



# **ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

## **ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΠΛΗΡΕΣ ΔΟΜΗΜΕΝΟ  
ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ  
ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ  
ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

**Φοιτητής: Ηλίας Δήμας  
Α.Μ. 71347267**

**Εισηγητής: Ιωάννης Βογιατζής ,Καθηγητής**

**Αθήνα - Αιγάλεω ,----- 2023**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ****ΠΛΗΡΕΣ ΔΟΜΗΜΕΝΟ ΔΙΚΤΥΟ ΣΤΑΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ  
ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΟΜΕΝΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ****Ηλίας Δήμας  
Α.Μ. 71347267****Εισηγητής: Ιωάννης Βογιατζής ,Καθηγητής****Εξεταστική Επιτροπή:****Ημερομηνία εξέτασης -----**



**Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.**  
**Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής και Ηλίας Δήμας,**  
**-----, 2023**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δήμας Ηλίας του Σπύρου, με αριθμό μητρώου 71347267 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών :

Υπογραφή

Ηλίας Δήμας



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ιωάννη Βογιατζή, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή που ανέλαβα τη παρούσα διπλωματική εργασία, στον κύριο Δημήτριο Ψιλιά, υποψήφιο διδάκτορα για την πολύτιμη βοήθειά, στήριξη και τις συμβουλές που μου παρείχε κατά την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου Σπύρο, Ελισάβετ και Ευανθία Δήμα, τους φίλους μου καθώς και κατοικίδιο μου Ghost, για τη συμπαράσταση κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την κατασκευή ενός δικτύου όπου εξυπηρετεί υπηρεσίες σταθμών φόρτισης για UAVS. Η κεντρική ιδέα είναι στηριγμένη στο LoRa λόγω των προτερημάτων του σε σύγκριση με άλλα δίκτυα LPWAN. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η ορθή, ασφαλής καθώς και με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας επικοινωνία drones με βάσεις φόρτισης, όπου βρίσκονται τοποθετημένες είτε σε αστικές είτε σε αγροτικές περιοχές. Οι βάσεις σε συνέχεια επικοινωνούν με έναν server όπου έχει αποθηκευμένα στην βάση δεδομένων του στοιχεία ταυτοποίησης των βάσεων και των drones καθώς και ποιες βάσεις εξυπηρετούν και τις υπολειπόμενες μονάδες των drone. Όλα τα μηνύματα επικοινωνίας αποστέλλονται μέσω LoRa και κρυπτογραφούνται με XOR chirp.

**ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Διαδίκτυο αντικειμένων (IoT), LoRa  
**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** LoRa, Arduino UNO, Raspberry Pi, Dragino LoRa/GPS shield, UAV, Drone, Base, Server, Βάση δεδομένων, Γραφικό περιβάλλον διεπαφής χρήστη (GUI), IoT, UAV

## ABSTRACT

This thesis deals with the construction of a network where it serves charging station services for UAVS . The core idea is based on the LoRa because of its advantages compared to other LPWAN networks. The purpose of this thesis is the proper, safe and low energy consumption communication of drones with charging bases, where they are located either in urban or rural areas. The bases then communicate with a server where it has stored in its database identification data of the bases and drones as well as which bases serve the remaining drone credits. All communication messages are sent via LoRa and encrypted with XOR chirp.

SCIENTIFIC AREA: Internet of Things (IoT), LoRa

KEYWORDS: LoRa, Arduino UNO, Raspberry Pi, Dragino LoRa/GPS shield, UAVS, Drone, Base, Server, Database, Graphical User Interface (GUI), IoT

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	15
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Περιγραφή του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας .....	16
1.3 Σύνοψη του LoRa.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	18
2.1 Η τεχνολογία Chirp Spread Spectrum.....	18
2.2 Frequency Shift Keying .....	19
2.3 Βασικές έννοιες.....	21
Τι είναι το LoRa ; .....	21
Τι είναι το LoRaWAN ; .....	21
Τι είναι η LoRa Alliance ; .....	22
Frequency shift (Μετατόπιση Συχνότητας).....	22
Bandwidth (Εύρος Ζώνης) .....	22
Spreading Factor (Παράγοντας Διασποράς).....	22
2.4 Phase Shift Keying (PSK) .....	23
Στιγμαία Φάση.....	23
Διαμόρφωση PSK .....	24
Αποδιαμόρφωση PSK .....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	28
3.1 Frequency Shift - Chirp Spread Spectrum .....	28
Στιγμαία Συχνότητα .....	29
Διαμόρφωση FS-CSS.....	29
Αποδιαμόρφωση FS-CSS.....	31
3.2 LoRa.....	32
Φέρουσα συχνότητα .....	32
Εύρος Ζώνης .....	32
Spreading Factor (Παράγοντας Διάδοσης) .....	32
Ρυθμός συμβόλων .....	33
Ρυθμός Chirp .....	34
Ρυθμός Τσιπ .....	34
3.3 Ανίχνευση σήματος LoRa .....	34
3.4 Συγχρονισμός .....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....	39
Γιατί LoRa ; .....	39
Τύποι πακέτων LoRa.....	42

Παράμετροι LoRaWAN ανά Ήπειρο.....	43
Γιατί LoRaWAN ; .....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	48
5.1    Arduino.....	48
5.2    Dragino LoRa Shield.....	50
5.3    Dragino LoRa/GPS Shield .....	51
5.4    Raspberry Pi 4 .....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	59
Εφαρμογή.....	59
Server GUI και βάση δεδομένων .....	65
Βάσεις φόρτισης και UAV.....	66
Εικόνες πλήρους λειτουργίας της εφαρμογής .....	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	73
Οδηγίες εγκατάστασης εργαλείων και βιβλιοθηκών για την χρήση της εφαρμογής.....	73
Εγκατάσταση του Raspberry Pi OS και απαιτούμενες τις βιβλιοθήκες.....	73
Εγκατάσταση του Visual Studio Code και τις απαιτούμενες επεκτάσεις .....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	77

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Λογότυπο LoRa.....	17
Εικόνα 2 Πακέτο Uplink.....	42
Εικόνα 3 Πακέτο Downlink.....	42
Εικόνα 4 Πακέτο LoRa ασαφής λειτουργίας.....	42
Εικόνα 5 Λογότυπο LoRaWAN.....	47
Εικόνα 6 Arduino UNO.....	49
Εικόνα 7 Dragino LoRa Shield.....	50
Εικόνα 8 Dragino LoRa/GPS Shield.....	53
Εικόνα 9 Raspberry Pi 4.....	54
Εικόνα 10 Ακίδες GPIO.....	56
Εικόνα 11 Adafruit Pi T-Cobbler (αριστερά) και Adafruit GPIO Cable (δεξιά).....	56
Εικόνα 12 Επέκταση ακίδων GPIO.....	57
Εικόνα 13 Σχηματικό συνδεσμολογίας LoRa Shield και Raspberry Pi 4.....	58
Εικόνα 14 GUI Server.....	65
Εικόνα 15 Φωτογραφία Server.....	65
Εικόνα 16 Φωτογραφία βάσης δεδομένων.....	66
Εικόνα 17 Φωτογραφία βάσεων φόρτισης.....	67
Εικόνα 18 Φωτογραφία UAV.....	67
Εικόνα 19 Σειριακή της βάσης 0xFA (250) όπου δέχεται το UAV.....	67
Εικόνα 20 Σειριακή του UAV όπου η κοντινότερη βάση βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση και δεν μπορεί να φτάσει έως την τοποθεσία της.....	68
Εικόνα 21 Σειριακή της βάσης 0xF1 (241) όπου το UAV δεν έχει την δυνατότητα να φτάσει στην βάση.....	68
Εικόνα 22 Broadcast αίτημα UAV.....	69
Εικόνα 23 Αποστολή αιτήματος από την βάση στον server και στοιχεία βάσης και UAV.....	69
Εικόνα 24 Αποδοχή αιτήματος φόρτισης έπειτα από ταυτοποίηση στοιχείων.....	69
Εικόνα 25 Σειριακή UAV με τοποθεσίες διαθέσιμων βάσεων και επιλογή κοντινότερης.....	70
Εικόνα 26 Απάντηση UAV ότι κατευθύνεται προς την βάση.....	70
Εικόνα 27 Μήνυμα βάσης προς UAV ότι αναμένει την άφιξη του.....	70
Εικόνα 28 Μήνυμα βάση στον Server για την αλλαγή της κατάστασης του.....	71
Εικόνα 29 Βάση ξάνα διαθέσιμη έπειτα από την φόρτιση του UAV.....	71
Εικόνα 30 Μήνυμα Server σε βάση μη έγκυρης ταυτοποίησης.....	71
Εικόνα 31 Μήνυμα Server σε βάση ανεπαρκών μονάδων.....	71
Εικόνα 32 Απόρριψη αιτήματος φόρτισης του UAV.....	72
Εικόνα 33 Μήνυμα UAV σε βάση ότι δεν μπορεί να φτάσει στην τοποθεσία της.....	72
Εικόνα 34 Αποστολή μηνύματος βάσης στο UAV να ενεργοποιήσει την ασφαλή λειτουργία του.....	72
Εικόνα 35 GUI Raspberry Pi Imager.....	73
Εικόνα 36 Λογότυπο του Visual Studio Code.....	74
Εικόνα 37 Επέκταση Serial Monitor.....	75
Εικόνα 38 Επέκταση PlatformIO IDE.....	75
Εικόνα 39 PlatformIO βιβλιοθήκη LoRa.....	75
Εικόνα 40 PlatformIO βιβλιοθήκη NeoSWSerial.....	76
Εικόνα 41 PlatformIO βιβλιοθήκη TinyGPS.....	76
Εικόνα 42 Προσθήκη βιβλιοθήκης NeoSWSerial στο Project.....	76

## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1 Παλμός up-chirp (πράσινος) και down-chirp (κόκκινος) .....	19
Σχήμα 2 Παράδειγμα FSK που μετατρέπονται από λογικά 1 σε λογικά 0.....	20
Σχήμα 3 Σύνθετο ημιτονοειδές σε πραγματικά και φανταστικά σήματα .....	23
Σχήμα 4 Στιγμαία φάση σε συνάρτηση με τον χρόνο για $M = 4$ PSK σύμβολα.....	25
Σχήμα 5 Στιγμαία φάση vs χρόνος για Data bits .....	26
Σχήμα 6 Διαμόρφωση φάσης ως κυκλική μετατόπιση ενός βασικού σήματος.....	26
Σχήμα 7 Ένα chirp με πραγματικά και φανταστικά σήματα .....	28
Σχήμα 8 Στιγμαία συχνότητα ως συνάρτηση του χρόνου για FS-CSS $M = 4$ σύμβολα .....	30
Σχήμα 9 Στιγμαία συχνότητα vs χρόνος για Data bits .....	31
Σχήμα 10 Διαμόρφωση FS-CSS ως κυκλική μετατόπιση ενός απλού σήματος .....	31
Σχήμα 11 Διάγραμμα φασματικής πυκνότητας για SF7 έως SF12 .....	33
Σχήμα 12 Σήμα LoRa έπειτα από down-chirping .....	35
Σχήμα 13 Δομή προοιμίου LoRa .....	37
Σχήμα 14 Προοίμιο LoRa μετά το down-chirping .....	37
Σχήμα 15 Προοίμιο LoRa μετά το up-chirping .....	38
Σχήμα 16 Διάγραμμα Data rate vs Απόσταση για τα LPWANS.....	39
Σχήμα 17 του Διάγραμμα ροής της εφαρμογής (1) με πετυχημένη φόρτιση .....	59
Σχήμα 18 Διάγραμμα ακολουθίας της εφαρμογής (1) με πετυχημένη φόρτιση.....	60
Σχήμα 19 Διάγραμμα ροής της εφαρμογής (2) με το UAV να ενεργοποιεί την λειτουργία ασφαλείας.....	60
Σχήμα 20 Διάγραμμα ακολουθίας της εφαρμογής (2) με το UAV να ενεργοποιεί την λειτουργία ασφαλείας.....	61
Σχήμα 21 Διάγραμμα ροής της εφαρμογής (3) με ελλιπής μονάδες φόρτισης.....	61
Σχήμα 22 Διάγραμμα ακολουθίας της εφαρμογής (3) με ελλιπής μονάδες φόρτισης .....	62
Σχήμα 23 Διάγραμμα ροής της εφαρμογής (4) με αποτυχημένη ταυτοποίηση .....	62
Σχήμα 24 Διάγραμμα ακολουθίας της εφαρμογής (4) με αποτυχημένη ταυτοποίηση.....	63
Σχήμα 25 Διάγραμμα δραστηριότητας της εφαρμογής.....	64

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Συγκρίσεις μεταξύ LoRa, Sigfox και NB-IoT .....	39
Πίνακας 2 Προδιαγραφές συντελεστών διασποράς.....	40
Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά LPWANS.....	41
Πίνακας 4 Συχνότητες LoRaWAN ανά ήπειρο.....	43
Πίνακας 5 Προεπιλεγμένα κανάλια LoRaWAN στην ζώνη EU863-870 .....	44
Πίνακας 6 Συνδεσμολογία LoRa Shield με Raspberry Pi.....	57

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

**UAV** Unmanned Aerial Vehicle  
**IoT** Internet of Things  
**ID** Identification  
**LoRa** Long Range  
**LPWAN** Low-energy Wide Area Network  
**Chirp** Compressed High Intensity Radar Pulse  
**CSS** Chirp Spread Spectrum  
**FSK** Frequency Shift Keying  
**PSK** Phase Shift Keying  
**PLL** Phase Locked Loop  
**DSSS** Direct Sequence Spread Spectrum  
**FHSS** Frequency Hopping Spread Spectrum  
**ISI** Inter-Symbol Interference  
**DFT** Discrete Fourier Transform  
**FFT** Fast Fourier Transform  
**ISM** Industrial, Scientific, and Medical  
**CRC** Cyclic Redundancy Check  
**SFD** Start of Frame Delimiter  
**OFDM** Orthogonal frequency division multiplexing  
**SBCs** single-board computers  
**SoC** system on a chip  
**CPU** central processing unit  
**GPU** graphics processing unit

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 Εισαγωγή

Στις ημέρες μας, η χρήση των μη επανδρωμένων πτητικών μέσων (UAVs) έχει γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας, καθώς τα χρησιμοποιούμε για επαγγελματικούς σκοπούς, ψυχαγωγία ή ακόμα για και στρατιωτικές επιχειρήσεις. Τα UAVs ή όπως έχει επικρατήσει στην καθημερινότητα μας drones, είναι πλέον πολύτιμο εργαλείο για φωτογραφίες από επαγγελματίες για την δημιουργία περιεχόμενου, για την εξερεύνηση και την εύρεση δυσπρόσιτων περιοχών με ασφάλεια καθώς πιο εξελιγμένα μοντέλα για αποστολές διάσωσης σε ορειβάτες και εξερευνητές ή ακόμα και για σε εμπόλεμες περιοχές. Αυτά είναι λίγα παραδείγματα για την χρήση των UAVs, αφού οι δυνατότητες τους είναι άπειρες καθώς είναι ευέλικτα και ο καθένας μπορεί να τα εξατομικεύσει και να τα εξοπλίσει κατάλληλα για την χρήση που επιθυμεί να τους πράξει.

Ένα UAV είναι πάντα έτοιμο για αποστολές και ο χρήστης του μπορεί να βρίσκεται απομακρυσμένα χωρίς να κινδυνεύει και να λαμβάνει εικόνα είτε στην οθόνη του είτε σε headset τύπου VR, βέβαια μπορεί να το χειριστεί από το κινητό του ή και από ένα απλό χειριστήριο σαν αυτό που είχαν όλα τα τηλεκατευθυνόμενα παιχνίδια. Τα τελευταία φυσικά απαιτούν τον χρήστη να βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από το UAV. Στο μέλλον όμως όπως κάθε μέσο θα κινείται αυτόνομα και προγραμματισμένα, ήδη η τεχνολογία μας μας επιτρέπει να έχουμε αυτοκίνητα που υποστηρίζουν ημιαυτόνομη και αυτόνομη οδήγησης. Η επιστημονική κοινότητα αργά η γρήγορα θα εγκαταστήσει αυτή την τεχνολογία και στα UAVs.

Υπάρχει όμως και ένα βασικό μειονέκτημά στα UAVs, το οποίο συναντάμε σε όλες τις συσκευές όπου είναι επαναφορτιζόμενες. Αυτό είναι η αυτονομία που τους προσφέρουν οι μπαταρίες τους, συνεπώς δεν έχουν τη δυνατότητα να βρίσκονται στον αέρα επ' αόριστον.



## 1.2 Περιγραφή του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός πλήρως δομημένου δικτύου με σκοπό την επαναφόρτιση των μπαταριών όπου βρίσκονται εγκατεστημένες στα UAVs. Το δίκτυο αυτό είναι βασισμένο στο LoRa, που με την χρήση του επιτυγχάνεται ο τρόπος επικοινωνίας μεταξύ όλων των πλακετών, καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας σε σύγκριση με άλλα LPWAN δίκτυα. Το σενάριο της εργασίας αυτής είναι, αυτόνομα UAVs να βρίσκονται στον αέρα και όταν η στάθμη της μπαταρίας τους πέσει κάτω από ένα ποσοστό (για παράδειγμα είκοσι της εκατό (20%)) να έχουν τη δυνατότητα να στείλουν στο δίκτυο φόρτισης ένα μήνυμα με σκοπό να προσγειωθούν στην κοντινότερη διαθέσιμη βάση και να επαναφορτιστούν.

Στο δίκτυο υπάρχουν οι εξής οντότητες: UAVs, βάσεις φόρτισης και ο server. Τα UAVs επικοινωνούν μονάχα με τις βάσεις, οι βάσεις ανταλλάσσουν μηνύματα και με τα UAVs αλλά και με τον server και τέλος ο server επικοινωνεί μόνο με τις βάσεις. Ο server διαθέτει στην βάση δεδομένων του, πίνακες με τα UAVs και τις βάσεις που εξυπηρετεί. Βάση των ID των παραπάνω ταυτοποιεί τις οντότητες και ελέγχει εάν μπορεί ένα UAV να επαναφορτίσει σε μία βάση. Οι πίνακες που προαναφέρθηκαν διαθέτουν και τις στήλες με τις διαθέσιμες μονάδες (αντιστοιχία σε χρόνο: μία μονάδα ίσων μία ώρα) καθώς και ποιες βάσεις είναι κατειλημμένες. Υπάρχει η δυνατότητα επικοινωνίας του server με server άλλου παρομοίου δικτύου σε περίπτωση όπου όλες οι βάσεις του εξυπηρετούν πελάτες και ο άλλος server με την σειρά να του απαντήσει τις συντεταγμένες μίας ελεύθερης βάσης που βρίσκεται στην δικιά του λίστα, αυτό συμβαίνει διότι με τρόπο που είναι κατασκευασμένο το δίκτυο είναι εύκολα επεκτάσιμο.

Τέλος όλα τα μηνύματα είναι κρυπτογραφημένα για την ασφάλεια των πελατών του δικτύου όσο και για το ίδιο το δίκτυο. Η προσομοίωση του δικτύου επιτυγχάνεται με την χρήση πλακετών Arduino UNO, Raspberry Pi και με δύο τύπους Dragino Shield LoRa, η διαφορά είναι ότι το ένα διαθέτει και δορυφορική συσκευή εντοπισμού συντεταγμένων (GPS).

### 1.3 Σύνοψη του LoRa

Το LoRa είναι μία ασύρματη τεχνολογία, αναπτύχθηκε από την εταιρεία Semtech και βασίζεται στη χρήση της τεχνολογίας συναεγερμού (chirp spread spectrum). Χρησιμοποιείται κυρίως για τη μετάδοση δεδομένων αισθητήρων (sensor data) και άλλων μηνυμάτων μεταξύ συσκευών σε περιβάλλοντα IoT (Internet of Things). Η τεχνολογία LoRa προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων. Καθώς χρησιμοποιεί μικρή ισχύ και επιτρέπει τη μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις, έχει χαμηλό κόστος και μπορεί να καλύψει μεγάλες επιφάνειες επίσης, είναι πολύ ανθεκτική στις παρεμβολές από άλλα ασύρματα δίκτυα και επιτρέπει την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων ακόμα και σε περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια. Το LoRa είναι επίσης πολύ ευέλικτο, καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς εφαρμογών. Το LoRa μπορεί να συνεργαστεί με άλλες τεχνολογίες, όπως το Wi-Fi και το Bluetooth, για την αποτελεσματική διαχείριση και συγχρονισμό των δεδομένων, και μπορεί επίσης να ενσωματωθεί σε πλατφόρμες IoT. Επίσης, οι επαναλαμβανόμενοι πύλες LoRa μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός ισχυρού και αξιόπιστου δικτύου LoRa. Συνολικά, το LoRa είναι μια πολύ ελκυστική επιλογή για εφαρμογές IoT, καθώς προσφέρει υψηλή αξιοπιστία, μεγάλη κάλυψη και χαμηλό κόστος ενέργειας. Είναι ιδανικό για εφαρμογές όπου η αξιοπιστία και η διαρκής σύνδεση είναι ζωτικής σημασίας.



Εικόνα 1 Λογότυπο LoRa

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Η τεχνολογία Chirp Spread Spectrum

Οι παλμοί Chirp μπορούν να βρεθούν σε όλο το φυσικό μας κόσμο, χρησιμοποιούνται από ζώα όπως δελφίνια και νυχτερίδες για επικοινωνία και ανίχνευση. Αυτοί οι ίδιοι παλμοί πρωτοπροσαρμόστηκαν και κατατέθηκαν για τεχνολογικές εφαρμογές τη δεκαετία του 1940 από τον καθηγητή Hüttmann, ο οποίος χρησιμοποίησε το chirp για εφαρμογές ραντάρ. Η έννοια της χρήσης του spread spectrum chirp σε εφαρμογές ραντάρ εξελίχθηκε περαιτέρω από τον Sidney Darlington, έναν ισόβιο συνεργάτη του IEEE, το 1947, η έρευνα του οποίου οδήγησε στον παλμικό συμπιεστή ραντάρ. Το 1996, η Canon συνέχισε την ανάπτυξη της τεχνολογίας chirp, καταθέτωντας παλμούς chirp για μετάδοση δεδομένων σε συστήματα οπτικών ινών. Από τη δεκαετία του 1990, οι τεχνολογίες chirp έχουν δει συνεχείς βελτιώσεις και προόδους. Πολλά από αυτά κινήθηκαν από περαιτέρω έρευνες και διπλώματα ευρεσιτεχνίας από την Nanotron Technologies, μια εταιρεία που αποτελεί πλέον μέρος της οικογένειας Inrixon που σήμερα είναι ο ηγέτης της τεχνολογίας chirp.

Στις ψηφιακές επικοινωνίες, η τεχνική εξάπλωσης φάσματος chirp spread spectrum (CSS) χρησιμοποιεί ευρυζωνικά γραμμικά φθάνοντα κύματα chirp για να κωδικοποιήσει πληροφορία. Ένα chirp είναι ένας ημιτονοειδής σήματος ο οποίος αυξάνει ή μειώνει τη συχνότητά του με το πέρασμα του χρόνου (συνήθως με μια πολυωνυμική έκφραση για τη σχέση μεταξύ χρόνου και συχνότητας). Τα σήματα chirp έχουν σταθερή πλάτη κύματος και διέρχονται σε γραμμικό ή μη γραμμικό τρόπο από τη μία άκρη στην άλλη άκρη σε κάποιο χρονικό διάστημα. Η τεχνική του chirp spread spectrum χρησιμοποιεί ολόκληρο το εύρος ζώνης για τη μετάδοση σημάτων. Αν η συχνότητα αυξάνεται από τη χαμηλότερη στην υψηλότερη, αυτό ονομάζεται up-chirp και αν η συχνότητα μειώνεται από την υψηλότερη στην χαμηλότερη, το αναφέρουμε ως down-chirp το σχήμα 1 αναπαριστά και τα δύο είδη chirp.

Το γινόμενο του εύρους ζώνης και του χρόνου ( $B * T > 1$ ) που είναι μεγαλύτερο από ένα αυτό είναι μια θεμελιώδης ιδιότητα τεχνικών εξάπλωσης φάσματος. Αυτό σημαίνει ότι το μεταδιδόμενο σήμα εκτείνεται σε μια ευρύτερη ζώνη συχνοτήτων από αυτή που θα ήταν απαραίτητη για τη μεταφορά της πληροφορίας μόνο της. Η εξάπλωση αυτή καθιστά το σήμα πιο ανθεκτικό στο θόρυβο και τις παρενοχλήσεις, καθώς και παρέχει μια μορφή ασφάλειας καθιστώντας το δυσκολότερο να ανιχνευθεί ή να ανακόψει.

Η τεχνική εξάπλωσης φάσματος chirp είναι ανθεκτική στη μετατόπιση Doppler, η οποία είναι η συχνοτική μετατόπιση που μπορεί να συμβεί όταν μια πηγή σήματος και ένας δέκτης βρίσκονται σε σχετική κίνηση. Η γραμμική συχνοτική αύξηση του chirp σήματος μπορεί να αντισταθμίσει τη μετατόπιση Doppler, επιτρέποντας στον δέκτη να ανιχνεύσει το σήμα ακόμη και όταν η συχνότητα λόγω κίνησης.

Η τεχνική του Chirp spread spectrum χρησιμοποιείται συχνά για εφαρμογές χαμηλής ισχύος και χαμηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, όπως σε συσκευές IoT, επειδή μπορεί να παρέχει επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας με ελάχιστη κατανάλωση ισχύος. Ωστόσο, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, αν χρειαστεί.



Σχήμα 1 Παλμός up-chirp (πράσινος) και down-chirp (κόκκινος)

## 2.2 Frequency Shift Keying

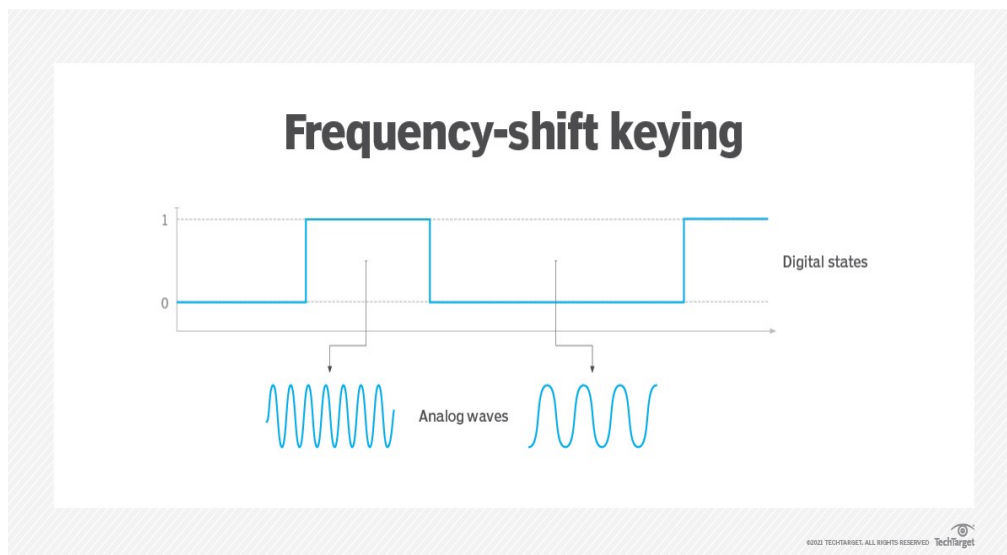
Το Frequency Shift Keying (FSK) είναι μια μέθοδος που εφευρέθηκε με σκοπό την διευκόλυνση της χρήσης των μηχανικών τηλετυπωτών στα μέσα του 1900. Η τυπική ταχύτητα αυτών των μηχανών ήταν 45 baud, που ισοδυναμεί με περίπου 45 bit ανά δευτερόλεπτο. Όταν οι υπολογιστές έγιναν συνηθισμένοι και τα δίκτυα δημιουργήθηκαν, αυτή η ταχύτητα σηματοδότησης ήταν κουραστική σε αυτούς τους ρυθμούς διεκπεραίωσης. Η μετάδοση μεγάλων εγγράφων κειμένου και προγραμμάτων χρειάστηκε ώρες για να ολοκληρωθεί. Κατά τη δεκαετία του 1970, οι μηχανικοί άρχισαν να αναπτύσσουν μόντεμ που έτρεχαν με μεγαλύτερες ταχύτητες και η αναζήτηση για ολοένα μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Τα πρώτα μόντεμ υπολογιστών χρησιμοποιούσαν FSK μέχρι το σημείο όπου επιτεύχθηκαν 1.200 ρυθμοί baud. Επιπλέον, οι τεχνολογίες κινητής τηλεφωνίας δεύτερης γενιάς χρησιμοποιούσαν το FSK για σκοπούς σηματοδότησης κλήσεων. Ωστόσο, όταν οι απαιτήσεις εύρους ζώνης φτάσουν σε ένα συγκεκριμένο ποσοστό, το FSK θεωρείται αναποτελεσματικό. Έτσι, άλλοι μηχανισμοί ψηφιακής διαμόρφωσης χρησιμοποιούνται συχνά αντί του FSK. Παρά τους περιορισμούς του εύρους ζώνης, το FSK εξακολουθεί να

χρησιμοποιείται σήμερα σε ορισμένες περιπτώσεις όπου απαιτείται μεταφορά υψηλής αξιοπιστίας για εφαρμογές χαμηλού εύρους ζώνης (για παράδειγμα στο LoRa).

Το FSK είναι μια μέθοδος μετάδοσης ψηφιακών σημάτων χρησιμοποιώντας διακριτά σήματα. Οι δύο δυαδικές καταστάσεις λογική 0 (χαμηλή) και 1 (υψηλή) σε έναν μηχανισμό κλειδιού δυαδικής μετατόπισης συχνότητας αντιπροσωπεύονται η καθεμία από μια αναλογική κυματομορφή. Η λογική 0 αντιπροσωπεύεται από ένα κύμα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα και η λογική 1 αντιπροσωπεύεται από ένα κύμα σε διαφορετική συχνότητα. Η απόσταση μεταξύ λογικού 0 και λογικού 1 είναι γνωστή ως σημείο απόκλισης ή μετατόπισης.

Κατά τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ κόμβων, η απόσταση μεταξύ των ψηφιακών καταστάσεων υπαγορεύει πόσα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η τοποθέτηση των καταστάσεων λογικού 0 και λογικού 1 πολύ μακριά μεταξύ τους θα δημιουργήσει αργούς ρυθμούς διεκπεραίωσης. Ωστόσο, εάν οι αλλαγές συχνότητας είναι πολύ κοντά μεταξύ τους, μπορεί να δημιουργήσει διασυμβολική παρεμβολή (ISI) μια συνθήκη που μπορεί να προκαλέσει σφάλματα στην σύνδεση. Έτσι, για μέγιστη απόδοση και για αποτροπή ISI, τα σήματα θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά μεταξύ τους.

Το FSK μπορεί επίσης να λειτουργήσει χρησιμοποιώντας περισσότερες από δύο δυαδικές διακριτές συχνότητες. Αυτό είναι γνωστό ως Multiple Frequency Shift Keying (MFSK). Το MFSK χρησιμοποιεί την τεχνική της ορθογωνίας διαμόρφωσης που έχει την δυνατότητα να μεταδώσει δύο ή περισσότερα bit ταυτόχρονα.



Σχήμα 2 Παράδειγμα FSK που μετατρέπονται από λογικά 1 σε λογικά 0

## 2.3 Βασικές έννοιες

### Τι είναι το LoRa ;

Το LoRa καθορίζει το φυσικό επίπεδο, είναι μια διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum (CSS) που χρησιμοποιείται για να παρέχει διαφορετικές ρυθμίσεις ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιώντας διαφορετικούς παράγοντες διασποράς. Δηλαδή τον λόγο πίσω από τη μακράς εμβέλειας επικοινωνία επίσης αναφέρεται σε μια ασύρματη διαμόρφωση που επιτρέπει χαμηλή κατανάλωση ισχύος και υψηλό προϋπολογισμό ραδιοφωνικού σήματος στην επικοινωνία. Η μετάδοση αυτή ανθεκτική έναντι διαταραχών και μπορεί να ληφθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Το LoRa είναι ιδανικό για εφαρμογές που μεταδίδουν μικρού μεγέθους δεδομένα με χαμηλούς ρυθμούς bit. Τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν σε μεγαλύτερη εμβέλεια σε σύγκριση με τεχνολογίες όπως WiFi, Bluetooth ή ZigBee. Για τον λόγο αυτό το LoRa κατάλληλο για αισθητήρες και ενεργοποιητές που λειτουργούν σε λειτουργία χαμηλής ισχύος. Το LoRa μπορεί να λειτουργήσει σε ζώνες χωρίς άδεια, για παράδειγμα, 915 MHz, 868 MHz και 433 MHz. Μπορεί επίσης να λειτουργήσει στα 2,4 GHz για να επιτύχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, με το κόστος της εμβέλειας. Αυτές οι συχνότητες εμπίπτουν σε ζώνες ISM που είναι δεσμευμένες διεθνώς για βιομηχανικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς.

### Τι είναι το LoRaWAN ;

Το LoRaWAN καθορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας και την αρχιτεκτονική συστήματος για το δίκτυο, αναφέρεται σε ένα πρωτόκολλο δικτύου που χρησιμοποιεί το LoRa για την επικοινωνία. Είναι ένα ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιείται ως ευρυζωνικό δίκτυο λόγω της ικανότητας του για μεγάλη του κάλυψη. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το LoRa σε δίκτυα χωρίς το LoRaWAN. Επίσης, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δίκτυα που μοιάζουν με LoRaWAN χωρίς LoRa, αλλά αυτό δεν θα είναι αποδοτικό. Το LoRaWAN είναι κατάλληλο για τη μετάδοση ωφέλιμων φορτίων μικρού μεγέθους (όπως δεδομένα αισθητήρων) σε μεγάλες αποστάσεις. Η διαμόρφωση LoRa παρέχει ένα σημαντικά μεγαλύτερο εύρος επικοινωνίας με χαμηλό εύρος ζώνης από άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης δεδομένων.

### *Τύπου μηνυμάτων για LoRaWAN 1.0.x και 1.1*

Οι διαφορετικοί τύποι μηνυμάτων χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά εντολών MAC και δεδομένων εφαρμογών. Τα LoRa μηνύματα μπορούν να χωριστούν σε Uplink και Downlink βάση της κατεύθυνσης που ταξιδεύουν.

### Μηνύματα Uplink

Τα μηνύματα αυτά αποστέλλονται από τελικές συσκευές στον διακομιστή δικτύου και από εκεί αναμεταδίδονται από μία ή πολλές πύλες. Εάν το μήνυμα Uplink ανήκει στον διακομιστή εφαρμογών ή στο διακομιστή σύνδεσης, ο διακομιστής δικτύου το προωθεί στον σωστό δέκτη.

## Μηνύματα Downlink

Τα μηνύματα αυτά αποστέλλονται από τον διακομιστή δικτύου σε μία μόνο τελική συσκευή και αναμεταδίδεται από μία μόνο πύλη. Αυτό περιλαμβάνει ορισμένα μηνύματα που ξεκινούν από τον διακομιστή εφαρμογών και τον διακομιστή σύνδεσης.

## Τι είναι η LoRa Alliance ;

Η LoRa Alliance είναι μια ανοιχτή, μη κερδοσκοπική ένωση που έχει γίνει μια από τις μεγαλύτερες και ταχύτερα αναπτυσσόμενες συμμαχίες στον τομέα της τεχνολογίας από την ίδρυσή της το 2015. Τα μέλη της συνεργάζονται στενά και μοιράζονται τεχνογνωσία για την ανάπτυξη και την προώθηση του προτύπου LoRaWAN, το οποίο είναι το παγκόσμιο πρότυπο για ασφαλή συνδεσιμότητα IoT LPWAN ποιότητας φορέα. Το LoRaWAN έχει την τεχνική ευελιξία για να αντιμετωπίσει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών IoT, σταθερών και κινητών, και ένα ισχυρό πρόγραμμα πιστοποίησης LoRaWAN που εγγυάται ότι οι συσκευές λειτουργούν όπως καθορίζεται. Το πρότυπο LoRaWAN έχει αναπτυχθεί από περισσότερους από 155 μεγάλους παρόχους δικτύων κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως και η συνδεσιμότητα είναι διαθέσιμη σε περισσότερες από 170 χώρες, με συνεχή επέκταση.

Η LoRa Alliance παρέχει πιστοποίηση LoRaWAN για τελικές συσκευές. Οι πιστοποιημένες τελικές συσκευές παρέχουν στους χρήστες τη σιγουριά ότι η τελική συσκευή είναι αξιόπιστη και συμβατή με τις προδιαγραφές LoRaWAN. Η πιστοποίηση είναι διαθέσιμη μόνο για κατασκευαστές συσκευών που είναι μέλη της LoRa Alliance. Αφού πιστοποιηθεί, ο κατασκευαστής μπορεί να χρησιμοποιήσει το σήμα LoRaWAN Certified μαζί με το προϊόν.

## Frequency shift (Μετατόπιση Συχνότητας)

Η μετατόπιση συχνότητας είναι η αλλαγή στη συχνότητα ενός σήματος λόγω αλλαγής της θέσης ή της ταχύτητας της πηγής ή του δέκτη. Στο πλαίσιο των συστημάτων επικοινωνίας, η μετατόπιση συχνότητας μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ανίχνευση και την αποδημοδότηση του σήματος, ιδιαίτερα σε συστήματα επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας και μεγάλου εύρους ζώνης.

## Bandwidth (Εύρος Ζώνης)

Το bandwidth είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται στο πεδίο των επικοινωνιών για να περιγράψει το εύρος των συχνοτήτων που απαιτούνται για να μεταδοθεί ένα σήμα. Πιο συγκεκριμένα, το bandwidth αναφέρεται στο διάστημα μεταξύ του χαμηλότερου και του υψηλότερου επιτρεπτού φάσματος συχνοτήτων για μια συγκεκριμένη μεθοδολογία μετάδοσης. Το bandwidth επηρεάζει την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, την ποιότητα του σήματος και την ευρωστία του σε θορύβους και παρεμβολές.

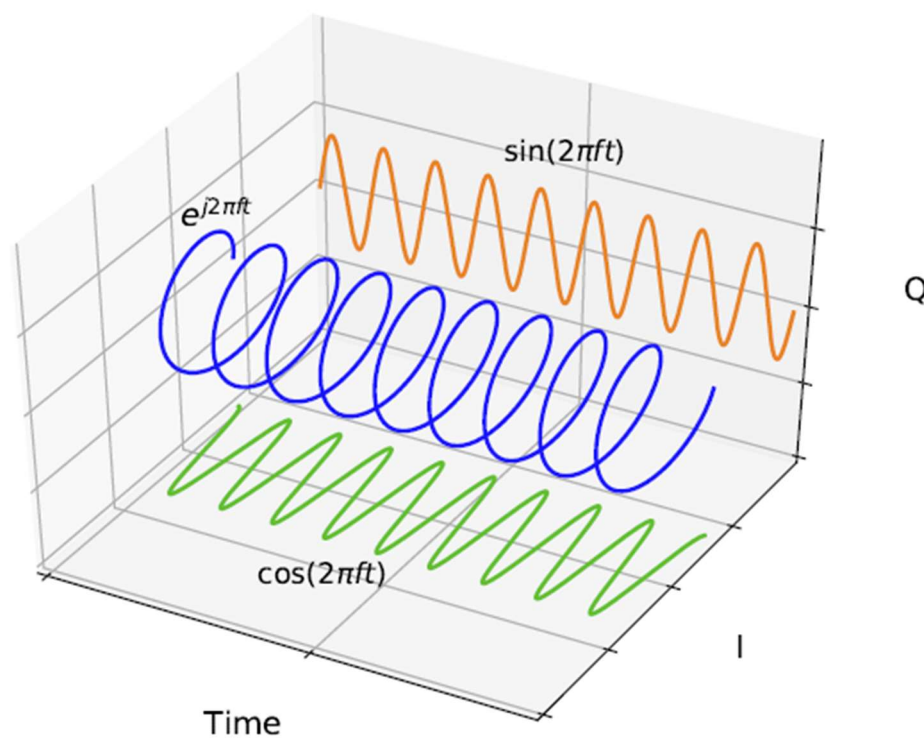
## Spreading Factor (Παράγοντας Διασποράς)

Το spreading factor είναι ένας παράγοντας που χρησιμοποιείται στη διασπορά φάσματος στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνίας. Όσο υψηλότερο είναι το spreading factor, τόσο περισσότερο διασπαρμένη είναι η πληροφορία και τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του δικτύου, αλλά τόσο χαμηλότερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων.

## 2.4 Phase Shift Keying (PSK)

Το σύνθετο ημιτονοειδές δίνεται από την σχέση :  $x(t) = e^{j2\pi ft}$

Με την χρήση της σχέσης του Euler, είναι ίσο με :  $e^{j2\pi ft} = \cos(2\pi ft) + j \sin(2\pi ft)$  όπου το πραγματικό μέρος της σχέσης μπορεί να αναπαρασταθεί ως η προβολή του μιγαδικού μέρους του ημιτονοειδούς στο πραγματικό επίπεδο. Επιπλέον το φανταστικό μέρος έχει την ίδια ιδιότητα με το πραγματικό αλλά στο φανταστικό επίπεδο. Ότι προαναφέρθηκε σχηματίζεται παρακάτω που το πραγματικό επίπεδο είναι οι άξονες Time και I, ενώ το φανταστικό οι άξονες Time και Q.



Σχήμα 3 Σύνθετο ημιτονοειδές σε πραγματικά και φανταστικά σήματα

### Στιγμιαία Φάση

Η γενική έκφραση για το σύνθετο ημιτονοειδές (παραλείποντας το πλάτος) γράφεται ως :  $x(t) = e^{j(2\pi ft + \theta)}$  (Εξ.1), ως όρισμα αυτού η στιγμιαία φάση ορίζεται ως :  $\varphi(t) = 2\pi ft + \theta$ . Υπάρχουν δύο παράμετροι στην στιγμιαία φάση όπου τροποποιώντας τις επηρεάζουν την μετάδοση πληροφοριών

1. Φάση  $\theta$
2. Συχνότητα  $\omega = 2\pi f$



## Διαμόρφωση PSK

Χρησιμοποιώντας μονάχα το τμήμα της φάσης, τα δεδομένα μπορούν να σταλούν μέσω ενός συνόλου  $M$  φάσεων  $\theta_m$ , όπου  $m = 0, 1, \dots, M-1$ .

Για  $M = 4$ , τέσσερα διαφορετικά σήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση 2 bit σε κανάλι (λόγω της σχέσης  $\log_2 4 = 2$ ) η Εξ.1 μπορεί να γραφτεί :

$$x(t) = e^{j(2\pi ft + \theta_m)} \quad (\text{Εξ.2})$$

Η στιγμιαία φάση είναι ίση με :

$$\varphi(t) = 2\pi ft + \theta_m, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad \text{ή} \quad m = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2} - 1$$

Για  $M = 4$  και εντός πιθανού εύρους  $2\pi$ , τέσσερις τέτοιες φάσεις είναι τα πολλαπλάσια του  $\theta_1 = \frac{2\pi}{M} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$  και  $\theta_m = m\theta_1$  όπου το  $m = -2, -1, 0, 1$

Μετατρέποντας την φάση σε bits για το παραπάνω παράδειγμα είναι η εξής :

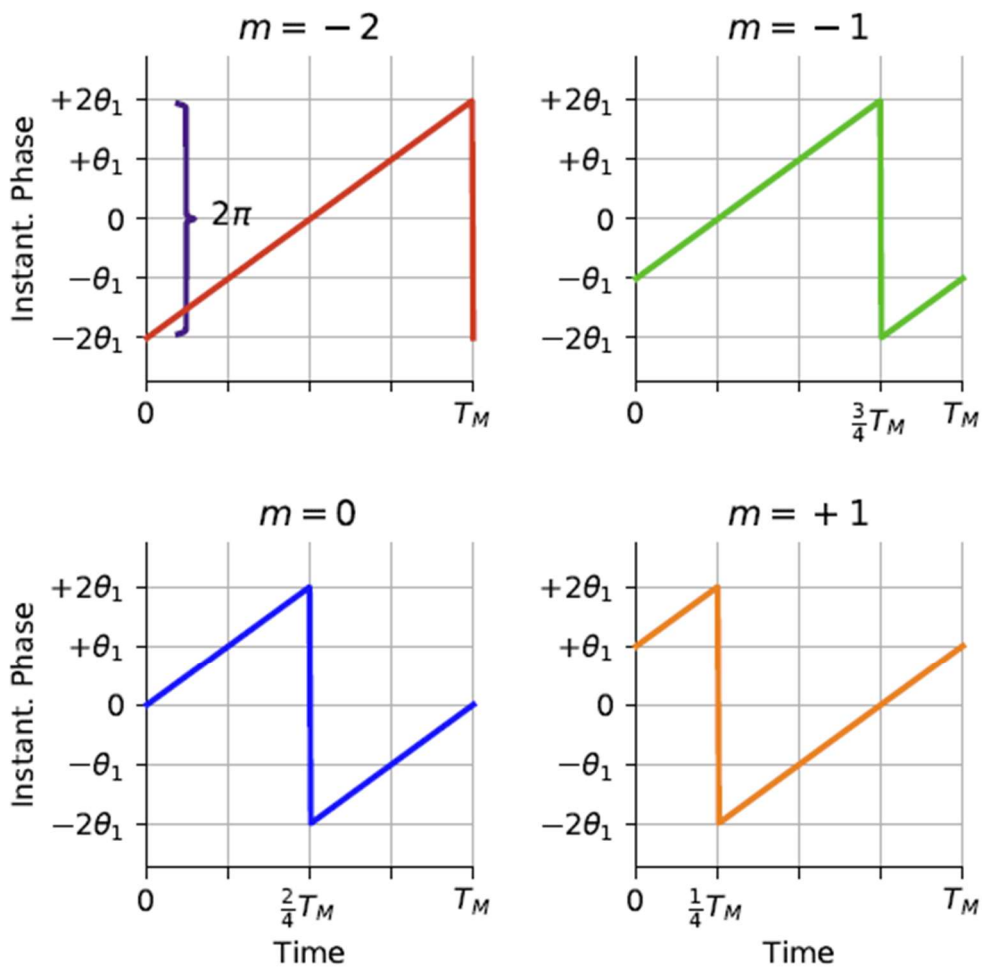
$$\theta(-2) = -2\theta_1 = -\pi \rightarrow 00$$

$$\theta(-1) = -1\theta_1 = -\frac{\pi}{2} \rightarrow 01$$

$$\theta(0) = 0\theta_1 = 0 \rightarrow 10$$

$$\theta(1) = 1\theta_1 = \frac{\pi}{2} \rightarrow 11$$

Οι τέσσερις πιθανές στιγμιαίες φάσεις  $\varphi(t) = 2\pi ft + \theta_m$  αναπαρίστανται στο παρακάτω σχήμα.

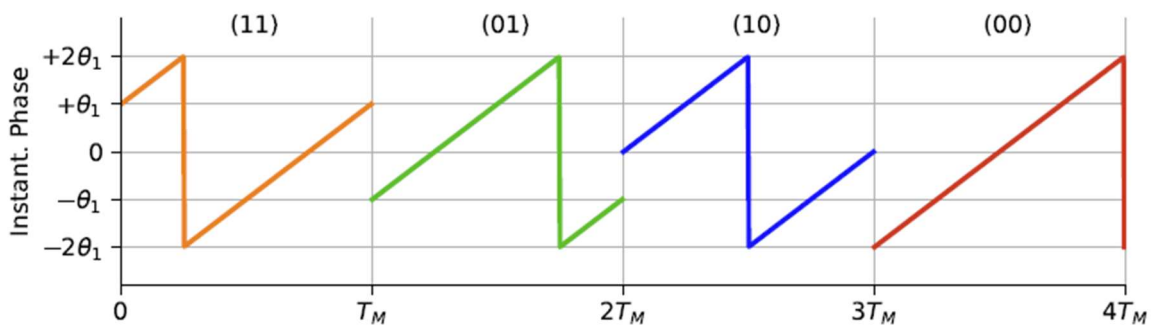


Σχήμα 4 Στιγμιαία φάση σε συνάρτηση με τον χρόνο για  $M = 4$  PSK σύμβολα

Αφού  $\theta_1 = \frac{\pi}{2}$ , το εύρος επαληθεύτε ως :  $-2\theta_1 = -\pi$  έως  $+2\theta_1 = +\pi$

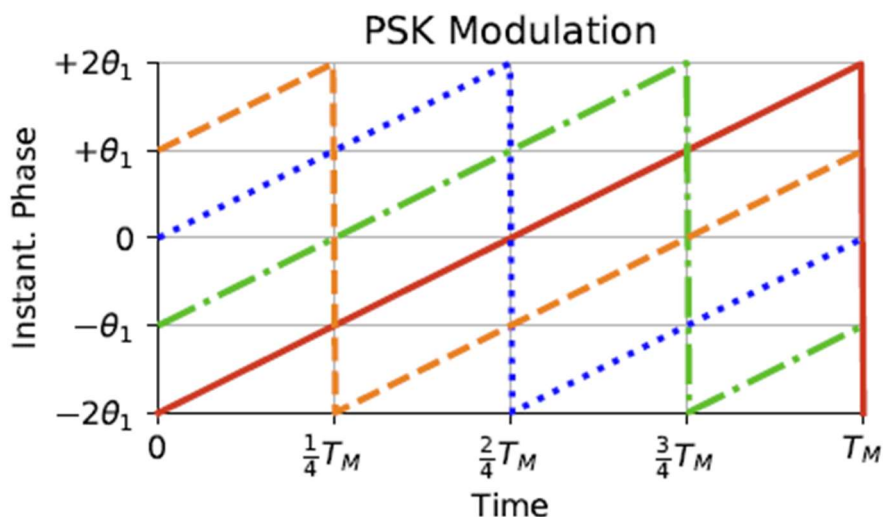
Ο ρυθμός μετάδοσης είναι το αντίστροφο μίας περιόδου  $T_M$  που είναι γνωστή ως χρόνος συμβόλου (symbol rate). Είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία αποστέλλονται ένα από όλα τα πιθανά σύμβολα διαμόρφωσης. Παρατηρείτε στο σχήμα 4 ότι η στιγμιαία φάση ορίζεται από πολλαπλάσια  $\frac{1}{M} = \frac{1}{4}$  του συμβόλου χρόνου  $T_M$  για κάθε πιθανό  $m$ .

Ένα παράδειγμα σήματος που φέρει την ακολουθία bit 11 01 10 00 σχεδιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5 Στιγμαία φάση vs χρόνος για Data bits

Ενώ από την άποψη της κατασκευής του σήματος, αυτές οι στιγμιαίες φάσεις είναι απλές κυκλικές μετατοπίσεις (με αριθμό ίσο με σύμβολο  $m$ ) ενός βασικού σήματος  $2\pi ft + \theta_0$ . Στο παρακάτω σχήμα, αναπαρίστανται τα τέσσερα σήματα του παραπάνω σχήματος το ένα πάνω στο άλλο.



Σχήμα 6 Διαμόρφωση φάσης ως κυκλική μετατόπιση ενός βασικού σήματος

### Αποδιαμόρφωση PSK

Από την πλευρά του δέκτη του σήματος, το σύνθετο ημιτονοειδές τμήμα του σήματος αφαιρείται καθώς δεν μεταφέρει πληροφορία και αυτό που απομένει είναι η φάση διαμόρφωσης. Από την Εξ.2

$$e^{j(2\pi ft + \theta m)} * e^{-j2\pi ft} = e^{j\theta m}$$

Το παραπάνω όρισμα του μιγαδικού αριθμού αποκαλύπτει σύμβολο δεδομένων την χρονική στιγμή  $m$  που στην συνέχεια μπορεί να μεταφραστεί σε αντίστοιχα bit.

$$\widehat{\theta}_m = x e^{j \theta_m}$$

Στην πραγματικότητα οι πληροφορίες φάσης αντικατοπτρίζονται στο πως ξεκίνα το ημιτονοειδές και είναι δύσκολο να μετρηθεί, για ευκολία αυτή η καθοδική μετατροπή περιγράφεται ως μία θεωρητική διαδικασία και ισούται με τον πολλαπλασιασμό του με  $e^{-j2\pi f t}$ . Επιπλέον από τα παραπάνω λείπει ένας σημαντικός αριθμός λεπτομερειών για την περιγραφή και την υλοποίηση ενός δέκτη PSK.

Στην πλευρά της εκπομπής, μετά την δημιουργία των συμβόλων διαμόρφωσης πρέπει να γίνει αναδειγματολειψία, διαμόρφωση παλμού για να ελεγχτεί το φάσμα και μετατροπή του σήματος στην κατάλληλη συχνότητα.

Στην πλευρά της λήψης, πρέπει να μετατραπεί προς τα κάτω το σήμα υψηλής συχνότητας σε, να αφαιρεθεί η μετατόπιση της φέρουσας συχνότητας μεταξύ των ταλαντωτών  $T_x$  και  $R_x$ , να πραγματοποιηθεί αντιστοιχισμένο φιλτράρισμα με σκοπό την μεγιστοποίηση του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR), να εξισορροπηστεί το σήμα για να μετριάσουν τα αποτελέσματα πολλαπλών καναλιών καθώς και να αποκτήσουμε συγχρονισμό χρονισμού και φάσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 Frequency Shift - Chirp Spread Spectrum

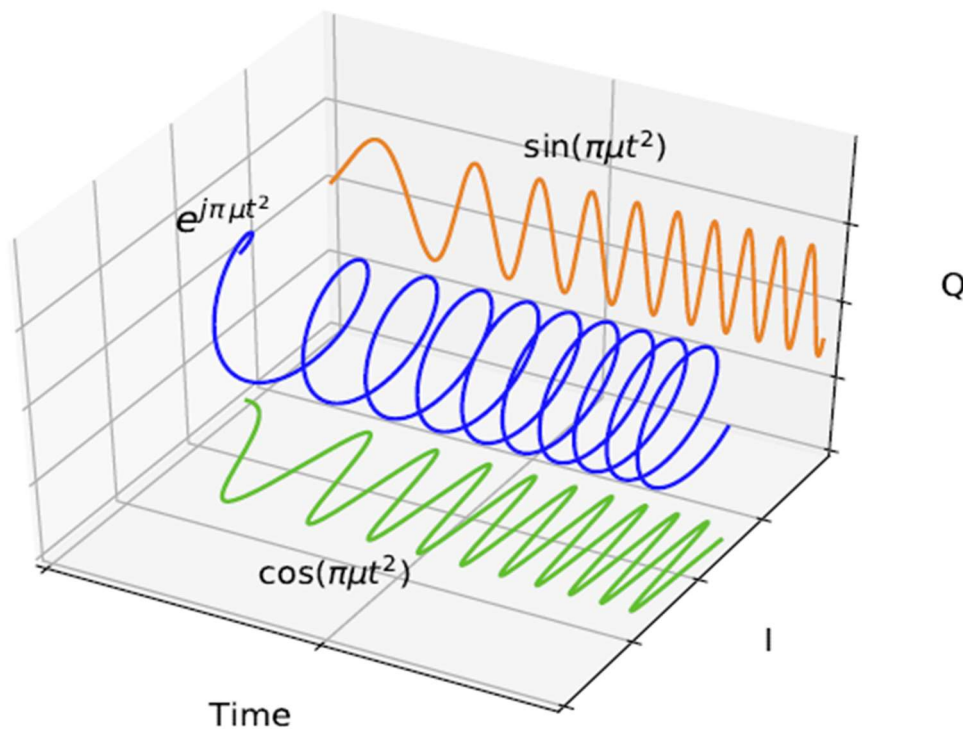
Από το προηγούμενο κεφάλαιο, έχοντας υπόψιν ένα βασικό μιγαδικό ημιτονοειδές που περιλαμβάνει στιγμιαία φάση, έχουμε την δυνατότητα να κινηθούμε προς ένα απλό chirp επεκτείνοντας το σε μία τετραγωνική στιγμιαία φάση δηλαδή :

$$x(t) = e^{j\pi\mu t^2} \text{ (ο λόγος πίσω από το παράγοντα } \pi \text{ εξηγείται παρακάτω)}$$

Αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Παρατηρείται ότι η φάση αντί να αλλάξει γραμμικά με την πάροδο του χρόνου, αλλάζει τετραγωνικά. Αυτός είναι ο λόγος όπου το σήμα φαίνεται να συμπιέζεται όλο και περισσότερο προς τα δεξιά. Από την σχέση του Euler, η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής :

$$e^{j\pi\mu t^2} = \cos(\pi\mu t^2) + j \sin(\pi\mu t^2)$$

το πραγματικό μέρος  $\cos(\pi\mu t^2)$  έχει την ιδιότητα να φαίνεται ως η προβολή του μιγαδικού ημιτονοειδούς στο πραγματικό επίπεδο. Παρόμοια την ίδια ιδιότητα κατέχει και το φανταστικό μέρος αλλά στο φανταστικό επίπεδο. Ότι προαναφέρθηκε σχηματίζεται παρακάτω που το πραγματικό επίπεδο είναι οι άξονες Time και I, ενώ το φανταστικό οι άξονες Time και Q.



Σχήμα 1 Ένα chirp με πραγματικά και φανταστικά σήματα

## Στιγμιαία Συχνότητα

Η γενική έκφραση για ένα απλό chirp, αγνοώντας πλάτος, φάση και συχνότητα γράφεται ως :

$$x(t) = e^{j(\pi\mu t^2 + 2\pi ft + \theta)} \quad (\text{Εξ.1})$$

Ο παράγοντας  $\pi$  για την ακρίβεια είναι  $2\pi$  πολλαπλασιασμένος με  $1/2$ . Αυτό γίνεται για την ομαλοποίηση του ρυθμού chirp ως την κλίση της στιγμιαίας συχνότητας του σήματος και ορίζεται ως η παράγωγος του ορίσματος .

$$v(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} (\pi\mu t^2 + 2\pi ft + \theta) = \mu t + f \quad (\text{Εξ.2})$$

Υπάρχουν τρεις παράμετροι στην στιγμιαία φάση όπου τροποποιώντας τις επηρεάζουν την μετάδοση πληροφοριών

1. Φάση  $\theta$
2. Συχνότητα  $\omega = 2\pi f$
3. Ρυθμός chirp  $\mu$

## Διαμόρφωση FS-CSS

Χρησιμοποιώντας μονάχα το τμήμα της συχνότητας, τα δεδομένα μπορούν να σταλούν μέσω ενός συνόλου  $M$  φάσεων  $f_m$ , όπου  $m = 0, 1, \dots, M-1$ .

Για  $M = 4$ , τέσσερα διαφορετικά σήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση 2 bit σε κανάλι (λόγω της σχέσης  $\log_2 4 = 2$ ) η Εξ.1 μπορεί να γραφτεί :

$$x(t) = e^{j(\pi\mu t^2 + 2\pi f_m t + \theta)} \quad (\text{Εξ.3})$$

Από την Εξ.2 η στιγμιαία συχνότητα ως παράγωγος της στιγμιαίας φάσης είναι ίση με :

$$v_m(t) = \mu t + f_m, \quad m = 0, 1, \dots, M-1 \quad \text{ή} \quad m = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2} - 1$$

Για  $M = 4$  και εντός πιθανού εύρους του εύρους ζώνης (Bandwidth)  $B$ , τέσσερις τέτοιες συχνότητες είναι τα πολλαπλάσια του  $f_1 = \frac{B}{M} = \frac{B}{4}$  και  $f_m = m f_1$  όπου το  $m = -2, -1, 0, 1$  (Εξ.4)

Μετατρέποντας την φάση σε bits για το παραπάνω παράδειγμα είναι η εξής :

$$f_{-2} = -2 f_1 = -\frac{B}{2} \rightarrow 00$$

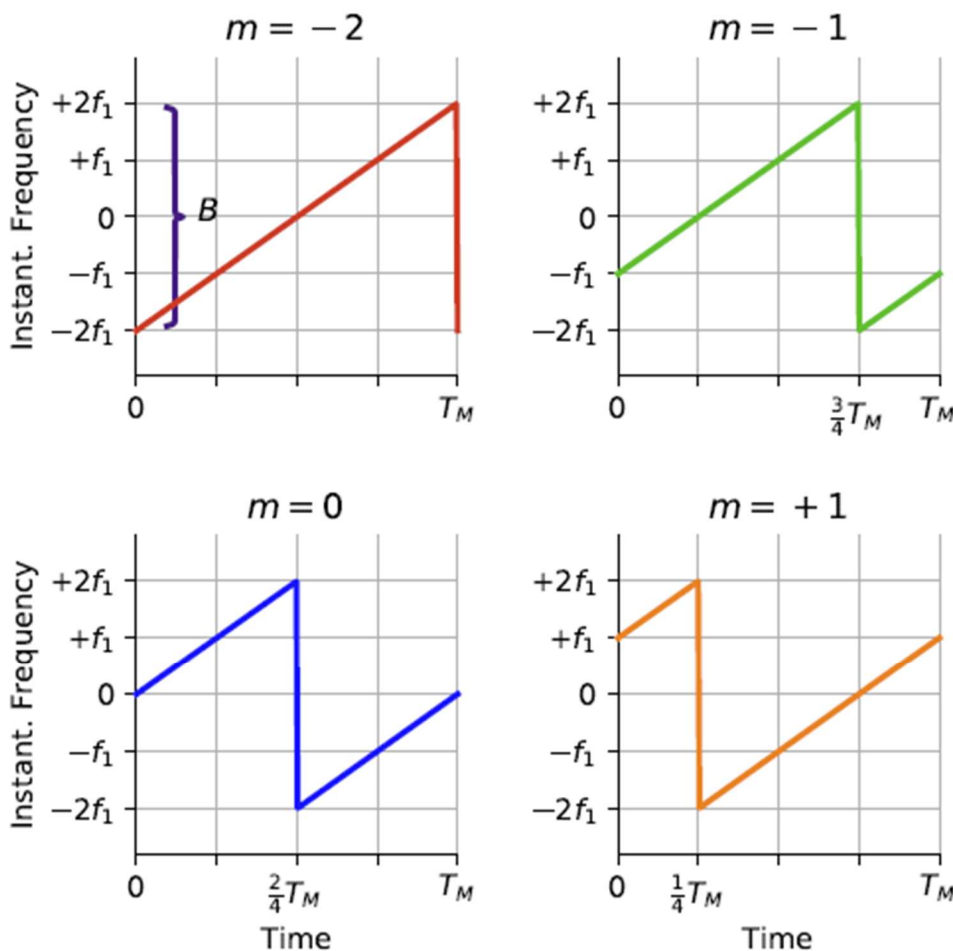
$$f_{-1} = -1 f_1 = -\frac{B}{4} \rightarrow 01$$

$$f_0 = 0 f_1 = 0 \rightarrow 10$$

$$f_{+1} = 1 f_1 = \frac{B}{4} \rightarrow 11$$

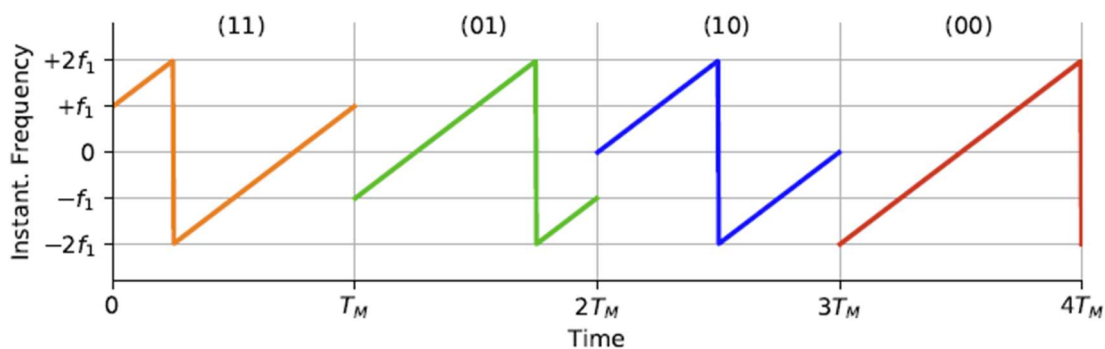
Οι τέσσερις πιθανές στιγμιαίες συχνότητες  $v_m(t) = \mu t + f_m$  αναπαρίστανται στο παρακάτω σχήμα. Συγκρίνοντας το με το σχήμα 4 του κεφαλαίου 2, γίνεται αντιληπτό γιατί αυτές οι συχνότητες  $M$  είναι γνωστές και ως φάσεις chirp. Παρατηρώντας τον άξονα  $y$ , αντιλαμβανόμαστε επίσης την ομοιότητα με την διαμόρφωση FSK. Επιπλέον παρατηρούνται τα παρακάτω.

- Όσον αφορά τους κύκλους ανά δευτερόλεπτο ή τα Hz, το εύρος συχνοτήτων μπορεί εύκολα να επαληθευτεί ως :  $-2f_1 = -\frac{B}{2}$  έως  $2f_1 = \frac{B}{2}$ .
- Ο ρυθμός μετάδοσης είναι το αντίστροφο μίας περιόδου  $T_M$  που είναι γνωστή ως χρόνος συμβόλου(symbol rate). Είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία αποστέλλονται ένα από όλα τα πιθανά σύμβολα διαμόρφωσης. Παρατηρείτε στο σχήμα 4 ότι η στιγμιαία φάση ορίζεται από πολλαπλάσια  $\frac{1}{M} = \frac{1}{4}$  του συμβόλου χρόνου  $T_M$  για κάθε πιθανό  $m$ .



Σχήμα 8 Στιγμιαία συχνότητα ως συνάρτηση του χρόνου για FS-CSS  $M = 4$  σύμβολα

- Παράδειγμα του σήματος που φέρει την ακολουθία bit 11 01 10 00 σχεδιάζεται στο παρακάτω σχήμα.
- Από την άποψη της κατασκευής του σήματος, αυτές οι στιγμιαίες συχνότητες είναι απλές κυκλικές μετατοπίσεις (με αριθμό ίσο με σύμβολο  $m$ ) ενός βασικού σήματος  $\mu t + f_0$ . Στο παρακάτω σχήμα, αναπαρίστανται τα τέσσερα σήματα του παραπάνω σχήματος το ένα πάνω στο άλλο. Αυτό βοηθάει στην κατασκευή των συμβόλων στο υλικό (hardware) μέσω αποτελεσματικών κυκλικών μετατοπίσεων.

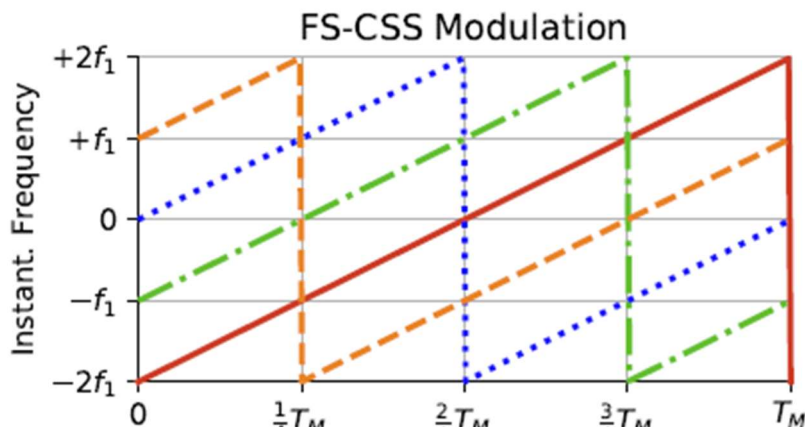


Σχήμα 9 Στιγμιαία συχνότητα vs χρόνος για Data bits

### Αποδιαμόρφωση FS-CSS

Στην πλευρά του δέκτη του σήματος, το ακατέργαστο τμήμα του chirp αγνοείται καθώς δε μεταφέρει πληροφορίες. Αυτό που υπομένει είναι η συχνότητα διαμόρφωσης και μία επιπρόσθετη φάση. Η Εξ.3 μετατρέπεται ως εξής:

$$e^{j(\pi\mu t^2 + 2\pi f_m t + \theta)} * e^{-j\pi\mu t^2} = e^{j(2\pi f_m t + \theta)} \quad (\text{Εξ.5})$$



Σχήμα 10 Διαμόρφωση FS-CSS ως κυκλική μετατόπιση ενός απλού σήματος



Η κλίση στο παραπάνω όρισμα μας αποκαλύπτει το σύμβολο δεδομένων τη στιγμή  $m$  που μπορεί στην συνέχεια να μεταφραστεί σε bit. Στις περισσότερες περιπτώσεις, λόγω της απλότητας των συσκευών που εφαρμόζουν το LoRa, απαιτεί αφαίρεση της φάσης  $\theta$  που προαναφέραμε χωρίς εκτίμηση, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας σύζευξη και απόλυτες τιμές. Βέβαια ένας δέκτης όπου έχει μια σταθερή σχέση φάσης με την πηγή, εκτιμά και αφαιρεί αυτή την φάση απευθείας ή μέσω ενός PLL (ατέρμονος βρόχος φάσης) σε μία τυπική αντιστάθμιση απόδοσης και πολυπλοκότητας. Η εύρεση αυτής της κλίσης  $f_m$  είναι το ίδιο πρόβλημα με την εύρεση ενός σύνθετου ημιτονοειδούς σε θόρυβο με αυθαίρετη φάση.

## 3.2 LoRa

Το LoRa είναι μια τεχνολογία επικοινωνίας που βασίζεται στην διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum σε συνδυασμό με Frequency Shift Keying. Είναι μια τεχνολογία φυσικού στρώματος που ανήκει στην εταιρία Semtech. Ο στόχος της τεχνολογίας αυτής είναι να επιτύχει υψηλή ποιότητα σύνδεσης σε εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος σε κανάλι πολλαπλής πρόσβασης. Κάποια από τα οφέλη του LoRa είναι:

- Αντίσταση στην εξασθένιση πολλαπλών διαδρομών και στο φαινόμενο Doppler
- Ανθεκτικότητα έναντι παρεμβολών στενής ζώνης και εμπλοκών
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος λόγω του σταθερού σήματος
- Υπολογιστικά απλή επεξεργασία σήματος
- Μεγάλη ακτίνα εμβέλειας (μετάδοσης και λήψης)

Λόγω των παραπάνω οφελών είναι μία δημοφιλής τεχνολογία σε υλοποιήσεις συστημάτων IoT που τροφοδοτούνται από μπαταρίες και δεν έχουν την ανάγκη για συνδεσιμότητα με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

### Φέρουσα συχνότητα

Στο LoRa η φέρουσα συχνότητα καθορίζεται από την κεντρική συχνότητα γύρω από διακυμάνσεις Chirp. Οι τιμές της μπορούν να κυμαίνονται από μερικές εκατοντάδες MHz έως περίπου 1 GHz.

### Εύρος Ζώνης

Το LoRa χρησιμοποιεί τρία διαφορετικά εύρη ζώνης: 125kHz, 250kHz και 500kHz.

### Spreading Factor (Παράγοντας Διάδοσης)

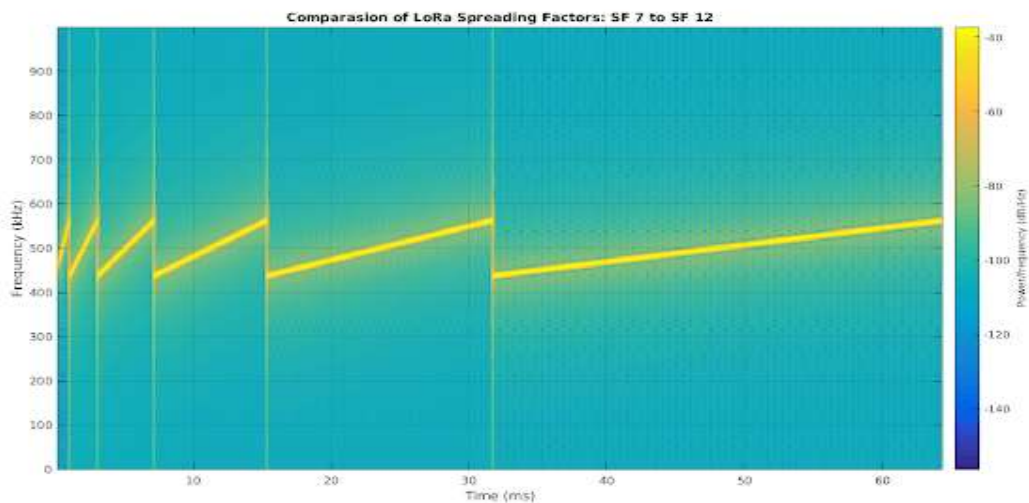
Στο LoRa, το spreading factor είναι ένας ρυθμιζόμενος παράγοντας που καθορίζει τον αριθμό των bits που αναπαρίστανται ανά σύμβολο και επιπλέον καθορίζει πόσο διασπαρμένη είναι η πληροφορία στο χρόνο. Πιο συγκεκριμένα το spreading factor μπορεί να ρυθμιστεί από 7 έως 12, με το 7 να αντιστοιχεί σε υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και χαμηλότερη ευαισθησία, ενώ το 12 αντιστοιχεί σε χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και υψηλότερη ευαισθησία.

Είναι μία ορολογία αρκετά μπερδεμένη, καθώς σε άλλες τεχνολογίες spread spectrum σχετίζεται με το εύρος ζώνης. Για παράδειγμα :

- Στο Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), είναι το μήκος της ακολουθίας διασποράς που αντικατοπτρίζει στον αριθμό των τσιπ για κάθε σύμβολο διαμόρφωσης
- Στο Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS), είναι ο αριθμός των φέρων συχνοτήτων στις οποίες μεταπηδά ένα σύμβολο διαμόρφωσης

Ενώ στο LoRa όπως προαναφέρομαι ορίζεται ως ο αριθμός δυαδικών ψηφίων ανά σύμβολο (υπάρχουν  $M$  δείγματα σε κάθε σύμβολο), κάθε σύμβολο LoRa μεταφέρει από 7 έως 12 bit για κάθε  $f_m = mf_1$  σε διάρκεια ενός Data σύμβολο TM.

$$M = 2^{SF} \text{ ή } SF = \log_2 M$$



Σχήμα 11 Διάγραμμα φασματικής πυκνότητας για SF7 έως SF12

Στο παραπάνω παράδειγμα τα σύμβολα LoRa παράγονται μέσω up-chirp με πλάτος ζώνης 125kHz και χρησιμοποιούνται διαφορετικά ορθογώνια (σχεδόν) spreading factors, ανάλογα με τις απαιτήσεις του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων και τις συνθήκες του καναλιού. Το LoRa χρησιμοποιεί παράγοντες διασποράς από 7 έως 12 όπου βρίσκονται στο παραπάνω σχήμα φασματικής πυκνότητας για διαφορετικούς spreading factors.

### Ρυθμός συμβόλων

Ο χρόνος μετάδοσης για καθένα από τα  $M$  πιθανά σήματα είναι ίσος με  $TM$  δευτερόλεπτα, ρυθμός συμβόλων ορίζεται ως  $RM$  όπου είναι η αντίστροφη τιμή αυτού του χρόνου. Δηλαδή  $RM = \frac{1}{TM}$ .

Έως τώρα έχει γίνει περιγραφή της στιγμιαίας συχνότητας, αλλά το σήμα έχει χτιστεί στηριγμένο στο βασικό chirp του σχήματος 7. Το σύμβολο με τη χαμηλότερη συχνότητά είναι με αυτό που την έχει ίση με  $2\pi f_1 t$  και ολοκληρώνει έναν πλήρη κύκλο σε διάρκεια  $TM$  (σήματα με συχνότητες ίσες με υψηλότερα πολλαπλάσια  $mf_1$  ολοκληρώνουν  $m$  κύκλους σε χρόνο  $TM$ ). Επομένως, βάση της Εξ.4 :

$$TM = \frac{1}{f_1} = \frac{M}{B} \text{ ή } B * TM = M \text{ (Εξ.6)}$$

## Ρυθμός Chirp

Ο ρυθμός chirp  $\mu$ , επιλέγοντας το παραπάνω σχήμα 8 για παράδειγμα. Θα πρέπει να επιλεγεί έτσι ώστε κάθε καμπύλη να εκτείνεται σε χρονικό διάστημα  $T_M$  σε εύρος ζώνης  $B$  και να επιστρέφει στην ίδια συχνότητα όπου ξεκινά. Αυτό βοηθά το σήμα στο να διατηρείται κάθε σύμβολο διακριθέν και να αποφεύγεται η παρεμβολή μεταξύ συμβόλων ISI. Επομένως, για  $\mu > 0$  το προκύπτον σήμα είναι up-chirp ενώ  $\mu < 0$  είναι down-chirp .

$$\mu = \frac{B}{T_M} \quad (\text{Εξ.7})$$

## Ρυθμός Tσιπ

Γενικά στα συστήματα Spread Spectrum, ο ρυθμός τσιπ ορίζεται ως ο ρυθμός συμβόλων που κλιμακώνεται από τον SF. Αυτό πρακτικά ορίζει το εύρος ζώνης του σήματος. Επομένως,  $R_c = B$ .

## 3.3 Ανίχνευση σήματος LoRa

Κατά την ανίχνευση του σήματος LoRa παρατηρείται πως, το σύμβολο διαμόρφωσης  $m$  εμφανίζεται με την συχνότητα  $f_m$  αλλά όχι με τον ρυθμό chirp  $\mu$ . Επομένως, συμβαίνει de-chirping δηλαδή αφαίρεση του τμήματος chirp. Στην πραγματικότητα αυτό συμβαίνει μέσω της επεξεργασίας σήματος. Εφόσον τα σύμβολα δεδομένων ορίζονται ως κυκλικές μετατοπίσεις ενός up-chirp, το down-chirping λειτουργεί ως μία διαδικασία 'ταιριαστού' φίλτρου στον δέκτη.

Έπειτα την διαδικασία de-chirping της κυματομορφής η εξίσωση ορισμού του σήματος συνεχούς χρόνου είναι η :  $x(t) = e^{j(2\pi f_m t + \theta)}$ .

Όμως με ρυθμό δειγματοληψίας κυματομορφής (αυστηρά περιορισμένος στο εύρος ζώνης  $B$  Hz όπως φαίνεται στο σχήμα 8). Από τις απότομες μεταβιβάσεις στις γραφικές παραστάσεις του σήματος με την πάροδο του χρόνου, το πραγματικό εύρος ζώνης είναι ευρύτερο από αυτό που προσεγγίζει το  $B$  μονάχα για ένα ασυμπτωτικά μεγάλο  $M$ . Ωστόσο λαμβάνεται το εύρος ζώνης του σήματος ως  $B$  με ένα λογικά μεγάλο αριθμό  $M$ . Ως συνέπεια, οι διαφορετικές κυματομορφές συμβόλων σε ένα δέκτη LoRa να μην είναι τελείως ορθογώνιες μεταξύ τους. Αυτό δεν είναι σοβαρό ζήτημα καθώς το LoRa στοχεύει να επιτύχει υψηλή ποιότητα σύνδεσης σε εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος και όχι σε βέλτιστο ρυθμό BER (Bit Error Rate).

Με ρυθμό δειγματοληψίας  $f_s = 1/T_s$  σε ίσα διαστήματα  $nT_s$  η παραπάνω εξίσωση ορίζεται ως :

$$x(nT_s) = e^{j(2\pi f_m nT_s + \theta)} \quad (\text{Εξ.8})$$

Βάση του θεωρήματος της δειγματοληψίας που θέτει όριο στον ρυθμό δειγματοληψίας  $f_s$ , εάν επιθυμούμε να αποφύγουμε την παραμόρφωση του σήματος σε ένα εύρος ζώνης  $B$ ,

$$f_s \geq 2B \text{ για πραγματικά σήματα}$$

$fs \geq B$  για πολύπλοκα σήματα

Εφόσον, έχουμε να κάνουμε με πολύπλοκα σήματα, επιλέγουμε τον χαμηλότερο δυνατό ρυθμό δειγματοληψίας  $fs$  ως:

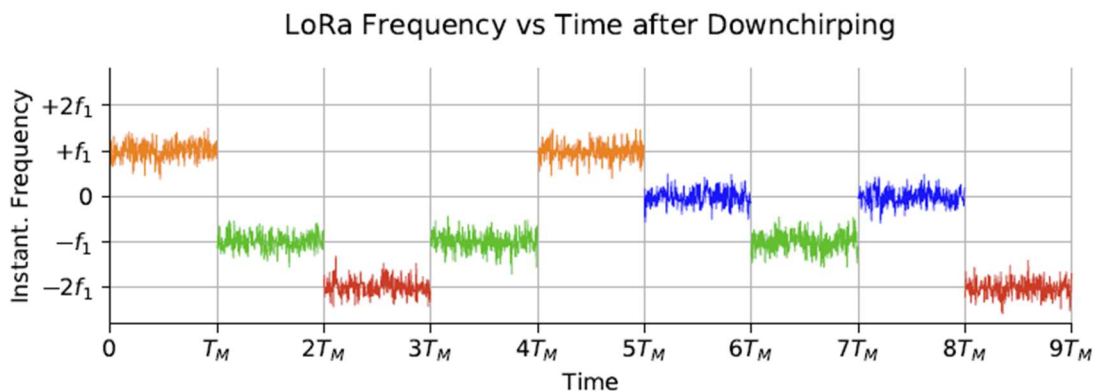
$$fs = 1/T_S = B \text{ και βάση της Εξ. 6 : } TM/T_S = M$$

Δηλαδή, ο δέκτης του σήματος συλλέγει  $M$  δείγματα ανά σύμβολο για κάθε σύμβολο χρόνου για την λήψη μίας απόφασης. Δηλαδή, ο δείκτης χρόνου  $n$  κυμαίνεται από 0 έως  $M-1$ .

Έχοντας υπόψιν την Εξ.8 και πως  $B = 1/T_S$  συνεπάγεται  $x(nT_S) = e^{j(2\pi f_m \frac{n}{B} + \theta)}$ , έπειτα από την Εξ.4 όπου  $f_1 = \frac{B}{M}$  και  $f_m = mf_1$ .

$$x(nT_S) = e^{j(2\pi m \frac{n}{B} + \theta)} = e^{j(2\pi m \frac{n}{M} + \theta)}, m = 0, 1, \dots, M \text{ ή } m = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2} - 1 \text{ (Εξ.9)}$$

Η παραπάνω εξίσωσή στην ουσία ορίζει ένα σύνθετο ημιτονοειδές σήμα με πλάτος  $A$ , φάση  $\theta$  και συχνότητα  $m/M$ . Ο δέκτης πρέπει να 'μαντέψει' ποιο  $m$  επιλέχθηκε από τον πομπό από όλες τις  $M$  πιθανές επιλογές. Ένα παράδειγμα ενός down-chirped LoRa για μία σταθερή συχνότητα  $m$  για κάθε σύμβολο χρόνου απεικονίζεται παρακάτω.



Σχήμα 12 Σήμα LoRa έπειτα απο down-chirping

Με τις παραπάνω διαδικασίες κάναμε εφικτή την αναπαραγωγή της παραπάνω εξίσωσης με μετασχηματισμό Fourier (DFT). Επιτυγχάνοντας έτσι, τον υπολογισμό των πολλαπλάσιων δείγμα προς δείγμα του σήματος με μπλοκ  $M$  ημιτόνων.

$$e^{j2\pi \frac{m}{M}n} * e^{-j2\pi \frac{k}{M}n} = \begin{cases} 1, m = k \\ 0, \text{διαφορετικά} \end{cases}$$

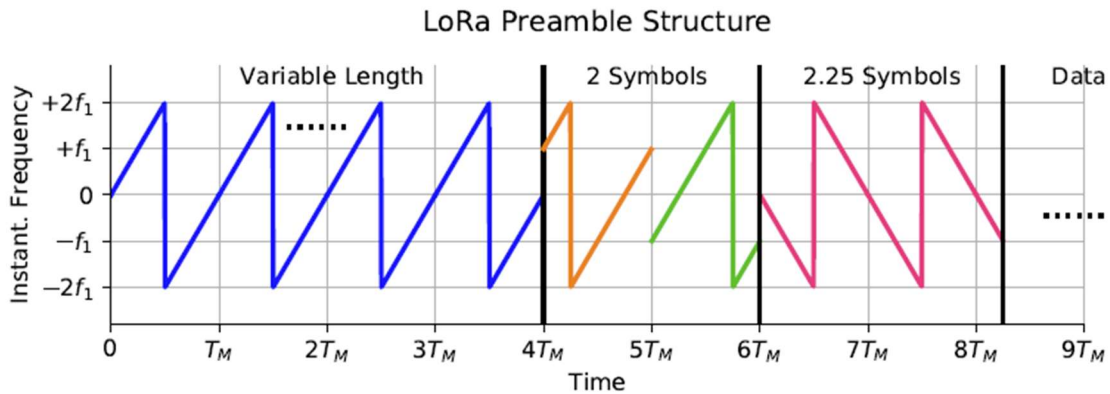
Βάση του παραπάνω ορισμού και της Εξ.9 συνεπάγεται ό,τι :

$$\begin{aligned} X[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} e^{j(2\pi \frac{m}{M}n + \theta)} \cdot e^{-j2\pi \frac{k}{M}n} \\ &= e^{j\theta} \sum_{n=0}^{N-1} 1 = M e^{j\theta} \end{aligned}$$

Ιδανικά, ο DFT του de-chirped σήματος θα έχει μονάχα έναν μη μηδενικό στοιχείο στο bin  $k = m$ , δηλαδή στην θέση του συμβόλου διαμόρφωσης. Στην πραγματικότητα, συγκρίνουμε όλες τις εξόδους DFT για όλα τα bins όπου κυμαίνονται στις τιμές από  $k = -\frac{M}{2}, \dots, \frac{M}{2} - 1$  και επιλέγουμε αυτό με το μεγαλύτερο μέγεθος για να το ορίσουμε  $m$ . Στην συνέχεια γνωρίζοντας το  $m$  το μεταφράζουμε σε μία ακολουθία bits. Επιπρόσθετα λόγω της απλότητας των πράξεων, ταχύτητας και αποτελεσματικότητας πλέον επιλύουμε με FFT χωρίς αλλοίωση αποτελέσματος.

### 3.4 Συγχρονισμός

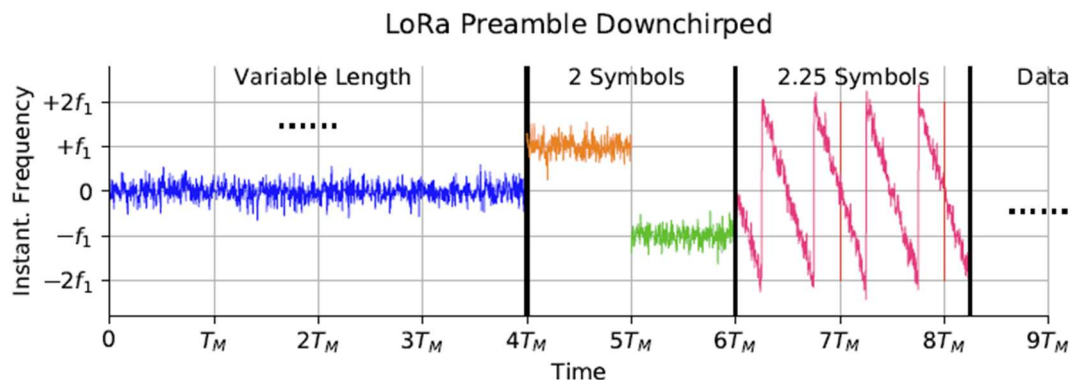
Στην περίπτωση που δοθεί λάθος παράθυρο δειγμάτων στην είσοδο FFT, η ενέργεια του συμβόλου θα διαιρεθεί μεταξύ δύο FFT, αυξάνοντας έτσι τον BER. Ο εντοπισμός του αρχικού δείγματος είναι μια διαδικασία που χειρίζεται ένα μπλοκ συγχρονισμού όπου εκμεταλλεύεται την ιδιαίτερη δομή της κυματομορφής LoRa. Σκοπός είναι να προσδιοριστεί ένα έγκυρο σήμα από διαφορετικά δείγματα θορύβου που υπάρχουν. Για να μας βοηθήσει σε αυτό το σήμα ξεκινά με μαζικά μη διαμορφωμένα up-chirps ( $\mu = +\frac{B}{TM}$ ) ως προοίμιο. Αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα όπου το μεταβλητό μήκος κυμαίνεται από 6 – 65535 (λόγω του τεράστιου του εύρους επιτρέπει την ανίχνευση προοιμίου ακόμη και σε χαμηλά SNR). Έπειτα ακολουθείται από 2 σύμβολα με προκαθορισμένη διαμόρφωση και στην συνέχεια με 2,25 σύμβολα down-chirps. Η παραπάνω δομή εξυπηρετεί στην ανίχνευση ενός σήματος LoRa καθώς και στον συγχρονισμό πλαισίων, συχνότητας και χρονισμού.



Σχήμα 13 Δομή προοίμιου LoRa

Η πιο απλή στρατηγική για την επίλυση του προβλήματος συγχρονισμού είναι ο διαχωρισμός του εισερχόμενου σήματος σε down-chirp και up-chirp και ο υπολογισμός των γινομένων χωριστά.

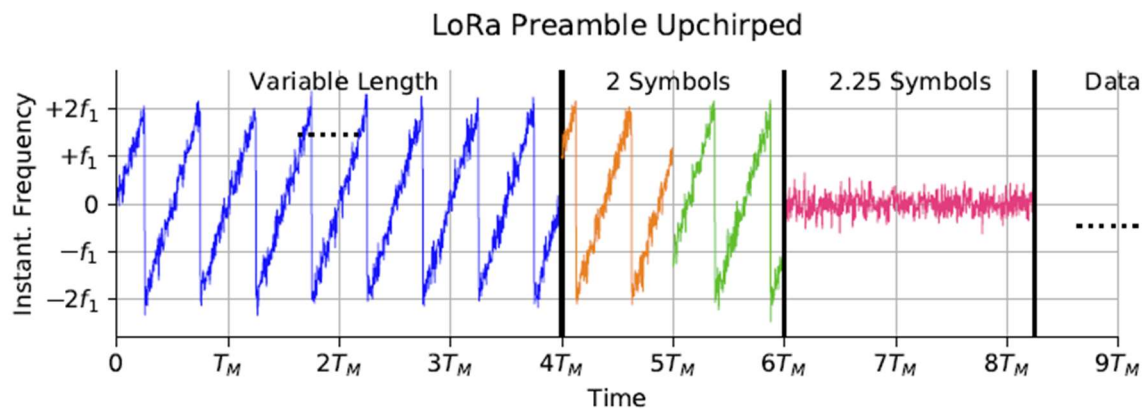
Ο πολλαπλασιασμός του σήματος με down-chirp ( $\mu = -\frac{B}{T_M}$ ) πραγματοποιείται για την ανίχνευση της παρουσίας του προοίμιου. Αυτό ακυρώνει τα up-chirp για όλα τα σύμβολα εκτός από τα σύμβολα μήκους 2,25 down-chirp που υπάρχει στο προοίμιο όπως φαίνεται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14 Προοίμιο LoRa μετά το down-chirping

Μόλις εντοπιστεί το προοίμιο, το επόμενο βήμα είναι να εντοπιστεί το ακριβές δείγμα ως αρχικό ευρετήριο στην είσοδο FFT για την ανίχνευση των συμβόλων. Αυτό γίνεται με έναν SFD. Όπως και φαίνεται στο Σχήμα 15, μια απλή λύση για να επισημανθεί το

όριο SFD είναι να πολλαπλασιάσει το προοίμιο με ένα up-chirp ( $\mu = +\frac{B}{T_M}$ ) που ακυρώνει τα down-chirps στο τέλος του προοιμίου και δημιουργεί μια (ιδανική) σταθερή συχνότητα.



Σχήμα 15 Προοίμιο LoRa μετά το up-chirping

Το FFT αυτού του de-chirped τμήματος του σήματος μπορεί να ληφθεί για ένα παράθυρο  $M$  δειγμάτων ως συνήθως, ας ορίσουμε έναν αριθμό δείγματος  $n$  έως  $n + M - 1$ . Ωστόσο, αντί να μετατοπιστεί σε ολόκληρο το μπλοκ των επόμενων  $M$  δειγμάτων από  $n + M$  έως  $n + 2M - 1$ , η είσοδος FFT είναι το παράθυρο δειγμάτων από  $n + 1$  έως  $n + M$ . Αυτό είναι υπολογιστικά ακριβό αφού κάθε δείγμα συμμετέχει σε πολλαπλές λειτουργίες FFT. Ωστόσο, μόλις αναγνωριστεί η ακριβής έναρξη του πρώτου σύμβολου δεδομένων μέσω του ορίου SFD, ο δέκτης μπορεί να επιστρέψει στην κανονική λειτουργία των μπλοκ προς μπλοκ FFT που αντιστοιχούν στα LoRa σύμβολα. Ένας βρόχος ανάκτησης ρολογιού μπορεί στη συνέχεια να αποτρέψει αυτό το παράθυρο από το να γλιστρήσει μακριά από τη σταδιακή συσσώρευση σφαλμάτων συγχρονισμού λόγω μετατόπισης του ρολογιού. Τα down-chirps αποδεικνύονται επίσης χρήσιμα για τη συχνότητα συγχρονισμού μέσω πολλών αλγορίθμων τύπου OFDM. Λάβετε υπόψη ότι αυτές οι τεχνικές συγχρονισμού είναι απλές από αλγοριθμική άποψη αλλά δαπανηρή από υπολογιστική άποψη.

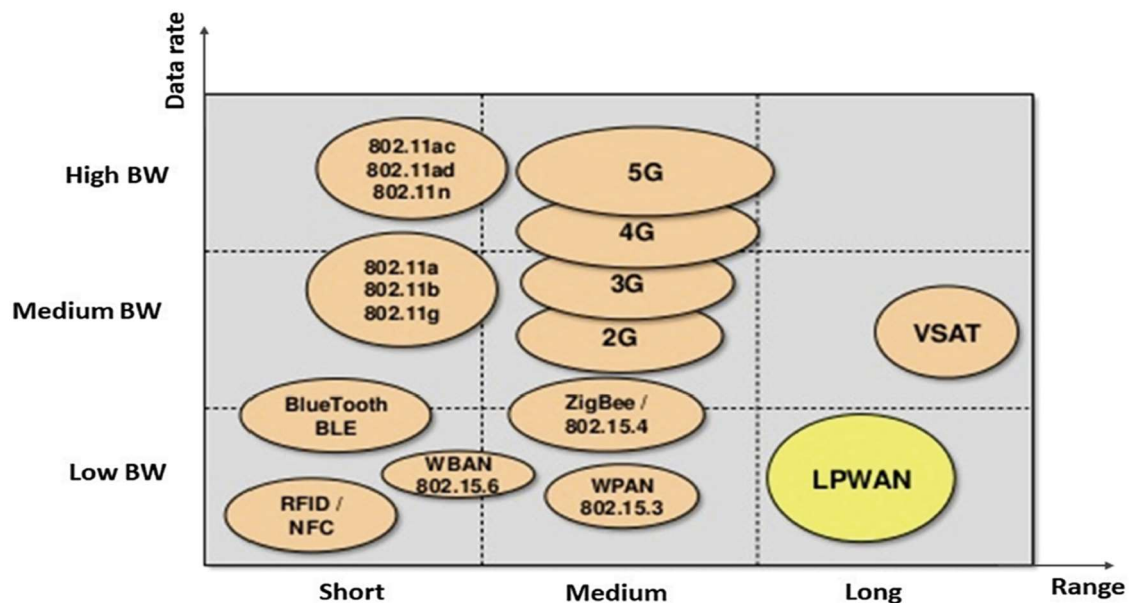
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Γιατί LoRa ;

Για το πλήρες δομημένο δίκτυο σταθμών φόρτισης θέλουμε έναν τρόπο διασύνδεσης όπου να διαθέτει ικανοποιητικό bandwidth και να έχει μεγάλη εμβέλεια . Θα μπορούσαμε να επιλέξουμε 5G ή LTE αλλά οι συγκεκριμένες τεχνολογίες ενώ έχουν ικανοποιητική εμβέλεια και αρκετά μεγάλες ταχύτητες , καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας .

Description	LoRa	SigFox	NB-IoT
Coverage	Urban: 5 km Rural: 20 km	Urban: 10 km Rural: 40 km	Urban: 1 km Rural: 10 km
Frequency Band	Unlicensed	Unlicensed	Licensed LTE Bands
Maximum Data Rate	50 kbps	100 bps	200 kbps
Battery Life	20 years	10 years	10 years
Standardization	LoRa Alliance	SigFox and ETSI	3GPP

Πίνακας 1 Συγκρίσεις μεταξύ LoRa, Sigfox και NB-IoT



Σχήμα 16 Διάγραμμα Data rate vs Απόσταση για τα LPWANS



Προτιμάμε LoRa επειδή είναι δωρεάν και δεν υπάρχουν επιβαρύνσεις από παρόχους (όπως κινητής τηλεφωνίας) .Η εμβέλεια δικτύου είναι ικανοποιητικά μεγάλη, για αστικές περιοχές έως 5km και για αγροτικές περιοχές έως 15km (κάποιες άλλες πηγές αναφέρουν 20km) . Οι αποστάσεις αυτές είναι ιδανικές, οπότε στην εφαρμογή μας θεωρούμε ότι η ιδανική εμβέλεια του δικτύου για ικανοποιητικές ταχύτητες για τα drones και τις βάσεις είναι για αστικές περιοχές έως 3km και για αγροτικές περιοχές έως 10km. Θα μπορούσαμε αναφέρουμε και το SigFox που έχει περίπου την διπλή εμβέλεια αλλά σε σύγκριση με τον LoRa για την υλοποίηση της εφαρμογής μας είναι σαφώς χειρότερο . Το SigFox καταναλώνει παραπάνω ενέργεια και έχει πολύ μικρές τιμές Data Rate συγκριτικά με το LoRa .

Το LoRa εν συντομία παρέχει ένα σημαντικά μεγαλύτερο εύρος επικοινωνίας με χαμηλό εύρος ζώνης από άλλες ανταγωνιστικές τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης δεδομένων.

Mode	Equivalent bit rate (kbps)	Sensitivity (dBm)	$\Delta$ (dB)
FSK	1,2	-122	-
LoRa SF = 12	0,293	-137	+15
LoRa SF = 11	0,537	-134,5	+12,5
LoRa SF = 10	0,976	-132	+10
LoRa SF = 9	1757	-129	+7
LoRa SF = 8	3125	-126	+4
LoRa SF = 7	5468	-123	+1
LoRa SF = 6	9375	-118	-3

Πίνακας 2 Προδιαγραφές συντελεστών διασποράς

## Πίνακας χαρακτηριστικών για πολλαπλά LPWANs

Feature	LoRa	SigFox	LTE-M Rel 14	NB-IoT (NB-LTE) Rel 14	Ingenu RPMA	Weightless- W	Weightless- N	Weightless- P
Modulation	CSS	GFSK, BPSK	QPSK, 16 QAM	QPSK, BPSK	RPMA	OQPSK, QAM	DBPSK	PSK, GMSK
Maximum data rate, DL/UL	50 kbps / 250 bps	256 b/day / 100 bps or 600bps (depends on country regulations)	590 / 1100 kbps (HD CAT-M1) 2.35 / 1.5 Mbps (HD CAT-M2)	27 / 65 kbps (CAT-NB1) 85 / 150 kbps (CAT-NB2)	156 / 624 kbps	1 Mbps / 50 kbps	Only UL: 100 kbps	100 / 100 kbps
Frequency	Unlicensed ISM bands 869 MHz (Europe) and 915 MHz (North America)	Unlicensed ISM bands 869 MHz (Europe) and 915 MHz (North America)	20-1,4 MHz	Licensed LTE 200 MHz	2.4 GHz	470 - 790MHz	800-900 MHz	169 - 923MHz
Bandwidth	250kHz and 125 kHz	100Hz	5 MHz	180kHz	1 MHz	6-8 MHz	200 Hz	12,5 kHz
Range	5 (urban) 15 km (rural)	10 km (urban) 30 km (rural)	10 km	15 km	5 km (urban) 15 km (rural)	5 km (urban)	3 km (urban)	2 km (urban)
Coverage (MCL)	157 dB	150 dB	164 dB	164 dB	177 dB	148 dB	148 dB	134 dB
Transmit power	20dBm	20dBm	20dBm	23dBm	30 dBm	27 dBm (up to 30 dBm)	27 dBm	27 dBm
Standardization	LoRa Alliance	SigFox Inc.	3GPP	3GPP	Ingenu Inc.	Weightless SIG		

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά LPWANs

## Τύποι πακέτων LoRa

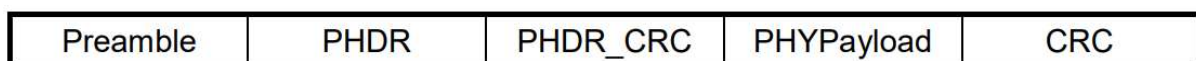
Το LoRa χρησιμοποιεί δύο τύπους μορφών πακέτων για τη μετάδοση δεδομένων: σαφή και ασαφή.

Στη σαφή λειτουργία, ένα πακέτο LoRa περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Το Preamble χρησιμοποιείται για τον συγχρονισμό του δέκτη με τον πομπό. Πρέπει να αποτελείται από 8 σύμβολα. Ωστόσο, ο πομπός θα προσθέσει άλλα 4,25 σύμβολα με αποτέλεσμα ένα τελικό προοίμιο μήκους  $8 + 4,25 = 12,25$  συμβόλων.
- Το PHDR (Physical Header) είναι ένα προαιρετικό στοιχείο που υπάρχει μόνο στη σαφή μορφή πακέτων και περιέχει πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος ωφέλιμου φορτίου και το CRC.
- Το PHDR\_CRC (Header CRC) είναι ένα προαιρετικό πεδίο που περιέχει έναν κωδικό ανίχνευσης σφαλμάτων για τη διόρθωση σφαλμάτων στην κεφαλίδα.
- Το PHYPayload περιέχει το πλήρες πλαίσιο που δημιουργείται από το επίπεδο MAC. Το μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου ποικίλλει ανάλογα με το DR (Data Rate).
- Το CRC είναι ένα προαιρετικό πεδίο που περιέχει έναν κωδικό ανίχνευσης σφαλμάτων για τη διόρθωση σφαλμάτων στο ωφέλιμο φορτίο των μηνυμάτων uplink (για LoRaWAN).

Το PHYPayload και το CRC κωδικοποιούνται με ένα από τα ποσοστά κωδικοποίησης (4/5, 4/6, 4/7 ή 4/8). Στη συνέχεια, το πλήρες πλαίσιο αποστέλλεται χρησιμοποιώντας έναν από τους Συντελεστές Διασποράς (SF = 7 έως 12).

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η μορφή ενός uplink πακέτου.



Εικόνα 2 Πακέτο Uplink

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η μορφή ενός downlink πακέτου.



Εικόνα 3 Πακέτο Downlink

Στην ασαφή λειτουργία, η κεφαλίδα αφαιρείται από το πακέτο όπου το μέγεθος ωφέλιμου φορτίου και ο ρυθμός κωδικοποίησης είναι σταθερός ή γνωστός εκ των προτέρων. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τη δομή ενός πακέτου LoRa που χρησιμοποιεί την ασαφή λειτουργία.



Εικόνα 4 Πακέτο LoRa ασαφής λειτουργίας

## Παράμετροι LoRaWAN ανά Ήπειρο

Το LoRaWAN ανάλογα σε ποια χώρα και ήπειρο βρίσκεσαι λειτουργεί σε συγκεκριμένο ραδιοφάσμα χωρίς άδεια .Αυτό σημαίνει ότι ο καθένας με τον κατάλληλο εξοπλισμό μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις ραδιοσυχνότητες χωρίς να απαιτείται να πληρώσει τέλη εκατομμύριων ευρώ για τα δικαιώματα της μετάδοσης .Παρόμοια όπως και το WiFi ,το οποίο χρησιμοποιεί τις ζώνες ISM 2,4 GHz και 5 GHz παγκοσμίως ,δηλαδή οποιοσδήποτε μπορεί να ρυθμίσει δρομολογητές WiFi και να μεταδώσει σήματα WiFi χωρίς την ανάγκη άδειας ή εξουσιοδότησης.

Το LoRaWAN χρησιμοποιεί χαμηλές ραδιοσυχνότητες με την μεγαλύτερη εμβέλεια .Το γεγονός αυτό συνοδεύεται επίσης και με του περισσότερους περιορισμούς που αφορούν κυρίως την χώρα όπου θέλουμε να το χρησιμοποιήσουμε. Αυτό αποτελεί πρόκληση για το LoRaWAN , όπου σκοπός του είναι η ομοιομορφία σε όλες τις διαφορετικές περιοχές του κόσμου .Ως αποτέλεσμα ,το LoRaWAN καθορίζεται για έναν συγκεκριμένο αριθμό ζωνών ανάλογα την περιοχή ,βέβαια αυτές οι ζώνες είναι αρκετά παρόμοιες ώστε να υποστηρίζουν ένα πρωτόκολλο αγνωστικοποίησης περιοχής .Ο διαχωρισμός αυτός όμως προκαλεί μία σειρά από συνέπειες για την υλοποίηση των συστημάτων υποστήριξης του LoRaWAN. . Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει τα πιο πρόσφατα σχέδια.

Σχέδιο καναλιού	Όνομα καναλιού
EU863-870	EU868
US902-928	US915
CN779-787	CN779
EE433	EE433
AU915-928	AU915
CN470-510	CN470
AS923	AS923
KR920-923	KR920
IN865-867	IN865
RU864-870	RU864

Πίνακας 4 Συχνότητες LoRaWAN ανά ήπειρο

Το LoRaWAN έχει ορισμένες επίσημες τοπικές προδιαγραφές ,όπου ονομάζονται τοπικές παράμετροι και τις έχει ορίσει το LoRa Alliance για την διασφάλιση της διαλειτουργικότητας μεταξύ των συσκευών και των δικτύων . Οι τοπικές αυτές παράμετροι περιλαμβάνουν παράμετρούς φυσικού επιπέδου ,όπως σχέδια καναλιού ,υποχρεωτικές συχνότητες καναλιών και ρυθμούς δεδομένων για αιτήματα σύνδεσης ,επίσης περιλαμβάνουν και παράμετρούς επιπέδου LoRaWAN ,όπως το μέγιστο μέγεθος ωφέλιμου φορτίου .Σε ορισμένες περιοχές ενδέχεται να χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα σχέδια καναλιού .Για παράδειγμα ,στην Ελλάδα ,μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το κανάλι EU868 όσο και το EE433 .Το LoRaWAN δραστηριοποιείται όπως αναφέραμε και παραπάνω σε ζώνες ISM.

### *EU863-870*

Η ζώνη EU863-870 μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περιοχή όπου η χρήση του ραδιοφάσματος ορίζεται από το πρότυπο ETSI[EN300.220] .Χρησιμοποιείται σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες και σε ορισμένες εκτός Ευρώπης . Η ζώνη EU863-870 υποδηλώνει ότι η ζώνη συχνοτήτων κυμαίνεται από 863MHz – 870 MHz ,βέβαια ορισμένες χώρες χρησιμοποιούν ελαφρώς διαφορετικές περιοχές συχνοτήτων .Για παράδειγμα η Αλβανία χρησιμοποιεί το εύρος 863-873 MHz.

### *Προεπιλεγμένα κανάλια EU863-870*

Σε κάθε τελική συσκευή που υποστηρίζει την ζώνη EU863-870 απαιτείται να εφαρμοστούν τα ακόλουθα τρία προεπιλεγμένα κανάλια .Αυτά τα κανάλια χρησιμοποιούνται από την τελική συσκευή για την μετάδοση του μηνύματος αίτησης για συμμετοχή . Η τελική συσκευή επιλέγει τυχαία ένα από τα προεπιλεγμένα κανάλια για να στείλει το προαναφερόμενο μήνυμα .

Συχνότητα καναλιού (MHz)	Εύρος ζώνης (kHz)	Ρυθμός δεδομένων LoRa	Ρυθμός bit (kbps)
868,10	125	DR0-DR5	0,3-5
868,30	125	DR0-DR5	0,3-5
868,50	125	DR0-DR5	0,3-5

*Πίνακας 5 Προεπιλεγμένα κανάλια LoRaWAN στην ζώνη EU863-870*

Για τις συσκευές συμβατές με την έκδοση LoRaWAN 1.0.x ,αυτά τα τρία κανάλια δεν είναι δυνατόν να τροποποιηθούν ,αλλά για τις συσκευές όπου είναι συμβατές με την έκδοση LoRaWAN 1.1 και τις μεταγενέστερης από αυτήν ,έχουμε την δυνατότητα μέσω της εντολής NewChannelReq να τροποποιήσουμε τα προαναφερθέντα κανάλια .

Η ζώνη EU863-870 υποστηρίζει έως και δεκαέξι κανάλια .Κατά την ενεργοποίηση της τελικής συσκευής ενδέχεται να καθοριστούν και επιπρόσθετα κανάλια . Για παράδειγμα ,το The Things Network χρησιμοποιεί τις ακόλουθες πέντε συχνότητες για uplink.

1. 867,1 MHz
2. 867,3 MHz
3. 867,5 MHz
4. 867,7 MHz
5. 867,9 MHz

Ενώ για downlink , το The Things Network χρησιμοποιεί μια επιπλέον σταθερή συχνότητα για την υποδοχή λήψης RX2 : 867,525 MHz σε DR0(SF12 / 125 kHz) .

### *Μέγιστος κύκλος λειτουργίας EU863-870*

Το ευρωπαϊκό ινστιτούτο τηλεπικοινωνιακών προτύπων (ETSI) ορίζει τον μέγιστο κύκλο λειτουργίας για την συχνότητα EU863-870 στον 1% ,που είναι ο μέγιστος χρόνος επικοινωνίας μίας συσκευής . Ο τρόπος υπολογισμού του επιτρεπόμενου χρόνου στον αέρα ανά ημέρα (24 ώρες) είναι ο εξής :

Κύκλος λειτουργίας	Εξίσωση : χρόνος στον αέρα = αριθμός " ανά ημέρα X κύκλος λειτουργίας	Μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος στον αέρα ανά ημέρα ,ανά συσκευή
0,1%	86400 x 0,1 %	86,4" την ημέρα
1%	86400 x 1 %	864" την ημέρα
10%	86400 x 10 %	8640" την ημέρα

Να σημειωθεί ότι ορισμένοι φορείς εκμετάλλευσης δικτύου όπως το The Things Network μειώνουν τον κύκλο λειτουργίας περισσότερο από ότι συνιστά το ETSI . Αυτοί οι τύποι περιορισμών εντάσσονται στην πολιτική δίκαιης πρόσβασης του The Things Network και περιορίζει τον χρόνο του uplink σε 30" ανά ημέρα ανά κόμβο και τα μηνύματα downlink σε δέκα μηνύματα ανά ημέρα ανά κόμβο.

### *Το LoRaWAN είναι πλέον ένα πρότυπο ITU.*

Όπως ανακοινώθηκε από την LoRa Alliance στις 7 Δεκεμβρίου 2021, το LoRaWAN® έχει εγκριθεί επίσημα ως πρότυπο για δικτύωση ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN) από την ITU.

## Γιατί LoRaWAN ;

- Εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος : Οι τελικές συσκευές LoRaWAN είναι βελτιστοποιημένες για να λειτουργούν σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης και μπορούν να διαρκέσουν έως και 10 χρόνια με μία μπαταρία.
- Μεγάλη εμβέλεια : Οι πύλες LoRaWAN μπορούν να μεταδίδουν και να λαμβάνουν σήματα σε απόσταση άνω των 10 χιλιομέτρων σε αγροτικές περιοχές και έως 3 χιλιομέτρων σε πυκνές αστικές περιοχές.
- Εξαιρετική κάλυψη δικτύου σε εσωτερικούς χώρους : Τα δίκτυα LoRaWAN μπορούν να παρέχουν βαθιά κάλυψη εσωτερικών χώρων και να καλύπτουν εύκολα πολυώροφα κτίρια.
- Φάσμα χωρίς άδεια χρήσης : Δεν χρειάζεται να πληρώσετε ακριβά τέλη άδειας χρήσης φάσματος συχνοτήτων για να αναπτύξετε ένα δίκτυο LoRaWAN.
- Γεωγραφική τοποθεσία - Ένα δίκτυο LoRaWAN μπορεί να προσδιορίσει τη θέση των τελικών συσκευών χρησιμοποιώντας τριγωνισμό χωρίς την ανάγκη GPS. Μια τερματική συσκευή LoRa μπορεί να εντοπιστεί εάν τουλάχιστον τρεις πύλες λάβουν το σήμα της.
- Υψηλή χωρητικότητα - Οι διακομιστές δικτύου LoRaWAN χειρίζονται εκατομμύρια μηνύματα από χιλιάδες πύλες.
- Δημόσιες και ιδιωτικές αναπτύξεις : Είναι εύκολο να αναπτύξετε δημόσια και ιδιωτικά δίκτυα LoRaWAN χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό (πύλες, τελικές συσκευές, κεραίες) και λογισμικό (προωθητές πακέτων UDP, λογισμικό Βασικού σταθμού, στοίβες LoRaWAN για τελικές συσκευές).
- Ασφάλεια στο δίκτυο από άκρο σε άκρο : Το LoRaWAN διασφαλίζει ασφαλή επικοινωνία μεταξύ της τελικής συσκευής και του διακομιστή εφαρμογών χρησιμοποιώντας κρυπτογράφηση AES-128.
- Ενημερώσεις υλικολογισμικού over the air : Υπάρχει η δυνατότητα ενημέρωσης εξ αποστάσεως το υλικολογισμικό (εφαρμογές και τη στοίβα LoRaWAN) για μία μόνο τελική συσκευή ή ομάδα τελικών συσκευών.
- Περιαγωγή : Οι τελικές συσκευές LoRaWAN μπορούν να πραγματοποιούν απρόσκοπτη μεταβίβαση από το ένα δίκτυο στο άλλο.
- Χαμηλό κόστος : Ελάχιστη υποδομή, χαμηλού κόστους τερματικοί κόμβοι και λογισμικό ανοιχτού κώδικα.
- Πρόγραμμα πιστοποίησης : Το πρόγραμμα πιστοποίησης LoRa Alliance πιστοποιούν τις τελικές συσκευές και παρέχει στους τελικούς χρήστες τη σιγουριά ότι οι συσκευές είναι αξιόπιστες και συμβατές με τις προδιαγραφές LoRaWAN.

- Μεγάλη γκάμα κατασκευαστών και παρόχων : Το LoRaWAN διαθέτει ένα πολύ μεγάλο οικοσύστημα κατασκευαστών συσκευών, κατασκευαστών πυλών, κατασκευαστών κεραιών, παρόχων υπηρεσιών δικτύου και προγραμματιστών εφαρμογών.



*Εικόνα 5 Λογότυπο LoRaWAN*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1 Arduino

Το arduino είναι υλισμικό ανοικτής πηγής με ενσωματωμένο μικροελεγκτή και εισόδους/εξόδους. Μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα Wiring το οποίο είναι επι της ουσίας, η γλώσσα προγραμματισμού C++ σε συνδυασμό με ένα σύνολο από βιβλιοθήκες, υλοποιημένες επίσης στην C++. Οι ιδρυτές του Arduino ήταν οι Massimo Banzi και David Cueartielles οι οποίοι ονόμασαν το σχέδιο από τον Αρντούινο της Ιβρέας και ξεκίνησαν να παράγουν πλακέτες σε ένα μικρό εργοστάσιο στην Ιβρέα, κωμόπολη της επαρχίας Τορίνο στην περιοχή Πεδεμόντιο της βορειοδυτικής Ιταλίας. Ο σκοπός δημιουργίας του ήταν λόγω της ανάγκης για μία συσκευή η οποία θα χρησιμοποιούνταν για τον έλεγχο προγραμμάτων διαδραστικών σχεδίων από μαθητές και θα ήταν πιο φθηνή από άλλα πρωτότυπα συστήματα διαθέσιμα εκείνη την περίοδο.

#### Υλικό (Hardware)

Μία πλακέτα Arduino αποτελείται από ένα μικροελεγκτή Atmel AVR και κάποια άλλα εξαρτήματα με σκοπό να διευκολυνθεί ο χρήστης στον προγραμματισμό και την ενσωμάτωσή του σε άλλα κυκλώματα. Όλες οι πλακέτες περιλαμβάνουν ένα γραμμικό ρυθμιστή τάσης 5V και έναν κρυσταλλικό ταλαντωτή 16MHz. Ο μικροελεγκτής είναι προγραμματισμένος με ένα bootloader, έτσι ώστε να μην χρειάζεται εξωτερικός προγραμματιστής.

Σε εννοιολογικό επίπεδο, στην χρήση του Arduino software stack, όλες οι πλακέτες προγραμματίζονται με μία RS-232 σειριακή σύνδεση, αλλά ο τρόπος που επιτυγχάνεται διαφέρει σε κάθε hardware εκδοχή. Οι σειριακές πλάκες Arduino περιέχουν ένα απλό level shifter κύκλωμα με σκοπό την μετατροπή του σήματος επιπέδου RS-232 σε TTL. Τα σημερινά Arduino προγραμματίζονται μέσω USB· το οποίο συμβαίνει λόγω μιας εφαρμογής προσαρμογών chip USB-to-Serial όπως το FTDI FT232. Κάποιες παραλλαγές, όπως το Arduino mini και το ανεπίσημο Boarduino, χρησιμοποιούν ένα αφαιρούμενο USB-to-Serial καλώδιο ή board, Bluetooth ή άλλες μεθόδους.

Η πλακέτα Arduino εκθέτει τα περισσότερα microcontroller I/O pins από άλλα κυκλώματα. Τα Diecimila, Duemilanove και το τρέχον Uno παρέχουν 14 ψηφιακά I/O pins, έξι από τα οποία έχουν τη δυνατότητα να παράγουν pulse-width διαμορφωμένα σήματα, και έξι αναλογικά δεδομένα. Αυτά τα pins βρίσκονται στην κορυφή της πλακέτας μέσω θηλυκών headers 0.1 ιντσών (2,2mm).

Το Arduino nano και το Arduino-Compatible Bare Bones Board και Boarduino Board υπάρχει πιθανότητα να παρέχουν αρσενικά header pins στο κάτω μέρος της πλακέτας προκειμένου να συνδέονται σε Breadboards. Υπάρχουν πολλές πλακέτες οι οποίες είναι συμβατές με και προέρχονται από πλακέτες Arduino. Κάποιες είναι λειτουργικά ισάξιες με ένα Arduino και μπορεί να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά. Πολλές είναι το βασικό Arduino με την προσθήκη καινοτόμων output drivers για να απλοποιήσουν την κατασκευή buggies και μικρών robot. Άλλες είναι ηλεκτρικά ισάξιες αλλά αλλάζουν τον

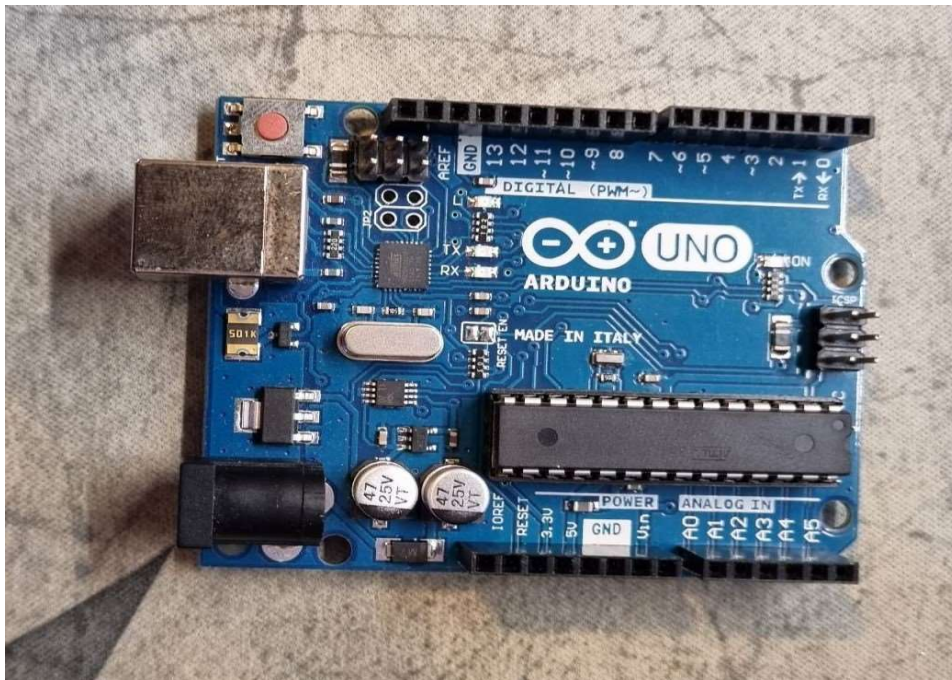
παράγοντα μορφής, επιτρέποντας κάποιες φορές την συνεχόμενη χρήση των "shields" ενώ κάποιες όχι. Κάποιες παραλλαγές είναι διαφορετικοί επεξεργαστές, με διάφορα επίπεδα συμβατότητας.

### Λογισμικό

Το ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) του Arduino είναι μία εφαρμογή γραμμένη σε γλώσσα προγραμματισμού Java, που είναι συμβατή με πολλές πλατφόρμες και προέρχεται από το IDE για τη γλώσσα προγραμματισμού Processing και το σχέδιο Wiring. Έχει σχεδιαστεί για να εισαγάγει στον προγραμματισμό αυτούς που δεν είναι εξοικειωμένοι με την ανάπτυξη λογισμικού. Περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα με χαρακτηριστικά όπως είναι η επισήμανση σύνταξης και ο συνδυασμός αγκύλων και είναι επίσης σε θέση να μεταγλωττίζει και να φορτώνει προγράμματα στην πλακέτα χωρίς ιδιαίτερη προσπάθεια. Δεν υπάρχει συνήθως καμία ανάγκη για επεξεργασία αρχείων make ή να τρέξουν προγράμματα σε ένα περιβάλλον γραμμής εντολών. Ένα πρόγραμμα ή κώδικας που γράφτηκε για Arduino ονομάζεται σκίτσο.

Τα Arduino προγράμματα είναι γραμμένα σε C ή C++. Το Arduino IDE έχει ενσωματωμένη μια βιβλιοθήκη λογισμικού που ονομάζεται "Wiring", από το πρωτότυπο σχέδιο Wiring, γεγονός που καθιστά πολλές κοινές λειτουργίες εισόδου/εξόδου πολύ πιο εύκολες. Οι χρήστες πρέπει μόνο να ορίσουν τις λειτουργίες setup και loop για να κάνουν ένα πρόγραμμα κυκλικής εκτέλεσης.

- Η συνάρτηση setup(): τρέχει μία φορά στην αρχή του προγράμματος και αρχικοποιεί τις ρυθμίσεις
- Η συνάρτηση loop(): καλείται συνέχεια μέχρι η πλακέτα να απενεργοποιηθεί



Εικόνα 6 Arduino UNO

## 5.2 Dragino LoRa Shield

Η ασπίδα SX127x είναι μια ασπίδα Arduino που διαθέτει την τεχνολογία LoRa και βασίζεται σε βιβλιοθήκη ανοιχτού κώδικα. Αυτή η ασπίδα επιτρέπει στο χρήστη να στέλνει δεδομένα και να φτάνει σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις με χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων. Παρέχει επικοινωνία φάσματος διασποράς εξαιρετικά μεγάλης εμβέλειας και υψηλή ανοσία στις παρεμβολές, ενώ ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ρεύματος.

Χρησιμοποιώντας την τεχνική διαμόρφωσης SX127x LoRa, το Dragino Shield που διαθέτει την τεχνολογία LoRa μπορεί να επιτύχει ευαισθησία πάνω από -148dBm, χρησιμοποιώντας κρύσταλλο χαμηλού κόστους και κατάλογο υλικών. Η υψηλή ευαισθησία σε συνδυασμό με τον ενσωματωμένο ενισχυτή ισχύος +20 dBm αποδίδει κορυφαίο προϋπολογισμό σύνδεσης, καθιστώντας το βέλτιστο για κάθε εφαρμογή που απαιτεί εμβέλεια ή στιβαρότητα. Το LoRa παρέχει επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο στην παρεμπόδιση όσο και στην επιλεκτικότητα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές διαμόρφωσης, επιλύοντας τον παραδοσιακό συμβιβασμό σχεδιασμού μεταξύ εμβέλειας, ανοχής σε παρεμβολές και κατανάλωσης ενέργειας.

Τέλος υποστηρίζουν τρόπους λειτουργίας (G)FSK υψηλής απόδοσης για συστήματα που περιλαμβάνουν WMBus, IEEE802.15.4g. Η ασπίδα Dragino Shield με τεχνολογία LoRa παρέχει εξαιρετικό θόρυβο φάσης, επιλεκτικότητα, γραμμικότητα δέκτη και IIP3 για σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ρεύματος από τις ανταγωνιστικές συσκευές.



Εικόνα 7 Dragino LoRa Shield

### 5.3 Dragino LoRa/GPS Shield

Το LoRa/GPS Shield είναι μια πλακέτα επέκτασης για LoRa™/GPS για χρήση σε συνδιασμό με το Arduino. Το LoRa/GPS Shield αποτελείται από τη μητρική πλακέτα LoRa/GPS Shield και το LoRa BEE.

Στο τμήμα LoRa, η ασπίδα LoRa/GPS Shield βασίζεται στον πομποδέκτη SX1276/SX1278. Οι πομποδέκτες της ασπίδας LoRa/GPS Shield διαθέτουν το μόντεμ μεγάλης εμβέλειας LoRa™ που παρέχει επικοινωνία φάσματος διασποράς εξαιρετικά μεγάλης εμβέλειας και υψηλή ανοσία στις παρεμβολές, ενώ ελαχιστοποιεί την κατανάλωση ρεύματος. Το LoRa™ παρέχει επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα τόσο στην παρεμπόδιση όσο και στην επιλεκτικότητα σε σχέση με τις συμβατικές τεχνικές διαμόρφωσης. Με αυτόν τον τρόπο επιλύεται ο παραδοσιακός συμβιβασμός σχεδιασμού μεταξύ εμβέλειας, ανοχής σε παρεμβολές και κατανάλωσης ενέργειας.

Στο τμήμα GPS, η πρόσθετη μονάδα L80 GPS έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές που χρησιμοποιούν GPS συνδεδεμένο μέσω των σειριακών θυρών στο arduino, όπως εφαρμογές χρονομέτρησης ή γενικές εφαρμογές που απαιτούν πληροφορίες GPS. Αυτή η μονάδα GPS μπορεί να υπολογίζει και να προβλέπει αυτόματα τις τροχιές χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα στην εσωτερική μνήμη flash, έτσι ώστε η ασπίδα να μπορεί να καθορίσει γρήγορα τη θέση ακόμη και σε επίπεδα σήματος σε εσωτερικούς χώρους με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Με την τεχνολογία AlwaysLocate™, η ασπίδα LoRa/GPS μπορεί να προσαρμόσει προσαρμοστικά τον χρόνο ενεργοποίησης/απενεργοποίησης για να επιτύχει ισορροπία μεταξύ της ακρίβειας εντοπισμού θέσης και της κατανάλωσης ενέργειας ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις συνθήκες κίνησης. Το GPS υποστηρίζει επίσης τη λειτουργία αυτόματης εναλλαγής κεραίας και έχει τη δυνατότητα να επιτύχει την εναλλαγή μεταξύ εσωτερικής κεραίας patch και εξωτερικής ενεργής κεραίας. Επιπλέον, διατηρεί τον εντοπισμό θέσης κατά τη διαδικασία εναλλαγής.

#### Προδιαγραφές LoRa

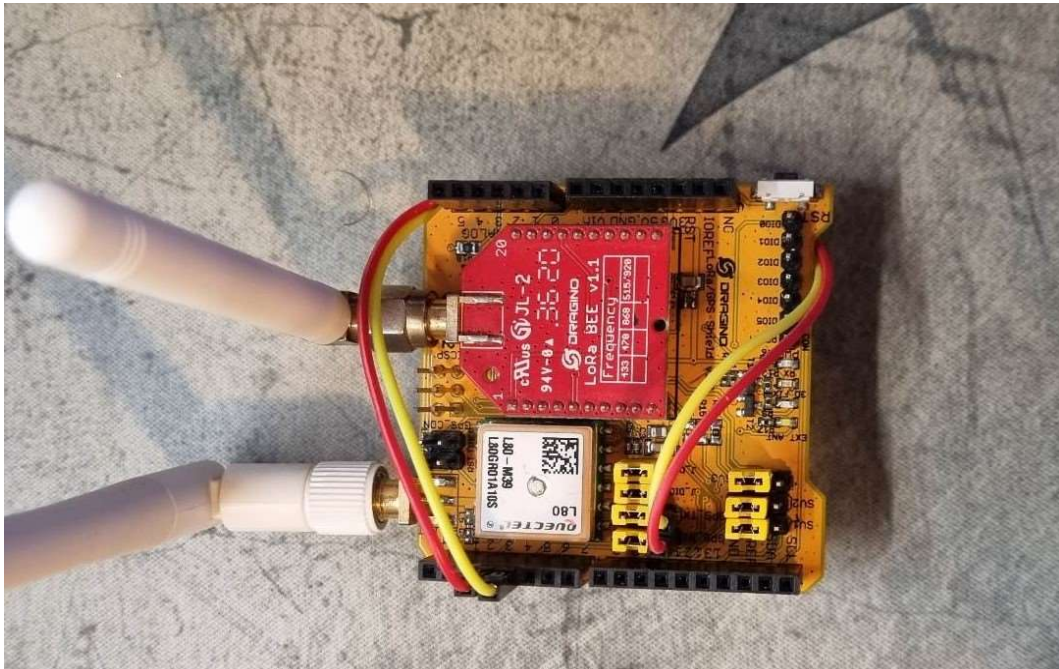
- Μέγιστος προϋπολογισμός σύνδεσης 168 dB.
- +20 dBm - 100 mW σταθερή έξοδος RF vs.
- +14 dBm PA υψηλής απόδοσης.
- Προγραμματιζόμενος ρυθμός μετάδοσης έως 300 kbps.
- Υψηλή ευαισθησία: έως -148 dBm.
- Μπροστινό άκρο ανθεκτικό σε σφαίρες: IIP3 = -12,5 dBm.
- Εξαιρετική ανοσία φραγής.
- Χαμηλό ρεύμα RX 10,3 mA, διατήρηση καταχωρητών 200 nA.

- Πλήρως ενσωματωμένος συνθέτης με ανάλυση 61 Hz.
- Διαμόρφωση FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa™ και OOK.
- Ενσωματωμένος συγχρονιστής bit για ανάκτηση ρολογιού.
- Ανίχνευση προοιμίου.
- Δυναμικό εύρος 127 dB RSSI.
- Αυτόματη ανίχνευση RF και CAD με εξαιρετικά γρήγορη AFC.
- Μηχανή πακέτων έως 256 bytes με CRC.

### Προδιαγραφές GPS

- Βασίζεται στο MT3339.
- Λήψη ισχύος: 25mA, παρακολούθηση ισχύος: 20mA.
- Συμβατότητα με GPS, SBAS.
- Προγραμματιζόμενος ρυθμός μετάδοσης bit έως 300 kbps.
- Σειριακές διεπαφές UART: Ρυθμιζόμενο 4800~115200 bps, Προεπιλογή: 9600bps.
- Ρυθμός ενημέρωσης: 1Hz (προεπιλογή), έως και 10Hz.
- Τάση εισόδου/εξόδου: 2,7V ~ 2,9V.
- Πρωτόκολλα: NMEA 0183, PMTK.
- Ακρίβεια οριζόντιας θέσης: Αυτόνομη < 2,5 m CEP.
- TTFF@-130dBm με EASY™: Cold Start < 15s, Warm Start < 5s, Hot start < 1s; TTFF@-130dBm without EASY™: Cold Start < 35s, Warm Start < 30s, Hot Start < 1s.
- Ακρίβεια χρονισμού: 1PPS out 10ns, Reacquisition Time < 1s.
- Ακρίβεια ταχύτητας χωρίς ενίσχυση < 0,1m/s, Ακρίβεια επιτάχυνσης χωρίς ενίσχυση 0,1m/s<sup>2</sup>.
- Ευαισθησία Acquisition -148dBm, Tracking -165dBm, Reacquisition - 160dBm.
- Περιβάλλον: Θερμοκρασία λειτουργίας -40°C έως 85°C, θερμοκρασία αποθήκευσης -45°C έως 125°C.
- Δυναμική απόδοση Υψόμετρο Max. 18000m, Μέγιστη ταχύτητα Max. 515m/s, Μέγιστη επιτάχυνση 4G.

- Δέκτης ζώνης L1 (1575,42MHz) Κανάλι 22 (παρακολούθηση) / 66 (λήψη).



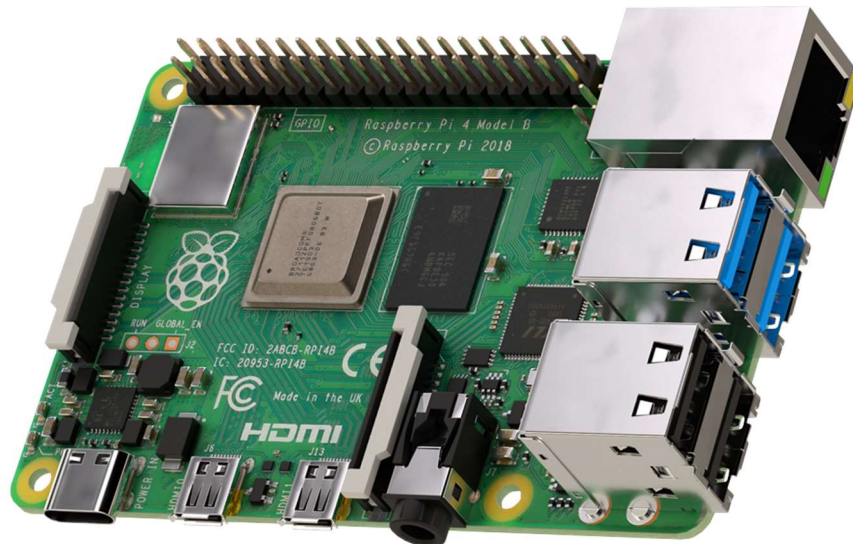
Εικόνα 8 Dragino LoRa/GPS Shield

## 5.4 Raspberry Pi 4

Τα Raspberry Pi είναι μια σειρά μικρών υπολογιστών με μία πλακέτα (SBC) που αναπτύχθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο από το Ίδρυμα Raspberry Pi σε συνεργασία με την Broadcom. Το έργο Raspberry Pi αρχικά έκλινε προς την προώθηση της διδασκαλίας της βασικής επιστήμης των υπολογιστών στα σχολεία. Το αρχικό μοντέλο έγινε πιο δημοφιλές από ό,τι αναμενόταν, πουλώντας εκτός στόχου αγοράς του, για χρήσεις όπως η ρομποτική. Χρησιμοποιείται ευρέως σε πολλούς τομείς, λόγω του χαμηλού κόστους, της σπονδυλωτικότητας και του ανοιχτού σχεδιασμού του.

Μετά την κυκλοφορία του δεύτερου τύπου πλακέτας, το Raspberry Pi Foundation δημιούργησε μια νέα οντότητα, με το όνομα Raspberry Pi Trading. Ίδρυμα επαναδιατέθηκε ως εκπαιδευτικό φιλανθρωπικό ίδρυμα για την προώθηση της διδασκαλίας της βασικής επιστήμης των υπολογιστών σε σχολεία και αναπτυσσόμενες χώρες. Τα περισσότερα Pis κατασκευάζονται σε ένα εργοστάσιο της Sony στο Pencoed της Ουαλίας, ενώ άλλα κατασκευάζονται στην Κίνα και την Ιαπωνία.

Υπάρχουν τρεις σειρές Raspberry Pi και έχουν κυκλοφορήσει αρκετές γενιές από το καθένα. Τα Raspberry Pi SBC διαθέτουν σύστημα Broadcom σε τσιπ (SoC) με ενσωματωμένη CPU συμβατή με ARM και εντός τσιπ GPU.



Εικόνα 9 Raspberry Pi 4

Βασικές προδιαγραφές για το Raspberry Pi 4 είναι οι εξής:

- Broadcom BCM2711, τετραπύρηνο Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.8GHz
- 4GB LPDDR4-3200 SDRAM
- Ασύρματη σύνδεση 2,4 GHz και 5,0 GHz IEEE 802.11ac, Bluetooth 5.0, BLE
- Gigabit Ethernet
- 2 θύρες USB 3.0 και 2 θύρες USB 2.0.
- Τυποποιημένη κεφαλή 40 ακίδων GPIO του Raspberry Pi (πλήρως συμβατή με προηγούμενες πλακέτες)
- 2 × θύρες micro-HDMI (υποστηρίζονται έως και 4k@60)
- Θύρα οθόνης MIPI DSI 2 λωρίδων
- Θύρα κάμερας MIPI CSI 2 λωρίδων

- Θύρα στερεοφωνικού ήχου και σύνθετου βίντεο 4 πόλων
- H.265 (αποκωδικοποίηση 4k@60), H264 (αποκωδικοποίηση 1080p@60, κωδικοποίηση 1080p@30)
- OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0
- Υποδοχή κάρτας Micro-SD για φόρτωση λειτουργικού συστήματος και αποθήκευση δεδομένων
- Συνεχές ρεύμα 5V μέσω υποδοχής USB-C (τουλάχιστον 3A\*)
- 5V DC μέσω κεφαλής GPIO (τουλάχιστον 3A\*)
- Ενεργοποίηση Power over Ethernet (PoE) (απαιτείται ξεχωριστό καπέλο PoE)
- Θερμοκρασία λειτουργίας: C περιβάλλοντος

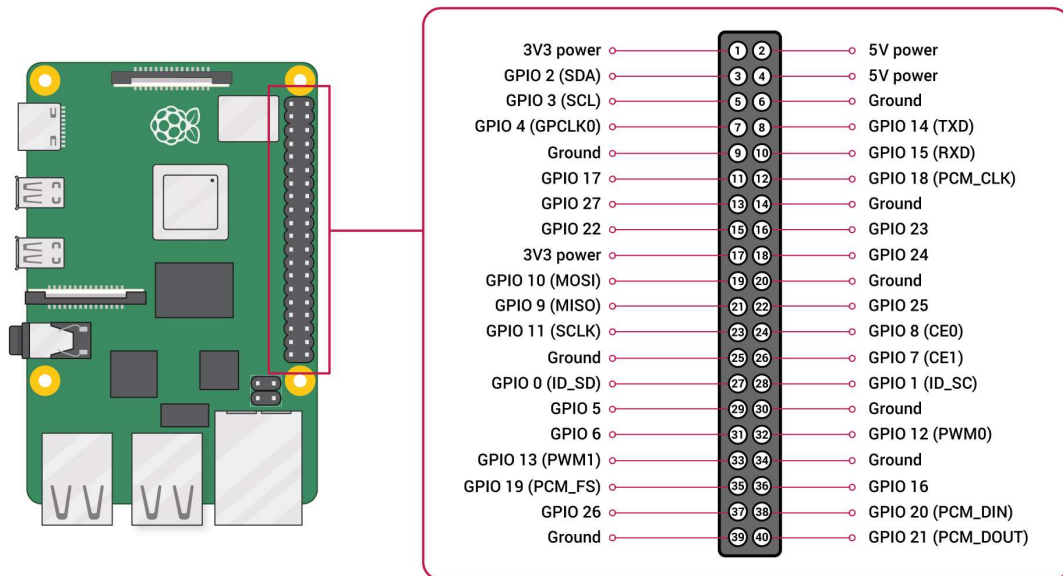
## Λογισμικό

Το Raspberry Pi OS με παλαιότερη ονομασία Raspbian είναι το συνιστώμενο λειτουργικό σύστημα για κανονική χρήση σε ένα Raspberry Pi ,το οποίο στην ουσία του είναι ένα λειτουργικό σύστημα βασισμένο σε Debian Linux εξατομικευμένο κατάλληλα για τα Raspberry Pi. Βέβαια ο κάθε χρήστης έχει την επιλογή να εγκαταστήσει ότι λειτουργικό σύστημα επιθυμεί καθώς υποστηρίζονται από άλλους (όχι από την εταιρία κατασκευής του) διάφορα άλλα λειτουργικά όπως για παράδειγμα Ubuntu και Windows 10 IoT Core. Υπάρχουν ποικίλα προγράμματα για την εγκατάσταση των λειτουργικών αυτών. Το Raspberry Pi Imager είναι ο γρήγορος και εύκολος τρόπος για να γίνει η εγκατάσταση του Raspberry Pi OS και άλλων λειτουργικών συστημάτων σε μια κάρτα microSD.

## GPIO

Κάθε μοντέλο του Raspberry Pi έχει ένα σύνολο ακίδων εισόδου/εξόδου γενικής χρήσης (GPIO) κατά μήκος της επάνω άκρης της πλακέτας. Αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύνδεση και επικοινωνία με κάθε είδους ηλεκτρονικά εξαρτήματα, λειτουργώντας ως φυσική διεπαφή μεταξύ του Raspberry Pi και του έξω κόσμου.

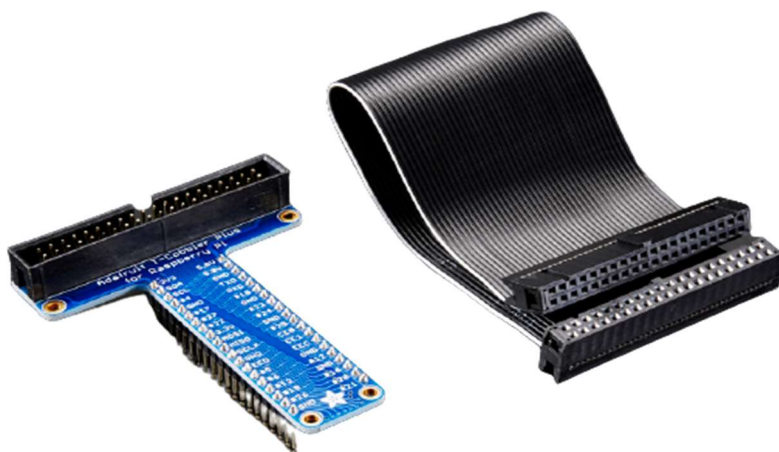




Εικόνα 10 Ακίδες GPIO

Για την εκπόνηση της εργασίας και λόγω της είδη κατοχής ενός παραπάνω εξαρτήματος LoRa Shield. Χρησιμοποιήθηκε για την εκ λόγω υλοποίηση αλλά τρία εξαρτήματα για την διευκόλυνση της συνδεσμολογίας καθώς το LoRa Shield είναι κατασκευασμένο για πλακέτες τύπου Arduino. Τα προαναφερθέντα εξαρτήματα είναι τα παρακάτω και έχουν τοποθετηθεί πάνω σε ένα απλό breadboard και πάνω στο Raspberry Pi 4.

1. Adafruit Pi T-Cobbler
2. Adafruit GPIO Ribbon Cable



Εικόνα 11 Adafruit Pi T-Cobbler (αριστερά) και Adafruit GPIO Cable (δεξιά)

### 3. Επέκταση 40 ακίδων για Raspberry Pi 4



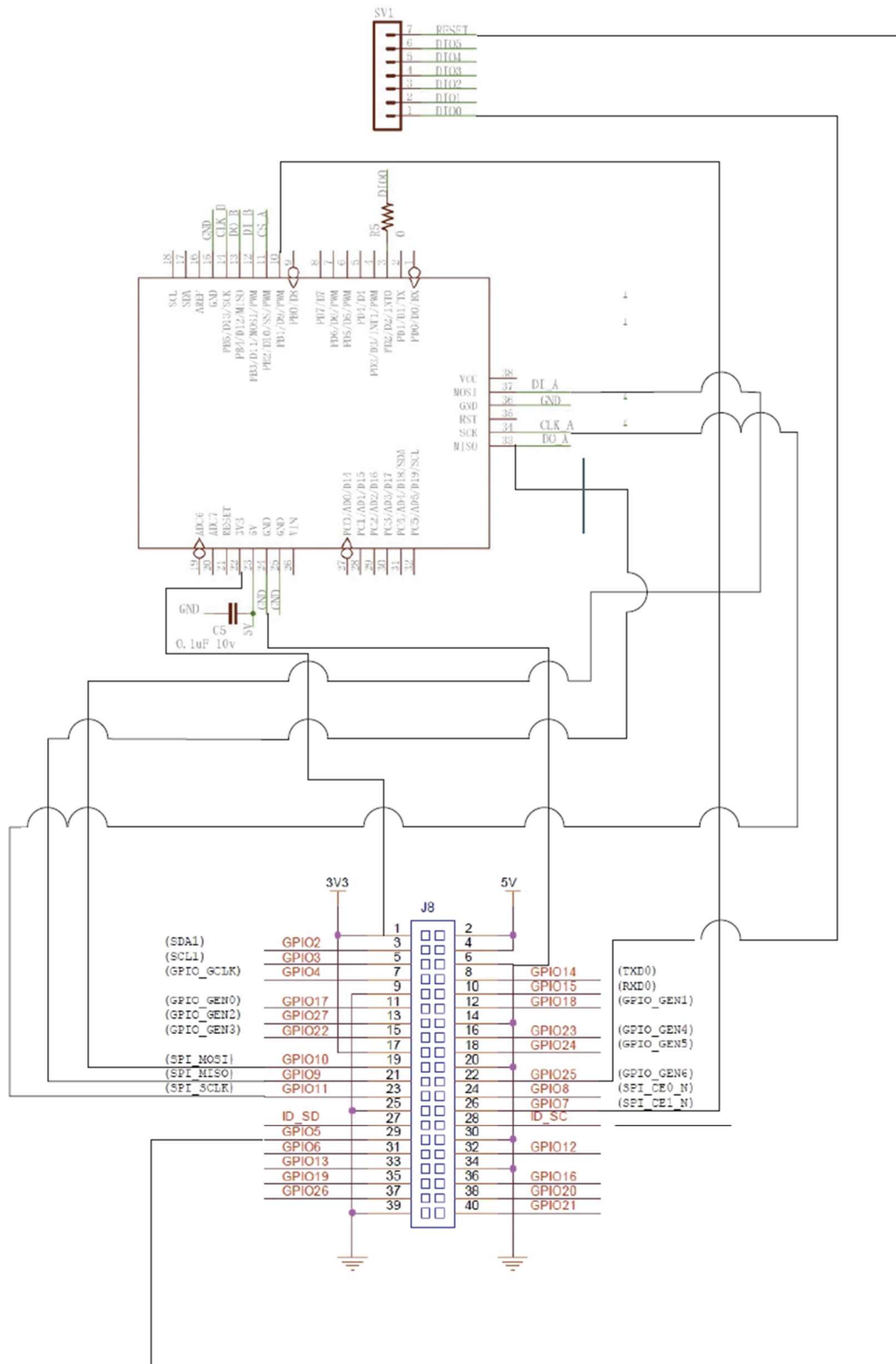
Εικόνα 12 Επέκταση ακίδων GPIO

#### Συνδεσμολογία LoRa shield με Raspberry Pi

Έπειτα από κατανόηση των σχηματικών των συσκευών LoRa shield v.1.4 και Raspberry Pi 4 και βάση των παραπάνω ενοτήτων σχετικά με τις συσκευές αυτές. Για την σύζευξη των παραπάνω συσκευών απαιτείται η διασύνδεση των εξής ακίδων :

<b>LoRa shield v.1.4</b>	<b>Raspberry Pi 4 GPIO</b>
ICSP PIN 33 (MISO)	PIN 19 (SPI MISO)
ICSP PIN 34 (SCLK)	PIN 21 (SPI SCLK)
ICSP PIN 37 (MOSI)	PIN 23 (SPI MOSI)
SV1 PIN 7 (RESET)	PIN 29 (GPIO #5)
SV1 PIN 1 (DIO0)	PIN 22 (GPIO #25)
PIN 10	PIN 26 (CE1)
PIN 24 (GND)	PIN 6 (GND)
PIN 22 (3V3)	PIN 1 (3V3)

Πίνακας 6 Συνδεσμολογία LoRa Shield με Raspberry Pi

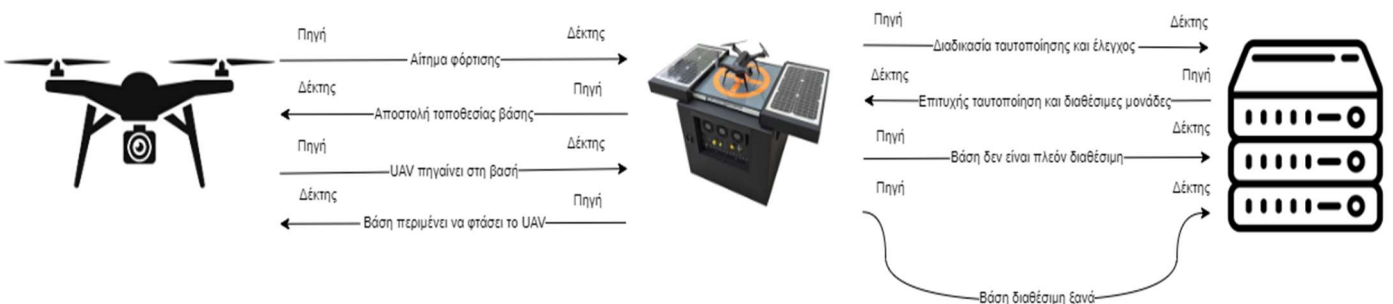


Εικόνα 13 Σχηματικό συνδεσμολογίας LoRa Shield και Raspberry Pi 4

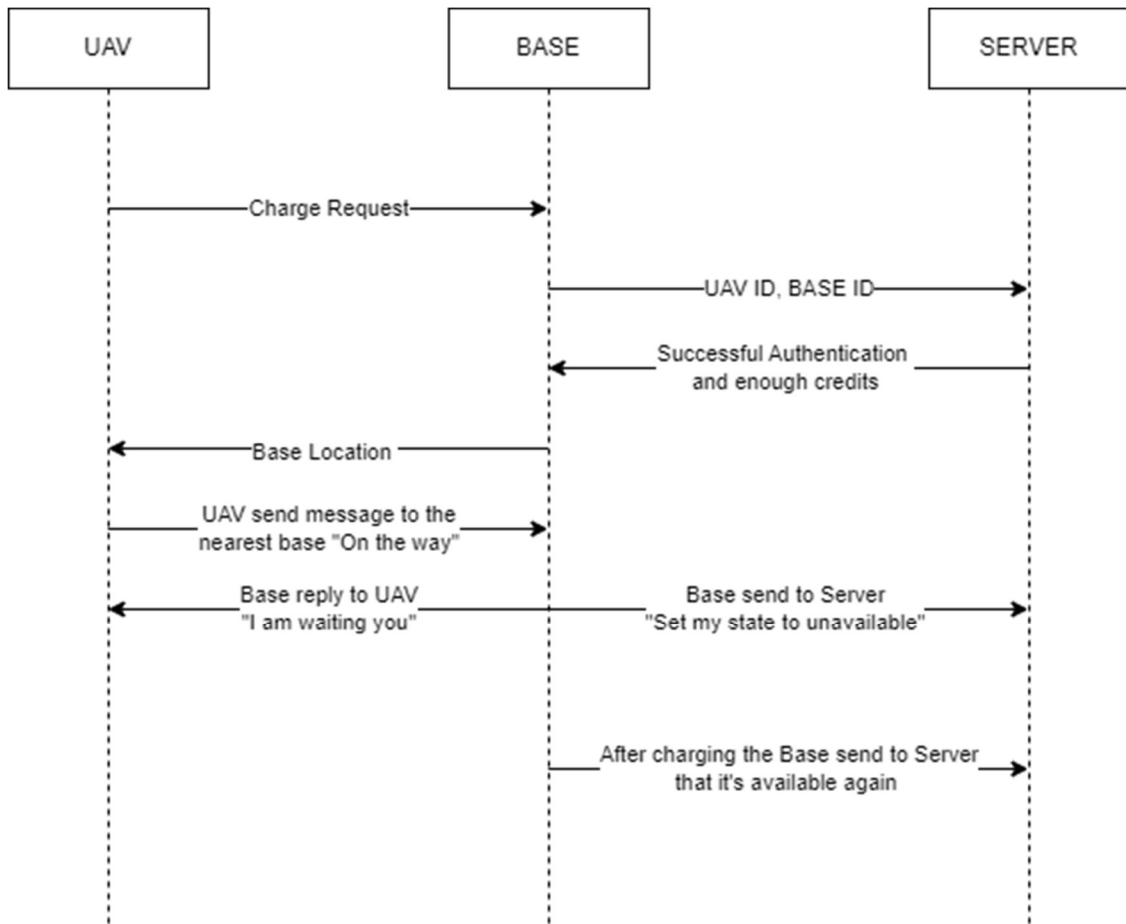
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Εφαρμογή

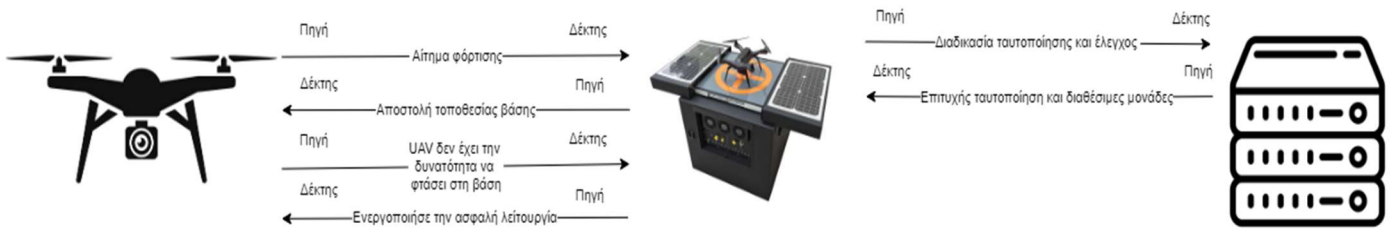
Στην εφαρμογή όλα τα μηνύματα στέλνονται μέσω LoRa .Πρώτα ένα UAV στέλνει ένα αίτημα φόρτισης σε όλο το δίκτυο, έπειτα οποιαδήποτε βάση που βρίσκεται εντός εμβέλειας εκπομπής του μηνύματός του UAV και μπορεί να ακούσει το αίτημά του στέλνει στον server το αναγνωριστικό βάσης, το αναγνωριστικό του UAV και μετέπειτα ελέγχει στη βάση δεδομένων του εάν αυτή η βάση είναι διαθέσιμη και αν το UAV έχει μονάδες για φόρτιση. Στην συνέχεια, εάν όλοι οι έλεγχοι είναι έγκυροι, ο server απαντάει στη βάση (μπορεί να απαντήσει σε πολλές βάσεις ταυτόχρονα) ότι το αίτημα έγινε αποδεκτό, εάν οι μονάδες είναι χαμηλότερες από ένα, τότε απαντάει ότι το UAV δεν έχει αρκετές μονάδες και εάν κάποιος έλεγχος πάει στραβά τότε, απαντάει με τον αριθμό 404 στη βάση. Μετά την παραπάνω διαδικασία και εφόσον η βάση έχει πάρει την άδεια να δεχτεί το UAV, στέλνει στο UAV την τοποθεσία του εάν περισσότερες από μία βάσεις έχουν την άδεια να δεχτούν το UAV τότε όλες στέλνουν τις τοποθεσίες τους. Μετά από αυτό το βήμα, το UAV υπολογίζει την πλησιέστερη απόσταση βάσης και απαντά μόνο σε αυτή τη βάση ότι είναι καθ' οδόν ή εάν η απόσταση είναι μεγάλη, τότε απαντάει ότι δεν μπορεί να φτάσει τόσο μακριά. Έπειτα την τελευταία αποστολή η βάση φόρτισης απαντάει στο UAV ότι το περιμένει να φτάσει στην τοποθεσία της η στην περίπτωση όπου δεν μπορεί να φτάσει να ενεργοποιήσει την λειτουργία ασφαλείας του. Τέλος, εάν το UAV μπορεί να πάει στη βάση, η βάση στέλνει ένα μήνυμα στον διακομιστή που λέει να ορίσει την κατάσταση της σε μη διαθέσιμη. Μετά τη φόρτιση το UAV φεύγει από τη βάση και αυτή με την σειρά της στέλνει στον server ότι είναι ξανά διαθέσιμη. Λόγω της ασυμβατότητας και της ιδιοτροπίας της κωδικοποίησης των διαφορετικών πλακετών της εφαρμογής προτιμήθηκε η κρυπτογράφηση XOR όπου είναι κοινή για όλες τις πλατφόρμες.



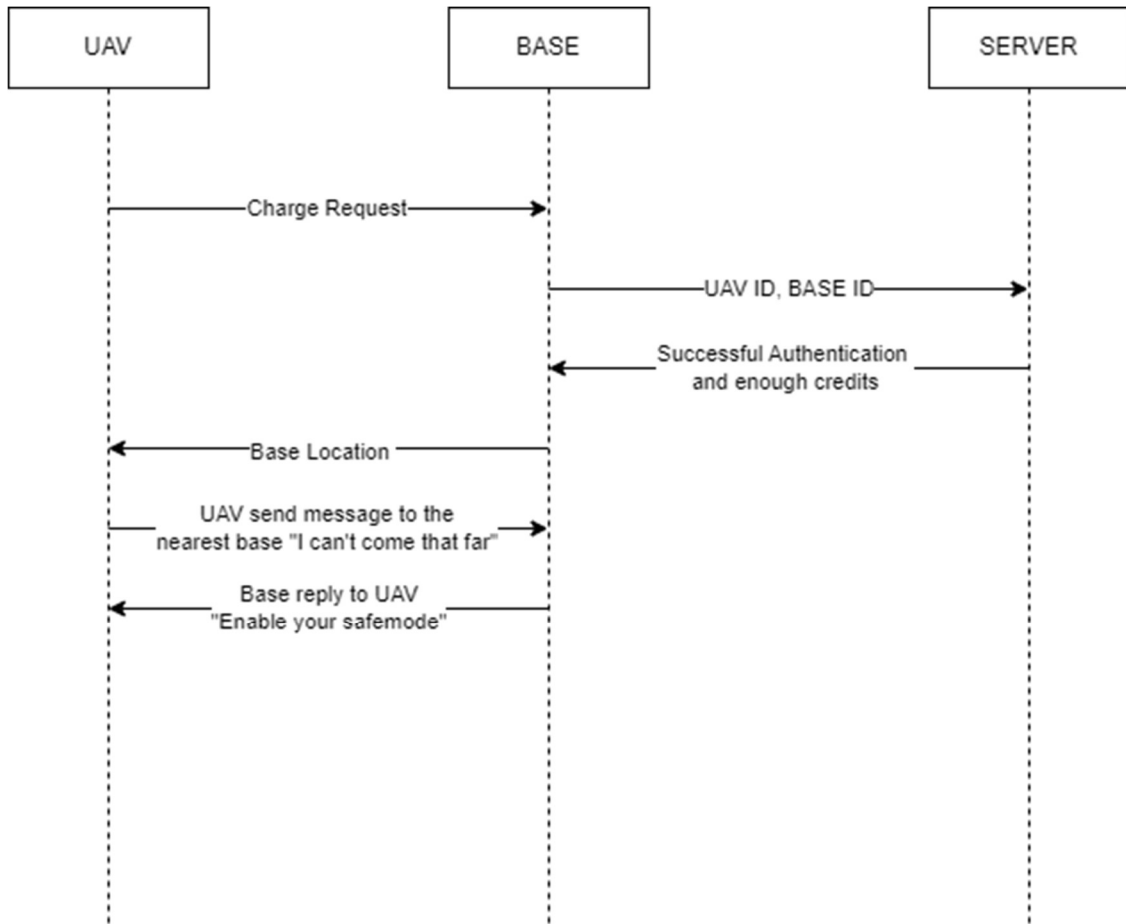
Σχήμα 17 του Διάγραμμα ροής της εφαρμογής (1) με πετυχημένη φόρτιση



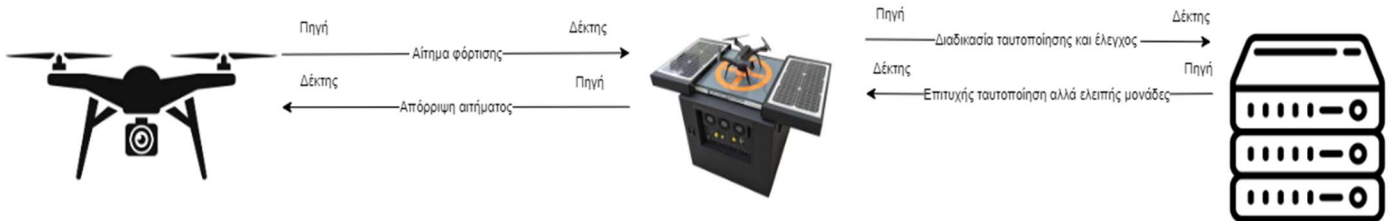
Σχήμα 18 Διάγραμμα ακολουθίας της εφαρμογής (1) με πετυχημένη φόρτιση



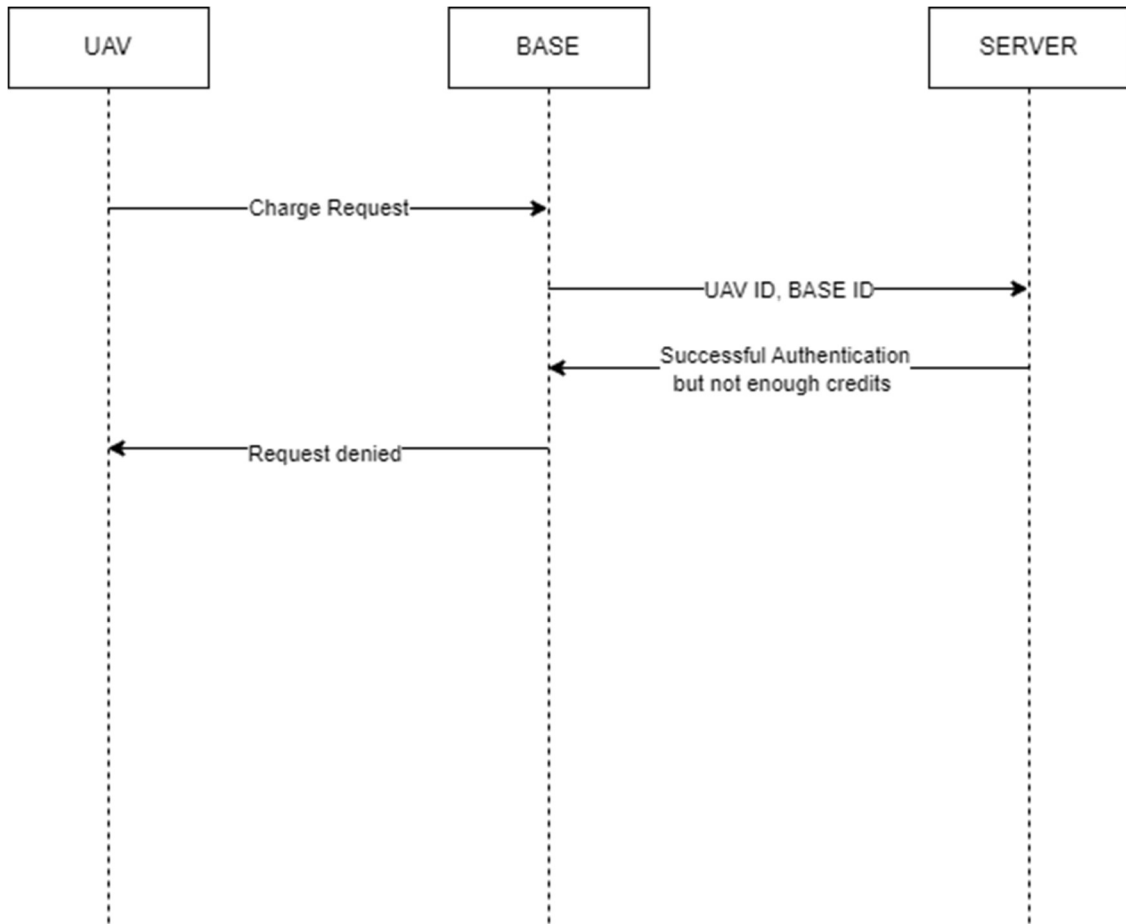
Σχήμα 19 Διάγραμμα ροής της εφαρμογής (2) με το UAV να ενεργοποιεί την λειτουργία ασφαλείας



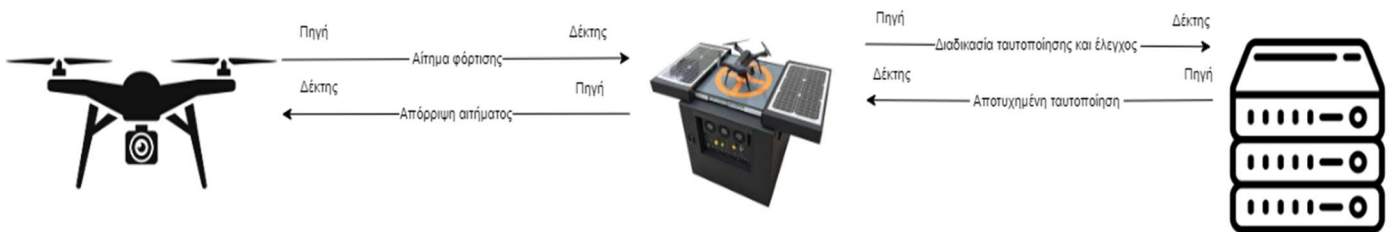
Σχήμα 20 Διάγραμμα ακολουθίας της εφαρμογής (2) με το UAV να ενεργοποιεί την λειτουργία ασφαλείας



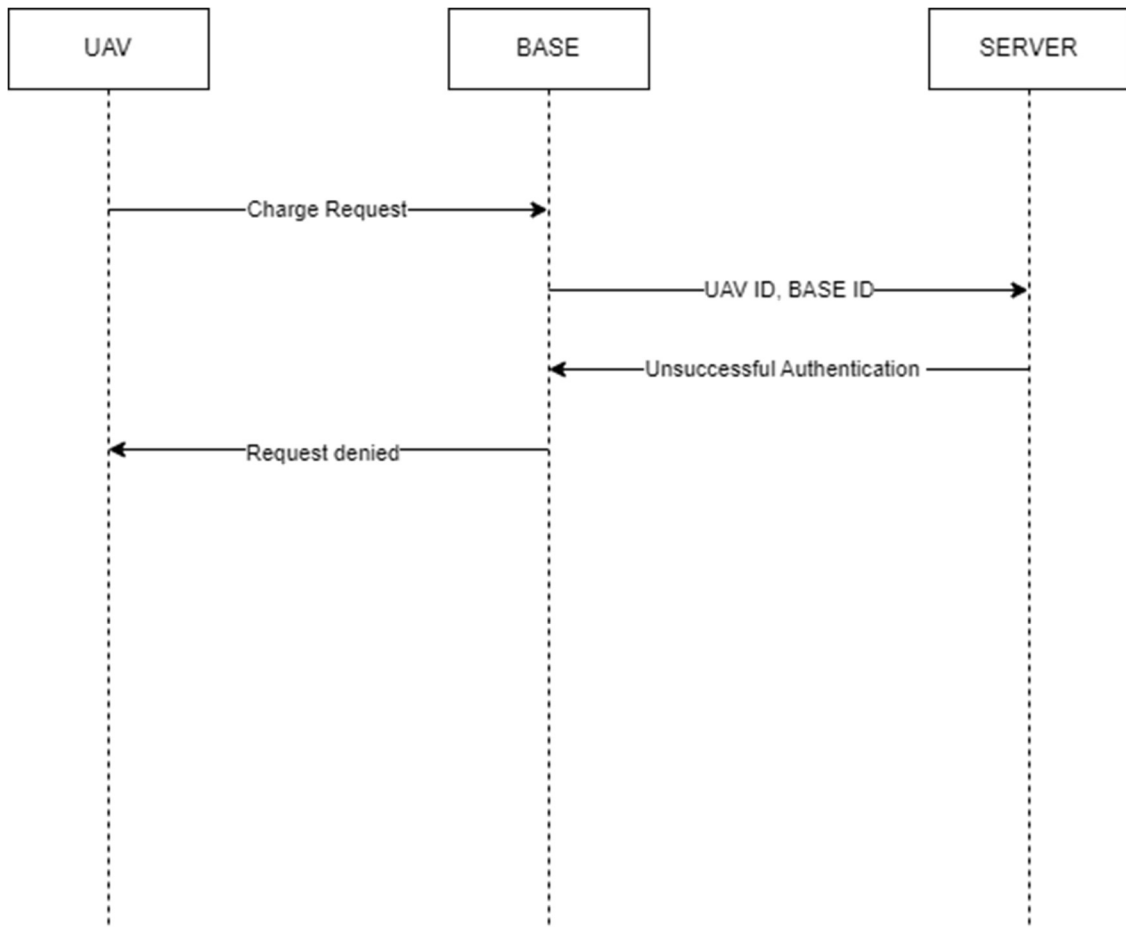
Σχήμα 21 Διάγραμμα ροής της εφαρμογής (3) με ελλiptής μονάδες φόρτισης



Σχήμα 22 Διάγραμμα ακολουθίας της εφαρμογής (3) με ελλιπής μονάδες φόρτισης

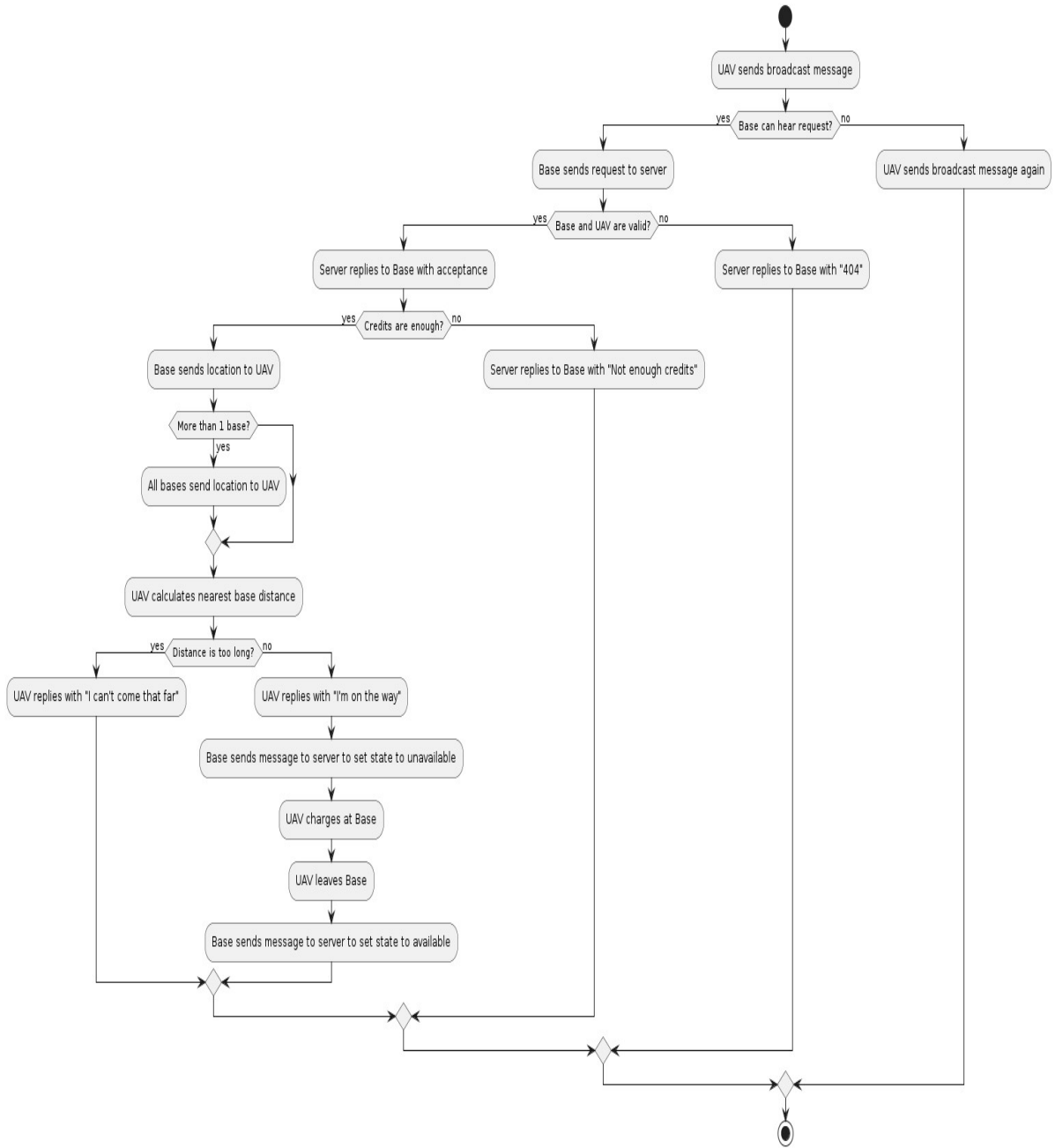


Σχήμα 23 Διάγραμμα ροής της εφαρμογής (4) με αποτυχημένη ταυτοποίηση



Σχήμα 24 Διάγραμμα ακολουθίας της εφαρμογής (4) με αποτυχημένη ταυτοποίηση

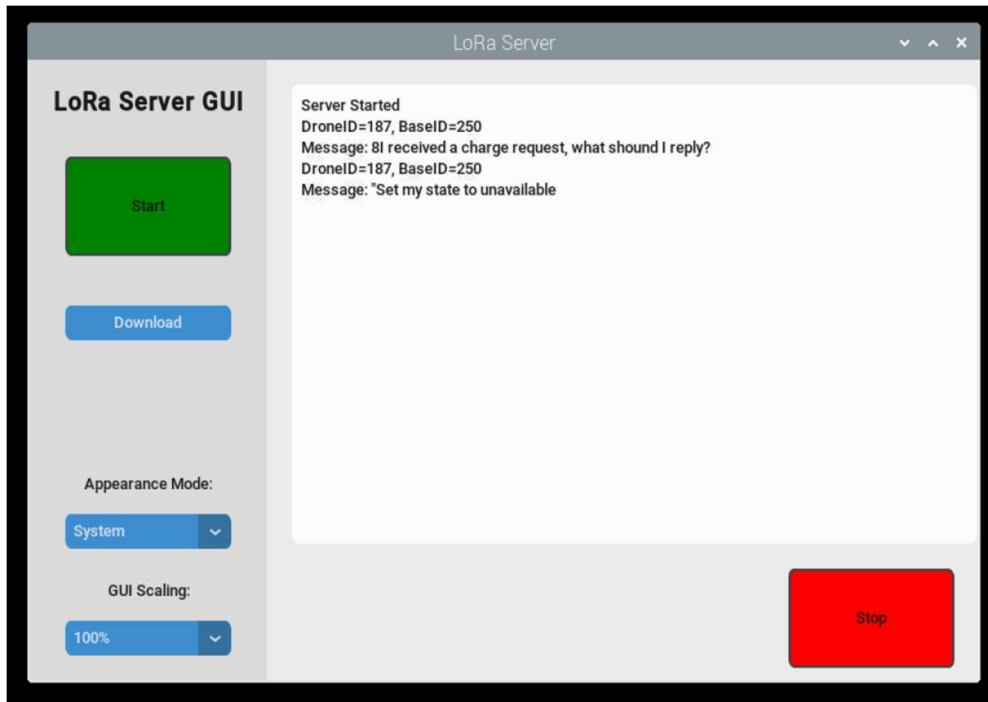




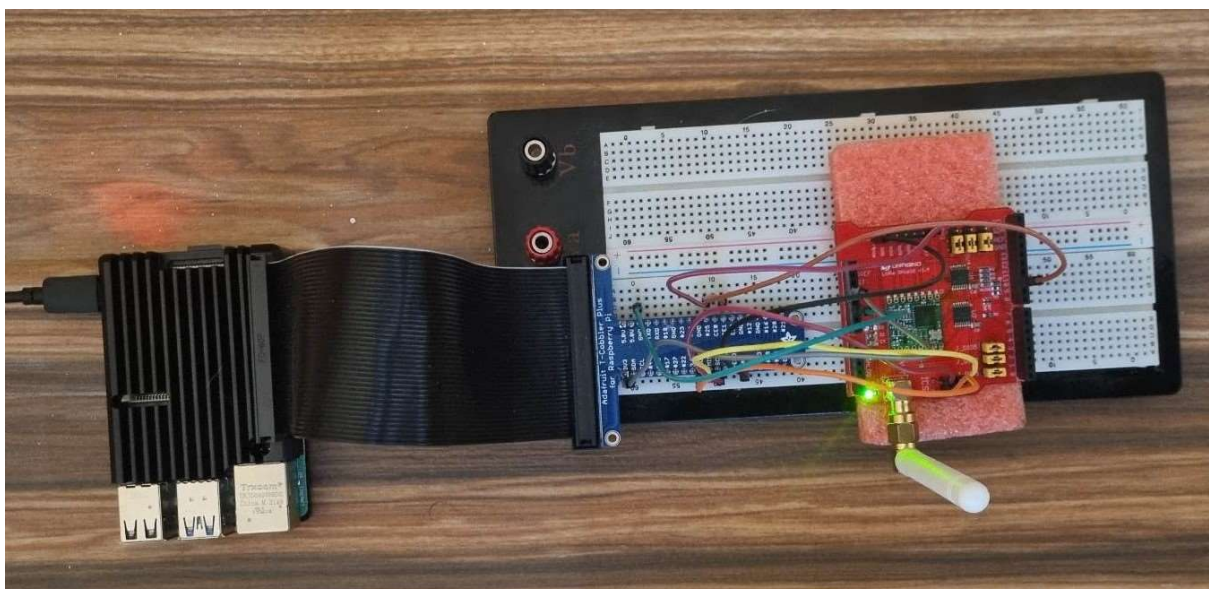
Σχήμα 25 Διάγραμμα δραστηριότητας της εφαρμογής

## Server GUI και βάση δεδομένων

Για την εγγραφή του πηγαίου κώδικα του server της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού python και το εργαλείο ήταν η προεγκαταστημένη εφαρμογή Thorny στον Raspian .Η βάση δεδομένων είναι γραμμένη σε SQL με την χρήση python.



Εικόνα 14 GUI Server



Εικόνα 15 Φωτογραφία Server

```

1 import sqlite3
2
3 # Connect to the database
4 conn = sqlite3.connect("database.db")
5 cursor = conn.cursor()
6
7 # Create the 3 tables
8 cursor.execute("""
9 CREATE TABLE IF NOT EXISTS drones (
10     drone_id INTEGER PRIMARY KEY,
11     drone_name TEXT NOT NULL,
12     credits INTEGER NOT NULL
13 );
14 """)
15
16 cursor.execute("""
17 CREATE TABLE IF NOT EXISTS bases (
18     base_id INTEGER PRIMARY KEY,
19     base_name TEXT NOT NULL,
20     availability BOOLEAN DEFAULT 0
21 );
22 """)
23
24 cursor.execute("""
25 CREATE TABLE IF NOT EXISTS data (
26     drone INT,
27     base INT,
28     time DATETIME,
29     FOREIGN KEY (drone) REFERENCES drones(dr
30     FOREIGN KEY (base) REFERENCES bases(base
31 );
32 """)
33
34 # Insert data into the drones table
35 drones_data = [
36     (176, "Drone 01", 10),
37     (177, "Drone 02", 15),
38     (178, "Drone 03", 20),
39     (179, "Drone 04", 0),

```

**Drones:**

```

(176, 'Drone 01', 10)
(177, 'Drone 02', 15)
(178, 'Drone 03', 20)
(179, 'Drone 04', 0)
(180, 'Drone 05', 23)
(181, 'Drone 06', 11)
(182, 'Drone 07', 1)
(183, 'Drone 08', 100)
(184, 'Drone 09', 3)
(185, 'Drone 10', 8)
(186, 'Drone 11', 3)
(187, 'Drone 12', 7)

```

**Bases:**

```

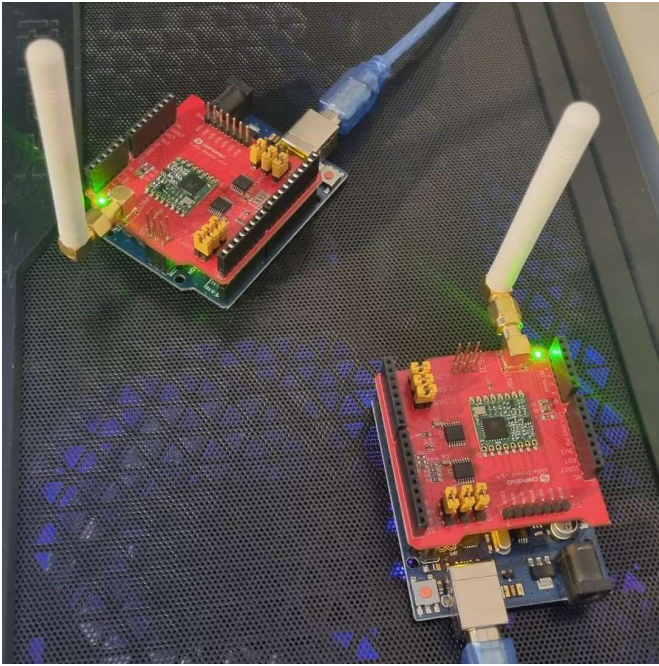
(240, 'Base 01', 1)
(241, 'Base 02', 1)
(242, 'Base 03', 0)
(243, 'Base 04', 0)
(244, 'Base 05', 1)
(245, 'Base 06', 1)
(246, 'Base 07', 0)
(247, 'Base 08', 0)
(248, 'Base 09', 0)
(249, 'Base 10', 1)
(250, 'Base 11', 1)
(251, 'Base 12', 0)

```

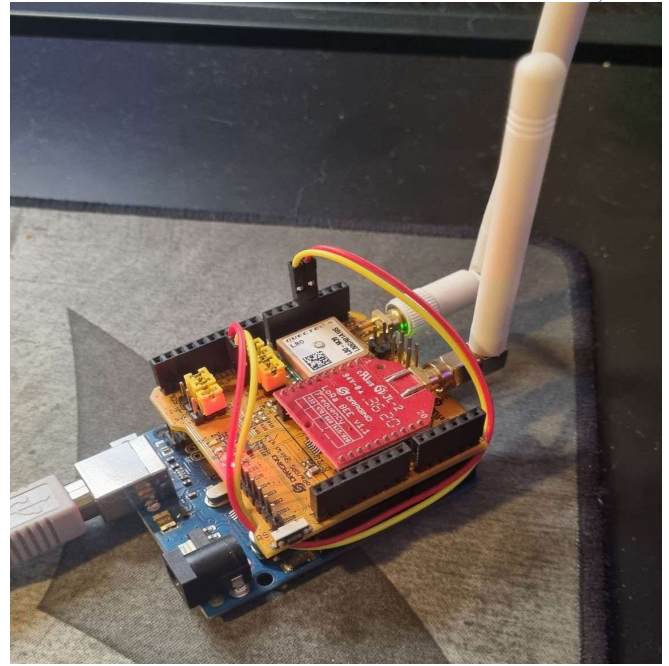
Εικόνα 16 Φωτογραφία βάσης δεδομένων

## Βάσεις φόρτισης και UAV

Για την συγγραφή του πηγαίου κώδικα σε γλώσσα προγραμματισμού CPP και για την ανάγνωση της αποστολής καθώς και της λήψης των μηνυμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Visual Studio της Microsoft όπου από το κατάστημα της εφαρμογής εγκαταστάθηκε το Platform IO (απαραίτητο για τον προγραμματισμό των Arduino) και το Serial Monitor (απαραίτητο για την ανάγνωση των σειριακών των Arduino). Στις παρακάτω φωτογραφίες παρουσιάζονται οι βάσεις και το UAV καθώς και η σειριακές των Arduino.



Εικόνα 17 Φωτογραφία βάσεων φόρτισης



Εικόνα 18 Φωτογραφία UAV

```

Received from: 0xbb
Sent to: 0xfa
Message: I want to charge my batteries
RSSI: -33
SNR: 9.25

Received from: 0xcc
Sent to: 0xfa
Message: The request was accepted
RSSI: -64
SNR: 9.75

Received from: 0xbb
Sent to: 0xfa
Message: On the way!
RSSI: -31
SNR: 10.00

```

Εικόνα 19 Σειριακή της βάσης 0xFA (250) όπου δέχεται το UAV

```

Received from: 0xbb
Sent to: 0xf1
Message: I want to charge my batteries
RSSI: -36
SNR: 9.75

Received from: 0xcc
Sent to: 0xf1
Message: The request was accepted
RSSI: -52
SNR: 9.50

Received from: 0xbb
Sent to: 0xf1
Message: I can't come that far...
RSSI: -37
SNR: 8.75

```

Εικόνα 21 Σειριακή της βάσης 0xF1 (241) όπου το UAV δεν έχει την δυνατότητα να φτάσει στην βάση

```

Battery level: 7%
Estimated battery life: 1.20 hours
My location : 1000.00,1000.00
Received from: 0xf1
Sent to: 0xbb
Message: 500.00,500.00
RSSI: -32
SNR: 9.50

The smallest distance is: 13574.82
Estimated trip duration: 67.87 hours

Received from: 0xf1
Sent to: 0xbb
Message: Enable your safemode
RSSI: -34
SNR: 10.00

```

Εικόνα 20 Σειριακή του UAV όπου η κοντινότερη βάση βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση και δεν μπορεί να φτάσει έως την τοποθεσία της

## Εικόνες πλήρης λειτουργίας της εφαρμογής

### 1. Αποστολή αιτήματος του UAV στις βάσεις

```
Received from: 0xbb  
Sent to: 0xfa  
Message: I want to charge my batteries  
RSSI: -33  
SNR: 9.25
```

*Εικόνα 22 Broadcast αίτημα UAV*

### 2. Αποστολή των βάσεων στον Server για ταυτοποίηση και έγκριση αιτήματος

```
DroneID=187, BaseID=250  
Message: 8I received a charge request, what should I reply?
```

*Εικόνα 23 Αποστολή αιτήματος από την βάση στον server και στοιχεία βάσης και UAV*

### 3. Απάντηση Server στην βάση

```
Received from: 0xcc  
Sent to: 0xfa  
Message: The request was accepted  
RSSI: -64  
SNR: 9.75
```

*Εικόνα 24 Αποδοχή αιτήματος φόρτισης έπειτα από ταυτοποίηση στοιχείων*

4. Αποστολή των συντεταγμένων τους από όλες διαθέσιμες βάσεις στο UAV και λήψη απόφασης σε ποια βάση θα πάει το UAV

```
Battery level: 6%
Estimated battery life: 1.16 hours
My location : 1000.00,1000.00
Received from: 0xf1
Sent to: 0xbb
Message: 500.00,500.00
RSSI: -36
SNR: 9.25

Received from: 0xfa
Sent to: 0xbb
Message: 999.00,1000.00
RSSI: -31
SNR: 9.75

The smallest distance is: 111.19
Estimated trip duration: 0.56 hours
```

*Εικόνα 25 Σειριακή UAV με τοποθεσίες διαθέσιμων βάσεων και επιλογή κοντινότερης*

5. Απάντηση του UAV στην κοντινότερη βάση

```
Received from: 0xbb
Sent to: 0xfa
Message: On the way!
RSSI: -31
SNR: 10.00
```

*Εικόνα 26 Απάντηση UAV ότι κατευθύνεται προς την βάση*

6. Αποστολή μηνύματος από την βάση στο UAV

```
Received from: 0xfa
Sent to: 0xbb
Message: I am waiting you
RSSI: -29
```

*Εικόνα 27 Μήνυμα βάσης προς UAV ότι αναμένει την άφιξη του*

## 7. Αποστολή μηνύματος αλλαγής κατάστασης της βάσης στον Server

```
DroneID=187, BaseID=250
Message: "Set my state to unavailable"
```

*Εικόνα 28 Μήνυμα βάση στον Server για την αλλαγή της κατάστασης του*

## 8. Έπειτα από την φόρτιση του UAV αποστολή μηνύματος από την βάση στον server ότι είναι διαθέσιμη ξανά

```
BaseID=250
Available again!
```

*Εικόνα 29 Βάση ξανά διαθέσιμη έπειτα από την φόρτιση του UAV*

### Περίπτώσεις

A) Στην περίπτωση όπου στο βήμα 3 η ταυτοποίηση δεν είναι έγκυρη ο Server αποστέλλει το εξής μήνυμα στην βάση :

```
Received from: 0xcc
Sent to: 0xf1
Message: 404
RSSI: -56
SNR: 9.25
```

*Εικόνα 30 Μήνυμα Server σε βάση μη έγκυρης ταυτοποίησης*

Ενώ στην περίπτωση που το UAV δεν έχει διαθέσιμες μονάδες αποστέλλει το παρακάτω μήνυμα

```
Received from: 0xcc
Sent to: 0xf1
Message: Not enough credits!
RSSI: -53
SNR: 9.50
```

*Εικόνα 31 Μήνυμα Server σε βάση ανεπαρκών μονάδων*



Στη συνέχεια με τη σειρά της η βάση στέλνει στο UAV το παρακάτω μήνυμα

```
Received from: 0xfa
Sent to: 0xbb
Message: Your request has been rejected
RSSI: -30
SNR: 10.00
```

*Εικόνα 32 Απόρριψη αιτήματος φόρτισης του UAV*

Β) Στην περίπτωση που στο βήμα 4 το UAV δεν έχει την δυνατότητα να φτάσει στην κοντινότερη βάση, το UAV αποστέλλει στο βήμα 5 το παρακάτω μήνυμα :

```
Received from: 0xbb
Sent to: 0xf1
Message: I can't come that far...
RSSI: -37
SNR: 8.75
```

*Εικόνα 33 Μήνυμα UAV σε βάση ότι δεν μπορεί να φτάσει στην τοποθεσία της*

Ενώ στο βήμα 6 η βάση απαντάει στο UAV το μήνυμα

```
Received from: 0xf1
Sent to: 0xbb
Message: Enable your safemode
RSSI: -34
SNR: 10.00
```

*Εικόνα 34 Αποστολή μηνύματος βάσης στο UAV να ενεργοποιήσει την ασφαλή λειτουργία του*

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Οδηγίες εγκατάστασης εργαλείων και βιβλιοθηκών για την χρήση της εφαρμογής

#### Εγκατάσταση του Raspberry Pi OS και απαιτούμενες τις βιβλιοθήκες

Προαπαιτούμενα :

- SD κάρτα 16gb (το λιγότερο)
- Εγκατάσταση σε έναν Η/Υ το λογισμικό της Raspberry, Raspberry Pi imager
- Θύρα στον Η/Υ για SD κάρτα ή εξωτερικός εξοπλισμός που έχει αυτή την δυνατότητα(πχ USB στικάκι με υποδοχή για SD κάρτα)

Έχοντας τον απαραίτητο παραπάνω εξοπλισμό, έπειτα ανοίγουμε το Raspberry Pi imager στον Η/Υ και επιλέγουμε ποιο λειτουργικό σύστημα θέλουμε να εγκαταστήσουμε στην SD κάρτα. Για την εφαρμογή της διπλωματικής εργασίας και επειδή θέλουμε να έχουμε GUI επιλέξαμε το Raspberry Pi OS 64-bit. Στην συνέχεια πατάμε την επιλογή Write και περιμένουμε να τελειώσει η διαδικασία εγκατάστασης.



Εικόνα 35 GUI Raspberry Pi Imager

Για την χρήση του προγράμματος του Server απαιτούνται οι εξής εντολές στην γραμμή εντολών για την εγκατάσταση των βιβλιοθηκών στο Raspberry Pi OS :

- Εγκατάσταση SQLite βιβλιοθήκης για την βάση δεδομένων  
`sudo apt-get install sqlite3`
- Εγκατάσταση βιβλιοθηκών για την δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος  
`sudo apt-get install python3-tk`  
`pip3 install customtkinter`
- Εγκατάσταση βιβλιοθήκης για την χρήση του I2C και input-output ακίδων του Raspberry Pi (DigitalIO και Board)  
`pip3 install adafruit-blinka`
- Εγκατάσταση βιβλιοθήκης για την λειτουργία του LoRa Chip SX1278  
`pip3 install adafruit-circuitpython-rfm9x`

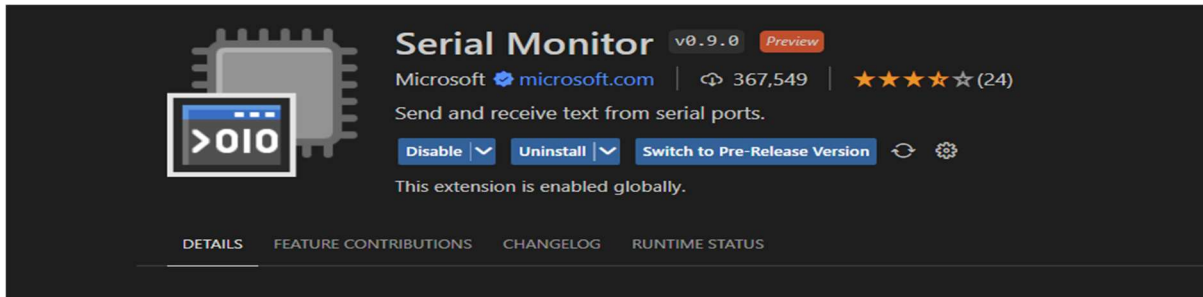
## Εγκατάσταση του Visual Studio Code και τις απαιτούμενες επεκτάσεις

1. Πηγαίνουμε στο <https://code.visualstudio.com/download>
2. Επιλέγουμε το λειτουργικό του Η/Υ που θέλουμε να το εγκαταστήσουμε
3. Εκτελούμε το αρχείο που κατεβάσαμε

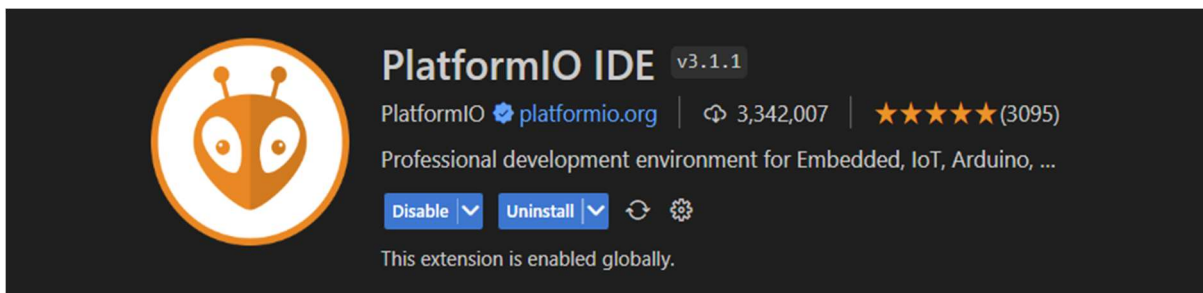


Εικόνα 36 Λογότυπο του Visual Studio Code

4. Αφού τελειώσουμε την διαδικασία εγκατάστασης του Visual Studio Code, ανοίγουμε το πρόγραμμα και πηγαίνουμε στο Marketplace
5. Επιλέγουμε τις επεκτάσεις Serial Monitor και PlatformIO IDE και τις εγκαθιστούμε στο Visual Studio Code

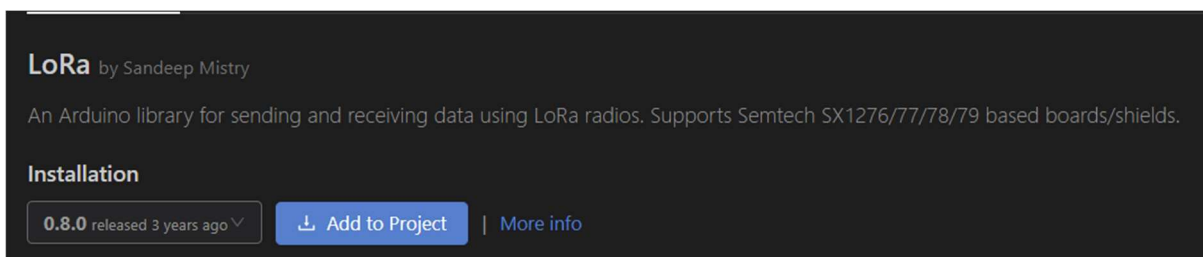


Εικόνα 37 Επέκταση Serial Monitor



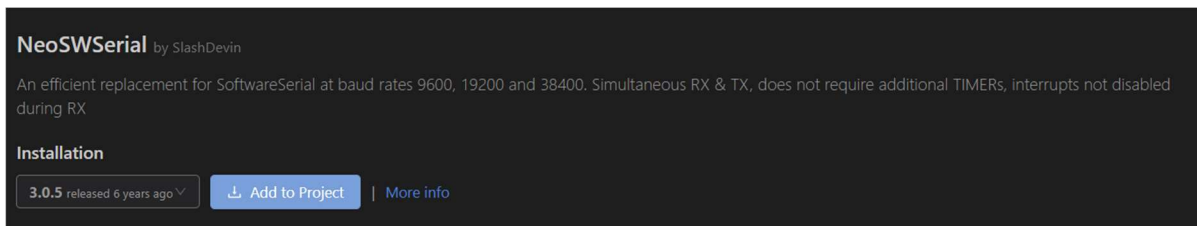
Εικόνα 38 Επέκταση PlatformIO IDE

6. Έπειτα πηγαίνουμε στο PlatformIO IDE επιλέγουμε από το μενού την επιλογή Libraries και ψάχνουμε τις εξής βιβλιοθήκες :
  - LoRa



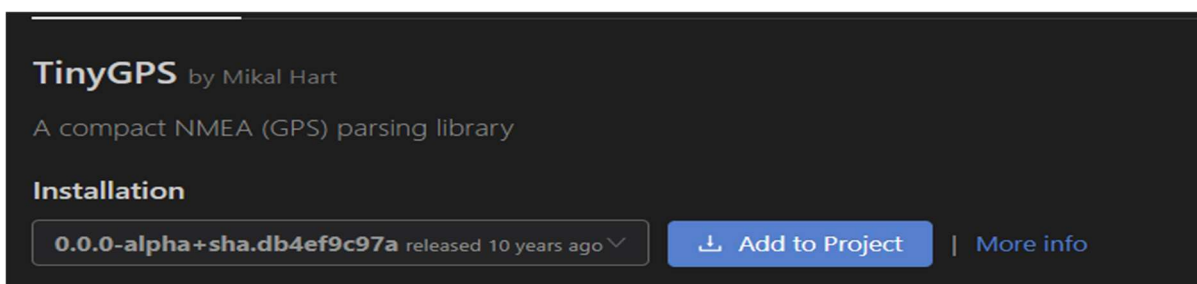
Εικόνα 39 PlatformIO βιβλιοθήκη LoRa

- NeoSWSerial



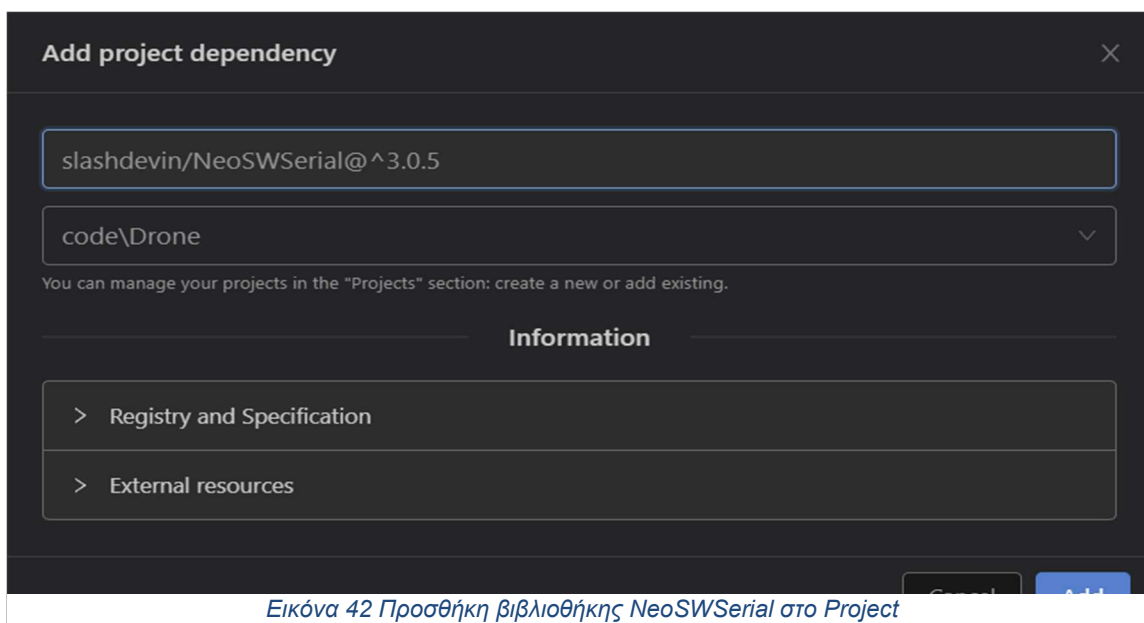
Εικόνα 40 PlatformIO βιβλιοθήκη NeoSWSerial

- TinyGPS (για το UAV στον πηγαίο κώδικα των βάσεων δεν χρησιμοποιείτε αυτή η βιβλιοθήκη καθώς δεν υπάρχει συσκευή GPS)



Εικόνα 41 PlatformIO βιβλιοθήκη TinyGPS

7. Στην συνέχεια για κάθε βιβλιοθήκη πατάμε την επιλογή Add to Project με σκοπό να εγκαταστήσουμε στο Project που γράφουμε τον κώδικα την βιβλιοθήκη που θέλουμε για να την εφαρμογή



Εικόνα 42 Προσθήκη βιβλιοθήκης NeoSWSerial στο Project

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<https://www.semtech.com/>

<https://www.dragino.com/>

<https://www.raspberrypi.com/>

<https://www.arduino.cc/>

<https://www.thethingsnetwork.org>

[www.inpixon.com/technology](http://www.inpixon.com/technology)

[www.nanotron.com/en](http://www.nanotron.com/en)

<http://www.sghoslya.com>

<https://en.wikipedia.org>

<https://www.techtarget.com>

- 1) Qasim Chaudhari, “Understanding LoRa PHY (Long-Range Physical Layer)”, Wireless Pi
- 2) M. Knight and B. Seeber, Decoding LoRa: Realizing a Modern LPWAN with SDR, Proceedings of the 6th GNU Radio Conference, Vol 1, No 1, 2016.
- 3) O. Seller and N. Sornin, Low power long range transmitter, Patent EP 2 763 321 A1,2014.
- 4) Kumari, P.; Mishra, R.; Gupta, H.P.; Dutta, T.; Das, S.K. An Energy Efficient Smart Metering System using Edge Computing in LoRa Network. IEEE Trans. Sustain. Comput. 2021.
- 5) Flauzac, O.; Hérard, J.; Nolot, F.; Cola, P. A Fault Tolerant LoRa/LoRaWAN Relay Protocol Using LoRaWAN Class A Devices. In Proceedings of the International Conference on Ad-Hoc Networks and Wireless, Bari, Italy, 19–21 October 2020; Springer: Berlin, Germany, 2020; pp. 295–302.
- 6) Sundaram, J.P.S.; Du, W.; Zhao, Z. A survey on lora networking: Research problems, current solutions, and open issues. IEEE Commun. Surv. Tutor. 2019, 22, 371–388
- 7) Vikas Hassija , Vikas Saxena. Vinay Chamola , “Scheduling drone charging for multi-drone network based on consensus time-stamp and game theory”, October 2019
- 8) AQEEL MAHMOOD JAWAD , HAIDER MAHMOOD JAWAD, ROSDIADEE NORDIN ,SADIK KAMEL GHARGHAN , NOR FADZILAH ABDULLAH ,AND MAHMOOD JAWAD ABU-ALSHAEER, “Wireless Power Transfer With Magnetic Resonator Coupling and Sleep/Active Strategy for a Drone Charging Station in Smart Agriculture” , VOLUME 7, 2019
- 9) Mehran Behjati , Aishah Binti Mohd Noh , Haider A. H. Alobaidy , Muhammad Aidiel Zulkifley ,Rosdiadee Nordin and Nor Fadzilah Abdullah, “LoRa

- Communications as an Enabler for Internet of Drones towards Large-Scale Livestock Monitoring in Rural Farms”, June 2021
- 10) Qazawat Zirak, Dmitriy Shashev, Stanislav Shidlovskiy , “Swarm of Drones Using LoRa Flying Ad-Hoc Network” , 2021
  - 11)Attila Simo , Simona Dzitac , Ioan Dzitac , Mihaela Frigura-Iliasa , Flaviu Mihai Frigura-Iliasa,” Air quality assessment system based on self-driven drone and LoRaWAN network” ,*Computer Communications* 175 (2021) 13–24
  - 12)Anders Carlsson , Ievgeniia Kuzminykh , Robin Franksson, and Alexander Liljegren, “Measuring a LoRa Network:Performance, Possibilities and Limitations” Karlskrona, Sweden