

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Τμήμα Πληροφορικής



Πτυχιακή Εργασία

Υλοποίηση Αλγορίθμων Διαχείρισης Τουριστικών
Ροών με Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων

Αλέξανδρος Δημήτριος Ζερβόπουλος – Π2015111

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Κωνσταντίνος Οικονόμου

Ιούνιος 2019

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Κωνσταντίνος Οικονόμου, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Δημήτριος Τσουμάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Θεόδωρος Ανδρόνικος, Αναπληρωτής Καθηγητής,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Στην οικογένειά μου, για όλη την υποστήριξη που μου έχουν προσφέρει
και σε όσους ήταν κοντά μου, όποτε τους χρειαζόμουν

Περίληψη

Η ραγδαία ανάπτυξη των Τεχνολογιών της Πληροφορίας και της Επικοινωνίας (ΤΠΕ), σε συνδυασμό με την ένταξή τους στην καθημερινή ζωή, έχουν προκαλέσει ριζικές αλλαγές στην κοινωνία και στη βιομηχανία στο σύνολό της. Μια πτυχή αυτού είναι η εμφάνιση του *έξυπνου τουρισμού*, υπόσχεται να προσφέρει μία γκάμα από υπηρεσίες στους τουρίστες, προκειμένου να εμπλουτίσει τη συνολική εμπειρία τους καθ' όλη τη διάρκεια των ταξιδιών τους. Ωστόσο, αυτό συνοδεύεται από ένα ευρύ φάσμα προκλήσεων, ιδίως στον τομέα της δικτύωσης, καθώς οι έξυπνες υπηρεσίες τουρισμού είναι εξαιρετικά ποικίλες όσον αφορά το πεδίο εφαρμογής, πράγμα στο να έχει η καθεμία κατά κύριο λόγο διαφορετικές απαιτήσεις από το δίκτυο. Επιπλέον, τα δίκτυα που συναντώνται σε περιβάλλοντα έξυπνου τουρισμού είναι συχνά ετερογενή και τεράστια σε μέγεθος, αποτελούμενα από κόμβους με διαφορετικές δυνατότητες υπολογιστικής και δικτύωσης. Ως εκ τούτου, απαιτούνται διάφορες τεχνικές για την αντιμετώπιση ζητημάτων διάχυσης πληροφορίας που μπορεί να προκύψουν, έτσι ώστε να διευκολύνεται η λειτουργία της πληθώρας των λειτουργικών υπηρεσιών.

Μία τέτοια τεχνική είναι η κατασκευή *Connected Dominating Sets* (CDS) για την παροχή *virtual backbones* μέσω ασύρματων δικτύων και τη διευκόλυνση της λειτουργίας έξυπνων υπηρεσιών σε περιβάλλοντα έξυπνου τουρισμού. Αυτές οι τεχνικές έχουν επικεντρωθεί σε μεγάλο βαθμό στις παραμέτρους του δικτύου, και όχι σε εκείνες που αφορούν σε αντίστοιχο βαθμό τις εφαρμογές. Για το λόγο αυτό, προτείνεται μία διαφορετική προσέγγιση σε αυτή τη διατριβή. Δεδομένου ότι κάθε υπηρεσία έχει τις δικές της ειδικές απαιτήσεις, ένα virtual backbone network μπορεί να κατασκευαστεί για να ταιριάζει στις ανάγκες της. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι κόμβοι είναι σε μεγάλο βαθμό ανόμοιοι, όσον αφορά τις δυνατότητές τους, οι επιδόσεις κάθε επιμέρους συστήματος πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την κατασκευή του virtual backbone network, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητά του βάσει των απαιτήσεων μιας εξεταζόμενης υπηρεσίας. Για να επιτευχθεί αυτό, κάθε κόμβος

στο δίκτυο χαρακτηρίζεται από μια παράμετρο *appropriateness*, η οποία υποδεικνύει πόσο κατάλληλος είναι ένας κόμβος για ένα απαιτούμενο virtual backbone network. Αυτή η παράμετρος μπορεί να παρασχεθεί κατόπιν αιτήματος μιας υπηρεσίας, κάτι που στοχεύει ακόμα στην αποφυγή συμφόρησης των κεντρικών κόμβων, όταν αυτοί υποστηρίζουν μεγάλο όγκο υπηρεσιών.

Για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης, ένας αλγόριθμος για την κατασκευή ενός CDS επεκτείνεται για να ληφθεί υπόψη αυτή η παράμετρος. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι κατανοητός και απαιτεί μόνο τοπική πληροφορία, με μια σχετικά γρήγορη φάση κατασκευής, μόλις αποκτηθεί η απαιτούμενη πληροφορία. Αυτά τα χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με την αρκετά απλή, αλλά αποτελεσματική, άπληστη φύση του αλγορίθμου, ταιριάζουν καλύτερα στις απαιτήσεις που θέτει η δυναμική φύση των δικτύων που βρίσκονται σε αυτά τα περιβάλλοντα. Ο αλγόριθμος και η επέκτασή του υλοποιούνται σε ασύρματο δίκτυο χαμηλού κόστους, το οποίο εγκαθίσταται σε πανεπιστημιακή πανεπιστημιούπολη και χρησιμοποιείται ως πειραματικός σταθμός δοκιμής για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης προσέγγισης. Αυτό το σύστημα βασίζεται στην πλατφόρμα ανάπτυξης *Arduino*, σε συνδυασμό με μια συσκευή *XBee-PRO S2C module*, με το *Arduino Wireless SD Shield* να μεσολαβεί για την επικοινωνία των δύο προηγούμενων. Η ενσωμάτωση αυτών των στοιχείων συμβάλλει στην ευκολία χρήσης, την προσβασιμότητα και το χαμηλό κόστος του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα καθιστά παρέχει ικανοποιητικές δυνατότητες για τα πλαίσια των πειραμάτων.

Τα πειράματα επικεντρώνονται στο πώς η εισαγωγή της καταλληλότητας επηρεάζει τη διαδικασία κατασκευής CDS. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος ξεκινά τη διαδικασία κατασκευής ενός virtual backbone network, με και χωρίς χρήση της παραμέτρου καταλληλότητας. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι η προτεινόμενη προσέγγιση είναι ικανή να δημιουργήσει κατάλληλα virtual backbone networks για έξυπνες υπηρεσίες τουρισμού, τα οποία παρέχουν μειωμένη επιβάρυνση για το δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα οδηγούν σε σημαντική αύξηση της απόδοσης κατά τη συνολική κατασκευαστική διαδικασία. Συγκεκριμένα, ο χρόνος και τα μηνύματα που απαιτούνται για τις κατασκευές CDS μειώνονται, ως συνέπεια της μείωσης του μεγέθους τους, αποτέλεσμα που δεν είναι καθόλου αμελητέο, λαμβάνοντας υπόψη τη γενική βελτίωση που αυτό συνεπάγεται όσον αφορά τη διάδοση πληροφοριών.

Ενώ τα αποτελέσματα είναι πολλά υποσχόμενα, υπάρχει πάντα περιθώριο για μελλοντική δουλειά. Ιδιαίτερη σημασία έχει η παρακολούθηση της απόδοσης της προτει-

νόμενης προσέγγισης σε πραγματικές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, μπορεί να διερευνηθεί ένα σύνολο παραμέτρων που βασίζονται στο δίκτυο για να βελτιωθεί περαιτέρω η απόδοση του αλγορίθμου κατασκευής CDS, αντί για αυτήν που προτείνεται, που επικεντρώνεται στη λειτουργία της εφαρμογής και εκφράζεται μέσω της καταλληλότητας κάθε κόμβου.

Abstract

The growth and development of Information and Communication Technologies, coupled with their integration into everyday life, has caused radical changes to the society and industry as a whole. One aspect of this is the emergence of *smart tourism*, promising to provide a multitude of services to tourists, in order to enrich their overall experience throughout their journeys. This is, however, accompanied by a breadth of challenges, particularly in the networking area, as smart tourism services are remarkably diverse in scope, which also leads to each service having vastly different networking requirements. Additionally, networks encountered in smart tourism environments are often heterogenous and vast in size, consisting of nodes of varying computational and networking capabilities. As such, various techniques are required to address information dissemination issues which may arise, so that the plethora of operating services are facilitated.

One such technique is the construction of *Connected Dominating Sets* (CDS) in order to provide *virtual backbones* over wireless networks and facilitate the operation of intelligent services in smart tourism environments. These techniques have largely focused on network parameters, rather than application specific ones. Instead, a different approach is proposed in this dissertation. Given that each service has its own specific requirements, a virtual backbone can be constructed to fit its needs. Combined with the fact that nodes are largely dissimilar in terms of their capabilities, each individual system's performance needs to be taken into account during the construction of the virtual backbone network, in order to maximize its efficiency based on the requirements of a considered service. To accomplish this, each node in the network is characterized by an *appropriateness* parameter, which indicates how appropriate a node is for a requested virtual backbone network. This parameter can be provided upon a service's request, which also aims to avoid the overwhelming of central nodes, when supporting multiple services.

To assess the effectiveness of this approach, an algorithm for the construction of a CDS is extended to take this parameter into account. This algorithm is distributed and requires only local information, boasting a relatively fast construction phase, once the required information has been acquired. These traits, coupled with the algorithm's fairly simplistic, but effective, greedy nature best fit the requirements set by the dynamic nature of networks found in these environments. The algorithm and its extension are implemented in a low-cost wireless network, which is installed in a university campus and used as an experimental testbed to evaluate the effectiveness of the proposed approach. This system is based on the *Arduino* development board, combined with an *XBee-PRO S2C module*, interfacing through the *Arduino Wireless SD Shield*. The integration of these components conduces to the system's ease-of-use, accessibility and low cost, while making it sufficiently capable for the scope of the experiments.

The experiments focus on how the introduction of the appropriateness affects the CDS construction process. More specifically, each node initiates the process of constructing a virtual backbone network, with and without making use of the appropriateness parameter. The obtained results indicate that the proposed approach is capable of constructing virtual backbone networks for smart tourism services, which add reduced network overhead, while also yielding a significant increase in efficiency to the overall construction process. Particularly, the time and messages required for the CDS constructions are reduced, as a result of the backbone's decrease in size, an outcome not the least negligible, considering the overall improvement this entails regarding information dissemination matters.

While the results are promising, there's always room for future work to be done. Of particular importance is monitoring how the proposed approach would perform in real-world applications of larger scale. Additionally, a set of network-based parameters can be explored to further improve the CDS construction algorithm's performance, instead of the application-focused one expressed through each node's appropriateness.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Οικονόμου για όλη την καθοδήγηση που μου παρείχε, για τις εμπειρίες που μου δόθηκε η ευκαιρία να αποκτήσω και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας.

Επιπλέον, σημαντική συνδρομή κατά τη συγγραφή αποτέλεσαν οι οδηγίες και συμβουλές που προσέφερε ο Επίκουρος Καθηγητής κ. Βασίλειος Κομιανός, ο οποίος έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην κατεύθυνση της εργασίας. Η εμπειρία του υποψήφιου Διδάκτορα κ. Κωνσταντίνου Σκιαδόπουλου έπαιξε καθοριστικό ρόλο, καθώς ήταν πάντα πρόθυμος να ακούσει και να βοηθήσει σε κάθε είδους τεχνικό ζήτημα που προέκυψε, αλλά και στην υλοποίηση των αλγορίθμων που περιγράφονται. 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: Αικατερίνη Γεωργία Αλβάνου, Ανδρεάνα Στυλίδου, Αστέριο Παπαμιχαήλ, Ευγενία Δημητρίου, Κωνσταντίνο Μπέζα και Σπύρο Βέργη για όλες τις αξέχαστες ώρες συνεργασίας που είχαμε φέτος και χωρίς την αλληλεγγύη των οποίων, ο τελευταίος χρόνος θα ήταν εξαιρετικά δυσκολότερος.

Επιπρόσθετα, αδύνατη θα ήταν η εκπόνηση και ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας, χωρίς την υποστήριξη της οικογένειάς μου σε κάθε τομέα, κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Ευχαριστώ για όλα όσα μου έχουν προσφέρει, τόσο στα τελευταία τέσσερα χρόνια, όσο και στην υπόλοιπη ζωή μου, που έχουν συμβάλει στην πορεία που έχω ακολουθήσει.

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 ΕΣΠΑ

2014-2020 – Επιχειρησιακό Πρόγραμμα ‘Ιόνια Νησιά 2014-2020’.

Περιεχόμενα

A'	Εισαγωγή	1
A'.1	Βιβλιογραφική Έρευνα	4
A'.2	Αποτελέσματα και Συνεισφορά	5
A'.3	Δομή	5
B'	Κατασκευή Connected Dominating Set	7
B'.1	Backbones στα Δίκτυα	7
B'.2	Τρόποι Κατασκευής CDS	8
B'.3	Περιγραφή ενός Κατανεμημένου Αλγορίθμου Κατασκευής d -CDS	10
B'.3.1	Ανάλυση του Αλγορίθμου	11
B'.3.2	Επέκταση του Αλγορίθμου	12
B'.4	Virtual Backbones για Προσαρμόσιμες Υπηρεσίες Δικτύων	13
B'.4.1	Παράδειγμα Εφαρμογής της Προσέγγισης	14
Γ'	Περιγραφή Συστήματος	17
Γ'.1	Πλατφόρμα Arduino	17
Γ'.2	Συσκευή XBee-PRO S2C	19
Γ'.2.1	Περιγραφή Zigbee	20
Γ'.2.2	Τρόποι Λειτουργίας	21
Γ'.2.3	Παράμετροι Λειτουργίας και XCTU	24
Γ'.3	Σχεδιασμός του Συστήματος	25
Δ'	Πειράματα	29
Δ'.1	Διαμόρφωση του Δοκιμαστικού Περιβάλλοντος	29
Δ'.2	Διαχείριση του Δικτύου και Υλοποίηση του Αλγορίθμου	31

Περιεχόμενα	ix
Δ'.2.1 Αρχικοποίηση του Δικτύου	31
Δ'.2.2 Αρχικοποίηση του d -CDS Αλγορίθμου	32
Δ'.2.3 Κατασκευή του CDS	33
Δ'.3 Αποτελέσματα Πειραμάτων	34
Ε' Σύνοψη και Συμπεράσματα	39
Βιβλιογραφία	40
Παραρτήματα	48
I Υλοποίηση της Φάσης Κατασκευής	49
Πίνακας Δημοσιεύσεων	52
Συμβολισμοί Μεγεθών	53
Γλωσσάρι Ξενικών Όρων	54
Συντομογραφίες	55
Ευρετήριο	56

Κατάλογος Σχημάτων

B'.1	Παράδειγμα CDS σε γράφο. Οι γκρι κόμβοι είναι αυτοί που απαρτίζουν το CDS.	9
B'.2	Παράδειγμα δικτύου με 6 κόμβους και οι τιμές καταλληλότητας κάθε κόμβου, που έχουν ανατεθεί τυχαία στο εύρος $\{1, 2, 3, \dots, 100\}$	15
Γ'.1	Φωτογραφία της πλακέτας Arduino Mega 2560, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.	19
Γ'.2	Φωτογραφία της συσκευής XBee-PRO S2C, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.	20
Γ'.3	Η γραφική διεπαφή του XCTU.	24
Γ'.4	Φωτογραφίες των διαφορετικών συσκευών, που συγκροτούν το δίκτυο που κατασκευάστηκε.	27
Δ'.1	Τοποθέτηση των κόμβων του δικτύου, που σημειώνονται με κύκλους, στις πανεπιστημιακές εγκαταστάσεις.	30
Δ'.2	Η μέση τιμή της παραμέτρου καταλληλότητας A του virtual backbone network που κατασκευάστηκε από κάθε κόμβο.	35
Δ'.3	Το μέγεθος L του virtual backbone network, που κατασκευάστηκε από κάθε κόμβο, όπου $L = \text{CDS} $	36
Δ'.4	Ο χρόνος σε αριθμό hops T , που απαιτείται για την κατασκευή του virtual backbone κάθε κόμβου.	38

Κατάλογος Πινάκων

Γ'.1	Οι διαφορετικοί τύποι <i>frames</i> διαθέσιμοι σε <i>API</i> λειτουργία και τα αντίστοιχα αναγνωριστικά τους.	23
Γ'.2	Οι <i>AT</i> εντολές που χρησιμοποιούνται, οι αντίστοιχες τιμές τους και μία συντομή περιγραφή καθεμίας από αυτές.	26
Δ'.1	Αποτελέσματα της κατασκευής <i>CDS</i> . Το <i>A</i> είναι η μέση καταλληλότητα των κόμβων που αποτελούν τα <i>CDS</i> και το <i>L</i> είναι το μέσο μέγεθος των <i>CDS</i> που προκύπτει κάνοντας <i>trigger</i> όλους τους κόμβους, ενώ το <i>T</i> είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια φάση κατασκευής και το <i>M</i> είναι ο συνολικός αριθμός μηνυμάτων που μεταδίδονται από όλους τους κόμβους, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στο σύνολό της.	35
Δ'.2	Αθροιστική χρήση κόμβων για τις Περιπτώσεις 1 και 2, σε σύγκριση με την αθροιστική χρήση κόμβων όταν δε χρησιμοποιείται πρωτόκολλο δρομολόγησης (πλημμυρίδα) για το δίκτυο που μελετάται όπου $N = 25$	37

Κεφάλαιο Α΄

Εισαγωγή

Η εκθετική ανάπτυξη της τεχνολογίας, που χαρακτηρίζει τον τελευταίο αιώνα, έχει επιφέρει μεγάλες αλλαγές στην καθημερινότητα του ανθρώπου, από την αυτοματοποίηση μεγάλου αριθμού εργασιακών θέσεων, μέχρι και τον τρόπο διεξαγωγής της ανθρώπινης επικοινωνίας σε καθημερινή βάση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενσωμάτωσης *Τεχνολογιών Πληροφορίας και Επικοινωνιών* (ΤΠΕ) στην ανθρώπινη ζωή αποτελεί και η έννοια του *Διαδικτύου των Πραγμάτων*, ή Internet of Things (IoT), που περιλαμβάνει την τοποθέτηση ηλεκτρονικών συσκευών και αισθητήρων σε καθημερινά αντικείμενα, διασυνδεδεμένων μεταξύ τους, καθώς και με το Διαδίκτυο.

Το IoT εμπεριέχει πολυάριθμους κλάδους, με τον *Έξυπνο Τουρισμό* να ξεχωρίζει και να προσελκύει ιδιαίτερα το επιστημονικό ενδιαφέρον, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο τουρισμός αποτελεί μία από τις κυριότερες πηγές εσόδων, αλλά και σημαντικός παράγοντας σε κυβερνητικές πολιτικές και κοινωνικές αλλαγές [1, 2, 3, 4]. Με την υιοθέτηση των ΤΠΕ, δίνεται η δυνατότητα καλύτερης διαχείρισης των διαφόρων ζητημάτων που σχετίζονται με τον τουρισμό, αλλά και η παροχή ευφυών υπηρεσιών που εστιάζουν στην αύξηση των ποσοστών ικανοποίησης των τουριστών. Ο Έξυπνος Τουρισμός μπορεί έτσι να θεωρηθεί και ως εξειδίκευση των *Έξυπνων Πόλεων*, στοχεύοντας στην αξιοποίηση υπάρχοντων ΤΠΕ και υποδομών για την παροχή υπηρεσιών μείζονος σημασίας σε τουρίστες πριν, κατά τη διάρκεια αλλά και μετά από την επίσκεψή τους σε κάποιο τουριστικό προορισμό [5].

Οι υπηρεσίες αυτές συνδυάζουν τεχνολογίες διαφόρων ειδών, που αφορούν τόσο το υλικό, όσο και το λογισμικό, όπως δίκτυα ασύρματης επικοινωνίας και δίκτυα αισθη-

τήρων, φορητές υπολογιστικές συσκευές (έξυπνων κινητών, tablet, κλπ.), συστήματα συστάσεων, γεωγραφικά πληροφοριακά συστήματα και εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας για την μετάδοση πληροφοριών [6, 7, 8]. Συνολικά, οι υπηρεσίες αυτές περιλαμβάνουν [5, 9]:

- Παροχή πληροφοριών που αφορούν τη μεταφορά
- Πληροφόρηση για τη διαμονή και δυνατότητα απομακρυσμένων κρατήσεων
- Σχεδιασμό δρομολογίων και προτάσεις [10]
- Κατανάλωση υπηρεσιών και συστάσεις για ψυχαγωγία (φαγητό, εκδρομές, κ.α.)
- Συνθήκες σχετικές με τον τουριστικό προορισμό (καιρικές, κυκλοφοριακές, κ.α.) [11]
- Παρακολούθηση ροής κυκλοφορίας τουριστικών πληθών
- Δημιουργία προφίλ επισκεπτών
- Προβλέψεις για τη ροή και ανάπτυξη τουριστικών ροών [12]
- Υπηρεσίες για διαχείριση φυσικών καταστροφών και καταστάσεων εκτάκτου ανάγκης [13, 14, 15]

Οι παραπάνω υπηρεσίες παράγουν και αξιοποιούν μεγάλο όγκο πληροφορίας για τη βέλτιστη λειτουργία τους, με απόρροια την απαίτηση για αρμόζουσες τεχνικές και υποδομές που να στηρίζουν τις ανάγκες τους. Επιπρόσθετα, αναγκαία προϋπόθεση είναι η αξιόπιστη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, ιδιαίτερος σε περιπτώσεις που είναι αναγκαίες για την ασφάλεια, ή ακόμα και διάσωση, σε καταστάσεις εκτάκτου ανάγκης. Η ποικιλομορφία των υπηρεσιών υπό εξέταση θέτει αρκετούς περιορισμούς, που εξαρτώνται από την εκάστοτε υπηρεσία, και πρέπει να διευθετηθούν αναλόγως. Οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν:

1. την ικανότητα της υποδομής στην επεξεργασία και μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων·
2. αξιόπιστη επικοινωνία με χαμηλούς χρόνους μετάδοσης·
3. υψηλή ρυθμαπόδοση· και

4. ευελιξία σε διάφορες συνθήκες δικτύων και υπηρεσιών.

Οι έξυπνες πόλεις και οι έξυπνοι προορισμοί είναι περιβάλλοντα πλούσια σε ασύρματους αισθητήρες που καλύπτονται από τα *ασύρματα δίκτυα αισθητήρων* που έχουν διαμορφωθεί. Τέτοιου είδους δίκτυα συνήθως είναι κατανεμημένα στο χώρο με τρόπο τέτοιο, ώστε να καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις, αλλά αρκετά πυκνό για να υπάρχει πλεονασμός στις επιλογές δρομολόγησης. Ακόμα, σχεδιάζονται με στόχο τη δυνατότητα λειτουργίας τους σε ακραίες συνθήκες, όπου συμβατικά συστήματα και δίκτυα καταρρέουν λόγω φυσικών καταστροφών, και μπορούν να εξυπηρετήσουν ως εναλλακτική λύση για τη διεξαγωγή επικοινωνίας [16]. Για αυτούς τους λόγους, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων θεωρούνται αξιόπιστη δικτυακή υποδομή για την υποστήριξη της λειτουργίας υπηρεσιών έξυπνου τουρισμού.

Δεδομένης της διαφορετικότητας των απαιτήσεων μεταξύ των υπηρεσιών έξυπνου τουρισμού, σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται μία προσέγγιση για την παροχή *προσαρμοσμένες δικτυακές υπηρεσίες* χρησιμοποιώντας το ίδιο υποκείμενο, χαμηλού κόστους, δίκτυο. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην ιδέα ότι διαφορετικές υπηρεσίες ή εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά *virtual backbone networks*, που είναι δυνατό να αποτελούνται από κόμβους που πληρούν ειδικά κριτήρια επιλογής, με σκοπό την ικανοποίηση συγκεκριμένων απαιτήσεων. Για την επίτευξη κατασκευής ενός *virtual backbone network*, χρησιμοποιούνται τα *συνδεδεμένα κυριαρχικά σύνολα*, ή *Connected Dominating Sets (CDS)* [17].

Οι τεχνικές CDS που εφαρμόζονται σε δίκτυα αποσκοπούν στη δημιουργία ενός συνδεδεμένου υποσυνόλου D , τέτοιου ώστε όλοι οι κόμβοι του δικτύου είτε να ανήκουν στο D , είτε να απέχουν απόσταση ενός άλματος (hop) από αυτό. Η έννοια αυτή μπορεί να γενικευτεί, ώστε οι κόμβοι να απέχουν το πολύ d hops, γνωστό και ως d -CDS. Με βάση την ιδέα ότι διαφορετικές υπηρεσίες ή εφαρμογές μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά *virtual backbone networks*, μπορούν να κατασκευαστούν πολλαπλά CDS για να διευκολύνουν τη λειτουργία των διαφόρων υπηρεσιών, ανάλογα με τις απαιτήσεις τους. Σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας είναι σημαντικό: α) οι κόμβοι που φιλοξενούν τις υπηρεσίες να περιλαμβάνονται στο CDS για την παροχή αξιόπιστης επικοινωνίας, και β) κεντρικοί κόμβοι να μην κατακλύζονται από τη συμμετοχή τους σε μεγάλο πλήθος CDS και την χρήση τους από πολλές υπηρεσίες.

Α΄.1 Βιβλιογραφική Έρευνα

Στη δουλειά [18] υποστηρίζεται ότι μία σημαντική πρόκληση που συναντάται σε δίκτυα έξυπνων πόλεων, και κατ' επέκταση σε εφαρμογές και υπηρεσίες έξυπνου τουρισμού, είναι το πως να διατηρηθεί η ποιότητα μιας υπηρεσίας, ή quality of service (QoS). Σύμφωνα με αυτή τη δουλειά, το QoS είναι σημαντικό, καθώς καθιστά ικανή την ύπαρξη διαφορετικών επιπέδων προτεραιότητας για διαφορετικούς χρήστες, δεδομένα, ή αιτήματα προγραμμάτων και εγγυάται την υψηλή απόδοση ροών δεδομένων. Στη [19], οι συγγραφείς υποστηρίζουν την υψηλή σημασία που έχουν τα δίκτυα σε έξυπνες πόλεις και προτείνουν λύσεις σε κοινά προβλήματα, όπως είναι η ευελιξία, κλιμάκωση, καθυστερήσεις επικοινωνίας, αξιοπιστία, απώλεια δεδομένων, εξισορρόπηση φορτίων, αποτυχίες πόρων και σημαντικές αλλαγές στο δίκτυο, που παρέχουν τεχνικές βασισμένες σε (θεωρητικές) έννοιες θεωρίας γράφων. Επιπλέον, τεχνικές, που στηρίζονται σε Dominating sets, Spanning Subgraphs και Partitioning, μελετώνται ως προσεγγίσεις που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ροής. Όσον αφορά τα CDS, στη [20] υποστηρίζεται πως οι αλγόριθμοι CDS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή backbone network σε fog computing και δηλώνεται ότι προγενέστερες έρευνες δεν εστιάζουν στην κατασκευή CDS λαμβάνοντας υπόψη εφαρμογές και τις απαιτήσεις τους. Αντί αυτού, είναι σύνηθες οι τεχνικές κατασκευής CDS να στηρίζονται σε παραμέτρους που αφορούν το δίκτυο, όπως η πυκνότητα, το κόστος δρομολόγησης, η τοποθεσία, η ενέργεια και η αξιοπιστία.

Μία από τις σημαντικότερες συνεισφορές στη μελέτη των d -CDS, για την περίπτωση των ασύρματων ad-hoc δικτύων, είναι η [21], που αποδεικνύει ότι η κατασκευή ενός minimum d -CDS (d -MCDS), δηλαδή του d -CDS με το μικρότερο δυνατό μέγεθος, είναι NP-complete. Έπειτα, προτείνει μία τεχνική που βασίζεται σε clustering για την προσεγγιστική εύρεση αυτού. Μία μεγάλη ποικιλία άλλων μεθόδων έχει διερευνηθεί, μερικές από τις οποίες ακολουθούν κεντριοποιημένη λογική [17], ενώ οι εναπομείνουσες διαιρούνται [22] σε κατανεμημένες [23, 24] και μεθόδους που βασίζονται σε τοπική πληροφορία [25, 26].

Η κατασκευή ενός (d -)CDS έχει μελετηθεί σχολαστικά στη βιβλιογραφία και έχει προκύψει ένα μεγάλο πλήθος μεθόδων για την επίτευξή της. Αυτές περιλαμβάνουν την ένωση των κόμβων του Maximal Independent Set ενός δικτύου [27], χρησιμοποιώντας σε ορισμένες περιπτώσεις δέντρα Steiner [28]. Ένας αλγόριθμος, που προτάθηκε πρόσφατα και ανήκει σε αυτή την κατηγορία, είναι ο CS-Cluster [29], ο οποίος φάνηκε

να αποδίδει σημαντικά καλύτερα από προηγούμενες προσπάθειες. Πολλές άλλες προσεγγίσεις που αξιοποιούν τεχνικές clustering [30] έχουν ερευνηθεί, καθώς και άλλες, που στηρίζονται σε spanning trees [23].

Ένας άπληστος, κατανεμημένος αλγόριθμος, που προστέθηκε πρόσφατα στην υπάρχουσα γκάμα αλγορίθμων κατασκευής d -CDS, διαφέρει σε μερικά βασικά σημεία από προηγούμενους, ενώ ταυτόχρονα αποδίδει εξίσου καλά, ή και ακόμα καλύτερα απ' ότι ο CS-Cluster [29] και ο [17]. Σύμφωνα με αυτόν, χρησιμοποιείται μόνο τοπική πληροφορία από κάθε κόμβο, όπου ο καθένας συλλέγει μέχρι και τους $(d + 1)$ -hop γείτονές του. Μετέπειτα, ένας κόμβος επιλέγεται αυθαίρετα για την εκκίνηση της εύρεσης του d -CDS. Εφόσον έχει συλλεχθεί η απαραίτητη πληροφορία, είναι δυνατή η κατασκευή πολλαπλών d -CDS, ποικίλων d , από διαφορετικούς αρχικούς κόμβους. Ο αλγόριθμος αυτός περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο ;;, καθώς χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Α΄.2 Αποτελέσματα και Συνεισφορά

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας και με βάση τα προηγούμενα, ένας προϋπάρχων αλγόριθμος επεκτείνεται για την κατασκευή d -CDS [24], ώστε να λαμβάνονται υπόψη κριτήρια επιλογής κόμβων για την κατασκευή virtual backbone networks που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των υπηρεσιών ως προς το δίκτυο. Ένα ασύρματο δίκτυο αισθητήρων αποτελούμενο από χαμηλού κόστους ειδικά σχεδιασμένων κόμβων, που στηρίζονται στην πλατφόρμα Arduino καθώς και σε κεραίες XBee, κατασκευάζεται και στήνεται στο χώρο του Ιονίου Πανεπιστημίου. Ένα σύνολο πειραμάτων διεξάγεται, που στοχεύει στην εξέταση των ζητημάτων που προκύπτουν κατά την κατασκευή των virtual backbone networks με τον d -CDS αλγόριθμο που μελετάται, για την περίπτωση όπου $d = 1$ (ή απλά CDS).

Α΄.3 Δομή

Η παρούσα διατριβή έχει δομηθεί με τον ακόλουθο τρόπο. Στο Κεφάλαιο Β΄ παρουσιάζονται αναλυτικότερα διαφορετικοί τρόποι κατασκευής CDS και η χρησιμότητά τους στα δίκτυα, καθώς και η επέκταση που έγινε σε προηγούμενο αλγόριθμο. Στο Κεφάλαιο Γ΄ περιγράφονται λεπτομερώς τα διαφορετικά στοιχεία του συστήματος, ο λόγος

που επιλέχθηκαν αυτά και οι παράμετροι λειτουργίας τους. Στο Κεφάλαιο Δ΄ επεξηγούνται τα πειράματα και ο τρόπος με τον οποίο αυτά πραγματοποιήθηκαν, καθώς και τα αποτελέσματα που εξήχθησαν. Τέλος, στο Κεφάλαιο Ε΄ γίνεται η σύνοψη του περιεχομένου της εργασίας και των όσων επιτεύχθηκαν κατά την εκπόνησή της, αλλά και πιθανές βελτιώσεις και μελέτες που θα μπορούσαν να γίνουν στο μέλλον.

Κεφάλαιο Β΄

Κατασκευή Connected Dominating Set

Η κατασκευή ενός Connected Dominating Set, πέρα από τον τομέα των μαθηματικών και της θεωρίας γράφων, έχει προσελκύσει ενδιαφέρον ως μέσο δημιουργίας virtual backbone network σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων. Η δομή αυτή εξυπηρετεί στην ιεραρχική διαχείριση ενός δικτύου, με όφελος τη βελτίωση της απόδοσής του και την ευκολότερη επεκτασιμότητά του. Παρ' όλ' αυτά, η κατασκευή ενός CDS με το μικρότερο δυνατό μέγεθος έχει αποδειχτεί πως είναι NP-complete, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη προσεγγιστικών μεθόδων για την κατασκευή τους. Οι αρχές τέτοιων μεθόδων παρουσιάζονται περιληπτικά σε αυτό το κεφάλαιο, καθώς και ο αλγόριθμος που επεκτάθηκε στα πλαίσια της διατριβής.

Β΄.1 Backbones στα Δίκτυα

Στα παραδοσιακά δίκτυα, η ιεραρχική διαχείριση της υποδομής είναι το κλειδί στην αποδοτική ανάπτυξή τους σε ευρεία κλίμακα. Έτσι, συχνά χρησιμοποιείται η έννοια του backbone για συχνές ενέργειες, όπως είναι τα broadcast και η χρονοδρομολόγηση, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του φόρτου που επιφέρουν αυτές στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, ένα backbone αποτελεί ένα σημαντικό πυρήνα του δικτύου, ο οποίος συνενώνει τα διαφορετικά μέρη του, τα οποία πιθανά έχουν πρόσβαση στο δίκτυο με διαφορετικούς τρόπους, και χαρακτηρίζεται από υψηλές επιδόσεις και αξιοπιστία. Υπάρχουν διάφοροι τύποι backbone, ανάλογα με το είδος και τις ανάγκες του εκάστοτε δικτύου.

Παρόλ' αυτά, η κινητικότητα που χαρακτηρίζει τα mobile ad-hoc networks και η κατανομημένη φύση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων κάνουν τη χρήση των συμβατικών μεθόδων διαχείρισης δικτύων αρκετά πιο περίπλοκη, αφού στηρίζονται στην προκαθορισμένη υποδομή τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις, συχνά χρησιμοποιούνται τα CDS για την εγκαθίδρυση virtual backbones, όπου οι κόμβοι που ανήκουν στο CDS χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες που επιβαρύνουν σημαντικά το δίκτυο.

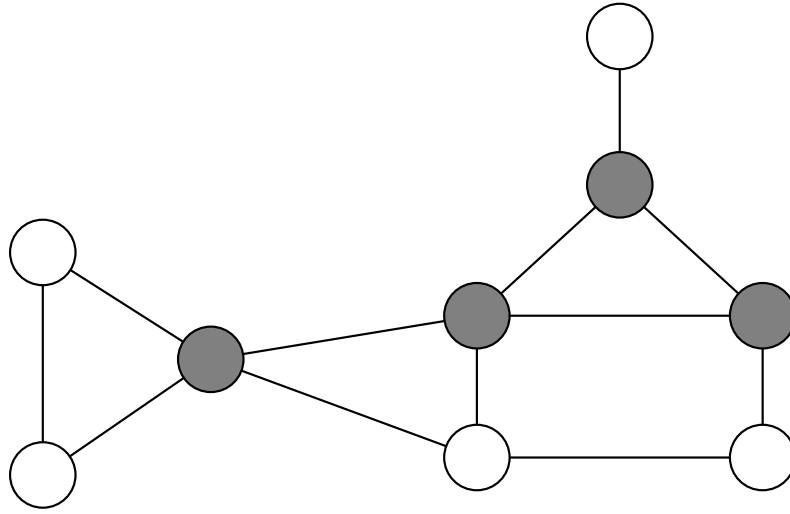
Το μέγεθος του backbone, άρα και το μέγεθος του CDS, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την αποτελεσματικότητά του. Συνεπώς, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την κατασκευή του πρέπει να εγγυάται ότι το μέγεθος του CDS θα είναι το μικρότερο δυνατό, γνωστό ως Minimum Connected Dominating Set (MCDS). Η κατασκευή ενός MCDS έχει αποδειχτεί πως είναι NP-complete, οπότε οι αλγόριθμοι που έχουν προκύψει είναι προσεγγιστικοί και δεν μπορούν να εγγυηθούν την κατασκευή αυτού. Για την αξιολόγηση αυτών, συνήθως χρησιμοποιείται η αναλογία του CDS που κατασκευάζεται προς το μέγεθος του MCDS, δηλαδή $|CDS|/|MCDS|$, γνωστή και ως αναλογία προσέγγισης.

Έτσι η κατασκευή ενός backbone μέσω CDS προσφέρει τα εξής οφέλη [22]:

- Αποδοτική δρομολόγηση πακέτων μέσω των κόμβων που αποτελούν το backbone [31, 32, 33].
- Μείωση διπλότυπων πακέτων broadcast και multicast, εκτελώντας τη διαδικασία κατά μήκος του CDS.
- Καλύτερη διαχείριση της ενέργειας, αφού οι κόμβοι που δεν ανήκουν στο CDS δε χρειάζεται να είναι συνεχώς ενεργοί [34].
- Προώθηση πληροφορίας σχετικά με την ποιότητα των ζεύξεων του δικτύου, για την επιλογή διαδρομής σε συγκεκριμένες περιπτώσεις [35].

Β'.2 Τρόποι Κατασκευής CDS

Η κατασκευή των (d -)CDS έχει μελετηθεί εκτενώς και οι αλγόριθμοι που έχουν σχεδιαστεί με στόχο αυτήν είναι πολλοί. Πέρα από το μέγεθος του CDS, μερικά σημαντικά χαρακτηριστικά αυτού είναι η διάμετρός του αλλά και ο απαιτούμενος αριθμός των μηνυμάτων. Σημαντικότερος, όμως, είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η κατασκευή του, ο οποίος μπορεί να είναι είτε κεντριοποιημένος είτε μη κεντριοποιημένος.



Σχήμα Β'.1: Παράδειγμα CDS σε γράφο. Οι γκρι κόμβοι είναι αυτοί που απαρτίζουν το CDS.

Οι κεντριοποιημένοι αλγόριθμοι αξιοποιούν ολική πληροφορία, έχοντας πλήρη γνώση της τοπολογίας του δικτύου σε έναν κόμβο, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την επιλογή των κόμβων που θα συνιστούν το CDS. Αυτό συνήθως οδηγεί στη μείωση του $|CDS|$, όμως δεν είναι πάντοτε εφικτό, σε περιπτώσεις, όπου οι πόροι των κόμβων δεν είναι επαρκείς για την κλίμακα του δικτύου, ή, λόγω κινητικότητας των κόμβων, η τοπολογία μεταβάλλεται συνεχώς. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αλγορίθμου κεντριοποιημένης κατασκευής CDS αποτελεί αυτός των Guha και Khuller [17].

Αντίθετα, στους κατανεμημένους αλγορίθμους, οι αποφάσεις λαμβάνονται αποκεντριοποιημένα, με κάθε κόμβο να κρίνει ποιοι είναι οι καταλληλότεροι για τη σύνθεση του CDS. Αυτό δε σημαίνει απαραίτητα πως η πληροφορία που απαιτείται δεν είναι ολική, αφού υπάρχουν αλγόριθμοι που ξεκινούν από ένα σημείο και καταναίμουν το φόρτο εργασίας σταδιακά στο δίκτυο. Ένα υποσύνολο των κατανεμημένων αλγορίθμων βασίζεται σε μόνο τοπική πληροφορία, που αρμόζουν και καλύτερα στα δυναμικά περιβάλλοντα.

Ένας σχετικά απλός αλγόριθμος για την κατανεμημένη κατασκευή ενός d -CDS παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Β'.3 Περιγραφή ενός Κατανεμημένου Αλγορίθμου Κατασκευής d -CDS

Ο αλγόριθμος που περιγράφεται σε αυτή την ενότητα προτάθηκε στη δουλειά [24] και στηρίζεται στην κατανεμημένη κατασκευή ενός d -CDS, όπου κάθε κόμβος απαιτεί τοπική πληροφορία. Η περιγραφή του θα εστιάσει κυρίως στην περίπτωση του απλού CDS (δηλ. 1-CDS), όμως η γενίκευσή του για d -CDS ακολουθεί την ίδια λογική. Μία έννοια που επαναλαμβάνεται συχνά είναι αυτή του συνόλου των k -hop γειτόνων ενός κόμβου v , η οποία στο εξής θα συμβολίζεται ως $\delta_k(v)$.

Για να ικανοποιούνται οι ιδιότητες ενός CDS, πρέπει να μην υπάρχει κόμβος, του οποίου η απόσταση από κάποιον κόμβο στο CDS να υπερβαίνει το 1 hop. Επομένως, πρώτο βήμα είναι κάθε κόμβος u να βρει το σύνολο των κόμβων που απέχουν απόσταση 2 hop από αυτόν, δηλαδή το $\delta_2(u)$, που αποτελούν τους κόμβους στόχους. Επόμενο στάδιο είναι να γνωρίζει, μέσω ποιών γειτόνων, από αυτούς στο $\delta_1(u)$, μπορεί να επικοινωνήσει με τους $\delta_2(u)$, καθώς αυτοί είναι οι υποψήφιοι για την κατασκευή του CDS.

Το ζήτημα, πλέον, είναι να γίνει η κατάλληλη επιλογή των υποψηφίων, ώστε το τελικό CDS να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο. Φυσικά, η κατασκευή του MCDS έχει αποδειχτεί πως είναι NP-complete, οπότε είναι δυνατή μόνο η προσέγγιση αυτού. Ένας αρκετά απλός τρόπος αντιμετώπισης τέτοιων ζητημάτων είναι η επιλογή του κόμβου που ικανοποιεί κάθε φορά καλύτερα κάποιον ευριστικό κανόνα. Οι αλγόριθμοι που ακολουθούν αυτή τη λογική λέγονται *άπληστοι*, αφού δεν κοιτούν αν ο συνδυασμός των επιλογών τους θα οδηγήσει στην καλύτερη λύση, αλλά σε κάθε βήμα κάνουν απλά την καλύτερη τοπική δυνατή επιλογή, με βάση τον ευριστικό κανόνα, ευελπιστώντας ότι, έτσι, θα οδηγηθούν κοντά στην καθολικά βέλτιστη.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ένας πιθανός ευριστικός κανόνας, που μπορεί να οριστεί, είναι ο αριθμός των κόμβων στόχων που ικανοποιεί κάθε υποψήφιος. Δηλαδή, ο u πρέπει να υπολογίσει σε κάθε βήμα για κάθε υποψήφιο κόμβο $v \in \delta_1(u)$, τον αριθμό των κόμβων στο $\delta_2(u)$ με τους οποίους επιτυγχάνεται επικοινωνία μέσω του v , που αντιστοιχεί στο σύνολο $\delta_1(v) \cap \delta_2(u)$. Οι κόμβοι που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία εισάγονται στο CDS και καλούνται να την επαναλάβουν, έως ότου να παύσει η προσθήκη νέων κόμβων σε αυτό. Έχοντας ορίσει αυτά τα βήματα, ξεκινώντας από έναν αυθαίρετο κόμβο μπορεί να κατασκευαστεί κι ένα CDS.

Με βάση τα παραπάνω, διακρίνονται δύο φάσεις του αλγορίθμου:

1. Συλλογή πληροφορίας, ή αρχικοποίηση, μέχρι 2 hops μακριά, για την εύρεση των στόχων και των υποψηφίων.
2. Διαδικασία κατασκευής CDS, ξεκινώντας από κάποιον κόμβο και προσθέτοντας διαδοχικά νέους σε αυτό.

Αξίζει να αναφερθεί πως, λόγω της κατανεμημένης φύσης του αλγορίθμου, κάθε κόμβος που εισάγεται στο CDS δεν έχει γνώση αυτών που βρίσκονται ήδη σε αυτό και, κατ' επέκταση, αν κάποιος κόμβος στόχος έχει ήδη ικανοποιηθεί από άλλον. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προσθήκη επιπλέον κόμβων στο CDS, οι οποίοι δεν ικανοποιούν συνολικά κανένα νέο κόμβο. Ακόμα, η επιλογή του αρχικού κόμβου μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση του αλγορίθμου, αλλά αυτό θα μπορούσε να λυθεί με διάφορες τροποποιήσεις. Εναλλακτικά, μιας και η φάση κατασκευής είναι αρκετά σύντομη, σε σχέση με αυτή της συλλογής πληροφορίας, μπορεί να γίνει με πολλαπλούς διαφορετικούς αρχικούς κόμβους και να επιλεγεί το μικρότερο CDS που θα προκύψει.

B'.3.1 Ανάλυση του Αλγορίθμου

Ορθότητα

Η ορθότητα του αλγορίθμου αποδεικνύεται, κάνοντας την υπόθεση ότι υπάρχει ένας κόμβος u του δικτύου, ο οποίος να απέχει πάνω από d hops από κάθε κόμβο v στο d -CDS. Για τους κόμβους v που απέχουν απόσταση $d + 1$ hops από τον u , το σύνολο κόμβων στόχων δεν θα είναι κενό. Αυτό είναι αδύνατο, αφού για να έχει τελειώσει η φάση κατασκευής, θα πρέπει κάθε κόμβος του d -CDS να ικανοποιεί κάθε κόμβο στόχο. Επομένως, είναι αδύνατο να υπάρχει κόμβος $d + 1$ hops μακριά από κάποιον κόμβο του d -CDS, άρα προφανώς δεν μπορεί να υπάρχει κόμβος $d + 2$ hops μακριά. Τελικά, δεν είναι δυνατό να υπάρχει κόμβος που να απέχει απόσταση μεγαλύτερη του d από το d -CDS.

Αριθμός Μηνυμάτων

Κατά τη φάση αρχικοποίησης, όλοι οι κόμβοι u μεταδίδουν d μηνύματα σε όλους τους $d_1 u$ γείτονες. Επομένως, η πολυπλοκότητα των μηνυμάτων θα είναι $O(nd\Delta_1)$, όπου Δ_1 ο μέγιστος αριθμός γειτόνων ενός κόμβου στο δίκτυο. Για τη φάση κατασκευής, στέλνεται ένα μήνυμα σε κάθε κόμβο του d -CDS, οπότε θα έχει πολυπλοκότητα $O(|d| -$

CDS)). Αξίζει να αναφερθεί ότι η φάση αρχικοποίησης, που παρουσιάζει σχετικά μεγάλο κόστος, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μόνο μία φορά και από εκεί και στο εξής, η φάση κατασκευής μπορεί να λάβει χώρα όσες φορές χρειαστεί.

Χρόνος Τερματισμού και Επεξεργασίας

Αν και στην πραγματικότητα η φάση κατασκευής του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ασύγχρονη, συνηθίζεται ο χρόνος τερματισμού να υπολογίζεται θεωρώντας πως όλες οι λειτουργίες των κόμβων πραγματοποιούνται ταυτόχρονα και ότι όλα τα μηνύματα λαμβάνονται την ίδια χρονική στιγμή. Συνεπώς, ο αριθμός των βημάτων είναι άνω φραγμένος από τη διάμετρο του δικτύου D μείον τον αριθμό των hops d , δηλαδή $O(D - d)$. Για το χρόνο επεξεργασίας, χρειάζεται να μελετηθεί κυρίως η συμπεριφορά των κόμβων κατά τη φάση κατασκευής, όπου, για να επιλεγεί ένας 1-hop γείτονας, πρέπει να ολοκληρωθούν δύο αναζητήσεις στο σύνολο των υποψήφιων γειτόνων. Δεδομένου ότι οι υποψήφιοι γείτονες είναι υποσύνολο των $\delta_1(u)$, η χειρότερη περίπτωση θα είναι $2|\delta_1(u)|$, που είναι άνω φραγμένη από $2\Delta_1$. Αυτοί οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για $\delta_{d+1}(u)$ κόμβους και αφού $\delta_{d+1}(u) \leq \Delta_{d+1}$, συνεπάγεται πως η πολυπλοκότητα για κάθε επανάληψη είναι $2\Delta_1\Delta_{d+1}$, οπότε $O(\Delta_1\Delta_{d+1})$.

Β'.3.2 Επέκταση του Αλγορίθμου

Η κύρια παρατήρηση που χρειάζεται να γίνει, για την κατανόηση της επέκτασης του αλγορίθμου, είναι πως στο στάδιο που επιλέγονται οι υποψήφιοι ενός κόμβου u , που τελικά θα εισαχθούν στο CDS, είναι πιθανό να υπάρχουν πολλαπλοί από αυτούς, που να ικανοποιούν ίδιο αριθμό κόμβων στόχων. Στην περίπτωση αυτή, μπορούμε να επεκτείνουμε τον ευριστικό κανόνα, ώστε να λαμβάνει περισσότερες παραμέτρους υπόψη, το είδος, όσο και το πλήθος, των οποίων μπορεί να ποικίλει. Για παράδειγμα, αν κύριο μέλημα είναι η μείωση του μεγέθους του CDS, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ο βαθμός του υποψηφίου, δηλαδή το πλήθος των γειτόνων του, αφού θα μπορούσε να θεωρηθεί πως αυτός έχει περισσότερη πληροφορία για το δίκτυο και άρα είναι ο καταλληλότερος. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να περιλαμβάνει πληροφορίες για τα επίπεδα ενέργειας του κόμβου, CDS.

Είναι προφανές πως η τροποποίηση που περιγράφεται είναι αρκετά μικρή, αλλά ταυτόχρονα ιδιαίτερα ευέλικτη. Η πληροφορία για τις παραμέτρους αυτές μπορεί να συμπεριληφθεί στη φάση συλλογής πληροφορίας και το να ληφθεί υπόψη κατά την κατασκευή

δεν αυξάνει τη χρονική πολυπλοκότητα του αλγορίθμου. Ακόμα, για να φανεί σημαντική διαφορά σε σχέση με τον αρχικό αλγόριθμο, θα πρέπει το δίκτυο να είναι αρκετά πυκνό, ώστε να υπάρχουν συχνά υποψήφιοι που ικανοποιούν ίδιο αριθμό κόμβων, αφού η παράμετρος δεν είναι κύρια προτεραιότητα του ευριστικού κανόνα. Για το λόγο αυτό, εξετάζεται η αποτελεσματικότητα αυτής της επέκτασης στα πλαίσια ενός περιβάλλοντος έξυπνου τουρισμού, όπου υπάρχει μεγάλο πλήθος κόμβων και διαφορετικών εφαρμογών, με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται η δυνατότητα εφαρμογής της.

B'.4 Virtual Backbones για Προσαρμόσιμες Υπηρεσίες Δικτύων

Οι συμβατικές υποδομές δικτύων έχουν αποδειχτεί αποτελεσματικές στις περισσότερες περιπτώσεις, αλλά η ανάπτυξή τους, ώστε να παρέχουν μαζική, ασύρματη σύνδεση συνθηθίζει να είναι υψηλή σε χρηματικό κόστος, να μην είναι ευέλικτη και να αποτυγχάνει σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών. Αφετέρου, η τοποθέτηση ενός ασύρματου δικτύου αισθητήρων είναι χαμηλή σε κόστος, ευέλικτη και ανθεκτική σε σφάλματα. Μεταξύ της πληθώρας των υπηρεσιών που παρέχει ένας τουριστικός προορισμός, είναι πιθανό να υπάρχουν υπηρεσίες σε εγρήγορση για περιστατικά υγειονομικής περίθαλψης, παρέμβασης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και προστασίας από απειλές ασφάλειας ή φυσικών καταστροφών. Οι υπηρεσίες αυτές αναμένεται να είναι αξιόπιστες και να μπορούν να συνεχίσουν τη λειτουργία τους, ακόμα και σε ακραίες συνθήκες, ώστε να είναι σε θέση να παρέχουν άμεση ανταπόκριση. Ένα υποκείμενο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων είναι πιθανό να υποστηρίξει τη λειτουργία τέτοιων υπηρεσιών, αλλά και άλλων ειδών υπηρεσιών, όπως συλλογή δεδομένων αισθητήρων.

Επιπρόσθετα, σε ένα τέτοιου τύπου περιβάλλον, είναι πιθανή η ύπαρξη ετερογενών δικτύων, αποτελούμενα από κόμβους ποικίλων δυνατοτήτων και δικτυακές συνδέσεις που διαφέρουν σε χωρητικότητα και ταχύτητα. Ακόμη και σε περιπτώσεις ομογενών δικτύων, είναι πιθανό να μην μπορούν όλοι οι κόμβοι να προσφέρουν την ίδια απόδοση για τους σκοπούς μιας υπηρεσίας ως προς το δίκτυο ή την υπολογιστική ισχύ, λόγω της τρέχουσας κατάστασης χρήσης τους, μιας και κεντρικοί κόμβοι μπορεί να λειτουργούν ήδη ως κόμβοι ή ρουτερς σε άλλα virtual backbone networks. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι προφανές πως τα κατασκευαζόμενα virtual backbone networks θα πρέπει να σχεδιαστούν με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχουν τις μέγιστες δυνατές επιδόσεις με

βάση τις απαιτήσεις κάθε υπηρεσίας. Επιπλέον, η προτεινόμενη προσέγγιση θα μπορούσε να παρέχει πολλαπλά virtual backbone networks, όπου το καθένα υποστηρίζει τη λειτουργία διαφορετικών υπηρεσιών με διαφορετικές απαιτήσεις από το υποκείμενο ασύρματο δίκτυο αισθητήρων.

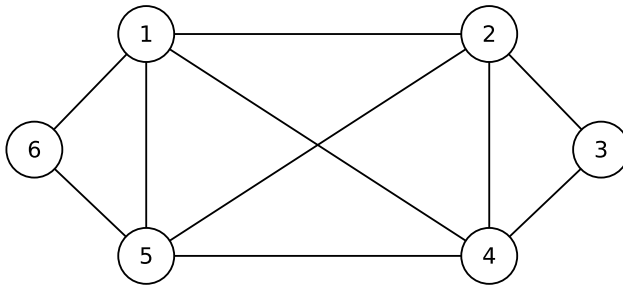
Η προτεινόμενη προσέγγιση βασίζεται στην αποκεντριοποιημένη κατασκευή CDS, όπου η εγκαθίδρυση του virtual backbone network πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μόνο τοπική πληροφορία, με την προσθήκη ότι οι κόμβοι που το απαρτίζουν είναι αυτοί που θεωρούνται οι πιο κατάλληλοι, μεγιστοποιώντας την απόδοση μιας δεδομένης υπηρεσίας. Η επιλογή των κόμβων μπορεί να πραγματοποιηθεί στηριζόμενη σε ένα σύνολο από κριτήρια επιλογής που να σχετίζονται με την απόδοση που προσφέρουν οι κόμβοι για μία δεδομένη υπηρεσία, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν: α) την επεξεργαστική ισχύ και διαθέσιμη μνήμη των κόμβων, β) την κατάσταση χρήσης τους και γ) την ποιότητα των συνδέσεων του δικτύου. Τα κριτήρια επιλογής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκφράσουν την καταλληλότητα ενός κόμβου για μια δεδομένη υπηρεσία. Επομένως, για ένα δεδομένο κόμβο n_i , είναι δυνατό να υπολογιστεί η καταλληλότητα a_{n_i} αυτού για μία εξεταζόμενη υπηρεσία. Η καταλληλότητα A ενός virtual backbone network θεωρείται η μέση τιμή καταλληλότητας των κόμβων που το απαρτίζουν $A = (a_{n_1} + a_{n_2} + \dots + a_{n_i}) / L$, όπου $L = |\text{CDS}|$.

Έτσι, στην υπόλοιπη εργασία εξετάζεται κατά πόσο θα επηρεαστεί η απόδοση του κατανεμημένου αλγορίθμου που περιγράφηκε στην Ενότητα Β'3 καθώς και της επέκτασής του, χρησιμοποιώντας την παράμετρο καταλληλότητας. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιλέχθηκε καθώς ταιριάζει τα χαρακτηριστικά του ταιριάζουν με τις απαιτήσεις αυτής της προσέγγισης, όντας κατανεμημένος κι έχοντας σχετικά χαμηλό κόστος για την κατασκευή πολλών CDS.

Β'.4.1 Παράδειγμα Εφαρμογής της Προσέγγισης

Για να είναι ξεκάθαρα τα βήματα του αλγορίθμου που περιγράφεται και της επέκτασής του, αλλά και να φανεί σε ένα ελεγχόμενο περιβάλλον πως επηρεάζεται από το κριτήριο καταλληλότητας, εξετάζεται η εκτέλεσή του στο δίκτυο που παρουσιάζεται στο Σχήμα Β'.2. Συγκεκριμένα, μελετάται η περίπτωση κατασκευής 1-CDS, ξεκινώντας τη διαδικασία από τον κόμβο n_1 , θεωρώντας πως έχει τελειώσει η φάση αρχικοποίησης του αλγορίθμου, δηλαδή κάθε κόμβος u του δικτύου γνωρίζει τα σύνολα $\delta_1(u)$ και $\delta_2(u)$.

Ο κόμβος n_1 έχει ως κόμβο στόχο το $\delta_2(n_1) = \{n_3\}$, τον οποίο μπορεί να ικανο-



n_i	a_{n_i}
1	66
2	35
3	13
4	98
5	49
6	85

Σχήμα B'.2: Παράδειγμα δικτύου με 6 κόμβους και οι τιμές καταλληλότητας κάθε κόμβου, που έχουν ανατεθεί τυχαία στο εύρος $\{1, 2, 3, \dots, 100\}$.

ποιήσει είτε μέσω του n_2 είτε μέσω του n_4 . Στην περίπτωση του αρχικού αλγορίθμου, η επιλογή μεταξύ αυτών θα γίνει τυχαία, αφού είναι ισοδύναμοι, ικανοποιώντας τον ίδιο αριθμό κόμβων, οπότε έστω ότι θα επιλεγεί ο n_4 . Για το n_4 , ο κόμβος στόχος του θα είναι ο n_6 , τον οποίο μπορεί να ικανοποιήσει μέσω του n_1 και του n_5 . Έστω ότι επιλέγεται ο n_5 , ο οποίος είναι σε θέση να ικανοποιήσει το n_3 μέσω του n_2 ή του n_4 . Αν τελικά επιλεγεί ο n_2 , αυτός επιδιώκει να ικανοποιήσει τον n_6 , μέσω κόμβων οι οποίοι ανήκουν ήδη στο CDS, οπότε η εκτέλεση σταματάει. Έτσι, έχει κατασκευαστεί ένα CDS με $L = |\text{CDS}| = 4$. Αυτό έχει αυξημένο μέγεθος, σε σχέση με το MCDS με $L = 2$, που οφείλεται στους εξής λόγους: α) ισοδύναμοι κόμβοι επιλέγονται τυχαία και β) κάθε ξεχωριστός κόμβος δεν έχει πληροφορία για τους κόμβους που έχουν ήδη ικανοποιηθεί από προηγούμενους κόμβους που ανήκουν στο CDS. Το τελευταίο είναι ένα πρόβλημα ιδιαίτερα δύσκολο να επιλυθεί, αφού θα έπρεπε με κάποιο τρόπο κάθε κόμβος που εισάγεται στο CDS να ενημερώνει ολόκληρο το δίκτυο για τους κόμβους που ικανοποιεί. Αυτό θα επιβάρυνε σημαντικά στο δίκτυο, τόσο σε χρόνο όσο και αριθμό μηνυμάτων.

Αντίθετα, ο πρώτος λόγος αντιμετωπίζεται σχετικά εύκολα, αναπτύσσοντας κάποιο περαιτέρω κριτήριο, πέρα από τον αριθμό των κόμβων στόχων που ικανοποιούνται, για την εισαγωγή ενός κόμβου στο CDS. Αυτό στην προκειμένη τοπολογία θα μπορούσε να είναι κάτι ασήμαντο, όπως να επιλέγεται ο κόμβος με το μικρότερο αναγνωριστικό αριθμό, όμως, σε πραγματικές περιπτώσεις μπορούμε να λάβουμε υπόψη πληροφορίες που πιθανώς να είναι χρήσιμες στην εφαρμογή. Αυτό είναι που προσπαθεί να πετύχει και η προτεινόμενη προσέγγιση, χρησιμοποιώντας το κριτήριο καταλληλότητας κάθε κόμβου. Χρησιμοποιώντας το κριτήριο καταλληλότητας, ο κόμβος n_1 θα επέλεγε τον

κόμβο n_4 , αφού $a_{n_4} > a_{n_2}$, ο οποίος με τη σειρά του θα επέλεγε τον κόμβο n_1 . Έτσι, λήγει η κατασκευή του CDS, έχοντας τελικό μέγεθος $L = |\text{MCDS}| = 2$.

Κεφάλαιο Γ΄

Περιγραφή Συστήματος

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, με σκοπό την εξέταση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης προσέγγισης, κατασκευάζεται ένα ασύρματο δίκτυο. Κάθε κόμβος του δικτύου απαρτίζεται από ένα Arduino Mega 2560 [36], ένα Wireless SD shield [37], καθώς και μία κεραία XBee-PRO S2C [38]. Οι προδιαγραφές τους, καθώς και τα οφέλη που προσφέρει το καθένα από αυτά, παρουσιάζονται αναλυτικά σε αυτό το κεφάλαιο.

Γ΄.1 Πλατφόρμα Arduino

Τα Arduino είναι μία πλατφόρμα ηλεκτρονικών που στηρίζεται τόσο σε προσβάσιμο και φτηνό υλικό όσο και λογισμικό, με στόχο την αλληλεπίδραση των χρηστών με το φυσικό περιβάλλον. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν οδηγήσει στην ευρεία χρήση τους, ιδιαίτερα στο χώρο της εκπαίδευσης, παίζοντας πρωταρχικό ρόλο σε αμέτρητα project, ποικίλης δυσκολίας και περιπλοκότητας. Η πλατφόρμα αυτή βασίζεται στην ιδέα του ανοιχτού σχεδιασμού, κατά την οποία ο σχεδιασμός υλικού και λογισμικού είναι ανοιχτής πρόσβασης, που μπορεί ο καθένας να χρησιμοποιήσει, ή ακόμα και τροποποιήσει, εφόσον το δημοσιεύσει έπειτα με τον ίδιο τρόπο. Το γεγονός αυτό έχει συμβάλει στην συγκέντρωση μιας αρκετά μεγάλης κοινότητας που είναι πάντα πρόθυμη να συνεισφέρει στην ανάπτυξή της πλατφόρμας και έτοιμη να βοηθήσει και να καθοδηγήσει νέους χρήστες.

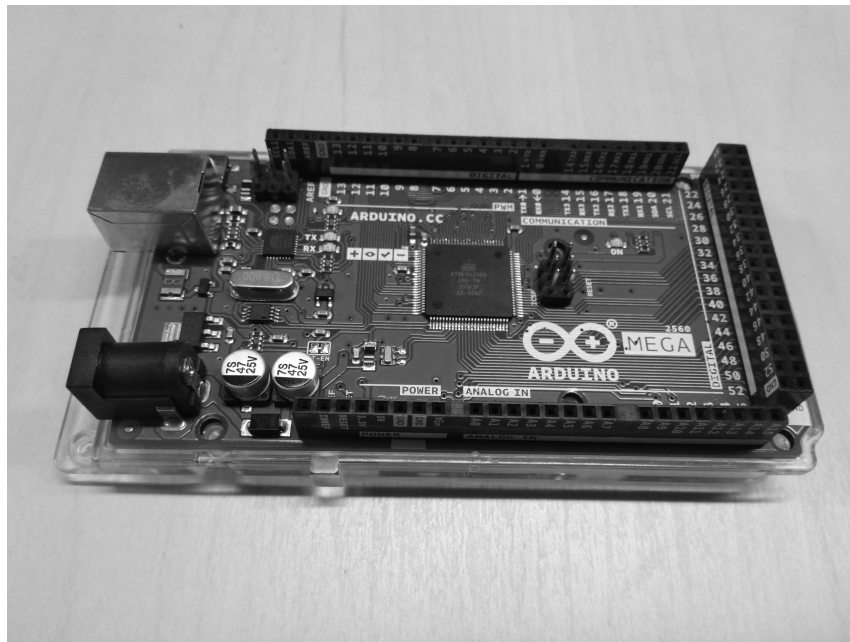
Στο κομμάτι του υλικού, δίνεται η δυνατότητα, μέσω των Arduino boards, του συνδυασμού και ελέγχου διαφόρων ηλεκτρονικών μερών, όπως αισθητήρων, κινητήρων

και οθονών LCD. Ο έλεγχος γίνεται μέσω ενός μικροελεγκτή που βρίσκεται επάνω στην πλακέτα, ενώ στα pins αυτής μπορούν να συνδεθούν τα διάφορα εξαρτήματα, μέσω καλωδίων. Οι πλακέτες διαθέτουν μεγάλο αριθμό pins (μεταβαλλόμενο ανάλογα με το μοντέλο), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σειριακή επικοινωνία μεταξύ συσκευών, ή να μεταφέρουν αναλογικά και ψηφιακά σήματα, ως είσοδο ή έξοδο. Ακόμα, είναι δυνατή η χρήση breadboards για τη διασύνδεση ηλεκτρονικών με την πλακέτα για πιο περίπλοκα projects.

Αντίστοιχα, το λογισμικό έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι φιλικό στη χρήση, ακόμα και για άτομα που δεν είναι εξοικειωμένα με τον χώρο των ηλεκτρονικών ή του προγραμματισμού. Η γλώσσα που χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό των Arduino boards είναι βασισμένη στις C και C++, πράγμα αναμενόμενο δεδομένων των περιορισμών που θέτουν οι δυνατότητες του υλικού, χρήζοντας υπεύθυνο τον προγραμματιστή για την κατάλληλη διαχείριση των πόρων που έχει στη διάθεσή του. Δύσκολη θα ήταν, άλλωστε, διαφορετική επιλογή, δεδομένου του γεγονότος ότι οι γλώσσες αυτές έχουν αποδείξει την αξία τους στο πέρασμα του χρόνου, όντας από τις πλέον διαδεδομένες σε εφαρμογές χαμηλού επιπέδου, όπως είναι τα λειτουργικά και τα ενσωματωμένα συστήματα. Για το λόγο αυτό, είναι βέβαιο πως κάποιος θα μπορεί να βρει δοκιμασμένες λύσεις και απαντήσεις, σε περίπτωση που αντιμετωπίσει κάποια δυσκολία ή αβεβαιότητα για ζητήματα που αφορούν την πραγματοποίηση της ιδέας του.

Ένα πρόγραμμα, εφόσον τηρεί τους κανόνες της γλώσσας αυτής, μπορεί να μεταφορτωθεί μέσω σειριακής σύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή στη μνήμη Flash της πλακέτας κι έπειτα να εκτελεστεί από το μικροελεγκτή. Τα προσωρινά δεδομένα του προγράμματος μπορούν να αποθηκευτούν στη στατική μνήμη τυχαίας προσπέλασης SRAM, ή σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, ακόμα και στη Flash. Τα περισσότερα μοντέλα διαθέτουν αρκετά μικρό μέγεθος SRAM, επομένως είναι αναγκαία η συνετή διαχείριση αυτής και καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το καταλληλότερο board, ανάλογα με τις ανάγκες του προγράμματος.

Οι δυνατότητες των πλακετών μπορούν να ενισχυθούν μέσω περιφερειακών συσκευών, γνωστών ως Arduino shields, που λειτουργούν ως επεκτάσεις και εφαρμόζουν επάνω στα pins. Αυτά χρησιμεύουν κατά κύριο λόγο ως διεπαφές για την επίτευξη επικοινωνίας με άλλες συσκευές, ή ακόμα και τη σύνδεσή τους με το Διαδίκτυο, μέσω Ethernet. Έτσι κι εδώ, επιτρέπουν την επικοινωνία του Arduino με την κεραία XBee καθώς και τη χρήση μνήμης SD.

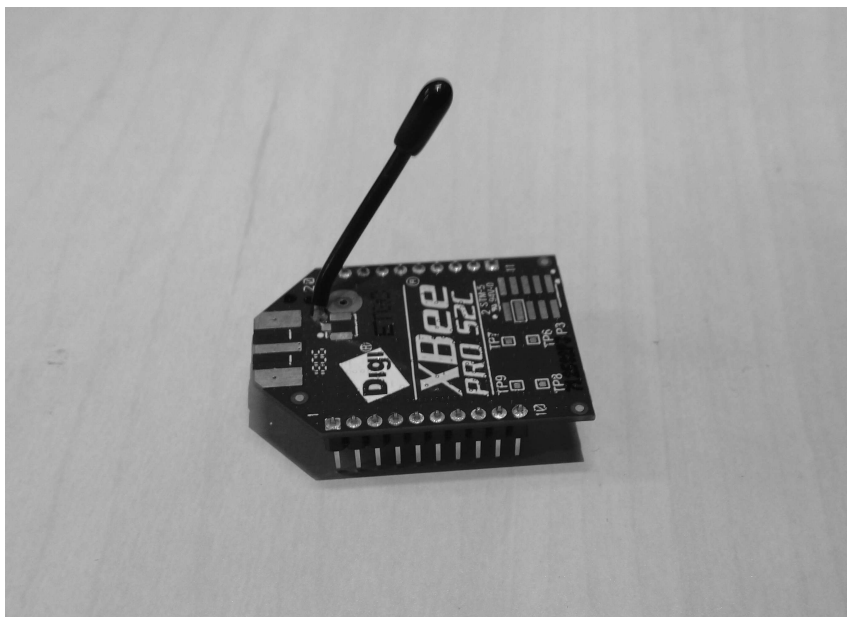


Σχήμα Γ'.1: Φωτογραφία της πλακέτας Arduino Mega 2560, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

Γ'.2 Συσκευή XBee-PRO S2C

Η συσκευή XBee-PRO S2C αποτελεί μία φθηνή και διαδεδομένη λύση για παροχή ασύρματης επικοινωνίας σε ηλεκτρονικές συσκευές. Για την ακρίβεια, χρησιμοποιεί ραδιοκύματα στο εύρος των 2.4GHz, που μπορούν να διανύσουν αποστάσεις μέχρι και των 90 μέτρων σε αστικά περιβάλλοντα, με ταχύτητες που φτάνουν τα 250Kbps. Προορίζεται, κυρίως, για χρήση με μικροελεγκτές, αφού μπορεί να αλληλεπιδράσει με αυτούς μέσω σύνδεσης με Serial Peripheral Interface (SPI) αλλά και Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART). Σχετικά με τον τρόπο επικοινωνίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τρία διαφορετικά πρωτόκολλα: το 802.15.4, το DigiMesh, καθώς και το Zigbee. Έχει σχεδιαστεί έτσι, ώστε να είναι συμβατή με άλλες συσκευές Zigbee, ανεξάρτητα από την κατασκευαστική εταιρεία τους.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Zigbee, το οποίο περιγράφεται στη συνέχεια, σε συνδυασμό με τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται κατά τη λειτουργία αυτού.



Σχήμα Γ'.2: Φωτογραφία της συσκευής XBee-PRO S2C, που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

Γ'.2.1 Περιγραφή Zigbee

Το Zigbee είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας, βασισμένο στο 802.15.4, με κύριο στόχο την παροχή επικοινωνίας σε χαμηλού κόστους, χαμηλής ενέργειας δίκτυα, με χαμηλές απαιτήσεις σε ταχύτητες, που στηρίζονται σε mesh τοπολογίες. Ορίζει τα επίπεδα Network και Application, πάνω από τα προϋπάρχοντα Physical και Medium Access Control (MAC) της στοίβας του 802.15.4. Αυτά παρέχουν υψηλού επιπέδου λειτουργικότητα, όπως είναι η δρομολόγηση πακέτων και η κρυπτογραφημένη επικοινωνία.

Σύμφωνα με αυτό, οι συσκευές διακρίνονται σε τρεις διαφορετικούς τύπους: Coordinator, Router και End Device.

Coordinator

Ο Coordinator έχει τις περισσότερες λειτουργίες στο δίκτυο και πρέπει να υπάρχει μόνο ένας σε αυτό. Είναι υπεύθυνος για το σχηματισμό αυτού, επιλέγοντας το κανάλι στο οποίο θα λειτουργεί, καθώς κι ένα μοναδικό αναγνωριστικό γι αυτό. Ακόμα, καθορίζει την πολιτική ασφαλείας του δικτύου καθώς και το Zigbee Stack Profile,

που προσδιορίζει τη χρήση των συσκευών, των κόμβων που μπορούν να συνδεθούν σε αυτό. Πέρα από αυτές τις αρμοδιότητες, έχει τις ίδιες λειτουργίες με ένα Router και πρέπει να είναι συνεχώς σε λειτουργία.

Router

Οι Routers είναι κυρίως υπεύθυνοι για την προώθηση και δρομολόγηση πακέτων, σε περίπτωση που μία μετάδοση πραγματοποιείται μεταξύ δύο κόμβων που δεν είναι άμεσα συνδεδεμένοι. Για να εκτελέσουν τα καθήκοντά τους, πρέπει πρώτα να έχουν συνδεθεί σε κάποιο δίκτυο που έχει σχηματίσει ένας Coordinator. Όπως και ο Coordinator, πρέπει να παραμένει διαρκώς σε λειτουργία.

End Device

Τα End Devices είναι ένας ιδιαίτερος τύπος συσκευής, με αρκετά περιορισμένες λειτουργίες, που αποσκοπούν κατά κύριο λόγο στην εξοικονόμηση ενέργειας. Αναλυτικότερα, κάθε τέτοια συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με έναν συγκεκριμένο κόμβο, ο οποίος ορίζεται ως πατέρας της. Ο πατέρας είναι υπεύθυνος για τη μεταφορά ενός πακέτου στα παιδιά του, τα οποία μπορούν να παραμένουν απενεργοποιημένα και να ξυπνούν περιοδικά, ώστε να ελέγξουν αν υπάρχει κάποιο πακέτο διαθέσιμο για αυτά.

Γ'.2.2 Τρόποι Λειτουργίας

Η επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και της συσκευής μπορεί να επιτευχθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους, Transparent και Application Programming Interface (API). Σε κάθε περίπτωση, η επικοινωνία γίνεται μέσω των serial buffers του Arduino, αφού βασίζεται στη χρήση της διεπαφής SPI. Για την ακρίβεια, υπάρχουν δύο buffers, ένας για την αποστολή (TX) κι ένας για τη λήψη (RX) δεδομένων.

Transparent

Στον Transparent τρόπο λειτουργίας, η συσκευή χρησιμοποιεί ένα σύνολο προκαθορισμένων παραμέτρων που έχει θέσει ο χρήστης, οι οποίες δεν μπορούν να αλλάξουν κατά τη διάρκεια χρήσης του προγράμματος. Ο μικροελεγκτής όταν θέλει να στείλει ένα μήνυμα, τοποθετεί τα δεδομένα αυτού στον TX buffer, τα οποία θεωρούνται payload του μηνύματος και αποστέλλονται στον προορισμό που έχει οριστεί. Αντίστοιχα,

η συσκευή, που θα λάβει το μήνυμα αυτό, θα στείλει το payload του μηνύματος (και μόνον αυτό) στο μικροελεγκτή της μέσω του RX buffer αυτού.

Συνεπώς, αυτός ο τρόπος λειτουργίας λειτουργεί ουσιαστικά ως υποκατάστατο καλωδίου για τη σειριακή επικοινωνία μεταξύ των δύο μικροελεγκτών. Η επικοινωνία αυτή, βέβαια, επιτυγχάνεται ασύρματα, αλλά είναι αρκετά περιοριστική, αφού δεν μπορεί κανείς, για παράδειγμα, να αλλάξει τον προορισμό ενός μηνύματος κατά την εκτέλεση μιας εφαρμογής. Παρ' όλ' αυτά, είναι η ιδανική επιλογή για σχετικά απλές εφαρμογές, αφού με μερικές μόνο αλλαγές στις παραμέτρους των συσκευών, μπορεί εύκολα να στηθεί ένα λειτουργικό δίκτυο.

Application Programming Interface

Σε λειτουργία API, η επικοινωνία στηρίζεται στην αποστολή και λήψη frames, τα οποία αναπαριστούν λειτουργίες ή γεγονότα για τη συσκευή. Αυτό, για παράδειγμα, επιτρέπει την τροποποίηση των διαφόρων παραμέτρων της συσκευής, ακόμη και κατά τη διάρκεια λειτουργίας της. Έτσι, όλα τα δεδομένα που στέλνονται σε αυτή από το μικροελεγκτή ελέγχονται ως προς τη δομή τους και, ανάλογα με αυτή, εκτελείται η ανάλογη λειτουργία της συσκευής.

Η δομή ενός frame αποτελείται από διαφορετικά πεδία και αλλάζει με βάση τον τύπο αυτού, οι οποίοι παρουσιάζονται στο σύνολό τους στον Πίνακα Γ'.1. Σε γενικές γραμμές, η API λειτουργία επιτρέπει τις εξής δυνατότητες:

- Μετάδοση δεδομένων σε διαφορετικές διευθύνσεις, χωρίς να απαιτείται να διακοπεί η λειτουργία της, ώστε να αλλάξει κάποια παράμετρος.
- Λήψη πληροφορίας επιτυχίας/αποτυχίας ενός απεσταλμένου πακέτου.
- Αναγνώριση της διεύθυνσης πηγής ενός πακέτου.

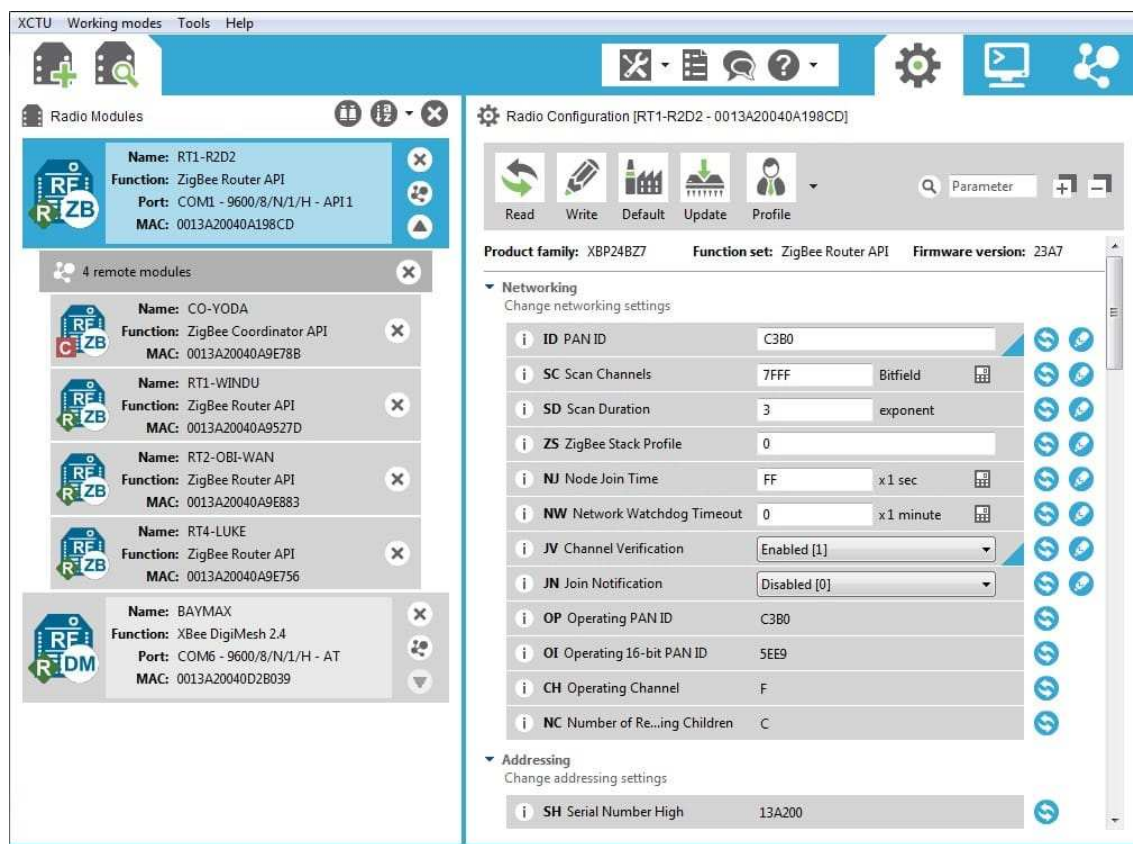
Έτσι, είναι ξεκάθαρο πως σε API λειτουργία, η συσκευή είναι σημαντικά πιο ικανή, ακόμα και για περισσότερο πολύπλοκα projects. Χρησιμοποιώντας αυτή, όμως, γίνεται αρκετά πιο δύσκολος ο τρόπος διεπαφής με τη συσκευή, καθώς πρέπει να σταλεί στον TX buffer του μικροελεγκτή μία συγκεκριμένη ακολουθία από bytes, που αποτελείται εν μέρει από συγκεκριμένους ειδικούς χαρακτήρες, ανάλογα με τον τύπο του μηνύματος. Για την ευκολότερη διαχείριση αποστολής των frames, είναι δυνατή η χρήση διαφόρων βιβλιοθηκών, ανάλογα με την πλατφόρμα που χρησιμοποιείται.

Πίνακας Γ'.1: Οι διαφορετικοί τύποι frames διαθέσιμοι σε API λειτουργία και τα αντίστοιχα αναγνωριστικά τους.

API frame name	API ID
AT Command	0x08
AT Command - Queue Parameter Value	0x09
Zigbee Transmit Request	0x10
Explicit Addressing Zigbee Command Frame	0x11
Remote Command Request	0x17
Create Source Route	0x21
AT Command Response	0x88
Modem Status	0x8A
Zigbee Transmit Status	0x8B
Zigbee Receive Packet	0x90
Zigbee Explicit Rx Indicator	0x91
Zigbee I/O Data Sample Rx Indicator	0x92
XBee Sensor Read Indicator	0x94
Node Identification Indicator	0x95
Remote Command Response	0x97
Extended Modem Status	0x98
Over-the-Air Firmware Update Status	0xA0
Route Record Indicator	0xA1
Many-to-One Route Request Indicator	0xA3

Γ'.2.3 Παράμετροι Λειτουργίας και XCTU

Η συσκευή διαθέτει διάφορες παραμέτρους, στις οποίες συμπεριλαμβάνεται ο τύπος συσκευής και ο τρόπος λειτουργίας αυτής. Οι παράμετροι αυτές είναι δυνατό να αλλάξουν είτε μέσω της εφαρμογής XCTU, είτε μέσω API εντολών. Μέσω των τελευταίων, μπορεί να σταλεί frame με ID 0x08, το οποίο ενημερώνει τη συσκευή για το αναγνωριστικό όνομα της παραμέτρου προς τροποποίηση και θέτει την ανάλογη τιμή.



Σχήμα Γ'.3: Η γραφική διεπαφή του XCTU.

Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εφαρμογή XCTU, που αποτελεί πλατφόρμα, διαθέσιμη σε λειτουργικά Windows, Mac και Linux, που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Digi (κατασκευαστής και των συσκευών που περιγράφονται), επιτρέποντας την παραμετροποίηση της λειτουργίας για ένα μεγάλο εύρος συσκευών της. Πέρα από την τροποποίηση των παραμέτρων, είναι δυνατή η αλλαγή firmware της συσκευής, αλλά και η αλλαγή πρωτοκόλλου, σε περίπτωση που η συσκευή υποστηρίζει περισσότερα από

ένα, όπως είναι και το XBee-PRO S2C. Περαιτέρω, παρέχει διάφορα εργαλεία, στο γραφικό περιβάλλον που φαίνεται στο Σχήμα Γ'.3 [39], που διευκολύνουν τον πειραματισμό και τον έλεγχο λειτουργίας των συσκευών:

- Αποθήκευση και φόρτωση προφίλ με τις παραμέτρους λειτουργίας της συσκευής, επιτρέποντας εύκολη τροποποίηση πολλών συσκευών ταυτόχρονα.
- Αναζήτηση κόμβων που βρίσκονται στο ίδιο PAN με τη συνδεδεμένη συσκευή.
- Απομακρυσμένη διαμόρφωση των παραμέτρων συσκευών στο ίδιο PAN.
- Γραφική απεικόνιση της τοπολογίας του δικτύου, συμπεριλαμβανόμενης και πληροφορίας για την ποιότητα σύνδεσης μεταξύ κόμβων.
- Γραφική κατασκευή API frames και μηνυμάτων σε Transparent τρόπο λειτουργίας, μέσω παρεχόμενης κονσόλας.
- Αναλυτικός έλεγχος ποιότητας σύνδεσης μεταξύ δύο συνδεδεμένων κόμβων.

Γ'.3 Σχεδιασμός του Συστήματος

Το σύστημα που σχεδιάζεται βασίζεται στη χρήση πλακετών Arduino, με τις συσκευές XBee για την παροχή ασύρματης επικοινωνίας μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η πλακέτα Arduino Mega 2560 και η συσκευή XBee-PRO S2C. Ως διεπαφή για τη διασύνδεση των δύο συσκευών, χρησιμοποιείται το Arduino Wireless SD shield, πάνω στο οποίο εφαρμόζει η κεραία και στη συνέχεια τοποθετείται επάνω στην πλακέτα Arduino.

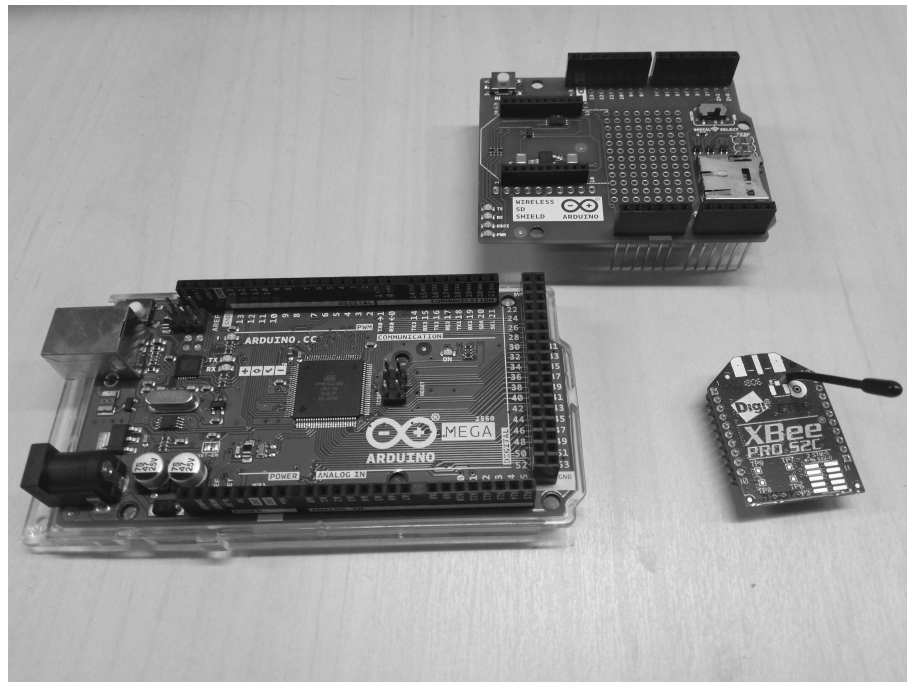
Το συγκεκριμένο μοντέλο Arduino επιλέχθηκε καθώς διαθέτει σχετικά μεγάλο μέγεθος SRAM, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο, καθώς οι buffers, που μεσολαβούν για τη σειριακή επικοινωνία με την κεραία, καταλαμβάνουν μέρος της SRAM. Το προκαθορισμένο μέγεθος αυτών είναι 64 bytes για καθέναν από τους RX και TX buffers. Για τις απαιτήσεις, που προκύπτουν εξίσου από το μέγεθος του δικτύου και την υλοποίηση του αλγορίθμου, το μέγεθος καθενός από τους δύο buffers έχει οριστεί στα 512 bytes, καταλαμβάνοντας συνολικά 1024 bytes της SRAM. Λόγω αυτού, είναι ξεκάθαρο πως η χρήση ενός λιγότερο ικανού μοντέλου, όπως είναι το ιδιαίτερα διαδεδομένο Arduino Uno (2kB SRAM), θα περιόριζε, ή ακόμα χειρότερα θα καθιστούσε αδύνατη, τη δυνατότητα διαχείρισης του δικτύου, αλλά και την κατασκευή του CDS. Η βιβλιοθήκη που

χρησιμοποιείται με σκοπό τη διευκόλυνση διαχείρισης του συστήματος, σε API τρόπο λειτουργίας, είναι αυτή του χρήστη Andrew Rapp στο Github [40].

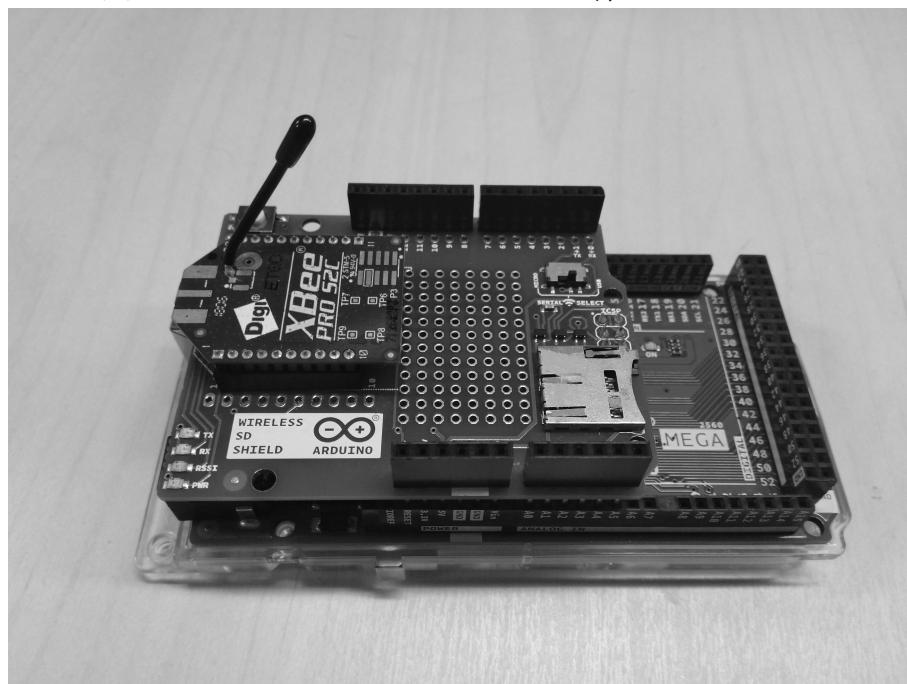
Για το δίκτυο που αναπτύχθηκε, διαμορφώθηκε προφίλ μέσω του XCTU, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε κάθε κόμβο, αλλάζοντας στον καθένα το αναγνωριστικό του, ώστε να είναι μοναδικό στο δίκτυο. Οι AT εντολές που αντιστοιχούν στις παραμέτρους που τροποποιήθηκαν καταγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα Γ'.2.

AT Command	Τιμή	Περιγραφή
ID	16	Το PAN ID του δικτύου.
ZS	0	Το Zigbee Stack Profile που χρησιμοποιείται.
JV	1	Απαιτείται η ύπαρξη Coordinator στο δίκτυο.
NI	1	Αναγνωριστικό του κόμβου.
BH	1	Ο αριθμός των hops που μπορούν να διανύσουν τα μηνύματα.
AP	2	API τρόπος λειτουργίας.

Πίνακας Γ'.2: Οι AT εντολές που χρησιμοποιούνται, οι αντίστοιχες τιμές τους και μία συντομή περιγραφή καθεμιάς από αυτές.



(α') Οι συσκευές που συνιστούν τους κόμβους του δικτύου.



(β') Ένας κόμβος του δικτύου πλήρως συναρμολογημένος.

Σχήμα Γ'.4: Φωτογραφίες των διαφορετικών συσκευών, που συγκροτούν το δίκτυο που κατασκευάστηκε.

Κεφάλαιο Δ΄

Πειράματα

Ο στόχος των πειραμάτων είναι να εξεταστεί κατά πόσο η εισαγωγή του κριτηρίου appropriateness επηρεάζει την κατασκευή του CDS και του προκύπτοντος virtual backbone network. Για τους σκοπούς των πειραμάτων, κατασκευάζεται ένα δοκιμαστικό ασύρματο δίκτυο αισθητήρων. Μελετώνται δύο περιπτώσεις:

- **Περίπτωση 1**, η κατασκευή του CDS και το επακόλουθο virtual backbone network χωρίς να χρησιμοποιούνται οι πληροφορίες σχετικά με την καταλληλότητα.
- **Περίπτωση 2**, την κατασκευή του CDS και του επακόλουθου virtual backbone network χρησιμοποιώντας την πληροφορία καταλληλότητας.

Δ΄.1 Διαμόρφωση του Δοκιμαστικού Περιβάλλοντος

Το περιβάλλον δοκιμής είναι ένα ασύρματο δίκτυο, το οποίο αποτελείται από 25 ειδικά σχεδιασμένες, χαμηλού κόστους συσκευές ($N = 25$), όπως περιγράφονται στην Κεφάλαιο Γ΄ και οι οποίες χρησιμεύουν ως κόμβοι του δικτύου. Οι κόμβοι διασκορπίζονται στο χώρο του Ιονίου Πανεπιστημίου (Κέρκυρα, Ελλάδα), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα Δ΄.1.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τα πειράματα μεταφορτώνεται σε κάθε κόμβο και, εφόσον αυτοί έχουν τοποθετηθεί, ο αλγόριθμος κατασκευής d -CDS και για τις δύο



Σχήμα Δ΄.1: Τοποθέτηση των κόμβων του δικτύου, που σημειώνονται με κύκλους, στις πανεπιστημιακές εγκαταστάσεις.

περιπτώσεις εκτελείται με $d = 1$. Σημειώνεται ότι σε αυτό το πείραμα, οι τιμές appropriateness των κόμβων a υπολογίζονται τυχαία και ανατίθενται σε κάθε κόμβο, όπου $a_{n_i} \in \{1, 2, 3, \dots, 100\}$ χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι λειτουργίες των κόμβων, συνθήκες δικτύου ή απαιτήσεις υπηρεσιών. Για τον υπολογισμό των τιμών καταλληλότητας a , η γεννήτρια τυχαίων αριθμών του Αρδουίνο, η οποία παρέχει συνεχείς, ομοιόμορφα κατανομημένες τιμές, αρχικοποιείται χρησιμοποιώντας το αναγνωριστικό κάθε κόμβου ως seed αυτής, έτσι ώστε οι τιμές a να παραμένουν ίδιες για κάθε κόμβο, καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων.

Δ'.2 Διαχείριση του Δικτύου και Υλοποίηση του Αλγορίθμου

Μόλις εγκατασταθούν και ενεργοποιηθούν οι κόμβοι, το περιβάλλον δοκιμής είναι έτοιμο να χρησιμοποιηθεί για τα πειράματα. Η διεξαγωγή των πειραμάτων παρουσιάζει ορισμένες προκλήσεις, λόγω των ρεαλιστικών συνθηκών του περιβάλλοντος και του αριθμού των μηνυμάτων που πρέπει να διαδοθούν σε όλο το δίκτυο. Αυτές περιλαμβάνουν διάφορες τεχνικές δυσκολίες, που σε ορισμένες περιπτώσεις οφείλονται σε ελαττωματικό υλικό, αλλά κυρίως στη διακύμανση της ποιότητας του σήματος, η οποία επηρεάζεται από πολλούς περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες. Ακόμα, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κόμβοι είναι κατανεμημένοι σε διαφορετικά κτίρια του χώρου του πανεπιστημίου, η περισυλλογή τους είναι ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, έχουν ληφθεί ανάλογα μέτρα στον κώδικα, ώστε να είναι δυνατή η επανεκκίνηση απομακρυσμένων κόμβων, αλλά και η ρύθμιση παραμέτρων για τη λειτουργία τους, μέσω μηνυμάτων του Coordinator. Κάθε τέτοια περίπτωση εξηγείται περαιτέρω σε σχετικό σημείο της περιγραφής της υλοποίησης που ακολουθεί.

Η διαδικασία του πειράματος αποτελείται από τρεις διακριτές φάσεις:

1. την αρχικοποίηση του δικτύου
2. την αρχικοποίηση του αλγορίθμου κατασκευής *d*-CDS
3. την κατασκευή του CDS.

Δ'.2.1 Αρχικοποίηση του Δικτύου

Στη φάση αρχικοποίησης του δικτύου, κάθε κόμβος πρέπει να συνδεθεί στο PAN που συγκροτεί ο Coordinator, εφόσον έχει εκτελέσει τις κατάλληλες AT εντολές, να ανακαλύψει τους γειτονικούς του κόμβους, ώστε να συλλεγεί η τοπολογία από τον Coordinator. Για την ευκολότερη διαχείριση του δικτύου, ο Coordinator στέλνει ένα συγκεκριμένο τύπο μηνύματος σε όλο το δίκτυο, μόλις ξεκινήσει τη λειτουργία του, το οποίο σημαίνει την επανεκκίνηση κάθε κόμβου που το λαμβάνει. Έτσι, όλοι οι κόμβοι ξεκινούν σχεδόν ταυτόχρονα, με αποτέλεσμα να απλουστεύεται σημαντικά ο τρόπος διαχείρισης των διαφορετικών καταστάσεων, στις οποίες μπορεί να βρίσκεται κάθε κόμβος.

Κατά τη διάρκεια της αρχικοποίησης του δικτύου, κάθε κόμβος ακολουθεί μια συγκεκριμένη διαδικασία για να ανακαλύψει τους γείτονές του. Για την ακρίβεια, είναι απαραίτητο η διαδικασία ανακάλυψης των γειτόνων να παρέχει συμμετρικές ζεύξεις και αξιόπιστη επικοινωνία. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, μόλις ένας κόμβος ξυπνήσει και συνδεθεί στο PAN, επιλέγει μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή στα επόμενα 40 δευτερόλεπτα, στην οποία μεταδίδει ένα μήνυμα broadcast στους 1-hop γείτονες. Κάθε κόμβος που το λαμβάνει, απαντάει με το id του. Αφού γίνει η πρώτη μετάδοση, κάθε κόμβος περιμένει 50 δευτερόλεπτα και επαναμεταδίδει, μέχρι αυτή η διαδικασία να πραγματοποιηθεί συνολικά τρεις φορές. Έπειτα, οι κόμβοι ανταλλάσσουν τον αριθμό των επιτυχημένων μεταδόσεων με κάθε κόμβο που τους έχει ανταποκριθεί. Αν το άθροισμα αυτών των επιτυχημένων μεταδόσεων μεταξύ οποιωνδήποτε δύο κόμβων είναι μεγαλύτερο από πέντε, με μέγιστο το έξι, εφόσον οι τρεις μεταδόσεις αποστέλλονται προς κάθε κατεύθυνση, οι κόμβοι θεωρούνται γείτονες.

Στη συνέχεια, ο κόμβος του δικτύου, που έχει οριστεί ως Coordinator, συγκεντρώνει την τοπολογία. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μετάδοση ενός broadcast μηνύματος προς όλο το δίκτυο, στο οποίο απαντά κάθε κόμβος με τα αναγνωριστικά των γειτόνων του. Οι δύο αυτές διαδικασίες γίνονται χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες λειτουργίες του Zigbee, συγκεκριμένα ορίζοντας ως προορισμό τις αντίστοιχες διευθύνσεις 0xffff και 0x0000. Μόλις περάσει ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, ο Coordinator κατασκευάζει έναν πίνακα γειτνίασης, ανάλογα με τις απαντήσεις που δέχτηκε. Όλα τα χρονικά διαστήματα που αναφέρθηκαν, επιλέχθηκαν ώστε να αντιμετωπιστεί το γεγονός ότι η συσκευή XBee, όταν χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Zigbee, κρατά ένα πίνακα με τα broadcast μηνύματα που έχει λάβει. Ο πίνακας αυτός έχει χώρο για οκτώ εγγραφές, εκ των οποίων η καθεμία παραμένει σε αυτόν για 8 δευτερόλεπτα. Αυτό γίνεται ώστε να μην επαναμεταδίδονται ατέρμονα τα μηνύματα τύπου broadcast.

Δ'.2.2 Αρχικοποίηση του d -CDS Αλγορίθμου

Με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας, λαμβάνει χώρα η φάση αρχικοποίησης αλγορίθμου d -CDS, όπου κάθε κόμβος εκκινεί μια πλημμυρίδα. Για αποφυγή συμφόρησης του δικτύου, κάθε κόμβος ξεκινάει σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, ανάλογα με το αναγνωριστικό του. Δεδομένου ότι η πλημμυρίδα αυτή χρειάζεται να φτάσει μόνο σε κόμβους έως $d + 1$ -hops μακριά από τον κόμβο εκκίνησης, στο μήνυμα περιλαμβάνεται μια τιμή Time to Live (TTL). Αυτή η τιμή TTL αρχίζει από $d + 1$ και μειώνεται κατά

1 με κάθε αναμετάδοση του αρχικού μηνύματος. Κάθε κόμβος διατηρεί τη μέγιστη τιμή TTL που λαμβάνεται από κάθε κόμβο, καθώς δεν είναι εγγυημένη η ανάθεση της σωστής τιμής TTL με το πρώτο μήνυμα που θα ληφθεί.

Όταν αυτή η πλημμυρίδα έχει πλέον σταματήσει κι ένας κόμβος u έχει λάβει μέγιστη τιμή TTL ίση με 0 ή 1 από κάποιον άλλο v , τότε ο v θα είναι d ή $d + 1$ -hop γείτονας του u , ο οποίος πρέπει να ενημερώσει τον v ως προς αυτό. Για να γίνει αυτό, είναι αναγκαίο να βρεθεί διαδρομή προς αυτόν. Έτσι, κάθε κόμβος που αναμεταδίδει το μήνυμα της πλημμυρίδας, προσθέτει σε αυτό το αναγνωριστικό του. Ουσιαστικά, το μήνυμα κουβαλάει ένα stack (στοίβα), με το μονοπάτι το οποίο ακολούθησε ώστε να φτάσει από τον κόμβο v στο u . Ο κόμβος u αποθηκεύει την πληροφορία δρομολόγησης μαζί με την τιμή TTL, ώστε να είναι σε θέση να τον ενημερώσει, όταν έρθει η κατάλληλη στιγμή.

Μετά την πάροδο μίας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, κι εφόσον έχει εκκινήσει η διαδικασία πλημμυρίδας από κάθε κόμβο του δικτύου, κάθε κόμβος στέλνει στους d και $(d + 1)$ -hop γείτονες το ID του. Για την αποφυγή συμφόρησης του δικτύου, χρησιμοποιείται και πάλι το αναγνωριστικό του κάθε κόμβου για να χρονοδρομολογηθεί αυτή η διαδικασία.

Δ'.2.3 Κατασκευή του CDS

Μετά την επιτυχημένη ολοκλήρωση των προηγούμενων φάσεων, ξεκινά η φάση κατασκευής CDS. Για το σκοπό των πειραμάτων, η διαδικασία αυτή εκτελείται από κάθε κόμβο του δικτύου. Για την επίτευξη αυτού είναι υπεύθυνος ο Coordinator, ο οποίος κάνει trigger κάθε κόμβο στο δίκτυο διαδοχικά. Η υλοποίηση της φάσης κατασκευής που εκτελεί κάθε κόμβος παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα I. Μετά από την κατασκευή ενός CDS, κάθε κόμβος που το αποτελεί στέλνει στον Coordinator τα δεδομένα του. Έτσι, αυτός θα γνωρίζει μετά από κάθε κατασκευή CDS τις εξής πληροφορίες:

- τους κόμβους του CDS
- τις τιμές καταλληλότητας a των κόμβων που απαρτίζουν το CDS

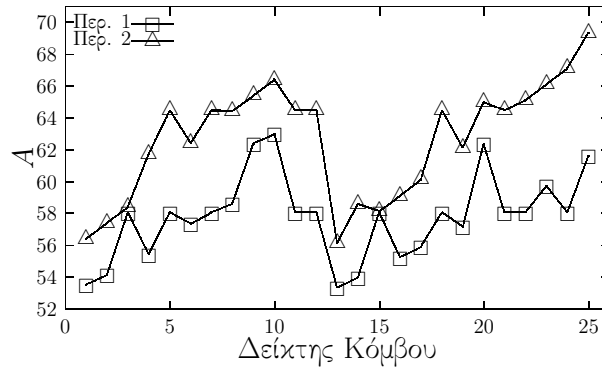
Από κόμβο σε κόμβο, υπάρχει καθυστέρηση της τάξης των 45 δευτερολέπτων, αφού ο Coordinator περιμένει 30 δευτερόλεπτα από την τελευταία στιγμή που έλαβε

πληροφορία σχετικά με την κατασκευή CDS και 15 δευτερόλεπτα από το τελευταίο μήνυμα πληροφορίας. Εφόσον όλοι οι κόμβοι του δικτύου έχουν εκκινήσει τη διαδικασία κατασκευής ενός CDS, οι πληροφορίες αυτών και ο αριθμός των μηνυμάτων, που μεταδόθηκαν καθ' όλη την εκτέλεση και σχετίζονται με αυτή (δεν συμπεριλαμβάνονται π.χ. μηνύματα για εύρεση γειτόνων), συλλέγονται από τον Coordinator για να μελετηθούν. Αυτά εκτυπώνονται στην οθόνη του υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο Coordinator και αποθηκεύονται σε αρχείο για περαιτέρω ανάλυση.

Δ'.3 Αποτελέσματα Πειραμάτων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, προκειμένου να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης για την παροχή αξιόπιστων virtual backbone networks, που να βελτιώνουν τις συνθήκες υπό τις οποίες θα λειτουργούν αιτούμενες υπηρεσίες έξυπνου τουρισμού, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος που επιφέρεται στην υποδομή του δικτύου. Προκειμένου να ελεγχθεί η ικανότητα της προτεινόμενης προσέγγισης να προσφέρει virtual backbone networks για τις αιτούμενες υπηρεσίες έξυπνου τουρισμού, μελετώνται δύο περιπτώσεις. Σε κάθε μία από αυτές, υπολογίζεται η καταλληλότητα των virtual backbone networks, A για την περίπτωση 1 και A' για την περίπτωση 2, προκειμένου να μετρηθεί η καταλληλότητα των κατασκευασμένων δικτύων. Οι μέσες τιμές της προκύπτουσας καταλληλότητας των virtual backbone networks $\bar{A}$ και $\bar{A}'$ υπολογίζονται και παρουσιάζονται για λόγους σύγκρισης. Σύμφωνα με τα πειράματα $\bar{A} = 57.80$ και $\bar{A}' = 62.67$, που δίνονται και στον Πίνακα Δ'.1. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η καταλληλότητα των virtual backbone networks, όταν γίνεται χρήση των πληροφοριών σχετικά με την καταλληλότητα (A'), είναι ελαφρώς αυξημένη (+4.88). Είναι ενδιαφέρον ότι η αύξηση εμφανίζεται στα περισσότερα από τα κατασκευασμένα virtual backbone networks, όπως φαίνεται στο σχήμα Δ'.2. Το γεγονός ότι η καταλληλότητα είναι μοναχά ελαφρώς αυξημένη οφείλεται στο σχετικά μικρό μέγεθος του δικτύου, καθώς οι κεντρικοί κόμβοι θα εξακολουθούν να περιλαμβάνονται στο τελικό CDS, ανεξάρτητα από την καταλληλότητά τους a .

Ένα επιπλέον αποτέλεσμα των πειραμάτων σχετικά με τη δομή του virtual backbone network είναι η μείωση του μεγέθους του. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το μέσο μέγεθος των virtual backbone networks στην περίπτωση 2 ($\bar{L}'$) είναι μικρότερο από το μέσο μέγεθος αυτών που έχουν προκύψει στην περίπτωση 1 ($\bar{L}$), $\bar{L}' = 6,92$ και $\bar{L} = 10,76$ καθώς τα CDS που προκύπτουν στην περίπτωση 2 είναι μικρότερα από τα CDS



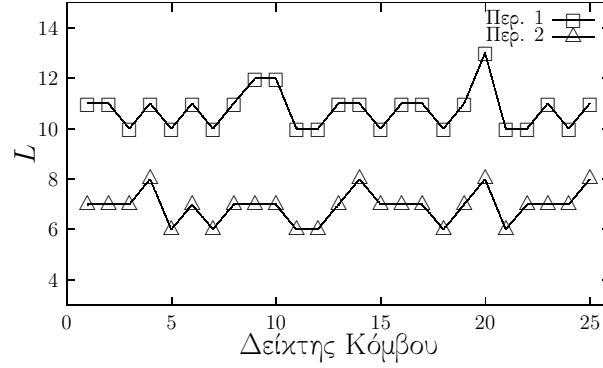
Σχήμα Δ'.2: Η μέση τιμή της παραμέτρου καταλληλότητας A του virtual backbone network που κατασκευάστηκε από κάθε κόμβο.

της περίπτωσης 1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, εξαιτίας της παραμέτρου a , κόμβοι κοντινοί μεταξύ τους, τείνουν να συγκλίνουν στις επιλογές τους, όταν επιλέγουν μεταξύ εξίσου έγκυρων γειτόνων, αναφορικά με τον αριθμό των κόμβων που ικανοποιούν. Μια σημαντική πτυχή αυτού του αποτελέσματος είναι ότι η μείωση του μεγέθους των virtual backbone networks εμφανίζεται σε όλα τα προκύπτοντα virtual backbone networks σε αυτό το σύνολο πειραμάτων, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα Δ'.3. Σύμφωνα με αυτό το αποτέλεσμα, η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί για την παροχή virtual backbone networks που χρησιμοποιούν μειωμένο αριθμό κόμβων, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος για την υποκείμενη υποδομή δικτύου.

Τα αποτελέσματα μελετώνται περαιτέρω προκειμένου να αξιολογηθεί η μείωση του

Πίνακας Δ'.1: Αποτελέσματα της κατασκευής CDS. Το A είναι η μέση καταλληλότητα των κόμβων που αποτελούν τα CDS και το L είναι το μέσο μέγεθος των CDS που προκύπτει κάνοντας trigger όλους τους κόμβους, ενώ το T είναι ο χρόνος που απαιτείται για μια φάση κατασκευής και το M είναι ο συνολικός αριθμός μηνυμάτων που μεταδίδονται από όλους τους κόμβους, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στο σύνολό της.

Περίπτωση 1				Περίπτωση 2			
$\bar{A}$	$\bar{L}$	$\bar{T}$	M	$\bar{A}'$	$\bar{L}'$	$\bar{T}'$	M'
57.8	10.76	4.04	3135	62.68	6.92	2.56	2784



Σχήμα Δ'.3: Το μέγεθος L του virtual backbone network, που κατασκευάστηκε από κάθε κόμβο, όπου $L = |\text{CDS}|$.

κόστους στην υποκείμενη υποδομή δικτύου. Για την εκτίμηση αυτής, ο συνολικός αριθμός κόμβων που αποτελούν τα virtual backbone networks, C για την περίπτωση 1 και C' για την περίπτωση 2, συγκρίνεται με τον συνολικό αριθμό κόμβων F (Εξίσωση Δ'.3) που χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο πρωτόκολλο δρομολόγησης (δηλαδή πλημμυρίδα δικτύου) ως σημείο αναφοράς. Ο συνολικός αριθμός κόμβων που αναφέρεται ως αθροιστική χρήση κόμβων για την περίπτωση 1 (Εξίσωση Δ'.1) και η περίπτωση 2 (Εξίσωση Δ'.2) είναι το άθροισμα του αριθμού των κόμβων που κατασκευάζουν τα virtual backbone networks (L και L') που χρησιμοποιούνται από τις ζητούμενες υπηρεσίες, όπου οι ζητούμενες υπηρεσίες σε αυτό το σύνολο πειραμάτων θεωρούνται ίσες με τον αριθμό κόμβων στο δίκτυο ($N = 25$). Η συσσωρευμένη χρήση κόμβου F , όπου δεν υπάρχει διαθέσιμο πρωτόκολλο δρομολόγησης, θεωρείται ότι είναι 100%, καθώς όλοι οι κόμβοι του δικτύου χρησιμοποιούνται από τις ζητούμενες υπηρεσίες (Εξίσωση Δ'.3).

$$C = \sum_{i=1}^N L_i \quad (\Delta'.1)$$

$$C' = \sum_{i=1}^N L'_i \quad (\Delta'.2)$$

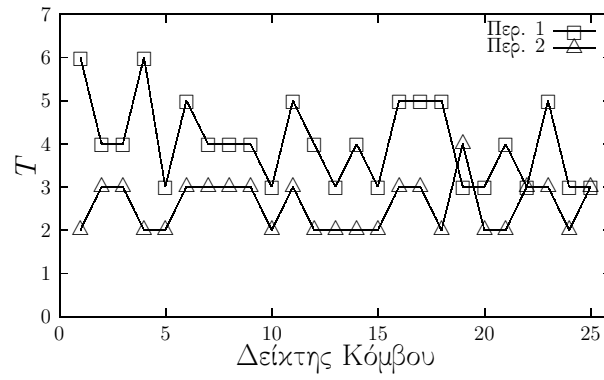
$$F = \sum_{i=1}^N N \quad (\Delta'.3)$$

Συγκεκριμένα, όταν εφαρμόζεται η πλημμυρίδα, η χρήση των κόμβων θεωρείται 100%. Ο αρχικός αλγόριθμος CDS που εφαρμόστηκε (περίπτωση 1) παρέχει 43,04% αθροιστική χρήση κόμβων, ενώ η προτεινόμενη προσέγγιση χρησιμοποιώντας την παράμετρο a (περίπτωση 2) παρέχει 27,68% αθροιστική χρήση κόμβων, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα Δ'.2.

Πίνακας Δ'.2: Αθροιστική χρήση κόμβων για τις Περιπτώσεις 1 και 2, σε σύγκριση με την αθροιστική χρήση κόμβων όταν δε χρησιμοποιείται πρωτόκολλο δρομολόγησης (πλημμυρίδα) για το δίκτυο που μελετάται όπου $N = 25$.

	Πλημμυρίδα (F)	Περ. 1 (C)	Περ. 2 (C')
Αθρ. Χρήση Κόμβων	625	269	173
Ποσοστό	100%	43,04%	27,68%

Επιπρόσθετα, παρατηρείται πως το μέγεθος των CDS σχετίζεται με το χρόνο κατασκευής τους σε αριθμό hops. Τα αποτελέσματα, που καταγράφονται στον Πίνακα Δ'.1, δείχνουν πως στην περίπτωση 2 ο χρόνος που απαιτείται για τη φάση κατασκευής ($\bar{T}'$) ολοκληρώνεται πιο γρήγορα απ' ότι στην περίπτωση 1 ($\bar{T}$), αφού $\bar{T} = 4.04$ και $\bar{T}' = 2.56$. Η μείωση του χρόνου κατασκευής παρουσιάζεται ακόμα στο Σχήμα Δ'.4, όπου η διαφορά είναι εμφανής στις περισσότερες περιπτώσεις κατασκευής CDS. Επιπλέον, ο συνολικός αριθμός μηνυμάτων M για την περίπτωση 1, $M = 3135$, είναι μεγαλύτερος από αυτόν για την περίπτωση 2, $M' = 2784$, που οφείλεται εξίσου στη μείωση του μεγέθους του CDS και καταγράφεται στον Πίνακα Δ'.1, παρέχοντας περαιτέρω μείωση του κόστους για την υποκείμενη υποδομή του δικτύου.



Σχήμα Δ'.4: Ο χρόνος σε αριθμό hops T , που απαιτείται για την κατασκευή του virtual backbone κάθε κόμβου.

Κεφάλαιο Ε΄

Σύνοψη και Συμπεράσματα

Σ Ε αυτό το έργο παρουσιάζεται μια προσέγγιση για την παροχή virtual backbone networks για υπηρεσίες έξυπνου τουρισμού μέσω ασύρματων δικτύων που αποτελούνται από συσκευές χαμηλού κόστους. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται σε έναν προϋπάρχοντα αλγόριθμο κατασκευής d -CDS [24] ο οποίος επεκτείνεται προκειμένου να ληφθεί υπόψη η καταλληλότητα συγκεκριμένων τμημάτων του υποκείμενου δικτύου, προκειμένου να παρασχεθούν virtual backbone networks, που να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των εκάστοτε υπηρεσιών έξυπνου τουρισμού. Η προτεινόμενη προσέγγιση όχι μόνο έχει ως στόχο να παρέχει virtual backbone networks μέγιστης απόδοσης, αλλά και να παρέχει πολλαπλά virtual backbone network, προκειμένου να υποστηριχθεί η λειτουργία πολλών υπηρεσιών έξυπνου τουρισμού μέσω κοινής υποδομής δικτύου.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της παρουσιαζόμενης προσέγγισης, αναπτύσσεται μια υποδομή ασύρματου δικτύου στα κτίρια του Ιονίου Πανεπιστημίου, αποτελούμενη από 25 ειδικά σχεδιασμένους κόμβους χαμηλού κόστους. Ένα σύνολο πειραμάτων διεξάγεται στο δίκτυο που μελετά την επίδραση χρήσης πληροφορίας σχετικά με την καταλληλότητα κάθε κόμβου στην κατασκευή του virtual backbone network. Συγκεκριμένα, η κατασκευή CDS μελετάται σε δύο περιπτώσεις:

1. Κατασκευή CDS χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι πληροφορίες σχετικά με την καταλληλότητα των κόμβων.
2. Κατασκευή CDS λαμβάνοντας υπόψη τις πληροφορίες σχετικά με την καταλληλότητα των κόμβων.

Τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων δείχνουν ότι η χρήση πληροφορίας καταλληλότητας επηρεάζει την κατασκευή των virtual backbone networks που έχουν προκύψει και, επίσης, ότι αυτά έχουν μειωμένο μέγεθος σε σύγκριση με όσα κατασκευάζονται χωρίς να γίνει χρήση της πληροφορίας καταλληλότητας. Επιπλέον, παρατηρείται ότι, όταν χρησιμοποιούνται οι πληροφορίες σχετικά με την καταλληλότητα, η αθροιστική χρήση των κόμβων από τις υποστηριζόμενες υπηρεσίες διατηρείται σχετικά χαμηλή και μειώνεται η επιβάρυνση για την κατασκευή των virtual backbone networks.

Τα αποτελέσματα προδιαγράφουν τις κατευθυντήριες γραμμές για τη μελλοντική έρευνα, όπου:

1. θα πρέπει να μελετηθούν και να εξεταστούν μέθοδοι εκτίμησης της καταλληλότητας·
2. σε μεγαλύτερα ασύρματα δίκτυα που υποστηρίζουν υπηρεσίες έξυπνου τουρισμού·
3. όπου θα αξιολογηθεί η επίδραση στην απόδοση των υπηρεσιών

Επιπλέον, συνετό θα ήταν να μελετηθεί ένα σύνολο ζητημάτων σχετικά με την υποκείμενη δομή δικτύου και τα επακόλουθα virtual backbone networks, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της κεντρικής θέσης των κόμβων στην κατασκευή του CDS, καθώς και της κατασκευής d -CDS για $d > 1$.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Shahbaz, R. R. Kumar, S. Ivanov, and N. Loganathan, “The nexus between tourism demand and output per capita with the relative importance of trade openness and financial development: A study of malaysia,” *Tourism Economics*, vol. 23, no. 1, pp. 168–186, 2017.
- [2] A. Farmaki, L. Altinay, D. Botterill, and S. Hilke, “Politics and sustainable tourism: The case of cyprus,” *Tourism management*, vol. 47, pp. 178–190, 2015.
- [3] R. Ohlan, “The relationship between tourism, financial development and economic growth in india,” *Future Business Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 9–22, 2017.
- [4] G. De Vita and K. S. Kyaw, “Tourism development and growth,” 2016.
- [5] D. Buhalis and A. Amaranggana, “Smart tourism destinations,” in *Information and communication technologies in tourism 2014*, pp. 553–564, Springer, 2013.
- [6] N. Chung, H. Han, and Y. Joun, “Tourists’ intention to visit a destination: The role of augmented reality (ar) application for a heritage site,” *Computers in Human Behavior*, vol. 50, pp. 588–599, 2015.
- [7] U. Gretzel, M. Sigala, Z. Xiang, and C. Koo, “Smart tourism: foundations and developments,” *Electronic Markets*, vol. 25, no. 3, pp. 179–188, 2015.
- [8] U. Gretzel, H. Werthner, C. Koo, and C. Lamsfus, “Conceptual foundations for understanding smart tourism ecosystems,” *Computers in Human Behavior*, vol. 50, pp. 558–563, 2015.

- [9] D. Buhalis and A. Amaranggana, “Smart tourism destinations enhancing tourism experience through personalisation of services,” in *Information and communication technologies in tourism 2015*, pp. 377–389, Springer, 2015.
- [10] V. Komianos, *Content personalization approaches in cultural heritage (real, virtual and mixed) environments*. PhD thesis, Ionian University, Faculty of Information Science & Informatics, Dept. of Informatics, 2017.
- [11] R. Kitchin, “The real-time city? big data and smart urbanism,” *GeoJournal*, vol. 79, no. 1, pp. 1–14, 2014.
- [12] K. Su, J. Li, and H. Fu, “Smart city and the applications,” in *2011 international conference on electronics, communications and control (ICECC)*, pp. 1028–1031, IEEE, 2011.
- [13] E. Balandina, S. Balandin, Y. Koucheryavy, and D. Mouromtsev, “Iot use cases in healthcare and tourism,” in *2015 IEEE 17th Conference on Business Informatics*, vol. 2, pp. 37–44, IEEE, 2015.
- [14] K. Ali, H. X. Nguyen, Q.-T. Vien, and P. Shah, “Disaster management communication networks: Challenges and architecture design,” in *2015 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PerCom Workshops)*, pp. 537–542, IEEE, 2015.
- [15] A. Kaur and S. K. Sood, “Analytical mapping of research on disaster management, types and role of ict during 2011–2018,” *Environmental Hazards*, pp. 1–20, 2019.
- [16] 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.
- [17] S. Guha and S. Khuller, “Approximation algorithms for connected dominating sets,” *Algorithmica*, vol. 20, pp. 374–387, Apr 1998.
- [18] R. Wenge, X. Zhang, C. Dave, L. Chao, and S. Hao, “Smart city architecture: A technology guide for implementation and design challenges,” *China Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 56–69, 2014.

- [19] M. Haddad, “Networks in smart cities from a graph theoretic point of view,” in *City Networks*, pp. 39–54, Springer, 2017.
- [20] V. C. Sharmila and A. George, “Implementation of connected dominating set in fog computing using knowledge-upgraded iot devices,” in *Knowledge Computing and Its Applications*, pp. 3–24, Springer, 2018.
- [21] A. D. Amis, R. Prakash, T. H. P. Vuong, and D. T. Huynh, “Max-min d-cluster formation in wireless ad hoc networks,” in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, vol. 1, pp. 32–41 vol.1, March 2000.
- [22] J. Yu, N. Wang, G. Wang, and D. Yu, “Connected dominating sets in wireless ad hoc and sensor networks b• a comprehensive survey,” *Computer Communications*, vol. 36, no. 2, pp. 121 – 134, 2013.
- [23] P.-J. Wan, K. M. Alzoubi, and O. Frieder, “Distributed construction of connected dominating set in wireless ad hoc networks,” in *Proceedings.Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol. 3, pp. 1597–1604 vol.3, June 2002.
- [24] K. Skiadopoulos, K. Giannakis, K. Oikonomou, I. Stavrakakis, and S. AG•ssa, “Distributed construction of d-hop connected dominating sets for wireless sensor networks,” in *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1–7, Dec 2018.
- [25] F. Dai and J. Wu, “An extended localized algorithm for connected dominating set formation in ad hoc wireless networks,” *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, no. 10, pp. 908–920, 2004.
- [26] Y. L. S. Zhu and M. T. D.-Z. Du, “Localized construction of connected dominating set in wireless networks,” in *Proceedings of US National Science Foundation International Workshop Theoretical Aspects of Wireless Ad Hoc, Sensor and Peer-to-Peer Networks*, 2004.

- [27] W. Wu, H. Du, X. Jia, Y. Li, and S. C.-H. Huang, “Minimum connected dominating sets and maximal independent sets in unit disk graphs,” *Theoretical Computer Science*, vol. 352, no. 1, pp. 1 – 7, 2006.
- [28] Y. Li, M. T. Thai, F. Wang, C.-W. Yi, P.-J. Wan, and D.-Z. Du, “On greedy construction of connected dominating sets in wireless networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 5, no. 8, pp. 927–932, 2005.
- [29] X. Gao, X. Zhu, J. Li, F. Wu, G. Chen, D. Du, and S. Tang, “A novel approximation for multi-hop connected clustering problem in wireless networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, pp. 2223–2234, Aug 2017.
- [30] C. R. Lin and M. Gerla, “Adaptive clustering for mobile wireless networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 15, pp. 1265–1275, Sep. 1997.
- [31] A. Ephremides, J. E. Wieselthier, and D. J. Baker, “A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 1, pp. 56–73, 1987.
- [32] Y.-L. Chang and C.-C. Hsu, “Routing in wireless/mobile ad-hoc networks via dynamic group construction,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 5, no. 1, pp. 27–37, 2004.
- [33] A. B. McDonald, “A mobility-based framework for adaptive dynamic cluster-based hybrid routing in wireless ad-hoc networks,” in *in Wireless Ad Hoc Networks, Ph. D. Dissertation, Univ. of Pittsburgh, Citeseer*, 1999.
- [34] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, and R. Morris, “Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks,” *Wireless networks*, vol. 8, no. 5, pp. 481–494, 2002.
- [35] R. Sivakumar, P. Sinha, and V. Bharghavan, “Cedar: a core-extraction distributed ad hoc routing algorithm,” *IEEE Journal on Selected Areas in communications*, vol. 17, no. 8, pp. 1454–1465, 1999.
- [36] Arduino, “Arduino Mega 2560 Rev3.” Accessed: 19 Mar 2019.
- [37] Arduino, “Arduino Wireless SD Shield.” Accessed: 19 Mar 2019.

- [38] Digi, “XBee-PRO Zigbee Through-Hole (Wire Antenna).” Accessed: 19 Mar 2019.
- [39] Digi, “XCTU - Next Gen Configuration Platform For XBee/RF Solutions.” Accessed: 12 June 2019.
- [40] Andrewrapp, “andrewrapp/xbee-arduino.” Accessed: 19 Mar 2019.

Παραρτήματα

Παράρτημα Ι

Υλοποίηση της Φάσης Κατασκευής

```
1
2 while (unsatisfiedCount > 0) {
3     uint8_t maxSatisfied[NUMNODES] = {};
4     uint8_t maxSatisfiedLength = 0;
5     uint8_t maxAvailability = 0 ;
6     uint8_t nodeWithMax = 0;
7
8     // Check to see which node in 'candidatesID' satisfies the majority
9     // of those in 'unsatisfied'
10    for (uint8_t i=0; i<candidatesCount; i++) {
11        uint8_t currSatisfied[NUMNODES] = {};
12        uint8_t currSatisfiedLength = 0;
13        uint8_t currAvailability = candidatesAvailability[i];
14        intersection(currSatisfied, &currSatisfiedLength, unsatisfied,
15        unsatisfiedCount, d_hopOfNeighbors[i], d_hopCountOfNeighbors[i]);
16
17        if (currSatisfiedLength > maxSatisfiedLength) {
18            // Keep the info of the node we're looking for
19            Serial.print(F("Replaced node "));
20            Serial.print(nodeWithMax);
21            Serial.print(F(" with "));
22            Serial.print(candidatesID[i]);
23            memcpy(maxSatisfied, currSatisfied, currSatisfiedLength);
24            maxSatisfiedLength = currSatisfiedLength;
25            nodeWithMax = candidatesID[i];
26
27            maxAvailability = currAvailability;
```

```

26     } else if ((currSatisfiedLength == maxSatisfiedLength) &&
considerAvailability) {
27         if (currAvailability > maxAvailability) {
28             Serial.print(F("Replaced node "));
29             Serial.print(nodeWithMax);
30             Serial.print(F(" with "));
31             Serial.print(candidatesID[i]);
32             Serial.println(F(" - "));
33             Serial.print(maxAvailability);
34             Serial.print(F(" < "));
35             Serial.print(currAvailability);
36             memcpy(maxSatisfied, currSatisfied, currSatisfiedLength);
37             maxSatisfiedLength = currSatisfiedLength;
38             nodeWithMax = candidatesID[i];
39
40             maxAvailability = currAvailability;
41         }
42     }
43 }
44
45 if (nodeWithMax == 0) {
46     Serial.println(F("No candidate is suitable."));
47     break;
48 }
49
50 Serial.print(F("\nAdding "));
51 Serial.print(nodeWithMax);
52 Serial.print(F(" to BLUE, satisfying: "));
53 printArray(maxSatisfied, maxSatisfiedLength);
54
55 blueNodes[blueNodesCount++] = nodeWithMax;
56
57 // 'nodeMax' is no longer a candidate
58 Serial.print(F("\nRemoving node: "));
59 Serial.print(nodeWithMax);
60 Serial.println(F(" from candidates."));
61 Serial.println(F("Old candidates:"));
62 printArray(candidatesID, candidatesCount);
63 setDifference(candidatesID, &candidatesCount, &nodeWithMax, 1, true);
64 Serial.println(F("New candidates:"));
65 printArray(candidatesID, candidatesCount);

```

```
66
67
68 // The set of nodes 'maxSatisfied' is now satisfied
69 Serial.println(F("\nSatisfying: "));
70 printArray(maxSatisfied, maxSatisfiedLength);
71 Serial.println(F("Removing from unsatisfied:"));
72 Serial.println(F("Old unsatisfied:"));
73 printArray(unsatisfied, unsatisfiedCount);
74 setDifference(unsatisfied, &unsatisfiedCount, maxSatisfied,
75               maxSatisfiedLength, false);
76 Serial.println(F("New unsatisfied:"));
77 printArray(unsatisfied, unsatisfiedCount);
78 }
79 Serial.println(F("\n\nNodes painted blue: "));
80 printArray(blueNodes, blueNodesCount);
81
```

Πίνακας Δημοσιεύσεων

Δημοσιεύσεις σε Διεθνή Συνέδρια (με κρίση)

- Alexandros Zervopoulos, Konstantinos Skiadopoulos, Konstantinos Giannakis, Konstantinos Oikonomou, Vasileios Komianos, Georgios Tsoumanis, “Constructing Virtual Backbones over Low-Cost Wireless Networks for Smart Tourism Services”, In 2019 10th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA), 2019.

Συμβολισμοί Μεγεθών

$\delta_k(u)$	Ο αριθμός των k -hop γειτόνων του κόμβου u .
Δ_k	Ο μέγιστος αριθμός k -hop γειτόνων των κόμβων του δικτύου.
a_{n_i}	Η τιμή της παραμέτρου καταλληλότητας του κόμβου n_i .
A	Η μέση τιμή καταλληλότητας των κόμβων ενός virtual backbone network.
L	Το μέγεθος ενός Connected Dominating Set και κατ' επέκταση του virtual backbone network.
M	Ο αριθμός μηνυμάτων που απαιτούνται για την κατασκευή ενός Connected Dominating Set.
T	Ο αριθμός βημάτων που χρειάζονται για την κατασκευή ενός Connected Dominating Set.
N	Ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο που έγιναν τα πειράματα.

Γλωσσάρι Ξενικών Όρων

Internet of Things	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
Connected Dominating Set	Διασυνδεδεμένο Κυριαρχικό Σύνολο
Virtual Backbone Network	Εικονικό Δίκτυο-Ραχοκοκαλιά
Personal Area Network	Δίκτυο Προσωπικής Περιοχής
Coordinator	Συντονιστής
Router	Δρομολογητής
End Device	Τελική Συσκευή

Συντομογραφίες

TTE	Τεχνολογία Πληροφορίας και Επικοινωνιών
IoT	Internet of Things
CDS	Connected Dominating Set
d -CDS	d -hop Connected Domianting Set
MCDS	Minimum Connected Dominating Set
API	Application Programming Interface
PAN	Personal Area Network
TTL	Time to Live

Ευρετήριο

Έξυπνες Πόλεις, 1
Έξυπνος Τουρισμός, 1
Application Programming Interface, 22
Arduino, 17
Connected Dominating Set, 3
Internet of Things, 1
Virtual Backbone Network, 3
XBee-PRO S2C, 19
Zigbee Coordinator, 20
Zigbee End Device, 21
Zigbee Router, 21
Zigbee, 20

Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνιών, 1