

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΧΑΜΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΕΥΡΕΙΑΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ
(LPWAN) LoRa ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΙΧΝΗΛΑΣΙΑ
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΧΡΗΣΗ GPS**

ΚΟΤΙΔΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ ΠΟΝΗΣ



ΑΘΗΝΑ, 19/2/2020

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Απόστολος Κοτίδης

Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και για αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και συνέβαλαν στην προσπάθειά μου αυτή.

Τον κύριο Πόνη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα και το ενδιαφέρον που έδειξε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Τον Γιώργο, τον Κώστα και την Ελένη για την άμεση και έμπρακτη βοήθεια τους.

Την οικογένειά μου και τους φίλους μου που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος «Εφοδιαστική» που διδάσκεται από τον Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της διπλωματικής είναι η μελέτη και η υλοποίηση δικτύου χαμηλής ισχύος και ευρείας περιοχής κάλυψης (LPWAN) με σκοπό τον εντοπισμό θέσης τελικών συσκευών (End-Nodes). Η αυξανόμενη τάση των τελευταίων χρόνων για συσκευές που μπορούν να συνδεθούν στο διαδίκτυο, με σκοπό την παρακολούθηση και τον απομακρυσμένο χειρισμό τους, έχει δημιουργήσει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things). Παράλληλα, αναπτύσσονται νέα δίκτυα (LPWAN) και πρωτόκολλα επικοινωνίας που επιτρέπουν στις τελικές συσκευές να λειτουργούν με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και να είναι αυτόνομες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ύστερα από τη σύγκριση των δικτύων LPWAN, το LoRa, μαζί με το πρωτόκολλο LoRaWAN, κρίθηκε το πλέον κατάλληλο για τον εντοπισμό θέσης τελικών συσκευών που είχε ως στόχο η παρούσα μελέτη. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, αναπτύχθηκαν τρεις LoRa σταθμοί βάσης (Gateways), ικανοί να ανιχνεύσουν τα σήματα που θα έστελναν τελικές συσκευές και να τα προωθήσουν σε διακομιστή δικτύου, ο οποίος με τη σειρά του προωθούσε μηνύματα με τα χαρακτηριστικά των σημάτων στον επιλύτη, ώστε να βρεθεί η θέση του end-node. Αρχικά, παρουσιάστηκε η διαδικασία επιλογής του εξοπλισμού και η προετοιμασία του και στη συνέχεια αναλύθηκαν οι αλγόριθμοι με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί εντοπισμός θέσης και η επιλογή του καταλληλότερου, που είναι αυτός της Χρονικής Διαφοράς Άφιξης Σήματος (TDOA). Όπως διαπιστώθηκε, για τη χρήση του αλγορίθμου TDOA στην επίλυση εντοπισμού θέσης, απαιτείται ειδικός εξοπλισμός LoRa ο οποίος υποστηρίζει τη ζητούμενη ακρίβεια χρονοσφραγίδων σε nanoseconds από τον επιλύτη Ioracloud, επομένως αντί αυτού, έγινε εφαρμογή του αλγορίθμου Δείκτη Ισχύος Λαμβανόμενου Σήματος (RSSI), με ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ εντοπίστηκαν οι παράμετροι που επηρεάζουν περισσότερο το δίκτυο και την λειτουργία του.

Abstract

This diploma thesis was developed within the framework of the course "Supply Chain Management", offered by the Sector of Industrial Management and Operational Research of the School of Mechanical Engineering of the National Technical University of Athens. The subject of this thesis is the study and implementation of Low Power and Wide Area Networks (LPWAN) in order to locate End-Nodes. The increasing trend of devices capable of connecting to the Internet, so as to monitor and remotely control them has created a wide range of Internet of Things applications. At the same time, new networks (LPWANs) and communication protocols are being developed that allow end-devices to operate with minimal power consumption and be autonomous for extended periods of time. After comparing the LPWAN networks, LoRa, together with the LoRaWAN protocol, was found to be the most suitable for locating end-devices, which was the implementation targeted in the present study. To achieve this goal, three LoRa base stations (Gateways) were developed, capable of detecting signals sent by end-devices and forwarding them to a network server, which in turn forwarded messages with signal characteristics to the solver, to find the position of the end-node. Initially, the procedure for selecting the equipment and its preparation was presented, and then the algorithms that could be used for localization were analyzed, choosing, finally, the most appropriate one, which was the Time Difference Of Arrival (TDOA). As it occurred, for the use of the TDOA algorithm in the positioning solution, a special LoRa equipment was required which would be capable of fine timestamping at nanosecond precision as the loracloud solver needs, so the RSSI algorithm was implemented instead, with satisfactory results, while it was emphasized which are the more effective parameters for the network and its operation.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Περιεχόμενα	5
Κατάλογος Σχημάτων	7
Κατάλογος Πινάκων	10
1. Εισαγωγή.....	11
1.1. Αντικείμενο της εργασίας	11
1.2. Δομή Εργασίας.....	11
2. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet Of Things)	13
2.1. Είδη Δικτύων για επικοινωνία των IoT συσκευών	14
2.1.1. Συνδεσιμότητα Μικρής Εμβέλειας	14
2.1.2. Συνδεσιμότητα Μεγάλης Εμβέλειας.....	15
2.1.3. LP-WAN λύσεις για υπηρεσίες IoT	16
2.1.3.1. LoRa και LoRaWAN	17
2.1.3.2. Sigfox	22
2.1.3.3. NB-IoT.....	23
2.2. Συγκριτική ανάλυση μεταξύ LP-WAN δικτύων.....	24
2.2.1. Ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας.....	25
2.2.2. Διάρκεια ζωής μπαταρίας και χρονική καθυστέρηση	25
2.2.3. Επεκτασιμότητα και όγκος πληροφοριών	25
2.2.4. Κάλυψη και εμβέλεια δικτύου.....	26
2.2.5. Μοντέλο ανάπτυξης	26
2.2.6. Κόστος.....	26
2.3. Επιλογή Δικτύου.....	27
3. Σχεδιασμός Συστήματος Εντοπισμού Θέσης	28
3.1.1. Δημιουργία Application στο TTN	29
3.1.2. Gateway	32
3.1.2.1. Ενεργοποίηση Gateway	36
3.1.2.2. Εύρεση IP του router	37
3.1.2.3. Σύνδεση Gateway με οθόνη.....	38
3.1.2.4. Καταχώρηση Gateway στο TTN	46

3.1.3.	End - Node	48
3.1.3.1.	Σύνδεση Node με υπολογιστή.....	51
3.1.4.	Επικοινωνία Node με TTN και Gateways.....	51
4.	Εντοπισμός Θέσης	61
4.1.	Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης με LoRa.....	63
4.1.1.	Radio Signal Strength Indicator (RSSI).....	63
4.1.1.1.	Αλγόριθμος και διαδικασία εντοπισμού της μεθόδου RSSI.....	64
4.1.2.	Time Of Arrival (TOA)	66
4.1.2.1.	Αλγόριθμος και διαδικασία εντοπισμού της μεθόδου TOA.....	66
4.1.3.	Time Difference Of Arrival (TDOA).....	67
4.1.3.1.	Αλγόριθμος και διαδικασία εντοπισμού της μεθόδου TDOA.....	67
4.2.	Η πλατφόρμα LoRa Cloud και Geolocation.....	72
4.2.1.	«HTTP POST Request»	75
4.3.	Αποτελέσματα Μετρήσεων	78
5.	Συμπεράσματα και μελλοντικές ενέργειες	83
	Αναφορές	87

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Εφαρμογές IoT	13
Σχήμα 2: Ενεργειακή απόδοση και κόστος τελικής συσκευής και συνδέσεως	16
Σχήμα 3: Data rate και κάλυψη.....	16
Σχήμα 4: Spread Spectrum Signal	18
Σχήμα 5: Spreading Factor	19
Σχήμα 6: Πλεονεκτήματα μεταξύ των τεχνολογιών IoT σε διαφορετικούς παράγοντες	27
Σχήμα 7: Σχεδιάγραμμα Συστήματος	28
Σχήμα 8: Αρχική Σελίδα TTN	29
Σχήμα 9: Επιλογή Console από λίστα.....	29
Σχήμα 10: Console Menu	29
Σχήμα 11: Προσθήκη Application	30
Σχήμα 12: Application	30
Σχήμα 13: Προσθήκη Node	31
Σχήμα 14: Στοιχεία Node	31
Σχήμα 15: RAK2245-868MHz	33
Σχήμα 16: Raspberry Pi 4.....	33
Σχήμα 17: Εξοπλισμός Gateway	34
Σχήμα 18: Διαδικασία συναρμολόγησης Gateway.....	35
Σχήμα 19: Τελική διάταξη Gateway.....	35
Σχήμα 20: Επιλογή image	36
Σχήμα 21: Flash image	37
Σχήμα 22: Τοποθέτηση κάρτας MicroSD	37
Σχήμα 23: Διεύθυνση IP του Router.....	38
Σχήμα 24: Διάταξη σύνδεσης Gateway με οθόνη	38
Σχήμα 25: Περιβάλλον Linux	39
Σχήμα 26: Εισαγωγή εντολής	39
Σχήμα 27: Αρχικό Μενού ρυθμίσεων του Gateway.....	40
Σχήμα 28: Εισαγωγή των IP	40
Σχήμα 29: Εντολή SSH.....	41
Σχήμα 30: Απομακρυσμένη επικοινωνία με Gateway	41
Σχήμα 31: Αρχικό Μενού Gateway μέσω SSH	41
Σχήμα 32: Επιλογή TTN	42
Σχήμα 33: Επιλογή συχνότητας λειτουργίας 868MHz	42

Σχήμα 34: Κώδικας Packet Forwarder	46
Σχήμα 35: Console Menu	46
Σχήμα 36: Εγγραφή Gateway.....	47
Σχήμα 37: Εκχώρηση στοιχείων Gateway	47
Σχήμα 38: Στοιχεία καταχωρημένου Gateway	48
Σχήμα 39: RAK811-LoRa Node.....	49
Σχήμα 40: Κώδικας Arduino	49
Σχήμα 41: Arduino Uno.....	50
Σχήμα 42: Semtech SX1276 transceiver	50
Σχήμα 43: Συναρμολογημένο End-Node.....	51
Σχήμα 44: Τοποθέτηση Gateway	52
Σχήμα 45: Αρχική οθόνη Τερματικού	52
Σχήμα 46: Εκχώρηση στοιχείων Node	53
Σχήμα 47: Οθόνη εκκίνησης Node	53
Σχήμα 48: Αποστολή μηνύματος προς TTN	53
Σχήμα 49: Εισερχόμενα μηνύματα στο TTN	54
Σχήμα 50: Uplink με χρήση "pig-tail" κεραίας.....	55
Σχήμα 51: Αποστολή μηνυμάτων από διαφορετικές θέσεις	55
Σχήμα 52: Κεραία ενίσχυσης σήματος	56
Σχήμα 53: Τοποθέτηση Gateway με κεραία.....	56
Σχήμα 54: Uplink από κοντινή περιοχή	57
Σχήμα 55: Uplink από απόσταση ενός χιλιομέτρου	57
Σχήμα 56: Κάλυψη περιοχής με ενισχυμένη κεραία.....	58
Σχήμα 57: Metadata των Gateways	59
Σχήμα 58: Τελική μορφή Gateway	60
Σχήμα 59: Τριπλευρισμός σήματος.....	61
Σχήμα 60: Μέθοδος κύκλων με RSSI.....	63
Σχήμα 61: Διάταξη 3 gateways.....	68
Σχήμα 62: Σχηματισμός κλάδων υπερβολής	69
Σχήμα 63: Εντοπισμός θέσης end-node	69
Σχήμα 64: Επιρροή σφάλματος στην λύση	71
Σχήμα 65: Αρχιτεκτονική του αναπτυσσόμενου δικτύου.....	72
Σχήμα 66: Αρχική σελίδα LoRa Cloud.....	73
Σχήμα 67: Άνοιγμα οδηγού χρήσης.....	73
Σχήμα 68: API Version 3.....	74
Σχήμα 69: Περιεχόμενα οδηγού	74
Σχήμα 70: Αποτέλεσμα επίλυσης.....	77

Σχήμα 71: Τοποθέτηση Gateways	78
Σχήμα 72: Διάταξη Gateways στην περιοχή μετρήσεων	79
Σχήμα 73: Ποσοστά επιτυχημένων uplinks	80
Σχήμα 74: Χάρτης δεικτών HDOP	81
Σχήμα 75: Αποτέλεσμα λύσης βασισμένο σε RSSI	81
Σχήμα 76: Αποτελέσματα θέσης 1 στον χάρτη	82
Σχήμα 77: Αποτελέσματα θέσης 2 στον χάρτη	82
Σχήμα 78: Εμφάνιση Uplink στο TTN	84
Σχήμα 79: Παράδειγμα εμφάνισης Node σε χάρτη	85
Σχήμα 80: Προσθήκες αυτοματοποίησης στη δομή	85

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων συναρτήσει του συντελεστή διάδοσης....	19
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά τελικών συσκευών κάθε κλάσης	21
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά LP-WAN δικτύων Sigfox, LoRa, NB-IoT	23
Πίνακας 4: Διαφορετικά κόστη μεταξύ των LoRa, Sigfox και NB-IoT	27
Πίνακας 5: Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός	32
Πίνακας 6: Εξοπλισμός.....	48

1. Εισαγωγή

1.1. Αντικείμενο της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη και υλοποίηση δικτύου χαμηλής ισχύος και ευρείας περιοχής κάλυψης (LPWAN) με σκοπό τον εντοπισμό θέσης και την ιχνηλασιμότητα τελικών συσκευών (End-Nodes). Το ενδιαφέρον εστιάζει στην κάλυψη της ανάγκης της ιχνηλασιμότητας αντικειμένων για το μεγαλύτερο δυνατό χρονικό διάστημα με το μικρότερο εφικτό κόστος. Η προσέγγιση αυτή δεν έχει σκοπό να αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους εντοπισμού GPS, εφόσον η ακρίβεια του εντοπισμού θέσης που προσφέρουν αυτοί οι μέθοδοι είναι η βέλτιστη. Οι εφαρμογές που καλύπτει, αφορούν περιπτώσεις όπου το ζητούμενο είναι η παρακολούθηση ενός αντικειμένου σε βάθος χρόνου και σε διακριτές χρονικές στιγμές, εντός της ημέρας. Τα παραδείγματα εφαρμογών αυξάνονται συνεχώς και αφορούν επιχειρήσεις, για την παρακολούθηση στόλου οχημάτων, περιβαλλοντικές οργανώσεις, για την παρακολούθηση και μελέτη συμπεριφοράς έμβιων όντων, αλλά και δημόσιοι οργανισμοί, για την συλλογή και διαχείριση απορριμάτων. Στην Ελλάδα, η αξιοποίηση τεχνολογιών που λειτουργούν μέσω δικτύων LPWAN είναι ακόμη σε πρώιμο στάδιο και αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία, κρίνοντας από την εξέλιξή τους στην υπόλοιπη Ευρώπη τα τελευταία πέντε χρόνια.

1.2. Δομή Εργασίας

Το παρόν κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στο αντικείμενο και τους στόχους της εργασίας και παρέχει μια εικόνα για το περιεχόμενο των κεφαλαίων που ακολουθούν.

Στο 2ο Κεφάλαιο εντοπίζεται η ολοένα αυξανόμενη τάση για εφαρμογές του Δικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things), ενώ αναλύονται τα χαρακτηριστικά των τριών μεγαλύτερων δικτύων LPWAN, το LoRa, το Sigfox και το NB-IoT. Ύστερα από την εξέταση ορισμένων παραμέτρων για κάθε δίκτυο και τη σύγκριση μεταξύ τους, επιλέγεται το δίκτυο LoRa ως το πλέον κατάλληλο για το αντικείμενο μελέτης.

Στο 3ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι ενέργειες που έγιναν για τη ρύθμιση του εξοπλισμού και γενικότερα του δικτύου, ώστε οι συσκευές (σταθμοί βάσης-τελικές συσκευές) να είναι σε θέση να επικοινωνήσουν μεταξύ τους μέσω του διακομιστή δικτύου The Things Network (TTN). Στο κεφάλαιο αυτό, περιγράφονται με χρονική σειρά οι εργασίες που έγιναν, προκειμένου να προετοιμαστεί το δίκτυο για τον εντοπισμό θέσης. Επίσης, έγιναν αρκετές δοκιμές για τη λήψη δεδομένων και την επιτυχή επικοινωνία μεταξύ τελικής συσκευής και σταθμού βάσης.

Στο 4ο Κεφάλαιο αποτυπώνονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό θέσης και ο αλγόριθμος που ακολουθεί κάθε μέθοδος. Ο Δείκτης Ισχύος Λαμβανόμενου Σήματος (RSSI), ο Χρόνος Άφιξης Σήματος (TOA) και η Χρονική Διαφορά Άφιξης Σήματος (TDOA) αποτελούν τρεις από τις πλέον κατάλληλες μεθόδους εντοπισμού θέσης. Όπως αναλύεται στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται επιλύτης που εφαρμόζει συνδυασμό των μεθόδων RSSI και TDOA, από τον οποίο ελήφθησαν τα αποτελέσματα τοποθεσίας της τελικής συσκευής. Όπως διαπιστώθηκε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της μελέτης, η μέθοδος TDOA απαιτεί

σταθμούς βάσης LoRa, ικανούς να καταγράψουν χρονοσφραγίδες με ακρίβεια nanosecond, ενώ ο εξοπλισμός που ήταν διαθέσιμος λειτουργούσε με ακρίβεια microsecond. Επομένως, έγινε η εφαρμογή του εναλλακτικού αλγορίθμου RSSI, με ικανοποιητικά αποτελέσματα ακρίβειας εντοπισμού θέσης.

Στο 5ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη, ενώ εντοπίζονται τα σημεία που επιδέχονται βελτίωσης για μελλοντικές ενέργειες. Πιο συγκεκριμένα, διασαφηνίζονται οι στόχοι που είχαν τεθεί πριν την εκπόνηση της μελέτης που έγινε και κατά πόσο αυτοί πραγματοποιήθηκαν. Επίσης, παρουσιάζονται ενέργειες που θα μπορούσαν να γίνουν, προκειμένου η διαδικασία εντοπισμού θέσης να γίνεται συστηματικά, με αυτοματοποιημένες διαδικασίες, για τη δυνατότητα εποπτείας ενός, εν δυνάμει, μεγάλου στόλου τελικών συσκευών.

2. Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet Of Things)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) αποτελεί το δίκτυο επικοινωνίας πληθώρας συσκευών, αισθητήρων και αντικειμένων ικανών να συνδεθούν σε τοπικό ή παγκόσμιο δίκτυο με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων είτε μεταξύ τους, είτε με τον τελικό χρήστη.

Το Internet of Things, θεωρείται η νέα επανάσταση στον τομέα των τεχνολογιών και συγκεκριμένα της επικοινωνίας. Με τον αριθμό των συσκευών που συνδέονται στο διαδίκτυο να αυξάνεται δραματικά τα τελευταία έτη, έχουν παρουσιαστεί νέες ιδέες στο τομέα της τεχνολογίας δημιουργώντας με τη σειρά τους νέες ανάγκες. Επίσης, η τάση για εκσυγχρονισμό τόσο των επιχειρήσεων όσο και των νοικοκυριών, έχει οδηγήσει στη ραγδαία εξέλιξη και ανάπτυξη αισθητήρων που έχουν τη δυνατότητα να στέλνουν πληροφορίες μέσω διαδικτύου, επιτρέποντας στο χρήστη να κάνει χειρισμούς και να ενημερώνεται απομακρυσμένα, χωρίς να χρειάζεται να γίνει από τον ίδιο άμεση επίβλεψη. Τα παραδείγματα εφαρμογών είναι πολλά και εκτείνονται από κινητά τηλέφωνα και υπολογιστές, μέχρι καφετιέρες, ψυγεία, λαμπτήρες και wearable τεχνολογία (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Εφαρμογές IoT

Επίσης, η εξέλιξη της τεχνολογίας έχει οδηγήσει στη μείωση του κόστους παραγωγής, με αποτέλεσμα να είναι οικονομικά εφικτή η σύνδεση σε δίκτυο WiFi ή κάποιο άλλο είδος επικοινωνίας, για συσκευές που πριν από μερικά χρόνια δε θα φανταζόταν κανείς ότι θα μπορούσαν να συνδεθούν στο διαδίκτυο.

Σύμφωνα με έρευνες από εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο των τηλεπικοινωνιών όπως η Cisco, τουλάχιστον 50 δισεκατομμύρια IoT συσκευές θα είναι

συνδεδεμένες μέχρι το 2020, ενώ προβλέπεται ένα έντονο κύμα τεχνολογικής μετάβασης και εκσυγχρονισμού από τις επιχειρήσεις, οι οποίες αναζητούν νέες λύσεις και εφαρμογές που θα τους επιτρέπουν να εκμεταλλευθούν στο έπακρο τα Big Data που παράγουν (Cisco, 2015).

2.1. Είδη Δικτύων για επικοινωνία των IoT συσκευών

Οι υπάρχουσες τεχνολογίες για τις υπηρεσίες που καλύπτουν οι IoT συσκευές χωρίζονται σε μικρής και μεγάλης εμβέλειας μετάδοσης. Τα κύρια εμπόδια που εντοπίζονται στην εφαρμογή IoT λύσεων είναι η διαχείριση κόστους του δικτύου, η επεκτασιμότητα και οργάνωσή του, η διαστασιολόγηση των τελικών συσκευών, η ενεργειακή ανεξαρτησία τους και η κάλυψη δικτύου.

2.1.1. Συνδεσιμότητα Μικρής Εμβέλειας

Τα συστήματα μικρής εμβέλειας ήταν τα πρώτα που εφαρμόστηκαν σε δίκτυα ασύρματων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks). Όσον αφορά το κόστος του δικτύου, ένα τυπικό χαρακτηριστικό των συνδέσεων αυτών είναι η ιδιωτική κτήση εξοπλισμού στο μεγαλύτερο μέρος του δικτύου. Ο παράγοντας αυτός δεν μπορεί να παραλειφθεί μιας και αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα της λειτουργίας. Στην περίπτωση που ένα σύνθετος δίκτυο ασύρματων αισθητήρων υιοθετούταν από μία στρατηγική δημόσια υποδομής, δε θα ήταν εφικτή η επικοινωνία ανάμεσα στους χρήστες και τον εγκατεστημένο εξοπλισμό, λόγω περιορισμών εμβέλειας μετάδοσης (Wang & Liu, 2011). Επομένως, θα χρειαζόταν επιπρόσθετος εξοπλισμός, όπως Σταθμοί Βάσης (Gateways) για να συνδέσουν τις τελικές συσκευές (End-Nodes) με τον Κεντρικό Σταθμό Βάσης.

Επιπρόσθετα, η διαχείριση του δικτύου σε μεγάλη κλίμακα, εμπεριέχει προβλήματα που αφορούν τη λειτουργικότητα των End-Nodes σε εφαρμογές μικρής εμβέλειας μετάδοσης. Για παράδειγμα, οι περισσότερο διαδεδομένες τεχνολογίες WSN, όπως, τα βασισμένα σε IEEE 802.15.4, ZigBee και 6LoWPAN, παρουσιάζουν εξαιρετικά χαμηλές καταναλώσεις ενέργειας συνδυάζοντας χαμηλό κόστος κατασκευής τελικών συσκευών. Παρ' όλα αυτά θα χρειαζόταν ένας σημαντικός αριθμός συγκεντρωτών (συλλέκτες πληροφορίας) σε σχετικά μεγάλα δίκτυα, οι οποίοι αυξάνουν συνολικά την κατανάλωση ενέργειας.

Ακόμη ένα σημαντικό ζήτημα, κοινό για όλες τις τεχνολογίες μικρής εμβέλειας, είναι η ανάγκη σύνδεσης στο διαδίκτυο, έτσι ώστε να φορτώνονται τα δεδομένα που συλλέγονται στο υπολογιστικό νέφος (Cloud). Ενώ οι αστικές περιοχές και τα προάστια δεν αναμένεται να αντιμετωπίζουν πρόβλημα, σε απομακρυσμένες περιοχές είναι

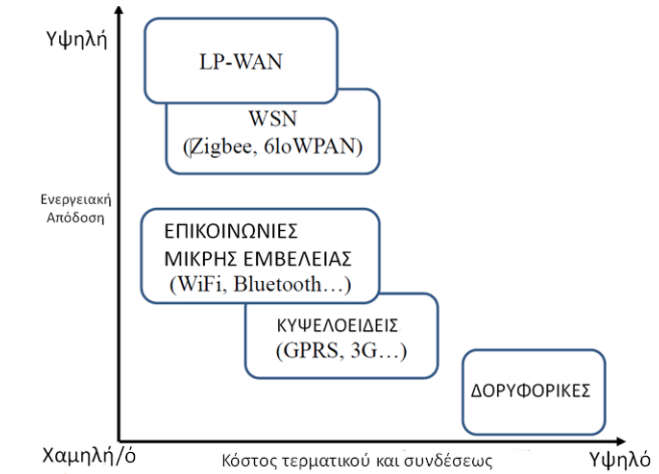
πολύ δύσκολο και δαπανηρό να αναπτυχθεί δίκτυο, λόγω έλλειψης προϋπάρχουσας υποδομής για παροχή διαδικτυακής πρόσβασης αυτού του τύπου.

2.1.2. Συνδεσιμότητα Μεγάλης Εμβέλειας

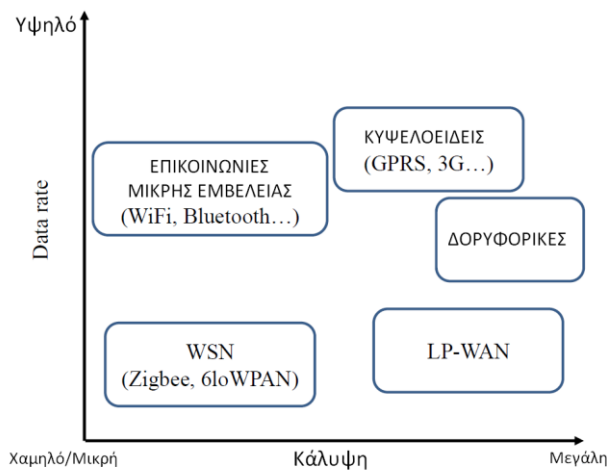
Όσον αφορά τη μετάδοση μεγάλης εμβέλειας, τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται είναι τα κυψελοειδή. Βασίζονται σε δημόσιες υποδομές και είναι ευρέως διαδεδομένα για την κάλυψη που προσφέρουν σε μεγάλες περιοχές. Τέτοια είναι για παράδειγμα, τα πρότυπα δίκτυα GSM, GPRS, 3G/4G και το επερχόμενο 5G. Οι τελικές συσκευές συλλέγουν τα δεδομένα και στη συνέχεια τα στέλνουν στο Cloud μέσω συνδέσμου κυψελοειδών δεδομένων. Το κύριο πρόβλημα όμως, είναι ότι αυτά τα συστήματα σχεδιάστηκαν έτσι, ώστε να ικανοποιήσουν διαφορετικές ανάγκες από αυτές των IoT συσκευών (Narsalla et al, 2013). Οι υπάρχοντες κυψελοειδείς σταθμοί βάσης είναι ικανοί να υποστηρίξουν ένα μικρό σχετικά αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, σε σύγκριση με την ανάγκη που υπάρχει σε εφαρμογές αισθητήρων. Ακόμη, τα συστήματα ελέγχου απαιτούν συνήθως ένα δίκτυο με πολλούς αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης που μπορούν να συνδεθούν και να στέλνουν περιοδικά μηνύματα πληροφορίας μερικών byte. Για το λόγο αυτό, τα κυψελοειδή δίκτυα είναι στην παρούσα τους μορφή, μάλλον ακατάλληλα προς χρήση σε όρους επεκτασιμότητας και κατανάλωσης ενέργειας για τις εφαρμογές αυτές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2. Αν εστιάσει κανείς στην ενεργειακή απόδοση, τα κυψελοειδή δίκτυα απαιτούν συνεχή επικοινωνία μεταξύ τελικών συσκευών και σταθμών βάσης για κάθε ενέργεια, γεγονός που εξαντλεί τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Το ίδιο περίπου ισχύει και για τις τεχνολογίες δορυφορικής επικοινωνίας. Παρά την ευρεία κάλυψη που προσφέρουν παγκοσμίως, η ενέργεια που καταναλώνεται για την επικοινωνία είναι απαγορευτική για εφαρμογές IoT. Επίσης, η μεγάλη καθυστέρηση στη μετάδοση σημάτων αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για εφαρμογές στις οποίες παίζει σημαντικό ρόλο η γρήγορη απόκριση, ενώ η παροχή υπηρεσιών δορυφορικής μετάδοσης είναι υπερβολικά δαπανηρή.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, τα Δίκτυα Χαμηλής Ισχύος και Ευρείας Κάλυψης (LP-WAN) εμφανίζονται σαν μία εναλλακτική λύση μεταδόσεων μεγάλης εμβέλειας για να καλύψουν τις ανάγκες που έχουν οι IoT υπηρεσίες (Σχήμα 3).



Σχήμα 2: Ενεργειακή απόδοση και κόστος τελικής συσκευής και συνδέσεως



Σχήμα 3: Data rate και κάλυψη

2.1.3. LP-WAN λύσεις για υπηρεσίες IoT

Τα τελευταία χρόνια, αναπτύσσονται όλο και περισσότερες πλατφόρμες που ακολουθούν τη φιλοσοφία των δικτύων LP-WAN. Στόχος των ενεργειών αυτών είναι η εκμετάλλευση της μεγάλης εμβέλειας που παρουσιάζεται στα κυψελοειδή δίκτυα και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας των WSN. Πολλά από τα LP-WAN εγχειρήματα βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, ενώ κάποια έχουν ήδη ξεκινήσει να αναπτύσσουν την αρχιτεκτονική τους. Οι LoRa, Sigfox και NB-IoT είναι οι πρωτοπόρες πλατφόρμες στον τομέα των δικτύων LP-WAN, παρουσιάζουν έντονους ρυθμούς ανάπτυξης και έχουν ήδη ξεκινήσει να παρέχουν IoT υπηρεσίες που χρησιμοποιούν επιχειρήσεις και ιδιώτες (Margelis et al, 2015).

Τα δίκτυα LP-WAN ακολουθούν αστεροειδή τοπολογία, όπου οι τελικές συσκευές συνδέονται άμεσα με τους σταθμούς βάσης. Συνήθως, οι σταθμοί βάσης και ο

σκελετός του δικτύου είναι δημόσιοι και τους διαχειρίζονται οι πάροχοι των IoT υπηρεσιών, κάτι που απελευθερώνει τους χρήστες από τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας, ενώ δεν χρειάζεται να είναι οι ίδιοι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη του συστήματος. Όσον αφορά τη συνδεσιμότητα των τελικών συσκευών με τους σταθμούς βάσης, οι περισσότερες εταιρίες εφαρμόζουν ζώνες συχνοτήτων ISM (Industrial, Scientific and Medical) οι οποίες κυμαίνονται σε μία περιοχή συχνοτήτων κάτω από το 1 GHz, όπως 868 MHz στην Ευρώπη, 915 MHz στις ΗΠΑ, 433 MHz στην Ασία κλπ. Σε σύγκριση με τη ζώνη των 2.4 GHz, η μετάδοση σε μικρότερη συχνότητα επιτρέπει την καλύτερη διαπερασιμότητα των κυμάτων και μεγαλύτερη εμβέλεια, χαρακτηριστικά που θεωρούνται πολύτιμα για τη συνδεσιμότητα σε εσωτερικούς χώρους.

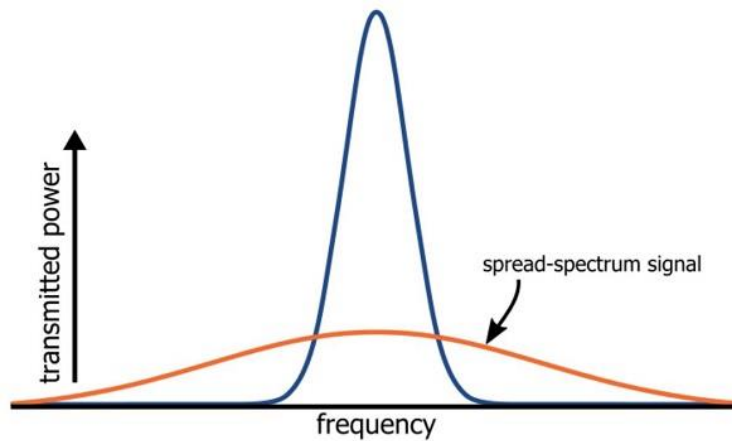
Ακόμη ένα κοινό χαρακτηριστικό σε αυτά τα συστήματα είναι η ασύμμετρη συνδεσιμότητα των τελικών συσκευών. Επειδή ο στόχος είναι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, οι περισσότερες εφαρμογές εστιάζουν στη σύνδεση μέσω uplink, δηλαδή από την τελική συσκευή προς το σταθμό βάσης, μιας και το αντίθετο (downlink) είναι περιορισμένο, έτσι ώστε να μειώνεται ο χρόνος στον οποίο γίνεται λήψη δεδομένων. Επομένως, η κύρια ροή δεδομένων έχει κατεύθυνση από τις τελικές συσκευές του δικτύου προς τον πυρήνα του (σταθμοί βάσης), όμως στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιούνται μόνο αισθητήρες αλλά και επενεργητές, υπάρχει ανάγκη αμφίδρομης ανταλλαγής μηνυμάτων (uplink/downlink). Εκτός αυτού, χρειάζεται και στην περίπτωση που πρέπει να γίνει ενημέρωση λογισμικού των τελικών συσκευών.

Συνοψίζοντας, τα κύρια πλεονεκτήματα των δικτύων LPWAN είναι τα εξής:

- Μεγάλη επεκτασιμότητα και εμβέλεια, απαραίτητα χαρακτηριστικά δικτύων σε μεγάλες περιοχές με έντονη συμφόρηση.
- Περιορισμένη, που είναι χρήσιμη στην ιχνηλασιμότητα αγαθών κατά την αποστολή.
- Ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες μπορούν είτε να προγραμματιστούν από τον χρήστη, είτε από το σύστημα διαχείρισης του LP-WAN.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας τελικών συσκευών και χαμηλό κόστος.

2.1.3.1. LoRa και LoRaWAN

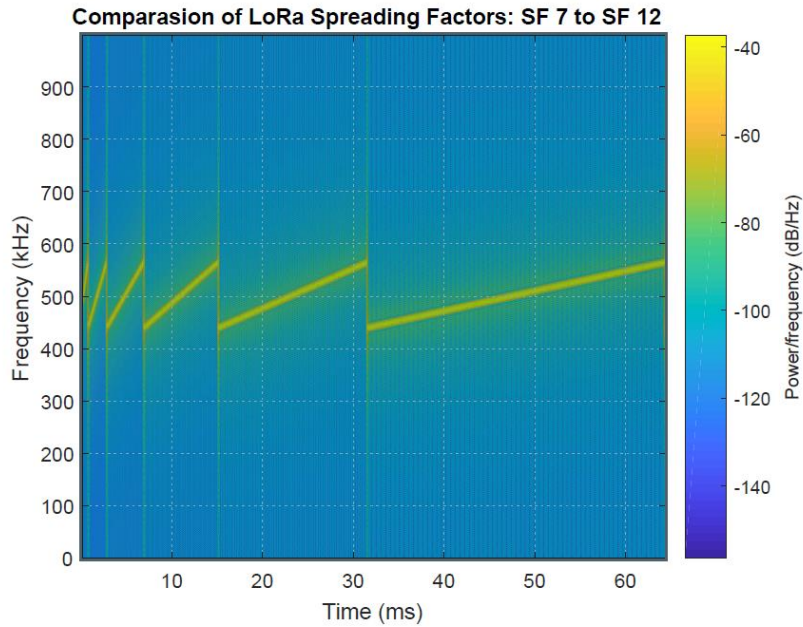
Το LoRa (Long Range) είναι μία τεχνολογία φυσικού επιπέδου ανεπτυγμένη από την εταιρεία Semtech, η οποία χρησιμοποιεί τη Διαμόρφωση Διαχωρισμού Φάσματος (Spread Spectrum Modulation) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4 (Sforza, 2013).



Σχήμα 4: Spread Spectrum Signal

Στην Ευρώπη οι διαθέσιμες συχνότητες είναι 433 MHz και 868 MHz, ενώ συνηθέστερη είναι η συχνότητα των 868 MHz αφού είναι ευρύτερη και περιέχει υποσήματα με λιγότερο αυστηρές απαιτήσεις κύκλου εργασίας. Οι συχνότητες λειτουργίας εντάσσονται στο φάσμα των ISM συχνοτήτων (Industrial, Scientific & Medical) που προορίζονται για τηλεπικοινωνίες στον χώρο της βιομηχανίας, των επιστημών και της ιατρικής. Η μπάντα ISM φτάνει μέχρι τις συχνότητες 1 GHz και είναι διαδεδομένη σε εφαρμογές IoT κυρίως, γιατί η χρήση της δεν προϋποθέτει κρατική άδεια και επιτρέπει χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας. Όσον αφορά την Ευρώπη, υπεύθυνη για τη ρύθμιση και τον έλεγχο της χρήσης των συσκευών που λειτουργούν σε ISM συχνότητες, είναι ο οργανισμός ETSI (European Telecommunications Standards Institute).

Η τοπολογία του δικτύου είναι τύπου αστέρα με gateways (σταθμοί βάσης) που έχουν το ρόλο μιας νοητής γέφυρας ανάμεσα στα end-nodes (τελικές συσκευές) και το κεντρικό δίκτυο (Network Server), όπου τα δεδομένα αποθηκεύονται και γίνονται διαθέσιμα στον χρήστη. Το εύρος κάλυψης εξαρτάται από τον εξοπλισμό που είναι διαθέσιμος, αλλά μπορεί και να τροποποιηθεί μέσα από αλλαγές στο εύρος σήματος, στον κώδικα που χρησιμοποιείται, στην ισχύ που εκπέμπεται, στην συχνότητα του φορέα και στον συντελεστή διάδοσης (Spread Factor). Ο συντελεστής διάδοσης (SF) είναι το πεδίο ανάμεσα στο symbol rate και το chip rate. Το πεδίο αυτό είναι ίσο με $2^{(SF)}$, ενώ οι συντελεστές διάδοσης κυμαίνονται από 7 έως 12 (Σχήμα 5). Αν αυξηθεί ο SF τότε αυξάνεται η ισχύς μετάδοσης και το σήμα γίνεται πιο ανθεκτικό απέναντι σε θορύβους, μειώνεται όμως το data rate (βλ. Πίνακας 1: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων συναρτήσει του συντελεστή διάδοσης). Καθένας από αυτούς είναι ορθογώνιος, που σημαίνει ότι επιτρέπεται να μεταδοθούν πολλαπλά σήματα στο ίδιο κανάλι ταυτόχρονα.



Σχήμα 5: Spreading Factor

Πίνακας 1: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων συναρτήσει του συντελεστή διάδοσης

Spread Factor	Bandwidth	Data Rate	Ευαισθησία Δέκτη (SX1276)
7	125 kHz	2,22 kbits/s	-123 dBm
8	125 kHz	1,19 kbits/s	-126 dBm
9	125 kHz	0,64 kbits/s	-129 dBm
10	125 kHz	0,35 kbits/s	-132 dBm
11	125 kHz	0,16 kbits/s	-133 dBm
12	125 kHz	0,08 kbits/s	-136 dBm

Σε μία συσκευή LoRa το εύρος ζώνης κυμαίνεται από 7,8 kHz έως 500 kHz, με τα πιο συνήθη να είναι στα 125 kHz , 250 kHz , και 500 kHz.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας που βασίστηκε στο LoRa και τυποποιήθηκε από την LoRa Alliance για πρώτη φορά το 2015 ονομάστηκε LoRaWAN (Long Range Wide Area Network). Η LoRa Alliance είναι μια συμμαχία εταιριών που δραστηριοποιούνται στον χώρο των τηλεπικοινωνιών (LoRa-Alliance, 2015), ενώ αποτελείται από τρεις κύριες ομάδες εταιριών: χρηματοδότες, συνεισφέροντα μέλη και μέλη-χρήστες (stakeholders). Χρησιμοποιώντας το LoRaWAN κάθε μήνυμα που μεταδίδεται από μια τελική συσκευή, λαμβάνεται από όλους τους σταθμούς βάσης που είναι εντός εμβέλειας. Αξιοποιώντας αυτή την περιττή λήψη, το LoRaWAN βελτιώνει τον ποσοστό λαμβανόμενων μηνυμάτων. Για να επιτευχθεί αυτό, χρειάζεται να τοποθετηθούν σταθμοί βάσης στην περιοχή εφαρμογής του δικτύου, γεγονός που αυξάνει το κόστος ανάπτυξης του. Οι λήψεις προωθούνται και φιλτράρονται σε έναν διακομιστή δικτύου (Network Server) ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο ασφάλειας, αποστολής

επιβεβαιώσεων στην τελική συσκευή και την αποστολή του μηνύματος στον διακομιστή εφαρμογών (Application Server).

Μία από τις δυνατότητες του LoRaWAN, είναι η χρήση της μεθόδου ADR (Adaptive Data Rate) που επιτρέπει στον διακομιστή δικτύου να προσαρμόζει το συντελεστή διάδοσης (SF), έτσι ώστε να ταιριάζει όσο το δυνατόν καλύτερα στις απαιτήσεις του κάθε μηνύματος (uplink), κάτι που μεγιστοποιεί την διάρκεια ζωής της μπαταρίας και βελτιώνει τη χωρητικότητα του δικτύου. Η ύπαρξη της μεθόδου αυτής είναι καθοριστικής σημασίας για την επεκτασιμότητα δικτύων LoRa, όπως αποδεικνύεται από μελέτες οι οποίες δείχνουν ότι χωρίς ADR ένα δίκτυο θα μπορούσε να υποστηρίξει 120 nodes, ενώ με τη χρήση ADR στο ίδιο δίκτυο θα μπορούσε να υποστηρίξει 1.600 nodes.

Επίσης, διακρίνονται τρεις τύποι τελικών συσκευών αναλόγως τις ανάγκες πληροφορίας. Οι Class A συσκευές έχουν προγραμματισμένο χρονικό «παράθυρο» λήψης πληροφοριών αμέσως μετά από κάθε uplink επικοινωνία, με αποτέλεσμα να καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια, οι Class B έχουν επιπρόσθετα προγραμματισμένα χρονικά «παράθυρα» επομένως η κατανάλωση ενέργειας είναι μεγαλύτερη, ενώ οι Class C είναι συνεχώς σε επικοινωνία με τον σταθμό βάσης και εκπέμπουν σήμα, επομένως καταναλώνουν την περισσότερη ενέργεια από τις τρεις κατηγορίες LoRa τελικών συσκευών (βλ. Πίνακας 2). Τέλος, η ασφάλεια εξασφαλίζεται από άκρη σε άκρη (end-to-end) με Εξελιγμένα Πρότυπα Κρυπτογράφησης (AES), έτσι ώστε να παρέχονται μοναδικά δίκτυα, εφαρμογές και κλειδιά συσκευών για κρυπτογράφηση δεδομένων σε διαφορετικά Συστήμα Ανοιχτής Διασύνδεσης (OSI) (Sanchez, 2016).

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά τελικών συσκευών κάθε κλάσης

Class Συσκευών	Χαρακτηριστικά
<p>A («Όλες»)</p>	<p>Τελικές συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρία ή ενεργοποιητές χωρίς περιορισμούς χρονικής καθυστέρησης επικοινωνίας. Επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία με τους σταθμούς βάσης και οι μεταδόσεις είναι προγραμματισμένες από τις τελικές συσκευές σε καθορισμένο χρονικό πρόγραμμα. Αποτελούν τις ενεργειακά αποδοτικότερες συσκευές, εφόσον τα downlinks είναι περιορισμένα και προϋποθέτουν να έχει προηγηθεί uplink.</p>
<p>B («Beacon»)</p>	<p>Τελικές συσκευές που τροφοδοτούνται από μπαταρία, ενεργειακά επαρκείς με περισσότερα παράθυρα για εισερχόμενα μηνύματα. Για να ανοίξει παράθυρο επικοινωνίας σε συγκεκριμένο χρόνο, οι τελικές συσκευές δέχονται ταυτόχρονα ένα σήμα (beacon) από το σταθμό βάσης. Στην περίπτωση αυτή, ο διακομιστής δικτύου γνωρίζει πότε μπορούν να λάβουν σήμα οι τελικές συσκευές.</p>
<p>C («Συνεχείς»)</p>	<p>Τελικές συσκευές με τον μέγιστο αριθμό εισερχόμενων μηνυμάτων. Αποτελούν συσκευές που μπορούν να δέχονται σήματα συνεχώς και χρησιμεύουν σε εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνίας, ενώ κλείνουν μόνο όταν η ενέργεια που καταναλώνουν για μετάδοση είναι πάνω από κάποιο όριο.</p>

2.1.3.2. Sigfox

Το Sigfox είναι ένα Δίκτυο Χαμηλής Ισχύος και Ευρείας Κάλυψης (LP-WAN), το οποίο ξεκίνησε να αναπτύσσεται το 2010 από την ομώνυμη start-up εταιρία στη Γαλλία. Ως φορέας δικτύου, προσφέρει ολοκληρωμένη συνδεσιμότητα IoT εφαρμογών με δικές της εγκαταστάσεις σταθμών βάσης, εξοπλισμένων με γνωστικά προγράμματα επικοινωνίας που ορίζονται από το λογισμικό και συνδεδεμένων σε back-end διακομιστές μέσω IP δικτύου. Οι τελικές συσκευές συνδέονται στους σταθμούς βάσης μέσω της διαμόρφωσης Δυαδικής Μετατροπής Φάσης Πληκτρολόγησης (BPSK) σε μία εξαιρετικά στενή ζώνη συχνοτήτων (μπάντα) των 100 Hz (Sanchez, 2016).

Όπως και το LoRa, χρησιμοποιεί ISM ζώνες συχνοτήτων χωρίς να χρειάζεται άδεια. Λόγω της εξαιρετικά στενής μπάντας, χρησιμοποιεί το εύρος ζώνης συχνοτήτων επαρκώς και δέχεται ελάχιστα επίπεδα θορύβου, κάτι που οδηγεί σε χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλή ευαισθησία λήψης και χαμηλό κόστος σχεδιασμού κεραίας με την προϋπόθεση ότι η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων δεν ξεπερνά τα 100 bps. Αρχικά, το δίκτυο υποστήριζε μόνο uplink επικοινωνία, όμως αργότερα εξελίχθηκε σε δίκτυο αμφίδρομης επικοινωνίας. Για να μπορέσει να γίνει downlink επικοινωνία από το σταθμό βάσης προς τις τελικές συσκευές, θα πρέπει πρώτα να προκύψει κάποιο μήνυμα uplink. Ο αριθμός των uplink μηνυμάτων περιορίζεται στα 140 ανά ημέρα και το μέγιστο μήκος μηνύματος φτάνει τα 12 bytes. Ο αριθμός των downlink, όμως, είναι σημαντικά περιορισμένος, αφού επιτρέπονται μόνο 4 downlink μηνύματα ανά ημέρα σε κάθε τελική συσκευή, γεγονός που δεν αφήνει περιθώριο για την επιβεβαίωση άφιξης κάθε uplink μηνύματος από τον σταθμό βάσης. Επίσης, τα μηνύματα αυτά δεν ξεπερνούν τα 8 bytes μήκος (Mekki et al, 2017).

Επομένως, για την αξιόπιστη uplink επικοινωνία χρησιμοποιείται μετάδοση σε πλήθος χρονικών στιγμών και συχνοτήτων, καθώς και πολλαπλές αποστολές του μηνύματος. Κάθε τελική συσκευή αποστέλλει πολλαπλές φορές το ίδιο μήνυμα σε διαφορετικά κανάλια συχνοτήτων. Για τον λόγο αυτό, για παράδειγμα στην Ευρώπη, η ζώνη συχνοτήτων ανάμεσα στα 868.10 MHz και 868.220 MHz χωρίζεται σε 400 ορθογωνικά κανάλια των 100 Hz. Εφόσον οι σταθμοί βάσης μπορούν να λάβουν μηνύματα ταυτόχρονα σε όλα τα κανάλια, οι τελικές συσκευές μπορούν να διαλέξουν τυχαία τη συχνότητα καναλιού που θα μεταδώσουν το μήνυμα, απλοποιώντας έτσι τον σχεδιασμό και το κόστος τους (Raza et al, 2017). Όπως υποστηρίζει η εταιρία, η εμβέλεια μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 10 χιλιόμετρα, ενώ η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να επιτρέπει έως 20 χρόνια διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας 2.5 Ah σε κατάσταση αναμονής.

Η τοπολογία αστέρα της Sigfox είναι παρόμοια με αυτή των κυψελοειδών δικτύων, με ευρεία εφαρμογή σταθμών βάσης, με στόχο την κάλυψη ολόκληρων χωρών με ζώνες συχνοτήτων ISM. Αυτή η υποδομή σταθμών βάσης επιτρέπει στις τελικές συσκευές να αποστέλλουν τα δεδομένα που συλλέγουν απευθείας στους διακομιστές του δικτύου της Sigfox, τα οποία παρέχει στους συνδρομητές μέσω μίας Διεπαφής Προγραμματισμού Εφαρμογών (API). Τέλος, η χρήση των ISM ζωνών συχνοτήτων όπως προαναφέρθηκε, κάνει αυστηρή τη χρήση του εύρους ζώνης για τις τελικές συσκευές.

Στην Ελλάδα, η εταιρία Sigfox ήρθε στα τέλη του 2019, κίνηση που εντάσσεται στα πλαίσια της στρατηγικής επέκτασης της εταιρίας, η οποία πλέον έχει καταστήσει διαθέσιμο το δίκτυό της σε 65 χώρες. Έως τώρα, η εφαρμογή του δικτύου έχει γίνει σε χώρες του εξωτερικού, όπου έχουν υλοποιηθεί πολλά έργα σε τομείς που σχετίζονται με την εφοδιαστική αλυσίδα, έξυπνες πόλεις και κτήρια, στη βιομηχανία, τη γεωργία αλλά και σε σπίτια για την κάλυψη καθημερινών αναγκών αλλά και τη λύση σύνθετων προβλημάτων.

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά LP-WAN δικτύων Sigfox, LoRa, NB-IoT

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Licensed LTE frequency bands
Bandwidth	100 Hz	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Maximum data rate	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidirectional	Limited / Half-duplex	Yes / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	140 (UL), 4 (DL)	Unlimited	Unlimited
Maximum payload length	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Range	10 km (urban), 40 km (rural)	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Interference immunity	Very high	Very high	Low
Authentication & encryption	Not supported	Yes (AES 128b)	Yes (LTE encryption)
Adaptive data rate	No	Yes	No
Handover	End-devices do not join a single base station	End-devices do not join a single base station	End-devices join a single base station
Localization	Yes (RSSI)	Yes (TDOA)	No (under specification)
Allow private network	No	Yes	No
Standardization	Sigfox company is collaborating with ETSI on the standardization of Sigfox-based network	LoRa-Alliance	3GPP

2.1.3.3. NB-IoT

Το NB-IoT είναι μία νέα τεχνολογία που εισήγαγε ο οργανισμός 3GPP το 2016. Παρ' όλο που ενσωματώνεται στα πρότυπα του LTE δικτύου, μπορεί να θεωρηθεί ως μια νέα ασύρματη διεπαφή. Σε αντίθεση με τις τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, χρησιμοποιεί συχνότητες που έχουν λάβει άδεια (700 MHz, 800 MHz και 900 MHz), ίδιες με αυτές του LTE δικτύου και εφαρμόζει τη διαμόρφωση Τετραγωνικής Μετατροπής Φάσης Πληκτρολόγηση (QPSK). Το εύρος ζώνης συχνοτήτων που καταλαμβάνει είναι 200 KHz, το οποίο αντιστοιχεί σε μία πηγή μετάδοσης GSM και LTE, ενώ η 3GPP προτείνει την λειτουργία του NB-IoT σε σύνδεση με το LTE

κυβελοειδές δίκτυο. Το NB-IoT μπορεί να υποστηριχθεί με μία απλή αναβάθμιση λογισμικού στην ήδη υπάρχουσα υποδομή του LTE δικτύου.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας βασίζεται στο πρωτόκολλο LTE. Στην πραγματικότητα, το NB-IoT μειώνει τις λειτουργίες του πρωτοκόλλου LTE στο ελάχιστο και τις προσαρμόζει στις απαιτήσεις των εφαρμογών IoT. Για παράδειγμα, το backend σύστημα του LTE χρησιμοποιείται για να μεταδώσει την πληροφορία στις τελικές συσκευές. Επειδή το σύστημα αυτό λαμβάνει πόρους και καταναλώνει ενέργεια μπαταρίας από κάθε τελική συσκευή, διατηρείται στο ελάχιστο, τόσο στο μέγεθος όσο και στην εμφάνισή του. Η προσαρμογή στις ανάγκες των IoT υπηρεσιών, εστίασε στη μείωση του μεγέθους και την αποστολή των μηνυμάτων δεδομένων, για να δοθεί προτεραιότητα στην αυτονομία των συσκευών.

Επομένως, η τεχνολογία NB-IoT μπορεί να θεωρηθεί ως μία νέα ασύρματη διεπαφή από άποψη πρωτοκόλλου επικοινωνίας, βασισμένη όμως σε μία ολοκληρωμένη και αξιόπιστη υποδομή, που έχει ήδη αναπτυχθεί. Επίσης, επιτρέπει τη σύνδεση έως 100 χιλιάδων συσκευών ανά σταθμό βάσης με δυνατότητα επέκτασης της χωρητικότητας αυτής. Χρησιμοποιεί την Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας (FDMA) ενός φορέα στην uplink επικοινωνία και την ορθογωνική FDMA (OFDMA) για downlink, ενώ χρησιμοποιεί διαμόρφωση QPSK (Wang et al, 2016). Ο ρυθμός αποστολής δεδομένων φτάνει τα 200 kbps στο downlink και τα 20 kbps στο uplink, ενώ το μέγεθος των μηνυμάτων δεν ξεπερνά τα 1.600 bytes. Ο χρόνος ζωής της μπαταρίας μπορεί να φτάσει τα 10 χρόνια, δεδομένου ότι η συσκευή μεταδίδει 200 bytes πληροφορίας την ημέρα κατά μέσο όρο (Adhikary et al, 2016).

Η εταιρία 3GPP συνεχίζει να βελτιώνει το δίκτυο NB-IoT και δημιουργεί νέες εκδόσεις που θα συμπεριλαμβάνουν περισσότερες λειτουργίες, όπως μεθόδους εντοπισμού θέσης, δυνατότητα ενημερώσεων λογισμικού των τελικών συσκευών και άλλες τεχνικές λεπτομέρειες για να αναπτυχθούν νέες εφαρμογές βασισμένες στην NB-IoT τεχνολογία.

2.2. Συγκριτική ανάλυση μεταξύ LP-WAN δικτύων

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, για την επιλογή του κατάλληλου LP-WAN δικτύου προκειμένου να εξυπηρετήσει μία εφαρμογή IoT. Η ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας, η διάρκεια ζωής μπαταρίας των τελικών συσκευών, η χρονική καθυστέρηση μετάδοσης, η επεκτασιμότητα, το μέγεθος δεδομένων, η κάλυψη δικτύου, η εμβέλεια, η εφαρμογή και το κόστος των τεχνολογιών LP-WAN είναι οι σημαντικότεροι από αυτούς τους παράγοντες (Mekki et al, 2017) και για τον λόγο

αυτό, με βάση αυτούς θα αναλυθούν στη συνέχεια οι διαφορές των LoRa, Sigfox και NB-IoT.

2.2.1. Ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας

Το Sigfox και το LoRa χρησιμοποιούν φάσμα συχνοτήτων χωρίς άδεια και με πρωτόκολλα ασύγχρονης επικοινωνίας. Έχουν τη δυνατότητα να αποφύγουν τις παρεμβολές, το multipath και την εξασθένηση σήματος, όμως δεν μπορούν να φτάσουν τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας που προσφέρει το NB-IoT. Το φάσμα που χρησιμοποιεί το NB-IoT είναι αδειοδοτημένο, βασισμένο στο σύγχρονο πρωτόκολλο LTE που διασφαλίζει τη βέλτιστη ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών, με την προϋπόθεση βέβαια να μπορεί να καλυφθεί το κόστος που έχει μια άδεια LTE φάσματος η οποία μπορεί να ξεπεράσει τα 500 εκατομμύρια ευρώ. Είναι σαφές λοιπόν, ότι το NB-IoT αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή ανάμεσα στα τρία δίκτυα, σε περίπτωση που δοθεί μέγιστη προτεραιότητα στην εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών.

2.2.2. Διάρκεια ζωής μπαταρίας και χρονική καθυστέρηση

Στο Sigfox, το LoRa και το NB-IoT, οι τελικές συσκευές βρίσκονται σε κατάσταση αδρανοποίησης τον περισσότερο χρόνο, όταν δε λειτουργούν, με αποτέλεσμα να μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας. Στο NB-IoT, όμως, καταναλώνουν επιπρόσθετη ενέργεια λόγω της σύγχρονης επικοινωνίας και της διαχείρισης ποιότητας υπηρεσίας σε συνδυασμό με τις λειτουργίες OFDMA/FDMA οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερα επίπεδα ρεύματος. Σε σύγκριση, λοιπόν, με τα δίκτυα Sigfox και LoRa, προσφέρει λιγότερη διάρκεια ζωής μπαταρίας τελικών συσκευών.

Το πλεονέκτημά του όμως ως προς αυτά, είναι τα χαμηλά επίπεδα χρονικής καθυστέρησης παράδοσης σημάτων. Αντίθετα από το Sigfox, το LoRa παρέχει τη δυνατότητα λειτουργίας Class C τελικών συσκευών, όπως προαναφέρθηκε, ώστε να υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία με χαμηλή χρονική καθυστέρηση, σε βάρος της κατανάλωσης ενέργειας. Επομένως, αν δεν παίζει σημαντικό ρόλο η χρονική καθυστέρηση και το μέγεθος των δεδομένων που αποστέλλονται είναι μικρό στην εφαρμογή που αναπτύσσεται, το Sigfox και το LoRa για Class A τελικές συσκευές, είναι οι καλύτερες επιλογές, ενώ για μικρή χρονική καθυστέρηση προτιμάται το NB-IoT και το Class C LoRa.

2.2.3. Επεκτασιμότητα και όγκος πληροφοριών

Ο αριθμός των συσκευών που μπορούν να υποστηρίξουν τα τρία αυτά δίκτυα είναι πολύ μεγάλος, ενώ ανταποκρίνονται θετικά στην αύξηση του πλήθους και την πυκνότητα των συνδεδεμένων συσκευών. Για την επίτευξη επεκτασιμότητας

υπάρχουν διάφορες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί όπως η αποδοτική εκμετάλλευση της ποικιλομορφίας σε ένα κανάλι, αλλά και στον χρόνο και στον χώρο. Το NB-IoT προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες επέκτασης από τα άλλα δίκτυα, με χωρητικότητα έως και 100 χιλιάδων συσκευών ανά σταθμό βάσης, διπλάσια από αυτή των Sigfox και LoRa. Ακόμη, υποστηρίζει μετάδοση μεγαλύτερου μεγέθους πληροφοριών που φτάνει τα 1600 bytes, τη στιγμή που το LoRa φτάνει τα 243 bytes και το Sigfox μόλις τα 12 bytes.

2.2.4. Κάλυψη και εμβέλεια δικτύου

Το κύριο πλεονέκτημα που αξιοποιείται στο Sigfox είναι πως μία ολόκληρη πόλη μπορεί να καλυφθεί από ένα μόνο σταθμό βάσης, αφού η εμβέλεια μπορεί να φτάσει έως και 40 χιλιόμετρα. Για παράδειγμα, στο Βέλγιο που είναι μία χώρα 30.500 τετραγωνικών χιλιομέτρων, το δίκτυο Sigfox χρειάστηκε μόλις 7 σταθμούς βάσης για την κάλυψη ολόκληρης της χώρας. Το LoRa από την άλλη πλευρά, έχει μικρότερη εμβέλεια, επομένως χρειάζεται περισσότερους σταθμούς βάσης, και για την κάλυψη μιας πόλης όπως η Βαρκελώνη χρειάζεται 3 σταθμούς βάσης, ενώ το NB-IoT εμφανίζει τη μικρότερη κάλυψη δικτύου συγκριτικά με τις υπόλοιπες και δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε αγροτικές ή προαστιακές περιοχές που δεν καλύπτονται από κάλυψη LTE δικτύου.

2.2.5. Μοντέλο ανάπτυξης

Τα χαρακτηριστικά του NB-IoT δημοσιεύθηκαν τον Ιούνιο του 2016, για την καθιέρωση του δικτύου, όμως θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος αφού βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης. Το Sigfox και το LoRa όμως, αποτελούν ώριμα οικοσυστήματα δικτύων, που βρίσκονται στο στάδιο εμπορευματοποίησης σε πολλές χώρες και πόλεις. Το LoRa είναι διαθέσιμο σε 42 χώρες έναντι των 31 που είναι το Sigfox, παρ' όλα αυτά οι περιπτώσεις εφαρμογής των δύο δικτύων βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη. Ένα μείζον πλεονέκτημα του LoRa, είναι η προσαρμοστικότητά του, αφού προσφέρει τη δυνατότητα ανάπτυξης δικτύου τοπικού χαρακτήρα με τη χρήση ιδιόκτητων LoRa gateways ή δημόσιων σταθμών βάσης. Στον τομέα της βιομηχανίας μπορεί να εφαρμοστεί ένα υβριδικό λειτουργικό μοντέλο τοπικού δικτύου LoRa σε εργοστασιακές περιοχές και να χρησιμοποιεί το LoRa δίκτυο για να καλύψει και εξωτερικές περιοχές.

2.2.6. Κόστος

Διάφοροι παράγοντες κόστους πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως το κόστος άδειας φάσματος συχνοτήτων, εφαρμογής και ανάπτυξης δικτύου και το κόστος των συσκευών που χρησιμοποιούνται. Στον Πίνακα 4: Διαφορετικά κόστη μεταξύ των LoRa, Sigfox και NB-IoT παρουσιάζονται τα κόστη των παραγόντων αυτών για κάθε

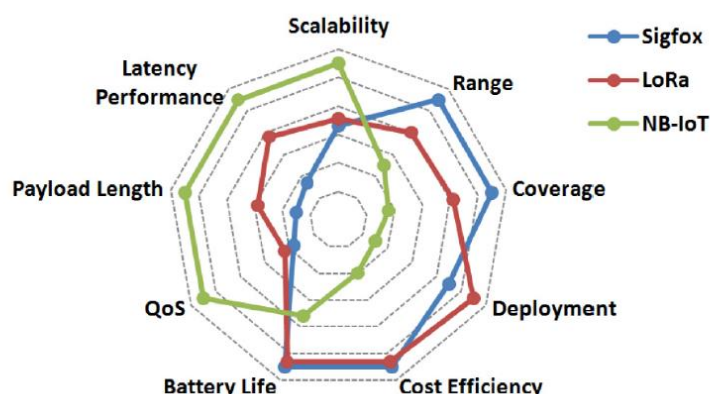
δίκτυο, όπου είναι φανερό πως το Sigfox και το LoRa είναι σημαντικά οικονομικότερα από το NB-IoT. Κάθε δίκτυο παρουσιάζει τα δικά του πλεονεκτήματα, επομένως η καταλληλότητα του κάθε δικτύου κρίνεται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 4: Διαφορετικά κόσθη μεταξύ των LoRa, Sigfox και NB-IoT

	Κόστος άδειας	Κόστος Ανάπτυξης	Κόστος Τελικής Συσκευής
LoRa	0	>100€/gateway	3-5€
Sigfox	0	>4.000€/σταθμό βάσης	<2€
NB-IoT	>500 εκατ. €	>15.000€/σταθμό βάσης	>20€

2.3. Επιλογή Δικτύου

Όπως είναι φανερό, δεν υπάρχει μία μόνο λύση LP-WAN δικτύου που να ταιριάζει στις απαιτήσεις κάθε προβλήματος. Σύμφωνα με την ανάλυση των παραγόντων που προηγήθηκε, έχουν δημιουργηθεί γραφικές αναπαραστάσεις των πλεονεκτημάτων του κάθε δικτύου όπως αυτή του Σχήμα 6.



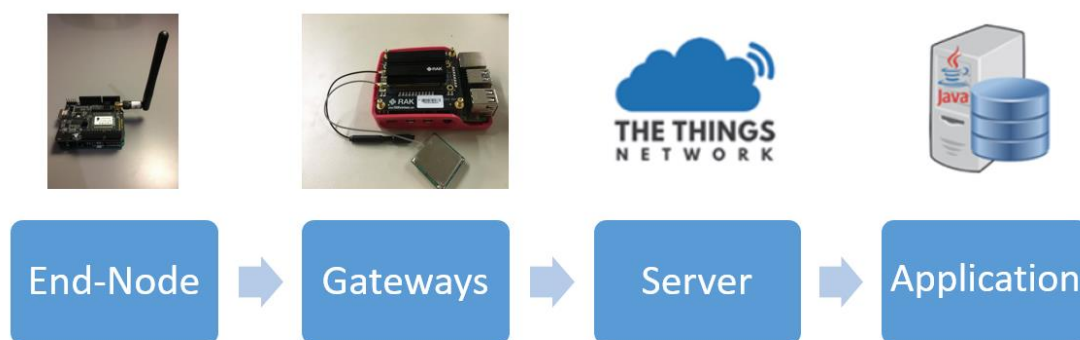
Σχήμα 6: Πλεονεκτήματα μεταξύ των τεχνολογιών IoT σε διαφορετικούς παράγοντες

Οι ανάγκες ενός δικτύου που θα καθιστά εφικτό τον εντοπισμό θέσης τελικών συσκευών, δίνοντας έμφαση στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους, την κάλυψη δικτύου αλλά και το κόστος ανάπτυξης, είναι φανερό πως καλύπτονται επαρκώς από το δίκτυο LoRa. Επομένως, η μελέτη που έγινε, χρησιμοποιεί το LoRaWAN πρωτόκολλο επικοινωνίας με εξοπλισμό συμβατό με το δίκτυο αυτό.

3. Σχεδιασμός Συστήματος Εντοπισμού Θέσης

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, για το Σύστημα Εντοπισμού Θέσης χωρίς τη χρήση GPS, χρειάζονται τέσσερα βασικά στοιχεία:

- Το End-Node (Πομπός)
- Τρία Gateways (Σταθμοί Βάσης)
- Server
- Εφαρμογή Εντοπισμού Θέσης (Geo-Location Application)



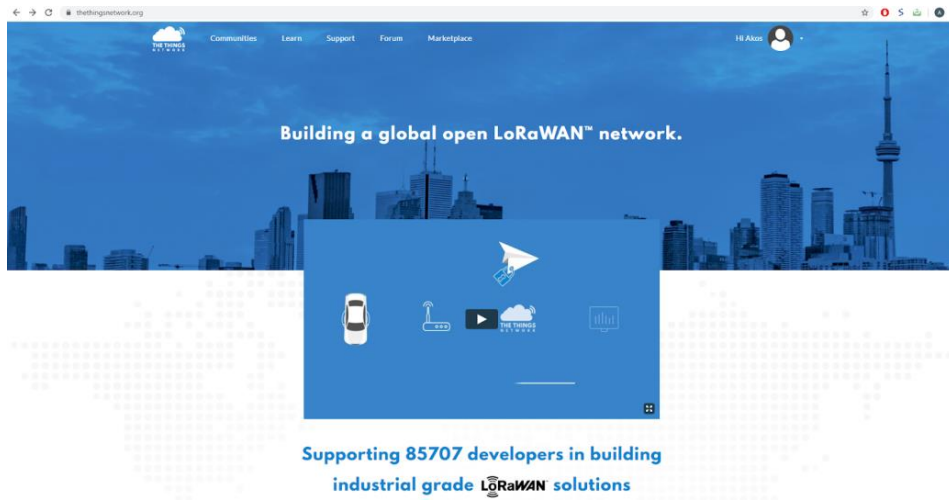
Σχήμα 7: Σχεδιάγραμμα Συστήματος

Όλες οι συσκευές πρέπει να είναι συνδεδεμένες σε έναν κεντρικό Server, ο οποίος εξασφαλίζει την ασφαλή και επιτυχή επικοινωνία μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό, δομείται ένα δίκτυο στο οποίο ανήκει ορισμένος αριθμός gateways και end-node. Ο Network Server που επιλέχθηκε είναι αυτός του The Things Network (TTN), μιας και αποτελεί μία πλατφόρμα open-source, χωρίς να είναι αναγκαία η συνδρομή ή η αγορά εξοπλισμού για να εγκαταστήσουμε ιδιόκτητο server.

Η επικοινωνία ανάμεσα σε κάθε end-node και τα gateways γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRaWAN. Ύστερα τα gateways προωθούν τα πακέτα δεδομένων που έλαβαν από κάθε Node, μέσω του πρωτοκόλλου UDP/IP στο The Things Network (Server), μαζί με την πληροφορία που περιέχει το εισερχόμενο μήνυμα (uplink), όπως είναι η ακριβής ώρα που δέχθηκαν το σήμα (σε ακρίβεια microsecond), το Δείκτη Ισχύος Εισερχόμενου Μηνύματος (RSSI) που μετριέται σε dB, τη συχνότητα λειτουργίας, κλπ. Τέλος, τα δεδομένα από τα Gateways, τα οποία έχει επεξεργαστεί το TTN, αποστέλλονται μέσω πρωτοκόλλου MQTT στην Εφαρμογή Εντοπισμού Θέσης.

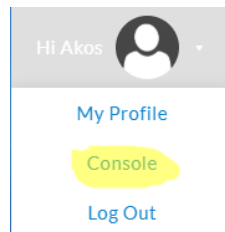
3.1.1. Δημιουργία Application στο TTN

Στο Σχήμα 8 φαίνεται η αρχική σελίδα του The Things Network, ύστερα από τη δημιουργία λογαριασμού.



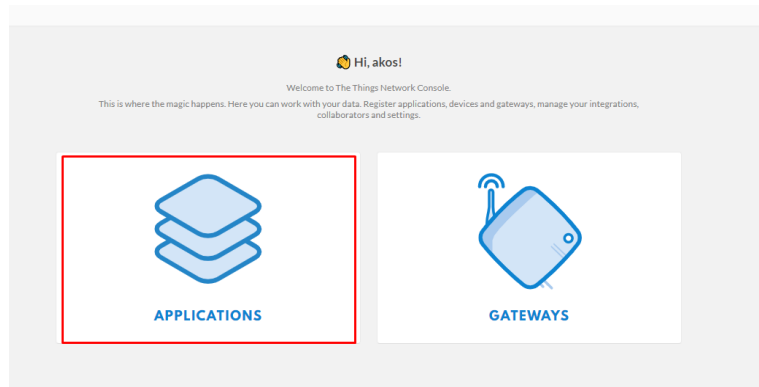
Σχήμα 8: Αρχική Σελίδα TTN

Στην καρτέλα προφίλ του Σχήμα 9 επιλέγεται το console.

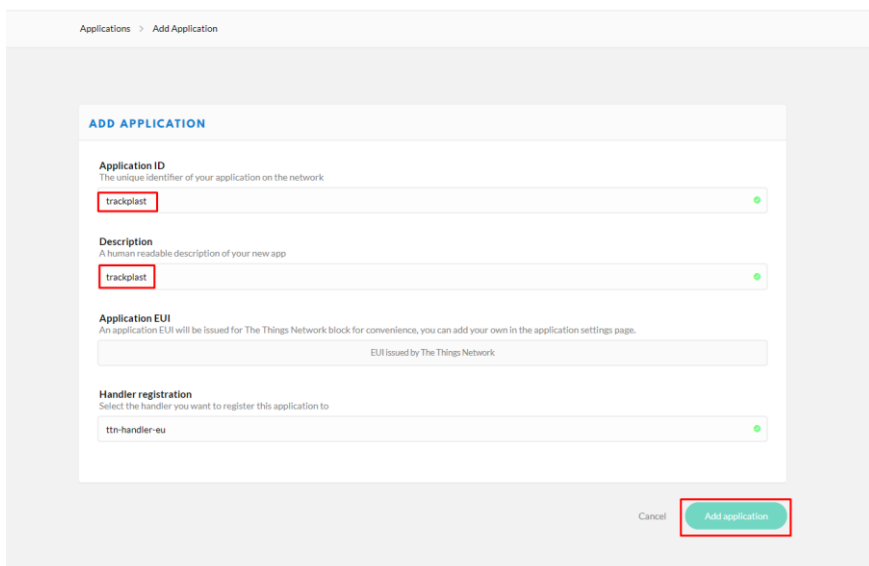


Σχήμα 9: Επιλογή Console από λίστα

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 10 και Σχήμα 11, στο μενού Applications δημιουργείται η εφαρμογή στην οποία θα καταχωρηθούν τα nodes και μέσω της οποίας θα επικοινωνούν με τα gateways.

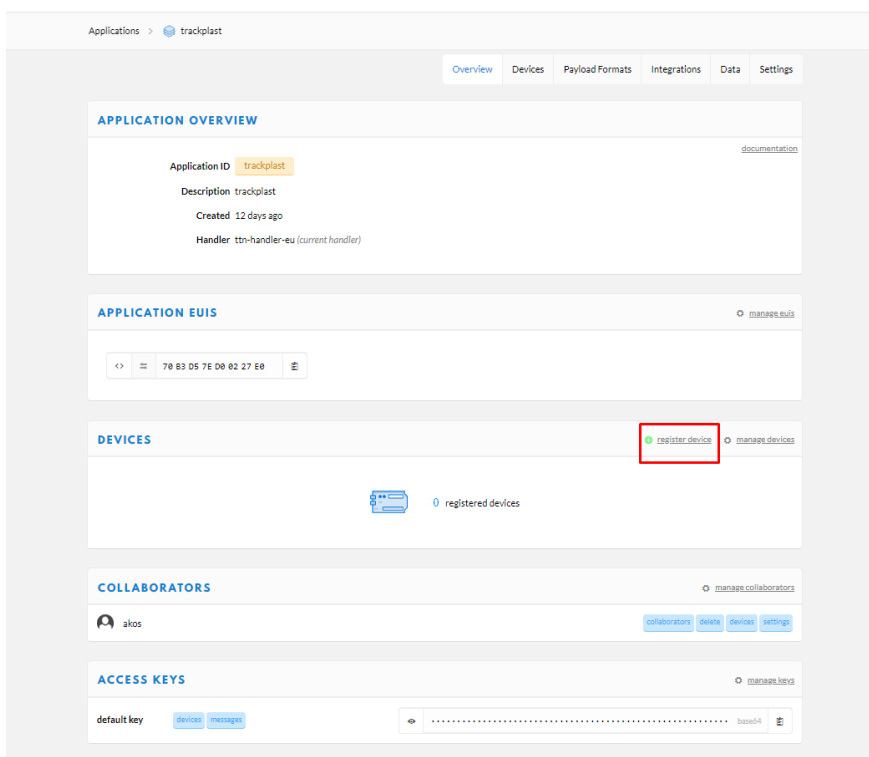


Σχήμα 10: Console Menu



Σχήμα 11: Προσθήκη Application

Στο Σχήμα 12, μέσα στο Application που δημιουργήθηκε, καταχωρούνται οι τελικές συσκευές προς εντοπισμό θέσης.



Σχήμα 12: Application

Στο Σχήμα 13 δίνεται μια μοναδική ονομασία σε κάθε συσκευή που καταχωρείται και το TTN θα δημιουργήσει αυτόματα το Device EUI.

The screenshot shows the 'REGISTER DEVICE' form in the TTN console. The form is titled 'REGISTER DEVICE' and has a 'bulk import devices' link. It contains the following fields:

- Device ID:** This is the unique identifier for the device in this app. The device ID will be immutable. The value 'node811_1' is entered and highlighted with a red box.
- Device EUI:** This is the unique identifier for this device on the network. You can change the EUI later. The value is empty.
- App Key:** This App Key will be used to secure the communication between you device and the network. The value is empty and marked as 'this field will be generated'.
- App EUI:** The value '70 B3 D5 7E D0 02 27 E0' is entered.

At the bottom right, there are 'Cancel' and 'Register' buttons.

Σχήμα 13: Προσθήκη Node

Η συσκευή καταχωρήθηκε και τα στοιχεία της εμφανίζονται όπως στο Σχήμα 14.

The screenshot shows the 'node811_1' device details page in the TTN console. The page is titled 'node811_1' and has a 'trackplast' application ID. It contains the following fields:

- Application ID:** trackplast
- Device ID:** node811_1
- Activation Method:** OTAA
- Device EUI:** 32 38 33 35 6C 38 7D 01
- Application EUI:** 70 B3 D5 7E D0 02 27 E0
- App Key:**
- Device Address:** 26 01 25 94
- Network Session Key:**
- App Session Key:**

Σχήμα 14: Στοιχεία Node

Οι μέθοδοι ενεργοποίησης (Activation Method) που φαίνονται στο Σχήμα 14 είναι δύο:

- **OTAA** {DevEUI, AppEUI, AppKey}: Η μέθοδος Over-The-Air Activation προτιμάται, γιατί εξασφαλίζει έναν ασφαλέστερο τρόπο επικοινωνίας με το The Things Network. Η συσκευή ακολουθεί μια διαδικασία σύζευξης με το δίκτυο κατά τη διάρκεια της οποίας ανατίθενται μια δυναμική διεύθυνση (Device Address) και κλειδιά ασφαλείας στη συσκευή.
- **ABP** {DevAddr, NwSKey, AppSKey}: Η μέθοδος Activation by Personalization κρατά σταθερή τη διεύθυνση της συσκευής (Device Address) όπως και τα κλειδιά ασφαλείας της συσκευής. Παρά το γεγονός ότι είναι απλούστερη αυτή η στρατηγική, μιας και η διαδικασία της σύζευξης παραλείπεται, θεωρείται ευάλωτη σε περιπτώσεις παραβίασης ασφάλειας.

Η μέθοδος που επιλέγεται επομένως, είναι η OTAA, εφόσον είναι ασφαλέστερη.

3.1.2. Gateway

Στον Πίνακα 5 και στα Σχήματα Σχήμα 15 Σχήμα 16 και Σχήμα 17 παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τους Σταθμούς Βάσης:

Πίνακας 5: Χρησιμοποιούμενος Εξοπλισμός

	ΠΡΟΪΟΝ	Περιγραφή
1.	RAK2245 Pi Hat Edition - EU868 MHz	LoRa Module
2.	Raspberry Pi 4	
3.	Sandisk Ultra microSDHC 32GB Class 10 UHS-I with Adapter	Κάρτα Μνήμης
4.	MikroTik RBGPOE, Gigabit PoE injector	Injector Data+Line
5.	Micro USB Active POE Splitter Power 48V to 5V 2A for Raspberry	Splitter Data+Line
6.	Digitus UTP 20m Cat5e Grey - (DK-1512-200)	Καλώδιο Ethernet
7.	POWERTECH Adapter USB Type-C σε Micro USB, μαύρο CAB-UC019	Αντάπτορας type c
9.	MIKROTIK PSU + Plug 48POW, Full power 48V 0.7A 48POW	Τροφοδοτικό
10.	Official Raspberry Pi 4 Model B Red & White Case	Θήκη

Το RAK2245 είναι ένα από τα πιο σύγχρονα LoRa modules της αγοράς και αποτελεί απόγονο του RAK831 της ίδιας εταιρίας. Έχουν εφαρμοστεί πολλές βελτιώσεις συγκριτικά με τον προκάτοχό του και αποτελεί αξιόπιστη λύση για την κατασκευή ενός DIY Gateway μιας και ο συγκεντρωτής (concentrator) του σήματος είναι ο **SX1301**, κατασκευασμένος από την εταιρία Semtech που είναι η εταιρία που κατέχει την

ευρεσιτεχνία της LoRa διαμόρφωσης (LoRa modulation). Επίσης, είναι πολύ σημαντικό για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, το γεγονός ότι έχει ενσωματωμένη κεραία GPS, που είναι αναγκαία για την εξασφαλιστεί ο συγχρονισμός μεταξύ των Gateways.



Σχήμα 15: RAK2245-868MHz

Το Raspberry Pi 4 είναι ο υπολογιστής του Gateway και είναι μία πολύ χρήσιμη και «ευέλικτη» συσκευή στην οποία μπορεί να εγκατασταθεί το λειτουργικό Linux και να δημιουργηθεί ο αλγόριθμος κώδικα που θα στέλνει τα πακέτα δεδομένων που έρχονται από τα end-nodes στο TTN. Συνδυάζει, επίσης, πολλές δυνατότητες για παραμετροποίηση, αξιοπιστία και μεγάλο εύρος υλοποιημένων εφαρμογών από τρίτους, που μπορούν να λειτουργήσουν ως οδηγοί.

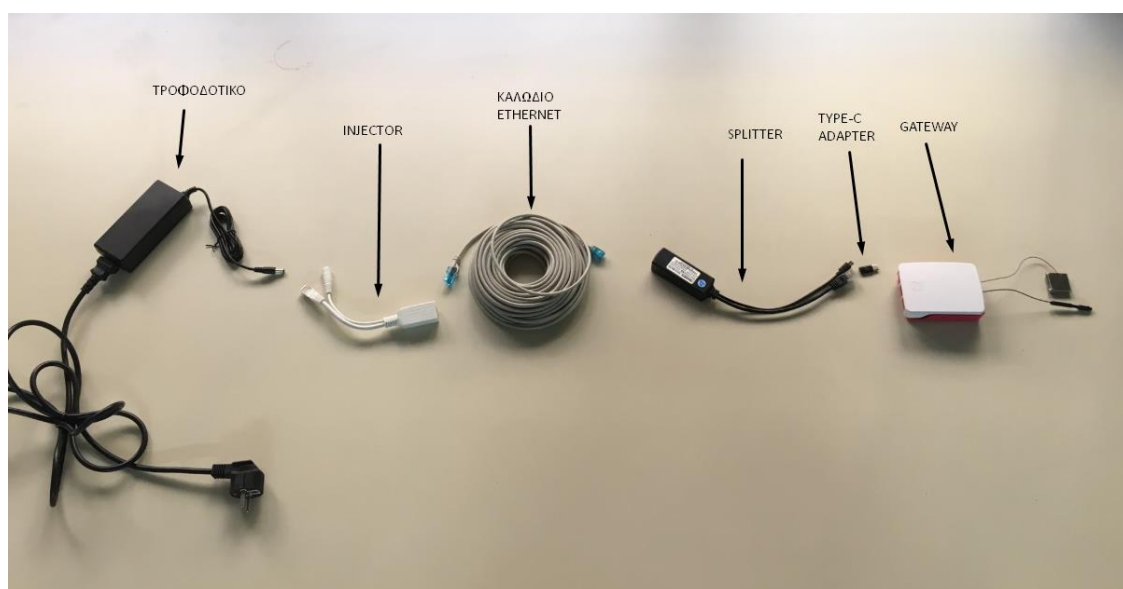


Σχήμα 16: Raspberry Pi 4

Οι επιλογές που υπάρχουν για την τροφοδοσία του Gateway με ρεύμα και Internet είναι οι εξής:

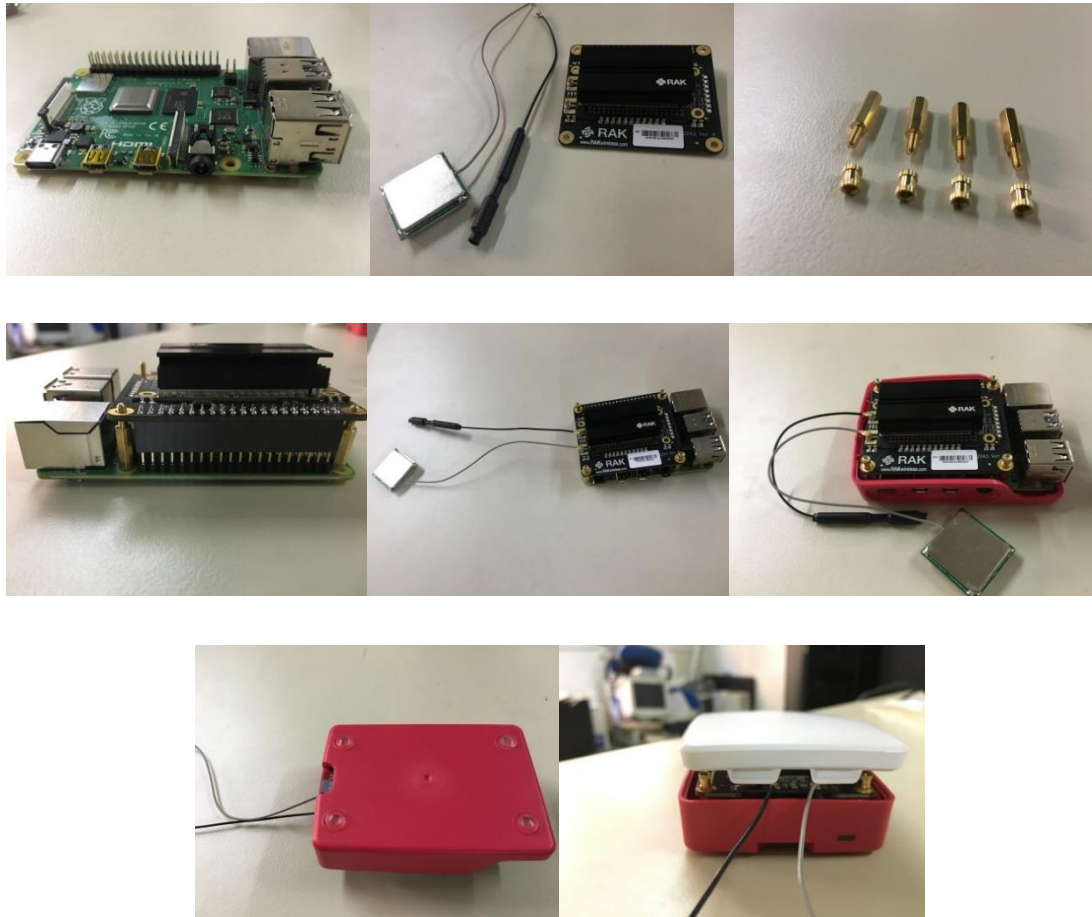
- Τροφοδοσία απευθείας από τροφοδοτικό των 5 Volt & 2 A και σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω καλωδίου Ethernet
- Τροφοδοσία απευθείας από τροφοδοτικό των 5 Volt & 2 A και σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω WiFi
- Τροφοδοσία και σύνδεση στο διαδίκτυο μέσω Power over Ethernet

Η τρίτη περίπτωση αποτελεί την πιο αξιόπιστη επιλογή, εφόσον το σήμα WiFi ενδέχεται να δεχθεί περιστασιακές διακοπές κατά τη λειτουργία του Gateway, ενώ η παράλληλη τροφοδοσία ρεύματος και Internet μέσω του καλωδίου Ethernet κάνει την εγκατάσταση πιο απλή και δεν απαιτεί την ύπαρξη πηγής ρεύματος στο σημείο που θα εγκατασταθεί το Gateway.



Σχήμα 17: Εξοπλισμός Gateway

Στο Σχήμα 18: Διαδικασία συναρμολόγησης Gateway παρουσιάζεται με εικόνες η διαδικασία συναρμολόγησης του Gateway βήμα προς βήμα.



Σχήμα 18: Διαδικασία συναρμολόγησης Gateway

Η τελική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19: Τελική διάταξη Gateway

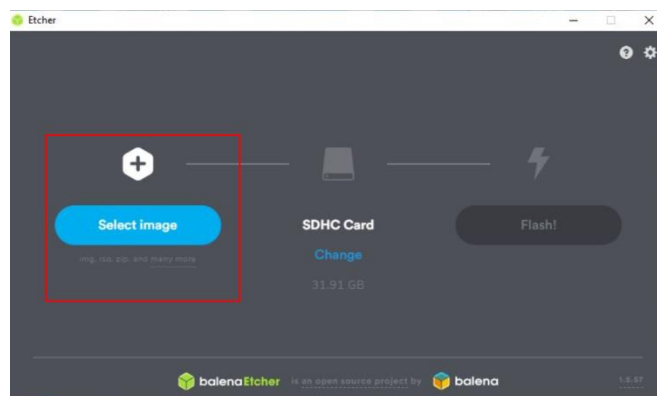
3.1.2.1. Ενεργοποίηση Gateway

Για να καταχωρηθεί το gateway στο TTN, θα πρέπει να μεταφερθεί στην κάρτα μνήμης (MicroSD), ο αλγόριθμος κώδικα που θα επιτρέπει την επικοινωνία του RAK2245 pi hat με το Raspberry Pi, έτσι ώστε το Gateway να λάβει υπόψη τις παραμέτρους που του τέθηκαν. Ο κώδικας έχει αναπτυχθεί από την εταιρία RAKwireless η οποία κατασκευάζει και τα LoRa modules που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία (RAK2245 pi hat).

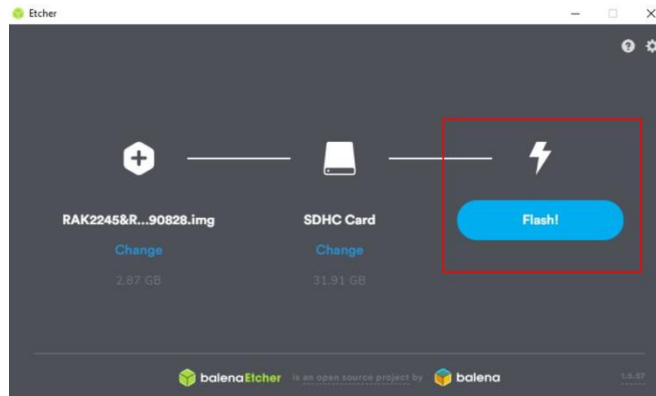
Ο σύνδεσμος που παρατίθεται, περιέχει το αρχείο που θα περαστεί στην κάρτα μνήμης:

<https://downloads.rakwireless.com/en/LoRa/RAK2245-Pi-HAT/Firmware/Raspberry-Pi-4/>

Για την εισαγωγή του αρχείου θα πρέπει πρώτα να περάσει από τη διαδικασία flashing, για αυτό χρειάζεται να εγκατασταθεί το εργαλείο Balena Etcher στον υπολογιστή (<https://www.balena.io/etcher/>), μέσω του οποίου θα γίνει η ζητούμενη διαδικασία. Αφού συνδεθεί με αντάππορα η κάρτα MicroSD στον υπολογιστή και γίνει εγκατάσταση του εργαλείου Balena Etcher, επιλέγεται το αρχείο κώδικα που αποθηκεύτηκε προηγουμένως όπως φαίνεται στα Σχήματα Σχήμα 20: Επιλογή image και Σχήμα 21, και στη συνέχεια επιλέγεται το Flash.



Σχήμα 20: Επιλογή image



Σχήμα 21: Flash image

Στη συνέχεια, αφαιρείται η κάρτα μνήμης από τον υπολογιστή και τοποθετείται στο gateway (βλ. Σχήμα 22).



Σχήμα 22: Τοποθέτηση κάρτας MicroSD

3.1.2.2. Εύρεση IP του router

Προκειμένου να καταχωρηθούν οι αρχικές ρυθμίσεις IP είναι απαραίτητο να είναι γνωστή η IP διεύθυνση του router στην οποία πρόκειται να συνδεθεί το gateway. Για να βρεθεί, από έναν υπολογιστή με λειτουργικό Windows που είναι συνδεδεμένος στο ίδιο router, εκτελείται η εντολή `ip config` σε περιβάλλον γραμμής εντολών (`cmd`). Και εμφανίζεται η οθόνη του Σχήματος 23 στην οποία περιλαμβάνεται η ζητούμενη IP του router. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να συνδεθεί το gateway σε οθόνη, έτσι ώστε να γίνουν κάποιες αρχικές ρυθμίσεις. Αφού αυτές γίνουν, υπάρχει η δυνατότητα να γίνει και απομακρυσμένη σύνδεση με αυτό, χρησιμοποιώντας τη διεύθυνση IP που θα του

δωθεί, μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας SSH (θα αναλυθεί περαιτέρω στη συνέχεια).

```
Microsoft Windows [Version 10.0.10586]
(c) 2016 Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\0οιτητής>ipconfig

Windows IP Configuration

Ethernet adapter Ethernet:

    Connection-specific DNS Suffix  . : ntua.gr
    IPv6 Address. . . . . : 2001:648:2000:2e:edf0:b7d5:555e:13a7
    Temporary IPv6 Address. . . . . : 2001:648:2000:2e:15e8:4858:90f:9ed0
    Link-local IPv6 Address . . . . . : fe80::edf0:b7d5:555e:13a7%8
    IPv4 Address. . . . . : 147.102.46.157
    Subnet Mask . . . . . : 255.255.0.0
    Default Gateway . . . . . : fe80::aec:f5ff:fea1:a427%8
                               147.102.46.200

Tunnel adapter isatap.{73C9AA43-2890-4BB4-B73E-AD51CED526AD}:

    Media State . . . . . : Media disconnected
    Connection-specific DNS Suffix  . : ntua.gr

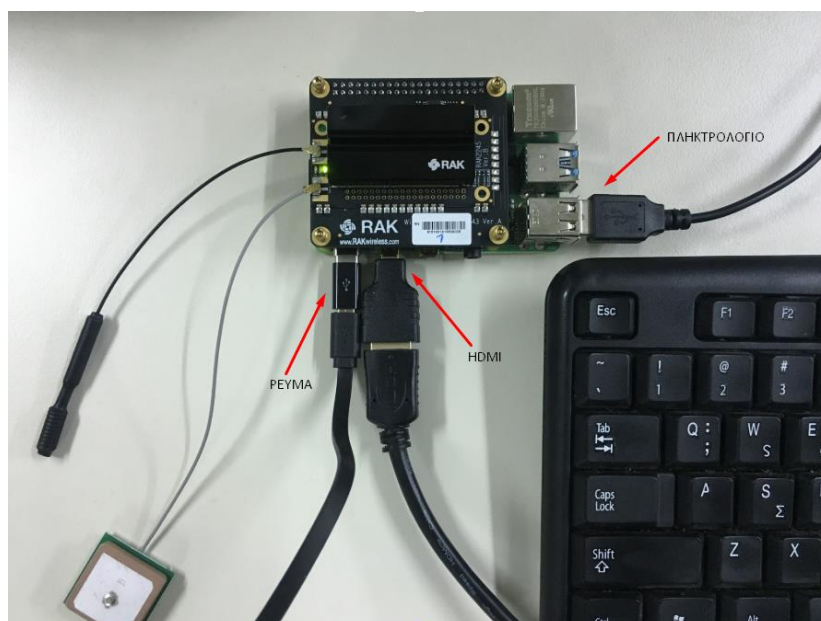
Tunnel adapter Teredo Tunneling Pseudo-Interface:

    Connection-specific DNS Suffix  . :
    IPv6 Address. . . . . : 2001:0:2851:782c:3492:24b9:6c99:d162
    Link-local IPv6 Address . . . . . : fe80::3492:24b9:6c99:d162%5
    Default Gateway . . . . . :
```

Σχήμα 23: Διεύθυνση IP του Router

3.1.2.3. Σύνδεση Gateway με οθόνη

Αφού ενεργοποιηθεί το Gateway και το έχει συνδεθεί με την οθόνη και το πληκτρολόγιο (βλ. **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** Σχήμα 24), θα εμφανιστεί το γραφικό περιβάλλον Linux του Σχήματος Σχήμα 25 στο οποίο τρέχει ο κώδικας, μέσω του οποίου γίνεται η επικοινωνία του Raspberry Pi με το RAK2245 και η σύνδεσή του στο TTN.



Σχήμα 24: Διάταξη σύνδεσης Gateway με οθόνη

```
Starting rpi-tools.service...
Starting triggerhappy global hotkey daemon...
Starting dhcpcd on all interfaces...
[ OK ] Started The Things Network Gateway.
[ OK ] Started System Logging Service.
[ OK ] Started triggerhappy global hotkey daemon.
[ OK ] Started Save/Restore Sound Card State.
[ OK ] Started Restore System Activity Data Collector.
[ OK ] Started Restore /etc/resolv.conf if the system crashed before the ppp link was shut.
[ OK ] Started rpi-tools.service.
[ OK ] Reached target Sound Card.
[ OK ] Started WPA supplicant.
[ OK ] Started Login Service.
[ OK ] Started Aesni mDNS/DNS-SD Stack.
[ OK ] Started LSB: service and resource monitoring daemon.
[ OK ] Started dphys-mmapfile - set up mount/umount, and delete a swap file.
[ OK ] Started LSB: Switch to ondemand cpu governor (unless shift key is pressed).
[ OK ] Started The Things Network Gateway.
[ OK ] Stopped The Things Network Gateway.
[ OK ] Started The Things Network Gateway.
[ OK ] Started dhcpcd on all interfaces.
[ OK ] Reached target Network.
Starting PostgreSQL Cluster 11-main...
[ OK ] Started Create RP Service.
Starting dnsmasq - A lightweight DHCP and caching DNS server...
Starting Advanced key-value store...
[ OK ] Reached target Network is Online.
Starting Mosquitto MQTT v3.1.03-1.1 Broker...
[ OK ] Started Loba App Server.
[ OK ] Started Loba Server.
[ OK ] Started Loba Gateway Bridge.
Starting OpenBSD Secure Shell server...
Starting /etc/rc.local Compatibility...
Starting Permit User Sessions.
My IP address is 147.102.46.166 2001:648:2000:2e:368c:7b73:a1c2:2c8c
[ OK ] Started Permit User Sessions.
[ OK ] Started Getty on tty1.
[ OK ] Reached target Login Prompts.
[ OK ] Started Mosquitto MQTT v3.1.03-1.1 Broker.
[ OK ] Started dnsmasq - A lightweight DHCP and caching DNS server.
[ OK ] Reached target Host and Network Name Lookups.
[ OK ] Started OpenBSD Secure Shell server.
[ OK ] Started Advanced key-value store.
[ OK ] Stopped The Things Network Gateway.
[ OK ] Started The Things Network Gateway.
[ OK ] Started PostgreSQL Cluster 11-main.
Starting PostgreSQL RDBMS...
[ OK ] Started PostgreSQL RDBMS.
[ OK ] Reached target Multi-User System.
[ OK ] Reached target Graphical Interface.
Starting Update UTMP about System Runlevel Changes...
[ OK ] Started Update UTMP about System Runlevel Changes.

Raspbian GNU/Linux 10 rak-gateway tty1
rak-gateway login: _
```

Σχήμα 25: Περιβάλλον Linux

Όταν ζητηθεί να κάνουμε login (βλ. Σχήμα 25), χρησιμοποιούνται τα στοιχεία:

Username: pi

Password: raspberry

Πατώντας Enter, εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου της διασύνδεσης με το Gateway.

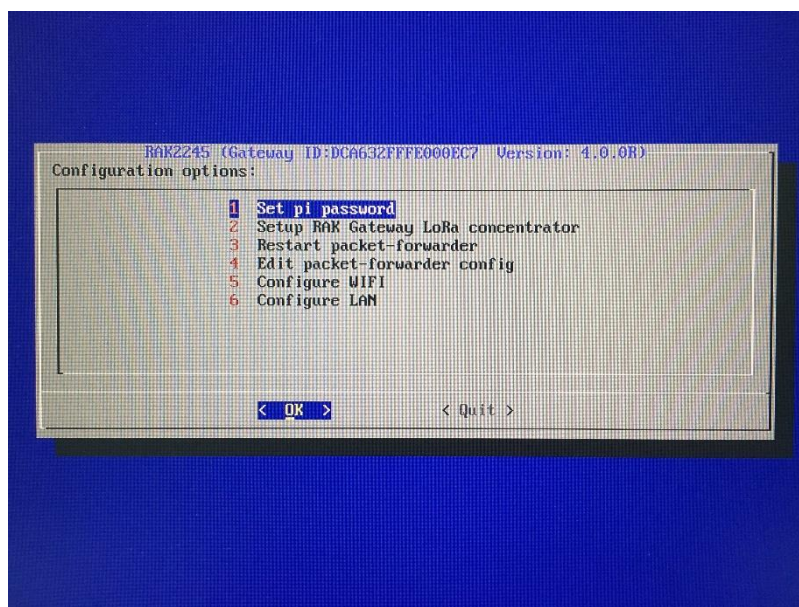
```
[ OK ] Reached target Host and Network Name Lookups.
[ OK ] Started OpenBSD Secure Shell server.
[ OK ] Started Advanced key-value store.
[ OK ] Stopped The Things Network Gateway.
[ OK ] Started The Things Network Gateway.
[ OK ] Started PostgreSQL Cluster 11-main.
Starting PostgreSQL RDBMS...
[ OK ] Started PostgreSQL RDBMS.
[ OK ] Reached target Multi-User System.
[ OK ] Reached target Graphical Interface.
Starting Update UTMP about System Runlevel Changes...
[ OK ] Started Update UTMP about System Runlevel Changes.

Raspbian GNU/Linux 10 rak-gateway tty1

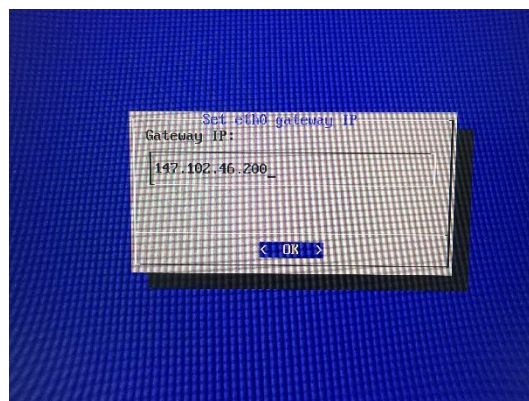
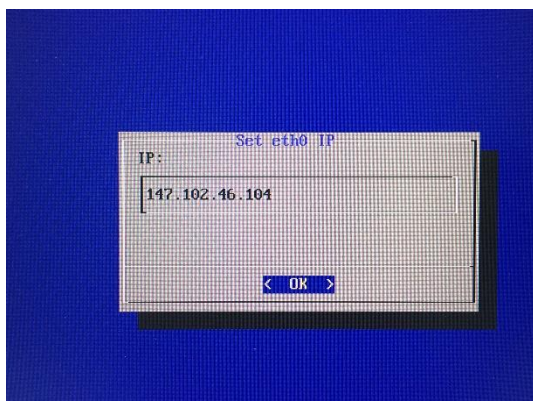
pi@rak-gateway login:
Password:
Last login: Mon Sep 30 16:05:02 BST 2019 on tty1
Linux rak-gateway 4.19.57-071+ #1244 SMP Thu Jul 4 18:48:07 BST 2019 armv7l
=====
[ ASCII art graphic ]
=====
SSH is enabled and the default password for the 'pi' user has not been changed.
This is a security risk - please login as the 'pi' user and type 'passwd' to set a new p
pi@rak-gateway:~$ sudo gateway-config
```

Σχήμα 26: Εισαγωγή εντολής

Καταχωρώντας την εντολή **sudo gateway-config** (Σχήμα 26) γίνεται μεταφορά στο μενού του Gateway όπως φαίνεται στο Σχήμα 27, όπου ανοίγεται η καρτέλα Configure LAN. Εισάγεται ως IP της συσκευής η 147.102.46.104, η οποία τέθηκε, ενώ σε περίπτωση που χρειάζεται να κρατηθεί η προεπιλεγμένη από την εταιρία (192.168.10.10) δε γίνεται αλλαγή. Ως IP του router (βλ.Σχήμα 28) τίθεται αυτή που βρέθηκε στο Σχήμα 23.



Σχήμα 27: Αρχικό Μενού ρυθμίσεων του Gateway



Σχήμα 28: Εισαγωγή των IP

Μετά την εκχώρηση της IP του gateway και του router, υπάρχει η δυνατότητα να γίνει χειρισμός του gateway απομακρυσμένα με τη χρήση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας SSH (Secure Shell). Στο cmd (Command Line) γράφεται η εντολή **ssh pi@147.102.46.104**, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29 και εμφανίζεται το παράθυρο διαλόγου της διασύνδεσης με το gateway του Σχήμα 30. Κατόπιν, γράφεται η εντολή

sudo gateway-config και γίνεται μεταφορά στο μενού του Gateway, όπου επιλέγεται **Setup RAK Gateway LoRa concentrator** (βλ. Σχήμα 31). Στη συνέχεια επιλέγεται **Server is TTN** (βλ. Σχήμα 32) και **EU_863_870** (βλ. Σχήμα 33), ώστε να δουλεύει στα 868MHz.

```
C:\Users\Φοιτητής>ssh pi@147.102.46.104
```

Σχήμα 29: Εντολή SSH



Σχήμα 30: Απομακρυσμένη επικοινωνία με Gateway

Πρέπει να συγκρατηθεί το Gateway ID του Σχήμα 31, διότι θα χρειαστεί στη συνέχεια.



Σχήμα 31: Αρχικό Μενού Gateway μέσω SSH

pi@rak-gateway: ~

GNU nano 3.2

```
{
  "SX1301_conf": {
    "lorawan_public": true,
    "clksrc": 1,
    "antenna_gain": 0,
    "radio_0": {
      "enable": true,
      "type": "SX1257",
      "freq": 867500000,
      "rssi_offset": -166.0,
      "tx_enable": true,
      "tx_freq_min": 863000000,
      "tx_freq_max": 870000000
    },
    "radio_1": {
      "enable": true,
      "type": "SX1257",
      "freq": 868500000,
      "rssi_offset": -166.0,
      "tx_enable": false
    },
    "chan_multiSF_0": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_1": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": -200000
    },
    "chan_multiSF_2": {
      "enable": true,
      "radio": 1,
      "if": 0
    },
```

```
    "chan_multiSF_3": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": -400000
    },
    "chan_multiSF_4": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": -200000
    },
    "chan_multiSF_5": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": 0
    },
    "chan_multiSF_6": {
      "enable": true,
      "radio": 0,
      "if": 200000
    },
```

```
    },
    "chan_Lora_std": {
        "enable": true,
        "radio": 1,
        "if": -200000,
        "bandwidth": 250000,
        "spread_factor": 7
    },
    "chan_FSK": {
        "enable": true,
        "radio": 1,
        "if": 300000,
        "bandwidth": 125000,
        "datarate": 50000
    },
    "tx_lut_0": {
        "pa_gain": 0,
        "mix_gain": 8,
        "rf_power": -6,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_1": {
        "pa_gain": 0,
        "mix_gain": 10,
        "rf_power": -3,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_2": {
        "pa_gain": 0,
        "mix_gain": 12,
        "rf_power": 0,
        "dig_gain": 0
    },
    "tx_lut_3": {
        "pa_gain": 1,
        "mix_gain": 8,
        "rf_power": 3,
        "dig_gain": 0
    }
}
```

```

"tx_lut_4": {
  "pa_gain": 1,
  "mix_gain": 10,
  "rf_power": 6,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_5": {
  "pa_gain": 1,
  "mix_gain": 12,
  "rf_power": 10,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_6": {
  "pa_gain": 1,
  "mix_gain": 13,
  "rf_power": 11,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_7": {
  "pa_gain": 2,
  "mix_gain": 9,
  "rf_power": 12,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_8": {
  "pa_gain": 1,
  "mix_gain": 15,
  "rf_power": 13,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_9": {
  "pa_gain": 2,
  "mix_gain": 10,
  "rf_power": 14,
  "dig_gain": 0

```

```

  "pa_gain": 2,
  "mix_gain": 11,
  "rf_power": 16,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_11": {
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 9,
  "rf_power": 20,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_12": {
  "desc": "TX gain table, index 12",
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 10,
  "rf_power": 23,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_13": {
  "desc": "TX gain table, index 13",
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 11,
  "rf_power": 25,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_14": {
  "desc": "TX gain table, index 14",
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 12,
  "rf_power": 26,
  "dig_gain": 0
},
"tx_lut_15": {
  "desc": "TX gain table, index 15",
  "pa_gain": 3,
  "mix_gain": 14,
  "rf_power": 27,
  "dig_gain": 0

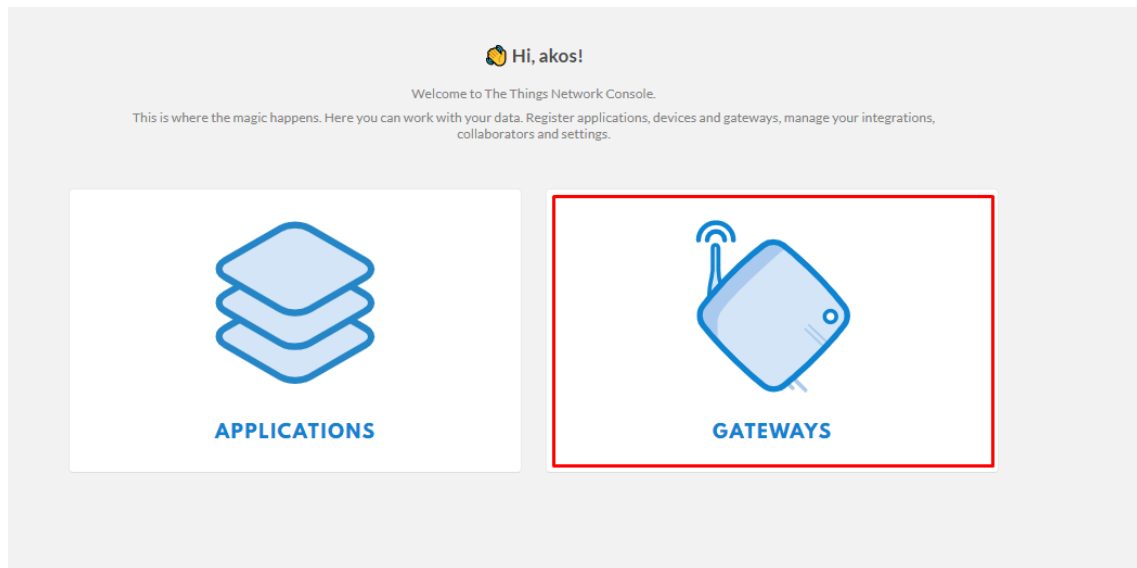
```

```
},
}
"gateway_conf": {
  "gateway_id": "DCA632FFFE000E2E",
  /* change with default server address/ports, or overwrite in local_conf.json */
  "server_address": "router.eu.thethings.network",
  "serv_port_up": 1700,
  "serv_port_down": 1700,
  /* adjust the following parameters for your network */
  "keepalive_interval": 10,
  "stat_interval": 30,
  "push_timeout_ms": 100,
  /* forward only valid packets */
  "forward_crc_valid": true,
  "forward_crc_error": false,
  "forward_crc_disabled": false,
  /* gps enable */
  "gps": true,
  "gps_tty_path": "/dev/ttyAMA0",
  "fake_gps": false,
  "ref_latitude": 10,
  "ref_longitude": 20,
  "ref_altitude": -1,
  "autoquit_threshold": 6
}
```

Σχήμα 34: Κώδικας Packet Forwarder

3.1.2.4. Καταχώρηση Gateway στο TTN

Για την καταχώρηση των Σταθμών Βάσης (gateways) στο TTN, επιλέγεται η καρτέλα Console (βλ.Σχήμα 35) και στη συνέχεια gateways.



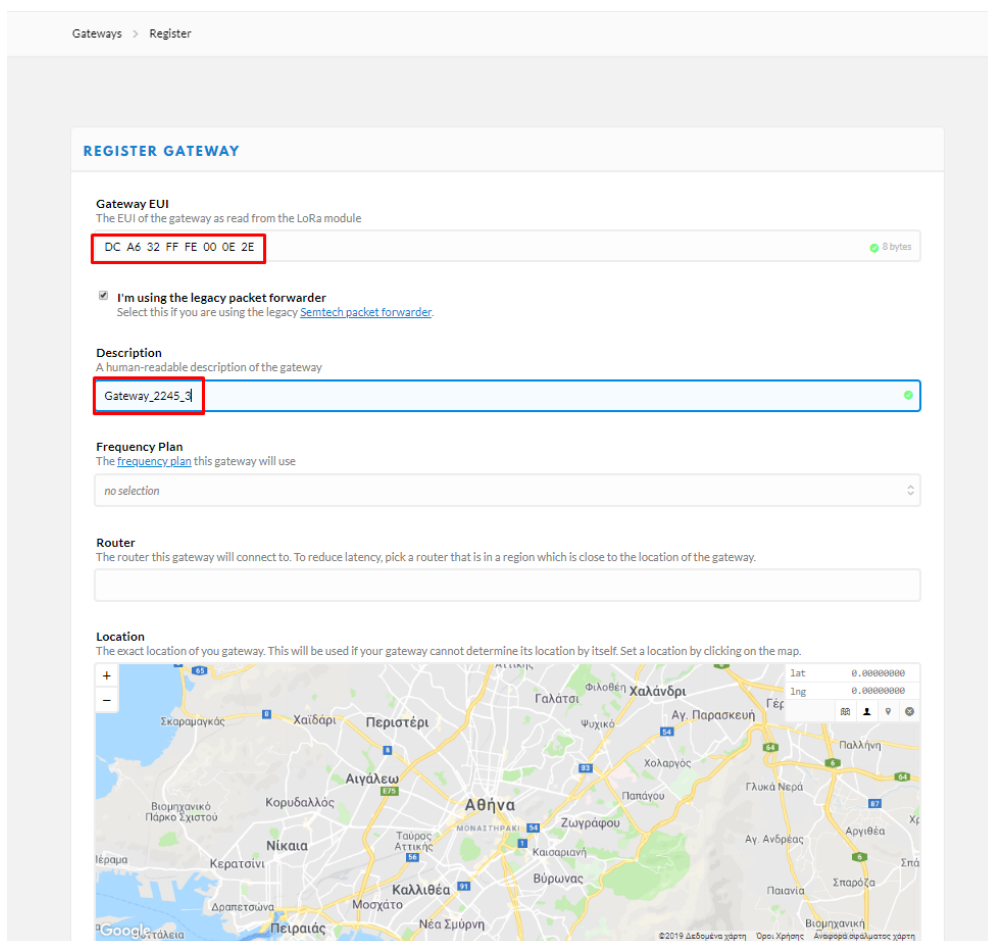
Σχήμα 35: Console Menu

Στο Σχήμα 36 επιλέγεται **register gateway** για νέα καταχώρηση:



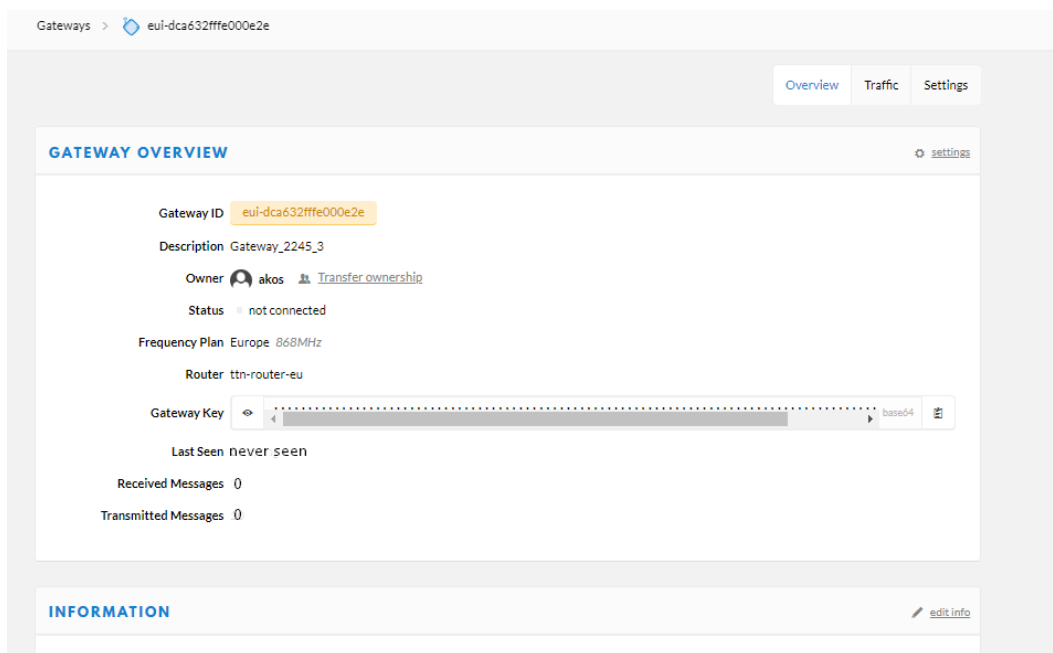
Σχήμα 36: Εγγραφή Gateway

Αρχικά, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 37 , γράφεται το Gateway EUI που εντοπίστηκε προηγουμένως στο αρχικό μενού (βλ. Σχήμα 31). Δίνεται ένα μοναδικό όνομα στο gateway και επιλέγεται Frequency Plan αυτό της Ευρώπης, δηλαδή 868MHz.



Σχήμα 37: Εκχώρηση στοιχείων Gateway

Ύστερα από την επιλογή εγγραφής του gateway στο TTN, εμφανίζονται τα στοιχεία του, όπως φαίνονται στο Σχήμα 38.



Σχήμα 38: Στοιχεία καταχωρημένου Gateway

3.1.3. End - Node

Για τα end-nodes επιλέχθηκε το μοντέλο RAK811 WisNode LoRa Module – 868MHz (βλ. Σχήμα 39), το οποίο συνοδεύεται από μία κεραία συμβατή με το δίκτυο LoRa. Έχει τη δυνατότητα να ενσωματωθεί σε Arduino και να αποτελεί τη συσκευή εντοπισμού ή να συνδεθεί με τον υπολογιστή και να δέχεται εντολές μέσω ενός τερματικού (Terminal) με εντολές τύπου «AT» (AT commands), έτσι ώστε να επικοινωνεί αποτελεσματικά με το δίκτυο LoRa και τα Gateways που έχουν εγκατασταθεί. Ο εξοπλισμός που χρειάζεται είναι αυτός του Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Εξοπλισμός

	ΠΡΟΪΟΝ	Περιγραφή
1.	Arduino Uno	Board
2.	RAK811 WisNode Lora Module - 868MHz	LoRa shield για Arduino
3	Μπαταρία 9V	Τροφοδοσία



Σχήμα 39: RAK811-LoRa Node

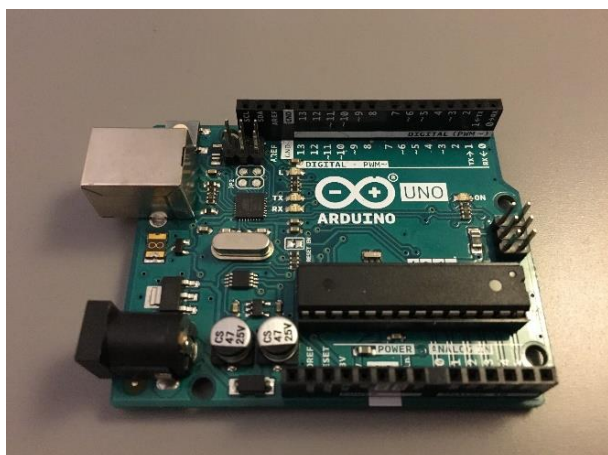
Το αυτόνομο end-node, όπως φαίνεται στο Σχήμα 40 στέλνει προγραμματισμένο μήνυμα στα gateways που είναι εγγεγραμμένα στο TTN, με τις παραμέτρους που έχουν τεθεί μέσω του κώδικα που τρέχει στο Arduino σε γλώσσα προγραμματισμού C++ και που μπορούν να επεξεργαστούν από το Arduino IDE που έχει εγκατασταθεί στον υπολογιστή.

```
JoinNetworkOTAA | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help
JoinNetworkOTAA §

#include "RAK811.h"
#include "SoftwareSerial.h"
#define WORK_MODE LoRaWAN // LoRaWAN or LoRaP2P
#define JOIN_MODE OTAA // OTAA or ABP
#if JOIN_MODE == OTAA
String DevEui = "3238333564384F06"; // Fill this out
String AppEui = "70B3D57ED00227E0"; // Fill this out
String AppKey = "E7A0A8563A07B490B9702518D0336FD8"; // Fill This out
#else JOIN_MODE == ABP
String NwkSKey = "";
String AppSKey = "";
String DevAddr = "";
#endif
#define TXpin 11 // Set the virtual serial port pins
#define RXpin 10
#define DebugSerial Serial
SoftwareSerial RAKSerial(RXpin, TXpin); // Declare a virtual serial port
char* buffer = "72616E776972656C657373";
int RESET_PIN = 12;
bool InitLoRaWAN(void);
RAK811 RAKLoRa(RAKSerial, DebugSerial);

void setup() {
//Define Reset Pin
```

Σχήμα 40: Κώδικας Arduino



Σχήμα 41: Arduino Uno

Ο λόγος που επιλέχθηκε το RAK811 WisNode είναι ότι παρέχει τη συμβατότητα με το Arduino Uno (βλ. Σχήμα 41), έτσι ώστε το end-node να δέχεται παραμετροποιήσεις, ενώ επικοινωνεί μέσω του πομποδέκτη SX1276 της Semtech (βλ. Σχήμα 42), που είναι η εταιρία που κατέχει την ευρεσιτεχνία της LoRa διαμόρφωσης (LoRa modulation). Έτσι εξασφαλίζεται αξιοπιστία και συμβατότητα με το πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRaWAN. Έχει επίσης υψηλή αντοχή στις παρεμβολές και καταναλώνει ελάχιστη ενέργεια, ενώ υποστηρίζει λειτουργία και με άλλες διαμορφώσεις συχνοτήτων, εκτός από τη LoRa (FSK, GFSK, MSK, GMSK & OOK)



Σχήμα 42: Semtech SX1276 transceiver



Σχήμα 43: Συναρμολογημένο End-Node

3.1.3.1. Σύνδεση Node με υπολογιστή

Πριν από κάθε σύνδεση με το ρεύμα, πρέπει να εξασφαλισθεί ότι έχει τοποθετηθεί η κεραία στο node, για την αποφυγή μόνιμης βλάβης. Για να συνδεθεί το node στον υπολογιστή, χρησιμοποιείται ένα καλώδιο Micro-USB. Η επικοινωνία ανάμεσα σε node και υπολογιστή γίνεται με τη χρήση ενός Τερματικού προγράμματος με AT Commands. Το Τερματικό που χρησιμοποιήθηκε, είναι φτιαγμένο από την εταιρία RAKwireless και έχει σκοπό να κάνει τη διαδικασία απλούστερη και γρηγορότερη. Ονομάζεται RAK SERIAL PORT TOOL και μπορεί να το εγκατασταθεί στον υπολογιστή ακολουθώντας το σύνδεσμο που παρατίθεται:

<https://downloads.rakwireless.com/en/LoRa/Tools/>

Διαλέγεται η θύρα του υπολογιστή στην οποία έχει συνδεθεί το node και πατώντας το κουμπί Open ξεκινά η επικοινωνία μεταξύ υπολογιστή και node (βλ. Σχήμα 45: Αρχική οθόνη Τερματικού).

3.1.4. Επικοινωνία Node με TTN και Gateways

Αρχικά, τοποθετήθηκε το gateway σε ταράτσα κτιρίου εντός του Πολυτεχνείου (βλ. Σχήμα 44), χρησιμοποιώντας ως κεραία αυτή που έρχεται μαζί με το RAK224 pi hat και είναι τύπου “rig-tail”, όπως βλέπουμε στο Σχήμα 15.



Σχήμα 44: Τοποθέτηση Gateway

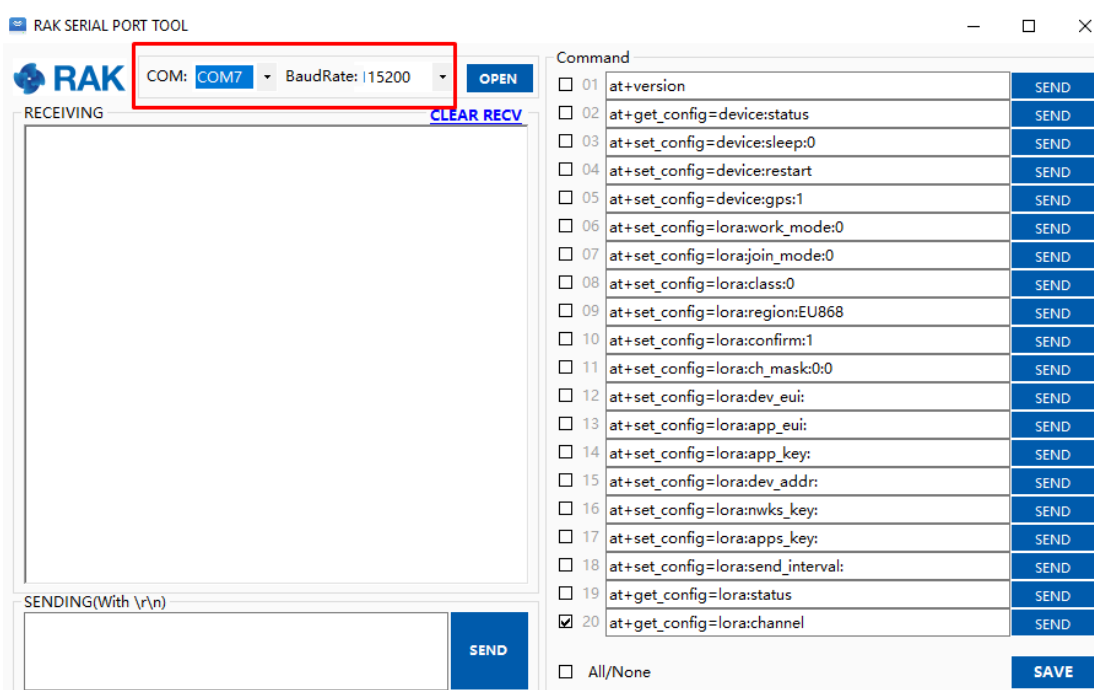
Προκειμένου να είναι εφικτός ο διάλογος του node με το TTN, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 46: Εκχώρηση στοιχείων Node θα πρέπει να εκτελεστούν οι εξής εντολές:

```
at+set_config=lora:dev_eui:3238333564384F06
```

```
at+set_config=lora:app_eui:70B3D57ED00227E0
```

```
at+set_config=lora:app_key:E7A0A8563A07B490B9702518D0336FD8
```

Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι κάθε φορά που το node θα εκπέμπει κάποιο μήνυμα (uplink), μέσω των χαρακτηριστικών κλειδιών που τέθηκαν, το μήνυμα αυτό θα γίνεται αντιληπτό μόνο από την εφαρμογή που δημιουργήθηκε προηγουμένως στο TTN. Το dev_eui είναι ξεχωριστό για κάθε node που έχει καταχωρηθεί στην εφαρμογή του TTN (Application), ενώ το app_eui και app_key ισχύουν για κάθε συσκευή που έχει καταχωρηθεί.



Σχήμα 45: Αρχική οθόνη Τερματικού

```
SENDING(With \r\n)
at+set_config=lor:dev_eui:3238333564384F06
at+set_config=lor:app_eui:70B3D57ED00227E0
at+set_config=lor:app_key:E7A0A8563A07B490B9702518D0336FD8
```

SEND

Σχήμα 46: Εκχώρηση στοιχείων Node

Πατώντας το κουμπί RESET του RAK811, εμφανίζονται οι παράμετροι του node (βλ. Σχήμα 47: Οθόνη εκκίνησης Node), μαζί με τα χαρακτηριστικά που θέσαμε προηγουμένως, ενώ ταυτόχρονα εκκινείται η διαδικασία ζεύξης του με το TTN.

```
| | / / \ \ / / | | | | _ _ _ | | _ _ _
| | / / \ \ / / | | | | _ _ _ | | _ _ _
| | / / \ \ / / | | | | _ _ _ | | _ _ _
| | / / \ \ / / | | | | _ _ _ | | _ _ _
=====
=====
*****
RAK811 Version:3.0.0.5.H
*****
=====
=====

Selected LoRaWAN 1.0.2 Region: EU868
autosend_interval: 600s
Initialization OK,AT Uart work mode:normal mode, Current
work_mode:LoRaWAN, join_mode:OTAA, Class: A
OTAA:
DevEui:3238333564384F06
AppEui:70B3D57ED00227E0
AppKey:E7A0A8563A07B490B9702518D0336FD8
OTAA Join Start...
```

Σχήμα 47: Οθόνη εκκίνησης Node

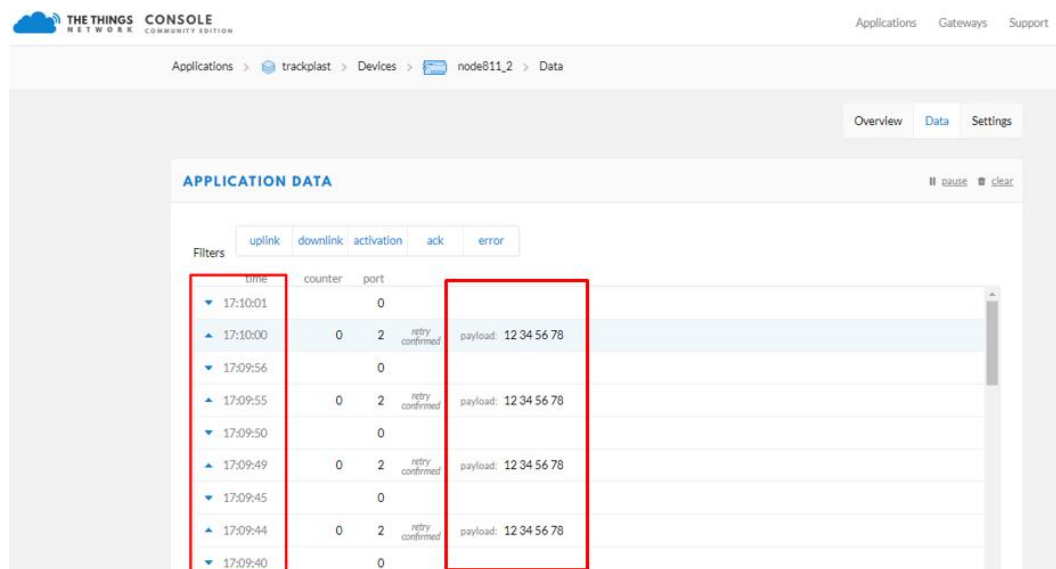
Μόλις συνδεθεί, εμφανίζεται το μήνυμα **Joined Succeeded**, που σημαίνει ότι το node είναι έτοιμο να στείλει μηνύματα προς το gateway στο TTN, όπως φαίνεται στο Σχήμα 48. Με την εντολή **at+send=lor:2:12345678**, το Node θα στείλει το μήνυμα **12345678** που είναι σε μορφή δεκαεξαδικού προς το TTN.

```
[LoRa]:Join retry Cnt:5
OTAA:
DevEui:3238333564384F06
AppEui:70B3D57ED00227E0
AppKey:E7A0A8563A07B490B9702518D0336FD8
OTAA Join Start...
[LoRa]:Joined Succeeded!
-> at+send=lor:2:12345678
OK
```

SEND

Σχήμα 48: Αποστολή μηνύματος προς TTN

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 49, τα μηνύματα που στάλθηκαν μέσω AT Commands εμφανίζονται στο TTN, στην καρτέλα Data του καταχωρημένου node.



THE THINGS NETWORK CONSOLE COMMUNITY EDITION

Applications > trackplast > Devices > node811_2 > Data

Overview Data Settings

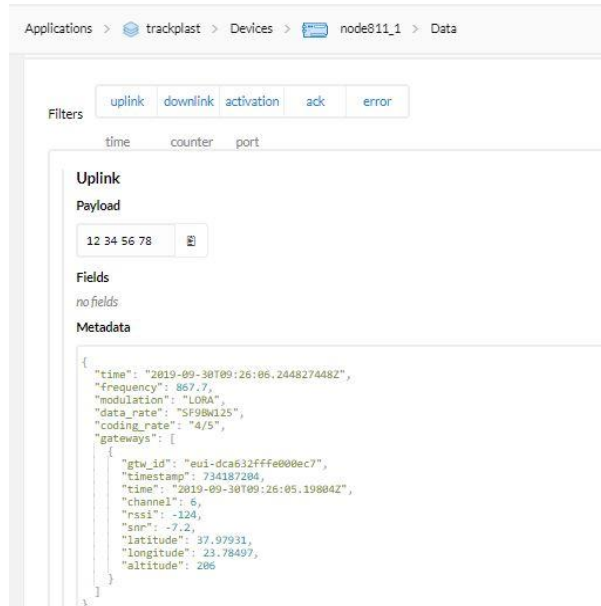
APPLICATION DATA pause clear

Filters uplink downlink activation ack error

time	counter	port	ack	error	payload
17:10:01	0	2	retry confirmed		12 34 56 78
17:10:00	0	2	retry confirmed		12 34 56 78
17:09:56	0	2	retry confirmed		12 34 56 78
17:09:55	0	2	retry confirmed		12 34 56 78
17:09:50	0	2	retry confirmed		12 34 56 78
17:09:49	0	2	retry confirmed		12 34 56 78
17:09:45	0	2	retry confirmed		12 34 56 78
17:09:44	0	2	retry confirmed		12 34 56 78
17:09:40	0	2	retry confirmed		12 34 56 78

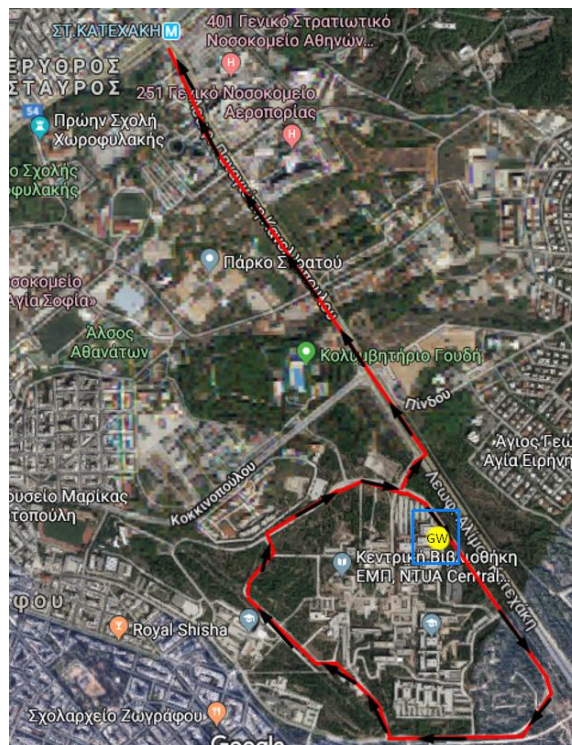
Σχήμα 49: Εισερχόμενα μηνύματα στο TTN

Η διαδρομή που ακολουθήθηκε για την αποστολή των μηνυμάτων είναι αυτή του Σχήμα 51 και κατά τη διάρκεια της κίνησης γίνονταν προσπάθειες για σύνδεση στο TTN και αποστολή μηνύματος (uplink) σε αυτό. Όπως παρατηρήθηκε, η λήψη σημάτων του gateway δεν ήταν ικανοποιητική, με αποτέλεσμα να μην επιτευχθεί επικοινωνία πέραν από μία περιοχή πολύ κοντά σε αυτό. Ο κύριος λόγος είναι αφενός το σημείο στο οποίο εγκαταστάθηκε, το οποίο περιβάλλεται από υπόλοιπα κτήρια και παρεμποδίζεται το σήμα και αφετέρου η κεραία του gateway για επικοινωνία στα 868 MHz του LoRa δικτύου.



Σχήμα 50: Uplink με χρήση "pig-tail" κεραίας

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 50, ο Δείκτης Ισχύος Εισερχόμενου Σήματος (RSSI) είναι -124 dBm, που σημαίνει ότι το σήμα που λάβαμε σε περιοχή που είναι πολύ κοντά στο gateway είναι ιδιαίτερα ασθενές, γεγονός που δικαιολογεί και την αδυναμία επικοινωνίας που παρατηρήθηκε σε μεγαλύτερη απόσταση.



Σχήμα 51: Αποστολή μηνυμάτων από διαφορετικές θέσεις

Στη συνέχεια, τοποθετήσαμε την κεραία 868MHz του Σχήμα 52 με ονομαστική ενίσχυση σήματος 6,5 dBi προκειμένου να εντοπίσουμε το πόσο επηρεάζει την ισχύ σήματος. Η προσωρινή τοποθέτηση του gateway έγινε όπως φαίνεται στο Σχήμα 53.



Σχήμα 52: Κεραία ενίσχυσης σήματος



Σχήμα 53: Τοποθέτηση Gateway με κεραία

Στην περιοχή που παρουσιάστηκε προηγουμένως, το σήμα που λήφθηκε είχε RSSI= -124 dBm, ενώ με τη χρήση της κεραίας λάβαμε RSSI= -77 dBm (βλ. Σχήμα 54).

The screenshot shows the CONSOLE Community Edition interface. The breadcrumb navigation is Applications > trackplast > Devices > node811_2 > Data. The 'Filters' section has 'uplink' selected. The data record is as follows:

```
time      counter  port
"data_rate": "SF/BW125",
"coding_rate": "4/5",
"gateways": [
  {
    "gtw_id": "eui-dca632fffe000ab3",
    "timestamp": 2582815051,
    "time": "2019-10-09T09:05:12.329485Z",
    "channel": 3,
    "rssi": -77,
    "snr": 8.8,
    "latitude": 37.97925,
    "longitude": 23.78486,
    "altitude": 209
  }
],
```

Σχήμα 54: Uplink από κοντινή περιοχή

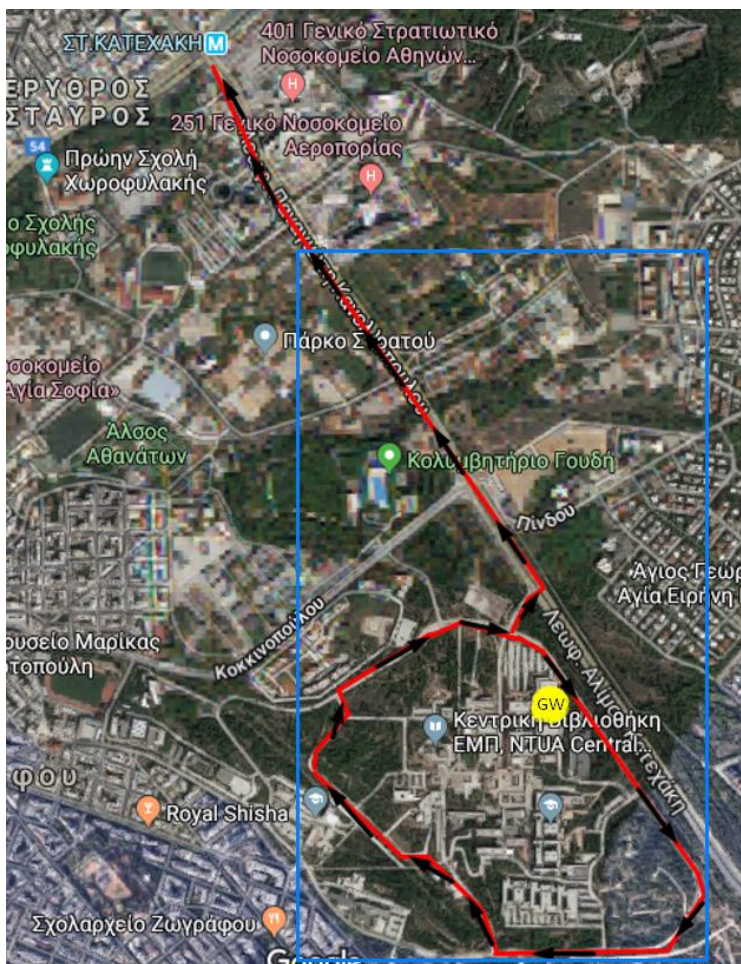
Σε απόσταση ενός χιλιομέτρου από το Gateway, αποστάλθηκε Uplink με επιτυχία, το οποίο είχε RSSI= -109 dBm (βλ. Σχήμα 55).

The screenshot shows the CONSOLE Community Edition interface. The breadcrumb navigation is Applications > trackplast > Devices > node811_2 > Data. The 'Filters' section has 'uplink' selected. The data record is as follows:

```
time      counter  port
{
  "gtw_id": "eui-dca632fffe000ab3",
  "timestamp": 1471650780,
  "time": "2019-10-09T08:46:41.165537Z",
  "channel": 2,
  "rssi": -109,
  "snr": -5.8,
  "rf_chain": 1,
  "latitude": 37.97924,
  "longitude": 23.78485,
  "altitude": 210
},
```

Σχήμα 55: Uplink από απόσταση ενός χιλιομέτρου

Η εφαρμογή της κεραίας προσέφερε θετικά αποτελέσματα και η περιοχή κάλυψης αυξήθηκε σημαντικά όπως φαίνεται από το Σχήμα 56, η οποία προκύπτει από τα σημεία στα οποία επιτεύχθηκε επικοινωνία του Node με το Gateway.

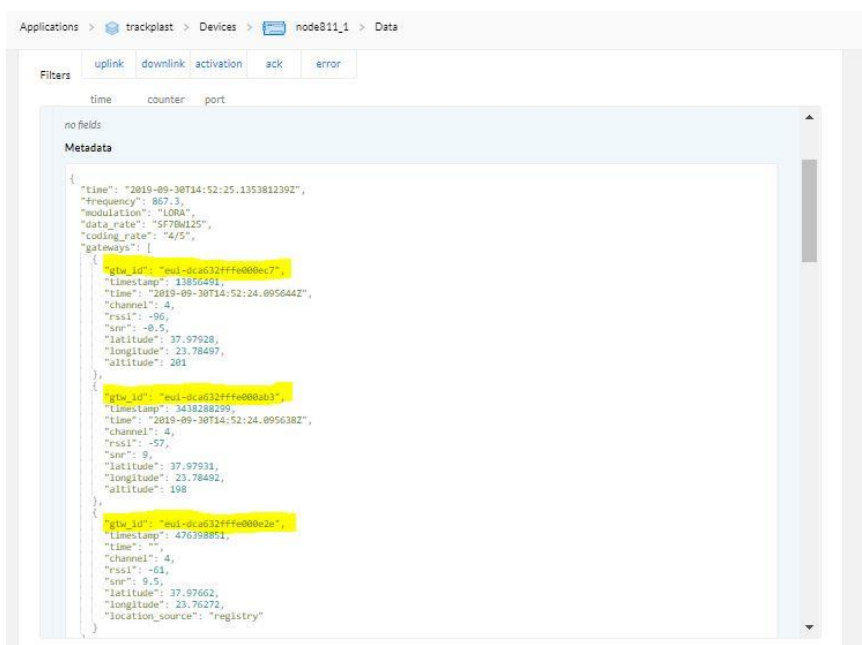


Σχήμα 56: Κάλυψη περιοχής με ενισχυμένη κεραία

Παρ' όλα αυτά, το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό για τη χρήση του gateway στον εντοπισμό θέσης των nodes μιας και χρειάζεται να τοποθετηθεί σε υψηλότερη θέση, αφού ο παράγοντας Line-of-Sight είναι μείζονος σημασίας για να επιτευχθεί ευρεία περιοχή κάλυψης.

Γενικότερα, ο δείκτης RSSI είναι μία μέτρηση της ποιότητας επικοινωνίας των Node με τα gateways, μετριέται σε dBm και το ζητούμενο είναι να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή 0. Για να θεωρηθεί πως η ισχύς του σήματος είναι επαρκής, θα πρέπει να μην είναι λιγότερο από την τιμή -100 dBm, επομένως τα μηνύματα που αποστέλλονται με RSSI που κυμαίνεται από -90 έως -120 dBm είναι πολύ πιθανό να μην παραδοθούν στο gateway.

Αφού ενεργοποιηθούν και τα τρία gateways, κάθε uplink που αποστέλλεται μέσω του node φτάνει στο καθένα σε διαφορετικό χρόνο και RSSI. Αν επιλέξουμε κάποιο από αυτά τα μηνύματα θα εμφανιστούν πολύ χρήσιμες πληροφορίες που αφορούν τη χρονική στιγμή που αποστάλθηκε το μήνυμα από το node, την ταυτότητα των gateways που το έλαβαν, τη χρονική στιγμή που το έλαβαν κλπ. Στο Σχήμα 57, βλέπουμε ότι το μήνυμα που εκπέμπει το node, γίνεται αντιληπτό από τα τρία gateways που έχουμε καταχωρήσει στην εφαρμογή του TTN.

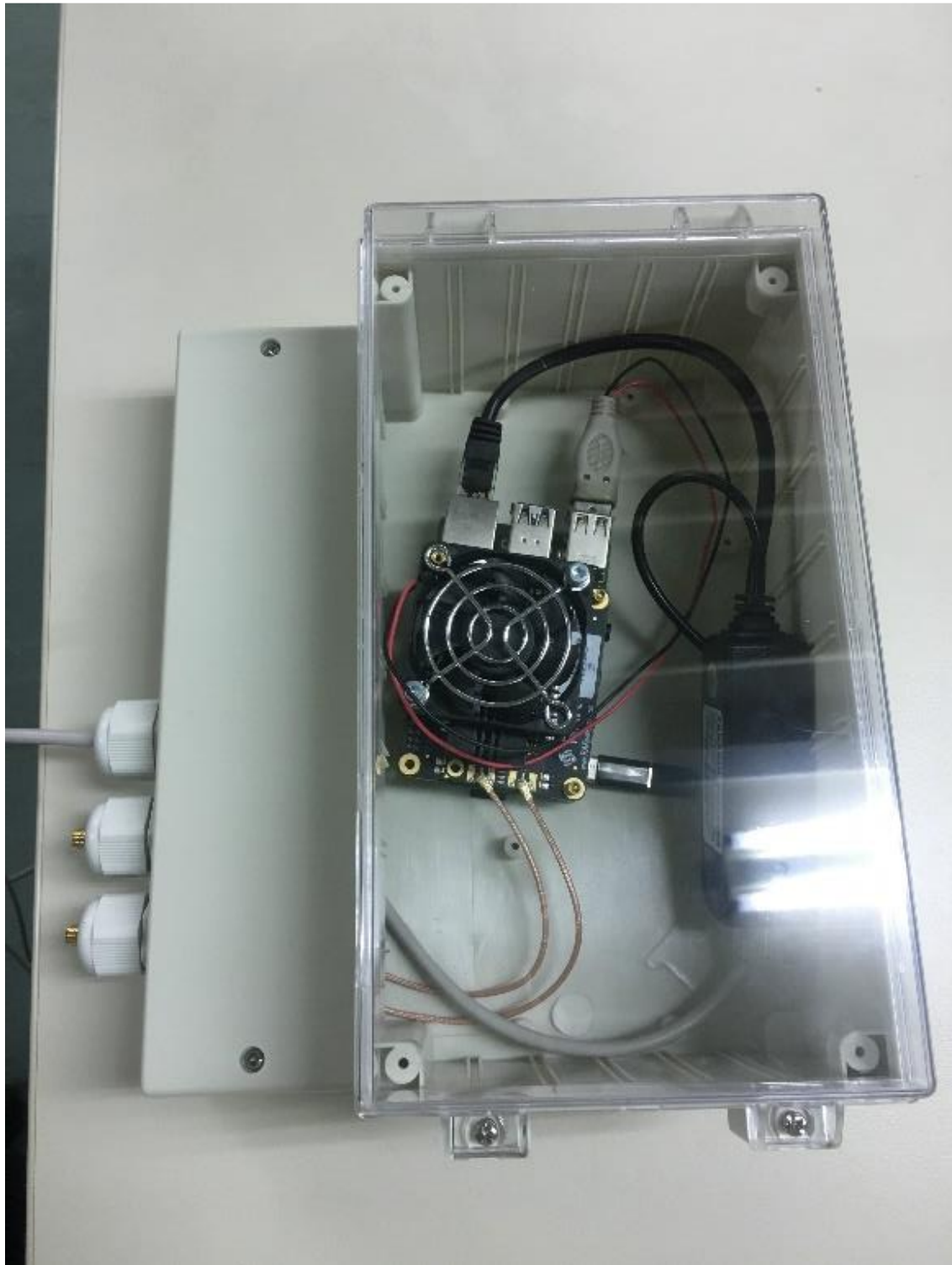


```
Applications > trackplast > Devices > node811_1 > Data
Filters: uplink, downlink, activation, ack, error
time, counter, port
no fields
Metadata
{
  "time": "2019-09-30T14:52:25.135381239Z",
  "frequency": 867.3,
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF7Bw125",
  "coding_rate": "4/5",
  "gateways": [
    {
      "gw_id": "eui-8c-a6-32-ff-fe-006c7",
      "time": "2019-09-30T14:52:24.895644Z",
      "channel": 4,
      "rssi": -96,
      "snr": -9.5,
      "latitude": 37.97928,
      "longitude": 23.78497,
      "altitude": 201
    },
    {
      "gw_id": "eui-8c-a6-32-ff-fe-006a3",
      "time": "2019-09-30T14:52:24.895638Z",
      "channel": 4,
      "rssi": -57,
      "snr": 9,
      "latitude": 37.97931,
      "longitude": 23.78492,
      "altitude": 198
    },
    {
      "gw_id": "eui-8c-a6-32-ff-fe-006e2a",
      "time": "2019-09-30T14:52:24.895638Z",
      "channel": 4,
      "rssi": -61,
      "snr": 9.5,
      "latitude": 37.97662,
      "longitude": 23.76272,
      "location_source": "registry"
    }
  ]
}
```

Σχήμα 57: Metadata των Gateways

Η ανάλυση των μεταδεδομένων θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο, στο οποίο η εγκατάσταση των τριών gateways γίνεται σε πυκνοκατοικημένη περιοχή, όπου με περισσότερες μετρήσεις γίνεται προσπάθεια να εξαχθούν αποτελέσματα και συμπεράσματα για το ποιά είναι η θέση του node και πώς μπορεί να εντοπισθεί.

Για την απρόσκοπτη λειτουργία του gateway σε όλες τις συνθήκες καιρού, χρησιμοποιήθηκε αδιάβροχο κουτί διακλαδώσεων, μέσα στο οποίο θα ήταν ασφαλής η λειτουργία του, εξασφαλίζοντας επίσης αρκετό χώρο για επαρκή ψύξη της συσκευής κατά τη λειτουργία. Επιπρόσθετα, επειδή εντοπίστηκε έντονη ανάπτυξη θερμοκρασιών κατά τη λειτουργία, προστέθηκε ψυκτικός ανεμιστήρας. Το τελικό αποτέλεσμα είναι αυτό του Σχήμα 58, όπου στα αριστερά φαίνεται το καλώδιο Ethernet που περνά μέσα στο κουτί μέσω στεγανού συτυπιοθλιπτή, ενώ οι άλλοι δύο προορίζονται για την κεραία LoRa και την κεραία GPS. Ο ψυκτικός ανεμιστήρας τοποθετήθηκε πάνω από το RAK2245 και τροφοδοτείται με ρεύμα από θύρα USB του Raspberry Pi.



Σχήμα 58: Τελική μορφή Gateway

4. Εντοπισμός Θέσης

Ο πιο διαδεδομένος και συνήθης τρόπος εντοπισμού θέσης στις μέρες μας είναι το GPS (Global Positioning System). Για τη λειτουργία του, χρειάζεται μια συσκευή-δέκτης η οποία λαμβάνει το δορυφορικό σήμα, με πληροφορία την ακριβή θέση του κάθε δορυφόρου και την ακριβή χρονική στιγμή που αυτό αποστάλθηκε. Η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα είναι περίπου ίδια με αυτή του φωτός, επομένως η απόσταση από κάθε δορυφόρο είναι εύκολο να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας την ταχύτητα του φωτός με το χρονικό διάστημα που ταξιδεύει το σήμα μέχρι να φτάσει από τον δορυφόρο στον δέκτη. Επομένως, θα πρέπει να είναι γνωστή και η ακριβής χρονική στιγμή που λαμβάνεται το κάθε σήμα.

$$d_i = c \cdot (t_i - t_j) \quad [1]$$

Όπου:

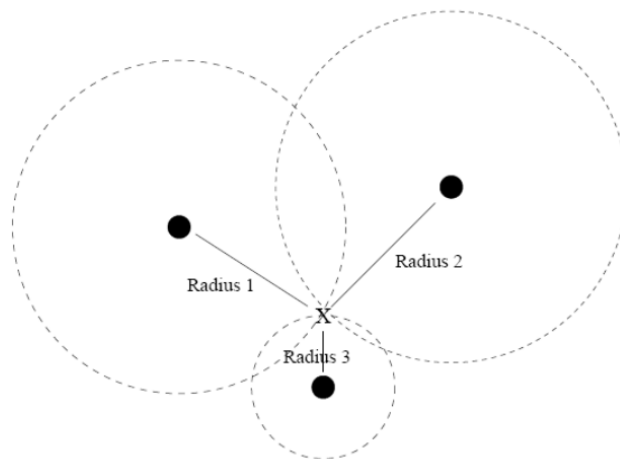
d_i : Απόσταση δέκτη από δορυφόρο

c : Ταχύτητα φωτός ($\sim 3 \cdot 10^8$ m/s)

t_i : Χρονική στιγμή άφιξης στον δέκτη

t_j : Χρονική στιγμή αποστολής σήματος από τον δορυφόρο

Με τη χρήση τριών διαφορετικών σημάτων, επομένως και τριών κύκλων που είναι οι αποστάσεις από τρεις δορυφόρους όπως φαίνεται στο Σχήμα 59, είναι εφικτό να επιτευχθεί τριπλευρισμός σήματος και να εντοπιστεί η θέση στην οποία βρίσκεται η συσκευή-δέκτης, για ένα πρόβλημα δύο διαστάσεων.



Σχήμα 59: Τριπλευρισμός σήματος

Για τον εντοπισμό θέσης μέσω δορυφορικού σήματος όμως, καταναλώνονται μεγάλα επίπεδα ενέργειας από τη συσκευή-δέκτη, με αποτέλεσμα να καθίσταται αδύνατη η ανεξαρτησία της σε ενέργεια, μέσα σε βάθος χρόνου μεγαλύτερο από αυτό των μερικών ημερών. Για να καλυφθεί η ανάγκη για περισσότερη ανεξαρτησία των τελικών συσκευών, δημιουργήθηκαν τα δίκτυα LPWAN, όπως προαναφέρθηκε. Συγκεκριμένα, το δίκτυο LoRa επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών οι οποίες πέραν από το γεγονός ότι συμβαδίζουν με IoT τεχνολογίες, απαιτούν πολύ χαμηλά επίπεδα ενέργειας από τις τελικές συσκευές.

Για τον εντοπισμό θέσης, χρειάζεται ο εξοπλισμός που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Οι απαιτήσεις του end-node σε ρεύμα είναι της τάξεως μερικών mA κατά την λειτουργία, ενώ στην κατάσταση αναμονής φτάνει τα μA , κάτι που σημαίνει ότι με τη χρήση μιας συμβατικής μπαταρίας για την παροχή ενέργειας, μπορεί να επιτευχθεί διάρκεια ζωής από 2 έως 15 χρόνων, αναλόγως τη χρήση για την οποία προορίζεται (Semtech, 2016). Οι χαμηλές απαιτήσεις ενέργειας οφείλονται επίσης στη χαμηλή συχνότητα στην οποία λειτουργεί το δίκτυο LoRaWAN (125 kHz), η οποία είναι ανάλογη της ενέργειας που απαιτείται για τη μετάδοση κάθε σήματος και καθιστά ιδανικό το δίκτυο για τη μετάδοση πληροφορίας μερικών byte σε μεγάλες αποστάσεις.

$$E = \frac{h \cdot c \cdot f}{u} \quad [2]$$

Όπου:

E : Ενέργεια Κύματος

h : Σταθερά Planck ($6,6254 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)

c : Ταχύτητα φωτός ($\sim 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$)

u : Ταχύτητα διάδοσης (\sim ταχύτητα φωτός)

f : Συχνότητα σήματος

Επίσης, ο τρόπος με τον οποίο εντοπίζεται η θέση των end-nodes διαφέρει από αυτόν του GPS. Η ίδια η συσκευή είναι πομποδέκτης και στέλνει σήμα προς τους διαθέσιμους σταθμούς βάσης (gateways), έτσι ώστε εκείνοι με τη σειρά τους να μεταφέρουν το σήμα που έλαβαν και να καταλήξει στον Application Server όπου θα γίνει ο εντοπισμός θέσης. Με τον τρόπο αυτό, η συσκευή δεν χρειάζεται να είναι συνεχώς ενεργή περιμένοντας κάποιο σήμα (awake mode), αλλά εκπέμπει σήμα συγκεκριμένες χρονικές στιγμές που έχουν καθοριστεί από τον προγραμματιστή και ύστερα μπαίνει σε λειτουργία αναμονής (sleep mode), γεγονός που εξοικονομεί σημαντικά την ενέργεια που καταναλώνεται.

4.1. Μέθοδοι Εντοπισμού Θέσης με LoRa

4.1.1. Radio Signal Strength Indicator (RSSI)

Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται η ένταση του σήματος που αντιλαμβάνεται κάθε gateway από το end-node. Η εξασθένιση του σήματος οφείλεται κυρίως στην απόσταση την οποία έχει διανύσει, επομένως όσο πιο ισχυρό το αντιλαμβάνεται το Gateway, τόσο πιο κοντά σε αυτό είναι το end-node. Η ένταση σήματος μετριέται σε dBm και μετατρέπεται προσεγγιστικά σε μέτρα από την παρακάτω σχέση:

$$d_i = 10^{((P_{tx} - RSSI_i) / 10 \cdot n)} \quad [3]$$

Όπου:

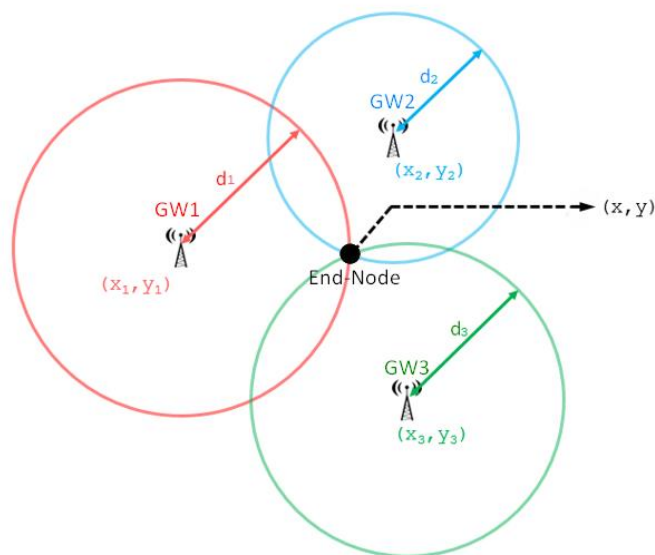
d_i : Προσεγγιστική απόσταση

P_{tx} : Ένταση σήματος μετάδοσης

RSSI : Ένταση σήματος που αντιλαμβάνεται το Gateway

n : Σταθερά απόσβεσης σήματος (2 έως 6)

Με την d_i απόσταση που υπολογίζεται από κάθε gateway, σχηματίζεται και ένας κύκλος ακτίνας d_i , που δείχνει το γεωμετρικό τόπο των πιθανών θέσεων end-node. Με τουλάχιστον τρεις κύκλους, είναι δυνατόν να επιτευχθεί εντοπισμός θέσης 2 διαστάσεων (x, y) όπως στο Σχήμα 60, ενώ με τέσσερις μπορεί να προσδιοριστεί και η τρίτη διάσταση, που είναι το ύψος. Στη μελέτη αυτή γίνεται εντοπισμός θέσης 2 διαστάσεων.



Σχήμα 60: Μέθοδος κύκλων με RSSI

Η RSSI μέθοδος δεν απαιτεί συγχρονισμό μεταξύ συσκευών και θεωρείται απλή στην εφαρμογή της. Παρ' όλα αυτά επηρεάζεται έντονα από την ύπαρξη εμποδίων στον χώρο και βασίζεται στην άμεση οπτική επαφή μεταξύ των end-nodes και των gateways (Line-Of-Sight).

4.1.1.1. Αλγόριθμος και διαδικασία εντοπισμού της μεθόδου RSSI

Λόγω της διακύμανσης που παρουσιάζουν οι παράμετροι του παραπάνω τύπου, τα αποτελέσματα που δίνει για τις αποστάσεις των gateways από το end-node είναι ανακριβή. Για τον λόγο αυτό, αποτελούν τις αρχικές εκτιμήσεις των αποστάσεων, ενώ για την πιο ακριβή προσέγγιση ακολουθούμε αλγοριθμικές διαδικασίες που ελαχιστοποιούν το σφάλμα των μετρήσεων, όπως αυτή που ελαχιστοποιεί το άθροισμα των τετραγωνικών σφαλμάτων των αποστάσεων που υπολογίζονται (Tarrío et al, 2011). Αν (x_i, y_i) οι θέσεις των gateways ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) και d_i οι αρχικές εκτιμήσεις των αποστάσεων, ισχύει για το σφάλμα:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^N (\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2} - d_i)^2 \quad [4]$$

Η θέση (x, y) του end-node μπορεί να υπολογιστεί επαναληπτικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}_k - a \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \end{bmatrix}_{x=\hat{x}_k, y=\hat{y}_k} \quad [5]$$

Όμως χρειάζεται για αρχικοποίηση μια εκτίμηση θέσης. Επίσης, μπορεί να γραμμικοποιηθεί είτε με τον αλγόριθμο υπερβολών, είτε με τον αλγόριθμο κύκλων.

Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος εντοπισμού υπερβολών μετατρέπει το πρόβλημα σε γραμμικό που μπορεί να λυθεί με εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων (Liu et al, 2006 & Cheung et al, 2004), και έχει ως εξής:

$$d_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad [6]$$

Ενώ για $x_1 = y_1 = 0$: $d_i^2 - d_1^2 = x_i^2 - 2xx_i + y_i^2 - 2yy_i$, και σε μητρωϊκή μορφή:

$$\begin{bmatrix} 2x_2 & 2y_2 \\ \vdots & \vdots \\ 2x_N & 2y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - d_2^2 + d_1^2 \\ \vdots \\ x_N^2 + y_N^2 - d_N^2 + d_1^2 \end{bmatrix} \quad [7]$$

Όπου $H = \begin{bmatrix} 2x_2 & 2y_2 \\ \vdots & \vdots \\ 2x_N & 2y_N \end{bmatrix}$, $\vec{x} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ και $b = \begin{bmatrix} x_2^2 + y_2^2 - d_2^2 + d_1^2 \\ \vdots \\ x_N^2 + y_N^2 - d_N^2 + d_1^2 \end{bmatrix}$

Οπότε η θέση του end-node μπορεί να υπολογιστεί ως το διάνυσμα \vec{x} για το οποίο ισχύει:

$$\vec{x} = (H^T H)^{-1} H^T b \quad [8]$$

Για την περίπτωση που έχουμε 3 gateways τότε ισχύει το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{cases} d_1^2 = (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 \\ d_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 \\ d_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 \end{cases} \quad [9]$$

Ανάγοντας τις σχέσεις προκύπτει ότι:

$$\begin{cases} d_1^2 = x^2 - 2x_1x + x_1^2 + y^2 - 2y_1y + y_1^2 \\ d_2^2 = x^2 - 2x_2x + x_2^2 + y^2 - 2y_2y + y_2^2 \\ d_3^2 = x^2 - 2x_3x + x_3^2 + y^2 - 2y_3y + y_3^2 \end{cases} \quad [10]$$

Αφαιρώντας τη δεύτερη από την πρώτη εξίσωση προκύπτει ότι:

$$(-2x_1 + 2x_2)x + (-2y_1 + 2y_2)y = d_1^2 - d_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \quad [11]$$

Αφαιρώντας τη τρίτη από τη δεύτερη εξίσωση προκύπτει ότι:

$$(-2x_2 + 2x_3)x + (-2y_2 + 2y_3)y = d_2^2 - d_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 \quad [12]$$

Επομένως, το σύστημα έχει δύο εξισώσεις με δύο αγνώστους και είναι γραμμικό:

$$\begin{cases} A \cdot x + B \cdot y = C \\ D \cdot x + E \cdot y = F \end{cases} \quad [13]$$

$$\begin{cases} x = \frac{CE - FB}{EA - BD} \\ y = \frac{CD - AF}{BD - AE} \end{cases} \quad [14]$$

4.1.2. Time Of Arrival (TOA)

Στη μέθοδο TOA η απόσταση του end-node από τα gateways θεωρείται ανάλογη με το χρόνο διάδοσης του σήματος μέσα στον χώρο έως ότου διανύσει αυτή την απόσταση. Για να είναι αξιόπιστο το χρονικό διάστημα που μετριέται, όλα τα gateways και end-nodes του συστήματος οφείλουν να είναι συγχρονισμένα με μεγάλη ακρίβεια και κάθε σήμα πρέπει να περιέχει μια χρονοσφραγίδα (timestamp), σχετική με την χρονική στιγμή που μεταδόθηκε, έτσι ώστε να διακρίνεται από τα υπόλοιπα σήματα που μεταδίδονται στο σύστημα.

Όπως και στη μέθοδο RSSI, έτσι και στην TOA για τον εντοπισμό θέσης του end-node πρέπει να βρεθούν οι αποστάσεις d_i μεταξύ end-node και gateways. Η διαφορά τους είναι ότι για τον υπολογισμό της απόστασης χρησιμοποιείται το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το σήμα για να φτάσει από τον πομπό στον δέκτη, και όχι η ένταση με την οποία ο δέκτης το αντιλαμβάνεται (RSSI). Ο υπολογισμός της απόστασης γίνεται από τον τύπο $d_i = c \cdot (t_i - t_j)$, όπως συμβαίνει και στο GPS και η τομή των κύκλων που σχηματίζονται αποτελεί τη θέση του End-Node.

4.1.2.1. Αλγόριθμος και διαδικασία εντοπισμού της μεθόδου TOA

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο για τον εντοπισμό θέσης είναι αυτός των ελαχίστων τετραγώνων. Η θέση υπολογίζεται ελαχιστοποιώντας το άθροισμα των τετραγώνων μιας μη γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης $F(x)$, θέτοντας τις συντεταγμένες του end-node (x_0, y_0) . Αν θεωρηθεί πως η αποστολή του σήματος εκπέμπεται τη χρονική στιγμή t_0 και τα N gateways που βρίσκονται στα σημεία $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)$ το λαμβάνουν τις χρονικές στιγμές t_1, t_2, \dots, t_N , τότε η αντικειμενική συνάρτηση σχηματίζεται ως εξής:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N a_i^2 f_i^2(x) \quad [15]$$

Όπου a_i : Αξιοπιστία λαμβανόμενου σήματος

f_i : Σφάλμα μέτρησης απόστασης

Για το σφάλμα μέτρησης απόστασης ισχύει ο τύπος:

$$f_i(x) = c \cdot (t_i - t_0) - \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad [16]$$

όπου c η ταχύτητα φωτός.

Στο μη γραμμικό πρόβλημα, ο προσδιορισμός της θέσης μπορεί να επιτευχθεί ελαχιστοποιώντας τη συνάρτηση $F(x)$ με τη μέθοδο Gauss-Newton, χρειάζεται όμως την αρχικοποίηση με μία εκτίμηση θέσης του end-node.

4.1.3. Time Difference Of Arrival (TDOA)

Στη μέθοδο TDOA μετριέται η απόσταση που έχουν μεταξύ τους ανά ζεύγη οι σταθμοί βάσης (gateways), μέσω της διαφοράς των χρονικών στιγμών που αντιλαμβάνονται το σήμα. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει, είναι ότι δεν υπάρχει ανάγκη συγχρονισμού της τελικής συσκευής (end-node) με το υπόλοιπο σύστημα, γεγονός που μειώνει σημαντικά την πολυπλοκότητα και το κόστος του εξοπλισμού. Αφού φτάσει το σήμα στα δύο σημεία αναφοράς (gateways), η διαφορά χρόνου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η διαφορά των αποστάσεων που έχουν τα 2 gateways με το end-node.

4.1.3.1. Αλγόριθμος και διαδικασία εντοπισμού της μεθόδου TDOA

Το end-node στέλνει το σήμα $X(t)$, και $N+1$ gateways(Base-Stations) λαμβάνουν το σήμα ως $Y_i(t)$, όπου $i=0,1,2,\dots,N$ ο αριθμός των Base-Stations(BSs) και το 0 συμβολίζει το BS αναφοράς. Συνήθως όλα τα σήματα των BSs, $Y_i(t)$ ($i=1,2,3,\dots,N$), συσχετίζονται με το σήμα του BS₀, το $Y_0(t)$. Επομένως, η διαφορά χρονικής άφιξης σήματος τ_{i0} που μετριέται είναι ανάμεσα στα BS _{i} και το BS₀ (Jin et al, 2018).

Η θέση του end-node συμβολίζεται ως $p=[x,y]^T$ και οι θέσεις των BSs ως $s_i=[x_i,y_i]^T$ όπου $i=1,2,3,\dots,N$. Η σχέση της απόστασης (r_i) μεταξύ της πηγής και των BS _{i} είναι:

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2, \quad i = 0,1,2, \dots, N \quad [17]$$

Για $i=0$, r_0 είναι η απόσταση μεταξύ του End-Node και του BS₀:

$$r_0^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \quad [18]$$

Σε περιβάλλον που επικρατεί Οπτική Γραμμή (Line Of Sight), θεωρείται σταθερή ταχύτητα σήματος αυτή του φωτός, c . Επομένως, ισχύει:

$$r_{i0} = c \cdot \tau_{i0} = r_i - r_0 = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad [19]$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

Για παράδειγμα, η απόσταση του BS_1 από το BS_0 είναι:

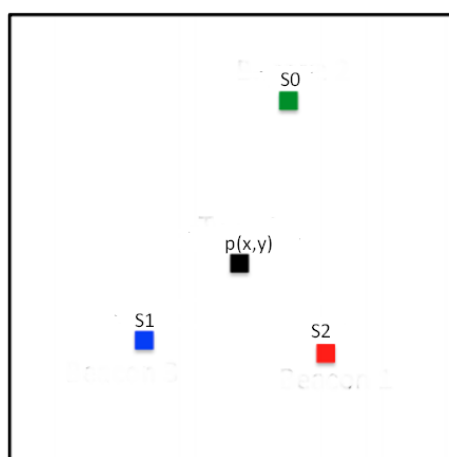
$$r_{10} = r_1 - r_0 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} - \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad [20]$$

$$= c \cdot \tau_{10}$$

Η παραπάνω εξίσωση έχει μοναδικούς αγνώστους τα x, y και η γραφική της παράσταση είναι μία υπερβολή με εστίες τα σημεία s_1 και s_0 , με απόσταση εστιών το r_{10} . Η τομή των N εξισώσεων υπερβολών αποτελεί το σημείο p που είναι και το ζητούμενο του προβλήματος. Η λύση ανά δύο εξισώσεις δίνει και την τομή των υπερβολών που τους αντιστοιχούν.

Η διαδικασία εντοπισμού θέσης ενός end-node σε δύο διαστάσεις με τη μέθοδο TDOA περιέχει τα εξής βήματα (O'Keefe, 2017):

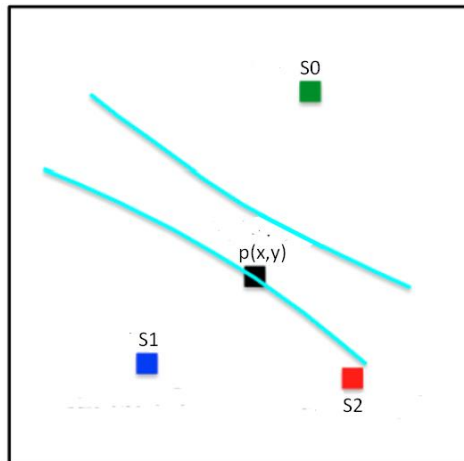
- Βήμα 1: Το σήμα αποστέλλεται σε άγνωστο χρόνο από το end-node στα gateways BS_0 και BS_1 (βλ. Σχήμα 61)



Σχήμα 61: Διάταξη 3 gateways

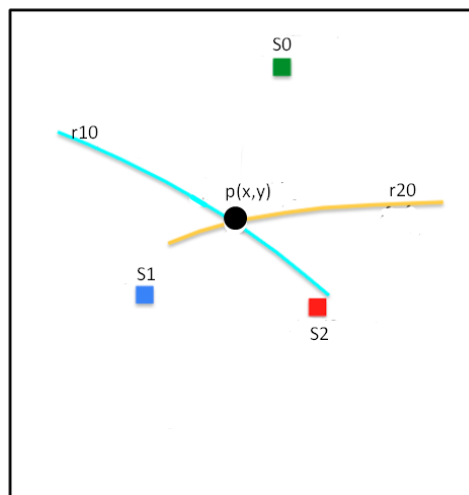
- Βήμα 2: Υπολογίζεται η απόσταση r_{10} και ύστερα σχηματίζεται η υπερβολή με εστίες τις θέσεις των gateways 0 και 1. Ο γεωμετρικός τόπος της υπερβολής

αποτελείται από δύο κλάδους όπως αυτοί φαίνονται στο Σχήμα 62, που πιθανώς να έκανε το πρόβλημα εντοπισμού δυσκολότερο. Αν υπάρχει, όμως, μία προσέγγιση της τοποθεσίας του end-node, ο ένας κλάδος μπορεί να απορριφθεί, όπως γίνεται με τον πάνω κλάδο του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 62: Σχηματισμός κλάδων υπερβολής

- Βήμα 3: Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για τουλάχιστον ένα ακόμη ζεύγος gateways, με σκοπό να ληφθεί η τοποθεσία του end-node από τη τομή των σχηματιζόμενων υπερβολών. Παρακάτω βλέπουμε στο Σχήμα 63 ότι η τομή των δύο υπερβολών αποτελεί την θέση του end-node.



Σχήμα 63: Εντοπισμός θέσης end-node

Στην περίπτωση που δεν υπήρχαν σφάλματα κατά τη μέτρηση θα ήταν αρκετές δύο εξισώσεις των οποίων η λύση θα έδινε τις συντεταγμένες του end-node. Όμως οι

υπερβολές ενδέχεται να μην περνούν από την πραγματική θέση λόγω σφαλμάτων των μετρήσεων χρονικών διαφορών.

Από τις προηγούμενες εξισώσεις ισχύει ότι:

$$r_i^2 = (r_{i0} + r_0)^2, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad [21]$$

Η εξίσωση (17) γράφεται και ως εξής:

$$\|s_i\|^2 + \|p\|^2 - 2s_i^T p = r_{i0}^2 + 2r_i r_0 + r_0^2, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N \quad [22]$$

Για $i = 0$, $r_{i0} = 0$. Επομένως:

$$\|s_0\|^2 + \|p\|^2 - 2s_0^T p = r_0^2 \quad [23]$$

Αφαιρώντας κατά μέλη τις (22) και (23) προκύπτει η εξίσωση της υπερβολής:

$$\|s_i\|^2 - \|s_0\|^2 - 2s_{i0}^T p = r_{i0}^2 + 2r_{i0}r_0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad [24]$$

Αν ληφθεί υπόψη και ο θόρυβος που επικρατεί στις πραγματικές συνθήκες, τότε $\tau_{i0} = \tau_{i0}^0 + \varphi_i$, όπου τ_{i0}^0 είναι η πραγματική τιμή του TDOA και φ_i το σφάλμα μέτρησης.

Η εξίσωση (23) μπορεί να γραφτεί σε μητρική μορφή ως εξής:

$$G_a \begin{bmatrix} x \\ y \\ r_0 \end{bmatrix} = h_a + \Phi_a \quad [25]$$

Όπου:

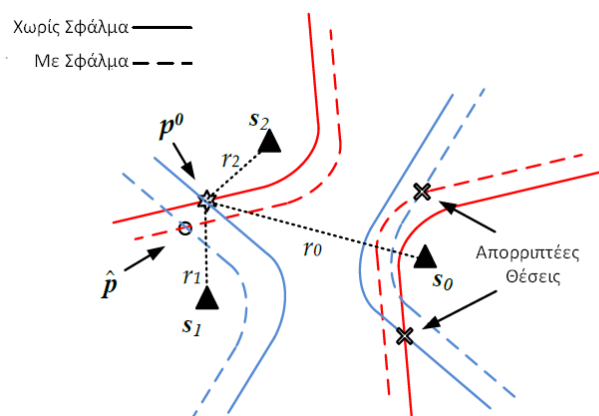
$$G_a = \begin{bmatrix} s_{10}^T & r_{10} \\ s_{20}^T & r_{20} \\ \vdots & \vdots \\ s_{N0}^T & r_{N0} \end{bmatrix}, \quad h_a = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_{10} - r_{10}^2 \\ K_{20} - r_{20}^2 \\ \vdots \\ K_{N0} - r_{N0}^2 \end{bmatrix}, \quad \Phi_a = -c \begin{bmatrix} r_1 \varphi_1 \\ r_2 \varphi_2 \\ \vdots \\ r_N \varphi_N \end{bmatrix} = -c B_\alpha \sigma, \quad B_\alpha = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & & 0 \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r_N \end{bmatrix}$$

Όπου Φ_a είναι το υψηλής τάξης σφάλμα που αγνοείται και σ το σφάλμα της TDOA μέτρησης, ενώ ισχύει ότι:

$$K_{i0} = K_i - K_0 = \|s_i\|^2 = x_i^2 + y_i^2, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, N \quad [26]$$

Οι εξισώσεις είναι γραμμικές υπό την υπόθεση ότι τα p και r_0 είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει λόγω της εξίσωσης (17). Ο αλγόριθμος του Chan υπολογίζει τα p και r_0 με τρεις ανεξάρτητες μεταβλητές και τα διορθώνει με τη σχέση

(17). Παρ' όλα αυτά, είναι αναπόφευκτη μια μικρή απόκλιση μεταξύ τους όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 64.



Σχήμα 64: Επιρροή σφάλματος στην λύση

Επίσης, για την καλύτερη προσέγγιση της θέσης του end-node, υπολογίζονται οι συντεταγμένες του διανύσματος $\tilde{x} = (x, y)$ που δίνουν την ελάχιστη δυνατή πιθανότητα σφάλματος των μετρήσεων, μέσω επαναληπτικής, μη-γραμμικής μεθόδου (Π.χ. Gauss-Newton) (Chan et al, 2006).

$$J_{TDOA} = \sum_{i=0}^N \frac{((t_i - t_0)s - \|\tilde{x} - x_i\| + \|\tilde{x} - x_0\|)^2}{\sigma_{d,i}^2} \quad [27]$$

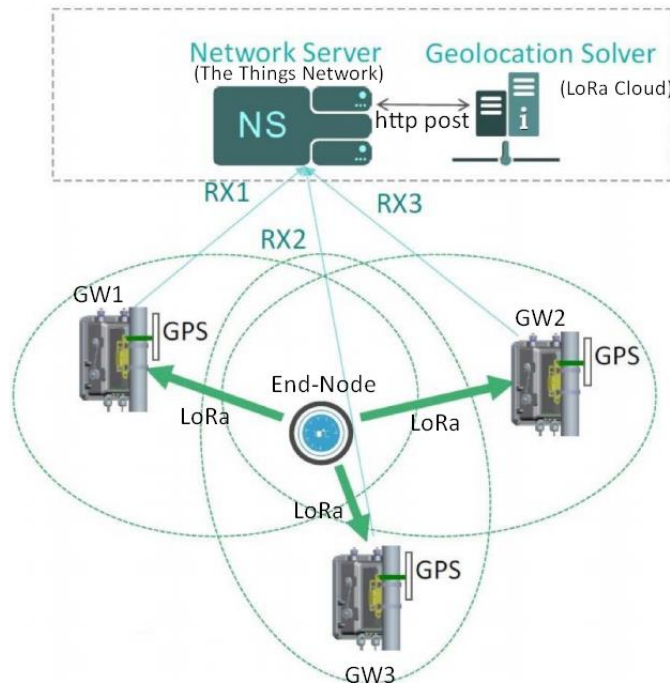
Ένα σημαντικό ζήτημα στις μεθόδους TOA και TDOA είναι το γεγονός ότι το σήμα που αντιλαμβάνονται οι σταθμοί βάσης ενδέχεται να μην προέρχεται από την άμεση Οπτική Γραμμή (Line Of Sight) μεταξύ πομπού και δέκτη, αλλά από ανάκλαση (Non Line Of Sight). Το φαινόμενο αυτό, προσθέτει ακόμη ένα σφάλμα που είναι πιθανό να υπάρχει σε κάθε μέτρηση, πέραν του σταθερού σφάλματος μέτρησης. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται μέθοδοι οι οποίες αποκλείουν τις μετρήσεις σημάτων που προέχονται από ανάκλαση και επιτρέπουν τον πιο ακριβή εντοπισμό θέσης με βάση τις Line Of Sight (LOS) μετρήσεις.

Μια από τις συνηθέστερες είναι η προσέγγιση των σταθμισμένων ελαχίστων τετραγώνων, στην οποία αφού ληφθεί ένα αξιόπιστο δείγμα μετρήσεων, είναι δυνατό να εντοπιστούν οι μετρήσεις που προέρχονται από Non Line Of Sight σήματα και να απορριφθούν κατά τη διαδικασία εντοπισμού θέσης του end-node. Η μέθοδος αυτή δε θα αναλυθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, μιας και οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν, εξασφάλιζαν LOS περιβάλλον.

Παρ' όλα αυτά, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θέσης στην πλατφόρμα LoRa Cloud, της Semtech, χρησιμοποιεί τη μέθοδο που περιεγράφηκε.

4.2. Η πλατφόρμα LoRa Cloud και Geolocation

Η ροή της πληροφορίας σε ένα δίκτυο LoRa ξεκινάει από τη τελική συσκευή. Το uplink που λαμβάνουν από αυτή οι σταθμοί βάσης, προωθείται στον διακομιστή δικτύου (Network Server), από όπου συλλέγονται οι ζητούμενες πληροφορίες και προωθούνται στον επιλύτη όπου γίνεται ο εντοπισμός θέσης με τις μεθόδους που περιεγράφηκαν προηγουμένως (βλ. Σχήμα 65).



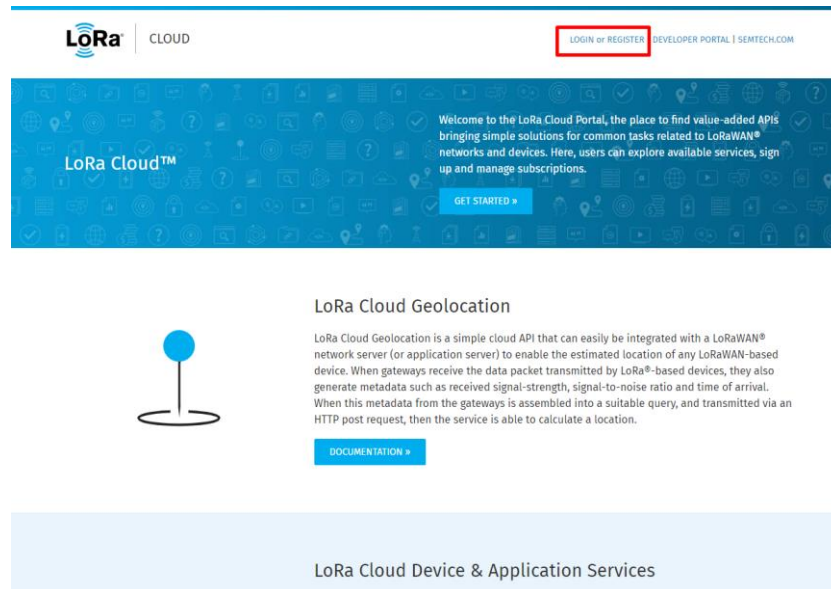
Σχήμα 65: Αρχιτεκτονική του αναπτυσσόμενου δικτύου

Για την εύρεση των συντεταγμένων του end-node, επιλέχθηκε η πλατφόρμα LoRa Cloud της Semtech, έτσι ώστε να εξασφαλισθούν αξιόπιστα και ακριβή αποτελέσματα. Η εφαρμογή LoRa Cloud Geolocation είναι διαθέσιμη στην πλατφόρμα από το καλοκαίρι του 2019 και αποτελεί τον “state of the art” επιλυτή εντοπισμού θέσης χωρίς τη χρήση GPS σε LoRaWAN δίκτυα.

Το LoRa Cloud Geolocation είναι μία Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών ή αλλιώς API (Application Programming Interface), το οποίο μπορεί να συνεργαστεί με έναν Network Server, για τον εντοπισμό θέσης συσκευών βασισμένες στο LoRaWAN. Όταν τα Gateways λαμβάνουν πακέτα δεδομένων από τα End-Nodes, παράγουν μεταδεδομένα (metadata) όπως το RSSI, το SNR (signal-to-noise ratio) και η χρονική

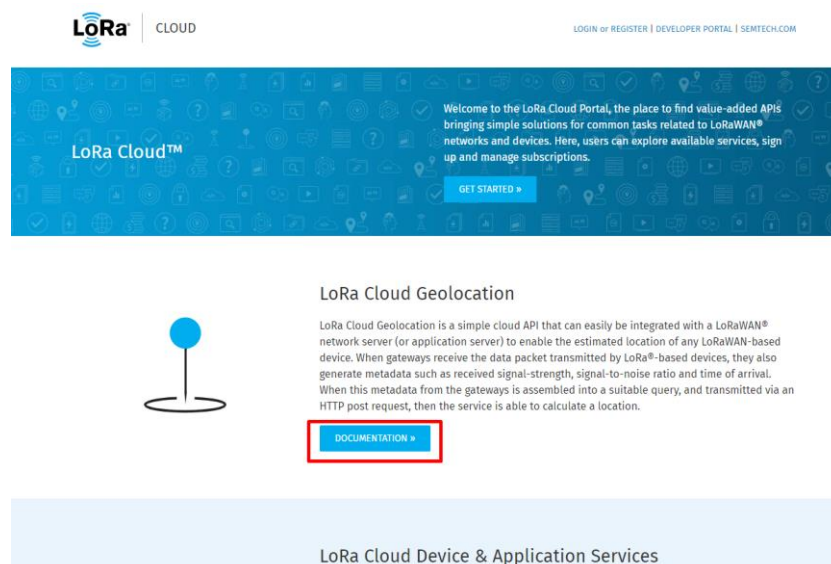
στιγμή άφιξης (TOA). Αν τα metadata αυτά περαστούν ως ένα HTTP αίτημα (HTTP post request) στην πλατφόρμα, τότε είναι δυνατό να γίνει υπολογισμός της θέσης των End-Nodes .

Αρχικά, απαιτείται η δημιουργία λογαριασμού για τη χρήση της πλατφόρμας (βλ. Σχήμα 66):



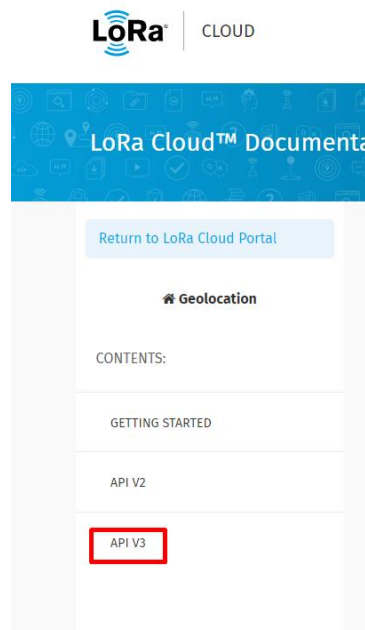
Σχήμα 66: Αρχική σελίδα LoRa Cloud

Αφού δημιουργηθεί λογαριασμός, επιλέγεται ο οδηγός χρήσης (Documentation) για την εφαρμογή του Geolocation, όπως φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 67:



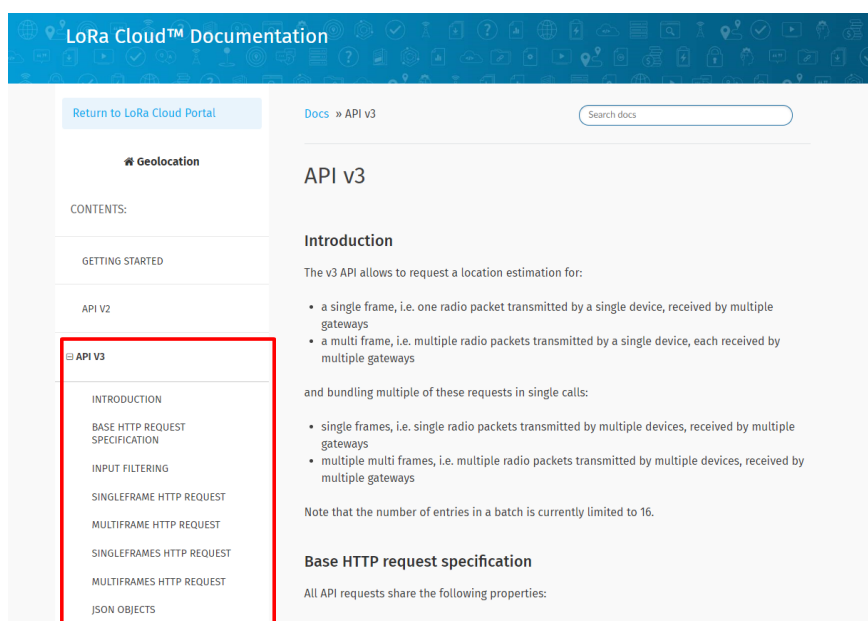
Σχήμα 67: Άνοιγμα οδηγού χρήσης

Η τρίτη έκδοση του API είναι η τρέχουσα έκδοση της εφαρμογής (Σχήμα 68):



Σχήμα 68: API Version 3

Αρχικά, ο οδηγός αναφέρει τις δυνατότητες του API V3 και τα χαρακτηριστικά του (Σχήμα 69), ενώ στη συνέχεια αναλύονται τα HTTP POST requests που μπορούν να γίνουν, για να ληφθεί η τοποθεσία της συσκευής σε δύο διαστάσεις (latitude, longitude) μαζί με άλλες χρήσιμες πληροφορίες.



Σχήμα 69: Περιεχόμενα οδηγού

Η μέθοδος εντοπισμού που χρησιμοποιείται είναι η TDOA σε συνδυασμό με την RSSI σε περίπτωση που χρειάζεται. Η Semtech προτείνει το συνδυασμό των δύο μεθόδων για τον εντοπισμό θέσης, επιτρέπει όμως και την επεξεργασία των παραμέτρων, όπως η επιλογή μίας μόνο μεθόδου για την επίλυση του προβλήματος.

4.2.1. «HTTP POST Request»

Για την επίτευξη επικοινωνίας μέσω πρωτοκόλλου HTTP, χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python. Η εισαγωγή των δεδομένων που χρειάζεται το LoRa Cloud για κάθε HTTP request είναι η ταυτότητα και τοποθεσία των Gateways του συστήματος, ενώ απαιτούνται και frames που είναι κυρίως πληροφορίες που έχει το κάθε Uplink στο TTN. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την αποστολή των δεδομένων στο LoRa Cloud αποτελείται από το κύριο μέρος (main.py) και το μέρος με τα δεδομένα σε μορφή json (bodyjson.py) το οποίο έχει γραφτεί σε μορφή υπορουτίνας:

main.py:

```
import requests
from bodyjson import bodyj

#url = 'https://gls.loracloud.com/api/v3/solve/singleframe'
url = 'https://gls.loracloud.com/api/v3/solve/multiframe'

data = bodyj()
print(data)

header = {'Accept': 'application/json', 'Content-Type': 'application/json', 'Ocp-Apim-Subscription-Key': 'AQEATI9/7sFsnMHB/uOg7t64lr3Q9oVEjORnhkgwEpz93TeYPHuw'}
response = requests.post(url, headers=header, json=data)

print("RESPONSE:")
print(response.text)
print("//==//")
print("RESPONSE CODE: " + str(response.status_code))
```

bodyjson.py:

```
def bodyj():
    m = {"gateways": [
        {
            "gatewayId": "eui-dca632ffe000ab3",
            "latitude": 37.97961,
            "longitude": 23.64723,
            "altitude": 97,
        },
        {
            "gatewayId": "eui-dca632ffe000e2e",
            "latitude": 37.97674,
            "longitude": 23.658,
            "altitude": 58,
        },
        {
            "gatewayId": "eui-7276ff002e062c08",
            "latitude": 37.97782,
            "longitude": 23.71291,
            "altitude": 72,
        },
        {
            "gatewayId": "eui-000080029c10dc66",
            "latitude": 37.86472,
            "longitude": 23.76957,
            "altitude": 77,
        },
        {
            "gatewayId": "eui-dca632ffe000ec7",
            "latitude": 37.97245,
            "longitude": 23.64515,
            "altitude": 69,
        }
    ],
    "frames": [
        [
            ["eui-dca632ffe000ab3", 0, 1033397204, -108, 1.8],
            ["eui-dca632ffe000ab3", 1, 1033397204, -108, 1.8],
```

```

["eui-dca632fffe000e2e", 0, 1398627596, -111, -3.8],
["eui-dca632fffe000e2e", 1, 1398627596, -111, -3.8],
["eui-dca632fffe000ec7", 0, 398305900, -115, -4.5],
["eui-dca632fffe000ec7", 1, 398305900, -115, -4.5],
["eui-7276ff002e062c08", 0, 1379106492, -116, -9],
["eui-7276ff002e062c08", 1, 1379106492, -116, -9],
],
[
["eui-dca632fffe000ab3", 0, 838371532, -105, -0.8],
["eui-dca632fffe000ab3", 1, 838371532, -105, -0.8],
["eui-dca632fffe000e2e", 0, 1203601924, -114, -6.8],
["eui-dca632fffe000e2e", 1, 1203601924, -114, -6.8],
["eui-dca632fffe000ec7", 0, 203280220, -113, -3.5],
["eui-dca632fffe000ec7", 1, 203280220, -113, -3.5],
],
[
["eui-dca632fffe000ab3", 0, 952554468, -97, -8.2],
["eui-dca632fffe000ab3", 1, 952554468, -97, -8.2],
["eui-dca632fffe000e2e", 0, 1317784860, -112, -6.2],
["eui-dca632fffe000e2e", 1, 1317784860, -112, -6.2],
["eui-dca632fffe000ec7", 0, 317463156, -114, -7.2],
["eui-dca632fffe000ec7", 1, 317463156, -114, -7.2],
]
],
"params": {"locAlgType": "TDOA_ALG", "doRssiTdoaCombine": True},
}

return m

```

Μόλις ο κώδικας τρέξει επιτυχώς, επιστρέφει τις γεωγραφικές συντεταγμένες της συσκευής, όπως αυτές υπολογίστηκαν από τον επιλύτη Lora Cloud (Σχήμα 70).

```

C:\Users\tolis\Desktop\tolis\trial\Scripts\python.exe C:/Users/tolis/Desktop/tolis/main.py
{'gateways': [{'gatewayId': 'eui-dca632fffe000ab3', 'latitude': 37.97961, 'longitude': 23.64723, 'altitude': 97}, {'gatewayId': 'eui-dca632fffe000e2e', 'latitu
RESPONSE:
{"result": {"numUsedGateways": 3, "HDOP": null, "locationEst": {"latitude": 37.978974, "longitude": 23.648174, "toleranceHoriz": 304}, "algorithmType": "Rssi"}
//==//
RESPONSE CODE: 200

```

Σχήμα 70: Αποτέλεσμα επίλυσης

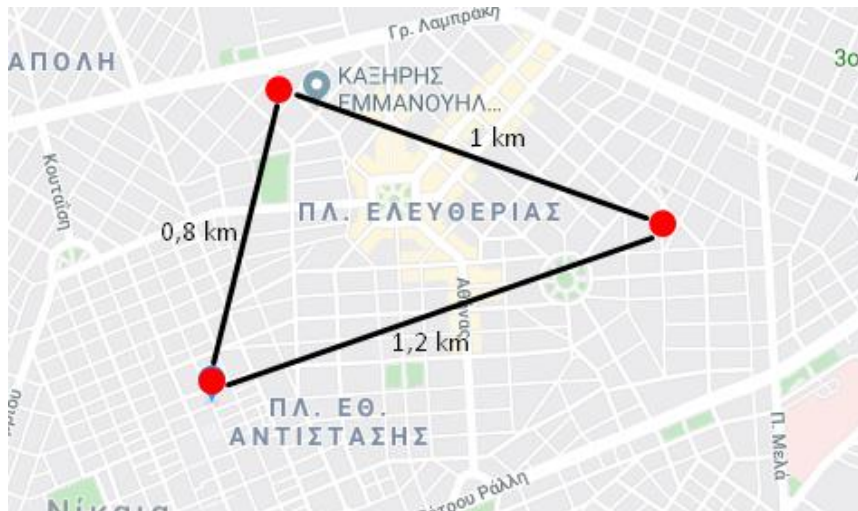
Το αποτέλεσμα που επιστρέφει το LoRa Cloud, περιέχει επίσης τον αριθμό των gateways που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό θέσης, τον συντελεστή «HDOP» (Horizontal Dilution Of Precision) και την ακρίβεια της θέσης ως ακτίνα κύκλου σε μέτρα «toleranceHoriz». Ο συντελεστής HDOP εξαρτάται από τη σχετική θέση του end-node με τα gateways και τον αριθμό των gateways που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό θέσης και η πραγματική ακρίβεια θέσης προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του με την toleranceHoriz. Όσον αφορά τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται, ο επιλύτης χρησιμοποιεί τον TDOA, ενώ εφεδρικά και σε περίπτωση που δεν είναι εφικτή η χρήση των timestamps, επιλύει με βάση το RSSI.

4.3. Αποτελέσματα Μετρήσεων

Για τη συλλογή πειραματικών μετρήσεων και την επίτευξη εντοπισμού θέσης της συσκευής, επιλέχθηκε αστικό πυκνοκατοικημένο περιβάλλον, το οποίο αποτελεί το πιο δύσκολο σενάριο εφαρμογής δικτύου, εφόσον τα κτήρια αποτελούν εμπόδιο στην ομαλή μετάδοση του σήματος από το end-node προς τα gateways. Συγκεκριμένα, τα 3 gateways τοποθετήθηκαν σε ταράτσες πολυκατοικιών όπως αυτή του Σχήματος Σχήμα 71, δημιουργώντας ένα τρίγωνο, μέσα στο οποίο έγιναν οι αποστολές uplink από το end-node.

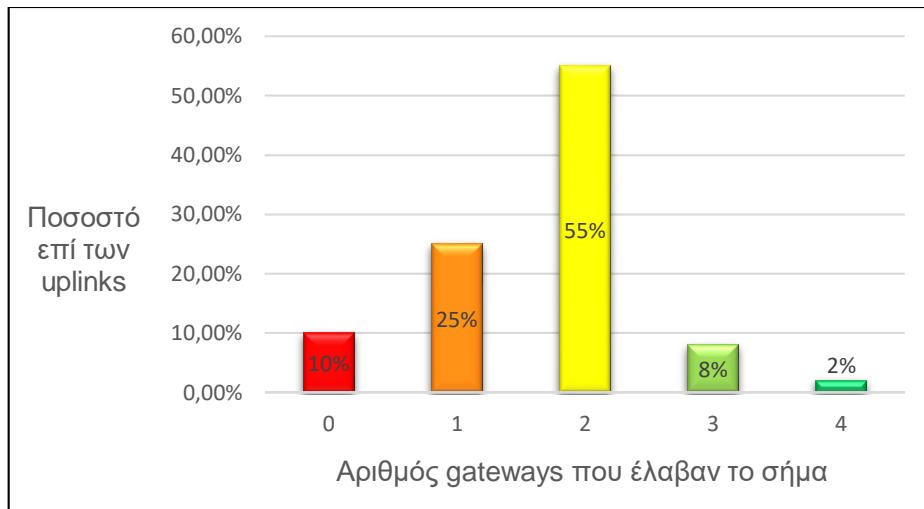


Σχήμα 71: Τοποθέτηση Gateways



Σχήμα 72: Διάταξη Gateways στην περιοχή μετρήσεων

Στο Σχήμα 72 φαίνεται πως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο gateways είναι 800 μέτρα, έτσι ώστε να εξασφαλισθεί ότι δε θα δημιουργηθεί παρεμβολή σήματος μεταξύ τους, αλλά με μέγιστη απόσταση τα 1.200 μέτρα, έτσι ώστε να είναι εφικτή η ταυτόχρονη λήψη σήματος και από τα τρία gateways. Επίσης, το Line Of Sight ήταν αρκετά περιορισμένο, εφόσον η τοποθέτησή τους δεν έγινε σε σημεία με μεγαλύτερο υψόμετρο από αυτό των κτηρίων της περιοχής, επομένως το ποσοστό επιτυχημένης επικοινωνίας του end-node με τα 3 gateways, ήταν αρκετά χαμηλό, με τις περισσότερες περιπτώσεις να επιτυγχάνεται επικοινωνία με ένα ή δύο από τα gateways (βλ. Σχήμα 73). Η περιοχή εντός του τριγώνου που δημιουργούν τα gateways, στην οποία διαπιστώθηκε σημαντικά καλύτερη επικοινωνία, είναι η πλατεία Ελευθερίας, κάτι που ήταν αναμενόμενο λόγω έλλειψης κτηρίων γύρω από την τελική συσκευή. Επιτυχημένη επικοινωνία για το αντικείμενο μελέτης σε αυτή την εργασία, θεωρείται η ταυτόχρονη λήψη του ίδιου μηνύματος uplink από τουλάχιστον 3 gateways, όπως έχει προαναφερθεί στις ανάγκες του εντοπισμού θέσης.

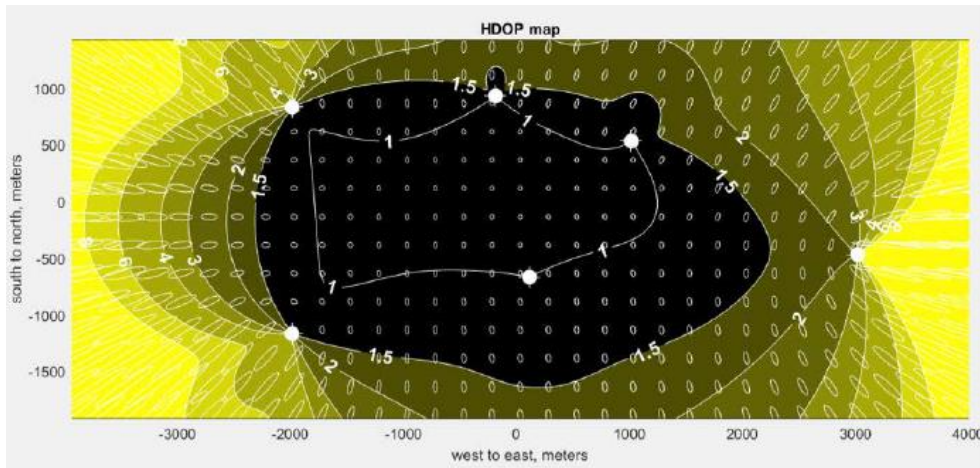


Σχήμα 73: Ποσοστά επιτυχημένων uplinks

Ο αριθμός και η διάταξη των gateways παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιτυχή κάλυψη του δικτύου που αναπτύσσεται. Η λήψη των μεταδιδόμενων σημάτων του κάθε end-node προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον 3 gateways κοντά σε αυτό ώστε να είναι δυνατός ο εντοπισμός θέσης, με αποτέλεσμα η κάλυψη του δικτύου να είναι ανάλογη του αριθμού των τοποθετημένων gateways σε μία περιοχή. Ο αριθμός αυτός όμως, δεν είναι από μόνος του ικανός να προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα. Όπως αναφέρει η εταιρία LoRa Alliance (2018), είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψιν ο δείκτης Οριζόντιας Αραίωσης της Ακρίβειας (HDOP). Ο δείκτης αυτός, συμβολίζει το σφάλμα των μετρήσεων που γίνονται, εξαρτάται εξ ολοκλήρου από τη διάταξη των gateways έναντι του end-node και αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα με το πόσο καλή είναι η διάταξη αυτή. Όπως αναφέρθηκε, ο δείκτης HDOP πολλαπλασιάζεται με την εφικτή ακρίβεια των μετρήσεων χρονοσφραγίδας (timestamp) σε μέτρα, η οποία προκύπτει από την ακρίβεια των χρονοσφραγίδων σε nanoseconds. Για παράδειγμα, timestamps με ακρίβεια 200 nanoseconds δίνουν αποτέλεσμα εντοπισμού θέσης με ακρίβεια 60 μέτρων. Με την υπόθεση καλής τοποθέτησης gateways έναντι του end-node θεωρούμε HDOP ίσο με 1, επομένως η πραγματική ακρίβεια αποτελέσματος παραμένει 60 μέτρα. Αν όμως ο δείκτης HDOP ήταν 2, τότε η πραγματική ακρίβεια θα ήταν ένας κύκλος με ακτίνα 120 μέτρα.

Σε πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν από την LoRa Alliance (2018), τοποθετήθηκαν έξι gateways και μετρήθηκαν δείκτες HDOP κοντά στη μονάδα στην κεντρική ζώνη, ενώ φτάνει και σε τιμές πάνω από 8, σε πλευρικές περιοχές (βλ. Σχήμα 74). Όπως αποδείχτηκε, η τοποθέτηση σε κοντινή απόσταση από την τελική συσκευή δεν βελτίωσε την επίδοση του εντοπισμού θέσης, αλλά τον πιο σημαντικό ρόλο έπαιξε το μοτίβο στο οποίο έγινε η τοποθέτηση των gateways. Η ακρίβεια εντοπισμού θέσης

για παράδειγμα, στο κέντρο ενός τετραγώνου στου οποίου τις ακμές έχουν τοποθετηθεί σταθμοί βάσης, ήταν καλύτερη από αυτή ενός τριγώνου. Παρά το γεγονός αυτό, στη μελέτη που έγινε χρησιμοποιήθηκε ο ελάχιστος δυνατός εξοπλισμός που χρειάζεται για την επίτευξη εντοπισμού θέσης, που είναι αυτός των τριών gateways σε τριγωνική διάταξη, όπως επισημάνθηκε.



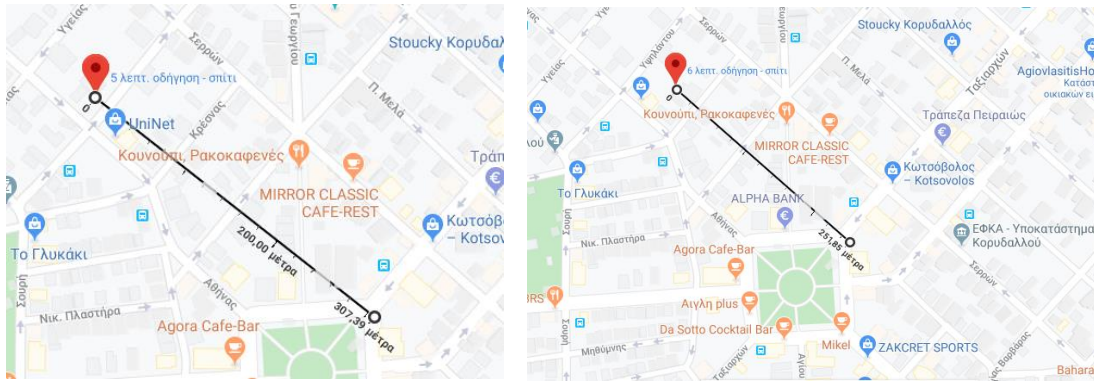
Σχήμα 74: Χάρτης δεικτών HDOP

Όπως φαίνεται παρακάτω, ύστερα από την αποστολή των μεταδεδομένων στο LoRa Cloud, ελήφθησαν οι γεωγραφικές συντεταγμένες που υπολογίσθηκαν με βάση το RSSI (βλ. Σχήμα 75).

```
main
C:\Users\tolis\Desktop\tolis\trial\Scripts\python.exe C:/Users/tolis/Desktop/tolis/main.py
{"gateways": [{"gatewayId": "eui-dca632fffe000ab3", "latitude": 37.97961, "longitude": 23.64723, "altitude": 97}, {"gatewayId": "eui-dca632fffe000e2e", "latitude": 37.97961, "longitude": 23.64723, "altitude": 97}, {"gatewayId": "eui-dca632fffe000c1a", "latitude": 37.97961, "longitude": 23.64723, "altitude": 97}]}
RESPONSE:
{"result": {"numUsedGateways": 3, "HDOP": null, "locationEst": {"latitude": 37.979185, "longitude": 23.648269, "toleranceHoriz": 304}, "algorithmType": "Rssi"}, "error": null}
//==//
```

Σχήμα 75: Αποτέλεσμα λύσης βασισμένο σε RSSI

Η τοποθέτηση των συντεταγμένων στους χάρτες της Google δείχνουν σημεία τοποθεσίας με απόκλιση από 200 έως 300 μέτρα από την πραγματική θέση (βλ. Σχήμα 76), η οποία μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική για τον εντοπισμό θέσης χωρίς τη χρήση GPS.



Σχήμα 76: Αποτελέσματα θέσης 1 στον χάρτη

Σε διαφορετικό σημείο εντός πλατείας (Σχήμα 77), ελήφθησαν αποτελέσματα με μικρότερο σφάλμα κατά μέσο όρο, αλλά με μεγαλύτερη διακύμανση.



Σχήμα 77: Αποτελέσματα θέσης 2 στον χάρτη

Η διάταξη των τριών gateways στην περιοχή μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένη, δεδομένης της δυσκολίας που υπήρχε στην ταυτόχρονη επικοινωνία του end-node με αυτά. Ο αριθμός των gateways είναι οριακά επαρκής και η τοποθέτηση ενός τέταρτου θα ήταν αρκετά ωφέλιμη για την αύξηση των επιτυχημένων μηνυμάτων για εντοπισμό θέσης των τελικών συσκευών. Ο σημαντικότερος, όμως, παράγοντας, είναι το υψόμετρο στο οποίο τοποθετήθηκαν οι σταθμοί βάσης, το οποίο λόγω περιορισμού πρόσβασης, δεν ξεπερνούσε αυτό της ταράτσας μίας πολυκατοικίας. Όπως έχει τονιστεί, ο παράγοντας Line-Of-Sight, παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στην επίτευξη της επικοινωνίας των τελικών συσκευών με τους σταθμούς βάσης, όσο και στην αξιοπιστία του αποτελέσματος θέσης. Επομένως, ο εντοπισμός θέσης της τελικής συσκευής θα γινόταν απρόσκοπτα αν εξασφαλιζόταν πρόσβαση σε σημεία που παρουσιάζουν μεγάλη υψομετρική διαφορά από το έδαφος, για την τοποθέτηση των σταθμών βάσης.

5. Συμπεράσματα και μελλοντικές ενέργειες

Η προσέγγιση που έγινε στην παρούσα εργασία είχε σκοπό να εξετάσει την εφαρμογή του δικτύου LoRa στη διαδικασία εντοπισμού θέσης, χωρίς τη χρήση σήματος GPS. Όπως επισημαίνεται, ο σκοπός αυτής της προσέγγισης δεν είναι η αντικατάσταση του GPS-tracking, εφόσον στοχεύει περισσότερο στην κάλυψη της ανάγκης ιχνηλασιμότητας των τελικών συσκευών και λιγότερο στον ακριβή εντοπισμό θέσης τους. Επομένως, το έργο που ζητείται να φέρει εις πέρας, είναι η επιτυχημένη δήλωση θέσης σε διακριτούς χρόνους σε επίπεδο ωρών ή ημερών, της κάθε τελικής συσκευής, σε μία πλατφόρμα παρακολούθησης, έτσι ώστε να είναι γνωστή η πορεία που ακολουθεί σε σχετικά μεγάλα χρονικά διαστήματα με ακρίβεια μερικών εκατοντάδων μέτρων.

Η ποικιλία των τεχνολογικών μέσων που υπάρχουν για τη διαδικασία εντοπισμού θέσης είναι ευρεία, παρά το γεγονός ότι το δίκτυο LoRa έχει αναπτυχθεί τα τελευταία 5 χρόνια. Το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν gateways του εμπορίου έτοιμα για χρήση, αλλά συντέθηκαν μαζί διαφορετικά στοιχεία εξοπλισμού για τη δημιουργία τους, μείωσε σημαντικά το κόστος του εξοπλισμού, ενώ κατέστησε δυνατό να γίνουν αρκετές επεμβάσεις και διορθωτικές ρυθμίσεις στο δίκτυο που αναπτύχθηκε. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί κανείς να έρθει περισσότερο σε επαφή με το αντικείμενο μελέτης, αφού του δίνεται η ευκαιρία να δει σε βάθος τον τρόπο που λειτουργεί το δίκτυο σε επίπεδο υλικής δομής αλλά και λογισμικού. Παρ'όλα αυτά, η σύνθεση του εξοπλισμού αποτελεί χρονοβόρα διαδικασία με επιπτώσεις στην επεκτασιμότητα του δικτύου για εφαρμογές ευρείας κάλυψης δικτύου. Διαπιστώθηκε επίσης, πως για την χρήση του αλγορίθμου TDOA και την αξιοποίηση των timestamps χρειάζεται να ζητηθεί κλειδί αποκρυπτογράφησης από την εταιρία Semtech και να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένος τύπος gateways (π.χ. Kerlink iBTS) που υποστηρίζει χρονοσφραγίδες με ακρίβεια nanoseconds. Η ακρίβεια των χρονοσφραγίδων σε nanoseconds είναι αναγκαία για την αντίστοιχη ακρίβεια σε δεκάδες μέτρα ή και ακόμη λιγότερο, δεδομένου ότι επικρατεί Line-Of-Sight περιβάλλον.

Επίσης, ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν η επίτευξη του geolocation με τον ελάχιστο εξοπλισμό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αυτή την εφαρμογή, ενώ υποδεικνύει μία πρώτη επαφή με τη χρήση του LoRa Cloud Geolocation Solver ο οποίος αποτελεί τον πιο σύγχρονο και αξιόπιστο επιλύτη για LoRa-based εντοπισμό θέσης. Η διαδικασία που παρουσιάζεται για να βρεθεί η θέση του end-node στο χάρτη, αποτελείται παράλληλα και από την επεξήγησή της, εστιάζοντας περισσότερο στην κατανόησή και λιγότερο στην αυτοματοποίηση αυτής.

Επομένως, το σημείο στο οποίο μπορούν να γίνουν βελτιώσεις σε μελλοντικό χρόνο, είναι αυτό της αυτοματοποίησης των διαδικασιών που περιεγράφηκαν, ώστε να υποστηρίζεται συστηματικός εντοπισμός θέσης όλων των τελικών συσκευών του δικτύου που έχει δημιουργηθεί, σε μία ενιαία πλατφόρμα παρακολούθησης. Για να μπορέσουν οι διαδικασίες αυτές να αυτοματοποιηθούν θα πρέπει να γίνουν τα εξής:

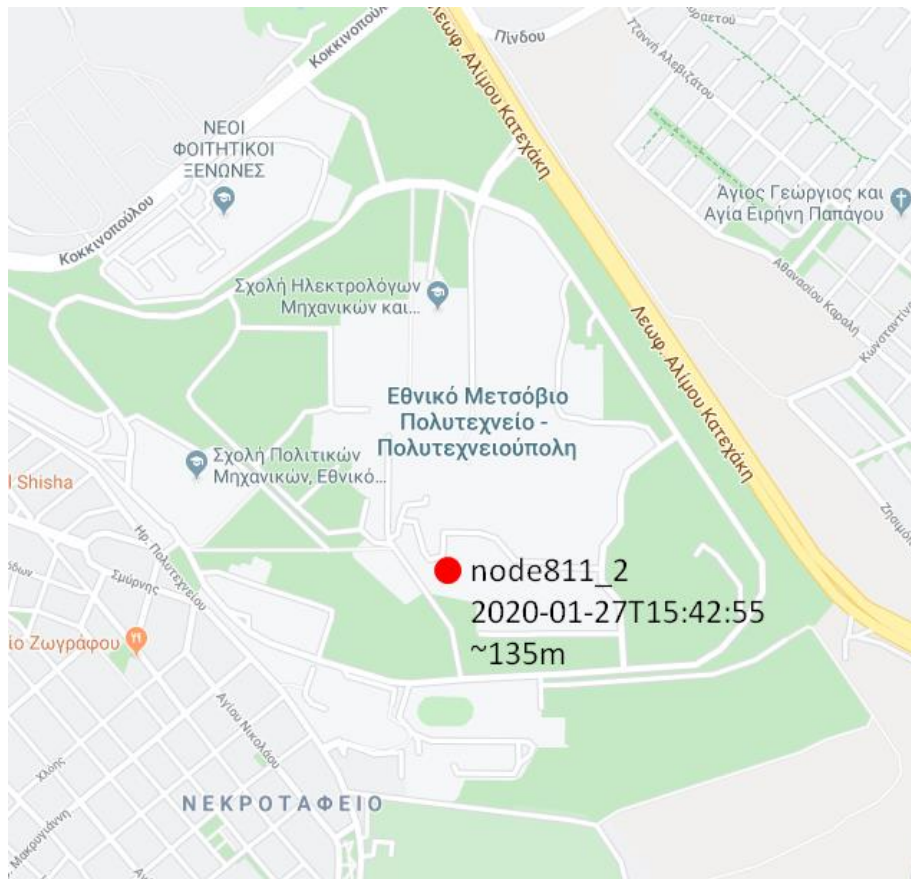
- 1) Μέσω πρωτοκόλλου mqtt θα διαβάζονται τα uplinks που εμφανίζονται στο TTN τα οποία θα περιέχουν το όνομα κάθε συσκευής που τα παράγει και την εκάστοτε χρονική στιγμή αποστολής του κάθε uplink, έτσι ώστε να μπορούν να αντιστοιχηθούν οι θέσεις που υπολογίζονται στα σωστά end-nodes.

The screenshot shows the 'APPLICATION DATA' interface for the 'trackplast' application. It displays a table of uplink messages. One message is highlighted with a red box around the 'dev id' field, which contains the value 'node811_2'. A red arrow points from this box to the text 'ΟΝΟΜΑ END-NODE ΠΟΥ ΕΣΤΕΙΛΕ ΤΟ UPLINK'. Another red box highlights the 'time' field in the metadata section, containing the value '2020-01-15T15:42:55.147103574Z'. A red arrow points from this box to the text 'ΧΡΟΝΙΚΗ ΣΤΙΓΜΗ ΑΠΟΣΤΟΛΗΣ UPLINK'. A third red box highlights the 'gateways' array in the metadata section, which contains an array of gateway objects. A red arrow points from this box to the text 'ΓΑΤΕWAYS ΠΟΥ ΕΛΑΒΑΝ ΤΟ UPLINK ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΥΤΟΥ'. The interface also shows filters for 'uplink', 'downlink', 'activation', 'ack', and 'error', and a table with columns for 'time', 'counter', and 'port'.

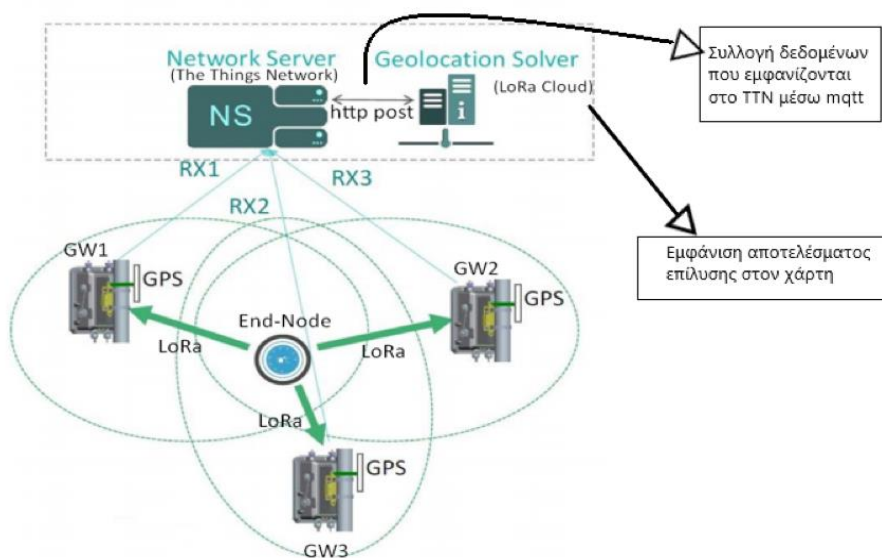
Σχήμα 78: Εμφάνιση Uplink στο TTN

- 2) Ύστερα από την πρόσβαση στα δεδομένα του TTN, θα πρέπει να δημιουργείται αυτόματα JSON αρχείο στη μορφή του bodyjson.py και θα μπορεί να είναι δυναμικό, μιας και τα δεδομένα του TTN είναι διαφορετικά σε κάθε uplink (π.χ. τα gateways που έλαβαν το σήμα του end-node). Όσον αφορά το Response, θα πρέπει να περιέχει εκτός των χαρακτηριστικών που αναφέρθηκαν, και το id του end-node αλλά και τη χρονική στιγμή για την οποία έγινε το geolocation (το οποίο πρέπει να λάβουμε από το TTN όπως φαίνεται στο Σχήμα 78).

- 3) Τέλος, θα εμφανίζονται οι θέσεις που υπολογίζονται για κάθε end-node στον χάρτη, με τις απαραίτητες πληροφορίες όπως το end-node id, η χρονική στιγμή και η ακτίνα ακρίβειας (βλ. Σχήμα 79).



Σχήμα 79: Παράδειγμα εμφάνισης Node σε χάρτη



Σχήμα 80: Προσθήκες αυτοματοποίησης στη δομή

Τέλος, όσον αφορά την τελική συσκευή και τις δυνατότητες του δικτύου, υπάρχουν ακόμη πολλά δεδομένα που μπορούν να ληφθούν πέραν της θέσης, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία περιβάλλοντος, η ανίχνευση κίνησης και ήχου, αρκεί να γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις στον εξοπλισμό. Το μέγεθος της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε δεν ήταν το ελάχιστο δυνατό, και όπως παρατηρήθηκε, η μείωση του μεγέθους της τελικής συσκευής συνεπάγεται αύξηση του κόστους της. Επειδή το κομμάτι των κατασκευών στα LPWAN δίκτυα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, δεν υπάρχει ποικιλία και επαρκής σχεδιασμός συσκευών με βάση τις ανάγκες που εξυπηρετούν η κάθε μία. Τα επόμενα χρόνια όμως, αναμένεται να αυξηθεί η ποικιλία και να μειωθεί το κόστος των τελικών συσκευών που κυκλοφορούν στην αγορά.

Αναφορές

A. Adhikary, X. Lin, Y.-P.E. Wang, Performance evaluation of NB-IoT coverage, in: Proc. of VTC-Fall, Montreal, QC, Canada, 2016, pp. 65–69.

B. Jin, X. Xu, T. Zhang, Robust Time-Difference-of-Arrival (TDOA) Localization Using Weighted Least Squares with Cone Tangent Plane Constraint, 2018

Brian O’Keefe, Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques, 2017

Chan, Y. T., Hang, H. Y. C., and Ching, P. C., “Exact and approximate maximum likelihood localization algorithms,” IEEE Trans.Veh. Technol. 55, 10–18 (2006a).

Cheung, K.; So, H.; Ma, W.; Chan, Y. Least squares algorithms for time-of-arrival-based mobile location. IEEE Trans. Sign. Process. 2004, 52, 1121–1128

Cisco, The Internet Of Things Vertical Solutions, [Online]. <https://www.cisco.com/web/offer/emear/38586/images/Presentations/P11>, 2015

F. Sforza, Communications system, US Patent US8406275 B2, 2013

K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F. Meyer, A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, 2017

Liu, B.; Lin, K.;Wu, J. Analysis of hyperbolic and circular positioning algorithms using stationary signal-strength-difference measurements in wireless communications. IEEE Trans. Veh. Tech. 2006, 55, 499–509.

LoRa-Alliance. A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN; LoRa-Alliance: San Ramon, CA, USA, 2015.

LoRa Alliance™ Strategy Committee, GEOLOCATION WHITEPAPER, 2018

Margelis, G.; Piechocki, R.; Kaleshi, D.; Thomas, P. Low throughput networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations, 2015; pp. 181–186.

Nasralla, M.M.; Ognenoski, O.; Martini, M.G. Bandwidth scalability and efficient 2D and 3D video transmission over LTE networks, 2013

P. Tarrío, A.M. Bernardos and J.R. Casar, Weighted Least Squares Techniques for Improved Received Signal Strength Based Localization, 2011

Sanchez R, State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services, 2016

Semtech, SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, 2016

U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara, Low power wide area networks: An overview, IEEE J. Commun. Surv. Tuto. 19 (2) (2017) 855–873.

Wang, F.; Liu, J. Networked wireless sensor data collection: Issues, challenges, and approaches, 2011, 13, 673–687

Y.E. Wang, X. Lin, A. Grovlen, Y. Sui, J. Bergman, A primer on 3GPP narrowband internet of things, IEEE Commun. Mag. 55 (3) (2016) 117–123.