίες χαμηλού κόστους που χρησιμοποιήθηκαν εισήγαγαν περιορισμούς πάνω στην επικοινωνία των κόμβων.

Το πειραματικό περιβάλλον που έγιναν τα πειράματα αποτελείται από πέντε κόμβους σε τοπολογία πλήρους γράφου, με τρόπο όπου ο κάθε κόμβος έχει ακριβώς τέσσερις γείτονες, και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν αποτελούνται από έντεκα ομάδες πολυωνύμων. Τα πειραματικά αποτελέσματα που βρέθηκαν επιβεβαιώνουν τα θεωρητικά. Έχειδειχθεί ότι για κάθε κόμβο υπάρχει τουλάχιστον μία επιτυχημένη μετάδοση σε διάρκεια ενός frame καθώς και ότι το throughput κυμαίνεται εντός του εύρους που δόθηκε από την θεωρία.

Η μελλοντική δουλειά μπορεί να γίνει στον τομέα αυτό περιλαμβάνει την βελτίω-

ση του συγχρονισμού και την διεξαγωγή πειραμάτων χρησιμοποιώντας περισσότερους κόμβους. Παρά των περιορισμών της υλοποίησης του συστήματος, το παρών σύστημα δείχνει την ενδεχόμενη επιτυχία της Πολίτικης.

Βιβλιογραφία

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: a survey,” *Computer networks*, vol. 38, no. 4, pp. 393–422, 2002.
- [2] T. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis, “A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control, 2005.*, pp. 719–724, IEEE, 2005.
- [3] A. Mainwaring, D. Culler, J. Polastre, R. Szewczyk, and J. Anderson, “Wireless sensor networks for habitat monitoring,” in *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, pp. 88–97, Acm, 2002.
- [4] E. S. Biagioni and K. Bridges, “The application of remote sensor technology to assist the recovery of rare and endangered species,” *The International Journal of High Performance Computing Applications*, vol. 16, no. 3, pp. 315–324, 2002.
- [5] G. Intelligence, “Definitive data and analysis for the mobile industry,” *GSMAintelligence. com*, 2016.
- [6] H. Hartenstein and L. Laberteaux, “A tutorial survey on vehicular ad hoc networks,” *IEEE Communications magazine*, vol. 46, no. 6, pp. 164–171, 2008.
- [7] K. Bouabdellah, H. Nouredine, and S. Larbi, “Using wireless sensor networks for reliable forest fires detection,” *Procedia Computer Science*, vol. 19, pp. 794–801, 2013.
- [8] B. Sundararaman, U. Buy, and A. D. Kshemkalyani, “Clock synchronization for

- wireless sensor networks: a survey,” *Ad hoc networks*, vol. 3, no. 3, pp. 281–323, 2005.
- [9] I.-K. Rhee, J. Lee, J. Kim, E. Serpedin, and Y.-C. Wu, “Clock synchronization in wireless sensor networks: An overview,” *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 56–85, 2009.
- [10] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, “Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, vol. 12, no. 3, pp. 493–506, 2004.
- [11] V. Rajendran, K. Obraczka, and J. J. Garcia-Luna-Aceves, “Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks,” *Wireless networks*, vol. 12, no. 1, pp. 63–78, 2006.
- [12] A. C. V. Gummalla and J. O. Limb, “Wireless medium access control protocols,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 3, no. 2, pp. 2–15, 2000.
- [13] M. C. Vuran and I. F. Akyildiz, “Spatial correlation-based collaborative medium access control in wireless sensor networks,” *IEEE/ACM Transactions On Networking*, vol. 14, no. 2, pp. 316–329, 2006.
- [14] I. Chlamtac and A. Faragó, “Making transmission schedules immune to topology changes in multi-hop packet radio networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 2, no. 1, pp. 23–29, 1994.
- [15] Arduino LLC, *Arduino*, 9 2010. Rev3.
- [16] WENSHING ELECTRONICS CO.,LTD, *Wireless Hi Sensitivity Receiver Module (RF ASK)*, 12 2008. v1.0.3.
- [17] WENSHING ELECTRONICS CO.,LTD, *Wireless Hi Power Transmitter Module (RF ASK)*, 10 2010. v1.0.3.
- [18] M. McCauley, “VirtualWire 1.27.” Accessed: 24 Sep 2019.
- [19] A. LLC, “Interrupt at the Arduino.” Accessed: 24 Sep 2019.

- [20] Wikipedia, “Interrupt.” Accessed: 24 Sep 2019.
- [21] A. LLC, “Arduino IDE.” Accessed: 24 Sep 2019.
- [22] M. Corporation, “Visual Studio Code.” Accessed: 31 Aug 2019.
- [23] O. Source, “Arduino Command Line Interface.” Accessed: 24 Sep 2019.
- [24] M. Maróti, B. Kusy, G. Simon, and Á. Lédeczi, “The flooding time synchronization protocol,” in *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 39–49, ACM, 2004.
- [25] S. Ganeriwal, R. Kumar, and M. B. Srivastava, “Timing-sync protocol for sensor networks,” in *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, pp. 138–149, ACM, 2003.
- [26] K. Skiadopoulos, A. Tsipis, K. Giannakis, G. Koufoudakis, E. Christopoulou, K. Oikonomou, G. Kormentzas, and I. Stavrakakis, “Synchronization of data measurements in wireless sensor networks for iot applications,” *Ad Hoc Networks*, 2019.
- [27] C. Guo, J. Shen, Y. Sun, and N. Ying, “Rb particle filter time synchronization algorithm based on the dpm model,” *Sensors*, vol. 15, no. 9, pp. 22249–22265, 2015.
- [28] “Ieee recommended practice for powering and grounding electronic equipment,” *IEEE Std 1100-2005 (Revision of IEEE Std 1100-1999)*, pp. 1–703, May 2006.
- [29] D. Robinson, T. A. Wysocki, V. W. Smith, and K. Popovski, “Background radio frequency interference measurements for wireless devices in the electricity supply industry,” 2005.

Παραρτήματα

Παράρτημα Ι

Απόδειξη του $\Xi\Xi\Xi\Xi$

Πίνακας Δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια (με κρίση)

- Asterios Papamichail, Vasileios Dragonas, George Koufoudakis, Konstantinos Oikonomou, Georgios Tsoumanis, Ioannis Stavrakakis, "Low-cost Device Implementation of a Topology Independent MAC (TiMAC) Policy", Third International Balkan Conference on Communications and Networking, Skopje, North Macedonia, 2019.

Γλωσσάρι Ξενικών Όρων

timeslot	χρονοθυρίδα
frame	πλαίσιο
sub-frame	υποπλαίσιο
microcontroler	μικροελεγκτής
Cyclic	Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού
Redundancy	
Check	

Συμβολισμοί Μεγεθών

N	Ο μέγιστος αριθμός των κόμβων μπορεί να έχει ένα δίκτυο
D	Ο μέγιστος αριθμός γειτόνων ενός κόμβου
k	Βαθμός του πολυωνύμου Γκαλουά
q	Η τάξη του πολυωνύμου Γκαλουά

Συντομογραφίες

WSN	Wireless Sensor Network
TDMA	Time Division Multiple Access
MAC	Medium Access Control
TiMAC	Topology independent Medium Access Control
FCS	Frame Check Sequence
CRC	Cyclic Redundancy Check

Ευρετήριο

Έλεγχος Προσπέλασης Μέσου, 7

Frame Check Sequence, 15

Ασύρματο Δίκτυο Αισθητήρων, 1

Δίκτυα Οχημάτων, 4

Πολιτική Πρόσβασης Μέσου Ανεξάρτη-
του της Τοπολογίας, 5

Πολλαπλή Πρόσβαση με Διαίρεση Χρό-
νου, 7