Neapolis University

HEPHAESTUS Repository **http://hephaestus.nup.ac.cy**

Department of Computer Science MSc in Information Systems and Digital Innovation

2021-01

þÿ ‘ ¾ ¹ ¿ » Ì ³ · Ã · Ä ¿ Å ± Ã Í Á ¼ ± Ä ¿ Å þÿ À Á É Ä ¿ º Ì » » ¿ Å L o R a ³ ¹ ± Ç Á ® Ã · þÿ ± ³ Á ¿ Ä ¹ º - Â À µ Á ¹ ¿ Ç - Â

þÿ “ º ¯ º ± Â , ‘ ½ Ä Î ½ ¹ ¿ Â

þÿ œ µ Ä ± À Ä Å Ç ¹ ± º Ì Á Ì ³ Á ± ¼ ¼ ± Ã Ä ± » · Á ¿ Æ ¿ Á ¹ ± º ¬ £ Å Ã Ä ® ¼ ± Ä ± º ± ¹ Ä · ½ ¨ · Æ ¹ ± º
þÿ £ Ç ¿ » ® ” ¹ ¿ ¯ º · Ã · Â Ÿ ¹ º ¿ ½ ¿ ¼ ¯ ± Â º ± ¹ • À ¹ Ã Ä ® ¼ · Â ¥ À ¿ » ¿ ³ ¹ Ã Ä Î ½ , ± ½ µ À ¹ Ã Ä ® ¼

http://hdl.handle.net/11728/11731

Downloaded from HEPHAESTUS Repository, Neapolis University institutional repository

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021

ΣΧΟΛΗ
Οικονομικών, Διοίκησης και Πληροφορικής

Αξιολόγηση του ασύρματου πρωτοκόλλου LoRa για χρήση σε αγροτικές περιοχές.

ΓΚΙΚΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021

Πανεπιστήμιο Νεάπολις Πάφου

ΣΧΟΛΗ
Οικονομικών, Διοίκησης και Πληροφορικής

Αξιολόγηση του ασύρματου πρωτοκόλλου LoRa για χρήση σε αγροτικές περιοχές.

Διατριβή η οποία υποβλήθηκε προς απόκτηση εξ αποστάσεως μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών στα Πληροφορικά Συστήματα και την Ψηφιακή Καινοτομία στο Πανεπιστήμιο Νεάπολις

ΓΚΙΚΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2021

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © **Γκίκας Αντώνιος, 2021**

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της διατριβής από το Πανεπιστημίου Νεάπολις δεν υποδηλώνει απαραιτήτως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Πανεπιστημίου.

Ονοματεπώνυμο Φοιτητή/Φοιτήτριας: ΓΚΙΚΑΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

Τίτλος Μεταπτυχιακής Διατριβής: Αξιολόγηση του ασύρματου πρωτοκόλλου LoRa για χρήση σε αγροτικές περιοχές.

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για την απόκτηση εξ αποστάσεως μεταπτυχιακού τίτλου στο Πανεπιστήμιο Νεάπολις και εγκρίθηκε στις …… [ημερομηνία έγκρισης] από τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής.

Εξεταστική Επιτροπή:

Πρώτος επιβλέπων (Πανεπιστήμιο Νεάπολις Πάφος)……[ονοματεπώνυμο, βαθμίδα, υπογραφή]

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: ……[ονοματεπώνυμο, βαθμίδα, υπογραφή]

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: ……[ονοματεπώνυμο, βαθμίδα, υπογραφή]

Περίληψη

Η αλματώδης εξάπλωση του διαδικτύου σε συνδυασμό με το δίκτυο των πραγμάτων (Internet of things) δημιούργησε την ανάγκη για νέες τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών.

Στον πρωτογενή τομέα της οικονομίας και συγκεκριμένα στην αγροτική ανάπτυξη ο αντίκτυπος των νέων τεχνολογιών ήταν τεράστιος. Η βελτιστοποίηση στην διαχείριση των φυσικών πόρων και η αύξηση του συντελεστή αποδοτικότητας μπορούν να επιτευχθούν μόνο με την χρήση σύγχρονων τεχνολογιών. Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κάθε δραστηριότητας πρέπει να μειωθεί για ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

Η εμφάνιση του ασύρματου πρωτοκόλλου Lora έδωσε το έναυσμα για την δημιουργία αυτόνομων IoT συσκευών βασισμένες σε αυτό. Η έξυπνη γεωργία και κτηνοτροφία είναι πλέον γεγονός.

Στην εργασία αυτή θα γίνει παρουσίαση ενός πιλοτικού προγράμματος βασισμένο στο πρωτόκολλο επικοινωνιών LoRa με σκοπό την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου υπό πραγματικές συνθήκες. Ένα δίκτυο από συσκευές βασισμένες στο Lora σε συνδυασμό με μία διαδικτυακή πλατφόρμα θα είναι η βάση για την επίτευξη του στόχου.

Ο βαθμός αξιοπιστίας είναι βασικός παράγοντας για την αξιοποίηση τέτοιων πολλά υποσχόμενων τεχνολογιών σε καίριους τομείς της οικονομίας.

Προσπαθήσαμε να δούμε την επίδραση που έχουν οι μεταβολές της απόστασης σε συνάρτηση με το Spreading Factor (SF), τις καιρικές συνθήκες και την μορφολογία του εδάφους στην λειτουργία συστημάτων βασισμένα στο ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνιών LoRa σε ρεαλιστικές συνθήκες χρήσης .

Λέξεις κλειδιά : LoRa, LoRaWAN , Ασύρματες επικοινωνίες

Abstract

The rapid spread of internet along with the Internet of Things (IoF) created the need for new technologies in the field of wireless communication.

In the primary field of economy and in agricultural development in particular, the impact of new technologies was huge. The optimization in handling the natural resources and the increase of the efficiency factor can only be achieved by using modern technologies. The environmental footprint of every activity should be reduced for a more sustainable future. The appearance of the wireless protocol LoRa triggered the creation of independent IoT devices based on it. The intelligent agriculture and stock-breeding is undoubtedly a fact.

In this paper a pilot program based on the communication protocol LoRa will be presented in order to evaluate the protocol under real conditions. A network of devices based on LoRa combined with an online platform will be the infrastructure for achieving this goal. The degree of reliability is a crucial factor for many promising technologies in the critical fields of economy.

What we specifically tried to do is see the impact of modifications of distance along with the Spreading Factor, the weather conditions and the topography in the system operation based on the wireless protocol LoRa under realistic conditions of usage.

Keywords: LoRa, LoRaWAN, Wireless Communication

Ευχαριστίες

Κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας στα πλαίσια της φοίτησης μου στο Πανεπιστήμιο Νεάπολις στο εξ' αποστάσεως MSC στα Πληροφοριακά Συστήματα και Ψηφιακή Καινοτομία είχα την τύχη να γνωρίσω αρκετούς αξιόλογους ανθρώπους τους οποίους θέλω να ευχαριστήσω.

Καθοριστικό ρόλο σε όλο αυτό το εγχείρημα είχε η συμβολή του επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ζήνων Ζήνωνος που με την βοήθεια και την καθοδήγηση του κατάφερα να ολοκληρώσω στην παρούσα εργασία. Επίσης η συμβολή όλων των καθηγητών-τριών μου ήταν πολύτιμη και με βοήθησε να διευρύνω τους ακαδημαϊκούς μου ορίζοντες. Οι γνώσεις που απέκτησα κατά την διάρκεια της φοίτησης μου ήταν ανεκτίμητες και μου άνοιξαν νέους επιστημονικούς ορίζοντες.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου την γυναίκα μου και τα 3 μου παιδιά για την υπομονή και συμπαράσταση που έδειξαν όλο αυτό το διάστημα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή 11
1.1 Σκοπός της εφαρμογής 11
1.2 Μεθοδολογία 12
1.3 Πρωτόκολλο Lora 13
Κεφάλαιο 2 - Βιβλιογραφική Επισκόπηση 15
2.1 Κάλυψη LoRa 15
2.2 Συστήματα Smart farming 16
2.3 Έξυπνα συστήματα μεταφορών – συγκοινωνιών – ενέργειας 17
2.4 Έξυπνες πόλεις 18
Κεφάλαιο 3 – Πρωτόκολλο LoRa 20
3.1 LoRaWAN 20
3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά 22
3.3 Συσκευές IoT με LoRa - LoRaWAN 25
3.4 Διαθέσιμες πλατφόρμες IoT για συστήματα LoRa 28
Κεφάλαιο 4 - Πιλοτική Εφαρμογή 30
4.1 Κατασκευή εξοπλισμού 31
4.2 Προγραμματισμός εξοπλισμού 36
4.3 Εγκατάσταση εξοπλισμού στο πεδίο μετρήσεων 43
4.4 Έλεγχος επικοινωνιών 44
4.5 Πειράματα και Αποτελέσματα 47
Συμπεράσματα 60
Βιβλιογραφία 61

Κατάλογος Γραφικών Παραστάσεων/Εικόνων/Διαγραμμάτων

Εικόνα 1 - Τοποθεσία διεξαγωγής μετρήσεων 13
Εικόνα 2- Σύγκριση του εύρους μετάδοσης και της κατανάλωσης για κάθε διαφορετικό τύπο επικοινωνίας. 17
Εικόνα 3 - LoRaWAN Class A, Class B & C 20
Εικόνα 4 - Επικοινωνία Bi-directional end-devices (Class A) 21
Εικόνα 5 - Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN 24
Εικόνα 6 - Dragino IoT development kit 27
Εικόνα 7- Εφαρμογή Putty SSH client 31
Εικόνα 8 - Dragino LG01-N (LoRa GATEWAY) 31
Εικόνα 9 - Επισκόπηση συστήματος LG01-N 32
Εικόνα 10 - LoRa Gateway σε στεγανό κουτί. 32
Εικόνα 11 - Κατασκευή και δοκιμή σταθμού μετρήσεων (LoRa Node) 33
Εικόνα 12 - Σχεδίαση και υλοποίηση LoRa Node. 34
Εικόνα 13 - Σταθερός σταθμός μετρήσεων (LoRa Node). 34
Εικόνα 14 - Φορητός σταθμός μετρήσεων (LoRa Node). 35
Εικόνα 15 - Ελεγκτής φόρτισης μπαταρίας LoRa Node από φωτοβολταϊκό πάνελ. 36
Εικόνα 16 - Δοκιμές Arduino uno με LoRa shield 37
Εικόνα 17 - Arduino Uno με W5100 shield συνδεδεμένα με RTC. 38
Εικόνα 18 - Ενεργοποίηση NTP Server στο LoRa Gateway. 38
Εικόνα 19 - Ρελέ για την μεταγωγή του RTC κατά την διάρκεια του συγχρονισμού 39
Εικόνα 20 - Διαδικασία συγχρονισμού RTC με NTP Server. 40
Εικόνα 21 - Διαδικτυακή πλατφόρμα THETHINGSNETWORK. 41
Εικόνα 22 - Καταχώρηση LoRa Gateway στο THETHINGSNETWORK 41
Εικόνα 23 - Ρύθμιση παραμέτρων LoRa Gateway. 42
Εικόνα 24 - Ρυθμίσεις ασφάλειας του LoRa Gateway. 42
Εικόνα 25 - Τοποθέτηση LoRa Gateway (Dragino LG01-N) στο πεδίο δοκιμών. 44
Εικόνα 26 – Τοποθεσία μετρήσεων (διάφορες αποστάσεις). 45
Εικόνα 27 – Σημεία μετρήσεων στα 250m , 700m και 1800m. 45
Εικόνα 28 - Στιγμιότυπα από μετρήσεις με φορητό LoRa Node. 46
Εικόνα 29 – RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF11 στα 250m 49
Εικόνα 30 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF11 στα 700m 49
Εικόνα 31 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF11 στα 1800m 50
Εικόνα 32 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF10 στα 250m 51
Εικόνα 33 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF10 στα 700m 51
Εικόνα 34 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF10 στα 1800m 52
Εικόνα 35 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF9 στα 250m 52
Εικόνα 36 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF9 στα 700m 53
Εικόνα 37 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF9 στα 1800m 53
Εικόνα 38 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF8 στα 250m 54
Εικόνα 39 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF8 στα 700m 55
Εικόνα 40 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF8 στα 1800m 55
Εικόνα 41 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF7 στα 250m 56
Εικόνα 42 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF7 στα 700m 57
Εικόνα 43 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF7 στα 1800m 57

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 - Ασύρματα πρωτοκολλά επικοινωνίας 14
Πίνακας 2 - Συγκεντρωτικός πίνακας LoRa Platforms 29
Πίνακας 3 - Αναλυτικά στοιχεία μετρήσεων 48
Πίνακας 4 - Διάρκεια εκπομπής ανά SF και απόσταση 58
Πίνακας 5 - Μέση τιμή του RSSI ανά SF και απόσταση 58
Πίνακας 6 - Μέση τιμή του SNR ανά SF και απόσταση 59
Πίνακας 7 - Δείκτης αποδοχής πακέτων PRR ανά SF και απόσταση 59
Πίνακας 8 - Ποσοστό απώλειας πακέτων ανά SF και απόσταση 59

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

Η τεχνολογία των επικοινωνιών εξελίσσεται και επηρεάζει πολλούς τομείς της καθημερινότητας μας. Το internet έχει μπει δυναμικά σε κάθε σπίτι αλλά και σε κάθε είδους επιχειρηματική δραστηριότητα.

Την προηγούμενη δεκαετία η εμφάνιση συσκευών πολύ μικρών διαστάσεων με ελάχιστη επεξεργαστική ισχύ και ταυτόχρονη σύνδεση στο διαδίκτυο έκαναν την εμφάνιση τους δημιουργώντας μία εντελώς νέα αγορά. Πολύ γρήγορα οι συσκευές αυτές ενσωμάτωσαν πληθώρα αισθητήρων και έγιναν γνωστές ως Internet of things (IoT).

Τα τελευταία χρόνια η εντατικοποίηση της αγροτικής παραγωγής για την κάλυψη των αυξημένων αναγκών υιοθέτησε την τεχνολογία του Internet of things δημιουργώντας μία νέα κατηγορία που ονομάστηκε έξυπνη γεωργία (intelligent agriculture) και είχε ως αντικείμενο την συλλογή, επεξεργασία, ανάλυση και έλεγχο πληροφοριών και παραμέτρων για την βελτιστοποίηση της παραγωγής μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα.

Οι τεράστιες απαιτήσεις για συλλογή πληροφοριών από απομακρυσμένα σημεία είχε ως αποτέλεσμα την δημιουργία ασύρματων πρωτοκόλλων επικοινωνίας.
Το πρωτόκολλο LoRaWAN μαζί με την τεχνολογία cloud κατάφερε να συγκεντρώσει όλα τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για τέτοιου είδους εφαρμογές.

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε συνδυασμό με το μειωμένο κόστος , τον μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας αλλά και την μεγάλη εμβέλεια (έως 10 χλμ) έκαναν το LoRaWAN™ την νούμερο 1 επιλογή σε έξυπνες γεωργικές εφαρμογές.

1.1 Σκοπός της εφαρμογής

Η τεχνολογία LoRa αναπτύχθηκε για την βελτίωση της επικοινωνίας με απομακρυσμένους σταθμούς μετρήσεων ή ακόμα και με μεμονωμένους αισθητήρες.
Οι αποστάσεις που μπορεί να καλύψει σε αγροτικές περιοχές είναι πολύ μεγάλες, ανάλογα με την μορφολογία του εδάφους αλλά και τον εξοπλισμό μπορεί να ξεπεράσει και τα 15 km.

Επίσης οι ανάγκες σε κατανάλωση ενέργειας των αισθητήρων είναι ελάχιστες, έχουμε την δυνατότητα να λειτουργούμε ένα αυτόνομο αισθητήρα για πάρα πολλές μέρες ή ακόμα και μήνες με την χρήση μίας απλής μπαταρίας. Αν τώρα συνδυάσουμε ένα μικρό

φωτοβολταϊκό στοιχείο με μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία η διάρκεια γίνετε πρακτικά απεριόριστη.

Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό την λειτουργία ενός συστήματος βασισμένο στο πρωτόκολλο LoRa - LoRaWAN για την μέτρηση των παραμέτρων του ίδιου του πρωτοκόλλου σε ότι αφορά την εμβέλεια , την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων αλλά και την αξιοπιστία του κάτω από διάφορες συνθήκες λειτουργίας.

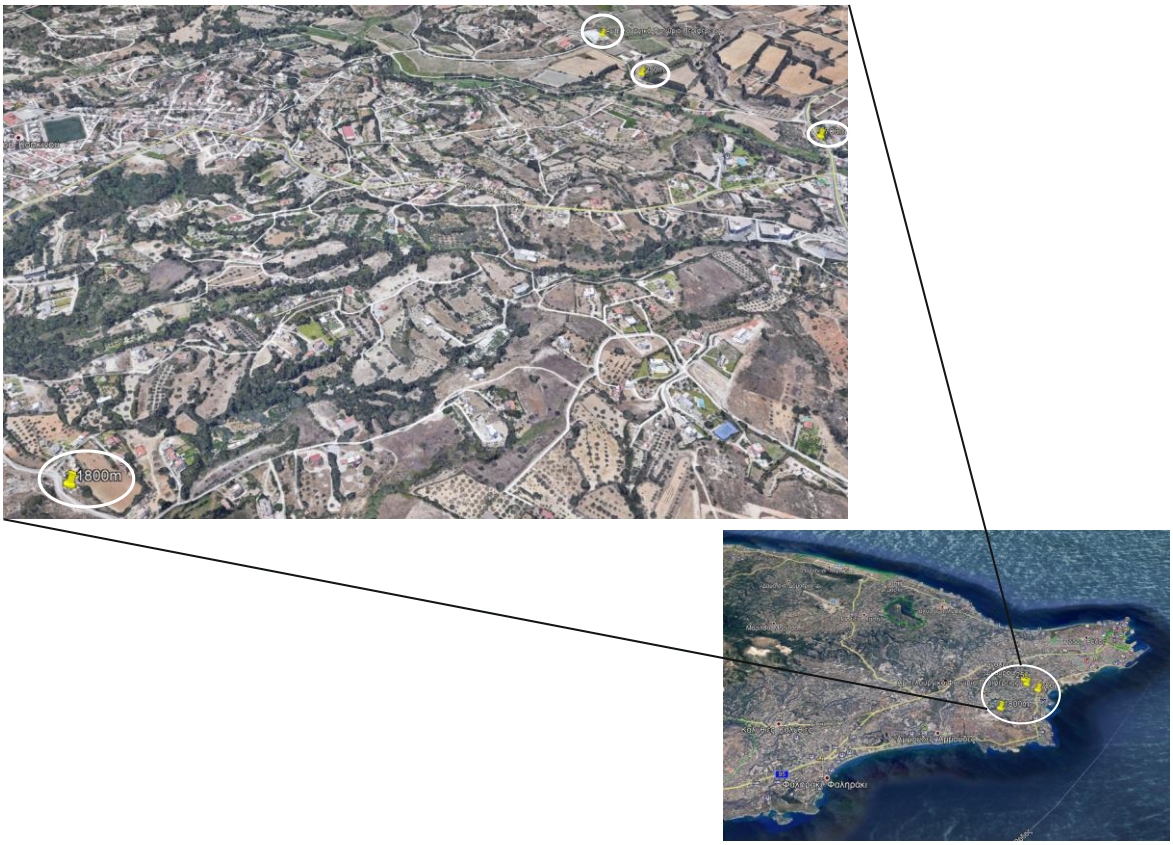
1.2 Μεθοδολογία

Το σύστημα θα εγκατασταθεί σε μία αγροτική περιοχή της Ρόδου και θα μας παρέχει δεδομένα με σκοπό την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου Lora σε πραγματικές συνθήκες. Βασική παράμετρος σε τέτοιου είδους συστήματα είναι η αξιοπιστία.

Θα γίνουν όλες οι απαραίτητες δοκιμές – μετρήσεις για να υπολογιστεί η αξιοπιστία του πρωτοκόλλου σε διαφορετικές αποστάσεις κάτω από πραγματικές συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό θα υπολογιστούν τα όρια της αξιόπιστης λειτουργίας του πρωτοκόλλου καθώς και του εξοπλισμού μας .

Η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων σε αυτή την αγροτική περιοχή θα προσομοιώσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας ενός συστήματος έξυπνης γεωργίας βασισμένο στο πρωτόκολλο LoRa . Οι σταθμός λήψης των μετρήσεων (Gateway) θα παραμείνει στο σημείο και μετά το πέρας της εργασίας για να χρησιμοποιηθεί και σε μελλοντικές επιστημονικές μελέτες.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας του πρωτοκόλλου LoRaWAN επιλέχθηκε μία περιοχή στο νησί της Ρόδου. Η περιοχή ονομάζεται Αμπελουργικό φυτώριο και βρίσκεται σε μία αγροτική περιοχή σχετικά κοντά στην πόλη της Ρόδου. Στο σημείο αυτό λειτουργεί το φυτώριο της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου. Εδώ θα γίνει η εγκατάσταση του LoraWan Gateway και θα συνδεθεί μόνιμα στο internet μέσο της adsl σύνδεσης των εγκαταστάσεων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία ασφαλή τοποθεσία για τον εξοπλισμό αλλά και μία αξιόπιστη σύνδεση στο Internet για την εκτέλεση των πειραμάτων.



Εικόνα 1 *- Τοποθεσία διεξαγωγής μετρήσεων*

Το σενάριο περιλαμβάνει την αποστολή πακέτων πληροφοριών ορισμένου μεγέθους από συγκεκριμένες αποστάσεις. Τα σημεία αυτά επιλέχθηκαν μετά από έλεγχο της διαθεσιμότητας τους, όσο αφορά δηλαδή την ασφάλεια κατά την διάρκεια της διεξαγωγής των μετρήσεων αλλά και την προσβασιμότητα τους .

1.3 Πρωτόκολλο Lora

Το LoRa (Long Range) είναι μία τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας δεδομένων που αρχικά καταχωρήθηκε ως ευρεσιτεχνία το 2008 από την εταιρία Cycleo στην Grenoble της Γαλλίας και αργότερα το 2012 αγοράστηκε από την Semtech. Οι ραδιοσυχνότητες που χρησιμοποιεί στην Ευρώπη είναι στα 169MHz , 433MHz και 868MHz ενώ στις ΗΠΑ χρησιμοποιεί τα 915MHz. Λειτουργεί αξιοποιώντας την διαμόρφωση φάσματος διασποράς εκμεταλλευόμενη την τεχνολογία CSS (Chirp Spread Spectrum) όπως ακριβώς λειτουργούν και τα Ραντάρ. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει την μετάδοση σημάτων σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Το LoRa σε σύγκριση με άλλα γνωστά πρωτόκολλα επικοινωνίας είναι ιδανικό για γεωργικές εφαρμογές.

Ακολουθούν συγκριτικά στοιχεία για τα υπόλοιπα ασύρματα πρωτοκολλά επικοινωνίας για να αποκτήσουμε μια πιο ολοκληρωμένη άποψη :

Πίνακας 1 *- Ασύρματα πρωτοκολλά επικοινωνίας*

Τεχνολογία	*LoRa*	*ZigBee*	*WiFi*	*Bluetooth*
Πρώτυπο	IEEE 802.15.4g	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11
Διαμόρφωση	Chirp Spread Spectrum(CSS)	Direct-sequence Spread Spectrum(DSSS)	Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)	Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
Συχνότητα	169/433/868/915 MHz	2.4 GHz, 868 MHz, 915 MHz	2.4 GHz	2.4 GHZ
Τοπολογία	Αστέρα	Πλέγμα (mesh)	Δεντροειδής	Δεντροειδής
Εμβέλεια	2-5km (αστικές) 15km (αγροτικές)	1-75 m	35-70 m(indoor) 100-250 m (outdoor)	1-10 m
Διάρκεια ζωής μπαταρίας	Μεγάλη	100-7000 μέρες	0.1-5 μέρες	1-7 μέρες
Κόστος	Χαμηλή	Χαμηλή	Μέση	Χαμηλή
Κατανάλωση ενέργειας	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή έως Υψηλή	Πολύ χαμηλή

Κεφάλαιο 2 - Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Υπάρχουν δημοσιευμένες διάφορες μελέτες σχετικά με την τεχνολογία LoRa και των δικτύων LoRaWAN. Πολλές από αυτές αναφέρονται σε διάφορους τομείς όπως την βιομηχανία , την αγροτική ανάπτυξη, τις μεταφορές, την υγεία αλλά και στην ίδια την τεχνολογία LoRaWAN αναλύοντας την λειτουργία της βάση του περιβάλλοντος εφαρμογής (αστικές ή αγροτικές περιοχές).

2.1 Κάλυψη LoRa

Αποτελέσματα αναφορικά με την κάλυψη του LoRa αναφέρονται στο [2] έχοντας πετύχει κάλυψη απόστασης 3 χλμ με συντελεστή εξάπλωσης SF 12 όπως και 2,3 χλμ με συντελεστή SF 7. Ο εξοπλισμός (gateway) τοποθετήθηκε στον δεύτερο όροφο ενός κτηρίου σε μία περιοχή που τα κτήρια ήταν πολυώροφα.

Σε μία αντίστοιχη μελέτη σχετικά με την κάλυψη του LoRa [3] έγιναν μετρήσεις τόσο σε περιβάλλον πόλης όσο σε ανοικτή θάλασσα. Διαπιστώθηκε ότι το ποσοστό επιτυχίας σε μετάδοση δεδομένων (πακέτου) έφτασε στο 80% σε αποστάσεις μικρότερες των 5 χλμ και σε μεγαλύτερες αποστάσεις που κυμάνθηκαν από 5 έως και 10 χλμ το ποσοστό επιτυχίας ήταν στο 60% πάντα σε περιβάλλον πόλης. Όσο αφορά την ανοικτή θάλασσα τα ποσοστά επιτυχίας σε αποστάσεις 15 χλμ ήταν 70%. Με αυτά τα πειραματικά δεδομένα μοντελοποιούν την εξασθένηση του καναλιού LoRa.

Στο [4] βλέπουμε μία μελέτη σχετικά με τις παρεμβολές που δημιουργούν τα ίδια τα συστήματα. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιήθηκαν πολυκατευθηντικές (Omni-Directional) κεραίες αλλά και κατευθυντικές (Directional) με την χρήση πολλαπλών σταθμών βάσης. Το σενάριο περιλάμβανε ένα σταθμό βάσης με 600 κόμβους. Το σύστημα αυτό λάμβανε παρεμβολές από 4 αντίστοιχα συστήματα που αποτελούντο δηλαδή από 4 σταθμούς βάσης με 600 κόμβους ο καθένας. Έγιναν πολλές προσομοιώσεις που έδειξαν ότι LoRaWANS πολλαπλών σταθμών βάσης με πολυκατευθυντηκές κεραίες είχαν αυξημένο ρυθμό εξαγωγής δεδομένων κατά 56% σε σχέση το 32% με χρήση κατευθυντηκών κεραιών.

2.2 Συστήματα Smart farming

Στο παρελθόν εφαρμογές έξυπνης γεωργίας για την αυτοματοποίηση διαφόρων συστημάτων βασίζονταν σε δεδομένα που συλλέγονταν από αισθητήρες. Με την πάροδο του χρόνου και την διείσδυση των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών τα διάφορα συστήματα αναπτύχθηκαν και βελτιώθηκαν [5].

Στο [6] ο συγγραφέας αναφέρεται σε ένα σύστημα βασισμένο στο LoRa (LoRa gateway) χωρίς την ανάγκη του cloud, αποθηκεύοντας όλα τα δεδομένα τοπικά λόγω του ότι στις αναπτυσσόμενες υποσαχάριες περιοχές της Αφρικής η συνδεσιμότητα και το κόστος είναι πολύ βασικοί περιοριστικοί παράγοντες. Η λύση αυτή προτάθηκε στα πλαίσια του έργου Ευρωπαϊκής Ένωσης – Αφρικής 8 το οποίο παρακολουθεί γεωργικές εγκαταστάσεις και εγκαταστάσεις αποθήκευσης.

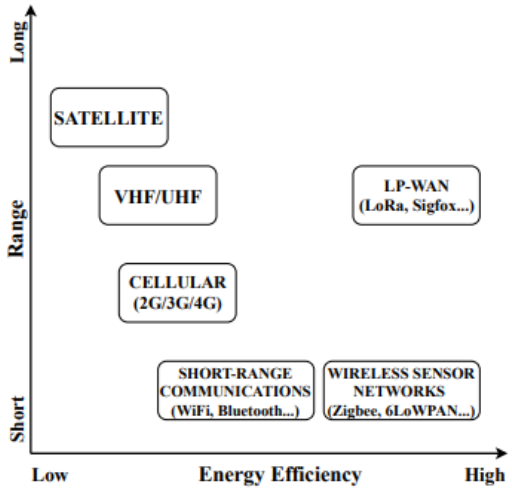
Πολλές λύσεις υπάρχουν σχετικά με το Smart farming. Οι περισσότερες πλατφόρμες μπορούν να διαχειριστούν απλά σενάρια. Όμως με την εξέλιξη της γεωργίας τα σενάρια που καλείται να διαχειριστεί η κάθε πλατφόρμα είναι αρκετά πολύπλοκα καθώς περιλαμβάνουν ετερογενή υλικά (hardware) και διαφορετικές τεχνολογίες δικτύωσης. Για να μπορούν να ενσωματωθούν όλα τα παραπάνω στα πλαίσια του IoT [7] αναπτύχθηκε η πλατφόρμα LoRaFarM. Η πλατφόρμα αυτή έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί για να μπορεί να διαχειριστεί πολλαπλά modules (λειτουργικές μονάδες) και σενάρια. Το συνολικό σύστημα βασίζεται στην τεχνολογία LoRaWAN λόγο της απλότητας του και εύκολης συνδεσιμότητας του.

Στο [8] προτείνεται μία έξυπνη πλατφόρμα υπηρεσιών βασισμένη στο πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRa και σε ένα δίκτυο ασύρματων αισθητήρων περιβαλλοντικής παρακολούθησης, με χαμηλή κατανάλωση και αξιόπιστη επικοινωνία. Πραγματοποιούνται πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό της ακρίβειας των αισθητήρων και επιλέγονται αισθητήρες κατάλληλοι για την συγκεκριμένη εφαρμογή με ταυτόχρονη πιστοποίηση του ίδιου του πρωτοκόλλου LoRa.

Στην εργασία [9] προτείνεται μία ευφυή πλατφόρμα υπηρεσιών γεωργίας με σκοπό την αποτελεσματικότερη διαχείριση της γεωργικής παραγωγής. Γίνεται χρήση της τεχνολογίας WSN (Wireless Sensor Network) και το πρωτόκολλο LoRa που χρησιμοποιείται ως το δίκτυο μεταφοράς. Η αξιοπιστία αλλά και η πολύ χαμηλή κατανάλωση είναι για μια ακόμα φορά ο λόγος που επιλέγεται το πρωτόκολλο LoRa καλύπτοντας επίσης κενά που αφήνουν άλλες τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα η κινητή τηλεφωνία. Εκτός από τη δυνατότητα μετρήσεων μέσο των έξυπνων αισθητήρων υπάρχει και η δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου εξοπλισμού.

2.3 Έξυπνα συστήματα μεταφορών – συγκοινωνιών – ενέργειας

Στις θαλάσσιες συγκοινωνίες έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς διάφορες εναλλακτικές μέθοδοι επικοινωνιών σε εφαρμογές IoT με τεχνολογίες τύπου WSN όπως κυψελοειδή συστήματα GSM, 3G,4G , λύσεις βασισμένες σε UHF ή VHF και IEEE 802.15.4 αρχιτεκτονικές.



Εικόνα 2- *Σύγκριση του εύρους μετάδοσης και της κατανάλωσης για κάθε διαφορετικό τύπο επικοινωνίας.*

Στο [10] το LoRa παρουσιάζεται ως ένα μέσο για ορισμένες θαλάσσιες δραστηριότητες που πραγματοποιούνται σε παράκτιες περιοχές, πιο συγκεκριμένα αξιοποιήθηκε για την παρακολούθηση ιστιοπλοϊκών αγώνων κλάσης Optimist. Με βάση αυτή τη μελέτη επιβεβαιώθηκε η καταλληλόλητα της χρήσης του LoRa σε μικρά ιστιοπλοϊκά σκάφη ή ακόμα και σε χαμηλού κόστους θαλάσσιες συσκευές όπως τα τηλεχειριζόμενα σκάφη.
Η κλιματική αλλαγή ήταν αποτέλεσμα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης κυρίως στις αστικές περιοχές που η κυκλοφορία των οχημάτων είναι πολύ μεγάλη. Οι περιβαλλοντικές παράμετροι αποτελούν τις ουσιώδεις πληροφορίες για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Στο [11] αναπτύχθηκε ένα σύστημα VMS (Vehicle Monitoring System) βασισμένο στο πρωτόκολλο LoRa το οποίο συλλέγει στοιχεία σχετικά με την ποιότητα του αέρα κατά την διάρκεια της κίνησης των οχημάτων αυτών μέσα σε αστικό ή άλλο περιβάλλον. Τα δεδομένα αυτά μαζί με την χρήση GPS και του πρωτοκόλλου LoRa έδωσαν την δυνατότητα παρακολούθησης της κατάστασης σε πραγματικό χρόνο μέσα από γραφικό περιβάλλον. Σε συνδυασμό με μία έξυπνη πόλη μπορούν να παρθούν αποφάσεις τόσο κρίσιμες όσο και αναγκαίες για την σωστή λειτουργία ενός αστικού περιβάλλοντος.

Σε συστήματα παρακολούθησης εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνολογίες απομακρυσμένων μετρήσεων και ελέγχου με IoT συσκευές όπως Arduino και Raspberry Pi αλλά και το δίκτυο LoRa. Στο [12] παρουσιάστηκε ένα τέτοιο σύστημα χαμηλού κόστους που χρησιμοποίησε όλες αυτές τις τεχνολογίες πολύ αποτελεσματικά. Ένα Raspberry Pi είχε αναλάβει το ρόλο της πύλης επικοινωνίας (gateway) δίνοντας πρόσβαση στα δεδομένα μέσο του ενός web interface. Οι αισθητήρες βασίζονταν σε ένα Arduino και έστελναν τα δεδομένα μέσο του LoRa πρωτοκόλλου. Τα δεδομένα που συλλέγονται, αναλύονται και παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τον βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης.

2.4 Έξυπνες πόλεις

Στην σύγχρονη κοινωνία ο όρος ΕΞΥΠΝΗ ΠΟΛΗ είναι κάπως αόριστος. Για να χαρακτηριστεί μία πόλη ως έξυπνη πρέπει μέσα από την αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών να βελτιώνονται οι υπηρεσίες προς τους πολίτες και να ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις προς το περιβάλλον.

Στο [13] σχεδιάζει ένα σύστημα διαχείρισης των ηλιακών φωτιστικών στην πόλη της Σενεγάλης , το οποίο θα ενεργοποιεί ή θα απενεργοποιεί αντίστοιχα τα φώτα σε μία περιοχή με ταυτόχρονη συλλογή δεδομένων σχετικά με τους λαμπτήρες – ηλιακά πάνελ για τον προγραμματισμό της συντήρησης τους. Η εφαρμογή παρέχει απομακρυσμένο έλεγχο του φωτισμού εξασφαλίζοντας την καλή ορατότητα ανάλογα με την ώρα, τις καιρικές συνθήκες και την κίνηση. Ταυτόχρονα παρακολουθεί το επίπεδο των μπαταριών αλλά και των φωτοβολταϊκών συλλεκτών. Όλες οι πληροφορίες μεταφέρονται μέσο του πρωτοκόλλου LoRa. Αναλύοντας τα δεδομένα σχετικά με την αξιοπιστία του πρωτοκόλλου οι ερευνητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η ύπαρξη πολλαπλών πυλών επικοινωνίας (gateways) βελτιώνουν την απόδοση του δικτύου με την μειώσει των απώλειών στα πακέτα δεδομένων κατά 20% και προτείνουν ότι το SF =10 αντί το 12 δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

Στις σύγχρονες πόλεις οι χώροι στάθμευσης είναι απαραίτητοι για την σωστή λειτουργίας της. Στο [14] βλέπουμε ένα σύστημα έξυπνης διαχείρισης χώρων στάθμευσης και πιο συγκεκριμένα μία υλοποίηση διασυνδεδεμένη με την «έξυπνη πόλη» στη οποία ο κάτοικος ή καλύτερα ο επισκέπτης που δεν γνωρίζει που ακριβώς βρίσκεται να μπορεί μέσα από ένα σύστημα να ενημερωθεί για το πλησιέστερο διαθέσιμο χώρο στάθμευσης. Ο χρήστης μέσα από την εφαρμογή θα είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο LoRa και μέσα από τις πύλες διασύνδεσης (gateways) θα αντλεί στοιχεία από τους

κόμβους LoRa. Οι κόμβοι αυτοί θα είναι τοποθετημένοι σε κάθε θέση στάθμευσης και αντιστρόφως θα ενημερώνουν μέσο των πυλών το δίκτυο LoRa και τελικά την εφαρμογή για την συγκεκριμένη διαθέσιμη θέση στάθμευσης. Ο ερευνητής καταλήγει στο ότι η μέγιστη εμβέλεια το δικτύου LoRa σε αστική περιοχή με βάση τον εξοπλισμό που έχει επιλέγει είναι τα 10 χλμ.

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω βλέπουμε ότι η χρήση της τεχνολογίας Lora – LoraWan μπορεί να έχει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της καθημερινότητας μας.

Το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας , η χαμηλή κατανάλωση με ταυτόχρονη αύξηση της διάρκειας λειτουργίας με την χρήση μπαταριών αλλά και η σχετικά μεγάλη αξιοπιστία της την καθιστούν νούμερο 1 επιλογή σε εφαρμογές έξυπνων πόλεων , smart farming κτλ.

Σε κάθε είδους εφαρμογή που περιλαμβάνει την χρήση του πρωτοκόλλου Lora καθοριστικό ρόλο για την επιλογή της τεχνολογίας αυτής παίζουν το περιβάλλον εγκατάστασης (αστικό, ημιαστικό, αγροτικό) αλλά και οι αποστάσεις που θα πρέπει να τοποθετηθούν οι σταθμοί μετρήσεων/ελέγχου σε σχέση με την πύλη επικοινωνίας (Gateway).

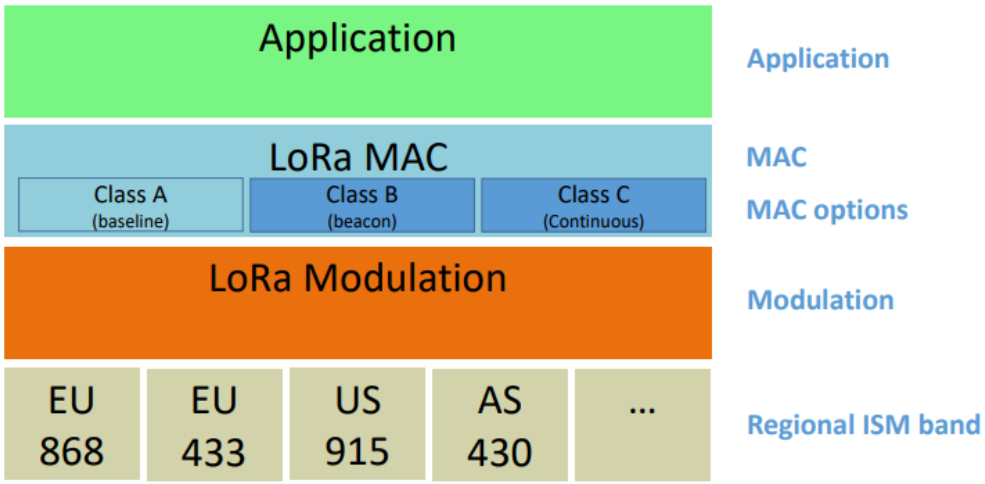
Κεφάλαιο 3 – Πρωτόκολλο LoRa

Με το όρο LoRa (Long Range) αναφερόμαστε στην τεχνική διαμόρφωσης σε συγκεκριμένο ασύρματο φάσμα το οποίο δεν χρειάζεται άδεια για την χρήση του. Η κατανάλωση είναι πολύ χαμηλή σε αντίθεση με την εμβέλεια που είναι μεγάλη. Λειτουργεί αξιοποιώντας την διαμόρφωση φάσματος διασποράς εκμεταλλευόμενη την τεχνολογία CSS (Chirp Spread Spectrum) όπως ακριβώς λειτουργούν και τα Ραντάρ.

Η τεχνολογία χρησιμοποιείτο για δεκαετίες σε στρατιωτικές εφαρμογές λόγο αυτών των χαρακτηριστικών της. Το LoRa είναι η πρώτη εμπορική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας. Αντίστοιχα το LoRaWAN είναι ένα δίκτυο βασισμένο στο LoRa που χρησιμοποιεί όμως το υπολογιστικό νέφος (Cloud) και δίνει την δυνατότητα σε συσκευές μικρού μεγέθους και κατανάλωσης (IoT) να επικοινωνούν μεταξύ τους. Στην ουσία ενσωματώνει στο LoRa δυνατότητα δικτύωσης συμπεριλαμβάνοντας κρυπτογράφηση δεδομένων αλλά και έλεγχο ταυτότητας κόμβου καθιστώντας το ασφαλές.

3.1 LoRaWAN

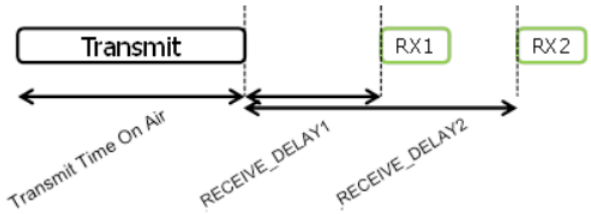
Το LoRaWAN διακρίνεται σε Class A και τις Class B & C που περιέχουν κάποιες επιπλέον δυνατότητες.



Εικόνα 3 *- LoRaWAN Class A, Class B & C*

Bi-directional end-devices (Class A): οι συσκευές κλάσης A λειτουργούν αμφίδρομα ακολουθώντας το μοτίβο μίας μετάδοσης (uplink) και δύο λήψεις μικρής διάρκειας. Τον τρόπο μετάδοσης τον καθορίζει η συσκευή λήψης των μετρήσεων (end-device). Η κλάση

A (Class A) έχει την χαμηλότερη κατανάλωση διότι η λήψη δεδομένων γίνεται μόνο μετά από την αποστολή δεδομένων προς την πύλη επικοινωνίας (gateway).



Εικόνα 4 *- Επικοινωνία Bi-directional end-devices (Class A)*

Σε αυτή την κλάση συναντάμε συνήθως συστήματα, όπως ανιχνευτές φωτιάς ή συστήματα έγκαιρης ειδοποίησης για σεισμούς

Bi-directional end-devices with scheduled receive slots (Class B): οι συσκευές της κλάσης Β επιτρέπουν περισσότερες λήψης δεδομένων, καθώς και μη προγραμματισμένες (τυχαίες) από την λύπη επικοινωνίας (gateway)

Σε αυτή την κλάση συναντάμε συνήθως έξυπνα συστήματα μετρήσεων (θερμοκρασίας , υγρασίας κτλ).

Bi-directional end-devices with maximal receive slots (Class C): οι συσκευές της κλάσης C έχουν συνεχώς ανοικτή την δυνατότητα λήψης δεδομένων εκτός από την στιγμή που εκπέμπουν (στέλνουν) δεδομένα προς την πύλη επικοινωνίας (gateway).

Σε αυτή την κλάση συναντάμε συνήθως έξυπνα συστήματα διαχείρισης στόλου ή ελέγχου της κυκλοφορίας.

Η μετάδοση των δεδομένων πραγματοποιείται προς τον κεντρικό εξυπηρετητή (network server) χρησιμοποιώντας μία οι περισσότερες πύλες επικοινωνίας (gateways) και έχει την μορφή πακέτων που το καθένα αποτελείται από :

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC

Τα δεδομένα αποστέλλονται από τον κεντρικό εξυπηρετητή (network server) προς μία συγκεκριμένη συσκευή μέσο συγκεκριμένης πύλης επικοινωνίας (gateway). Η λήψη των δεδομένων γίνεται με την μορφή πακέτων που το καθένα αποτελείται από :

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload

Και στις δύο περιπτώσεις αποστολής και λήψης το ασύρματο πακέτο LoRa συμπεριλαμβάνει εκτός από το ωφέλιμο φορτίο (δεδομένα αισθητήρων) πληροφορίες

όπως το PHDR (physical header) ακολουθούμενο από στοιχεία CRC (Cyclic Redundancy Check) για την διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων που διακινούνται.
Η τεχνολογία εξελίσσεται και κατά καιρούς βγαίνουν βελτιώσεις (versions) του πρωτοκόλλου LoRa και κατ' επέκταση του LoRaWAN. [1]

3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Ένα δίκτυο LoRaWAN για να λειτουργήσει είναι απαραίτητη η ύπαρξη των επιμέρους στοιχείων του, όπως οι κόμβοι , οι σταθμοί βάσης , ο εξυπηρετητής , η εφαρμογή.
Οι σταθμοί βάσεις περιλαμβάνουν τους αισθητήρες ή ελεγκτές και είναι οι συσκευές από τις οποίες ξεκινάει η πληροφορία όταν αναφερόμαστε σε αισθητήρες ή απλά καταλήγει μια πληροφορία (εντολή) όταν ο κόμβος παίζει τον ρόλο του ελεγκτή.
Οι σταθμοί βάσης (Gateways) αναλαμβάνουν την ασύρματη επικοινωνία ανάμεσα στους κόμβους ενός δικτύου LoRaWAN και τους εξυπηρετητές του συστήματος. Σε κάθε δίκτυο μπορεί να υπάρχουν πολλοί διαθέσιμοι σταθμοί βάσης κάτι που αυξάνει και την αξιοπιστία του καθώς η διαθεσιμότητα τους βοηθάει τους κόμβους να μπορούν να επικοινωνήσουν ανά πάσα στιγμή αδιάληπτα.
Ο εξυπηρετητής ή συστοιχίες αυτών (clusters) αναλαμβάνουν να μεταφέρουν την πληροφορία που συλλέγεται από τους κόμβους προς την εφαρμογή. Οι εξυπηρετητές αυτοί αναφέρονται συνήθως και ως cloud.
Και τελικά η εφαρμογή που έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί όλα τα διαθέσιμα στοιχεία και να παράξει ένα αποτέλεσμα μέσο της οπτικοποίησης των επεξεργασμένων δεδομένων αλλά και να δώσει τις απαραίτητες εντολές που θα μεταφερθούν στους κόμβου για την εκτέλεση μία εργασίας πχ (on/off) . [18]
Τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του ασύρματου πρωτοκόλλου LoRaWAN διακρίνονται στα παρακάτω:

A. Κατανάλωση ενέργειας

Το πρωτόκολλο χαρακτηρίζεται από την μικρή (ελάχιστη) κατανάλωση ενέργειας η οποία επιτυγχάνεται λόγω του ότι οι κόμβοι του δικτύου λειτουργούν ασύγχρονα. Επικοινωνούν μόνο όταν πρέπει να στείλουν δεδομένα που έχουν συλλέξει και το υπόλοιπο χρονικό διάστημα βρίσκονται σε κατάσταση deep sleep. Ανάλογα με τον κατασκευαστή οι καταναλώσεις κυμαίνονται από 20mA σε κατάσταση αναμονής έως 120mA κατά την διάρκεια αποστολής ή λήψης δεδομένων

Β. Εμβέλεια

Οι συχνότητες λειτουργίας του LoRa ανάλογα με την περιοχή στην οποία λειτουργούν είναι μεταξύ των 400 έως 900 MHz. Στην Ευρώπη συγκεκριμένα η συχνότητα που είναι διαθέσιμη για επικοινωνίες του LoRa είναι οι 868 MHz. Το φάσμα αυτό επιτρέπει την διάδοση των ραδιοκυμάτων σε θεωρητικές αποστάσεις έως και 45 - 50 Χλμ. Πρακτικά η εμβέλεια ενός τέτοιου συστήματος εξειδικεύεται σε αστικές περιοχές στα 2-5 Χλμ , στις ημιαστικές περιοχές έως τα 15 χλμ με δυνατότητα ανάλογα με την μορφολογία του εδάφους της περιοχής τα 30 χλμ. [17]

Γ. Τρόπο επικοινωνίας

Το πρωτόκολλο επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία δηλαδή την αποστολή και λήψη δεδομένων από τον ίδιο κόμβο.

Για να μπορέσει ένας κόμβος να συνδεθεί σε ένα δίκτυο LoRaWAN θα πρέπει να γίνουν εξατομικευμένες ρυθμίσεις και να ενεργοποιηθεί. Η ενεργοποίηση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

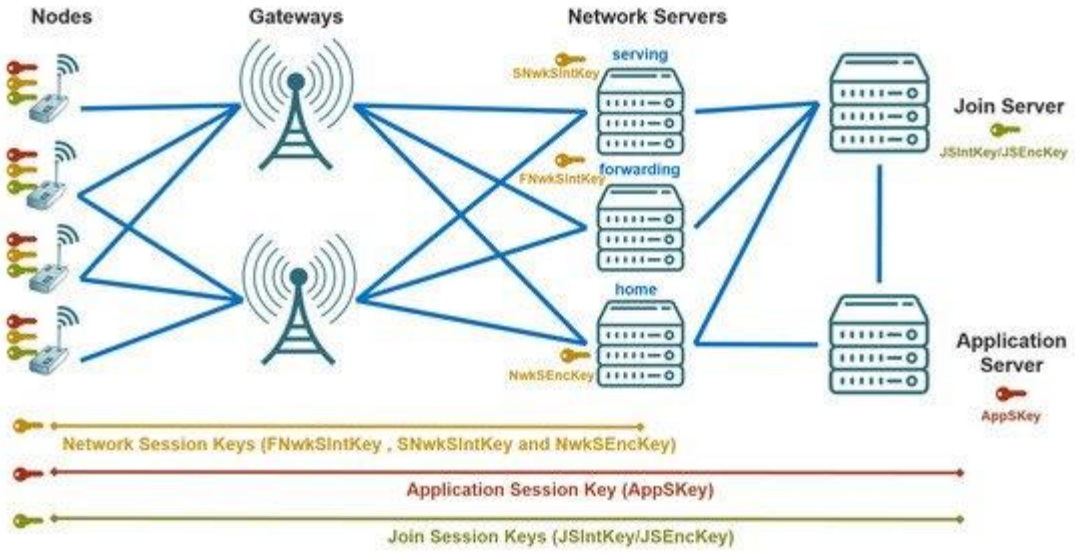
- Over the air Activation (OTAA)
- Activation By Personalization (ABP)

Η διαδικασία σύνδεσης JoinEUI απαιτείται για την επικοινωνία OTAA ενώ η DevEUI είναι απαραίτητη στο OTAA σε αντίθεση με το ABP που είναι προαιρετική.

Τα AppKey και NwkKey είναι τα κλειδιά (με κρυπτογράφηση επιπέδου AES-128) που έχουν παραχθεί από την εφαρμογή. Τα κλειδιά αυτά χρησιμοποιούνται από τους κόμβους για την κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση των στοιχείων του πακέτου πληροφοριών που διακινούν. Σε κάθε σύστημα που διαθέτει κρυπτογράφηση τα κλειδιά αυτά επιβάλλεται να παραμείνουν μυστικά για την διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων.

Το ABP μπορεί να αποτελεί έναν εύκολο τρόπο επικοινωνίας που όμως παρέχει μειωμένη ασφάλεια λόγω του ότι οι συσκευές χρησιμοποιούν τα ίδια κλειδιά κρυπτογράφησης για πάντα χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής αυτών.

Σε αντίθεση το OTAA δίνει την δυνατότητα δημιουργίας κλειδιών σε κάθε σύνδεση (session) με τους εξυπηρετητές (servers) και χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές που απαιτείται μεγαλύτερη ασφάλεια.



***Εικόνα** 5 - Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN*

Στο παραπάνω σχεδιάγραμμα βλέπουμε αριστερά του κόμβους (nodes) στους οποίου είναι συνδεδεμένοι οι αισθητήρες , ακριβώς δίπλα οι πύλες (gateways) αναλαμβάνουν την επικοινωνία των κόμβων με τους διακομιστές του δικτύου που με την σειρά τους αναλαμβάνουν να δρομολογήσουν τα δεδομένα στους εξυπηρετητές των εφαρμογών (application servers) [15]

Δ. Ασφάλεια

Η ασφάλεια είναι πραγματικά πολύ σημαντική στην χρήση του LoRa και γενικότερα στις εφαρμογές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία IoT. Η απώλεια δεδομένων αλλά και η καθυστέρηση σε υπηρεσίες υψηλών απαιτήσεων από κυβερνοεπιθέσεις όπως DoS , DDoS, Black hole attack , Wormhole attack κα πλήττουν την αξιοπιστία τέτοιων συστημάτων. Με βάση μελέτες που έχουν γίνει είναι κατανοητό ότι πρέπει να γίνουν ακόμα πολλές δοκιμές-έρευνες πάνω στην ασφάλεια του πρωτοκόλλου LoRa για να μπορέσουμε να έχουμε πετύχει τον μέγιστο βαθμό ασφάλειας. Όπως σε όλα τα πληροφοριακά συστήματα έτσι και στις εφαρμογές του LoRaWAN πρέπει να γίνονται εξειδικευμένες μελέτες και να καθορίζονται οι προδιαγραφές–απαιτήσεις ασφαλείας για την αξιόπιστη λειτουργία τους [16].

Ε. Δομή και χωρητικότητα δικτύου

Ένα δίκτυο LoRaWAN μπορεί να αποτελείται από πολλούς κόμβους και πύλες που να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους εξασφαλίζοντας αδιάληπτη λειτουργία και μεγάλη χωρητικότητα. Βασίζεται στην αρχιτεκτονική πλέγματος αστέρα που δίνει την

δυνατότητα σε έναν κόμβο να μπορεί να επικοινωνεί ταυτόχρονα με πολλές πύλες επικοινωνίας. Εδώ θα πρέπει να αναφέρουμε ότι σε πολλούς κόμβους υπάρχει ενσωματωμένος αισθητήρας γεωγραφικής θέσης (GPS) χωρίς ιδιαίτερο κόστος που επικουρικά βελτιώνει με τις πληροφορίες του την χρήση του συστήματος αν η εφαρμογή το απαιτεί.

Γενικότερα το LoRaWAN ως όρος συγχέεται πολλές φορές με το LoRa, που στην ουσία είναι δύο διαφορετικές έννοιες. Το LoRaWAN είναι του πρωτόκολλο επικοινωνίας βάση μίας αρχιτεκτονικής (δίκτυο) ενώ το LoRa χρησιμοποιεί μόνο το φυσικό επίπεδο (physical layer) στην επικοινωνία μέσο της ασύρματης διαμόρφωσης.

3.3 Συσκευές IoT με LoRa - LoRaWAN

Η τεράστια διάδοση της ασύρματης τεχνολογίας LoRa αύξησε το ενδιαφέρων πολλών κατασκευαστών και μία τεράστια γκάμα από συσκευές έχουν κατακλίσει την αγορά .

Παρακάτω θα δούμε αρκετές από αυτές και θα ενημερωθούμε σχετικά με τις δυνατότητες τους, όπως την εμβέλεια, την κατανάλωση και τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων αλλά και το επίπεδο ασφάλειας.

1. Sezo CL είναι μία συσκευή βασισμένη στο LoRaWAN για την μέτρηση θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτεινότητας και χρήση σε εσωτερικούς χώρους με διάρκεια ζωής της μπαταρίας μέχρι και 3 χρόνια. Η συσκευή λειτουργεί σε συχνότητες 863-870 MHz στα 14dBm για χρήση στην ευρωπαϊκή ένωση. Τεχνικά χαρακτηριστικά: Θερμοκρασία : -30 ÷ 60°C, ±0.3°C , Υγρασία : 0 ÷ 100%, ±2% , Φωτεινότητα : 0 ÷ 1000 lx με διαστάσεις 66 x 50 x 26 mm και βάρος 40 gr.

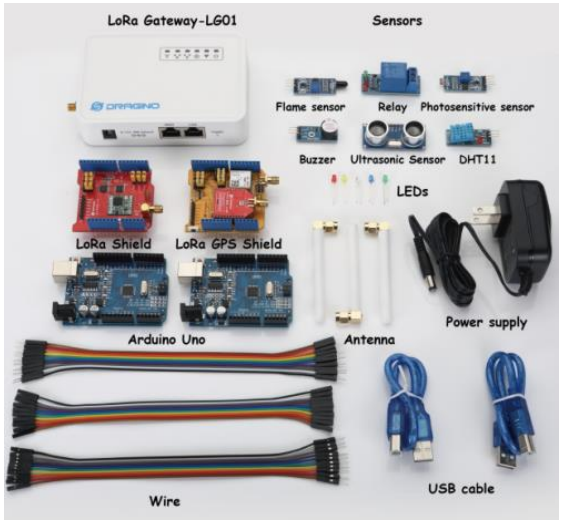
2. PrestoSense είναι συσκευή για τον ελέγχω χώρων στάθμευσης βασισμένη στο LoRaWAN. Έχει την δυνατότητα να εντοπίζει αν το κάποιο όχημα έχει παρκάρει στο σημείο και ταυτόχρονα καταγράφει και τον χρόνο που θα παραμείνει στην θέση αυτή. Τα δεδομένα μεταφέρονται σε κεντρικό εξυπηρετητή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια έξυπνη πόλη για ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τις διαθέσιμες θέσεις στάθμευσης στην πόλη. Η αξιοπιστία και η ακρίβεια της συσκευής είναι στο 99%, ανιχνεύει κάθε 2 δευτερόλεπτα , έχει πολύ εύκολη εγκατάσταση και είναι πολύ διακριτικό χωρίς να ενοχλεί. Εντοπίζει οχήματα με μαγνητικούς αισθητήρες και αισθητήρες υπερήχων. Επίσης μπορεί να συνδέεται σε δίκτυα LoRaWAN class A και λειτουργεί σε συχνότητες 863-870 MHz για

χρήση στην ευρωπαϊκή ένωση. Τεχνικά χαρακτηριστικά: διαστάσεις 210 x 25 mm βάρος 560gr, διάρκεια ζωής 8 χρόνια, απόσταση εντοπισμού 0-90cm, ανθεκτικότητα IP67.

3. OY1310 είναι μία συσκευή μέτρησης της κατανάλωσης νερού (υγρόμετρο), Είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί σε συνδυασμό με μηχανικούς μετρητές τύπου GSD80RFM μετατρέποντας τους σε ένα σύστημα IoT. Διαθέτει σύστημα ελέγχου-ειδοποίησης σε περίπτωση αφαίρεσης , υπερβολικής κατανάλωσης και διαρροής. Τεχνικά χαρακτηριστικά: διάρκεια ζωής μπαταρίας 8 χρόνια με ρυθμό μετάδοσης ανά 3 ώρες και SF12, διαθέτει κρυπτογράφηση AES-128 και λειτουργεί σε συχνότητες 868 MHz για χρήση στην ευρωπαϊκή ένωση.

4. SODAQ Cow Tracker είναι μία συσκευή για τον γεωεντοπισμό ζώων εκτροφής (αγελάδες, πρόβατα κτλ) βασισμένη στο LoRaWAN. Λειτουργεί μόνο όταν το ζώο είναι σε κίνηση διαφορετικά παραμένει ανενεργή (deep sleep mode). Ενσωματώνει ένα μικρό φωτοβολταϊκό συλλέκτη που φορτίζει την μπαταρία του. Τεχνικά χαρακτηριστικά : πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, δυνατότητα τοποθέτησης κάρτας μνήμης, καθώς και χρήση τεχνολογία Bluetooth.

5. Το Dragino IoT development kit περιέχει τον απαραίτητο εξοπλισμό για μπορέσει ο καθένας να δημιουργήσει συσκευές μετρήσεων – ελέγχου με δυνατότητα ασύρματης επικοινωνίας μέσο LoRaWAN. Το πακέτο περιέχει μία πύλη επικοινωνίας (gateway) με ενσωματωμένο εξυπηρετητής Linux και εμβέλεια LoRa έως και τα 10 χλμ σε οπτική επαφή. Επίσης υπάρχουν 2 συσκευές Arduino Uno με επιπλέον εξοπλισμό επικοινωνίας LoRa (LoRa Shield) και gps καθώς και πληθώρα αισθητήρων κα.



***Εικόνα** 6* - Dragino IoT development kit

Τεχνικά χαρακτηριστικά :

Linux server 400Mhz ar9331 processor, 64MB RAM, 16MB Flash

MCU ATMega328P, Flash: 32KB, SRAM: 2KB, EEPROM: 1KB

Interface: Power Input: 9 ~ 24v DC , 2 x RJ45 ports , USB 2.0 Host port x 1 , Internal USB 2.0 Host Interface x 1

Wifi : IEEE 802.11 b/g/n , Frenquency Band: 2.4 ~ 2.462GHz , Tx power: 11n tx power : mcs7/15: 11db mcs0 : 17db , 11b tx power: 18db , 11g 54M tx power: 12db , 11g 6M tx power: 18db , Wifi Sensitivity , 11g 54M : -71dbm , 11n 20M : -67dbm

LoRa : Frequency Range Band 1 (HF): 862 ~ 1020 Mhz, 168 dB maximum link budget , +20 dBm - 100 mW constant RF output vs , +14 dBm high efficiency PA , Programmable bit rate up to 300 kbps , High sensitivity down to -148 dBm , Excellent blocking immunity , Low RX current of 10.3 mA, 200 nA register retention , FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRaTM and OOK modulation , 127 dB Dynamic Range RSSI.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα σύνδεσης 3G ή 4G συσκευής για επικοινωνία μέσο του δικτύου κινητής τηλεφωνίας σε απομακρυσμένες περιοχές που δεν υπάρχει η δυνατότητα ενσύρματης σύνδεσης στο διαδίκτυο.

3.4 Διαθέσιμες πλατφόρμες IoT για συστήματα LoRa

Παρακάτω θα δούμε τις διαθέσιμες πλατφόρμες διαχείρισης IoT συσκευών μέσο LoRa.

Το "*The Things Network*" είναι ένας ελεύθερος διαδικτυακός εξυπηρετητής ανοικτός σε όλους που βοήθησε το LORAWAN ναι γίνει ευρέως γνωστό. Η φιλοσοφία πίσω από την λειτουργία του δικτύου είναι ότι όλοι όσοι συμμετέχουν επιτρέπουν την ελεύθερη χρήση των πυλών επικοινωνίας του (gateways) από τα υπόλοιπα μέλη του δικτύου. Δίνει την δυνατότητα να δοκιμαστούν νέες ιδέες καθώς και υλικά πριν αυτά βγουν στην αγορά. Δεν ενδείκνυται για εμπορική χρήση λόγο των περιορισμών στην διακίνηση δεδομένων αλλά και στην αξιοπιστία και διαθεσιμότητα των κόμβων του. Οι περισσότεροι κατασκευαστές IoT συσκευών προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το "The Things Network".

Το "*The Things Industries*" είναι η εμπορική πλευρά του "The Things Network" δίνοντας την δυνατότητα σε κάποιον να το δοκιμάσει και αν διαπιστώσει ότι μπορεί να το χρησιμοποιήσει , να πληρώσει συνδρομή . Η βασική διαφορά είναι ότι δεν μπορούν οι υπόλοιποι που συμμετέχουν να χρησιμοποιήσουν τον εξοπλισμό σου (gateway). Οι περισσότεροι κατασκευαστές IoT συσκευών προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το "The Things Industries".

Το "*Everynet*" είναι ένα δίκτυο από εξυπηρετητές που υποστηρίζεται από δική του ομάδα σε κάθε χώρα του κόσμου. Απευθύνεται κυρίως σε τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και προσφέρει με ελάχιστο κόστος την δημιουργία δημόσιου δικτύου LoRaWAN επαγγελματικού επιπέδου, με μόνη απαίτηση την είσπραξη εσόδων από την χρήση του. Οι περισσότεροι κατασκευαστές IoT συσκευών προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το "Everynet".

Το "*ThingPark*" είναι μια υποδομή που χρησιμοποιείτε από πάρα πολλούς τηλεπικοινωνιακούς παρόχους και προσφέρει την δυνατότητα σύνδεσης πυλών επικοινωνίας (gateways) των εταιριών Kerlink, Cisco και Multitech, Δεν πρέπει να ξεχάσουμε να αναφέρουμε ότι η Actility είναι ένας από του ιδρυτές της LORAWAN Alliance. Οι περισσότεροι κατασκευαστές IoT συσκευών προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το "ThingPark" της Actility.

Το "*LORASERVER*" είναι ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα από την εταιρία Broccar, αποτελεί μία οικονομική λύση για χρήστες που έχουν κάποιο επίπεδο εξειδίκευσης και έχεις την ευθύνη της διαχείρισης του δικτύου σου. Αποτελεί λύση για πολλές εταιρίες τεχνολογίας που διαθέτουν εξειδικευμένο προσωπικό στο LoRaWAN. Οι περισσότεροι

κατασκευαστές IoT συσκευών προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το " LORASERVER".

Το "*Orange LiveObject*" χρησιμοποιείται για την διαχείριση συσκευών και την διακίνηση δεδομένων και έχει την δυνατότητα επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών ανάλογα με την χώρα που λειτουργεί. Ανήκει στην French Telecom group Orange όπου και παρέχει υπηρεσίες LoRaWAN. Οι περισσότεροι κατασκευαστές IoT συσκευών προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το "Orange LiveObjects" .

Το "*ER Telecom*" δραστηριοποιείτε στη Ρωσία ως βασικός τηλεπικοινωνιακός πάροχος τόσο στο internet την ψηφιακή τηλεόραση αλλά και το δίκτυο LoRaWAN. Οι περισσότεροι κατασκευαστές IoT συσκευών προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το "ER Telecom"

Το "*Proximus*" ο βασικός τηλεπικοινωνιακός πάροχος του Βελγίου όπου και έχει αναπτύξει ένα εθνικό δίκτυο LoRaWAN παρέχοντας 2 υπηρεσίες λήψης δεδομένων αισθητήρων, ονομάζονται MyThings και Proximus Enco. Οι περισσότεροι κατασκευαστές IoT συσκευών προσφέρουν την δυνατότητα σύνδεσης με το " Proximus MyThings" και "Proximus Enco "

Πίνακας 2 - Συγκεντρωτικός πίνακας LoRa Platforms

Πλατφόρμες	*Χρήση*	*Κόστος*	*Όγκος δεδομένων*	*Συμβα-τότητα*	*Κοινή χρήση εξοπλισμού*	*Ειδικές γνώσεις*
The Things Network	ΕΛΕΥΘΕΡΗ	ΔΩΡΕΑΝ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟΣ	ΝΑΙ	ΝΑΙ	ΟΧΙ
The Things Industries	ΕΜΠΟΡΙΚΗ	ΝΑΙ	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟΣ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ
Everynet	ΠΑΡΟΧΟΥΣ	ΝΑΙ	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟΣ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ
ThingPark	ΠΑΡΟΧΟΥΣ	ΝΑΙ	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟΣ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ
LORASERVER	ΠΑΡΟΧΟΥΣ	ΝΑΙ	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟΣ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ
Orange LiveObject	ΕΜΠΟΡΙΚΗ	ΝΑΙ	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟΣ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΝΑΙ
ER Telecom	ΕΜΠΟΡΙΚΗ	ΝΑΙ	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟΣ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ
Proximus	ΕΜΠΟΡΙΚΗ	ΝΑΙ	ΑΠΕΡΙΟΡΙΣΤΟΣ	ΝΑΙ	ΟΧΙ	ΟΧΙ

Κεφάλαιο 4 - Πιλοτική Εφαρμογή

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία έγινε αξιολόγηση του πρωτοκόλλου LoRa . Η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε υπό πραγματικές συνθήκες. Το πεδίο που έγιναν οι μετρήσεις βρίσκεται σε μία τυπική αγροτική περιοχή στην οποία όμως θα υπάρχει διασύνδεση με το διαδίκτυο. Επίσης η περιοχή αυτή είναι αρκετά κοντά στην πόλη της Ρόδου με αποτέλεσμα να διευκολύνει την πρόσβαση στο σημείο και ταυτόχρονα να επηρεάζει δυσμενώς τις μετρήσεις λόγο του ηλεκτρονικού θορύβου της πόλης.

Συνδυάστηκε λοιπόν το αγροτικό περιβάλλον με τον αυξημένο βαθμό δυσκολίας στις επικοινωνίες για πιο ουσιαστικά αποτελέσματα.

Το σύστημα θα λειτουργεί με βάση το Dragino IoT development kit το οποίο αποτελείται από μία πύλη επικοινωνίας (gateway) η οποία θα είναι εγκατεστημένη στον σταθμό βάσης και θα έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσο adsl σύνδεσης.

Το δεύτερο σημείο θα είναι κινητό και θα περιλαμβάνει ένα Arduino uno με επιπλέον ένα LoRa Shield για την επίτευξη των ασύρματων επικοινωνιών μέσο του LoRa. Θα περιλαμβάνει επίσης μπαταρία και ένα μικρό φωτοβολταϊκό συλλέκτη μαζί με ελεγκτή φόρτισης για την παροχή επιπλέον ενέργειας σε περίπτωση που το πειραματικό κομμάτι απαιτήσει πρόσθετο εξοπλισμό.

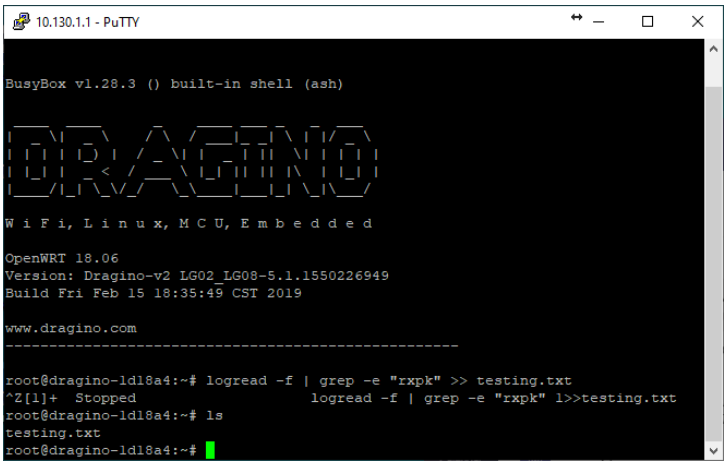
Η βασική ιδέα είναι να μεταδίδονται πακέτα πληροφοριών σε ελεγχόμενα χρονικά διαστήματα. Κατά την λήψη των δεδομένων θα γίνεται η αξιολόγησή του πρωτόκολλο βάση του ρυθμού σφάλματος RSSI.

Όλες οι μετρήσεις θα καταγράφονται στην πύλη επικοινωνίας Dragino LG01-N στην οποία εκτός του απαραίτητου υλικού για την επικοινωνία με LoRa συσκευές εμπεριέχεται και ένας Linux server.

Με την εντολή logread -f | grep -e "rxpk" >> testing.txt & μέσα από περιβάλλον SSH γίνεται καταγραφή όλων των συμβάντων που περιέχουν την λέξη "rxpk".

Η λέξη "rxpk" περιέχεται στα συμβάντα που περιέχουν εισερχόμενο πακέτο δεδομένων.

Η γραμμή εντολής ολοκληρώνεται με το σύμβολο & το οποίο δίνει την δυνατότητα στον ενσωματωμένο linux server να εκτελεί το logread διαρκώς ανεξάρτητα από άλλες διαδικασίες.



Εικόνα 7- Εφαρμογή Putty SSH client

Με τις δυνατότητες που μας προσφέρει ο συγκεκριμένος server θα πραγματοποιηθεί λεπτομερή καταγραφή των πακέτων που θα διακινηθούν κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Κατά συνέπεια θα συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για να γίνει η ανάλυση των δεδομένων που θα οδηγήσουν στην αξιολόγηση του πρωτοκόλλου.

Η πύλη περιλαμβάνεις επίσης δυνατότητες ενσύρματης και ασύρματης σύνδεσης στο διαδίκτυο.

Για μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα, το σύστημα θα συνδεθεί σε μία διαδικτυακή πλατφόρμα λήψης δεδομένων την TheThingsNetwork.

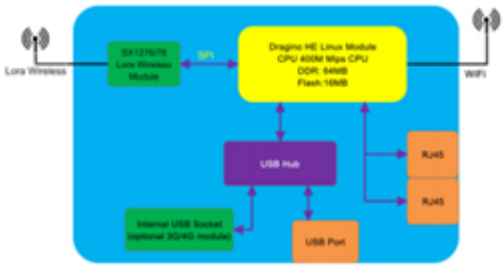
4.1 Κατασκευή εξοπλισμού

Ο εξοπλισμός χωρίζεται σε 2 μέρη.

α. Πύλη επικοινωνίας (GateWay)

Η πύλη επικοινωνίας περιλαμβάνει όπως αναφέραμε και πιο πάνω το Dragino LG01-N.

Εικόνα 8 - Dragino LG01-N (LoRa GATEWAY)



***Εικόνα** 9 - Επισκόπηση συστήματος LG01-N*

Η συγκεκριμένη πύλη θα εγκατασταθεί σε αγροτική περιοχή σε εξωτερικό χώρο εκτεθειμένη σε υγρασία, βροχή κτλ

Όμως η χρήση της με βάση τον κατασκευαστή προορίζεται μόνο για εσωτερικούς χώρους.

Για την αδιάλειπτη λειτουργία της πρέπει ο εξοπλισμός να προστατευθεί από τις καιρικές συνθήκες με την χρήση ενός στεγανού κιτίου ανάλογου μεγέθους που να επιτρέπει την πραγματοποίηση των επικοινωνιών wifi, lan και Lora.

Εικόνα 10 - LoRa Gateway σε στεγανό κουτί.

Η κατασκευή τοποθετήθηκε σε πλαστικό σωλήνα ύψους 3 μέτρων PVC εξωτερικά του κτιρίου των γραφείων του Περιφερειακού φυτωρίου.

Συνδέθηκε παροχή ρεύματος 220V καθώς και (UPS) Uninterruptable Power Supply 600VA.

Η σύνδεση με το internet έγινε με την χρήση του ασύρματου (wifi) προσαρμογέα που περιλαμβάνεται στο Dragino LG01-N μέσο ενός adsl router .

β. Κόμβος (node)

Ο κόμβος περιλαμβάνει όλο τον απαιτούμενο εξοπλισμό για την διεξαγωγή των μετρήσεων (πειραμάτων).
Ο κόμβος κατασκευάστηκε ώστε να έχει μικρό βάρος και με σχετικά μικρό όγκο για την ευκολότερη μεταφορά του. Η όλη κατασκευή έγινε με πλαστικούς σωλήνες PVC.

Εικόνα 11 - Κατασκευή και δοκιμή σταθμού μετρήσεων (LoRa Node)

Η ιδέα ήταν να μπορεί ο σταθμός μετρήσεων να είναι σταθερός αλλά και φορητός.
Αυτόνομος για το πρώτο κομμάτι του pilot που περιλάμβανε δοκιμές σε προστατευμένο χώρο του φυτωρίου με την χρήση ενός φορητού υπολογιστή laptop για να είναι δυνατή η παραμετροποίηση του κώδικα καθώς και λειτουργεί χωρίς απαραίτητα την δική μου παρουσία.
Ο σταθμός μετρήσεων απαρτίζεται από την βάση η οποία είναι πτυσσόμενη και αποσπώμενη από τον υπόλοιπο εξοπλισμό στην οποία στηρίζεται το κουτί με την επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Pb 12V 9Ah) και την βάση για το laptop.

Εικόνα 12 - Σχεδίαση και υλοποίηση LoRa Node.

Το τμήμα που φιλοξενεί τον κόμβο (Arduino + lora etc) είναι και αυτό ανεξάρτητο αλλά μπορεί να συνδεθεί με τα υπόλοιπα κομμάτια απλά τοποθετώντας το σε αυτά.

Εικόνα 13 - Σταθερός σταθμός μετρήσεων (LoRa Node).

Ο φορητότητα του σταθμού (node) ήταν κρίσιμη για την ολοκλήρωση του πειραματικού μέρους της εργασίας (pilot).

Το node έπρεπε να μπορεί να εγκατασταθεί και να λειτουργεί σε αυτοκίνητο διότι στα σημεία που επιλέχθηκαν ανάλογα με την απόσταση, για την αποστολή των πακέτων μέσο του LoraWan δεν μπορούσε να παραμείνει ο εξοπλισμός ανεπιτήρητος.

Η λύση δόθηκε με την εγκατάσταση του node στο αυτοκίνητό μου χωρίς να χρειαστούν μετατροπές.

Εικόνα 14 - Φορητός σταθμός μετρήσεων (LoRa Node).

Κατά την διάρκεια των πειραμάτων ο κόμβος (node) μπορούσε να μετακινηθεί με ασφάλεια στα διάφορα σημεία που είχαν επιλεγεί για να γίνουν οι μετρήσεις. Η τροφοδοσία του εξοπλισμού μπορούσε να γίνει με την χρήση της μπαταρίας του αυτοκινήτου ή ακόμα και με την χρησιμοποίηση της μπαταρίας του σταθερού τμήματος της βάσης.

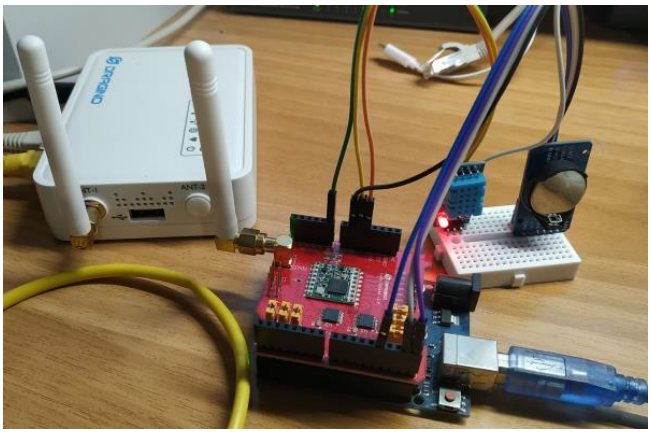
Επίσης υπήρχε η δυνατότητα σύνδεσης φωτοβολταϊκού συλλέκτη για την φόρτιση των μπαταριών μέσο του αυτόματου εκλεκτή φόρτισης κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Εικόνα 15 - Ελεγκτής φόρτισης μπαταρίας LoRa Node από φωτοβολταϊκό πάνελ.

Λόγο της χρήσης του φορητού υπολογιστή (laptop) για μεγάλα χρονικά διαστήματα προέκυψε η ανάγκη φόρτισης του. Αυτό έγινε με την χρήση ενός inverter 300W που είχε την δυνατότητα μετατροπής των 12V DC σε 220V AC για την απευθείας σύνδεση του.
Η διαδικασία της κατασκευής του σταθμού εργασίας διήρκησε αρκετές ημέρες μέχρις ότου να πάρει την τελική του μορφή ανάλογα με τις ανάγκες των πειραμάτων.
Το κόστος της κατασκευής ήταν σχετικά μικρό λόγο της προσωπική εργασίας και των φθηνών υλικών.

4.2 Προγραμματισμός εξοπλισμού

Η κατασκευή του εξοπλισμού συνοδευόταν και από την δημιουργία του απαραίτητου κώδικα για τον προγραμματισμό των Arduino και των Lora shields.
Η ρύθμιση του gateway απαιτούσε γνώσεις δικτύων αλλά και κάποιων ελάχιστων γνώσεων σε περιβάλλον Linux.
Αρχικά η παραμετροποίηση του gateway έγινε στο εργαστήριο με τον υπόλοιπο εξοπλισμό (Arduinos) δίπλα για συνεχή έλεγχο την συνδεσιμότητας αλλά και την αλλαγή διαφόρων παραμέτρων.



Εικόνα 16 - Δοκιμές Arduino uno με LoRa shield

Η υλοποίηση της εφαρμογής για την διενέργεια των μετρήσεων έγινε σταδιακά μέσα από μελέτη τόσο του πρωτοκόλλου Lora αλλά και του εξοπλισμού Arduino με τα Lora shields.

Κατά την διάρκεια των πρώτων δοκιμών προέκυψε η ανάγκη για τον έλεγχο του χρόνου μέσα στον οποίο θα έπρεπε να στείλω τα πακέτα των πληροφοριών (data packets).

Η χρήση του ενσωματωμένου timer στα Arduino δεν ήταν αρκετή. Η χρήση ενός real time clock ήταν απαραίτητη.

Επιλέχθηκε ένα real time clock DS3231 με δυνατότητα προσθήκης μπαταρίας για την διατήρηση του χρόνου (ώρα) και κατά την απενεργοποίηση του εξοπλισμού.

Το RTC παρείχε την δυνατότητα χρονοπρογραμματισμού των πειραμάτων δηλαδή σε ποια χρονικά διαστήματα θα γινόταν η αποστολή των απαραίτητα data packets. Αυτό ήταν πολύ σημαντικό για τον σωστό υπολογισμό του χρόνου αποστολείς των δεδομένων αλλά και τον έλεγχο για τυχόν χαμένων πακέτων.

Στην συνέχεια διαπιστώθηκε η ανάγκη για συγχρονισμό του RTC με την πραγματική ώρα πράγμα αδύνατο χωρίς την χρήση ενός NTP server.

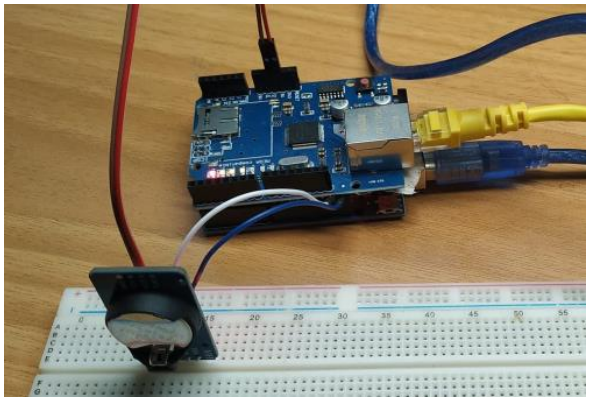
Για την επικοινωνία με έναν NTP server ήταν απαραίτητη η σύνδεση του node με το δίκτυο.

Το Arduino που συμπεριλαμβανόταν στο πακέτο της Dragino (Arduino uno) δεν διέθετε την απαραίτητο προσαρμογέα δικτύου για την υλοποίηση της σύνδεσης.

Έγινε προμήθεια ενός network shield W5100 που διέθετε μία θύρα lan για την διασύνδεση με το δίκτυο.

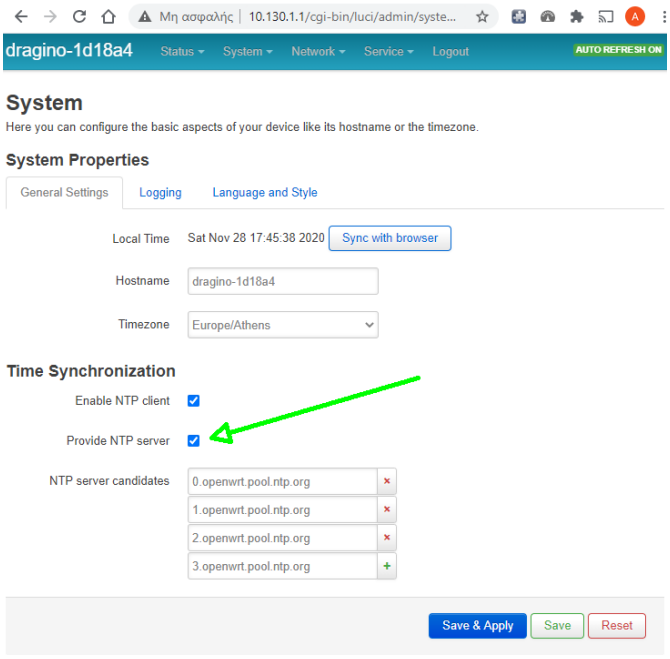
Κατά την προσπάθεια διασύνδεσης του W5100 σε συνδυάσω με το LoRa shield στο ίδιο Arduino Uno διαπιστώθηκε αδυναμία λόγο conflict στο τρόπο επικοινωνίας των 2 shield. Ως λύση επιλέχθηκε η χρήση του δεύτερου Arduino uno που υπήρχε στην συσκευασία.

Συνδέθηκε το Lan shield W5100 στο δεύτερο Arduino uno και σχεδιάστηκε κώδικας με την χρήση των απαραίτητων βιβλιοθηκών για τον συγχρονισμό του RTC με NTP server.



Εικόνα 17 - Arduino Uno με W5100 shield συνδεδεμένα με RTC.

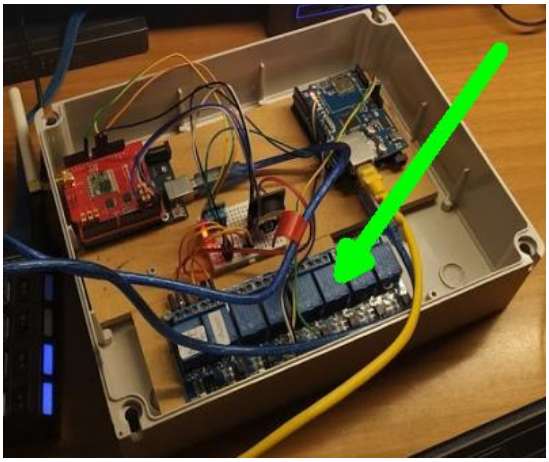
Ως time server επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο ενσωματωμένος NTP του gateway Dragino.



Εικόνα 18 - Ενεργοποίηση NTP Server στο LoRa Gateway.

Στην συνέχεια το ήδη συγχρονισμένο RTC μπορούσε να μεταφερθεί στο Arduino με το Lora shield για να γίνεται ο συγχρονισμός της αποστολής των πακέτο δεδομένων στην επιθυμητή χρονική στιγμή. Όμως η διαρκεί μεταφορά του RTC από το ένα Arduino στο άλλο δημιουργούσε προβλήματα αξιοπιστίας του εξοπλισμού.

Για την αποφυγή άσκοπων αλλαγών στο hardware και στις συνδέσεις των πλακετών έγινε χρήση μιας ολοκληρωμένης πλακέτας που περιλάμβανε solid state ρελέ. Με τον τρόπο αυτό γινόταν αυτόματη μεταβίβαση του RTC από το ένα Arduino στο άλλο χωρίς την χρήση εργαλείων.



Εικόνα 19 - Ρελέ για την μεταγωγή του RTC κατά την διάρκεια του συγχρονισμού

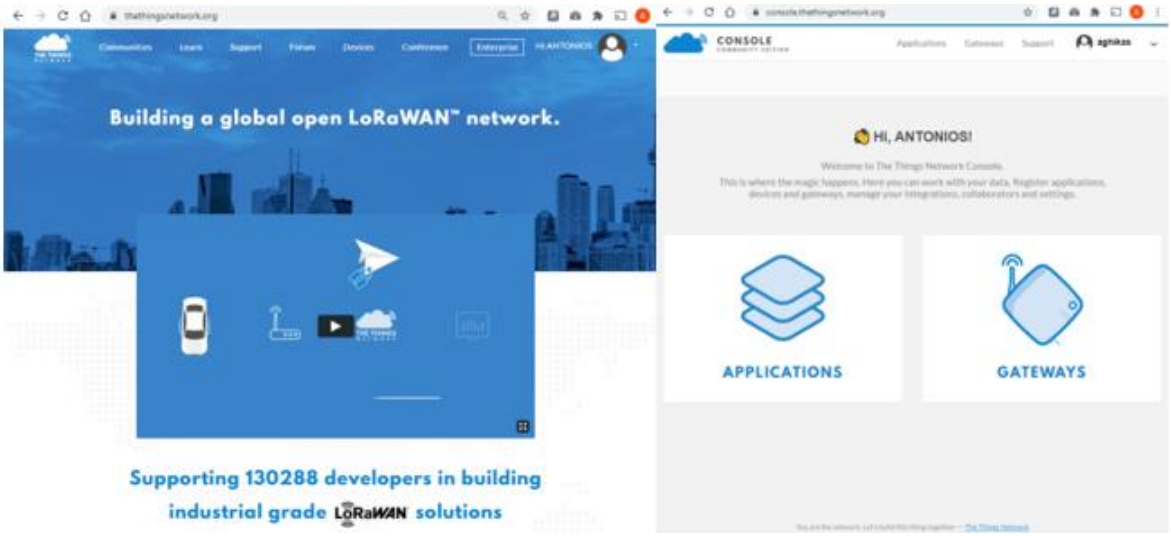
Καθημερινά πριν την έναρξη των μετρήσεων γινόταν συγχρονισμός του RTC μέσα από αυτόματη διαδικασία, απλά με την σύνδεση της θύρα LAN του gateway, με την θύρα LAN του W5100 shield και την μεταφορά του χρονισμού από τον NTP server της πύλης στο RTC. Στην συνέχεια το δεύτερο Arduino με το LoRa shield έδινε εντολή για την μεταγωγή και αναλάμβανε την χρήση του RTC για την διεξαγωγή των πειραμάτων.
Η όλη διαδικασία γινόταν αυτόματα (κώδικα) χωρίς την επέμβαση του χρήστη μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα.

Serial port monitor:
Time synchronization from Dragino Lora Gateway
The NTP time is 19:28:21
The RTC time is 19:28:21

Εικόνα 20 - Διαδικασία συγχρονισμού RTC με NTP Server.

Έχοντας εξασφαλιστεί ο απόλυτος συγχρονισμό του RTC με την πύλη επικοινωνίας πραγματοποιήθηκαν όλες τις απαραίτητες δοκιμές.

Η όλη διαδικασία αποστολής και λήψη των πακέτων δεδομένων έγινε μέσα από την διαδικτυακή πλατφόρμα *thethingsnetwork.org*.

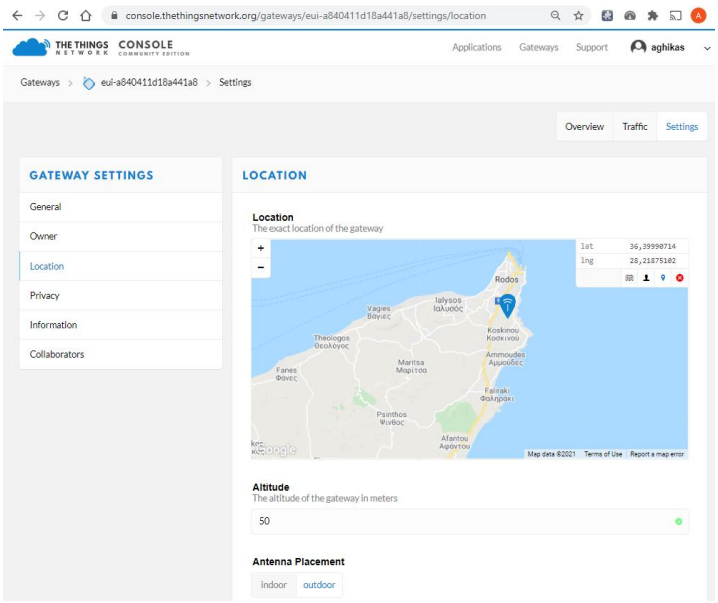


Εικόνα 21 - Διαδικτυακή πλατφόρμα THETHINGSNETWORK.

Η πλατφόρμα παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας εφαρμογών για IoT συσκευές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία Lora.

Ξεκινώντας δημιουργήθηκε ένας λογαριασμός και δηλώθηκε το Dragino LG01-N ως Gateway της πλατφόρμας. Λόγω του ότι η πλατφόρμα παρέχει τις υπηρεσίες της δωρεάν κάθε Gateway που δηλώνετε μπορεί να χρησιμοποιηθεί από κάθε μέλος της επίσης δωρεάν.

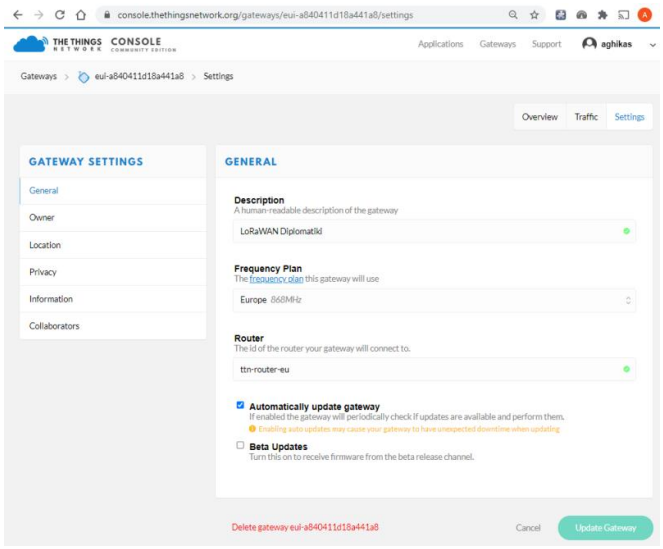
Άρα με την εγκατάσταση και σύνδεση του Gateway (Dragino LG01-N) δημιουργήθηκε στο νησί της Ρόδου η 1^{η} πύλη επικοινωνίας του **thethingsnetwork.org**.



Εικόνα 22 - Καταχώρηση LoRa Gateway στο THETHINGSNETWORK

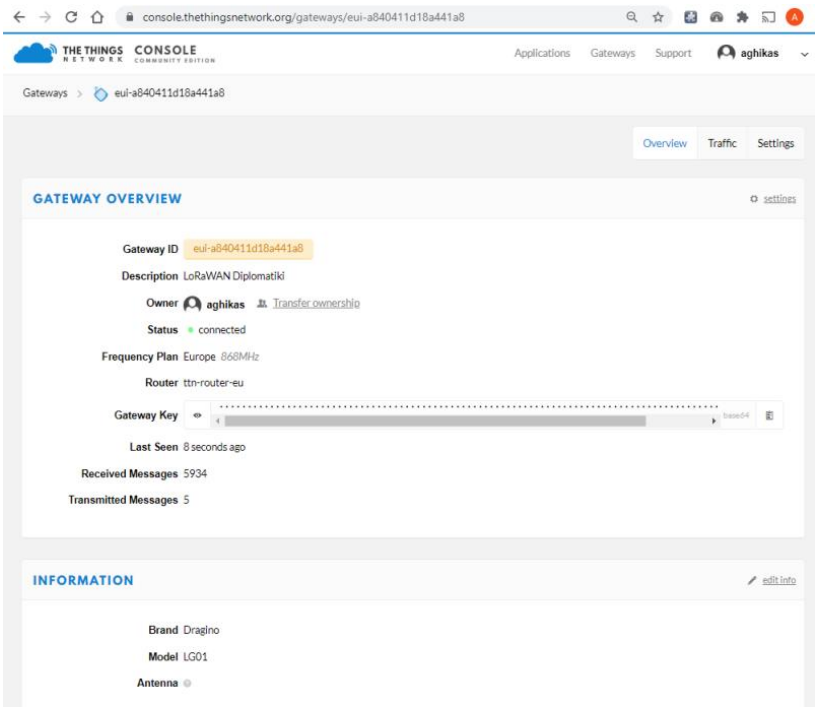
Όλος ο εξοπλισμός ακολουθεί τα πρότυπα της ευρωπαϊκής ένωσης σχετικά με τις επιτρεπόμενες συχνότητες λειτουργίας.

Η συχνότητα λειτουργίας του Lora στην ευρωπαϊκή ένωση είναι 868MHz και αποτελεί συχνότητα ελεύθερη για χρήση χωρίς να απαιτείται κάποια άδεια.



Εικόνα 23 - Ρύθμιση παραμέτρων LoRa Gateway.

Επίσης επιλέχθηκε ο ευρωπαϊκός router ttn-router-eu για την δρομολόγηση των πακέτων.



Εικόνα 24 - Ρυθμίσεις ασφάλειας του LoRa Gateway.

Στην συνέχεια έπρεπε να δημιουργηθεί μία εφαρμογή (application) μέσα από την οποία θα γινόταν η διακίνηση των πακέτων από το node.
Για την ασφάλεια της διακίνησης των δεδομένων η εφαρμογή και η πύλη επικοινωνίας είχαν τα δικά τους μοναδικά αναγνωριστικά κλειδιά.
Τα πακέτα δεδομένων κρυπτογραφούνται με την χρήση αυτών των κλειδιών μέσα από αλγόριθμους κρυπτογράφησης βασισμένους στην τεχνολογία AES128 η οποία εξασφαλίζει την μέγιστη ασφάλεια.
Έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις στον κώδικα του node και δηλώθηκαν τα μοναδικά κλειδιά πρόσβασης της πύλης και της εφαρμογής.
Επίσης δημιουργήθηκε και δηλώθηκε και το μοναδικό αναγνωριστικό κλειδί της εφαρμογής του node στην πλατφόρμα **thethingsnetwork.org**
Εφόσον λοιπόν είχε εξασφαλιστεί η επικοινωνία και αφού έγιναν οι τελευταίες τροποποιήσεις και βελτιώσεις της εφαρμογής του node ξεκίνησε η διεξαγωγή των πειραμάτων-μετρήσεων.

Η εφαρμογή έγινε με τέτοιον τρόπο ώστε να παρέχει την δυνατότητα της παραμετροποίησης των πειραμάτων όπως την αλλαγή των χρόνων αποστολής των πακέτων καθώς επίσης και την αλλαγή των παραμέτρων επικοινωνίας (spread factor) εύκολα και χωρίς την ανάγκη αλλαγών πολλών σημείων του κώδικά.

4.3 Εγκατάσταση εξοπλισμού στο πεδίο μετρήσεων

Αρχικά τοποθετήθηκε η πύλη επικοινωνίας (LoRa gateway) Dragino LG01-N σε σημείο κατάλληλο για να έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο αλλά και να προστατεύεται από την ηλιακή ακτινοβολία για μείωση της θερμοκρασίας του (ας μην ξεχνάμε ότι ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν για χρήση indoor και όχι outdoor).

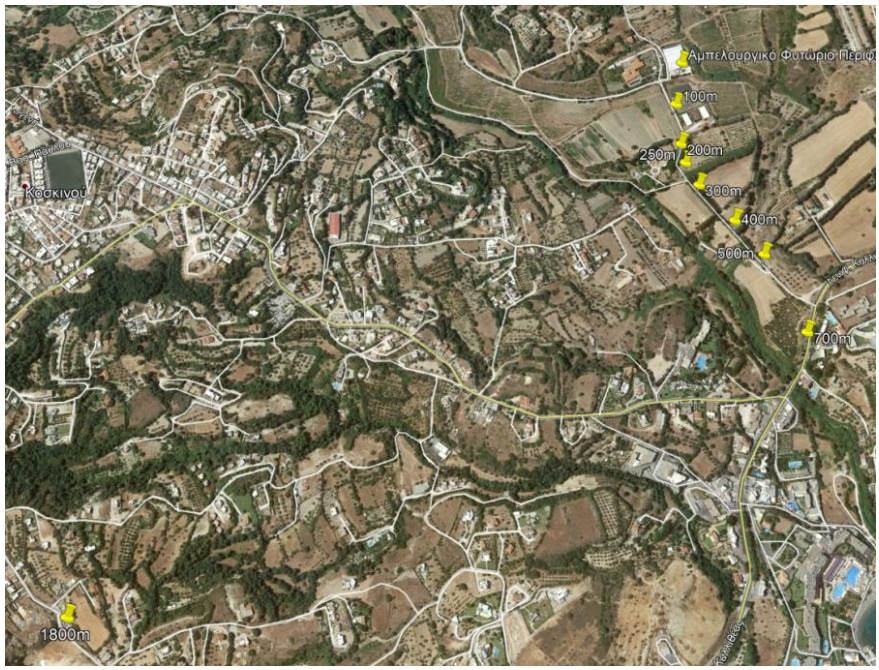
Εικόνα 25 - Τοποθέτηση LoRa Gateway (Dragino LG01-N) στο πεδίο δοκιμών.

Η θέση αυτή έδινε την απαραίτητη πρόσβαση του node στο πεδίο των δοκιμών.

4.4 Έλεγχος επικοινωνιών

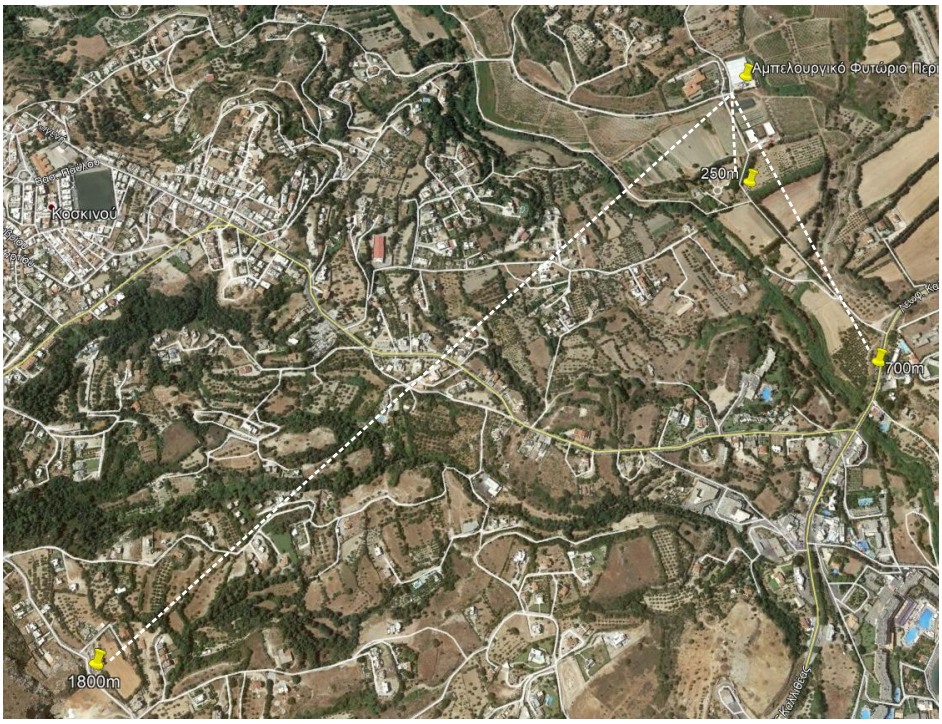
Πριν την έναρξη των πειραμάτων δοκιμάστηκε ο εξοπλισμός σε διάφορα σημεία στην ευρύτερη περιοχή.

Πραγματοποιήθηκε η αποστολή αρκετών πακέτων δεδομένων για τον εντοπισμό τυχών σφαλμάτων στον κώδικα και έγινε η επιλογή των θέσεων.



Εικόνα 26 – Τοποθεσία μετρήσεων (διάφορες αποστάσεις).

Μετά από συνεννόηση με τον υπεύθυνο καθηγητή αποφασίστηκε η επιλογή των παρακάτω θέσεων (βάση απόστασης) ως ιδανικές για την πραγματοποίηση των πειραμάτων.



Εικόνα 27 – Σημεία μετρήσεων στα 250m , 700m και 1800m.

Η περιοχή συνδυάζει τόσο το αγροτικό περιβάλλον (μεγάλα δέντρα) με μικρές αυξομειώσεις του ανάγλυφου στις μικρές αποστάσεις έως τα 700m.

Στην απόσταση των 1800m μεσολαβούν κτήρια, εγκαταστάσεις και άλλα που συνθέτουν ένα ημιαστικό περιβάλλον μαζί με τον «θόρυβο» της πόλης που βρίσκεται σε πολύ μικρή απόσταση.

Επιλέχθηκαν τα σημεία που θα έδιναν την δυνατότητα για την πραγματοποίηση μετρήσεων που με την ανάλυση τους θα μας έδιναν αποτελέσματα τα οποία θα ανταποκρίνονται σε οποιοδήποτε αγροτικό περιβάλλον.

Εικόνα 28 - Στιγμιότυπα από μετρήσεις με φορητό LoRa Node.

4.5 Πειράματα και Αποτελέσματα

Η συλλογής πειραματικών δεδομένων για τον καθορισμό της αξιοπιστίας του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRa σε πραγματικές συνθήκες ήταν ο βασικός σκοπός αυτής της διπλωματικής διατριβής. Η επιλογή της τοποθεσίας έθεσε τις βάσεις για να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των μετρήσεων και κατ' επέκταση των αποτελεσμάτων της. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τοποθεσία περιλαμβάνει μία αγροτική έκταση η οποία όμως βρίσκεται πολύ κοντά τόσο στον οικισμό των Ασγούρου όσο και αρκετά κοντά στην πόλη της Ρόδου. Η μορφολογία του εδάφους και η ύπαρξη φυσικών εμποδίων όπως ψηλά δέντρα και άλλα συνθέτουν ένα περιβάλλον που προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό αγροτικές εκτάσεις.

Μετά από δοκιμές και με στόχο την ορθότητα του αποτελέσματος αποφασίσθηκε να διεξαχθούν οι απαραίτητες μετρήσεις τηρώντας κάθε φορά τις ίδιες προϋποθέσεις. Η διάρκεια των μετρήσεων λόγο της πανδημία του Covid-19 έπρεπε να περιοριστεί με βάση τις οδηγίες της πολιτείας για την αποφυγή μετάδοσης του ιού.

Σε συνεννόηση με τις τοπικές αρχές συμφωνήθηκε ότι τα πειράματα θα μπορούν να έχουν σε καθημερινή βάση διάρκεια 3 έως 4 ώρες και να ολοκληρώνονται πάντοτε πριν την δύση του ηλίου. Επίσης οι μετρήσεις της κάθε ομάδας με βάση το spreading factor και την απόσταση, θα έπρεπε να ολοκληρώνονται κάτω από τις ίδιες κλιματικές συνθήκες, θερμοκρασίας & υγρασίας.

Όλα αυτά δημιούργησαν μία κατάσταση αρκετά δύσκολη και λόγο των περιορισμένων χρονικών ορίων έπρεπε σε σύντομο διάστημα να ολοκληρωθούν οι απαραίτητες μετρήσεις.

Η χρήση της πλατφόρμας thethingsnetwork.org για τον online έλεγχο της διαδικασίας των μετρήσεων βοηθάει σε πολύ μεγάλο βαθμό αλλά θέτει και περιορισμούς στον αριθμό των πακέτων δεδομένων που θα μπορούσαν να αποσταλούν με βάση το spreading factor.

Σενάριο μετρήσεων.

Πίνακας 3 - Αναλυτικά στοιχεία μετρήσεων

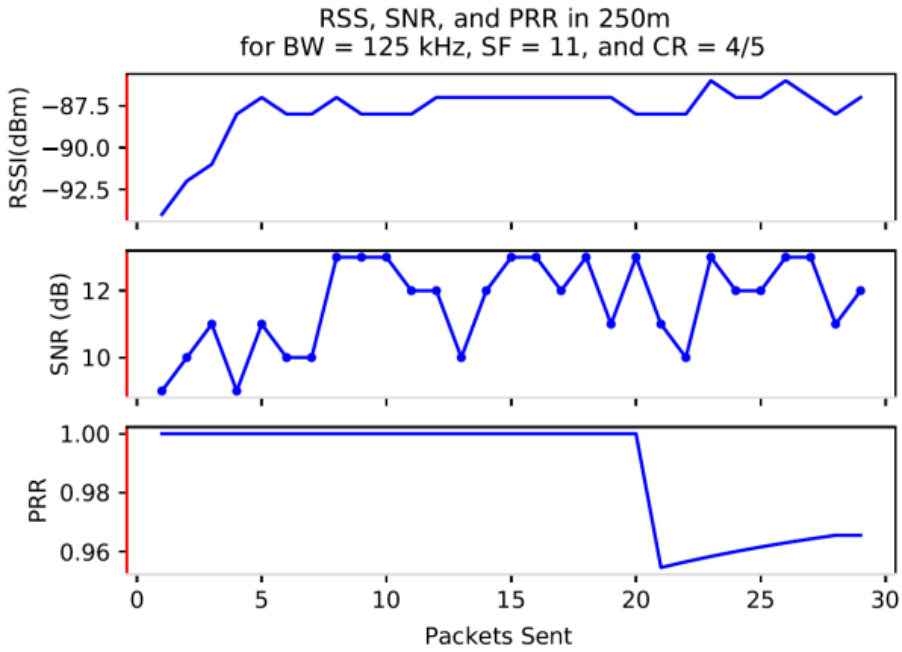
#	Distance	SF	BW	Coding rate	bit/ packet	packets	total bit	time (h)	temp ©	Καιρός
1	250	11	125	4/5	51	30	1530	1	18	Αίθριος
2	700	11	125	4/5	51	30	1530	1	18	Αίθριος
3	1800	11	125	4/5	51	30	1530	1	16	Αίθριος
4	250	10	125	4/5	51	60	3060	1	18	Συννεφιασμένος
5	700	10	125	4/5	51	60	3060	1	18	Συννεφιασμένος
6	1800	10	125	4/5	51	60	3060	1	18	Συννεφιασμένος-Βροχή
7	250	9	125	4/5	51	120	6120	1	18	Αίθριος
8	700	9	125	4/5	51	120	6120	1	17	Αίθριος
9	1800	9	125	4/5	51	120	6120	1	17	Αίθριος
10	250	8	125	4/5	51	200	10200	1	16	Βροχή
11	700	8	125	4/5	51	200	10200	1	15	Αίθριος
12	1800	8	125	4/5	51	200	10200	1	16	Αίθριος
13	250	7	125	4/5	51	300	15300	1	14	Αίθριος
14	700	7	125	4/5	51	300	15300	1	15	Αίθριος
15	1800	7	125	4/5	51	300	15300	1	15	Συννεφιασμένος

Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις που δημιουργήθηκαν από τα στοιχεία των log files που συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων μέσα από επεξεργασία με scripts σε γλώσσα Python.

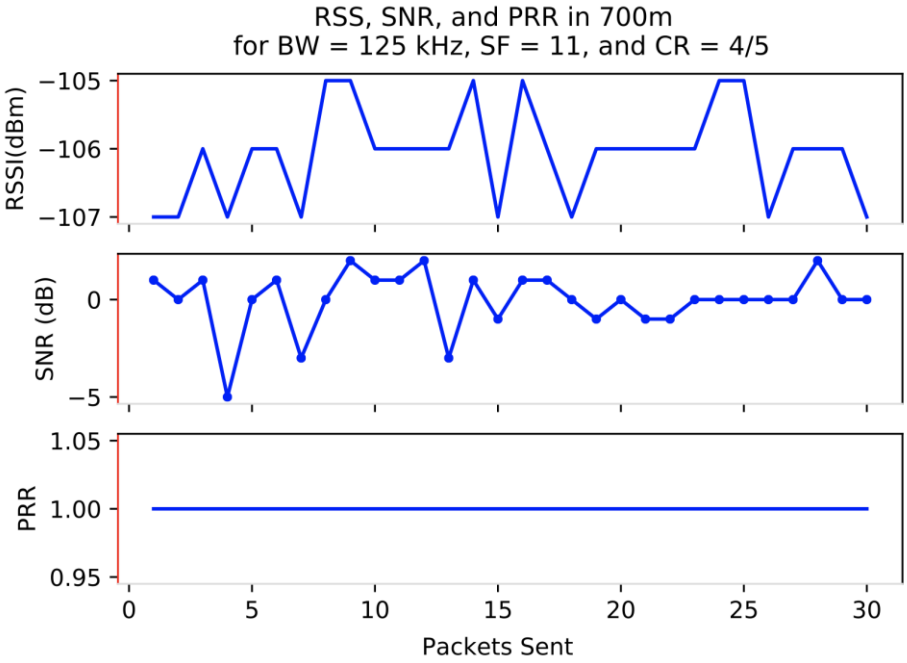
Στις εικόνες 29,30,31 εμφανίζονται οι τιμές RSS, SNR και PRR σε διαδοχικές αποστάσεις 250m, 700m και 1800m με σταθερό BW στα 125 kHz, CR 4/5 και SF 11 (χωρίς οπτική επαφή) .

Παρατηρούμε ότι το PRR (packet receipt ratio) παραμένει σε υψηλά επίπεδα πολύ κοντά στο 1 ανεξάρτητα της διακύμανσης των τιμών του RSSI και SNR σε όλες τις αποστάσεις.

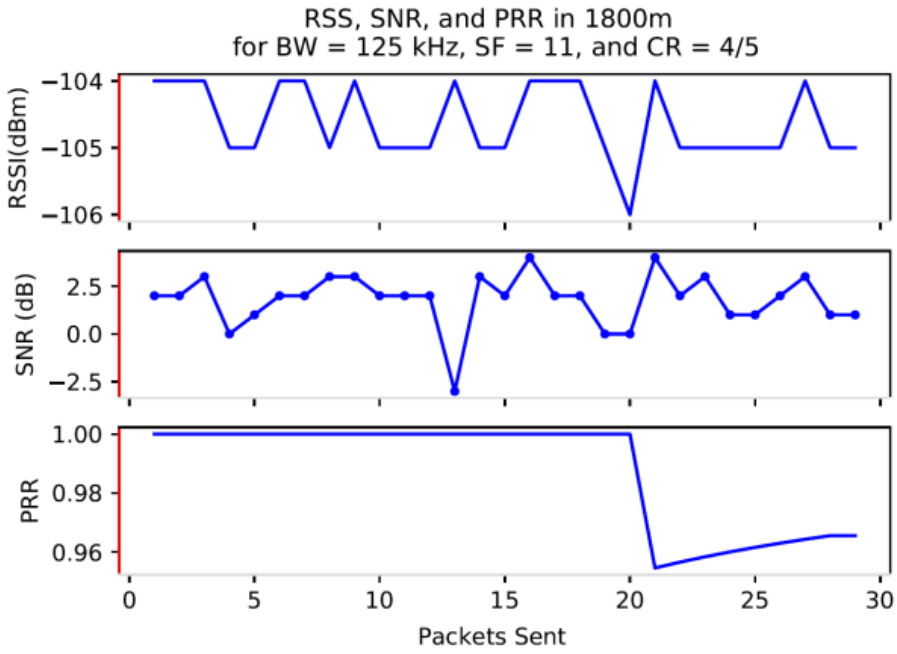
Με βάση τον πίνακα 3 παρατηρούμε διατήρηση των καιρικών συνθηκών καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων με σταθερή θερμοκρασία και καλό καιρό.



Εικόνα 29 – RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF11 στα 250m



Εικόνα 30 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF11 στα 700m

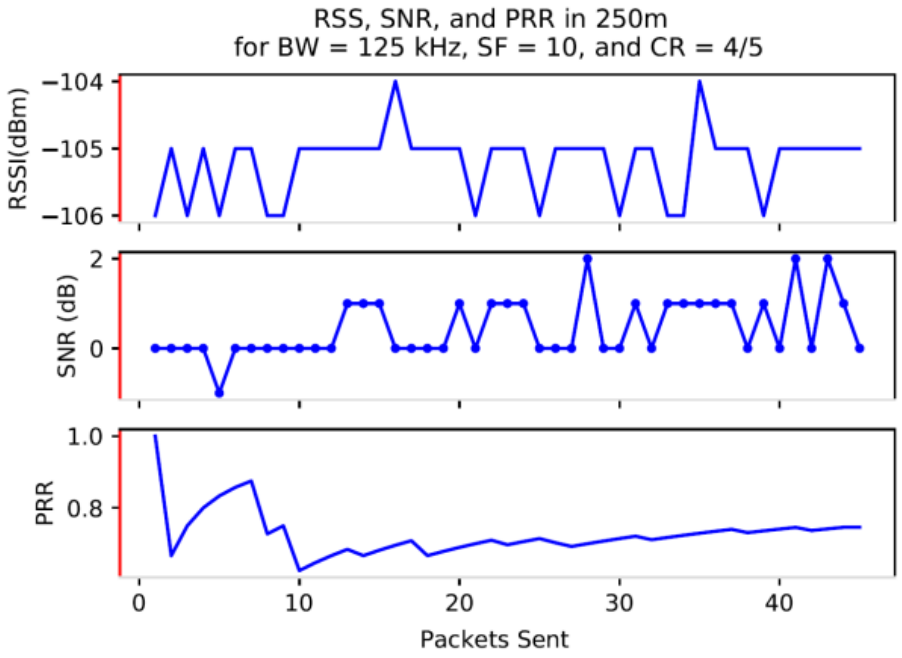


Εικόνα 31 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF11 στα 1800m

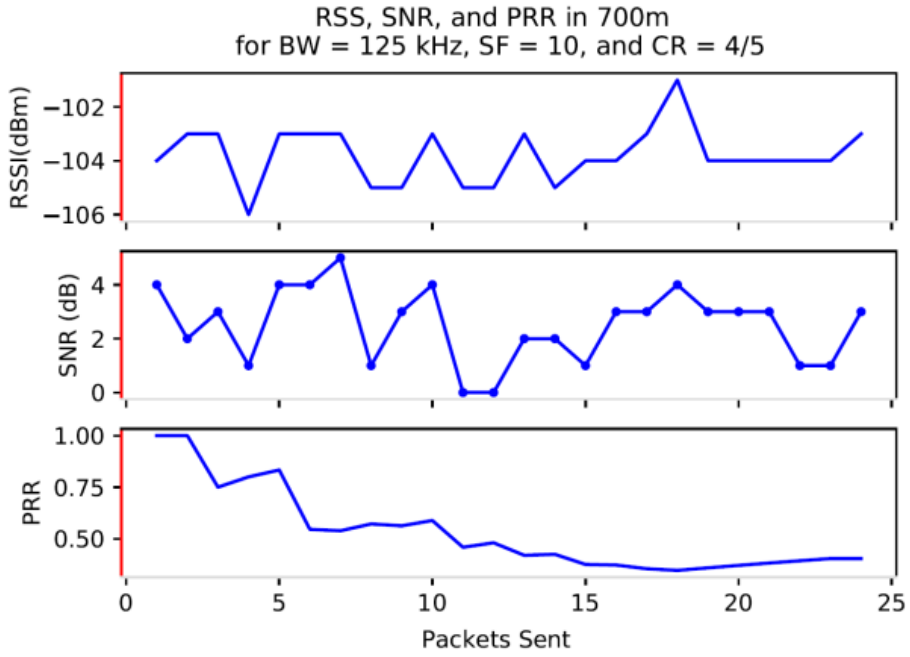
Στις εικόνες 32,33,34 εμφανίζονται οι τιμές RSS, SNR και PRR σε διαδοχικές αποστάσεις 250m, 700m και 1800m με σταθερό BW στα 125 kHz, CR 4/5 και SF 10 (χωρίς οπτική επαφή).

Παρατηρούμε ότι ενώ SF10 είναι υψηλό οι τιμές του PRR (packet receipt ratio) δεν είναι στα επιθυμητά επίπεδα ακόμα και στα 250m. Στις μεγαλύτερες αποστάσεις των 700m και 1800m οι τιμές του PRR είναι ακόμα πιο χαμηλές. Με βάση τον πίνακα 3 διαπιστώνουμε ότι η μόνη παράμετρος που έχει αλλάξει είναι ο καιρός (συννεφιασμένος) παρά την σταθερή θερμοκρασία των 18^{o} C.

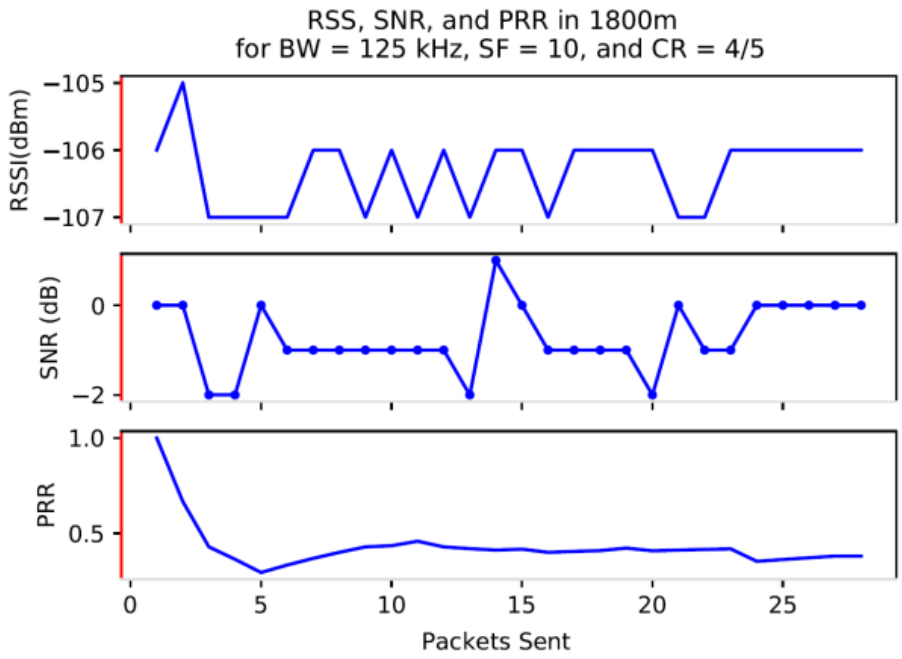
Επίσης και τα RSSI και SNR είναι σε χαμηλά επίπεδα ακολουθώντας ανάλογος το PRR.



Εικόνα 32 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF10 στα 250m

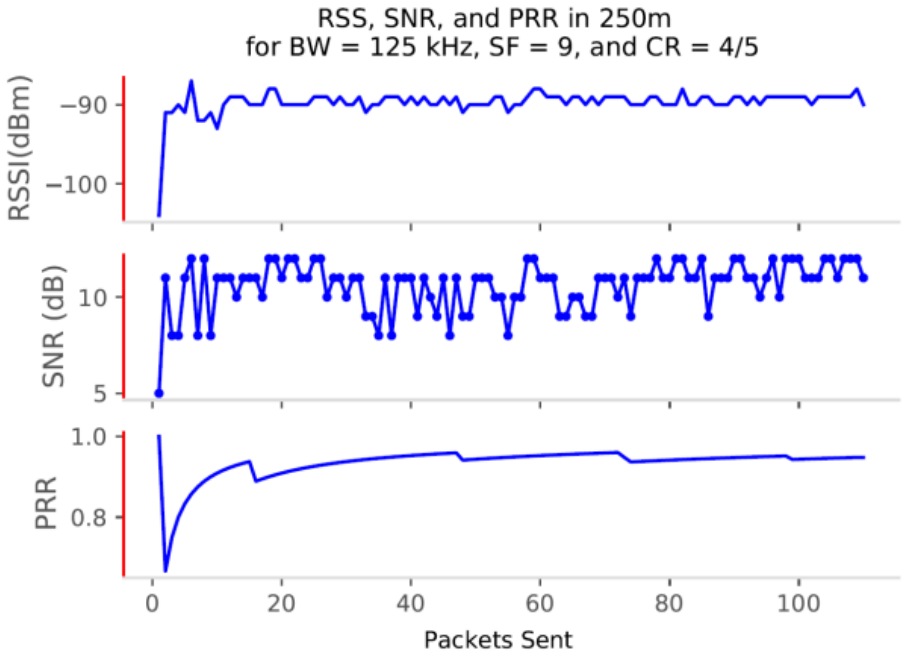


Εικόνα 33 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF10 στα 700m

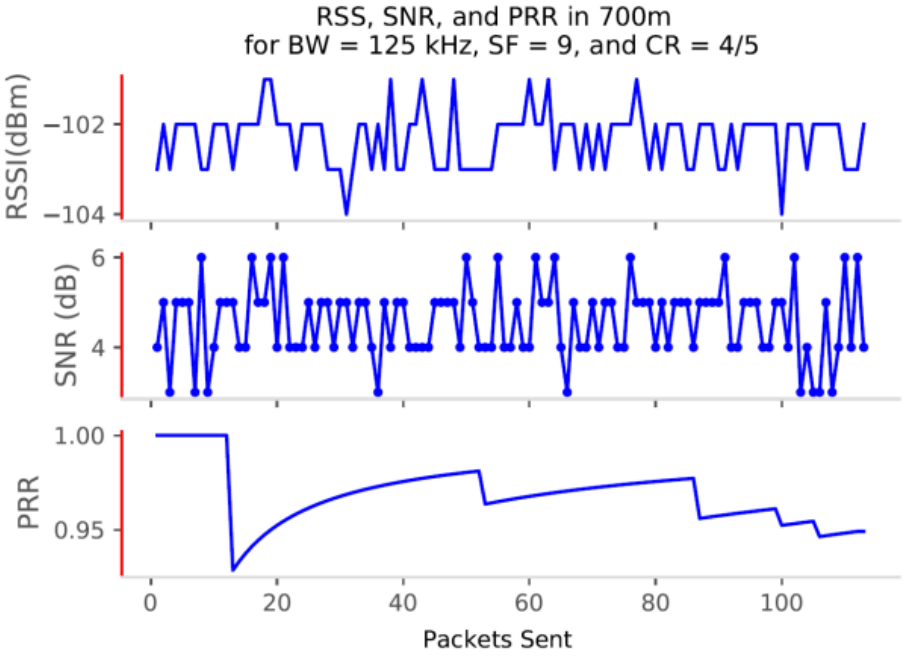


Εικόνα 34 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF10 στα 1800m

Στις εικόνες 35,36,37 εμφανίζονται οι τιμές RSS, SNR και PRR σε διαδοχικές αποστάσεις 250m, 700m και 1800m με σταθερό BW στα 125 kHz, CR 4/5 και SF 9 (χωρίς οπτική επαφή).

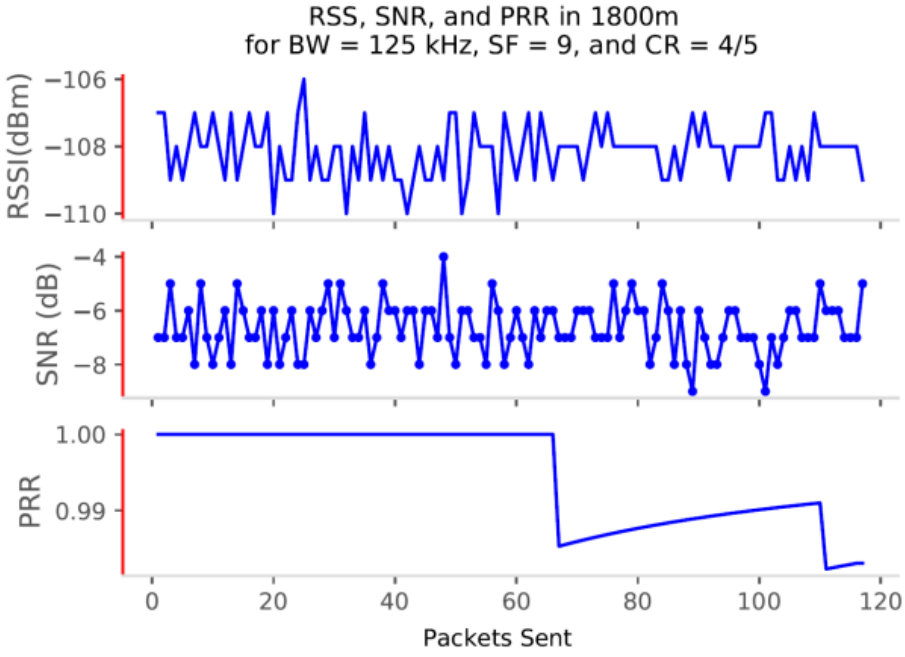


Εικόνα 35 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF9 στα 250m



Εικόνα 36 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF9 στα 700m

Παρατηρούμε ότι το PRR (packet receipt ratio) παραμένει σε υψηλά επίπεδα πολύ κοντά στο 1. Η διακύμανση των τιμών του RSSI και SNR στην απόσταση των 250m είναι μικρή ενώ αυξάνεται στις μεγαλύτερες αποστάσεις. Με βάση τον πίνακα 3 παρατηρούμε διατήρηση των καιρικών συνθηκών καθ' όλη την διάρκεια των μετρήσεων με σταθερή θερμοκρασία και καλό καιρό.



Εικόνα 37 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF9 στα 1800m

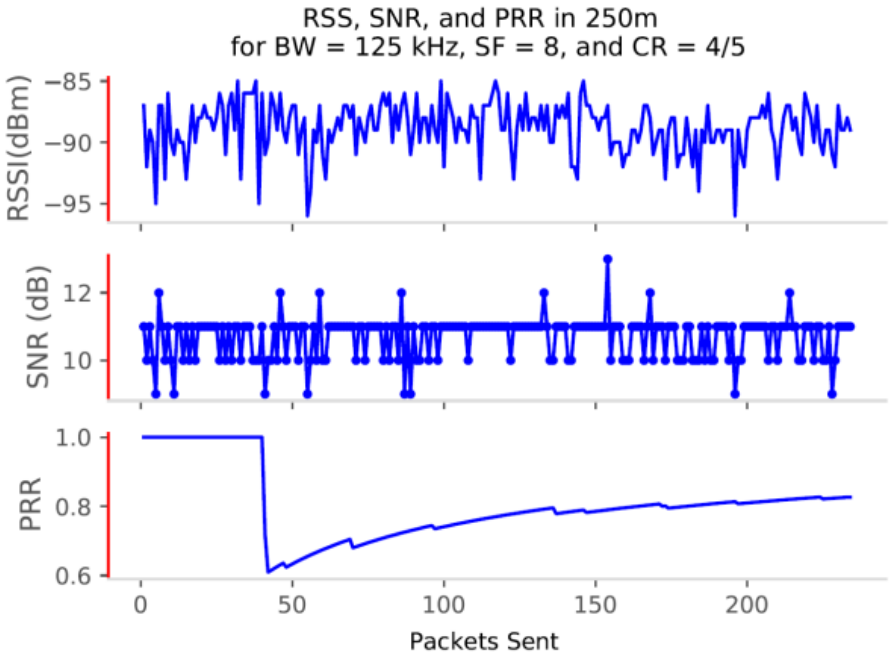
Στις εικόνες 38,39,40 εμφανίζονται οι τιμές RSS, SNR και PRR σε διαδοχικές αποστάσεις 250m, 700m και 1800m με σταθερό BW στα 125 kHz, CR 4/5 και SF 8 (χωρίς οπτική επαφή).

Το PRR (packet receipt ratio) στην απόσταση των 250m παραμένει σε χαμηλά επίπεδα λόγο της επιδείνωσης του καιρού αμέσως μετά την έναρξη των μετρήσεων (βροχή).

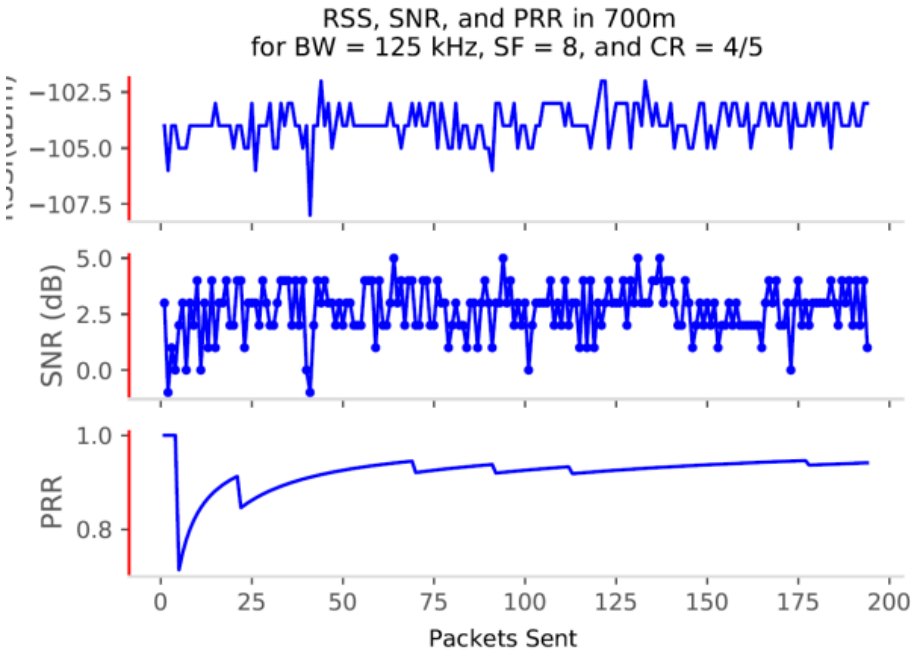
Στις αποστάσεις των 700m και 1800m διακρίνεται μια βελτίωση λόγο της ηλιοφάνειας που ακολούθησε αλλά το χαμηλού SF8 δεν απέδωσε τα μέγιστα.

Η διακύμανση των τιμών του RSSI και SNR στην απόσταση είναι ανάλογη του PRR σε όλες τις αποστάσεις.

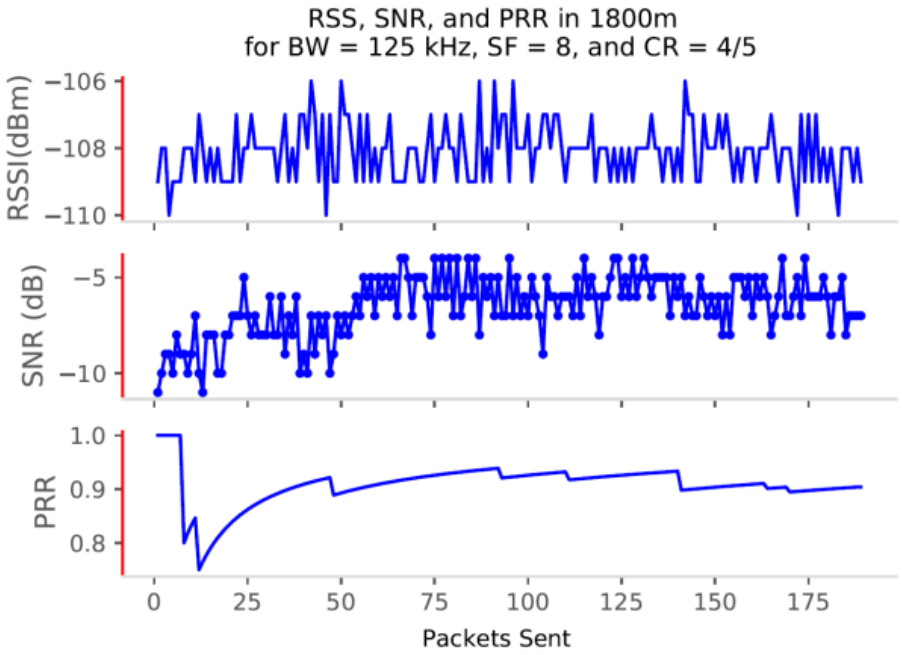
Οι καιρικές συνθήκες και η θερμοκρασία αποτυπώνονται στον πίνακα 3.



Εικόνα 38 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF8 στα 250m



Εικόνα 39 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF8 στα 700m



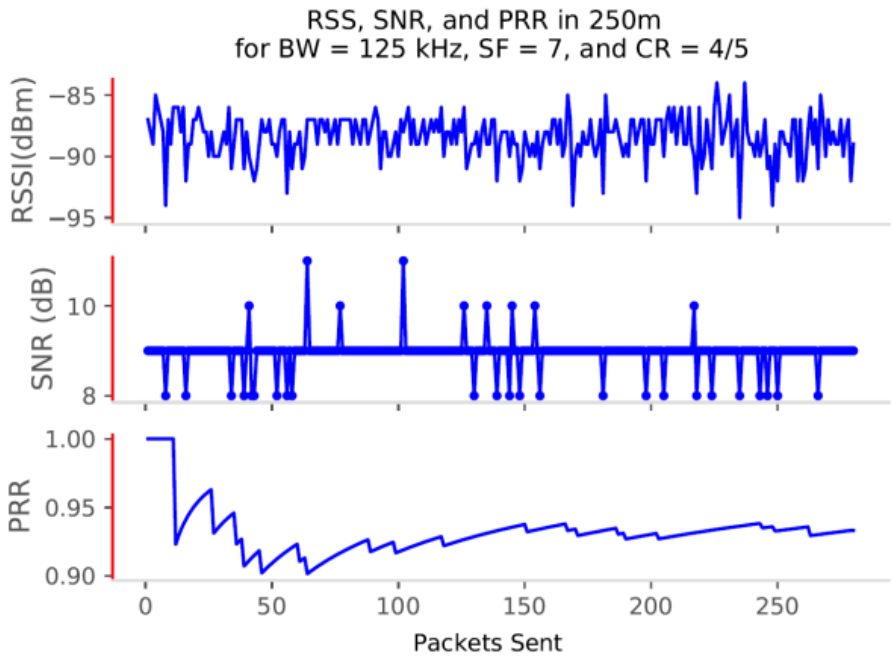
Εικόνα 40 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF8 στα 1800m

Στις εικόνες 41,42,43 εμφανίζονται οι τιμές RSS, SNR και PRR σε διαδοχικές αποστάσεις 250m, 700m και 1800m με σταθερό BW στα 125 kHz, CR 4/5 και SF 7 (χωρίς οπτική επαφή).

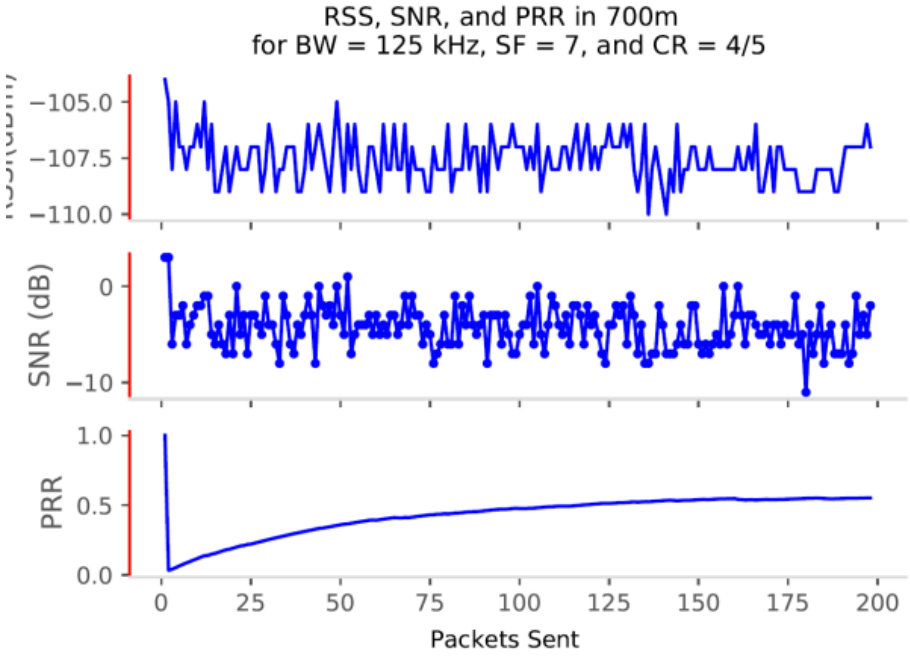
Το PRR (packet receipt ratio) στην απόσταση των 250m ακολουθεί την διακύμανση των τιμών του SNR και RSSI , είναι υψηλό με μικρή αυξομείωση προς τα κάτω λόγο του χαμηλού SF7.

Στις μεγαλύτερες αποστάσεις παρατηρείται ότι στα 700m το PRR είναι χαμηλότερο σε σχέση με αυτό στα 1800m. Οι τιμές των RSSI και SNR είναι επηρεάζουν αρνητικά τις μετρήσεις στα 700m ενώ στα 1800m εμφανίζονται βελτιωμένες.

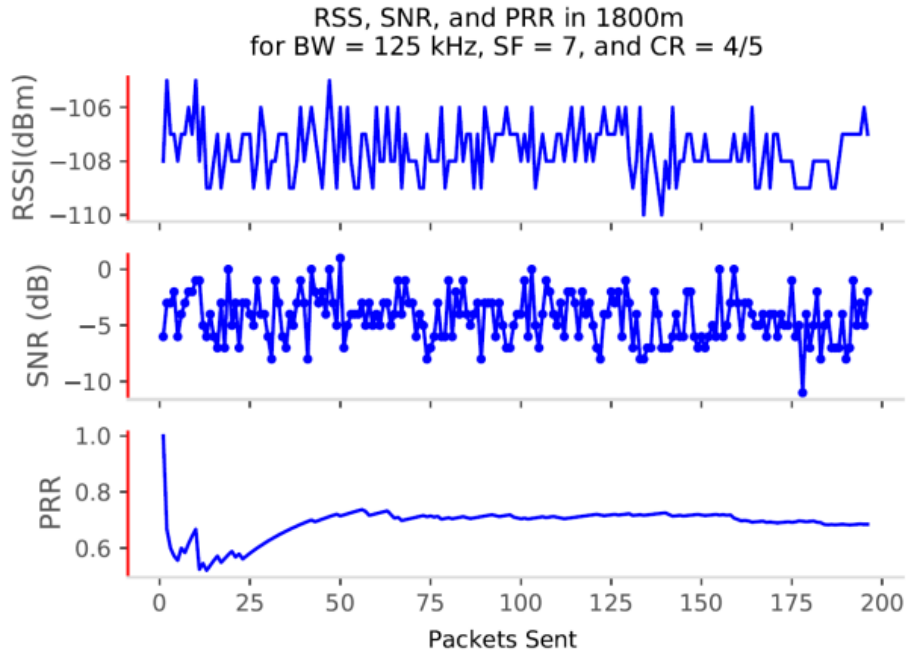
Οι καιρικές συνθήκες και η θερμοκρασία κατά την διάρκεια των μετρήσεων αποτυπώνονται στον πίνακα 3.



Εικόνα 41 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF7 στα 250m



Εικόνα 42 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF7 στα 700m



Εικόνα 43 - RSS,SNR και PRR με BW 125kHz , CR 4/5 και SF7 στα 1800m

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα:

Πίνακας 4 - Διάρκεια εκπομπής ανά SF και απόσταση

AIR TIME	Αποστάσεις gateway-node		
	250m	700m	1800m
SF	Χρόνος μετάδοσης (ms)	Χρόνος μετάδοσης (ms)	Χρόνος μετάδοσης (ms)
7	257,43	291,97	292,87
8	6847,87	7859,71	7512,58
9	2595,95	2605,59	2603,62
10	627,33	588,19	1332,79
11	7008,24	7009,67	7001,64

Οι τιμές του air time παρουσιάζουν μικρές μεταβολές για κάθε spread factor ανεξαρτήτου απόστασης. Στην περίπτωση όμως του SF10 εμφανίζονται μεγάλες αποκλείσεις που οφείλονται στα καιρικά φαινόμενα που επικρατούσαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Πίνακας 5 - Μέση τιμή του RSSI ανά SF και απόσταση

Μέση τιμή RSSI	Αποστάσεις gateway-node		
	250m	700m	1800m
SF	RSSI	RSSI	RSSI
7	-88	-105	-108
8	-89	-104	-108
9	-90	-102	-108
10	-105	-104	-106
11	-88	-106	-105

Πίνακας 6 - Μέση τιμή του SNR ανά SF και απόσταση

Μέση τιμή SNR	Αποστάσεις gateway-node		
	250m	700m	1800m
SF	SNR	SNR	SNR
7	9	1	-4
8	11	3	-7
9	11	5	-7
10	0	2	-1
11	12	0	2

Πίνακας 7 - Δείκτης αποδοχής πακέτων PRR ανά SF και απόσταση

Packet Reception Rate	Αποστάσεις gateway-node		
	250m	700m	1800m
SF	PRR	PRR	PRR
7	0,93	0,95	0,68
8	0,82	0,94	0,9
9	0,94	0,94	0,98
10	0,74	0,4	0,38
11	0,96	1	0,96

Στους πίνακες 5 έως 7 μπορούμε να δούμε συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων όσο αφορά το RSSI, SNR, και PRR σε συνάρτηση με την απόσταση και το Spread Factor όπως αυτά αποτυπώνονται στα γραφήματα (εικόνες) 29 έως 43.

Πίνακας 8 - *Ποσοστό απώλειας πακέτων ανά SF και απόσταση*

Packet loss (%)	Αποστάσεις gateway-node		
	250m	700m	1800m
SF	Packet loss (%)	Packet loss (%)	Packet loss (%)
7	6,68	4,71	31,57
8	17,375	5,85	9,61
9	5,21	5,08	1,69
10	25,42	59,64	61,67
11	3,44	0	3,44

Στον πίνακα 8 αποτυπώνεται το ποσοστό απώλειας πακέτων ανά SF και απόσταση αντιστρόφως ανάλογο των τιμών του πίνακα 6.

Συμπεράσματα

Στη εργασία αυτή έγινε μία έρευνα βασισμένη στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων για την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου LoRa.

Τα ποσοστά απώλειας πακέτων τις περισσότερες των περιπτώσεων είναι σχετικά χαμηλά, εκτός κάποιων μικρών εξαιρέσεων όπως επίσης παρατηρείται μία ανομοιομορφία στο PRR (Packet Reception Rate) σε σχέση με το αντίστοιχο συντελεστή διάδοσης (Spreading Factor) ως αποτέλεσμα των καιρικών συνθηκών.

Η επιτυχής χρήση του πρωτοκόλλου LoRa δεν εξαρτάτε πάντα από την απόστασης μεταξύ του κόμβου και της πύλης επικοινωνίας.

Παρατηρείται γενικότερα ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την αξιοπιστία του πρωτοκόλλου LoRa εκτός της απόστασης και της μορφολογίας του εδάφους είναι αρκετοί.

Τα καιρικά φαινόμενα και όχι μόνο η θερμοκρασία έχουν μεγάλη επίδραση στην ποιότητα και την αξιοπιστία των ασύρματων επικοινωνιών με χρήση του LoRa.

Η πανδημία του Covid-19 αποτέλεσε ανασταλτικό παράγοντα σχετικά με την διάρκεια των μετρήσεων αλλά και τον βαθμό εγκυρότητας των αποτελεσμάτων.

Σε μελλοντική εργασία θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις με μεταβαλλόμενα μεγέθη πακέτων καθώς επίσης θα αναλυθούν πιο συστηματικά παράμετροι που σχετίζονται με την μεταβολή των καιρικών συνθηκών σε 24ωρη βάση με σταθερούς σταθμούς (nodes) για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα.

Βιβλιογραφία

[1] Alliance, L. (2017). LoRaWAN 1.1 Specification. *technical specification*.

[2] Augustin, Aloÿs, et al. "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things." Sensors 16.9 (2016): 1466 .

[3] Petajajarvi, Juha, et al. "On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology." ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on. IEEE, 2015.

[4] Voigt, Thiemo, et al. "Mitigating Inter-network Interference in LoRa Networks." arXiv preprint arXiv:1611.00688 (2016).

[5] Miguel A Zamora-Izquierdo et al. "Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing". In: Biosystems Engineering 177 (2019), pp. 4–17.

[6] Congduc Pham, Abdur Rahim and Philippe Cousin. "Low-cost, Longrange open IoT for smarter rural African villages". In: 2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). IEEE. 2016, pp. 1–6.

[7] Collakovic, A.; Hadzialic, M. Internet of Things (IoT): A Review of Enabling Technologies, Challenges, and Open Research Issues. Comput. Netw. 2018, 144, 17–39.

[8] Ma, Y. W., & Chen, J. L. (2018, April). Toward intelligent agriculture service platform with lora-based wireless sensor network. In *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)* (pp. 204-207). IEEE. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8394568

[9] Siddique, A., Prabhu, B., Chaskar, A., & Pathak, R. (2019). A Review On Intelligent Agriculture Service Platform With Lora Based Wireless Sensor Network. life, 100, 7000.

[10] Sanchez-Iborra, R., G Liaño, I., Simoes, C., Couñago, E., & Skarmeta, A. F. (2019). Tracking and monitoring system based on LoRa technology for lightweight boats. *Electronics*, *8*(1), 15.

[11] Juang, J. A. J. A Vehicle Monitoring System Based on the LoRa.

[12] Choi, C. S., Jeong, J. D., Lee, I. W., & Park, W. K. (2018, January). LoRa based renewable energy monitoring system with open IoT platform. In 2018 international conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC) (pp. 1-2). IEEE.

[13] Yaye, S. A. R. R., Gueye, B., & Cheikh, S. A. R. R. (2019, April). Performance Analysis of a Smart Street Lighting Application Using LoRa Wan. In 2019 International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet) (pp. 1-6). IEEE.

[14] Antony, R., Shajih, M., & Chidambaram, S. Hardware Design of LoRa Node for IoT Based Smart Parking System.

[15] Butun, I., Pereira, N., & Gidlund, M. (2019). Security risk analysis of LoRaWAN and future directions. Future Internet, 11(1), 3. (pp. 7-9)

[16] Φράγκος, Α. (2020). Αξιολόγηση επίδοσης ασύρματων δικτύων αισθητήρων τεχνολογίας LoRa για την πρόσκτηση γεωχωρικών δεδομένων σε εφαρμογές Γεωργίας ακριβείας. (https://sci-hub.st/http://dspace.aua.gr/xmlui/handle/10329/7118)

[17] Seye, R. M., Ngom, B., Gueye, B., & Diallo, M. (2018,July). A Study of LoRa Coverage: Range Evaluation and Channel Attenuation Model. In 2018 1st International Conference on Smart Cities and Communities (SCCIC) (pp. 1-4). IEEE.

[18] Bhuvaneswari, P. T. V., Parameswaran, R., Sabarna, S., Manogaran, G. I., Suriya, G., & Paventhan, A. LoRa BASED SMART STREET LIGHT MANAGEMENT FRAMEWORK.