



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διασύνδεση μετεωρολογικού σταθμού Ε.Μ.Π.
στο Internet of Things με χρήση
τεχνολογίας LoRa

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Γεωργίου Ι. Κελίδη

Επιβλέπων: Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εργαστήριο Δικτύων Υπολογιστών

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως λευκή.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής
Εργαστήριο Δικτύων Υπολογιστών

Διασύνδεση μετεωρολογικού σταθμού Ε.Μ.Π.
στο Internet of Things μέσω
τεχνολογίας LoRa

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Γεωργίου Ι. Κελίδη

Επιβλέπων: Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Ιουλίου 2020.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Ευστάθιος Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Συμεών Παπαβασιλείου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ιωάννα Ρουσσάκη
Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2020

(Υπογραφή)

.....

Γεώργιος Ι. Κελίδης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2020 – All rights reserved.



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής
Εργαστήριο Δικτύων Υπολογιστών

Copyright © – All rights reserved. Γεώργιος Ι. Κελίδης, 2020
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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 τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως λευκή.

Περίληψη

Η παρούσα εργασία ασχολείται σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο με τη διαμόρφωση LoRa και το πρωτόκολλο LoRaWAN, μία αναπτυσσόμενη τεχνολογία δικτύων χαμηλής ισχύος – ευρείας περιοχής (Low-Power, Wide-Area Network – LPWAN), στα οποία εδράζεται σε μεγάλο βαθμό το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT).

Μέσα από τη χρήση κατάλληλων ηλεκτρονικών και ψηφιακών βαθμίδων, πομποδεκτών και λογισμικού, υλοποιείται η διασύνδεση του μετεωρολογικού σταθμού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.) στο IoT, με σκοπό την αποστολή και την προώθηση μετεωρολογικών δεδομένων σε διαδικτυακές πλατφόρμες για περαιτέρω χειρισμό, αξιοποίηση και αποθήκευση.

Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιούνται δύο ανεξάρτητες υλοποιήσεις, των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Λέξεις Κλειδιά

LoRa, LoRaWAN, LPWAN, end-device, Internet of Things, The Things Network, MQTT

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως λευκή.

Abstract

This project deals theoretically and practically with LoRa modulation and LoRaWAN protocol, a developing technology of Low-Power, Wide-Area Networks (LPWAN), on which the Internet of Things (IoT) is largely based.

Through the use of appropriate electronic and digital modules, transceivers and software, the interconnection of the meteorological station of the National Technological University of Athens (NTUA) to the IoT is implemented, in order to send and forward meteorological data to online platforms for further handling, utilization and storage.

In this context, two independent implementations are carried out, the results of which are presented in detail in the respective chapters.

Keywords

LoRa, LoRaWAN, LPWAN, end-device, Internet of Things, The Things Network, MQTT

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως λευκή.

*Αφιερώνεται στη μνήμη του πατέρα μου
Γιάννη Γ. Κελίδη*

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως λευκή.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2019 – 2020 στον τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Ευστάθιο Συκά και τον ερευνητή κ. Δημήτριο Καλογερά που μου έδωσαν τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα τόσο πολυδιάστατο και ενδιαφέρον θέμα, αποκρυσταλλώνοντας κεκτημένες γνώσεις και αποκτώντας νέες, αλλά κυρίως εμπλουτίζοντας την αντίληψή μου με δημιουργικό τρόπο.

Εκφράζω την απέραντη ευγνωμοσύνη μου στη μητέρα μου Χρυσούλα, γιατί έθεσε τις βάσεις για την πορεία μου και ήταν σταθερά δίπλα μου σε κάθε μου βήμα. Παράλληλα ευχαριστώ τις αδελφές μου Μαίρη και Βούλα, για την υποστήριξη και το ενδιαφέρον τους.

Τέλος, ευχαριστώ τη σύζυγό μου Χριστίνα, που με την καθημερινή της στάση, την κατανόηση και τις συμβουλές της, στάθηκε – όπως πράττει πάντα – πολύτιμος αρωγός στην προσπάθειά μου.

*Γεώργιος Ι. Κελίδης
Ιούλιος 2020*

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως λευκή.

“Without data, you’re just another person with an opinion.”

– W. Edwards Deming –

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως λευκή.

Περιεχόμενα

Μέρος Α: Θεωρητικό υπόβαθρο	1
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας	1
1.3 Συνεισφορά διπλωματικής εργασίας	3
1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 2: Internet of Things	5
2.1 Ορισμός	5
2.2 Παραδείγματα εφαρμογών	5
2.3 Πλεονεκτήματα	8
2.4 Εμπλεκόμενες τεχνολογίες	9
2.5 Προκλήσεις.....	11
2.6 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC).....	11
2.7 Προδιαγραφές – Τυποποίηση.....	12
Κεφάλαιο 3: Low-Power Wide-Area Network (LPWAN).....	14
3.1 Γενικά.....	14
3.2 Απαιτήσεις	14
3.3 Τεχνολογίες LPWAN.....	16
3.3.1 Γενικά.....	16
3.3.2 NB – IoT (Narrowband IoT)	16
3.3.3 SigFox.....	17
3.3.4 LoRa (Long Range).....	18
3.3.5 Σύγκριση.....	18
Κεφάλαιο 4: LoRa	21
4.1 Εισαγωγή	21
4.2 Διαμόρφωση LoRa (LoRa Modulation ή LoRa PHY).....	22
4.2.1 Γενικά.....	22
4.2.2 Θεώρημα Shannon – Hartley	22
4.2.3 Διασπορά φάσματος (Spread-spectrum – SS).....	23
4.2.3.1 Γενικά	23

4.2.3.2	<i>Direct-sequence spread-spectrum – DSSS (Διασπορά φάσματος άμεσης ακολουθίας)</i>	24
4.2.3.3	<i>Frequency-hopping spread-spectrum – FHSS (Διασπορά φάσματος αναπήδησης συχνότητας)</i>	25
4.2.3.4	<i>Chirp spread-spectrum – CSS (Chirp: Compressed High Intensity Radar Pulse)</i>	26
4.2.4	<i>Ανάλυση Διαμόρφωσης LoRa</i>	28
4.2.4.1	<i>Ανάλυση βασικών μεγεθών διαμόρφωσης LoRa</i>	28
4.2.4.2	<i>Αντιμετώπιση παρεμβολών</i>	32
4.2.4.3	<i>Βασικές ιδιότητες διαμόρφωσης LoRa</i>	34
4.3	<i>Πρωτόκολλο LoRaWAN (LoRaWAN protocol)</i>	36
4.3.1	<i>Εισαγωγή</i>	36
4.3.2	<i>Ανάλυση λειτουργίας δικτύου LoRaWAN</i>	38
4.3.2.1	<i>Κλάσεις συσκευών (Device Classes)</i>	38
4.3.2.2	<i>Ενεργοποίηση τελικού κόμβου (End-Device Activation)</i>	40
4.3.2.3	<i>Ασφάλεια</i>	41
4.3.2.4	<i>Δομές και τύποι μηνυμάτων (Message Formats and Types)</i>	42
4.3.2.5	<i>Προσαρμοστικός ρυθμός μετάδοσης (Adaptive data rate – ADR)</i>	44
4.3.2.6	<i>Τοπικές παράμετροι</i>	47
4.3.2.7	<i>Όρια και περιορισμοί πρωτοκόλλου LoRaWAN</i>	49
	<i>Κεφάλαιο 5: Υποστηρικτικά συστήματα και υποδομές</i>	51
5.1	<i>Γενικά</i>	51
5.2	<i>The Things Network (TTN)</i>	51
5.3	<i>Eclipse Mosquitto MQTT broker</i>	53
5.4	<i>EnhydriS</i>	54
5.5	<i>TagoIO</i>	55
	<i>Κεφάλαιο 6: Παρουσίαση βασικού εξοπλισμού</i>	56
6.1	<i>Γενικά</i>	56
6.2	<i>Raspberry Pi 3 Model B</i>	56
6.3	<i>Dragino LoRa/GPS HAT v1.4</i>	57
6.4	<i>EnviroDIY MayFly data logger</i>	58
6.5	<i>SODAQ LoRaBee RN2483</i>	60
6.6	<i>Raspberry Pi Zero W</i>	61

Μέρος Β: Υλοποίηση	62
Κεφάλαιο 7: Διασύνδεση μετεωρολογικού σταθμού Ε.Μ.Π. στο <i>Internet of Things (IoT)</i>	62
7.1 Γενικά.....	62
7.2 Απαιτήσεις και περιορισμοί.....	63
7.3 Αρχικοποίηση υποστηρικτικών συστημάτων και υποδομών.....	66
7.3.1 Αρχικοποίηση περιβάλλοντος TTN.....	66
7.3.1.1 Δημιουργία λογαριασμού TTN.....	66
7.3.1.2 Προσθήκη εφαρμογής TTN.....	67
7.3.1.3 Εγγραφή συσκευής.....	69
7.3.2 Αρχικοποίηση MQTT broker.....	71
7.3.3 Αρχικοποίηση περιβάλλοντος EnhydriS.....	71
7.3.4 Αρχικοποίηση περιβάλλοντος TagoIO.....	73
7.4 Στήσιμο κόμβου LoRa.....	79
7.4.1 Συνδεσμολογία.....	79
7.4.2 Προγραμματισμός.....	82
7.5 Οριστικοποίηση εφαρμογής TTN.....	85
7.6 Στήσιμο ενδιάμεσου host.....	86
7.6.1 Συνδεσμολογία.....	86
7.6.2 Προγραμματισμός.....	89
7.7 Παρουσίαση και διαχείριση δεδομένων.....	91
7.7.1 The Things Network.....	91
7.7.2 EnhydriS.....	93
7.7.3 TagoIO.....	95
7.8 Ενεργειακοί υπολογισμοί.....	97
Κεφάλαιο 8: Δοκιμή μικροελεγκτή <i>EnviroDIY Mayfly</i>	99
8.1 Γενικά.....	99
8.2 Απαιτήσεις και περιορισμοί.....	100
8.3 Αρχικοποίηση υποστηρικτικών συστημάτων και υποδομών.....	100
8.4 Στήσιμο κόμβου LoRa.....	100
8.4.1 Συνδεσμολογία.....	100
8.4.2 Προγραμματισμός.....	107
8.5 Οριστικοποίηση εφαρμογής TTN.....	110

8.6	Παρουσίαση και διαχείριση δεδομένων	111
8.6.1	<i>The Things Network</i>	111
8.6.2	<i>TagoIO</i>	112
8.7	Ενεργειακοί υπολογισμοί.....	113
Κεφάλαιο 9: Σύνοψη, συμπεράσματα και επεκτάσεις.....		118
9.1	Σύνοψη και συμπεράσματα	118
9.2	Επεκτάσεις	119
9.2.1	Πληροφορίες διοικητικής φύσης	120
9.2.2	Πληροφορίες επιχειρησιακής φύσης.....	120
Κεφάλαιο 10: Λογισμικό.....		123
10.1	Υλοποίηση κεφαλαίου 7.....	123
10.1.1	<i>pll.py (LoRa node)</i>	123
10.1.2	<i>periodic.c (LoRa node)</i>	124
10.1.3	<i>crontab (LoRa node)</i>	129
10.1.4	<i>TTN decoder</i>	129
10.1.5	<i>raw2enhydri.py (ενδιάμεσος host)</i>	131
10.1.6	<i>crontab (ενδιάμεσος host)</i>	132
10.2	Υλοποίηση κεφαλαίου 8.....	132
10.2.1	<i>LoRa_Mayfly.ino</i>	132
10.2.2	<i>TTN decoder</i>	137
Βιβλιογραφία		138

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1	5
Σχήμα 2.2	6
Σχήμα 2.3	5
Σχήμα 4.1	21
Σχήμα 4.2	36
Σχήμα 4.3	38
Σχήμα 4.4	39
Σχήμα 4.5	42
Σχήμα 4.6	43
Σχήμα 4.7	44
Σχήμα 5.1	51
Σχήμα 5.2	54
Σχήμα 5.3	55

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 6.1	56
Εικόνα 6.2	57
Εικόνα 6.3	59
Εικόνα 6.4	60
Εικόνα 6.5	61
Εικόνα 7.1	65
Εικόνα 7.2	66
Εικόνα 7.3	66
Εικόνα 7.4	67
Εικόνα 7.5	67
Εικόνα 7.6	68
Εικόνα 7.7	68
Εικόνα 7.8	69
Εικόνα 7.9	69
Εικόνα 7.10	70
Εικόνα 7.11	70

<i>Εικόνα 7.12</i>	71
<i>Εικόνα 7.13</i>	72
<i>Εικόνα 7.14</i>	72
<i>Εικόνα 7.15</i>	73
<i>Εικόνα 7.16</i>	74
<i>Εικόνα 7.17</i>	74
<i>Εικόνα 7.18</i>	75
<i>Εικόνα 7.19</i>	75
<i>Εικόνα 7.20</i>	76
<i>Εικόνα 7.21</i>	76
<i>Εικόνα 7.22</i>	77
<i>Εικόνα 7.23</i>	77
<i>Εικόνα 7.24</i>	78
<i>Εικόνα 7.25</i>	78
<i>Εικόνα 7.26</i>	80
<i>Εικόνα 7.27</i>	81
<i>Εικόνα 7.28</i>	82
<i>Εικόνα 7.29</i>	83
<i>Εικόνα 7.30</i>	83
<i>Εικόνα 7.31</i>	85
<i>Εικόνα 7.32</i>	86
<i>Εικόνα 7.33</i>	88
<i>Εικόνα 7.34</i>	88
<i>Εικόνα 7.35</i>	89
<i>Εικόνα 7.36</i>	91
<i>Εικόνα 7.37</i>	92
<i>Εικόνα 7.38</i>	92
<i>Εικόνα 7.39</i>	93
<i>Εικόνα 7.40</i>	94
<i>Εικόνα 7.41</i>	94
<i>Εικόνα 7.42</i>	95
<i>Εικόνα 7.43</i>	95
<i>Εικόνα 7.44</i>	96
<i>Εικόνα 7.45</i>	96

<i>Εικόνα 7.46</i>	97
<i>Εικόνα 7.47</i>	98
<i>Εικόνα 8.1</i>	104
<i>Εικόνα 8.2</i>	105
<i>Εικόνα 8.3</i>	105
<i>Εικόνα 8.4</i>	106
<i>Εικόνα 8.5</i>	106
<i>Εικόνα 8.6</i>	107
<i>Εικόνα 8.7</i>	108
<i>Εικόνα 8.8</i>	108
<i>Εικόνα 8.9</i>	109
<i>Εικόνα 8.10</i>	110
<i>Εικόνα 8.11</i>	111
<i>Εικόνα 8.12</i>	112
<i>Εικόνα 8.13</i>	112

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 2.1</i>	10
<i>Πίνακας 2.2</i>	10
<i>Πίνακας 2.3</i>	10
<i>Πίνακας 2.4</i>	10
<i>Πίνακας 3.1</i>	19
<i>Πίνακας 4.1</i>	30
<i>Πίνακας 4.2</i>	31
<i>Πίνακας 4.3</i>	44
<i>Πίνακας 4.4</i>	45
<i>Πίνακας 4.5</i>	45
<i>Πίνακας 4.6</i>	46
<i>Πίνακας 4.7</i>	48
<i>Πίνακας 4.8</i>	48
<i>Πίνακας 4.9</i>	50
<i>Πίνακας 7.1</i>	64
<i>Πίνακας 7.2</i>	73

Πίνακας 7.3.....	81
Πίνακας 7.4.....	84
Πίνακας 7.5.....	90
Πίνακας 8.1.....	100
Πίνακας 8.2.....	113
Πίνακας 8.3.....	114
Πίνακας 8.4.....	115
Πίνακας 9.1.....	119

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1.....	9
Διάγραμμα 3.1.....	18
Διάγραμμα 4.1.....	24
Διάγραμμα 4.2.....	24
Διάγραμμα 4.3.....	25
Διάγραμμα 4.4.....	26
Διάγραμμα 4.5.....	26
Διάγραμμα 4.6.....	26
Διάγραμμα 4.7.....	26
Διάγραμμα 4.8.....	26
Διάγραμμα 4.9.....	27
Διάγραμμα 4.10.....	27
Διάγραμμα 4.11.....	30
Διάγραμμα 4.12.....	32
Διάγραμμα 4.13.....	33
Διάγραμμα 4.14.....	33
Διάγραμμα 4.15.....	33
Διάγραμμα 4.16.....	39
Διάγραμμα 7.1.....	62
Διάγραμμα 7.2.....	79
Διάγραμμα 7.3.....	80
Διάγραμμα 7.4.....	87
Διάγραμμα 8.1.....	99

<i>Διάγραμμα 8.2</i>	<i>101</i>
<i>Διάγραμμα 8.3</i>	<i>102</i>
<i>Διάγραμμα 8.4</i>	<i>103</i>
<i>Διάγραμμα 8.5</i>	<i>116</i>

Η σελίδα αυτή είναι σκοπίμως λευκή.

Μέρος Α: Θεωρητικό υπόβαθρο

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως ευρύτερο αντικείμενο το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) μέσα από το πρίσμα των δικτύων ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (Low-Power, Wide-Area Networks – LPWANs). Ειδικότερα, ασχολείται με τη χρήση των LPWANs για τη διασύνδεση δικτύου αισθητήρων στο IoT, μέσω της τεχνολογίας διαμόρφωσης LoRa και του ραγδαία αναπτυσσόμενου MAC πρωτοκόλλου LoRaWAN, χρησιμοποιώντας την back-end υποστηρικτική υποδομή του The Things Network (TTN), το σύστημα αποθήκευσης και διαχείρισης υδρολογικών και μετεωρολογικών χρονοσειρών Enhydriis και την υψηλού επιπέδου cloud-based διαδικτυακή πλατφόρμα παρακολούθησης/ελέγχου TagoIO.

1.2 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία στοχεύει στην υλοποίηση συστήματος ασύρματης μετάδοσης δεδομένων τεχνολογίας LoRa και στην αποθήκευση, παρουσίαση και διάθεση της πληροφορίας στους ενδιαφερόμενους χρήστες μέσω διαδικτυακής πλατφόρμας, με σκοπό:

1. Τη διασύνδεση του μετεωρολογικού σταθμού του Ε.Μ.Π. στο Internet of Things (IoT).
2. Τη δοκιμή του μικροελεγκτή EnviroDIY Mayfly, ενός νέου data logger ανοικτού hardware.

Η επιθυμητή διασύνδεση περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

1. Λήψη, επεξεργασία και αποθήκευση (data logging) μετεωρολογικών δεδομένων.
2. Ασφαλής και αξιόπιστη διαχείριση, κωδικοποίηση και ασύρματη μετάδοση των δεδομένων (πρωτόκολλο MAC και αρχιτεκτονική συστήματος: LoRaWAN, φυσικό επίπεδο: διαμόρφωση LoRa).

3. Λήψη των δεδομένων από εγκατεστημένη LoRa Gateway του E.M.Π. και προώθησή τους στην back-end υποστηρικτική υποδομή του The Things Network (TTN).

4. Έλεγχο και αποκωδικοποίηση των δεδομένων από τους Network Server και Application Server του TTN.

5. Εξαγωγή από το TTN, αποθήκευση, ανάλυση και παρουσίαση των δεδομένων με 2 εναλλακτικούς τρόπους:

α. Εξαγωγή και αποθήκευσή τους σε ενδιάμεσο host με χρήση του Eclipse Mosquitto MQTT broker και στη συνέχεια διασύνδεση και προώθησή τους στο σύστημα αποθήκευσης και διαχείρισης υδρολογικών και μετεωρολογικών χρονοσειρών Enhydris (μόνο για τον 1^ο σκοπό).

β. Απευθείας διασύνδεση με την υψηλού επιπέδου cloud-based διαδικτυακή πλατφόρμα παρακολούθησης/ελέγχου TagoIO. Η διασύνδεση αυτή υλοποιεί αυτόματα την εξαγωγή και αποθήκευση των δεδομένων στην υπόψη πλατφόρμα, η οποία προτείνεται ως πλατφόρμα ενσωμάτωσης (integration) στο περιβάλλον TTN (και για τους 2 σκοπούς).

Η υλοποίηση των παραπάνω βημάτων προϋποθέτει τις εξής εργασίες:

1. Διασύνδεση, προγραμματισμό και φυσική εγκατάσταση ηλεκτρονικών διατάξεων και συστημάτων, σε επίπεδο τελικού κόμβου (end node/device):

α. Ως κόμβος 1 single-board υπολογιστής Raspberry Pi 3 Model B συνδεδεμένος με 1 expansion module LoRa HAT (για τον 1^ο σκοπό).

β. Ως κόμβος/data logger 1 μικροελεγκτής Mayfly Data Logger συνδεδεμένος με 1 expansion module LoRa Bee RN2483 (για τον 2^ο σκοπό).

2. Δημιουργία, ρύθμιση και διαχείριση λογαριασμών στις παρακάτω υποστηρικτικές υποδομές/πλατφόρμες:

α. The Things Network (TTN), και για τους 2 σκοπούς.

β. Enhydris (σύστημα αποθήκευσης και διαχείρισης υδρολογικών και μετεωρολογικών χρονοσειρών), μόνο για τον 1^ο σκοπό.

γ. TagoIO (υψηλού επιπέδου cloud-based διαδικτυακή πλατφόρμα παρακολούθησης/ελέγχου), και για τους 2 σκοπούς.

3. Διασύνδεση και προγραμματισμό ενδιάμεσου host (μόνο για τον 1^ο σκοπό) που υλοποιεί:

- α. MQTT broker για εξαγωγή δεδομένων από το περιβάλλον TTN.
- β. Διασύνδεση και προώθηση δεδομένων στο Enhydriis.

1.3 Συνεισφορά διπλωματικής εργασίας

Ο μετεωρολογικός σταθμός του Ε.Μ.Π. έχει εγκατασταθεί από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων. Βρίσκεται στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου (37.97385, 23.78743) σε υψόμετρο 219 m. Αποτελείται από ένα Raspberry Pi B και ένα Data Logger Zeno 3200, συνδεδεμένα με σειριακή θύρα. Ο Logger συλλέγει τα δεδομένα από τους αισθητήρες και τα εγγράφει σε αρχείο CSV, το οποίο μεταφέρεται στο Raspberry, για την περαιτέρω προώθησή του σε βάση δεδομένων. Η φυσική μεταφορά των δεδομένων γίνεται από ένα ασύρματο link τεχνολογίας WiFi με σύνδεση point-to-Access-Point μεταξύ του σταθμού και της σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Ο σταθμός χρησιμοποιεί μπαταρία για το Data Logger και κοινή τροφοδοσία δικτύου για το Raspberry Pi B. Το σύστημα είναι επομένως εξαρτημένο ενεργειακά από το δίκτυο ηλεκτροδότησης και συνεπώς ευάλωτο σε αστάθειες αυτού. Επίσης παρουσιάζει σχετικά υψηλή κατανάλωση ισχύος. Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνίσταται αρχικά στην αντιμετώπιση των θεμάτων αυτών, με εκμετάλλευση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων των δικτύων LPWAN. Παράλληλα, στη μελέτη και δοκιμή της ραγδαία αναπτυσσόμενης τεχνολογίας LoRa, καθώς και των υποστηρικτικών υποδομών που τη συνοδεύουν, στο πλαίσιο του IoT. Συνοπτικά:

- Οφέλη τεχνολογίας LPWAN: χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση, μεγαλύτερη εμβέλεια, αυξημένη ατρωσία στον Η/Μ θόρυβο, ανεξαρτησία από δίκτυο ηλεκτροδότησης.
- Οφέλη υποστηρικτικών υποδομών: Αξιόπιστη και εύκολη αποθήκευση, παρουσίαση και ανάλυση μετεωρολογικών δεδομένων.
- Ανάπτυξη και δοκιμή σχετικών προγραμμάτων.
- Προσαρμογή και δοκιμή σχετικών βιβλιοθηκών.
- Δοκιμή σχετικών ηλεκτρονικών διατάξεων και συστημάτων.

1.4 Δομή διπλωματικής εργασίας

Στο Μέρος Α (Θεωρητικό υπόβαθρο, κεφάλαια 1 έως 6) της εργασίας γίνεται μία θεωρητική μελέτη των επιμέρους εννοιών, λειτουργιών και διαδικασιών που τελικά συνδυαζόμενες οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα, καθώς επίσης και η παρουσίαση του γενικότερου τεχνολογικού και θεσμικού πλαισίου. Επίσης, παρουσιάζονται οι ηλεκτρονικές διατάξεις και τα συστήματα που χρησιμοποιούνται.

Στο Μέρος Β (Υλοποίηση, κεφάλαια 7 έως 10) της εργασίας γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση της υλοποίησης των διασυνδέσεων, βήμα προς βήμα, τόσο στο σκέλος του υλικού, όσο και του λογισμικού. Έπειτα γίνεται μία σύνοψη και εξάγονται συμπεράσματα, ενώ παράλληλα γίνεται αναφορά σε ενδεχόμενες επεκτάσεις της τεχνολογίας LoRa. Στο τέλος παρατίθεται το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.

Κεφάλαιο 2: Internet of Things

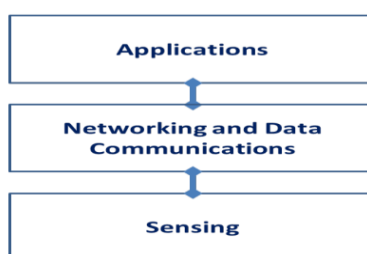
2.1 Ορισμός

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) αναφέρεται στην επέκταση της ασύρματης διαδικτυακής συνδεσιμότητας σε φυσικά αντικείμενα («πράγματα/things»), χαρακτηριζόμενα από μοναδικό διαδικτυακό αναγνωριστικό, καθώς και στο ευρύ πλέγμα επικοινωνιών και αλληλεπιδράσεων μεταξύ των αντικειμένων αυτών και άλλων συσκευών και συστημάτων, συνδεδεμένων στο διαδίκτυο [1].

Ως «things» μπορούν να εκληφθούν φυσικές ψηφιακές ή μηχανικές οντότητες, καθημερινά αντικείμενα, ακόμη και έμβια όντα. Τα εν λόγω αντικείμενα έχουν τη δυνατότητα διαδραστικής επικοινωνίας με άλλα μέσω διαδικτύου (ή και τοπικά), ενώ δύνανται να παρακολουθούνται και να ελέγχονται εξ αποστάσεως. Ως προϋπόθεση λοιπόν τίθεται η ενσωμάτωση στα «things» ηλεκτρονικών μέσων και λογισμικού, καθώς και δυνατότητα συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο, ώστε να επιτρέπεται η σύνδεση και η ανταλλαγή δεδομένων χωρίς την απαίτηση αλληλεπίδρασης ανθρώπου με άνθρωπο ή ανθρώπου με υπολογιστή [2]. Το IoT σηματοδοτεί την εποχή όπου το διαδίκτυο συναντά, εμπλέκεται και αλληλεπιδρά άμεσα με τον φυσικό κόσμο.

2.2 Παραδείγματα εφαρμογών

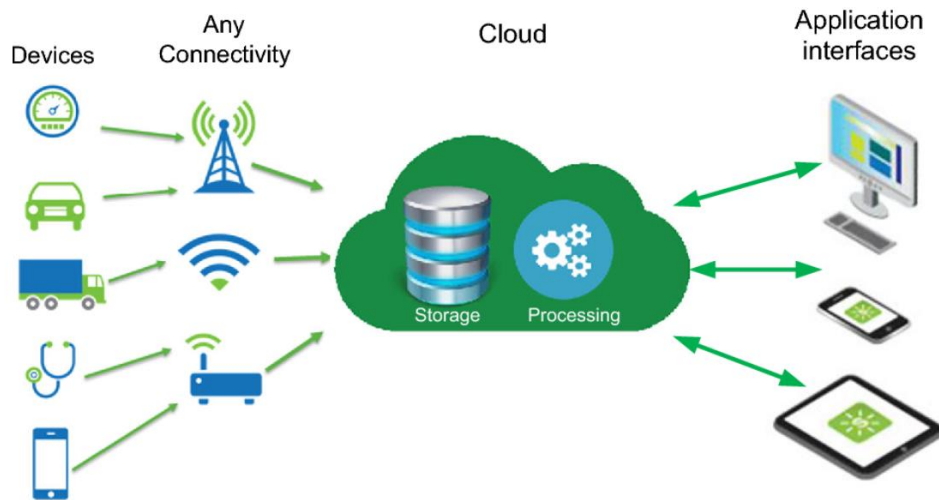
Το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) με έντυπό του το 2015 («Towards a Definition of the Internet of Things (IoT)», May 2015, [1]) περιέγραψε την αρχιτεκτονική του IoT ως ένα σύστημα τριών (3) επιπέδων:



Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική τριών (3) επιπέδων του IoT (IEEE) [1]

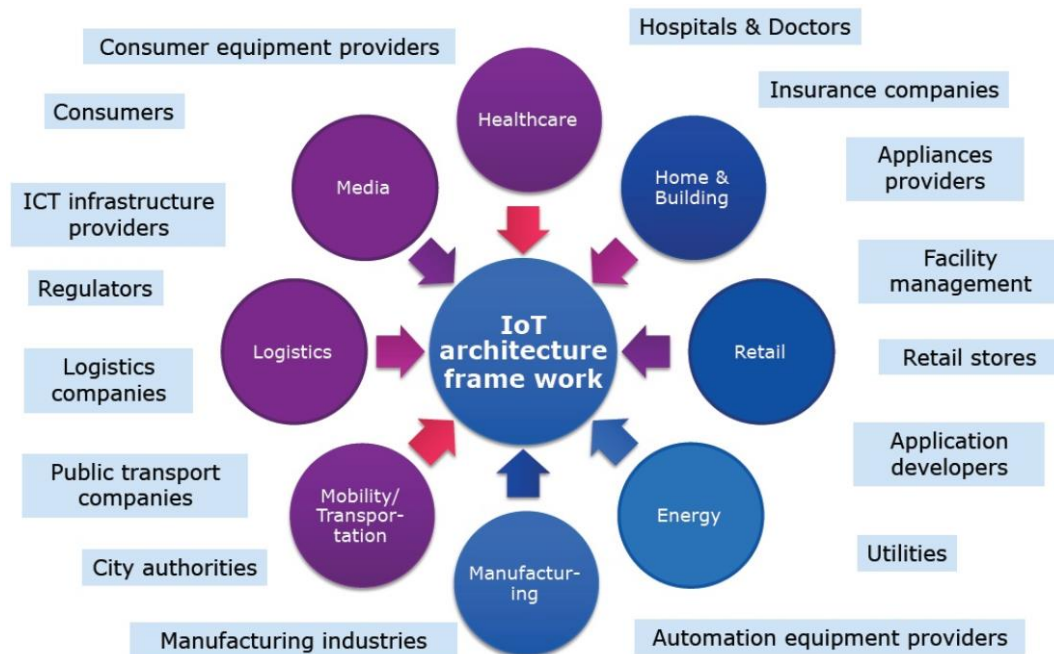
Η βασική οργάνωση μιας IoT αρχιτεκτονικής έχει ως εξής: Πλήθος από τελικές συσκευές χρήστη (end devices), διασυνδέονται μέσω κάποιας τεχνολογίας (κατά βάση, αλλά όχι αποκλειστικά, ασύρματης) σε μία κεντρική διαχειριστική cloud υποδομή, στην

οποία μεταδίδουν τα επιθυμητά δεδομένα. Τα δεδομένα αποθηκεύονται ή/και επεξεργάζονται στο cloud, από όπου αξιοποιούνται κατά τρόπο επιθυμητό από λοιπές εφαρμογές χρήστη.



Σχήμα 2.2: Βασική οργάνωση IoT αρχιτεκτονικής [3]

Στο ίδιο έντυπο του IEEE [1] αποτυπώνεται και η επέκταση του IoT στην αγορά, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3: Πεδία εφαρμογής IoT και ενδιαφερόμενα νομικά/φυσικά πρόσωπα (IEEE) [1]

Οι εφαρμογές του IoT αγγίζουν κάθε πτυχή της καθημερινότητας του σύγχρονου ανθρώπου, αλλά και της βιομηχανικής, οικονομικής και επιστημονικής πρακτικής [4].

Μία από τις συνήθεις κατηγοριοποιήσεις είναι η εξής: IoT industrial, IoT public, IoT appliance, IoT personal. Στη συνέχεια παρατίθενται εφαρμογές ανά κατηγορία [5]:

- **IoT industrial**

Βιομηχανία (Manufacturing): Προληπτική συντήρηση εξοπλισμού, διαχείριση βιομηχανικών δεδομένων(big data), κυβερνο-φυσικά συστήματα (έξυπνα δίκτυα, συστήματα αυτόνομης οδήγησης, κατανεμημένα ρομποτικά συστήματα, πλοήγηση), αισθητήρες παρακολούθησης, ενεργοποιητές, διακόπτες, έξυπνοι μετρητές, 3D εκτυπωτές, εξ αποστάσεως αυτοματοποίηση και βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας, διαχείριση αποθεμάτων, παρακολούθηση συνθηκών εργασίας (π.χ. ποιότητα αέρα).

Γεωργία (Agriculture): Συλλογή μετεωρολογικών και γεωλογικών δεδομένων (αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, ταχύτητας ανέμου, βροχόπτωσης, σύσταση εδάφους), πλοήγηση και αυτόνομη οδήγηση γεωργικών μηχανημάτων.

Κτηνοτροφία (Livestock farming): Παρακολούθηση και εντοπισμός ζωικού κεφαλαίου, παρακολούθηση υγείας.

ΙΑτρική και φροντίδα υγείας (Medical and healthcare): Φορητές συσκευές παρακολούθησης ζωτικών σημείων, συστήματα ειδοποίησης εκτάκτου ανάγκης, συσκευές επιτόπου διάγνωσης, συσκευές παρακολούθησης-ελέγχου-αντιμετώπισης χρόνιων παθήσεων.

Μεταφορές (Transportation): Έξυπνο σύστημα ελέγχου κυκλοφορίας, στάθμευσης, συλλογής διοδίων, διαχείρισης εφοδιασμού και στόλου οχημάτων, έλεγχος οχήματος, υποβοήθησης οδηγού, ασφαλείας, επικοινωνίας οχήματος με όχημα (V2V) / με υποδομή (V2I) / με πεζό (V2P), πλοήγηση.

Ενεργειακή διαχείριση (Energy management): Έξυπνα δίκτυα (smart grid), έξυπνοι μετρητές, διακόπτες, εξ αποστάσεως έλεγχος και βελτιστοποίηση κατανάλωσης ενέργειας.

- **IoT public**

Υποδομές (Infrastructure): Παρακολούθηση και προληπτική συντήρηση αστικών και αγροτικών υποδομών (π.χ. γεφυρών, σιδηροδρομικών γραμμών), δομικός έλεγχος ασφαλείας κρισίμων υποδομών, διαχείριση συμβάντων και συντονισμός ανταπόκρισης σε έκτακτη ανάγκη, συστήματα βελτιστοποίησης – προγραμματισμού

κατασκευών, διαχείριση απορριμάτων και αποβλήτων, έλεγχος επιπέδων ηχορύπανσης, αποδοτική διαχείριση δημοτικού φωτισμού.

Περιβαλλοντικός έλεγχος (Environmental monitoring): Παρακολούθηση ποιότητας αέρα, νερού, εδάφους, ατμοσφαιρικών συνθηκών, άγριας πανίδας, ανίχνευση μόλυνσης, παρακολούθηση στάθμης ποταμών, έγκαιρη προειδοποίηση για φυσικές καταστροφές.

- **IoT appliance**

Έξυπνο σπίτι (Smart home): Έξυπνος φωτισμός/θέρμανση/κλιματισμός, πολυμέσα, ασφάλεια, έξυπνες συσκευές (π.χ. ψυγείο, τηλεόραση), ενεργειακή διαχείριση κτιρίου, οικιακοί αυτοματισμοί.

- **IoT personal**

Προσωπική διασύνδεση: Smartphones, wearables, tablets, trackers.

2.3 Πλεονεκτήματα

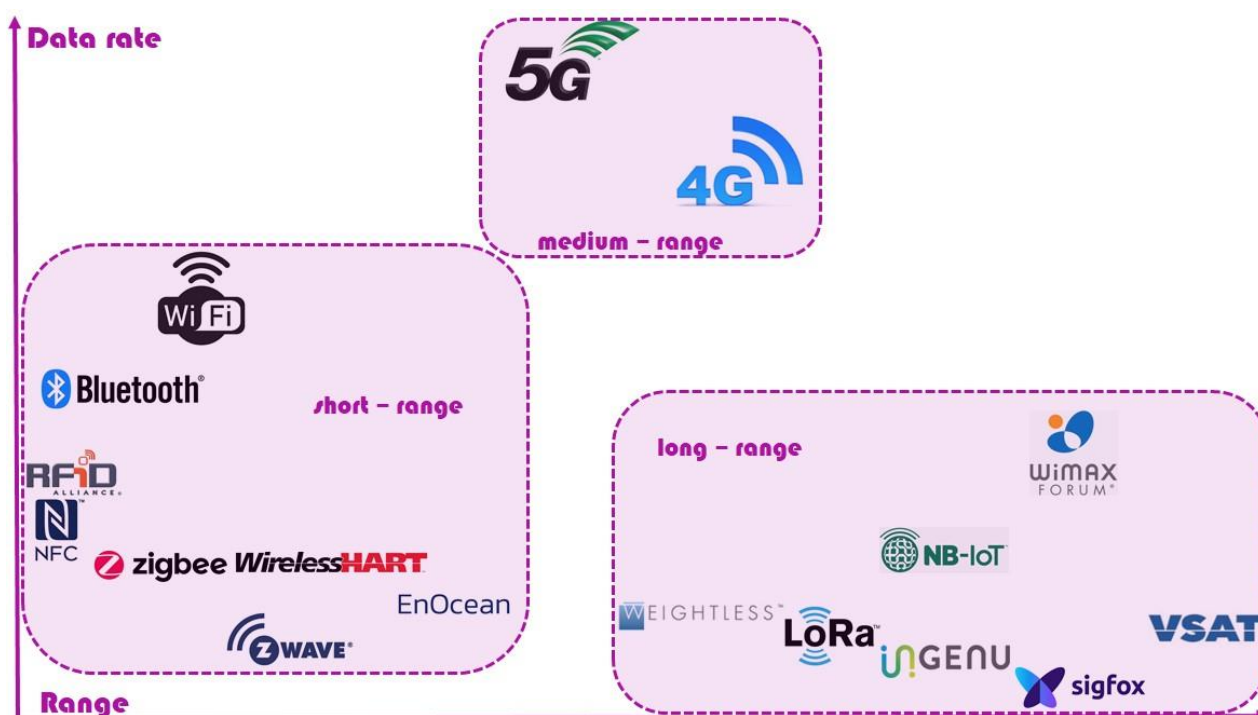
Σε συνδυασμό με τη διαρκή βελτίωση του υλικού, που εξασφαλίζει μεγάλες ταχύτητες επεξεργασίας και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, το IoT [6]:

- Εξασφαλίζει την εύρωστη επικοινωνία μεταξύ συσκευών (Machine-to-Machine (M2M) communication).
- Διευκολύνει την αυτοματοποίηση, αφού η -χρονοβόρα- ανθρώπινη παρέμβαση δεν είναι απαραίτητη.
- Βελτιστοποιεί τον έλεγχο, εφόσον αυξάνει τον όγκο των δεδομένων που συλλέγονται, επομένως και τη διαθέσιμη πληροφορία, ενώ παράλληλα διευκολύνει την παρακολούθησή τους. Αποτέλεσμα η ασφαλέστερη λήψη αποφάσεων.
- Μέσω της αποτελεσματικής επικοινωνίας μεταξύ συσκευών, εξοικονομεί ενέργεια και βοηθά στην εξοικονόμηση πόρων. Έτσι καθιστά τα συστήματα πιο αποδοτικά και μειώνει το οικονομικό κόστος.
- Μειώνει την ανθρώπινη προσπάθεια, απελευθερώνοντας παράλληλα ανθρώπινους πόρους. Ευρύτερα, ενισχύει την παραγωγικότητα του ανθρώπινου προσωπικού, εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο.
- Βελτιώνει την εμπειρία χρήσης.

2.4 Εμπλεκόμενες τεχνολογίες

Το IoT υλοποιείται με βάση τεχνολογίες/πρωτόκολλα που είτε υφίστανται πλέον της εικοσαετίας (π.χ. Wi-Fi), είτε αναπτύχθηκαν κατά τα τελευταία χρόνια (π.χ. LoRa, EnOcean), ακολουθώντας τη ραγδαία αύξηση του αριθμού των «things» και των σχετικών εφαρμογών, καλύπτοντας την ανάγκη για αποδοτικότερη, ασφαλέστερη και αξιόπιστη διασύνδεση.

Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει ποιοτικά τη θέση των τεχνολογιών αυτών μεταξύ τους, με βάση το ρυθμό μετάδοσης και την εμβέλεια καθεμίας:



Διάγραμμα 2.1: Συγκριτική ποιοτική αποτύπωση εμπλεκόμενων τεχνολογιών

Στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται, χάριν συγκρίσεως, σημαντικές τεχνολογίες/πρωτόκολλα που επικράτησαν ή/και εκτιμάται ότι θα διαδραματίσουν στο μέλλον σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη και περαιτέρω ανάπτυξη του IoT, κατηγοριοποιημένες σε ασύρματες μικρής, μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας και σε ενσύρματες.

Παράμετρος	Wi – Fi	Bluetooth	ZigBee	RFID/NFC	Z – wave	WirelessHART	EnOcean
Συχνότητες (MHz)	900, 2400, 5000, 5900, 60000	2400 – 2484	2400	0.12 - 0.15, 13.56, 433, 865-868, 902-928, 2450-5800, 3.1 – 10000	865.2 - 926	2400	315,868.3, 902, 928.35, 2400
EIRP τελικού κόμβου	< 20 dBm	< 20 dBm	< 20 dBm	< 25 dBm	< 13 dBm	< 10 dBm	< -2 dBm
Ευαισθησία δέκτη	-95 dBm	-98 dBm	-100 dBm	-109 dBm	-98 dBm	-108 dBm	-98 dBm
Εμβέλεια μέγιστη	100 m	100 m	300 m	100 m	100 m	100 m	300 m
Εμβέλεια τυπική	< 35 m	< 10 m	< 30 m	< 1 m	< 65 m	< 70 m	< 300 m
Ρυθ. μετάδοσης μέγιστος	6.7 Gbps	24 Mbps	250 kbps	800 kbps	100 kbps	250 kbps	125 kbps
Ρυθ. μετάδοσης τυπικός	< 100 Mbps	< 24 Mbps	< 250 kbps	< 100kbps	40 kbps	< 250 kbps	< 125 kbps

Πίνακας 2.1: Ασύρματες IoT τεχνολογίες μικρής εμβέλειας (short range wireless) [7] – [14]

Παράμετρος	4G/LTE	5G
Συχνότητες (MHz)	450 – 5900	450 – 6000, 24205 – 52600
EIRP τελικού κόμβου	< 23 dBm	< 55 dBm
Ευαισθησία δέκτη	-120 dBm	-97 dBm
Εμβέλεια μέγιστη	100 km	1 km
Εμβέλεια τυπική	< 5 km	< 0.5 km
Ρυθμός μετάδοσης μέγιστος	1 Gbps	20 Gbps
Ρυθμός μετάδοσης τυπικός	< 200 Mbps	1 Gbps

Πίνακας 2.2: Ασύρματες IoT τεχνολογίες μέσης εμβέλειας (medium range wireless) [15] – [16]

Παράμετρος	NB – IoT	Sigfox	LoRa	WiMax	Ingenu/RPMA	Weightless	VSAT
Συχνότητες (MHz)	703 – 2170	868, 915, 433	868, 915, 433	2300 - 2800, 3300 - 3800, 5100 - 5850	2400	138, 433, 470, 780, 868, 915, 923	3700-14500
EIRP τελικού κόμβου	< 23 dBm	< 24 dBm	< 14 dBm	< 27 dBm	< 27 dBm	< 17 dBm	< 34.5 dBm
Ευαισθησία δέκτη	-133 dBm	-126 dBm	-137 dBm	-98 dBm	-142 dBm	-131 dBm	-100 dBm
Εμβέλεια μέγιστη	100 km	40 km	20 km	50 km	15 km	> 2 km	35786 km
Εμβέλεια τυπική	< 10km	< 10km	< 10km	< 50 km	< 15 km	2 km	35786 km
Ρυθ. μετάδοσης μέγιστος	250 kbps	1 kbps	50 kbps	70 Mbps	624 kbps	100 kbps	155 Mbps
Ρυθ. μετάδοσης τυπικός	< 250 kbps	< 100 bps	< 10 kbps	< 10 Mbps	< 20 kbps	< 100 kbps	< 56 kbps

Πίνακας 2.3: Ασύρματες IoT τεχνολογίες μεγάλης εμβέλειας (longe range wireless) [17] – [23]

Παράμετρος	Ethernet	PLC
Ρυθ. μετάδοσης μέγιστος	100 Gbps	2 Mbps
Ρυθ. μετάδοσης τυπικός	< 100 Gbps	< 250 kbps

Πίνακας 2.4: Ενσύρματες IoT τεχνολογίες (wired) [24] – [25]

2.5 Προκλήσεις

Όπως σε κάθε τεχνολογικό προϊόν, η μελέτη αξιοποίησης της τεχνολογίας IoT σε κάποιο περιβάλλον, απαιτεί τη στάθμιση ανταγωνιζόμενων παραγόντων, προκειμένου να αξιολογηθεί η χρήση της. Στο πλαίσιο αυτό, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω [26]:

- **Συμβατότητα:** Δεν υπάρχει προς ώρας διεθνής τυποποίηση στην επικοινωνία. Επηρεάζει την επικοινωνία των συσκευών διαφορετικών τεχνολογιών, γεγονός που δυσχεραίνει τη μεταξύ τους επικοινωνία.

- **Πολυπλοκότητα:** Τα συστήματα IoT συλλέγουν και διαχειρίζονται τεράστιο όγκο δεδομένων που, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητά τους (των συστημάτων), αυξάνει την πιθανότητα σφαλμάτων. Η ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων αυτών αποτελεί μία διαρκή και δύσκολη πρόκληση, δεδομένου ότι ο όγκος των δεδομένων αυξάνεται ραγδαία.

- **Ιδιωτικότητα:** Εφόσον τα δεδομένα διαμοιράζονται μεταξύ διαφορετικών συσκευών, το ενδεχόμενο hacking δε μπορεί να αποκλειστεί. Στο βαθμό που αποτελούν προσωπικά ή κρίσιμα δεδομένα, θα πρέπει να είναι κρυπτογραφημένα, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα μη πιστοποιημένης πρόσβασης σε αυτά.

- **Ασφάλεια:** Κάποιος ιός σε μία εκ των συσκευών, καθίσταται εύκολα απειλητικός για όλες τις συσκευές, λόγω ακριβώς της αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ τους.

2.6 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα (EMC)

Η διαρκής επέκταση και εμπλοκή του IoT σε ένα ευρύ πλέγμα δραστηριοτήτων και διαδικασιών αναδεικνύει θέματα ηλεκτρομαγνητικής (H/M) συμβατότητας (Electromagnetic Compatibility – EMC), δεδομένου ότι υφίστανται απαιτήσεις ελαχιστοποίησης παρεμβολών και ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και εξασφάλισης ατρωσίας των συσκευών [27]. Βασικά σημεία:

- Σύμφωνα με εκτιμήσεις, τα «things» ήταν (παγκοσμίως) περί τα 15 δισεκατομμύρια το 2015, περί τα 27 δισεκατομμύρια το 2019 και εκτιμάται ότι θα φτάσουν τα 75 δισεκατομμύρια το 2025, με 127 νέα να συνδέονται στο διαδίκτυο κάθε δευτερόλεπτο [28]. Καθοριστική ώθηση σε αυτή την τάση εκτιμάται ότι θα δώσει η

εξέλιξη του 5G, που θεωρείται βασικό εργαλείο προς την πλήρη (full scale) υλοποίηση του IoT.

- Οι παραπάνω συσκευές θα είναι ολοένα και πιο πυκνά καταναμημένες στο χώρο – πρακτικά παντού.

- Σε πολλές περιπτώσεις, οι IoT συσκευές είναι σχεδιασμένες για λειτουργία και σε συχνότητες σημαντικά υψηλότερες από αυτές των μέχρι τώρα καθιερωμένων δοκιμών EMC, συνεπώς τα χαρακτηριστικά εκπομπής και ατρωσίας θα είναι άγνωστα.

- Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται εκτείνονται συνήθως στο μη αδειοδοτημένο φάσμα, ειδικότερα στις ζώνες βιομηχανικών, επιστημονικών και ιατρικών (Industrial, Scientific, Medical – ISM) εφαρμογών, οι οποίες είναι ήδη επιβαρυνμένες.

- Συνύπαρξη δικτύων μικρής, μεσαίας και μεγάλης εμβέλειας.

Τα παραπάνω οδηγούν:

1. Σε μία άνευ προηγουμένου πολυπλοκότητα σεναρίων ηλεκτρομαγνητικής συνύπαρξης, δυναμικών και μη προβλέψιμων.

- 2 Σε λειτουργία υπό περιβάλλον υψηλότερων Η/Μ παρεμβολών, με συνεπαγόμενη μείωση των σχετικών σηματοθορυβικών λόγων, που σημαίνει αυξημένη ευαισθησία σε αυτές (στις Η/Μ παρεμβολές).

3. Στην ανάγκη αναθεώρησης της μεθοδολογίας και εξέλιξης του εξοπλισμού και των οργάνων για δοκιμές EMC, με στόχο να προσαρμοστούν στην επέκταση του φάσματος συχνοτήτων.

2.7 Προδιαγραφές – Τυποποίηση

Οι βασικοί φορείς τυποποίησης είναι οι εξής:

- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- International Telecommunication Union (ITU)
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI)
- Internet Engineering Task Force (IETF)
- National Institute of Standards and Technology (NIST)
- Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS)
- World Wide Web Consortium (W3C)

Οι σχετικές με το IoT προδιαγραφές των παραπάνω φορέων (καθώς και λοιπών φορέων και οργανισμών τυποποίησης, αλλά και συμμαχιών (alliances) εταιρειών) τυποποιούν μεμονωμένες τεχνολογίες που λειτουργούν στο πλαίσιο του IoT (π.χ. WiFi, Bluetooth, ZigBee, SigFox) και όχι καθολικά και ενιαία το IoT. Αναφέρθηκε και παραπάνω ότι η συμβατότητα μεταξύ συσκευών από διαφορετικούς κατασκευαστές παρουσιάζει κενά. Η μεγαλύτερη δυσκολία των ομάδων εργασίας που εργάζονται για τον καθορισμό προδιαγραφών είναι η εξασφάλιση της διαλειτουργικότητας των συσκευών, μέσα σε ένα ιδιαίτερα ευρύ πλέγμα διαφορετικών εφαρμογών, διαφόρων δικτύων επικοινωνίας και διαφορετικών κατασκευαστών. Το γεγονός ότι σε πολλές περιπτώσεις πρόκειται για τεχνολογίες αποκλειστικής χρήσης (proprietary technologies), καθώς και η ανάγκη ενσωμάτωσης και των παλαιότερων τεχνολογιών, που δεν ήταν αρχικά σχεδιασμένες για κάτι αντίστοιχο, προσθέτουν έναν ακόμη βαθμό δυσκολίας.

Η παρούσα εργασία περιορίζεται στην παρουσίαση προδιαγραφών που σχετίζονται με την τεχνολογία LoRa, η οποία λαμβάνει χώρα στο κεφάλαιο 4.

Κεφάλαιο 3: Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)

3.1 Γενικά

Οι ευρέως διαδεδομένες ασύρματες τεχνολογίες, όπως το Wi – Fi ή το Bluetooth, δεν έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν μεγάλη εμβέλεια. Μεγαλύτερη εμβέλεια από αυτές μπορεί να πετύχει ένα κυψελωτό σύστημα κινητών τηλεπικοινωνιών, όπως το 4G, με αντίτιμο όμως την αυξημένη κατανάλωση ισχύος των τελικών κόμβων. Ως λύση προβάλλονται τα τελευταία χρόνια τα δίκτυα χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής (Low-Power Wide-Area Network – LPWAN): Αποτελούν ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα ευρείας περιοχής, σχεδιασμένα για μετάδοση δεδομένων με χαμηλό ρυθμό, μεταξύ κεντρικών συσκευών (base stations, gateways) και ακραίων/τελικών συσκευών, που αποκαλούνται κατά περίπτωση end devices, user equipment (UE), objects ή nodes (στο εξής «τελικοί κόμβοι», για λόγους απλότητας).

Τα τρία (3) κύρια χαρακτηριστικά ενός LPWAN είναι τα παρακάτω:

- Μεγάλη εμβέλεια
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος
- Χαμηλό κόστος

Σημειώνεται πως ο όρος «LPWAN» δεν υφίστατο πριν το 2013.

3.2 Απαιτήσεις

Τα LPWANs υλοποιούν κατά κύριο λόγο δίκτυα απομακρυσμένων μετρητών ρεύματος, δίκτυα αισθητήρων παρακολούθησης αγροκτηνοτροφικών μονάδων, δίκτυα αισθητήρων για επίβλεψη και έλεγχο παραγωγής βιομηχανικών μονάδων, δίκτυα έξυπνων κτηριακών εγκαταστάσεων, δίκτυα τερματικών πωλήσεων σε εμπορικές επιχειρήσεις, καθώς και δίκτυα εντοπισμού και παρακολούθησης εμπορευμάτων για τη διαχείριση εφοδιαστικών αλυσίδων. Αναμένεται να καλύψουν ένα ευρύτερο πλέγμα εφαρμογών, πολλές από τις οποίες παρατίθενται στην παράγραφο 2.2 της παρούσας εργασίας.

Η κάλυψη των παραπάνω περιπτώσεων προϋποθέτει τη συμμόρφωση των LPWANs με συγκεκριμένες απαιτήσεις και περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα:

1. Εξασφάλιση εμβέλειας, που κυμαίνεται από μερικά km εντός αστικού ιστού, έως δεκάδες km σε αγροτικές περιοχές (**κατά προσέγγιση από 1 έως 50 km**), ακόμη και σε εσωτερικούς ή/και υπόγειους χώρους. Η διαμόρφωση θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να παρουσιάζει αυξημένη ευρωστία έναντι φαινομένων πολυδιαδρομικής (multipath) μετάδοσης, σκίασης, διαλείψεων, παρεμβολών και θορύβου, παρέχοντας π.χ. δυνατότητα προσαρμογής της ισχύος ή/και του ρυθμού μετάδοσης (Transmit Power Control – TCP και Adaptive Data Rate – ADR αντίστοιχα). Οι τελικοί κόμβοι προτιμάται να είναι ακίνητοι ή βραδέως μετακινούμενοι.

2. Λειτουργία των τελικών κόμβων υπό πολύ χαμηλή ισχύ (**ιδανικά της τάξεως του 1 mW σε αναμονή και μερικών δεκάδων mW σε κατάσταση εκπομπής**), ώστε να αποφεύγεται η συχνή κοστοβόρα αντικατάσταση μπαταρίας και να παρατείνεται ο κύκλος ζωής της έως και στα 10 έτη, ή και παραπάνω, κατά περίπτωση. Προς αυτή την κατεύθυνση, είναι καλό π.χ. να μη χρησιμοποιείται το GPS για τον εντοπισμό του κόμβου, διότι η τεχνολογία αυτή είναι ενεργοβόρα. Γενικότερα, ο κόμβος πρέπει να βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία («waked - up») αυστηρά μόνον όταν απαιτείται να αποστείλει ή να λάβει δεδομένα. Αυτό εξυπηρετείται πιο αποτελεσματικά από τοπολογία τύπου αστέρα, με πρωτόκολλο τύπου ALOHA.

Πλέον επιθυμητή είναι η αξιοποίηση τεχνολογιών συγκομιδής ενέργειας (energy harvesting), που μειώνουν παράλληλα το βαρύ περιβαλλοντικό αποτύπωμα της αντικατάστασης μπαταριών εκατοντάδων έως και χιλιάδων τελικών κόμβων.

3. Αγορά εξοπλισμού σε χαμηλό κόστος (**περί τα 2€ ανά τελικό κόμβο**), γρήγορη και με ανάλογα χαμηλό κόστος εγκατάσταση αυτού. Επίσης, αξιοπιστία και μικρές απαιτήσεις συντήρησης, με ανάλογα χαμηλό λειτουργικό κόστος (**περί το 1€ σε ετήσια βάση ανά τελικό κόμβο**) [29].

4. Κλιμακωσιμότητα των δικτύων, μέσω απλοποιημένων και ελαφρών πρωτοκόλλων, αλλά και υλικού χαμηλής πολυπλοκότητας. Η υποδομή θα πρέπει να αναπτύσσεται με ευκολία σε εθνικό επίπεδο, με επαρκή κάλυψη, ακόμα και διασυνοριακά.

5. Ασφάλεια στη μετάδοση δεδομένων. Οι εκάστοτε διαχειριστές υποστηρικτικών υποδομών απαγορεύεται να έχουν πρόσβαση σε ουσιώδη δεδομένα χρηστών.

3.3 Τεχνολογίες LPWAN

3.3.1 Γενικά

Για την ομαλή λειτουργία των LPWANs απαιτείται ένα **πλήρες οικοσύστημα** [30]: Τελικοί κόμβοι, δικτυακή υποδομή, πρωτόκολλα, ελεγκτές δικτύου, διακομιστές δικτύου (network servers), διακομιστές εφαρμογών (application servers) και διεπαφή χρήστη (user interface). Αυτό προσφέρεται στην αγορά είτε ως πλήρης λύση από μία και μοναδική εταιρεία (π.χ. SigFox), είτε χωρίζεται μεταξύ πολλαπλών εταιρειών που συνεργάζονται στενά μεταξύ τους (π.χ. LoRa Alliance).

Στον Πίνακα 2.1 της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκαν (ως «long-range wireless») τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά των κυριότερων τεχνολογιών μεγάλης εμβέλειας IoT ενδιαφέροντος, που χρησιμοποιούν αδειοδοτημένες ή μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων. Από αυτές, οι πλέον αναδυόμενες και κυρίαρχες στον τομέα των LPWA δικτύων είναι οι **NB – IoT, SigFox, και LoRa**.

3.3.2 NB – IoT (Narrowband IoT)

Αναπτύχθηκε από τη συνεργασία 3GPP (3rd Generation Partnership Project), ενώ οι προδιαγραφές δημοσιεύθηκαν το 2016 [31]. Αποτελεί τεχνολογία εκπομπής στενής ζώνης (Narrow Band – NB), που αξιοποιεί τους σταθμούς βάσης του υπάρχοντος κυψελωτού συστήματος κινητής τηλεφωνίας. Έτσι καλύπτει μεγάλο αριθμό τελικών κόμβων (στην προκειμένη «UE»). Χρησιμοποιεί συχνότητες στο αδειοδοτημένο φάσμα.

Συνυπάρχει με τα πρωτόκολλα GSM και LTE. Μπορεί να υλοποιηθεί με μία απλή αναβάθμιση λογισμικού στην υπάρχουσα LTE υποδομή. Ουσιαστικά αποτελεί ένα πρωτόκολλο LTE μειωμένης λειτουργικότητας, υπό την έννοια ότι απενεργοποιεί σημαντικές λειτουργίες του πρωτοκόλλου LTE, ώστε να μειώνει την πολυπλοκότητα και τις ενεργειακές απαιτήσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η λειτουργία της συνάθροισης φερόντων (carrier aggregation) στα LTE δίκτυα, που βελτιώνει σημαντικά τους ρυθμούς μετάδοσης. Ωστόσο, οι υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεν αποτελούν LPWA απαίτηση, συνεπώς το πρωτόκολλο NB – IoT απενεργοποιεί τη συγκεκριμένη λειτουργία, με αποτέλεσμα ο τελικός κόμβος να εξοικονομεί ενέργεια (μπαταρία) και να καθίσταται ενεργειακά πιο αποδοτικός.

Το 2016, οι πολυεθνικές εταιρείες Vodafone Group plc και Huawei Technologies Co., Ltd. ενσωμάτωσαν στο δίκτυο της πρώτης στην Ισπανία την NB – IoT. Σύμφωνα με τη Vodafone, εντός του 2018, καλύπτονταν όλοι οι οικισμοί της Ισπανίας με πληθυσμό άνω των 25.000 κατοίκων, καθώς και το 90% της επικράτειας της Γερμανίας. Την ίδια χρονιά, η εταιρεία ανακοίνωσε ότι σχεδιάζει το διπλασιασμό της NB – IoT κάλυψης στην Ευρώπη έως το τέλος του 2019 [32].

Το 2017, η κυβέρνηση της Κίνας εξέφρασε την ισχυρή στήριξή της στην NB – IoT, θέτοντας στόχους κάλυψης και καθοδηγώντας ενεργά τους εμπλεκόμενους παρόχους (China Mobile Limited, China Telecom Corp. Ltd, China Unicom Group Co. Ltd.), επιχειρώντας να πρωτοπορήσει στη μεγάλης κλίμακας επέκταση της τεχνολογίας. Στο τέλος του 2017, όλες οι μεγάλες πόλεις της χώρας είχαν κάλυψη (400.000 σταθμοί βάσης, 20 εκατομμύρια συνδέσεις), ενώ ο στόχος είναι στο τέλος του 2020 να καλύπτεται όλο το εθνικό δίκτυο (1,5 εκατομμύριο σταθμοί βάσης, 600 εκατομμύρια συνδέσεις). Ως επακόλουθο, η Κίνα ηγείται της επέκτασης και αξιοποίησης της NB – IoT παγκοσμίως, μία δυναμική που εκτιμάται ότι θα συνεχιστεί και στο προσεχές μέλλον [33].

3.3.3 SigFox

Αναπτύχθηκε το 2010 από την εταιρεία SigFox (Γαλλία) και είναι τεχνολογία αποκλειστικής χρήσης (proprietary technology), παρέχοντας end - to - end συνδεσιμότητα, δηλαδή ένα πλήρες IoT οικοσύστημα [34]. Αποτελεί τεχνολογία εκπομπής πολύ στενής ζώνης (Ultra Narrow Band – UNB), που βασίζεται στην εγκατάσταση σταθμών βάσης (base stations) για την ανάπτυξη και επέκταση του δικτύου της. Χρησιμοποιεί συχνότητες στο μη αδειοδοτημένο φάσμα. Οι σταθμοί βάσης καλύπτουν πλήθος τελικών κόμβων (στην προκειμένη «objects»), σε μία τοπολογία αστέρα, όπου το σήμα που εκπέμπεται από έναν τελικό κόμβο λαμβάνεται από κάθε σταθμό βάσης που βρίσκεται εντός εμβέλειας και προωθείται έπειτα στο ένα και μοναδικό SigFox cloud.

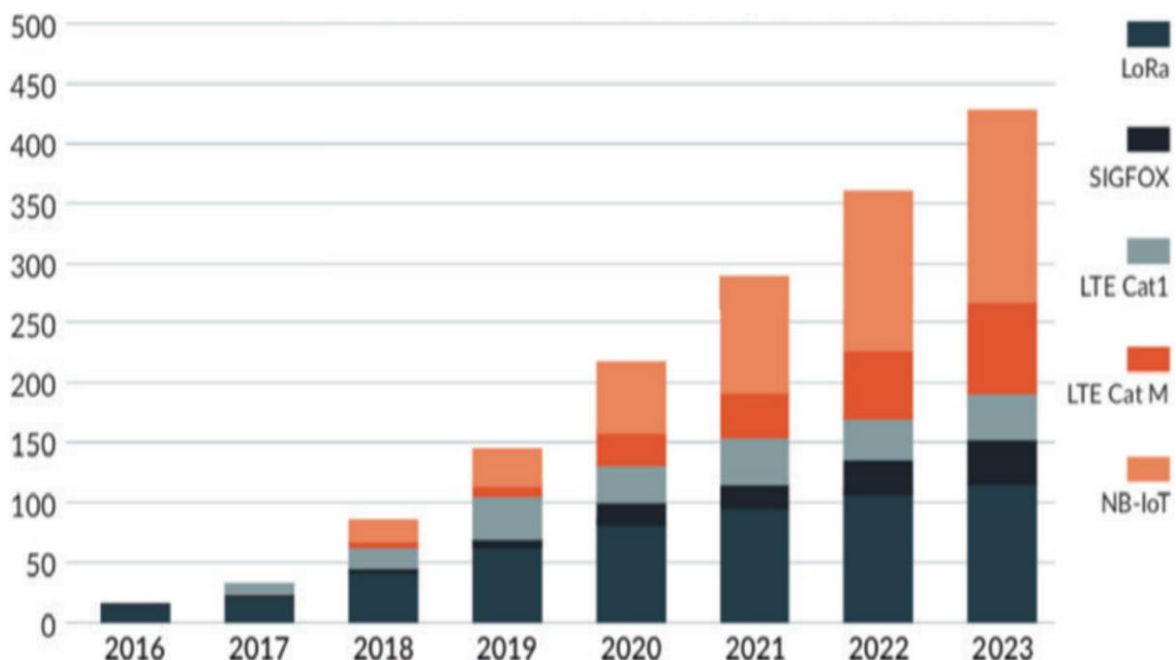
Η SigFox είναι παράλληλα και διαχειριστής/πάροχος LPWA δικτύου (network operator), συνεπώς διαχειρίζεται η ίδια εμπορικά τις IoT λύσεις που προτείνει, εγκαθιστώντας τους proprietary σταθμούς βάσης της. Το 2014, στη Γαλλία υπήρχαν συνολικά 1300 σταθμοί βάσης. Σύμφωνα με την εταιρεία, μέχρι στιγμής το δίκτυό της καλύπτει έκταση 5 εκατομμυρίων km² παγκοσμίως, σε 65 χώρες, με πληθυσμιακή κάλυψη ενός (1) δισεκατομμυρίου ανθρώπων.

3.3.4 LoRa (Long Range)

Αναπτύχθηκε από την εταιρεία Cycleo (Γαλλία). Το 2012 τα δικαιώματα της τεχνολογίας αγοράστηκαν από την εταιρεία Semtech (Η.Π.Α.). Είναι τεχνολογία αποκλειστικής χρήσης, σε ό,τι αφορά το φυσικό επίπεδο, ενώ στο επίπεδο MAC, το πρωτόκολλο LoRaWAN είναι ανοικτό και ελεύθερο. Χρησιμοποιεί ψηφιακή διαμόρφωση εξάπλωσης φάσματος (Chirp Spread Spectrum – CSS), με μικρό έως μεσαίο εύρος ζώνης. Για την ανάπτυξη και επέκταση του δικτύου της βασίζεται στην εγκατάσταση πυλών (gateways), ενώ χρησιμοποιεί συχνότητες στο μη αδειοδοτημένο φάσμα. Παρόμοια με το SigFox, οι πύλες καλύπτουν πλήθος τελικών κόμβων (στην προκειμένη «nodes»), σε μία τοπολογία «αστέρα από αστέρες», όπου το σήμα που εκπέμπεται από έναν τελικό κόμβο λαμβάνεται από κάθε πύλη που βρίσκεται εντός εμβέλειας και προωθείται έπειτα σε κεντρική cloud υποδομή. Η τεχνολογία LoRa θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

3.3.5 Σύγκριση

Η τρέχουσα, αλλά και η βραχυμεσοπρόθεσμα εκτιμώμενη κατάσταση στην αγορά των συσκευών LPWA αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα, σε εκατομμύρια συσκευές ανά έτος και ανά τεχνολογία (LoRa Alliance End of Year Report, 2018):



Διάγραμμα 3.1: Τρέχουσα και προβλεπόμενη κατάσταση στην αγορά των LPWA συσκευών [35]

Στη συνέχεια παρατίθεται πίνακας, όπου παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των τριών τεχνολογιών:

Παράμετρος	NB – IoT	SigFox	LoRa
Εμβέλεια (εντός/εκτός πόλης)	1 km / 10 km	10 km / 40 km	5 km / 20 km
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	250 kbps	1 kbps	50 kbps
Όριο μηνυμάτων/ημέρα (ul/dl)	Απεριόριστα	140 / 4	Απεριόριστα
Μέγ. ωφέλιμο φορτίο/μήνυμα	1600 bytes	12 bytes (ul) / 8 bytes (dl)	222 bytes
Συσκευές/σταθμό βάσης	100.000	1.000.000	1000
Link budget	150dB	151 dB	155 dB
EIRP (μέγιστη/κόμβο)	23 dBm	24 dBm	14 dBm
Ρεύμα αναμονής (sleep current)	5 μ A	2 μ A	1 μ A
Μέγιστο ρεύμα σε εκπομπή	120-300 mA	50 mA	30 mA
Διάρκεια ζωής μπαταρίας	< 10 έτη	> 10 έτη	> 10 έτη
Ενεργειακή απόδοση	Μέτρια	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
Latency	Χαμηλό	Υψηλό	Υψηλό
Διαμόρφωση	QPSK	BPSK	LoRa Spread Spectrum
Συχνότητες	Ζώνες LTE 703 – 2170 MHz (αδειοδοτημένο φάσμα)	Ευρώπη 868 MHz B. Αμερική 915 MHz Ασία 433 MHz (μη αδειοδοτημένο φάσμα)	Ευρώπη 868 MHz B. Αμερική 915 MHz Ασία 433 MHz (μη αδειοδοτημένο φάσμα)
Εύρος ζώνης (bandwidth)	200 kHz	200 kHz	125 / 250 / 500 kHz
Κόστος φάσματος	> 500M€ / MHz	Μηδενικό	Μηδενικό
Κόστος εγκατάστασης	> 15000€ / base station	> 4000€ / base station	< 1000€ / gateway
Κόστος τελικού κόμβου	> 20€	< 2€	3 – 5€
Τοπολογία	Κυψέλη	Αστέρας	Αστέρας
Ανάπτυξη ιδιωτικών δικτύων	Όχι	Όχι	Ναι
Αμφίδρομη επικοινωνία	Ναι	Περιορισμένη	Ναι
Προσαρμ. ρυθ.μετάδοσης (ADR)	Όχι	Όχι	Ναι
Ατρωσία σε παρεμβολές	Χαμηλή	Πολύ υψηλή	Πολύ υψηλή
Κρυπτογράφηση	EPS	Προαιρετική	AES 128b
Κινητικότητα	Μειωμένη	Ναι	Ναι
Εντοπισμός θέσης	Ναι	Ναι	Ναι
Τυποποίηση	3GPP	SigFox – ETSI	LoRa Alliance

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά NB-IoT, SigFox, LoRa [17] - [19], [29], [36]

Βασικά σημεία:

- **Ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service – QoS)**

Η NB – IoT χρησιμοποιεί αδειοδοτημένο φάσμα (συνεπώς πληρωμένο για αποκλειστική χρήση από τον πάροχο) και ένα σύγχρονο (πομπός και δέκτης δουλεύουν συγχρονισμένα) πρωτόκολλο, με αυστηρά καθορισμένα χρονικά παράθυρα. Έτσι επιτυγχάνει πολύ **μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης** και παρουσιάζει **μικρότερο latency**. Σε σχέση με τις SigFox και LoRa (ασύγχρονα πρωτόκολλα μη αδειοδοτημένου φάσματος), **προσφέρει υψηλότερου επιπέδου QoS**.

- **Οικονομικό και ενεργειακό κόστος**

Τα παραπάνω έρχονται με τίμημα αφενός μεν το **ιδιαίτερα υψηλό κόστος της αδειοδότησης φάσματος**, που θα κληθεί να καταβάλει ο χρήστης της NB – IoT, αφετέρου δε την **ταχύτερη εξάντληση των μπαταριών** των τελικών κόμβων, σημείο όπου υπερέχουν οι SigFox και LoRa. Επίσης, το κόστος τελικών συσκευών και συσκευών δικτύου είναι αισθητά μικρότερο στην περίπτωση SigFox και LoRa.

- **Κάλυψη και επεκτασιμότητα**

SigFox και LoRa αναπτύσσουν δικά τους δίκτυα από την αρχή, γεγονός που προσδίδει **μεγάλη ευελιξία και ευκολία κάλυψης** αγροτικών και περιαστικών περιοχών. Από την άλλη, η NB – IoT βασίζεται στην υπάρχουσα υποδομή του κυψελωτού συστήματος κινητών επικοινωνιών, πράγμα που **περιορίζει την τεχνολογία μόνο σε περιοχές όπου υπάρχει 4G κάλυψη**. Τέλος, οι SigFox και LoRa επιτυγχάνουν **μεγαλύτερη εμβέλεια**.

Παρατηρούμε ότι κάθε τεχνολογία υπερέχει σε κάποια παράμετρο, ενώ υπολείπεται σε κάποια άλλη. Για παράδειγμα σε μία εφαρμογή που απαιτεί χαμηλό latency, θα προτιμηθεί η NB – IoT λύση, ενώ μία εφαρμογή μεταφοράς δεδομένων λίγων δεκάδων bytes υπό ελαστικά χρονικά όρια, θα εξυπηρετηθεί από μία λύση SigFox ή LoRa.

Η στάθμιση των ανταγωνιζομένων παραγόντων (trade-off) γίνεται σε κάθε περίπτωση από τον ενδιαφερόμενο χρήστη, με κριτήριο τη βέλτιστη κάλυψη των αναγκών της εφαρμογής του και λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, οικονομικούς και νομικούς περιορισμούς.

Κεφάλαιο 4: LoRa

4.1 Εισαγωγή

Η τεχνολογία LoRa αναφέρεται τόσο στο υλικό, όσο και στο λογισμικό που υλοποιεί δίκτυα LPWAN. Εδράζεται σε δύο σκέλη:

- **Διαμόρφωση LoRa (LoRa Modulation/LoRa PHY)**, που υλοποιεί το φυσικό επίπεδο (Physical layer). Είναι υπεύθυνη για την επίτευξη ασύρματης ζεύξης μεγάλης εμβέλειας.
- **Πρωτόκολλο LoRaWAN**, που υλοποιεί το επίπεδο ζεύξης δεδομένων/υποεπίπεδο MAC (Data link layer/MAC sublayer). Καθορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας και την αρχιτεκτονική του δικτύου.

Τα παραπάνω αναφέρονται στο πλαίσιο του μοντέλου αναφοράς OSI (Open Systems Interconnection model). Στο επίπεδο εφαρμογών (Application layer) βρίσκονται οι διεπαφές με τα εκάστοτε προγράμματα/χρήστες (σχήμα 4.1)

Μοντέλο OSI	Επίπεδα LoRa
Επίπεδο εφαρμογών	Application
Επίπεδο ζεύξης δεδομένων/ υποεπίπεδο MAC	LoRa [®] MAC
	MAC options
	Class A (Baseline) Class B (Baseline) Class C (Continuous)
Φυσικό επίπεδο	LoRa [®] Modulation
	Regional ISM band
	EU 868 EU 433 US 915 AS 430 —

Σχήμα 4.1: Αντιστοίχιση επιπέδων OSI – LoRa [37]

4.2 Διαμόρφωση LoRa (LoRa Modulation ή LoRa PHY)

4.2.1 Γενικά

Η LoRa™ αποτελεί ασύρματη διαμόρφωση για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη εμβέλεια, χαμηλή ισχύ και χαμηλό ρυθμό μετάδοσης (long-range low-power low-data-rate). Χρησιμοποιεί το μη αδειοδοτημένο φάσμα βιομηχανικών, επιστημονικών και ιατρικών (Industrial, Scientific, Medical – ISM) εφαρμογών. Αποτελεί σχήμα διαμόρφωσης παράγωγο του CSS (Chirp Spread Spectrum) σχήματος, που βασίζεται στην εξάπλωση φάσματος. Η διαμόρφωση LoRa εφαρμόζει ένα μεταβλητό ρυθμό μετάδοσης, που επιτρέπει την ανταλλαγή του ρυθμού μετάδοσης με μεγαλύτερη ευαισθησία και μεγαλύτερη εμβέλεια, ακόμα και υπό δυσμενείς συνθήκες διαύλου, εντός ενός σταθερού εύρους ζώνης. Με άλλα λόγια, η διαμόρφωση LoRa «θυσιάζει» ρυθμό μετάδοσης, ώστε να επιτύχει τα παραπάνω πλεονεκτήματα, βελτιστοποιώντας την επίδοση του δικτύου και εξασφαλίζοντας βελτιωμένη ευρωστία (robustness) [38]. Επιτυγχάνει σημαντικά βελτιωμένο link budget, σε σύγκριση με τα σχήματα διαμόρφωσης στενής ζώνης (narrowband). Επιπρόσθετο πλεονέκτημά της είναι ότι τα φασματικά και χρονικά offsets μεταξύ πομπού και δέκτη είναι ίσα, απλοποιώντας σημαντικά τη σχεδίαση του δέκτη.

Αποτελεί μία τεχνολογία φυσικού επιπέδου αποκλειστικής χρήσης (proprietary), ανεξάρτητη από τις εφαρμογές των ανωτέρων επιπέδων, γεγονός που επιτρέπει τη συνύπαρξη και τη λειτουργία της με υφιστάμενες αρχιτεκτονικές δικτύων.

Αναπτύχθηκε από την εταιρεία Cycleo (Grenoble, Γαλλία). Το 2012 τα δικαιώματα της τεχνολογίας αγοράστηκαν από την εταιρεία Semtech (Η.Π.Α.).

4.2.2 Θεώρημα Shannon – Hartley

Το θεώρημα Shannon – Hartley καθορίζει τη χωρητικότητα ενός τηλεπικοινωνιακού διαύλου, δηλαδή το θεωρητικό άνω όριο του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων χωρίς απώλεια πληροφορίας λόγω λάθους, με την παραδοχή ότι ο δίαυλος υπόκειται σε προσθετικό λευκό θόρυβο τύπου Gauss (Additive White Gaussian Noise – AWGN) [38]:

$$C = B \log_2(1+S/N) \quad (1)$$

C: χωρητικότητα διαύλου (bps)

B: εύρος ζώνης διαύλου (Hz)

S: μέση λαμβανόμενη ισχύς σήματος (W)

N: μέση ισχύς θορύβου και παρεμβολών (W)

S/N: λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολές (σηματοθορυβικός λόγος)

Από τη σχέση (1) τεκμαίρεται πως η χειροτέρευση του S/N (ή SNR) σε ένα δίαυλο μπορεί να αντισταθμιστεί με αύξηση του εύρους ζώνης B του σήματος, ώστε να διατηρηθεί η χωρητικότητα C του διαύλου. Ακόμη, με δεδομένο SNR, η αύξηση του B συνεπάγεται και αύξηση του C.

4.2.3 Διασπορά φάσματος (*Spread-spectrum – SS*)

4.2.3.1 Γενικά

Το παραπάνω συμπέρασμα, μεταξύ άλλων, αξιοποιούν οι τεχνικές διασποράς φάσματος [39], οι οποίες διευρύνουν φασματικά το αρχικό σήμα. Αποτέλεσμα είναι η μετάδοση σήματος σε εύρος συχνοτήτων πολύ μεγαλύτερο του αρχικού εύρους ζώνης, με αποτέλεσμα η ισχύς του να διασπείρεται φασματικά σε μεγάλο βαθμό (καίτοι η συνολική ισχύς εκπομπής παραμένει σταθερή). Επιπλέον, η φασματική πυκνότητα ισχύος υποβιβάζεται σε επίπεδα κάτω από το κατώφλι του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, καθιστώντας το σήμα πρακτικά αόρατο. Η ανάκτηση του αρχικού σήματος στο δέκτη απαιτεί γνώση της αρχικής συχνότητας εκπομπής και των ψευδοτυχαίων κωδίκων που υλοποιούν τη φασματική διασπορά, συνεπώς απαιτείται συγχρονισμός.

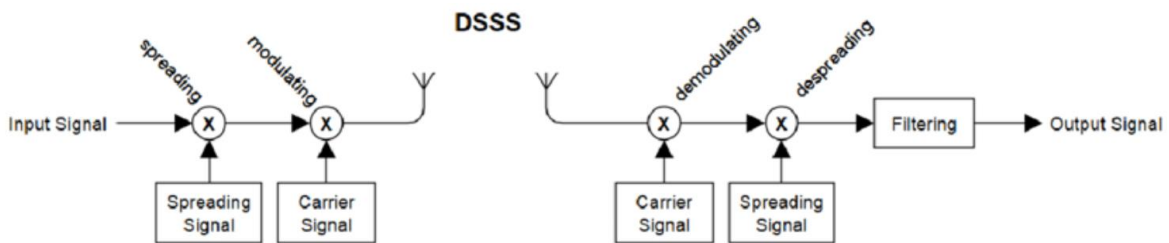
Τα πλεονεκτήματα των τεχνικών διασποράς φάσματος είναι:

- Αντίσταση σε παρεμβολές και θόρυβο
- Αποτροπή ανίχνευσης
- Αποτροπή υποκλοπών
- Ασφάλεια τηλεπικοινωνιών.
- Αξιοποίηση φάσματος μέσω συστημάτων πολλαπλής προσπέλασης

Οι κυριότερες τεχνικές διασποράς φάσματος είναι οι Direct-sequence spread-spectrum (DSSS) [40], Frequency-hopping spread-spectrum (FHSS) [40] και Chirp spread-spectrum (CSS) και παρουσιάζονται στα επόμενα εδάφια.

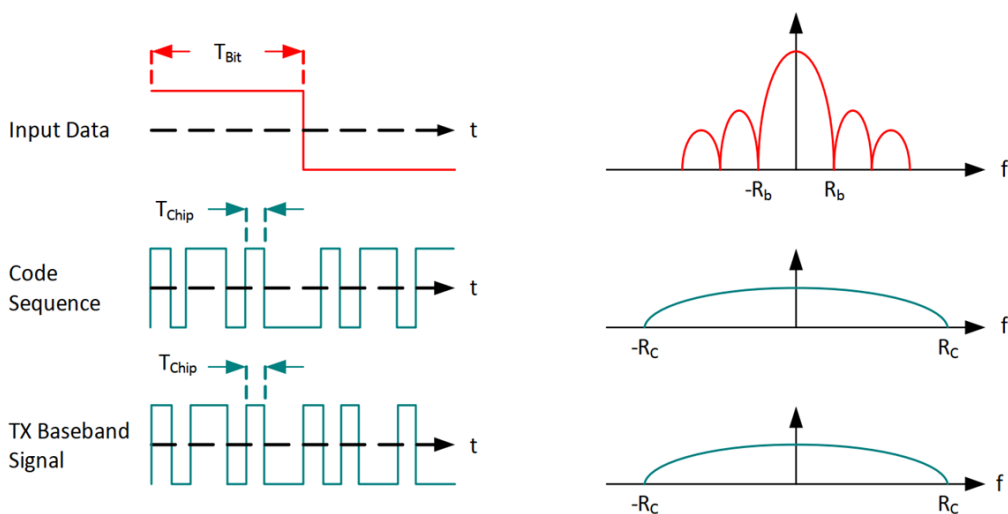
4.2.3.2 Direct-sequence spread-spectrum – DSSS (Διασπορά φάσματος άμεσης ακολουθίας)

Στον πομπό, το σήμα πληροφορίας πολλαπλασιάζεται με έναν κώδικα εξάπλωσης, δηλαδή μια ακολουθία παλμών (chips) πολύ μικρότερης περιόδου από αυτούς του σήματος πληροφορίας (code sequence ή chip sequence ή pseudo-random noise sequence ή pseudonoise – PN), η οποία επομένως είναι φασματικά πιο διευρυμένη. Κατά συνέπεια, το γινόμενο απλώνεται φασματικά, ενώ εξυπηρετείται η διάκριση του σήματος από το θόρυβο του διαύλου. Ακολουθεί διαμόρφωση φέροντος και παραγωγή του τελικού σήματος προς μετάδοση. Στο δέκτη, ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία. Για την ορθή ανάκτηση του αρχικού σήματος, είναι αναγκαία η πιστή αναπαραγωγή της αυτής ακολουθίας παλμών στο δέκτη.

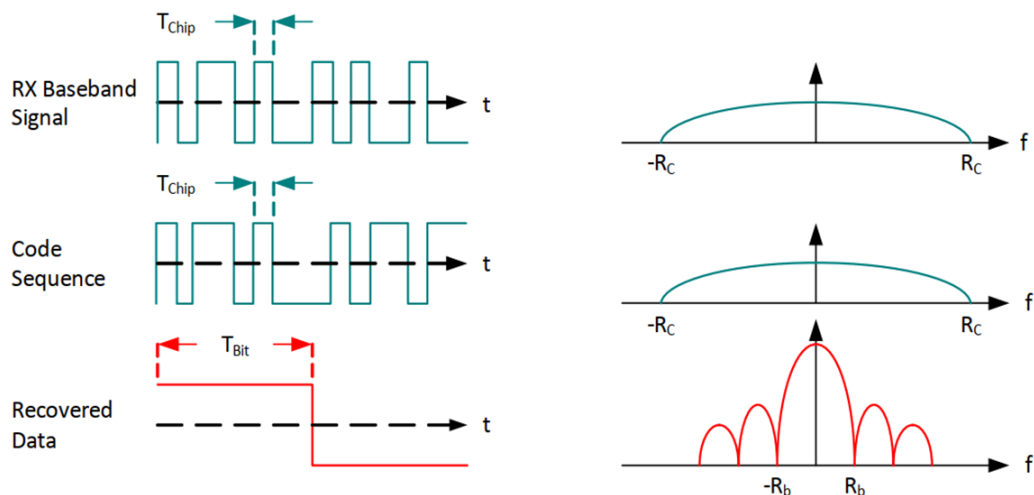


Διάγραμμα 4.1: Πομπός και δέκτης συστήματος DSSS [41]

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται ποιοτικά η φασματική διασπορά ενός σήματος πληροφορίας κατά τη διαμόρφωση με χρήση DSSS, καθώς και η επαναφορά του στο αρχικό εύρος ζώνης κατά την αποδιαμόρφωση (το παράδειγμα είναι ενδεικτικό και για την περίπτωση FHSS).



Διάγραμμα 4.2: Διαμόρφωση – διαδικασία φασματικής διασποράς [38]



Διάγραμμα 4.3: Αποδιαμόρφωση – διαδικασία φασματικής σύμπτυξης [38]

Το μέγεθος της διασποράς εξαρτάται από το λόγο chips/bit, δηλαδή το λόγο της συχνότητας των chips (chips/sec) προς το λόγο του ρυθμού μετάδοσης (bits/sec):

$$(\text{chips/sec}) / (\text{bits/sec}) = \text{chips/bit}$$

Ισοδύναμα, ο λόγος αυτός αποτελεί το λόγο του τελικού (διευρυμένου) εύρους ζώνης προς το αντίστοιχο αρχικό (μη διευρυμένο) **και ποσοτικοποιεί την ικανότητα αντίστασης του σήματος έναντι θορύβου και παρεμβολών**. Καλείται **κέρδος επεξεργασίας** (processing gain) και εκφράζεται συχνά σε dB:

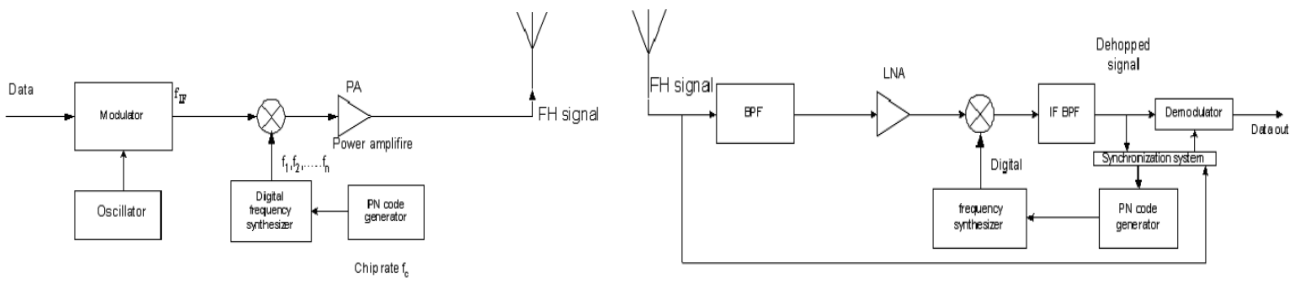
$$G_p = 10\log_{10}(R_c/R_b) \quad (2)$$

G_p : κέρδος επεξεργασίας (processing gain) (dB)

R_c, R_b : chip rate (chips/sec), bit rate (bps) αντίστοιχα

4.2.3.3 *Frequency-hopping spread-spectrum – FHSS (Διασπορά φάσματος αναπήδησης συχνότητας)*

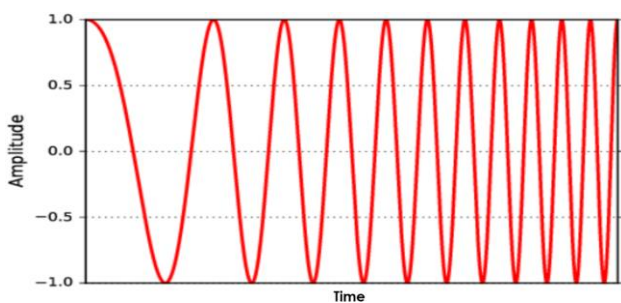
Στον πομπό, το σήμα πληροφορίας διαμορφώνει κατά FSK (ή BPSK) κάποιο φέρον. Το διαμορφωμένο σήμα πολλαπλασιάζεται με την έξοδο μιας γεννήτριας συχνοτήτων. Η τιμή της εξόδου της εξαρτάται από την έξοδο μιας γεννήτριας ακολουθίας παλμών PN. Ένα BPF φίλτρο επιλέγει την προς μετάδοση φέρουσα συχνότητα. Στο δέκτη υλοποιείται η αντίστροφη διαδικασία. Για την ορθή ανάκτηση του αρχικού σήματος, είναι αναγκαία η επίτευξη συγχρονισμού στο δέκτη.



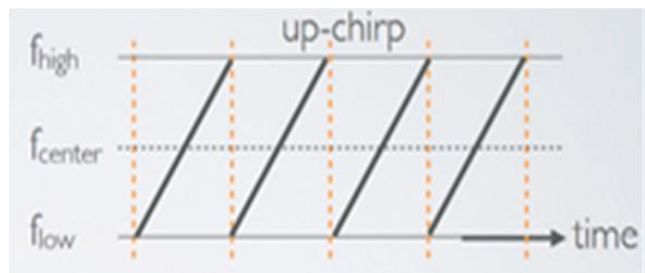
Διάγραμμα 4.4: Πομπός και δέκτης συστήματος FHSS [42]

4.2.3.4 Chirp spread-spectrum – CSS (*Chirp: Compressed High Intensity Radar Pulse*)

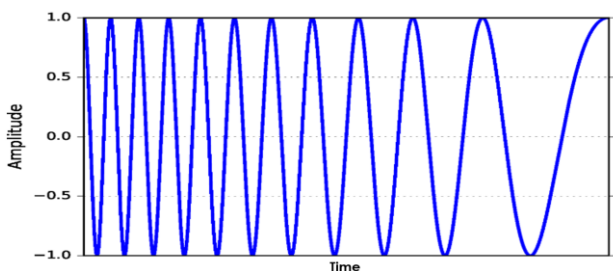
Η διασπορά φάσματος CSS χρησιμοποιεί ως φέρον έναν παλμό chirp, δηλαδή παλμό με συχνότητα γραμμικώς μεταβαλλόμενη [43]. Κατά τη διάρκεια ενός chirp, η συχνότητά του μεταβάλλεται γραμμικά, είτε από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη (up-chirp), είτε αντίστροφα (down-chirp). Η διαφορά των 2 συχνοτήτων προσεγγίζει το εύρος ζώνης του παλμού. Σε αντίθεση με τις τεχνικές DSSS και FHSS, η CSS δε χρησιμοποιεί code ή pseudonoise sequences, αλλά βασίζεται στη γραμμική φύση του chirp παλμού, προκειμένου να ανακτήσει το σήμα από το θόρυβο.



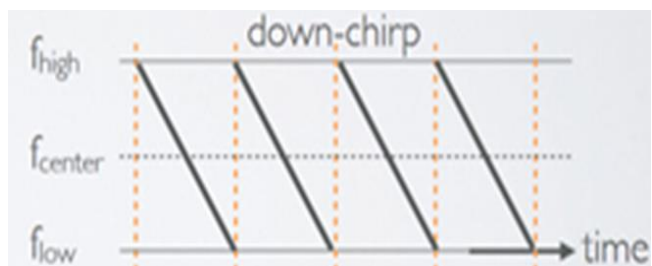
Διάγραμμα 4.5: Παλμός up-chirp στο χρόνο [44]



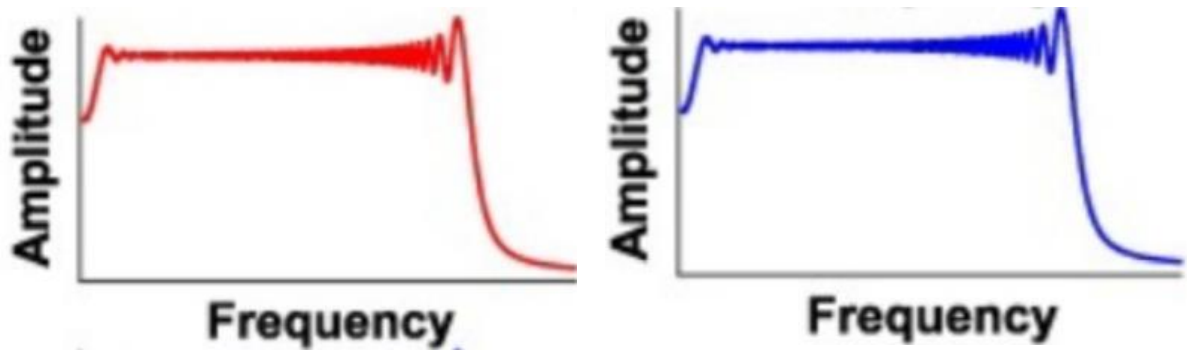
Διάγραμμα 4.6: Μεταβολή φέρουσας (up-chirp) [45]



Διάγραμμα 4.7: Παλμός down-chirp στο χρόνο [44]



Διάγραμμα 4.8: Μεταβολή φέρουσας (down-chirp) [45]

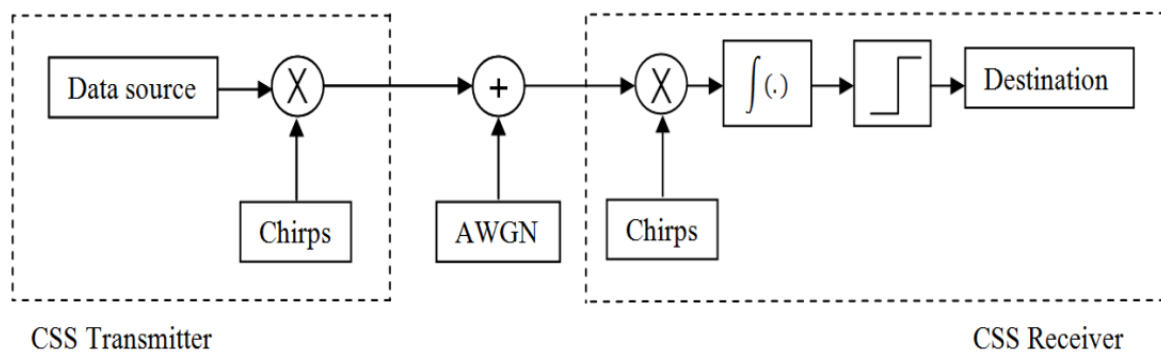


Διάγραμμα 4.9: Φάσμα παλμού up chirp (αριστερά) και down – chirp (δεξιά) [46]

Όπως και οι λοιπές μέθοδοι διασποράς φάσματος, η CSS χρησιμοποιεί όλο το διαθέσιμο φάσμα για τη μετάδοση του σήματος, παρουσιάζοντας αυξημένη ευρωστία απέναντι στο θόρυβο του διαύλου και σε παρεμβολές, καθώς και έναντι φαινομένων πολυδιαδρομικής εξασθένησης (multipath fading), ακόμη και υπό ιδιαίτερα χαμηλή ισχύ εκπομπής. Επιπρόσθετα, παρουσιάζει αντίσταση στο φαινόμενο Doppler. Συνδυαζόμενη με σχήματα ψηφιακής διαμόρφωσης (π.χ. BOK, QPSK, DQPSK), επιτυγχάνει καλύτερο BER. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης (<1 Mbps), χαμηλή ισχύ, μεγάλη εμβέλεια και κινητές τερματικές συσκευές.

Για τους παραπάνω λόγους χρησιμοποιήθηκε σε πλήθος στρατιωτικών και λοιπών ασφαλών τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών ήδη από τη δεκαετία του 1940, οπότε και αναπτύχθηκε αρχικά για εφαρμογές ραντάρ. Τα τελευταία 20 χρόνια υιοθετείται όλο και περισσότερο από εμπορικές τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές.

Στον πομπό το σήμα πληροφορίας διαμορφώνει την ακολουθία chirp. Στο δέκτη γίνεται η ανάκτηση του αρχικού σήματος, με διαδικασία αντίστροφη.



Διάγραμμα 4.10: Πομπός και δέκτης συστήματος CSS [47]

4.2.4 Ανάλυση Διαμόρφωσης LoRa

4.2.4.1 Ανάλυση βασικών μεγεθών διαμόρφωσης LoRa

Έστω R_b ο ρυθμός μετάδοσης της διαμόρφωσης (modulation bit rate ή Data Rate):

$$R_b = SF * \frac{1}{\left[\frac{2^{SF}}{BW}\right]} \text{ bits/sec} \quad (3)$$

Όπου:

SF: spreading factor (παράγοντας εξάπλωσης) [7,12]

BW: modulation bandwidth (εύρος ζώνης διαμόρφωσης) (Hz)

Η περίοδος συμβόλου (symbol period) T_s ορίζεται ως εξής:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \text{ secs} \quad (4)$$

Από (3) – (4) προκύπτει ο ρυθμός μετάδοσης συμβόλων (symbol rate) R_s :

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \text{ symbols/sec} \quad (5)$$

Τέλος, προσδιορίζουμε το ρυθμό μετάδοσης chips (chip rate) R_c :

$$R_c = R_s * 2^{SF} \text{ chips/sec} \quad (6)$$

Συνδυάζοντας (5) και (6):

$$R_c = R_s * 2^{SF}$$

$$R_c = \frac{BW}{2^{SF}} * 2^{SF} \text{ chips/sec} \quad (7)$$

Από την εξίσωση (7) τεκμαίρεται ότι η διαμόρφωση LoRa χαρακτηρίζεται από τη **μετάδοση 1 chip ανά sec και ανά Hz του εύρους ζώνης:**

$$R_C \equiv BW \quad (8)$$

$$\text{Κι επειδή} \quad BW = f_{high} - f_{low} \quad (9) \quad (\text{σχήμα 4.12})$$

$$f_{high} - f_{low} \equiv R_C \quad (10)$$

Η διαμόρφωση LoRa χρησιμοποιεί ένα μεταβλητό σχήμα διόρθωσης λαθών, το οποίο βελτιώνει την ευρωστία του μεταδιδόμενου σήματος, με κόστος το σχετικό πλεονασμό που αυτό απαιτεί. Ορίζουμε λοιπόν ως ονομαστικό ρυθμό μετάδοσης σήματος (nominal bit rate) R_b :

$$R_b = SF * \frac{\left\lceil \frac{4}{4+CR} \right\rceil}{\left\lfloor \frac{2^{SF}}{BW} \right\rfloor} \quad (11)$$

Όπου:

CR: code rate (ρυθμός κώδικα) [1,4]

SF, BW: όπως (3)

Η ακολουθία bits του σήματος πληροφορίας υφίσταται τεμαχισμό σε σύμβολα:

$$(\text{πλήθος bits ανά σύμβολο}) = SF \quad (12)$$

Το κάθε σύμβολο χωρίζεται σε στάθμες ή chips, των οποίων το πλήθος είναι:

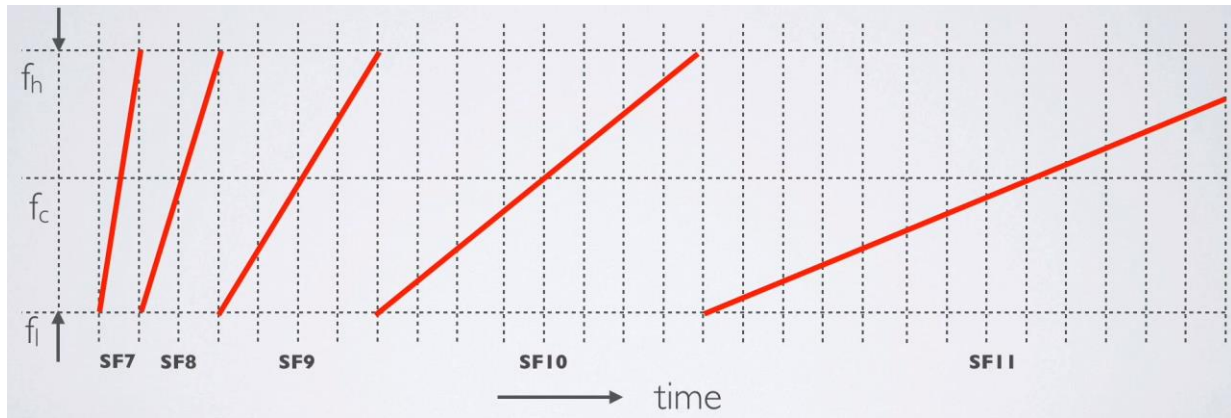
$$(\text{πλήθος chips}) = 2^{SF} \quad (13)$$

Αντίστοιχα, το σύμβολο λαμβάνει πεπερασμένο πλήθος διαφορετικών τιμών:

$$(\text{πλήθος chips}) = (\text{πλήθος διαφορετικών τιμών συμβόλου}) = 2^{SF} \quad (14)$$

Έπειτα, το κάθε σύμβολο (με βάση την εκάστοτε τιμή που λαμβάνει) **διαμορφώνει έναν αδιαμορφωτο παλμό chirp**. Η ακολουθία των παλμών chirp αποτελεί το προς μετάδοση διαμορφωμένο σήμα. **Το εύρος ζώνης συχνοτήτων του chirp είναι ίσο με το φασματικό εύρος ζώνης του σήματος.**

Στο διάγραμμα 4.11 φαίνεται ότι (υπό σταθερό BW) η μείωση (αντιστοίχως αύξηση) του SF κατά 1 σημαίνει υποδιπλασιασμό (αντιστοίχως διπλασιασμό) της χρονικής διάρκειας του παλμού chirp, επομένως διπλασιασμό (αντιστοίχως υποδιπλασιασμό) του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων.



Διάγραμμα 4.11: Μεταβολή SF [48]

Συνεπώς, χαμηλότερος SF σημαίνει περισσότερα chirps/sec, επομένως περισσότερα δεδομένα/sec. Υψηλότερος SF σημαίνει λιγότερα δεδομένα/sec. Με σταθερό όγκο δεδομένων, υψηλότερος SF οδηγεί σε μεγαλύτερους χρόνους μετάδοσης (Time on air - TOA), που με τη σειρά τους σημαίνουν μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας για κόμβους και για πύλες, κατά συνέπεια αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Από την άλλη, αυξάνει την εμβέλεια του σήματος.

Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται βασικά μεγέθη της διαμόρφωσης LoRa.

Parameter	Europe	North America
Frequency band	867-869MHz	902-928Mhz
Channels	10	64+8+8
Channel BW up	125/250kHz	125/500kHz
Channel BW down	125kHz	500kHz
TX Power up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)
TX Power down	+14dBm	+27dBm
SF up	7-12	7-10
Data rate	0.25 - 50kbps	0.98 - 21.9kbps
Link budget up	155dB	154dB
Link budget down	155dB	157dB

Πίνακας 4.1: Βασικά μεγέθη διαμόρφωσης LoRa [37]

Όπως βλέπουμε, για την επικοινωνία μεταξύ κόμβων ή κόμβων – πυλών στην Ευρώπη διατίθενται 10 κανάλια (μεταξύ 867 – 869 MHz). Η συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι πιο χαμηλές σε σχέση π.χ. με το Wi-Fi, γεγονός που εξηγεί εν μέρει τη μεγαλύτερη εμβέλεια που επιτυγχάνεται, όπως εξάλλου υποδεικνύει ο υπολογισμός των απωλειών ελευθέρου χώρου από την παρακάτω σχέση, που προκύπτει από την εξίσωση του Friis:

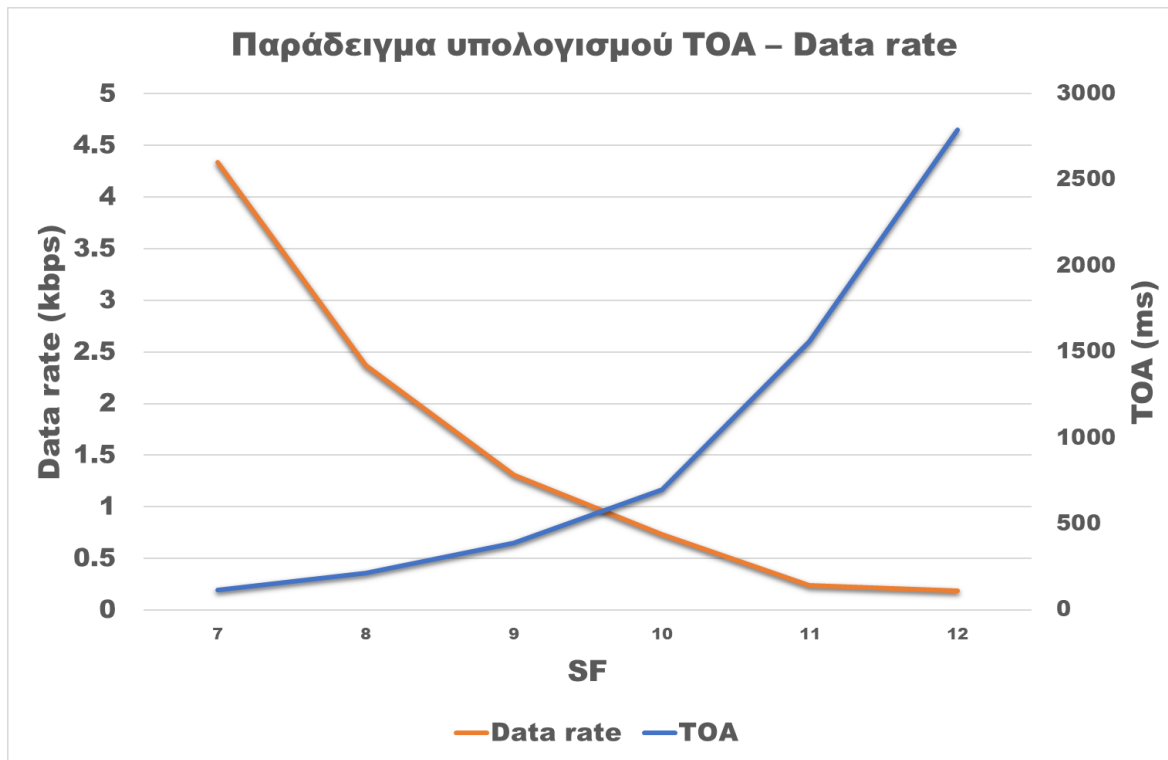
$$FSPL = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2 \quad (15)$$

Επιπρόσθετα, διατίθενται διάφοροι ρυθμοί μετάδοσης (από 0.25 έως 50 kbps). Η επιλογή γίνεται σταθμίζοντας την εμβέλεια με τη διάρκεια του μηνύματος, με γνώμονα τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας και τη χωρητικότητα του δικτύου. Χρησιμοποιείται ένα σύστημα προσαρμοστικού ρυθμού μετάδοσης (Adaptive data rate – ADR).

Στη συνέχεια παρατίθεται παράδειγμα θεωρητικού υπολογισμού χρόνου μετάδοσης (TOA) και ρυθμού μετάδοσης (Data rate) για πακέτο με ωφέλιμα δεδομένα 51 bytes, BW=125kHz και CR = 1. Τόσο στον πίνακα 4.2, όσο και στο διάγραμμα 4.13, είναι εμφανής η κατά έναν παράγοντα 2 (προσεγγιστικά) μεταβολή των TOA και Data rate σε κάθε αυξομείωση του SF κατά 1.

SF	chips/symbol	TOA	Data rate
7	128	118.02 ms	4.34 kbps
8	256	215.55 ms	2.37 kbps
9	512	390.14 ms	1.31 kbps
10	1024	698.37 ms	0.733 kbps
11	2048	1560.58 ms	0.238 kbps
12	4096	2793.47 ms	0.183 kbps

Πίνακας 4.2: Παράδειγμα υπολογισμού TOA – Data rate

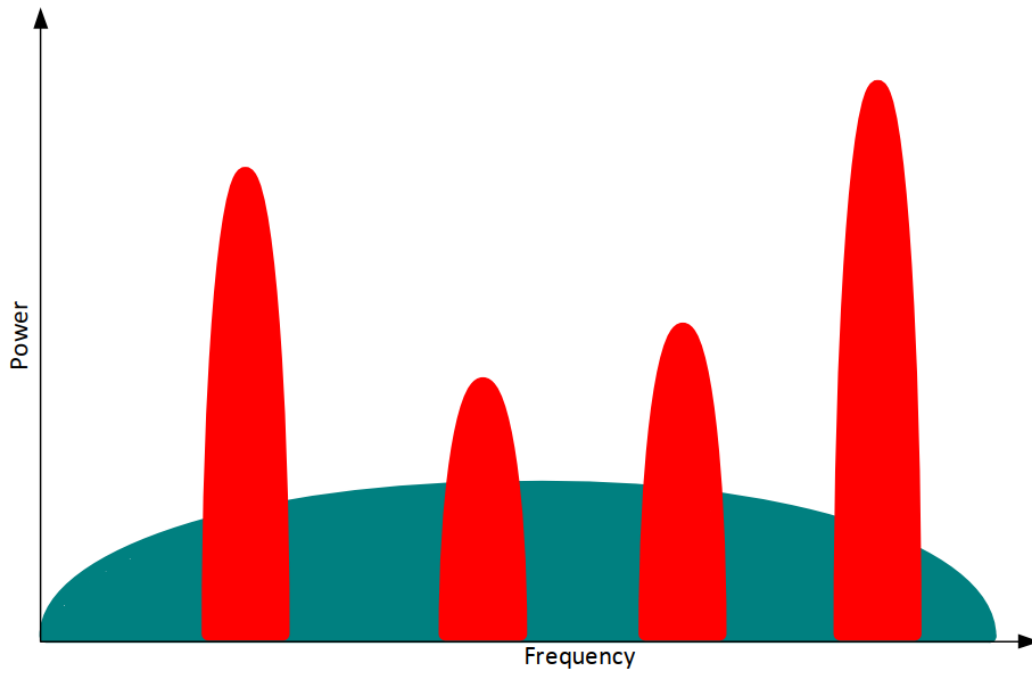


Διάγραμμα 4.12: Παράδειγμα υπολογισμού TOA – Data rate

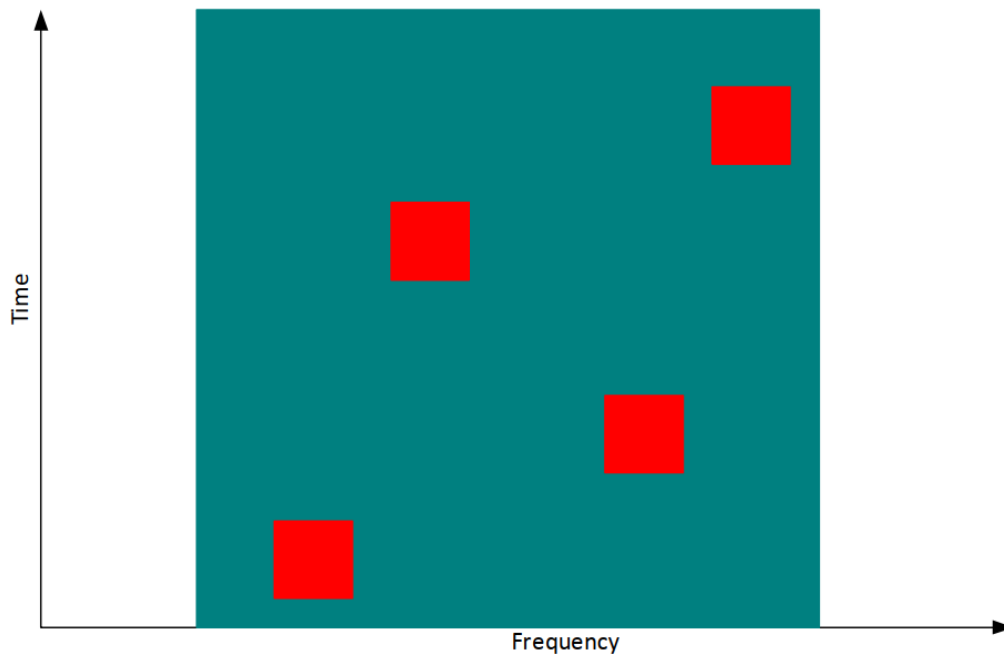
4.2.4.2 Αντιμετώπιση παρεμβολών

Θεμελιώδες χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης LoRa είναι ο τρόπος αντιμετώπισης των παρεμβολών, που της προσδίδει αυξημένη ευρωστία και ατρωσία έναντι αυτών, με παράλληλη αύξηση της εμβέλειας του σήματος, δεδομένης και της ευαισθησίας των δεκτών. Διακρίνουμε 2 περιπτώσεις:

- Σε περίπτωση συνύπαρξης σήματος LoRa με σήματα LoRa διαφορετικού SF, ο δέκτης εκλαμβάνει τα δεύτερα ως θόρυβο και τα χειρίζεται ανάλογα.
- Σε περίπτωση συνύπαρξης σήματος LoRa με πολλαπλά σήματα/παρεμβολές στενής ζώνης (διαγράμματα 4.13 και 4.14), αρχικά σημειώνουμε πως στο πεδίο του χρόνου οι εν λόγω παρεμβολές είναι σύντομες, σε σχέση με το σήμα LoRa.

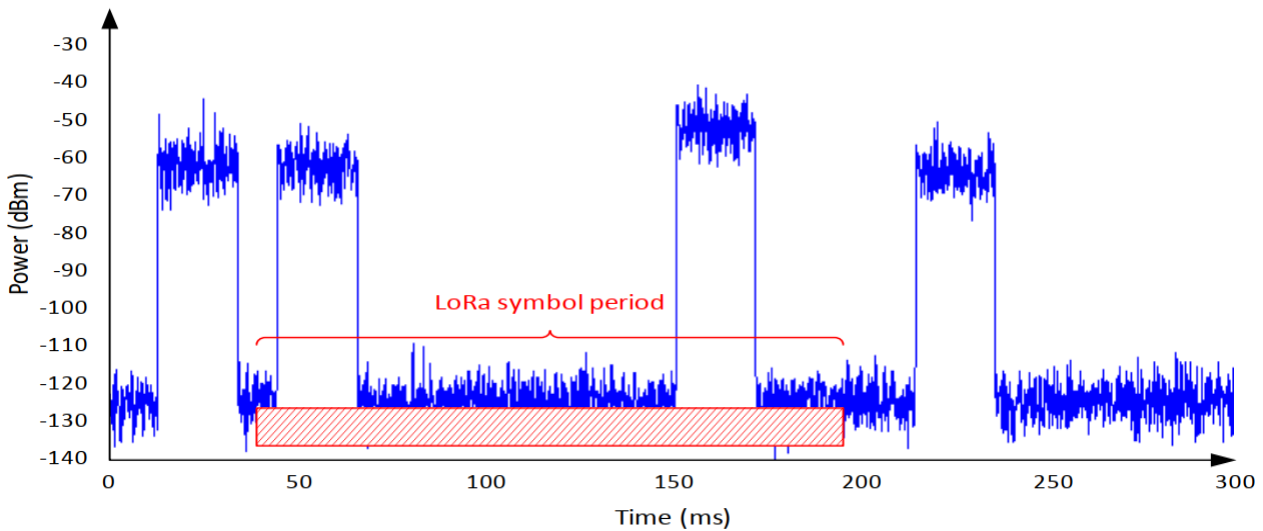


Διάγραμμα 4.13: Ισχύς – Συχνότητα (ποιοτική παρουσίαση) [38]
 Σήμα ευρείας ζώνης LoRa (μπλε) – σήματα/παρεμβολές στενής ζώνης (κόκκινο)



Διάγραμμα 4.14: Χρόνος – Συχνότητα (ποιοτική παρουσίαση) [38]
 Σήμα ευρείας ζώνης LoRa (μπλε) – σήματα/παρεμβολές στενής ζώνης (κόκκινο)

Επιπρόσθετα, ο πλεονασμός που εισάγεται κατά τη διαμόρφωση LoRa καθιστά το σήμα ανθεκτικό σε μηχανισμούς παρεμβολών που εμφανίζονται με καταιγιστικό ρυθμό. Ένα τέτοιο σενάριο απεικονίζεται στο διάγραμμα 4.15:



Διάγραμμα 4.15: Παρεμβολές καταιγιστικού τύπου [38]

Η διαμόρφωση LoRa ανέχεται παρεμβολές καταιγιστικού τύπου, αυθαιρέτου επιπέδου ισχύος, *με διάρκεια μέχρι και 30% της διάρκειας συμβόλου*, με υποβάθμιση στην ευαισθησία του δέκτη μικρότερη από 6 dB.

4.2.4.3 Βασικές ιδιότητες διαμόρφωσης LoRa

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, συμπεραίνουμε πως οι βασικές ιδιότητες της διαμόρφωσης LoRa είναι οι εξής:

- Κλιμακωσιμότητα εύρους ζώνης: Σε αντίθεση με τα σχήματα διαμόρφωσης στενής ή ευρείας ζώνης, δύναται να υποστηρίξει και τις δύο αυτές προσεγγίσεις, με απλές τροποποιήσεις.
- Σταθερή περιβάλλουσα – χαμηλή ισχύς: Αποτελώντας σχήμα διαμόρφωσης σταθερής περιβάλλουσας, επιτρέπει τη χρησιμοποίηση, χωρίς τροποποιήσεις, των ίδιων βαθμίδων χαμηλού κόστους / χαμηλής ισχύος και υψηλής απόδοσης. Επιπρόσθετα, χάρις στο κέρδος επεξεργασίας (processing gain) που αναφέρθηκε σε προηγούμενο εδάφιο, η ισχύς εκπομπής δύναται να μειωθεί έτι περαιτέρω.

- Υψηλή ευρωστία: Η ασύγχρονη φύση του σήματος LoRa το καθιστά ανθεκτικό σε μηχανισμούς παρεμβολών. Τυπικές τιμές επιλεκτικότητας δέκτη 90dB και απόρριψης 20dB.
- Ανθεκτικότητα στην πολυδιαδρομική εξασθένηση: Ο παλμός chirp είναι σχετικά ευρείας ζώνης, επομένως το σήμα LoRa παρουσιάζει ατρωσία στην πολυδιαδρομική εξασθένηση, καθιστώντας το κατάλληλο για αστικά και προαστιακά περιβάλλοντα.
- Ανθεκτικότητα στο φαινόμενο Doppler: Το υπόψη φαινόμενο προκαλεί μία ολίσθηση στη συχνότητα του σήματος LoRa, η οποία ωστόσο είναι αμελητέα. Η ανοχή αυτή στην ολίσθηση συχνότητας μειώνει την ανάγκη σχεδίασης αυστηρών ρολογιών αναφοράς, καθιστώντας την τεχνολογία κατάλληλη για χρήση σε κινητούς τελικούς κόμβους.
- Μεγάλη εμβέλεια: Με δεδομένη ισχύ εκπομπής και διεκπεραιωτική ικανότητα, το link budget της διαμόρφωσης LoRa ξεπερνά εκείνο της συμβατικής FSK (ως link budget ενός ασυρμάτου διαύλου ορίζεται το άθροισμα όλων των κερδών και αποσβέσεων/εξασθενήσεων από τον πομπό, μέσω του διαύλου και μέχρι το δέκτη). Συνδυαστικά με την ευρωστία και την ατρωσία που αναφέρθηκαν, η βελτίωση αυτή μπορεί να σημαίνει τουλάχιστον τετραπλασιασμό (x4) της εμβέλειας. ***Ενδεικτικά αναφέρεται ότι επιτεύχθηκε λήψη μηνύματος σε απόσταση 766km, με χρήση πομπού 25mW [49].***
- Βελτιωμένη δυνατότητα δικτύωσης: Επιτρέπει τη μετάδοση πολλαπλών σημάτων ταυτόχρονα και στο ίδιο κανάλι, χωρίς υποβάθμιση της ευαισθησίας του δέκτη. Διαμορφωμένα σήματα με διαφορετικούς παράγοντες εξάπλωσης (SF) εμφανίζονται ως θόρυβος στο δέκτη-στόχο, ο οποίος τα χειρίζεται ανάλογα.
- Εντοπισμός/απόσταση: Είναι κατάλληλη για εφαρμογές ραντάρ και εφαρμογές εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο, λόγω της εγγενούς ιδιότητάς της να διακρίνει γραμμικά μεταξύ των φασματικών και χρονικών σφαλμάτων.

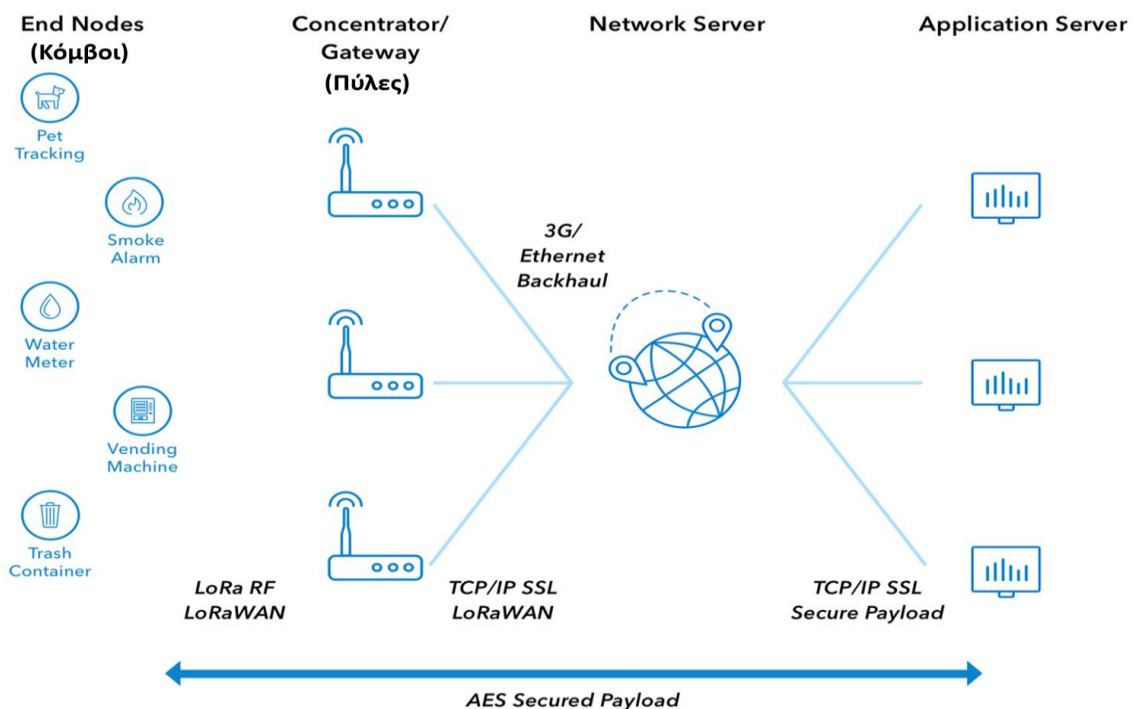
4.3 Πρωτόκολλο LoRaWAN (LoRaWAN protocol)

4.3.1 Εισαγωγή

Το LoRaWAN™ [19] αποτελεί πρωτόκολλο MAC (Medium access control - Ελέγχος προσπέλασης μέσου) για την υλοποίηση δικτύων LPWAN [37]. Είναι σχεδιασμένο να επιτρέπει σε συσκευές χαμηλής ισχύος να επικοινωνούν με διαδικτυακά συνδεδεμένες εφαρμογές, μέσω ασυρμάτων ζεύξεων μεγάλης εμβέλειας. Μπορεί να αντιστοιχηθεί με τα επίπεδα 2 και 3 (ζεύξης δεδομένων και δικτύου) του μοντέλου αναφοράς OSI. Εφαρμόζεται επομένως πάνω από το επίπεδο 1 (φυσικό επίπεδο), το οποίο μπορεί να υλοποιηθεί είτε με διαμόρφωση LoRa, είτε με FSK.

Το LoRaWAN™ καθορίζει το πρωτόκολλο επικοινωνίας και την αρχιτεκτονική του δικτύου, στοιχεία που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο χρόνο ζωής της μπαταρίας του κόμβου, στη χωρητικότητα του δικτύου, στην ποιότητα της υπηρεσίας, στην ασφάλεια και στο εύρος των εξυπηρετούμενων εφαρμογών.

Τα δίκτυα LoRaWAN βασίζονται στην εγκατάσταση *πυλών*, οι οποίες καλύπτουν ταυτόχρονα πλήθος από *κόμβους* (τυπικά εκατοντάδες), σε μία τοπολογία «αστέρα από αστέρες», όπου το σήμα που εκπέμπεται από έναν *κόμβο* λαμβάνεται από κάθε *πύλη* που βρίσκεται εντός εμβέλειας και προωθείται έπειτα σε κεντρική cloud-based υποδομή (σχήμα 4.2) [50].



Σχήμα 4.2: Αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN [50]

Στα δίκτυα LoRaWAN οι κόμβοι δε συσχετίζονται με μία συγκεκριμένη πύλη [37]. Αντιθέτως, το πακέτο από έναν κόμβο λαμβάνεται στην πράξη από πολλαπλές πύλες, που βρίσκονται στην εμβέλεια του. Κάθε μία από αυτές προωθεί το πακέτο σε έναν cloud-based διαχειριστή δικτύου (network server) μέσω δικτύων οπισθόζευξης (backhaul) (δίκτυα κινητών επικοινωνιών, ethernet, δορυφορικά συστήματα, Wi-Fi κ.λπ.). Με αυτό τον τρόπο η πολυπλοκότητα και οι επεξεργαστικές απαιτήσεις μεταφέρονται από τους κόμβους στον network server, ο οποίος διαχειρίζεται το δίκτυο, φιλτράρει τα πλεονάζοντα πακέτα, πραγματοποιεί ελέγχους ασφαλείας, προγραμματίζει acknowledgments (ACK) μέσω της βέλτιστης πύλης, υλοποιεί τον προσαρμοστικό ρυθμό μετάδοσης (ADR) κ.ά. Σε περίπτωση κινητού κόμβου, δεν απαιτείται διαπομπή (handover) από πύλη σε πύλη, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα κρίσιμο σε εφαρμογές εντοπισμού θέσης. Ο network server δρομολογεί τα πακέτα στον κατάλληλο διαχειριστή εφαρμογών (application server), δηλαδή ουσιαστικά στις τελικές εφαρμογές.

Οι κόμβοι των δικτύων είναι ασύγχρονοι και επικοινωνούν με τη μέθοδο ALOHA: Εκπέμπουν όταν έχουν έτοιμα προς αποστολή δεδομένα, είτε προγραμματισμένα, είτε πυροδοτούμενοι από κάποιο γεγονός. Έτσι μειώνουν τις απαιτήσεις σε ενέργεια και εξασφαλίζουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στη μπαταρία τους, σε σχέση με τοπολογίες δικτύων που απαιτούν περιοδικό συγχρονισμό των τελικών κόμβων.

Η απρόσκοπτη λειτουργία δικτύων αστέρα μεγάλης εμβέλειας απαιτούν πύλες υψηλής χωρητικότητας, με ικανότητα λήψης μηνυμάτων από πολλαπλούς κόμβους. Αυτό επιτυγχάνεται με αξιοποίηση του ADR αλλά και με χρήση πολυκάναλων πομποδεκτών στις πύλες, με δυνατότητα λήψης πολλαπλών μηνυμάτων σε πολλαπλά κανάλια. Κρίσιμοι παράγοντες είναι το πλήθος των αντικρουόμενων καναλιών, ο Data rate και ο TOA, το μήκος του ωφέλιμου φορτίου των πακέτων και το πόσο συχνά εκπέμπουν οι κόμβοι. Η χρήση διαφορετικών SF εξασφαλίζει την ορθογωνιότητα μεταξύ των CSS συμβόλων, που είναι απαραίτητη για την ανάκτησή τους [51], καθώς και διαφορετικά Data rates. Έτσι, η πύλη μπορεί να λάβει στο ίδιο κανάλι σήματα διαφορετικών SF/Data rates.

Η χρήση του χαμηλότερου δυνατού SF (άρα και του υψηλότερου δυνατού Data rate) είναι επιτακτική, ώστε να μειώνεται ο χρόνος στον αέρα (TOA) και να αποφεύγεται κάθε άσκοπη κατάληψη του διαθέσιμου καναλιού, κρατώντας το διαθέσιμο τόσο για την πύλη, όσο και για άλλους κόμβους.

Το πρωτόκολλο LoRaWAN είναι ανοικτό και ελεύθερο. Τυποποιείται από τη LoRa Alliance [52], μία ανοικτή συμμαχία 500 και πλέον εταιρειών τεχνολογίας – μελών

(μεταξύ των οποίων οι IBM Research GmbH, Cisco Systems Inc, Google LLC, ZTE CORPORATION), που συνεργάζονται για την προώθηση και καθιέρωσή του. Στο τέλος του 2018 η εν λόγω τεχνολογία είχε παρουσία σε πάνω από 100 χώρες, σε όλες τις ηπείρους, με πάνω από 80 εκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές, πάνω από 60.000 developers και περισσότερα από 10.000 δίκτυα.

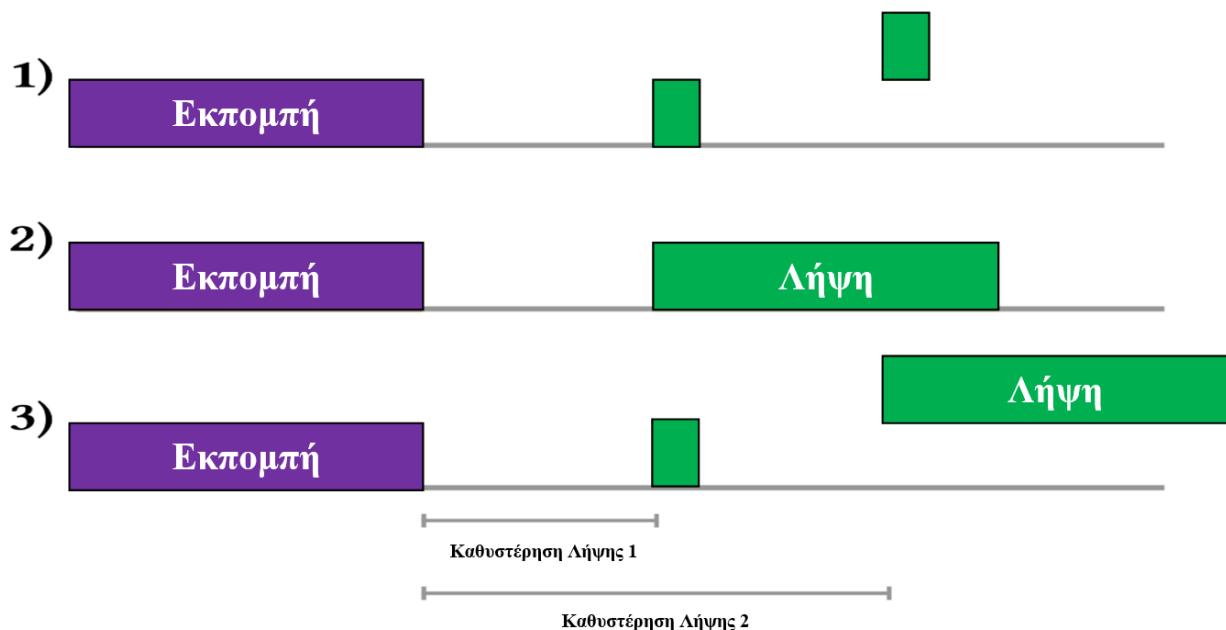
4.3.2 Ανάλυση λειτουργίας δικτύου LoRaWAN

4.3.2.1 Κλάσεις συσκευών (Device Classes)

Οι τελικοί κόμβοι ενός δικτύου LoRaWAN εξυπηρετούν ποικίλες εφαρμογές και άρα έχουν διαφορετικές απαιτήσεις. Για το λόγο αυτό το πρωτόκολλο LoRaWAN χρησιμοποιεί 3 κλάσεις συσκευών:

1. Class A: *Bi-directional end-devices* (Κλάση A: τελικές συσκευές διπλής κατεύθυνσης)

Επιτρέπουν αμφίδρομη επικοινωνία. Κάθε μετάδοση στην άνω ζεύξη (uplink transmission) ακολουθείται από σύντομα παράθυρα λήψης, που προγραμματίζονται από την ίδια την τελική συσκευή. Μηνύματα από την πύλη μπορούν να ληφθούν *αυστηρά μόνο εντός αυτών των παραθύρων*, ειδάλλως θα αναμένει το επόμενο uplink.



Σχήμα 4.3: Παράθυρα εκπομπής – λήψης συσκευής κλάσης A

2. Class B: Bi-directional end-devices with scheduled receive slots (Κλάση B: τελικές συσκευές διπλής κατεύθυνσης με προγραμματισμένα παράθυρα λήψης)

Πλέον των Class A, ανοίγουν επιπρόσθετα παράθυρα λήψης σε καθορισμένες χρονικές στιγμές. Το άνοιγμα των παραθύρων πυροδοτείται με μήνυμα συγχρονισμού από την πύλη, με σκοπό ο network server να γνωρίζει πότε η τελική συσκευή ακούει.

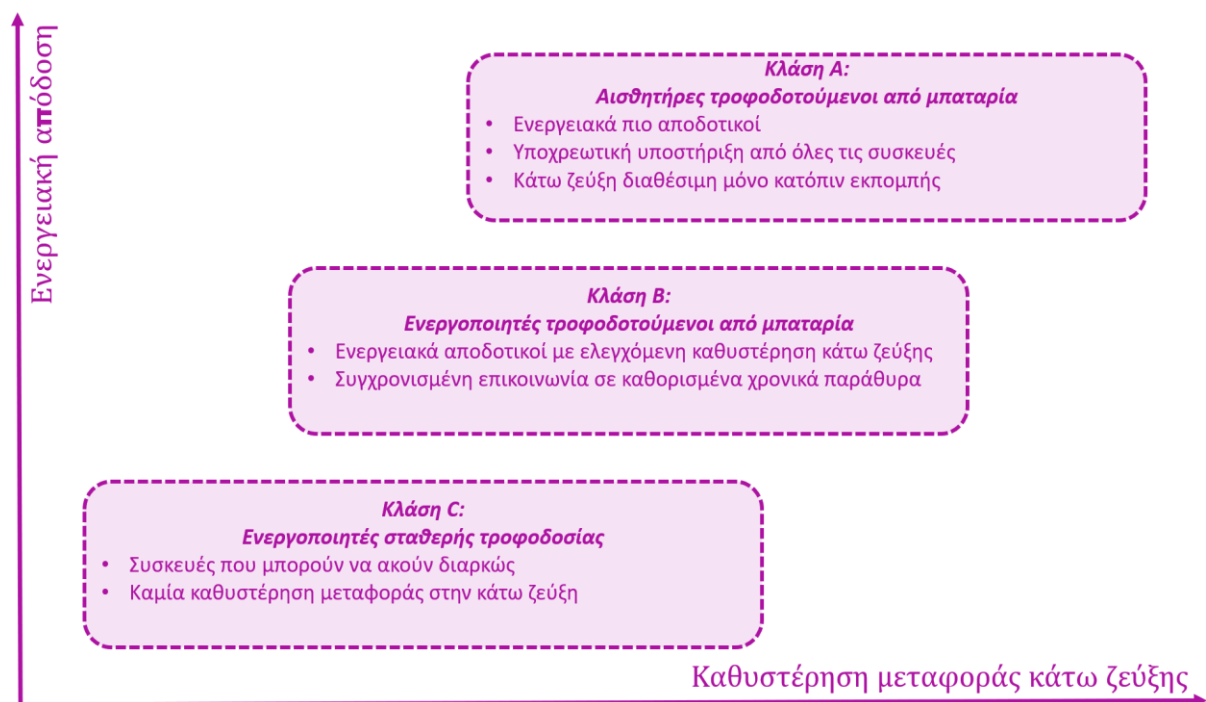
3. Class C: Bi-directional end-devices with maximal receive slots (Κλάση C: τελικές συσκευές διπλής κατεύθυνσης με μέγιστα παράθυρα λήψης)

Οι συσκευές αυτές έχουν μονίμως ανοικτά παράθυρα λήψης, πλην των περιόδων κατά τις οποίες εκπέμπουν.



Σχήμα 4.4: Παράθυρα εκπομπής – λήψης συσκευής κλάσης C

Στο διάγραμμα 4.16 απεικονίζεται ποιοτικά το trade-off μεταξύ ενεργειακής απόδοσης και καθυστέρησης μεταφοράς κάτω ζεύξης (downlink communication latency), το οποίο τελικά καθορίζει την επιλογή κλάσης συσκευής.



Διάγραμμα 4.16: Ενεργειακή απόδοση VS καθυστέρηση μεταφοράς κάτω ζεύξης

4.3.2.2 Ενεργοποίηση τελικού κόμβου (*End-Device Activation*)

Για να ενταχθεί στο δίκτυο LoRaWAN, κάθε τελική συσκευή πρέπει να καταχωρηθεί σε αντίστοιχη πλατφόρμα/εφαρμογή, να εξατομικευτεί και να ενεργοποιηθεί (καταχώρηση και εξατομίκευση θα περιγραφούν στα κεφάλαια 7 και 8). Η ενεργοποίηση γίνεται είτε δυναμικά, με ad hoc απόδοση κλειδιών συνεδρίας (session keys) στην έναρξη κάθε συνεδρίας (Over-The-Air Activation – OTAA), είτε στατικά, με τα κλειδιά προενσωματωμένα στον κώδικα της συσκευής (Activation By Personalization – ABP).

1. Over-The-Air Activation – OTAA (δυναμική ενεργοποίηση)

Προ της ενεργοποίησης, πρέπει να εξατομικευτεί η τελική συσκευή με τα παρακάτω αναγνωριστικά EUI (Extended Unique Identifier) και κλειδιά:

- Device EUI: Αποτελεί μοναδικό αναγνωριστικό συσκευής (δ/ση IEEE EUI64).
- Application EUI: Αποτελεί αναγνωριστικό εφαρμογής (δ/ση IEEE EUI64). Ταυτοποιεί μοναδικά τον application server και παράγεται κατά την καταχώρηση.
- App Key (Application key): Αποτελεί κλειδί που εκχωρείται στην τελική συσκευή από τον application server κατά την καταχώρηση.

Η ενεργοποίηση συνίσταται σε μία διαδικασία σύνδεσης (Join), με την αποστολή από την τελική συσκευή αιτήματος σύνδεσης (Join request ή Rejoin request, σε περίπτωση επανάληψης), που περιλαμβάνει τα παραπάνω αναγνωριστικά και κλειδιά. Το αίτημα λαμβάνεται από κάποια (κάποιες) πύλη (πύλες) και προωθείται στον network server. Εάν ο network server αποδεχτεί το αίτημα σύνδεσης με το δίκτυο, απαντά με αποδοχή σύνδεσης (Join accept), η οποία περιλαμβάνει:

- Device address (DevAddr): 32-bit δ/ση που ταυτοποιεί την τελική συσκευή στο τρέχον δίκτυο και εκχωρείται από τον network server.
- Λοιπά αναγνωριστικά και παραμέτρους δικτύου.

Στην τελική συσκευή, μετά από συνδυασμό των δεδομένων του Join accept με το AppKey, παράγονται αντίστοιχα τα εξής κλειδιά συνεδρίας:

- Network session key (NwkSKey)
- App session key (AppSKey)

Έπειτα ξεκινάει η ανταλλαγή δεδομένων, στο πλαίσιο της εκάστοτε εφαρμογής.

2. Activation By Personalization – ABP (στατική ενεργοποίηση)

Σε αυτή την περίπτωση, πρέπει να εξατομικευτεί η τελική συσκευή με τα Device EUI και Application EUI και να προενσωματωθούν επιπλέον στον κώδικά της τα DevAddr, NwkSKey και AppSKey, τα οποία παραμένουν σταθερά. Συνεπώς η τελική συσκευή είναι εξαρχής αντιστοιχημένη με ένα συγκεκριμένο δίκτυο και ξεκινάει αμέσως την ανταλλαγή δεδομένων, στο πλαίσιο της εκάστοτε εφαρμογής.

4.3.2.3 Ασφάλεια

Το πρωτόκολλο LoRaWAN καθορίζει τα παρακάτω κλειδιά ασφαλείας:

- App key (Appkey)
- Network session key (NwkSKey)
- App session key (AppSKey)

Τα παραπάνω κλειδιά έχουν μήκος 128 bits, ενώ ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης που χρησιμοποιείται είναι ο AES-128 (Advanced Encryption Standard – Προηγμένο Πρότυπο Κρυπτογράφησης), δηλαδή ένας συμμετρικός κρυπταλγόριθμος αντικατάστασης.

Το Appkey είναι γνωστό μόνο από την τελική συσκευή και από την εφαρμογή. Όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται για την παραγωγή των 2 κλειδιών συνεδρίας, κατά τη διαδικασία σύνδεσης/ενεργοποίησης (Join).

Τα κλειδιά συνεδρίας (session keys) είναι μοναδικά ανά συσκευή και ανά τρέχουσα συνεδρία, στην περίπτωση δυναμικής ενεργοποίησης (OTAA). Αυτό σημαίνει ότι σε περίπτωση απώλειας της σύνδεσης, η διαδικασία σύνδεσης/ενεργοποίησης επαναλαμβάνεται (με Rejoin request). Θα πρέπει να αποθηκεύονται στη συσκευή με τρόπο ώστε να αποτρέπεται η εξαγωγή τους από κακόβουλους χρήστες. Αντίθετα, σε περίπτωση στατικής ενεργοποίησης (ABP), τα κλειδιά συνεδρίας παραμένουν σταθερά. Συνεπώς δεν πρέπει να συσχετίζονται με οποιαδήποτε δημόσια διαθέσιμη πληροφορία (π.χ. Device EUI). Το NwkSKey είναι γνωστό στο δίκτυο, ενώ το AppSKey παραμένει ιδιωτικό.

Το NwkSKey χρησιμοποιείται για την αλληλεπίδραση μεταξύ τελικής συσκευής και network server. Επιβεβαιώνει την ακεραιότητα κάθε μηνύματος μέσω του κώδικα ακεραιότητας μηνύματος (Message Integrity Code – MIC). Το MIC είναι παρόμοιο με

ένα άθροισμα ελέγχου (checksum), με τη διαφορά ότι αποτρέπει παραποίηση του μηνύματος.

Το AppSKey χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση και αποκρυπτογράφηση του ωφέλιμου φορτίου δεδομένων. Το φορτίο είναι πλήρως κρυπτογραφημένο μεταξύ τελικής συσκευής και εφαρμογής, εξασφαλίζοντας την εμπιστευτικότητα. Κατά συνέπεια μόνον ο χρήστης δύναται να δει το περιεχόμενο των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται.

Τα κλειδιά συνεδρίας αντιμετωπίζουν, όπως προαναφέρθηκε, τα ζητήματα της **ακεραιότητας** και της **εμπιστευτικότητας**, μέσω των NwkSkey και AppSKey αντίστοιχα. Ωστόσο, δεδομένου ότι πρόκειται για ασύρματη εκπομπή, δε μπορεί να αποκλειστεί η επαναμετάδοση των μηνυμάτων, δηλαδή μία επίθεση αναπαραγωγής (replay attack). Οι εν λόγω κακόβουλες επιθέσεις εντοπίζονται και μπλοκάρονται με τη χρήση μετρητών πλαισίων. Η πύλη ή η τελική συσκευή αναμένουν κάθε φορά μήνυμα με μετρητή πλαισίων αυξημένο κατά 1. Σε διαφορετική περίπτωση αγνοούν το μήνυμα. Έτσι εξασφαλίζεται ότι η πληροφορία είναι **επίκαιρη**.

4.3.2.4 Δομές και τύποι μηνυμάτων (Message Formats and Types)

Το πρωτόκολλο διακρίνει τα ανταλλασσόμενα μηνύματα ως εξής:

1. Uplink messages (μηνύματα άνω ζεύξης)

Αποστολέας είναι η τελική συσκευή και παραλήπτης (μέσω πολλαπλών πυλών) ο network server.

ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ			ΥΠΟΕΠΙΠΕΔΟ MAC / ΕΠΙΠΕΔΟ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ
Preamble/	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC
12 σύμβολα	4 Bytes		13 – 235 Bytes	2 Bytes

Σχήμα 4.5: Δομή uplink message

Όπου: PHDR: Επικεφαλίδα φυσικού επιπέδου (Physical header)

PHYPayload: Ωφέλιμο φορτίο φυσικού επιπέδου (Physical payload)

CRC: Κυκλικός έλεγχος πλεονασμού (Cyclic redundancy check)

Το πεδίο PHYPayload υποδιαιρείται σε περαιτέρω πεδία:

ΥΠΟΕΠΙΠΕΔΟ MAC / ΕΠΙΠΕΔΟ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ							
PHYPayload							
MHDR	MACPayload						MIC
	FHDR				FPort	FRMPayload	
	DevAddr	FCtrl	FCnt	FOpts			
1 Byte	4 Bytes	1 Byte	2 Bytes	0 – 15 Bytes	1 Byte	51 – 222 Bytes	4 Bytes

Σχήμα 4.6: Δομή PHYPayload

Όπου: MHDR: Επικεφαλίδα MAC (MAC header)

MACPayload: Ωφέλιμο φορτίο MAC (MAC payload)

FHDR: Επικεφαλίδα πλαισίου (Frame header)

DevAddr: Device address

FCtrl: Έλεγχος πλαισίου (frame control octet)

FCnt: Μετρητής πλαισίων (frame counter)

FOpts: Εντολές MAC

FPort: Καθορισμός τρόπου διαχείρισης μηνυμάτων

FRMPayload: Ωφέλιμο φορτίο πλαισίου (Frame payload)

MIC: Κώδικας ακεραιότητας μηνύματος (Message integrity code)

Συμπεραίνουμε πως το ωφέλιμο φορτίο για δεδομένα εφαρμογών κυμαίνεται από 51 έως 222 Bytes, ενώ ο ελάχιστος πλεονασμός στο υποεπίπεδο MAC είναι 13 Bytes.

2. Downlink messages (μηνύματα κάτω ζεύξης)

Αποστολέας είναι ο network server και παραλήπτης (μέσω μοναδικής πύλης) η τελική συσκευή. Δεν υφίσταται πεδίο CRC.

ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ	ΥΠΟΕΠΙΠΕΔΟ MAC / ΕΠΙΠΕΔΟ ΖΕΥΞΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ		
Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload
12 σύμβολα	4 Bytes		

Σχήμα 4.7: Δομή downlink message

Τα μηνύματα μεταφέρουν εντολές MAC για τη διαχείριση του δικτύου ή εντολές και δεδομένα εφαρμογών. Γίνεται διάκριση σε συνολικά 8 τύπους μηνυμάτων, οι οποίοι παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος μηνύματος	Περιεχόμενο	Περιγραφή
Join-request	Εντολές	§ 4.3.2.2
Join-accept	Εντολές	§ 4.3.2.2
Unconfirmed Data Up	Εντολές και δεδομένα	uplink μήνυμα χωρίς απαίτηση ACK
Unconfirmed Data Down	Εντολές και δεδομένα	downlink μήνυμα χωρίς απαίτηση ACK
Confirmed Data Up	Εντολές και δεδομένα	uplink μήνυμα με απαίτηση ACK
Confirmed Data Down	Εντολές και δεδομένα	downlink μήνυμα με απαίτηση ACK
Rejoin-request	Εντολές	§ 4.3.2.2
Proprietary	Μη καθορισμένο	Μη τυποποιημένες μορφές μηνυμάτων

Πίνακας 4.3: Τύποι μηνυμάτων

4.3.2.5 Προσαρμοστικός ρυθμός μετάδοσης (*Adaptive data rate – ADR*)

Κάθε τελική συσκευή ρυθμίζει ξεχωριστά το κανάλι μετάδοσης (με ψευδοτυχαίο τρόπο), το ρυθμό μετάδοσης (Data rate) και την ισχύ εκπομπής (Tx Power). Αυτό αξιοποιείται από το πρωτόκολλο LoRaWAN, μέσω του μηχανισμού ADR, που βελτιστοποιεί το ρυθμό μετάδοσης, το χρόνο στον αέρα (TOA) και την κατανάλωση ενέργειας. Ο μηχανισμός ενεργοποιείται από την τελική συσκευή (όχι από τον network ή application server) όταν οι RF συνθήκες του διαύλου είναι σχετικά σταθερές, δηλαδή δεν υπάρχει ταχεία και μόνιμη μεταβολή της εξασθένησης. Κατά συνέπεια αφορά κυρίως στατικές συσκευές. Οι κινητές συσκευές πρέπει να ενεργοποιούν τον ADR μόνον όταν καθίστανται σταθερές για επαρκώς μεγάλο χρονικό διάστημα. **Ο ADR πρέπει να**

αξιοποιείται στο μέγιστο δυνατό βαθμό, προς αύξηση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας και τη μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου.

Εφόσον ο ADR είναι ενεργοποιημένος, ο network server στέλνει στην τελική συσκευή κατάλληλες εντολές MAC (ADR requests), με σκοπό την προσαρμογή των Data rate και Tx Power, επιλέγοντας μεταξύ των τιμών που φαίνονται στους πίνακες 4.4 και 4.5 αντίστοιχα (ισχύουν για την Ευρώπη, πλάνο συχνοτήτων EU863-870).

Data rate	Σχήμα	Ενδεικτικό bit rate (bps)
0	LoRa: SF12BW125	250
1	LoRa: SF11BW125	440
2	LoRa: SF10BW125	980
3	LoRa: SF9BW125	1760
4	LoRa: SF8BW125	3125
5	LoRa: SF7BW125	5470
6	LoRa: SF7BW250	11000
7	FSK: 50 kbps	50000
8...14	RFU	
15	Καθορίζεται στο πρωτ. LoRaWAN	

Πίνακας 4.4: Επιλογές πλάνων Data rate / EU863-870

Tx Power	EIRP	Παρατηρήσεις
0	Max EIRP	Max EIRP = +14 dBm
1	Max EIRP -2dB	Max EIRP = +14 dBm
2	Max EIRP -4dB	Max EIRP = +14 dBm
3	Max EIRP -6dB	Max EIRP = +14 dBm
4	Max EIRP -8dB	Max EIRP = +14 dBm
5	Max EIRP -10dB	Max EIRP = +14 dBm
6	Max EIRP -12dB	Max EIRP = +14 dBm
7	Max EIRP -14dB	Max EIRP = +14 dBm
8...14	RFU	
15	Καθορίζεται στο πρωτ. LoRaWAN	

Πίνακας 4.5: Επιλογές πλάνων Tx Power / EU863-870

Τα ADR requests ενσωματώνονται σε κάποιο downlink μήνυμα και η αποστολή τους προγραμματίζεται όταν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για την κατάσταση του διαύλου και ο τρέχων ρυθμός μετάδοσης δεν είναι βέλτιστος.

Ο αλγόριθμος που ακολουθείται έχει συνοπτικά ως εξής:

- Μέσω uplink μηνυμάτων (ενδεικτικά βάσει των τελευταίων 20 μηνυμάτων), ο network server λαμβάνει (ως metadata) μετρήσεις, μεταξύ των οποίων οι τιμές σηματοθορυβικού λόγου (SNR), μετρητών πλαισίων και οι ταυτότητες των πυλών που έλαβαν τα υπόψη μηνύματα.

- Επιλέγει την πύλη με τον καλύτερο SNR για το downlink.
- Υπολογίζει το περιθώριο ισχύος (margin), το οποίο καθορίζει τα επιτρεπτά όρια αυξομειώσης του SF ή/και του Tx Power (παρακάτω παρατίθεται παράδειγμα).

- Προγραμματίζει την αποστολή ADR request προς την τελική συσκευή, καθορίζοντας τις τιμές SF ή/και Tx Power.

- Υλοποιεί την αποστολή του ADR request.

Υπολογισμός περιθωρίου ισχύος:

Αρχικά σημειώνουμε ότι κάθε SF αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο κατώφλι SNR (SNR limit), κάτω από το οποίο είναι αδύνατη η αποδιαμόρφωση του σήματος στο δέκτη [51]:

Spreading Factor (SF)	SNR limit
7	-7.5 dB
8	-10 dB
9	-12.5 dB
10	-15 dB
11	-17.5 dB
12	-20 dB

Πίνακας 4.6: SF – SNT limit [51]

Το περιθώριο ισχύος (P_{margin}) δίδεται από τη σχέση:

$$P_{margin} = SNR_m - SNR_{limit} \quad (16)$$

Όπου: SNR_m : SNR μέτρησης

SNR_{limit} : από πίνακα 4.4

Παράδειγμα υπολογισμού:

Έστω δίκτυο LoRaWAN, που λειτουργεί υπό SF11BW125. Ο SNR λήψης (SNR_m) είναι 3 dB. Από σχέση (16) προκύπτει ότι:

$$P_{\text{margin}} = SNR_m - SNR_{\text{limit},11} = 3 - (-17.5) = 20.5 \text{ dB}$$

Υπάρχει συνεπώς ένα περιθώριο 20.5dB, το οποίο πρέπει να αξιοποιηθεί, ειδικά υφίσταται σπατάλη TOA (ισοδύναμα χωρητικότητας) και ενέργειας. Έστω λοιπόν ότι μεταβαίνουμε σε SF7BW125, διατηρώντας σταθερή την Tx Power. Τότε:

$$P_{\text{margin,new}} = SNR_m - SNR_{\text{limit},7} = 3 - (-7.5) = 10.5 \text{ dB}$$

Βλέπουμε ότι ακόμα και με την προσαρμογή του SF, υφίσταται και πάλι ένα περιθώριο 10.5dB, το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί με μείωση της Tx Power.

Στο παράδειγμα της § 4.2.4.1 (πίνακας 4.2), οι παραπάνω προσαρμογές θα σήμαιναν:

- Μείωση του TOA από 1560.58 σε 118.02 ms
- Αύξηση του Data rate από 0.183 σε 4.34 kbps
- Εξοικονόμηση ενέργειας από τη μείωση του Tx Power
- Μείωση παρεμβολών από τη μείωση του Tx Power

4.3.2.6 Τοπικές παράμετροι

Το πρωτόκολλο LoRaWAN διαφέρει μερικώς από περιοχή σε περιοχή, λόγω τοπικών κανονισμών χρήσης ραδιοσυχνοτήτων και δικαιωμάτων χρήσης φάσματος [53]. Είναι δε πλήρως καθορισμένο σε Ευρώπη και Η.Π.Α.

Όπως προαναφέρθηκε, λειτουργεί στο μη αδειοδοτημένο φάσμα των ISM εφαρμογών, στο οποίο δεν απαιτείται ατομικό δικαίωμα χρήσης ραδιοσυχνοτήτων, συνεπώς το κόστος φάσματος είναι μηδενικό, όπως συμβαίνει π.χ. και με το Wi-Fi.

Πλέον των παραπάνω, η χρήση χαμηλών συχνοτήτων εξασφαλίζει αφενός μεν μεγαλύτερη εμβέλεια (σχέση 15), αφετέρου δε αναδεικνύει επιπρόσθετους τοπικούς περιορισμούς.

Η LoRa Alliance, με την κατάρτιση σχετικής προδιαγραφής (LoRaWAN® Regional Parameters), προσπαθεί να συγκεράσει τους κατά τόπους περιορισμούς, επιλέγοντας ζώνες συχνοτήτων με τέτοιο τρόπο, ώστε το πρωτόκολλο να καθίσταται, κατά το δυνατόν, γεωγραφικά ανεξάρτητο (region-agnostic).

Σε ό,τι αφορά την Ευρώπη, δηλαδή το χώρο στον οποίο το ISM φάσμα καθορίζεται από το ευρωπαϊκό πρότυπο ETSI EN 300 220-2 V3.2.1 (2018-04) [54], το οποίο για την Ελλάδα εξειδικεύεται με τον «Κανονισμό Όρων Χρήσης Μεμονωμένων Ραδιοσυχνοτήτων ή Ζωνών Ραδιοσυχνοτήτων» (ΕΕΤΤ, ΦΕΚ 1241/Β/09-04-2020) [55], η παραπάνω προδιαγραφή ορίζει τα εξής κανάλια και σχήματα:

Κανάλι	Συχνότητα (MHz)	Σχήμα	Ζεύξη
1	868.1	SF7BW125 έως SF12BW125	uplink & RX1 downlink
2	868.3	SF7BW125 έως SF12BW125 και SF7BW250	uplink & RX1 downlink
3	868.5	SF7BW125 έως SF12BW125	uplink & RX1 downlink
4	867.1	SF7BW125 έως SF12BW125	uplink & RX1 downlink
5	867.3	SF7BW125 έως SF12BW125	uplink & RX1 downlink
6	867.5	SF7BW125 έως SF12BW125	uplink & RX1 downlink
7	867.7	SF7BW125 έως SF12BW125	uplink & RX1 downlink
8	867.9	SF7BW125 έως SF12BW125	uplink & RX1 downlink
9	868.8	FSK	uplink & RX1 downlink
10	869.525	SF9BW125	RX2 downlink

Πίνακας 4.7: Κανάλια – σχήματα / EU863-870

Το πρότυπο ETSI EN 300 220-2 V3.2.1 (2018-04) καθορίζει, μεταξύ άλλων, το μέγιστο κύκλο δράσης (duty cycle) των συσκευών, κάτι που αφορά τόσο τους κόμβους, όσο και τις πύλες (πίνακας 4.8)

Ζώνη συχνοτήτων	Κύκλος δράσης	Max E.R.P.
865.0-868.0 MHz	≤ 1%	25mW
868.0-868.6 MHz	≤ 1%	25mW
868.7-869.2 MHz	≤ 0.1%	25mW
869.4-869.65 MHz	≤ 10%	500mW

Πίνακας 4.8: Κύκλος δράσης

Η συμμόρφωση μιας συσκευής με τους παραπάνω περιορισμούς επιβάλλει τον ανάλογο προγραμματισμό της. Αυτό προϋποθέτει ακριβή υπολογισμό του χρόνου μετάδοσης των μηνυμάτων (TOA) και στη συνέχεια καθορισμό της συχνότητας αποστολής τους.

4.3.2.7 Όρια και περιορισμοί πρωτοκόλλου LoRaWAN

Το πρωτόκολλο LoRaWAN ενδείκνυται για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη εμβέλεια, χαμηλή ισχύ και χαμηλό κόστος, χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης, ασφάλεια και επαρκή κάλυψη δικτύου [56].

Στο πλαίσιο αυτό πρέπει να γίνονται οι εξής συμβιβασμοί:

- Τα ωφέλιμο φορτίο δεδομένων πρέπει να είναι όσο μικρότερο γίνεται.
- Η συχνότητα αποστολής των μηνυμάτων πρέπει να είναι της τάξεως των λεπτών (π.χ. ανά 5 ή 10 λεπτά)
- Ο ρυθμός μετάδοσης να είναι ο μεγαλύτερος δυνατός (επιθυμητό το σχήμα SF7BW125).
- Η αποστολή downlink μηνυμάτων να αποφεύγεται ή να περιορίζεται τόσο σε συχνότητα, όσο και σε μέγεθος.

Τα παραπάνω εξασφαλίζουν μικρότερα ΤΟΑ, δηλαδή χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας) και επαρκή χωρητικότητα στο δίκτυο, με αποτέλεσμα αυξημένη αξιοπιστία και αποδοτικότητα.

Από την άλλη μεριά, τα δίκτυα LoRaWAN είναι ακατάλληλα για:

- Αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (παρά μόνο αποστολή μικρών πακέτων ανά κάποια λεπτά)
- Τηλεφωνικές κλήσεις
- Μεμακρυσμένο έλεγχο συσκευών/λειτουργιών (π.χ. φώτα)
- Αποστολή/λήψη πολυμέσων

Σε κάθε περίπτωση απαιτείται γνώση τόσο των πλεονεκτημάτων, όσο και των μειονεκτημάτων του πρωτοκόλλου LoRaWAN, προκειμένου να διαπιστωθεί η συμβατότητά του με το υπό μελέτη σενάριο.

Κλείνοντας το κεφάλαιο 4, παρατίθεται εκ νέου, για λόγους ευκολίας, πίνακας με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LoRa.

Παράμετρος	LoRa
Εμβέλεια (εντός/εκτός πόλης)	5 km / 20 km
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	50 kbps
Όριο μηνυμάτων/ημέρα (ul/dl)	Απεριόριστα
Μέγ. ωφέλιμο φορτίο/μήνυμα	222 bytes
Συσκευές/σταθμό βάσης	1000
Link budget	155 dB
EIRP (μέγιστη/κόμβο)	14 dBm
Ρεύμα αναμονής (sleep current)	1 μ A
Μέγιστο ρεύμα σε εκπομπή	30 mA
Διάρκεια ζωής μπαταρίας	> 10 έτη
Ενεργειακή απόδοση	Πολύ υψηλή
Latency	Υψηλό
Διαμόρφωση	LoRa Spread Spectrum
Συχνότητες	Ευρώπη 868 MHz B. Αμερική 915 MHz Ασία 433 MHz (μη αδειοδοτημένο φάσμα)
Εύρος ζώνης (bandwidth)	125 / 250 / 500 kHz
Κόστος φάσματος	Μηδενικό
Κόστος εγκατάστασης	< 1000€ / gateway
Κόστος τελικού κόμβου	3 – 5€
Τοπολογία	Αστέρας
Ανάπτυξη ιδιωτικών δικτύων	Ναι
Αμφίδρομη επικοινωνία	Ναι
Προσαρμ. ρυθ. μετάδοσης (ADR)	Ναι
Ατρωσία σε παρεμβολές	Πολύ υψηλή
Κρυπτογράφηση	AES 128b
Κινητικότητα	Ναι
Εντοπισμός θέσης	Ναι
Τυποποίηση	LoRa Alliance

Πίνακας 4.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά LoRa

Κεφάλαιο 5: Υποστηρικτικά συστήματα και υποδομές

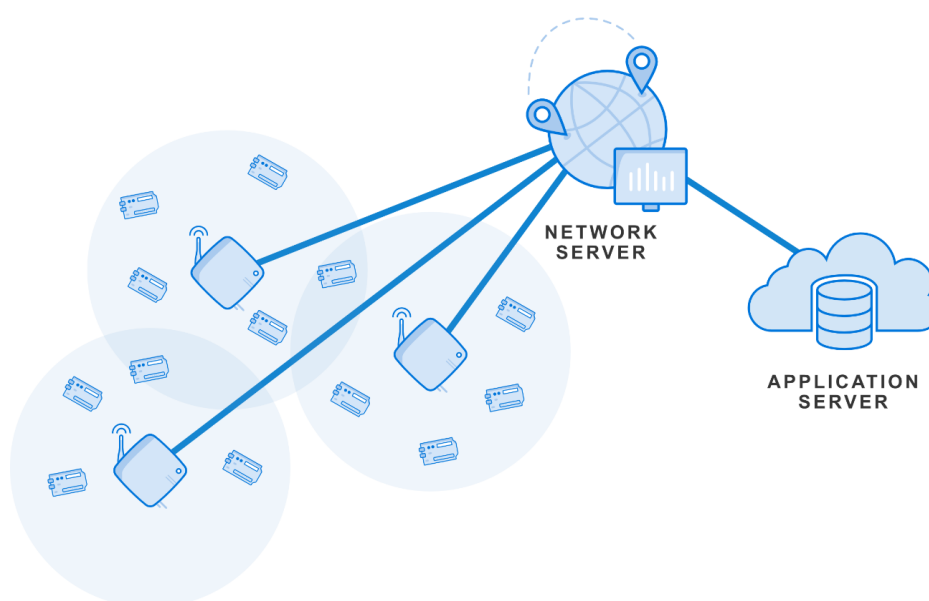
5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υποστηρικτικές υποδομές και τα συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας:

- The Things Network (TTN): Δίκτυο, network server, application server, διαχείριση συσκευών.
- Eclipse Mosquitto MQTT broker: Εξαγωγή δεδομένων από TTN application server (με σκοπό τον περαιτέρω χειρισμό τους).
- Enhydriis: Αποθήκευση – διαχείριση μετεωρολογικών χρονοσειρών
- TagoIO: Αποθήκευση – διαχείριση δεδομένων, διαχείριση συσκευών

5.2 The Things Network (TTN)

Το The Things Network (TTN) [57] αποτελεί μία υποδομή ανοικτού κώδικα, η οποία παρέχει ένα ελεύθερο/δημόσιο δίκτυο LoRaWAN, καθώς και ένα διαδικτυακό περιβάλλον διαχείρισης εφαρμογών και συσκευών. Εξυπηρετεί τη διασύνδεση συσκευών χαμηλής ισχύος και πυλών μεγάλης εμβέλειας σε ένα αποκεντρωμένο δίκτυο, με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων με εφαρμογές. Η κεντρική λειτουργία του TTN συνίσταται στη διάθεση του LoRaWAN network server, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 5.1: Δίκτυο The Things Network [58]

Με δεδομένη την απλότητα στη σχεδιαστική προσέγγιση των συσκευών στα δίκτυα LoRaWAN, ο network server είναι επιφορτισμένος με το κύριο μέρος της λογικής, η οποία κατανέμεται σε 3 επίπεδα:

- Λειτουργίες που αφορούν τις πύλες (gateway-related): παρακολούθηση και διαχείριση κατάστασης, προγραμματισμός χρήσης και διαχείριση μεταδόσεων, κατανομή φορτίου μεταδόσεων μεταξύ πυλών για συμμόρφωση με τους τοπικούς περιορισμούς κύκλου δράσης.
- Λειτουργίες που αφορούν τις συσκευές (device-related): διαχείριση κατάστασης, διαχείριση διευθύνσεων και αντιστοίχιση αυτών με συσκευές και εφαρμογές, διαχείριση κλειδιών ασφαλείας και μετρητών πλαισίων.
- Λειτουργίες που αφορούν τις εφαρμογές: διαχείριση και προώθηση κίνησης προς τις εφαρμογές, διερμηνεία δυαδικών δεδομένων και γεφύρωση αυτών με τα πρωτόκολλα υψηλού επιπέδου.

Η χρήση του δικτύου TTN προϋποθέτει τη δημιουργία λογαριασμού στην ιστοσελίδα www.thethingsnetwork.org. Η εγγραφή είναι δωρεάν, εφόσον το δίκτυο είναι πλήρως ελεύθερο. Μέσω του λογαριασμού, ο χρήστης δημιουργεί/καταχωρεί και διαχειρίζεται είτε εφαρμογές και τις αντίστοιχες συσκευές τους, είτε πύλες. Η δημιουργία/καταχώρηση και διαχείριση γίνονται στην ενότητα Κονσόλα (Console), μία κλειστού κώδικα διεπαφή χρήστη. Στο πλαίσιο αυτό ο χρήστης ρυθμίζει διάφορες παραμέτρους, οι οποίες θα αποτυπωθούν στα κεφάλαια 7 και 8.

Το περιβάλλον TTN προτείνει μία σειρά από εφαρμογές υψηλού επιπέδου, που ονομάζονται *integrations* (ενσωματώσεις/ενοποιήσεις) και εξυπηρετούν τη διασύνδεση και τον έλεγχο εφαρμογών και συσκευών, την αποθήκευση και οπτικοποίηση δεδομένων και την υλοποίηση αναλύσεων, μέσα από διάφορες διεπαφές προγραμματισμού (APIs). Μία από τις εφαρμογές αυτές είναι η πλατφόρμα *TagoIO*, που χρησιμοποιείται στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας και θα παρουσιαστεί σε επόμενη παράγραφο.

Πλέον της συμμόρφωσης με τους τοπικούς περιορισμούς κύκλου δράσης, στο πλαίσιο του ελεύθερου/δημοσίου δικτύου TTN, έχει υιοθετηθεί μία *πολιτική δίκαιης πρόσβασης (Fair Access Policy)*, η οποία περιορίζει το χρόνο μετάδοσης στα **30 sec ανά 24ωρο και ανά κόμβο για uplink μηνύματα, και το πλήθος των downlink μηνυμάτων σε 10 ανά 24ωρο**. Η πολιτική αυτή δεν ισχύει για ιδιωτικά δίκτυα TTN.

Όσον αφορά την ασφάλεια του δικτύου TTN, ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στο εδάφιο 4.3.2.3.

Το TTN ξεκίνησε το 2015 στο Άμστερνταμ (Κάτω Χώρες) από την εταιρεία The Things Industries (TTI) [59] και έκτοτε αναπτύσσεται χάρη στις εθελοντικές συνεισφορές μίας αναπτυσσόμενης παγκόσμιας κοινότητας. Το ανοικτό του κώδικα και η πλούσια πληροφοριακή βάση της κοινότητας επιτρέπουν στους κατά τόπους χρήστες να στήνουν και να διαχειρίζονται πύλες, επεκτείνοντας την κάλυψη του ελεύθερου/δημοσίου δικτύου TTN. Παράλληλα, η TTI έχει αναπτύξει και ιδιωτικά δίκτυα, τα οποία καλύπτουν εξατομικευμένες εμπορικές ή βιομηχανικές ανάγκες, έναντι ανάλογου οικονομικού αντιτίμου. Τον Φεβρουάριο του 2020 είχαν εγκατασταθεί 18.000 πύλες σε 150 χώρες και υπήρχαν 98.000 μέλη και 500.000 συνδεδεμένες συσκευές [49].

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί πως βρίσκεται σε εξέλιξη, έχοντας ήδη δοκιμαστεί επιτυχώς, η ανάπτυξη δορυφόρων χαμηλής τροχιάς, που θα αναμεταδίδουν μηνύματα από απομακρυσμένες συσκευές στο επίγειο δίκτυο TTN, μέσω πρωτοκόλλου LoRaWAN. Επιτυγχάνεται έτσι παγκόσμια κάλυψη, ακόμα και για συσκευές εκτός εμβέλειας των επίγειων πυλών [60].

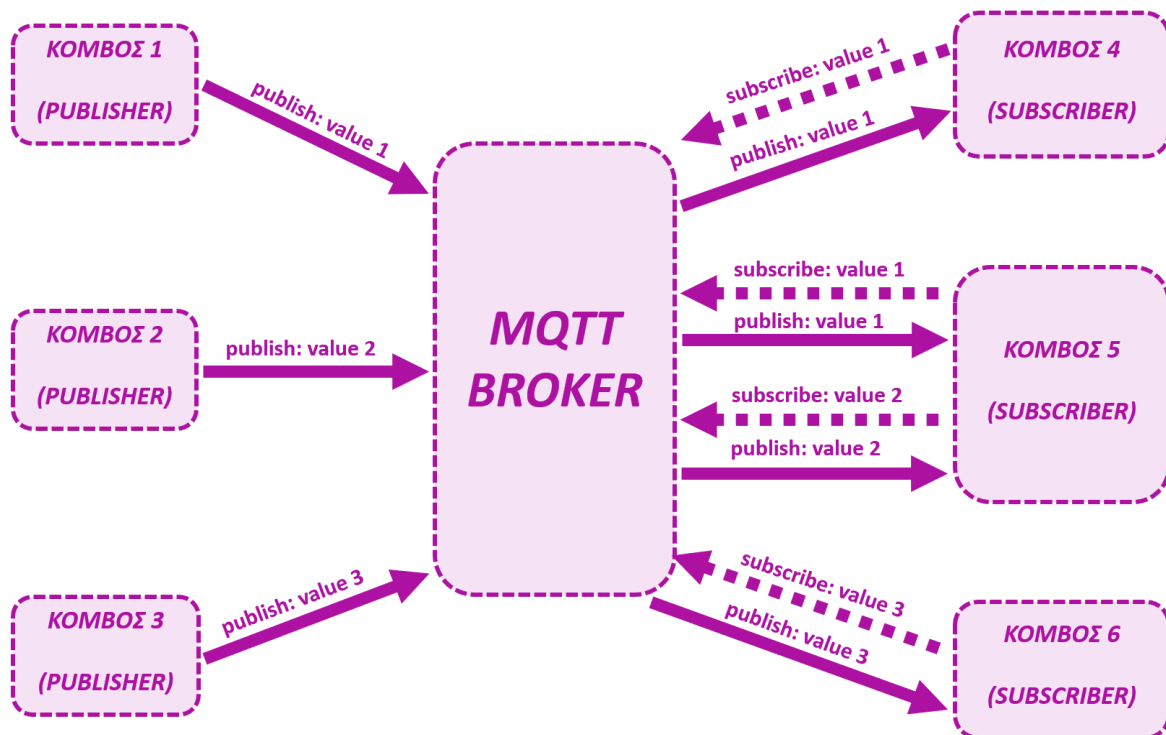
5.3 Eclipse Mosquitto MQTT broker

Το Eclipse Mosquitto [61] είναι ένας broker (μεσάζων, μεσίτης) μηνυμάτων ανοικτού κώδικα που εφαρμόζει πρωτόκολλο MQTT. Είναι ελαφρύ και κατάλληλο τόσο για συσκευές χαμηλής ισχύος (π.χ. κόμβοι IoT), όσο και μεγάλης ισχύος (servers).

Ενδείκνυται σε περιπτώσεις μηνυμάτων χαμηλού φορτίου δεδομένων (lightweight messaging), από συσκευές περιορισμένων πόρων. Παρέχει τα παρακάτω:

- main mosquito server
- mosquitto_pub and mosquitto_sub client utilities, για επικοινωνία με τον MQTT server
- Βιβλιοθήκη MQTT client γραμμένη σε C

Το MQTT (MQ Telemetry Transport, MQ Μεταφορά Τηλεμετρίας) είναι ένα απλό και ελαφρύ πρωτόκολλο μηνυμάτων publish/subscribe, σχεδιασμένο για συσκευές χαμηλού bandwidth και υψηλού latency. Συνδυάζει την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων των συσκευών και τη μείωση του bandwidth, με αξιοπιστία και εξασφάλιση παράδοσης των μηνυμάτων. Αυτό το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές IoT.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα MQTT broker

Σε αντίθεση με το HTTP, που αποτελεί πρωτόκολλο request – response, βασισμένο σε μία δομή client – server, το publish–subscribe messaging pattern (σχέδιο ανταλλαγής μηνυμάτων δημοσίευσης/εγγραφής) συνίσταται στο εξής: Ο αποστολέας μηνυμάτων (publisher) δεν αποστέλλει μηνύματα απευθείας στον παραλήπτη (subscriber): αντ’ αυτού, ταξινομεί τα μηνύματα σε θέματα (topics), κάνοντας publish σε ενδιαμέσο server, χωρίς γνώση των πιθανών ενδιαφερόμενων – subscribers. Παρόμοια, ο subscriber εκδηλώνει ενδιαφέρον για ένα ή περισσότερα topics, κάνοντας subscribe σε αυτά στον ενδιαμέσο server και λαμβάνει μόνο μηνύματα που αφορούν τα topics αυτά, χωρίς να έχει γνώση των publishers. Το σχέδιο αυτό παρέχει μεγάλη ευκολία κλιμακωσιμότητας στο δίκτυο και μία δυναμική τοπολογία, εφόσον είναι απλή η προσθαφαίρεση publishers/subscribers. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στο σχήμα 5.2.

5.4 Enhydris

Το Enhydris αποτελεί μία διαδικτυακή βάση υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων, ένα σύστημα αποθήκευσης και διαχείρισης υδρολογικών και μετεωρολογικών χρονοσειρών [62]. Εκεί ο χρήστης μπορεί να ενημερωθεί για τα όργανα και να παρακολουθήσει τις χρονοσειρές του σταθμού.

Είναι προσβάσιμη μέσω μιας διαδικτυακής διεπαφής, που περιλαμβάνει πολλές επιλογές παρουσίασης των δεδομένων, όπως πίνακες και γραφήματα. Η πρόσβαση στο Ephydris για συνεισφορά ή λήψη δεδομένων δίδεται σε διαπιστευμένους χρήστες ή ομάδες. Λειτουργεί λοιπόν είτε ως δημόσιο αποθετήριο για ελεύθερα δεδομένα ή ως ιδιωτικό σύστημα αποθήκευσης δεδομένων.

Είναι δυνατή η λήψη δεδομένων σε απλό κείμενο, για την περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία τους μέσω άλλων εφαρμογών και εργαλείων.

Το Ephydris αποτελεί ελεύθερο λογισμικό, γραμμένο σε Python και μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε λειτουργικό σύστημα.

Η ακριβής αξιοποίησή του θα αναφερθεί στα κεφάλαια 7 και 8.

5.5 TagoIO

Το περιβάλλον TagoIO [63] αποτελεί μία υψηλού επιπέδου cloud-based διαδικτυακή πλατφόρμα παρακολούθησης και ελέγχου. Αποτελεί προτεινόμενο integration για εφαρμογές στην πλατφόρμα του TTN, αλλά λειτουργεί και με άλλες πλατφόρμες και πρωτόκολλα.

Δίνει τη δυνατότητα και αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων, ελέγχου και διαχείρισης συσκευών, υλοποίηση αναλύσεων και ενοποιημένων υπηρεσιών. Επιπρόσθετα, συνδυάζει τα παραπάνω με ένα φιλικό στο χρήστη περιβάλλον διαχείρισης.



Σχήμα 5.3: Διασύνδεση TTN - TagoIO

Το TagoIO διαθέτει ξεχωριστό MQTT broker, υπεύθυνο για την προώθηση των δεδομένων σε ενδιαφερόμενους subscribers. Με αυτό τον τρόπο εξάγει απευθείας δεδομένα από εφαρμογές του δικτύου TTN, στις οποίες είναι διασυνδεδεμένο.

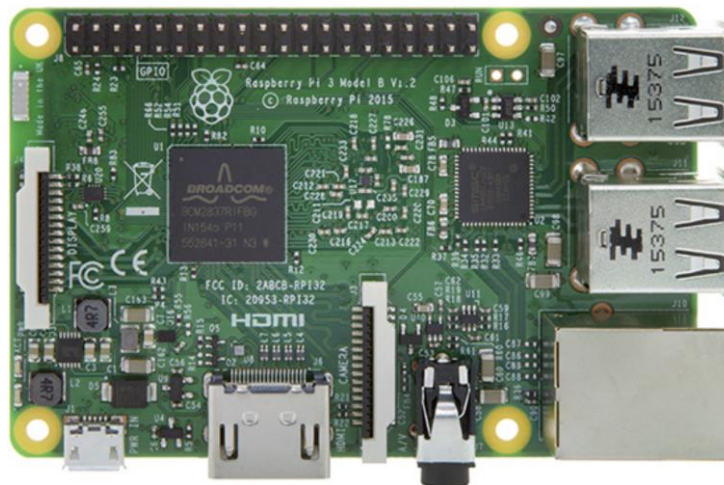
Κεφάλαιο 6: Παρουσίαση βασικού εξοπλισμού

6.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί ο βασικός εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διασύνδεση του μετεωρολογικού σταθμού Ε.Μ.Π στο IoT. Ο προϋπάρχων εμπλεκόμενος εξοπλισμός (εξοπλισμός μετεωρολογικού σταθμού Ε.Μ.Π., LoRa gateway Ε.Μ.Π.) δεν παρουσιάζεται, διότι αφενός μεν δεν αποτελεί αντικείμενο της εργασίας, αφετέρου εμπλέκεται και σε διαφορετικές εφαρμογές και προγράμματα.

6.2 Raspberry Pi 3 Model B

Είναι single-board υπολογιστής, σε μέγεθος πιστωτικής κάρτας, με ασύρματη συνδεσιμότητα LAN και Bluetooth. Ως λειτουργικό σύστημα παρέχεται από το Raspberry Pi Foundation (οργανισμός που ανέπτυξε το Raspberry Pi) το Raspbian, μία διανομή Linux βασισμένη στο Debian (32-bit), ωστόσο υποστηρίζει πλήθος από διαφορετικά λειτουργικά συστήματα, βασισμένα ή όχι σε Linux [64].



Εικόνα 6.1: Raspberry Pi 3 Model B

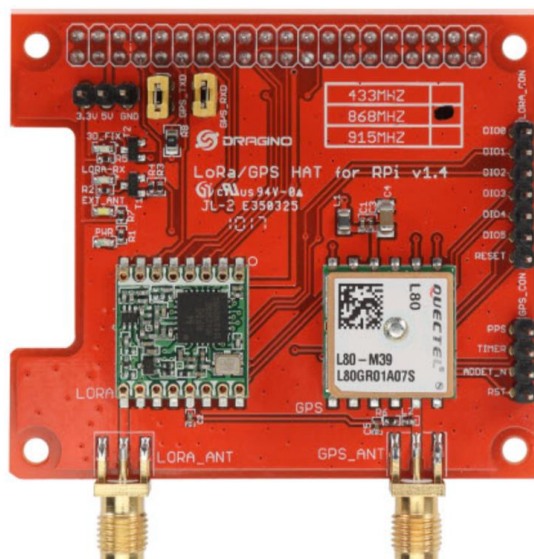
Χαρακτηριστικά:

- CPU: Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit
- RAM: 1GB
- Ασύρματη συνδεσιμότητα: BCM43438 wireless LAN and Bluetooth Low Energy (BLE) single-chip

- Ενσύρματη συνδεσιμότητα: 100 Base Ethernet
- I/O: 40-pin GPIO
- Ήχος/εικόνα: 4 Pole στερεοφωνική έξοδος, θύρα σύνθετου βίντεο
- HDMI: Πλήρους μεγέθους
- Θύρα κάμερας CSI για σύνδεση κάμερας Raspberry Pi
- Θύρα οθόνης DSI για σύνδεση οθόνης αφής Raspberry Pi
- Θύρα microSD για φόρτωση λειτουργικού συστήματος και αποθήκευση δεδομένων
- USB: USB2 / 4 θύρες (λειτουργιών)
- Τροφοδοσία: Θύρα micro USB (μέχρι 2.5A)

6.3 Dragino LoRa/GPS HAT v1.4

Είναι βαθμίδα επέκτασης (expansion module) του Raspberry Pi για ανάπτυξη συσκευών σε δίκτυο LoRaWAN. Βασίζεται στον πομποδέκτη SX1276/SX1278 (LoRa modem) που υλοποιεί τη διαμόρφωση LoRa, συνδυάζοντας μεγάλη εμβέλεια και απροσία σε παρεμβολές με χαμηλή κατανάλωση ισχύος, όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4. Παράλληλα υποστηρίζει και εφαρμογές GPS, μέσω της βαθμίδας L80, με δυνατότητα υπολογισμού και πρόβλεψης τροχιάς, ακόμα και για ασθενή σήματα εντός κλειστών χώρων, ισορροπώντας την ακρίβεια θέσης με την κατανάλωση ισχύος [65].



Εικόνα 6.2: Dragino LoRa/GPS HAT v1.4

Χαρακτηριστικά LoRa:

- Συχνότητες: 868 MHz/433 MHz/915 MHz
- Σταθερή RF έξοδος: +20 dBm / 100 mW
- Ρεύμα RX: c10.3 mA, 200 nA register retention
- Ευαισθησία μέγιστη: -148 dBm
- RSSI: 127 dB
- Ενισχυτής ισχύος (PA) υψηλής απόδοσης: +14 dBm
- Front end: IIP3 = -12.5 dBm (3^{ης} τάξης παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης)
- Μέγιστο link budget: 168 dB
- Bit rate: έως 300 kbps, προγραμματιζόμενο
- Διαμόρφωση: LoRa, FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK
- Πακέτα: μέχρι 256 με CRC
- Διεπαφή σύγχρονης σειριακής επικοινωνίας: SPI
- Ενσωματωμένος αισθητήρας θερμοκρασίας και δείκτης χαμηλής στάθμης μπαταρίας

Χαρακτηριστικά GPS:

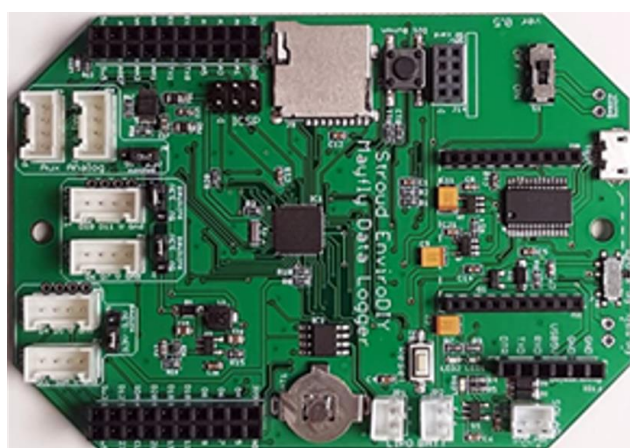
- Συχνότητες: Δέκτης L1 (1575.42MHz) κανάλι 22 (tracking) / 66 (acquisition).
- Ισχύς: 25mW (acquisition), 20mW (tracking)
- Τάση E/E: 2.7V ~ 2.9V
- Ευαισθησία: -148dBm (acquisition), -165dBm (tracking), -160dBm (reacquisition)
- Bit rate: έως 300 kbps, προγραμματιζόμενο
- Πρωτόκολλα: NMEA 0183, PMT
- Διεπαφή σειριακής επικοινωνίας: UART
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -40°C ~ 85°C

6.4 EnviroDIY MayFly data logger

Είναι single-board μικροελεγκτής, πλήρως συμβατός με το περιβάλλον Arduino IDE και προγραμματιζόμενος από το χρήστη. Αναπτύχθηκε από την κοινότητα EnviroDIY ως

ελεύθερο hardware για παρακολούθηση και διαχείριση δεδομένων, τηλεπικοινωνίες, εξάσκηση κ.ά., με σκοπό την ανάπτυξη απλών και χαμηλού κόστους εφαρμογών παρατήρησης του περιβάλλοντος, που θα συμβάλλουν στην περιβαλλοντική επιστήμη, στη διαχείριση πόρων και στην προστασία των λεκανών απορροής υδάτων [66].

Εκτός της microUSB θύρας, τροφοδοτείται από μπαταρία λιθίου 3.7V, η οποία συνδυάζεται με Φ/Β στοιχείο 0.5W, το οποίο παρέχεται μαζί με το μικροελεγκτή. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, σε συνδυασμό με τη συγκομιδή ενέργειας που υποστηρίζει (energy harvesting), καθιστά τον MayFly Data logger βιώσιμη IoT λύση για αποθήκευση και διαχείριση δεδομένων αισθητήρων σε μακροπρόθεσμη βάση.



Εικόνα 6.3: MayFly Data logger

Χαρακτηριστικά:

- Μικροεπεξεργαστής: ATmega1284p
- RAM: 16K
- Μνήμα Flash: 128K
- Pins: 28 ψηφιακά E/E, 8 αναλογικά, 4 ADC
- Θύρες: 2 σειριακές UART
- Υποδοχή microSD κάρτας
- Ενσωματωμένο ρολόι RTC (DS3231)
- Τροφοδοσία από μπαταρία lipo ή/και από Φ/Β στοιχείο
- Χαμηλή κατανάλωση ισχύος: 6.5 mA αναμονή, 0.27-0.43 mA sleep mode
- Υποδοχή για επέκταση τύπου xBee
- 2 δίοδοι φωτοεκπομπής (LED)

- 1 κομβίο προγραμματιζόμενο
- Τάση πλακέτας 3.3V, εναλλακτικά 5V για εξωτερικές συσκευές
- 2 κεφαλές των 20-pin για πρόσβαση σε όλες τις E/E
- 6 υποδοχές τύπου Grove για εύκολη σύνδεση σε αισθητήρες και συσκευές

6.5 SODAQ LoRaBee RN2483

Είναι βαθμίδα πομποδέκτη RN2483, ενσωματωμένη σε επέκταση τύπου xBee. Ο RN2483 είναι πομποδέκτης χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας, τεχνολογίας LoRa. Συμμορφώνεται με το πρωτόκολλο LoRaWAN σε επίπεδο συσκευών κλάσης A (Class A), εξασφαλίζοντας απρόσκοπτη διασύνδεση σε δίκτυα LoRaWAN. Ενδείκνυται για εφαρμογές αυτομάτων μετρήσεων, οικιακών και κτηριακών αυτοματισμών, συστημάτων συναγερμού και ασφαλείας, βιομηχανικού ελέγχου και παρακολούθησης, M2M, IoT [67].



Εικόνα 6.4: SODAQ LoRaBee RN2483

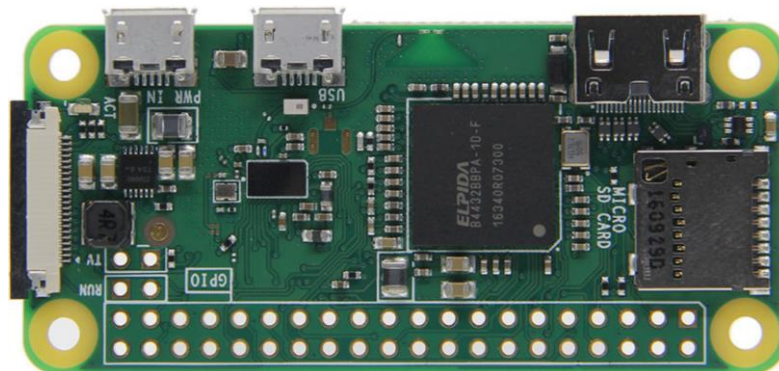
Χαρακτηριστικά:

- Συχνότητες: 868 MHz/433 MHz
- Ευαισθησία δέκτη: -148dBm
- Tx Power: +14dBm (868 MHz), +10dBm (433MHz)
- IP3 = -11 dBm (3ης τάξης παραμόρφωση ενδοδιαμόρφωσης)
- Διαμόρφωση: LoRa, FSK, GFSK
- Εμβέλεια: >15km προαστιακά, >5km αστικά
- Ενσωματωμένη στοίβα πρωτοκόλλων LoRaWAN Κλάσης A
- Τάση λειτουργίας: 2.1V ~ 3.6V
- Θερμοκρασία λειτουργίας: -40°C ~ 85°C

- Υγρασία λειτουργίας: 10% ~ 90%
- Bit rate: προγραμματιζόμενο έως 300 kbps (FSK), έως 5468bps (LoRa),
- Pins: 14 GPIO
- Περιβαλλοντικά φιλικό (συμμόρφωση RoHS)
- Διεπαφή ασύγχρονης σειριακής επικοινωνίας (UART)

6.6 Raspberry Pi Zero W

Είναι single-board υπολογιστής, με δυνατότητες ασύρματης συνδεσιμότητας και παρεχόμενα λειτουργικά συστήματα όπως το Raspberry Pi 3 Model B, αλλά σε πολύ μικρότερο μέγεθος [64].



Εικόνα 6.5: Raspberry Pi Zero X

Χαρακτηριστικά:

- CPU: 1GHz, single-core CPU
- RAM: 512MB
- Ασύρματη συνδεσιμότητα: 802.11 b/g/n wireless LAN, Bluetooth 4.1, Bluetooth Low Energy (BLE)
- Ενσύρματη συνδεσιμότητα: -
- I/O: 40-pin GPIO
- USB: 1 micro USB (λειτουργιών)
- Τροφοδοσία: micro USB
- Θύρα σύνθετου βίντεο
- HDMI: mini HDMI
- Θύρα κάμερας CSI

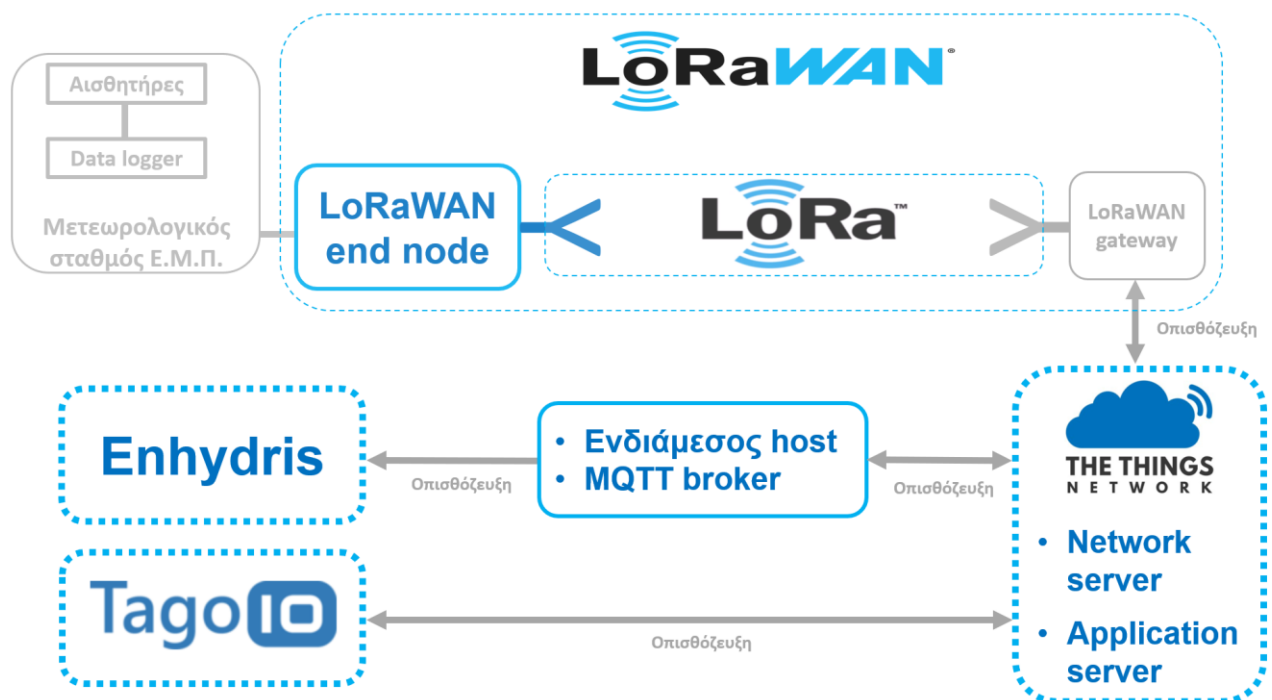
Μέρος Β: Υλοποίηση

Κεφάλαιο 7: Διασύνδεση μετεωρολογικού σταθμού Ε.Μ.Π. στο Internet of Things (IoT)

7.1 Γενικά

Η φυσική μεταφορά των δεδομένων από τον μετεωρολογικό σταθμό του Ε.Μ.Π. βασίζεται σε μία ασύρματη ζεύξη Wi-Fi με σύνδεση point-to-Access-Point μεταξύ του σταθμού και της σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Ο σταθμός είναι διασυνδεδεμένος στο σύστημα Enhydris (κεφάλαιο 5).

Στόχος είναι η πραγματοποίηση ασύρματης ζεύξης LoRa, για μεταφορά των μετεωρολογικών δεδομένων από το σταθμό, μέσω ενός κόμβου LoRa (LoRaWAN end node), στην πύλη LoRa (LoRaWAN gateway) και η περαιτέρω προώθησή τους στο σύστημα Enhydris και στην πλατφόρμα TagoIO.



Διάγραμμα 7.1: Πλήρες σύστημα διασύνδεσης

Το διάγραμμα 7.1 αποτυπώνει το πλήρες τελικό σύστημα. Με γαλάζιο χρώμα γραμματοσειράς/πλαισίου επισημαίνονται τα υποσυστήματα που αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Συνοπτική περιγραφή:

- Ο κόμβος LoRa (ένα Raspberry Pi 3 Model B συνδεδεμένο με ένα Dragino LoRa/GPS HAT v1.4, κεφάλαιο 6) δέχεται τα μετεωρολογικά δεδομένα από τον logger του σταθμού και τα στέλνει, μέσω ζεύξης LoRa, στην πύλη LoRa του Ε.Μ.Π.
- Η πύλη LoRa τα προωθεί μέσω του δικτύου οπισθόζευξης στο TTN (network – application servers, κεφάλαιο 5).
- Προώθηση είτε στο Enhydriis, μέσω του ενδιάμεσου host/MQTT broker (ένα Raspberry Pi Zero W), είτε απευθείας στο TagoIO (κεφάλαια 5-6).

7.2 Απαιτήσεις και περιορισμοί

Το σύστημα πρέπει να ικανοποιεί συγκεκριμένες απαιτήσεις λειτουργίας, όσον αφορά τις μεταβλητές που θα αποστέλλονται και την περιοδικότητα της αποστολής τους. Παράλληλα πρέπει να συμμορφώνεται με τους τοπικούς περιορισμούς περί duty cycle (εδάφιο 4.3.2.6), με τους περιορισμούς του πρωτοκόλλου LoRAWAN (εδάφιο 4.3.2.7), αλλά και την πολιτική δίκαιης πρόσβασης του TTN (παράγραφος 5.2). Τα παραπάνω συνοψίζονται ως εξής:

- Μεταφορά τιμών 18 μεταβλητών (μέγεθος αρχικό άνω των 200 Bytes)
- Περιοδικότητα αποστολής: 1 πακέτο ανά 20 min
- Μέγεθος payload στη χειρότερη περίπτωση Data Rate: 51 Bytes
- Όριο uplink: 30 sec ανά 24h και ανά κόμβο
- Duty cycle: 1%
- Όριο downlink: 10 μηνύματα ανά 24ωρο

Ο περιορισμός του μεγέθους του payload υλοποιείται μέσω μετατροπής των δεδομένων από string σε binary μορφή, αλλά και της αλλαγής της τάξης μεγέθους των τιμών των μεταβλητών και μετατροπής τους σε ακεραίους αριθμούς, διαδικασία που στο τελευταίο στάδιο αντιστρέφεται στον application server για αναπαραγωγή των αρχικών

τιμών. Έτσι, από έναν πίνακα των 216 Bytes καταλήγουμε σε έναν πίνακα των 35 Bytes, που υπολείπεται σαφώς του ορίου των 51 Bytes.

Ο περιορισμός δικτύου των 30 sec/κόμβο/24h για uplink μηνύματα αντιστοιχεί σε ένα συνολικό duty cycle 0,035% για τον κόμβο, δηλαδή υπερκαλύπτει τον τοπικό περιορισμό του 1%, συνεπώς εξετάζονται μαζί. Επίσης, οι τιμές των αισθητήρων του μετεωρολογικού σταθμού αποστέλλονται ανά 20min, κάτι που θέτει και την ελάχιστη αποδεκτή περιοδικότητα αποστολής σε 1 μήνυμα ανά 20min. Με δεδομένο το payload των 35 Bytes, οι TOA και η περιοδικότητα αποστολής uplink μηνυμάτων ανά Data Rate, σε βάθος 24ώρου, φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Data Rate	TOA (ms)	Μηνύματα/ ημέρα	Περιοδικότητα εφικτή	Περιοδικότητα αποδεκτή	Κάλυψη απαιτήσεων
SF7BW125	97.5	307	4 μηνύματα / 20min	1 μήνυμα / 20min	ΝΑΙ
SF8BW125	174.6	171	2 μηνύματα / 20min		ΝΑΙ
SF9BW125	308.2	97	1 μήνυμα / 20min	1 μήνυμα / 20min	ΝΑΙ
SF10BW125	575.5	52	<1 μήνυμα / 20min		ΟΧΙ
SF11BW125	1232.9	24	<1 μήνυμα / 20min		ΟΧΙ
SF12BW125	2302	13	<1 μήνυμα / 20min		ΟΧΙ

Πίνακας 7.1: Data Rate – περιοδικότητα μηνυμάτων επί τη βάσει 24ώρου

Εκτιμάται ωστόσο ότι η ζεύξη θα λειτουργεί υπό Data Rate SF7BW125 ή SF8BW125, που υπερκαλύπτουν την αποδεκτή περιοδικότητα του 1 πακέτου ανά 20min. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται στα παρακάτω δεδομένα:

- Εξασφαλισμένη οπτική επαφή LoRa node – LoRa gateway.
- Απόσταση 340m (<< δυνατοτήτων LoRa ζεύξεων).
- Κλιματολογικές συνθήκες αίθριες κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα [68].
- Η επίδραση των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων είναι σχεδόν αμελητέα σε συχνότητες χαμηλότερες των 10GHz [69].



Εικόνα 7.1: Απεικόνιση θέσεων μετεωρολογικού σταθμού και LoRa gateway

Για λόγους πλεονασμού, στο πρόγραμμα που υλοποιεί την αποστολή των μηνυμάτων (*periodic.c*, παράγραφος 7.4) τέθηκε ως περιοδικότητα η αποστολή 1 μηνύματος ανά 10 min, που υπερκαλύπτει την ελάχιστη αποδεκτή περιοδικότητα αποστολής. Σε περίπτωση μετάβασης σε άλλο Data Rate, το πρωτόκολλο αυτόματα προσαρμόζει τους χρόνους αποστολής, ώστε να βρίσκεται σε κάθε περίπτωση εντός των περιορισμών.

Τέλος, ο περιορισμός των 10 downlink μηνυμάτων ανά 24ωρο μπορεί να επιτευχθεί με τον αποκλεισμό μηνυμάτων επιβεβαίωσης λήψης (acknowledgments).

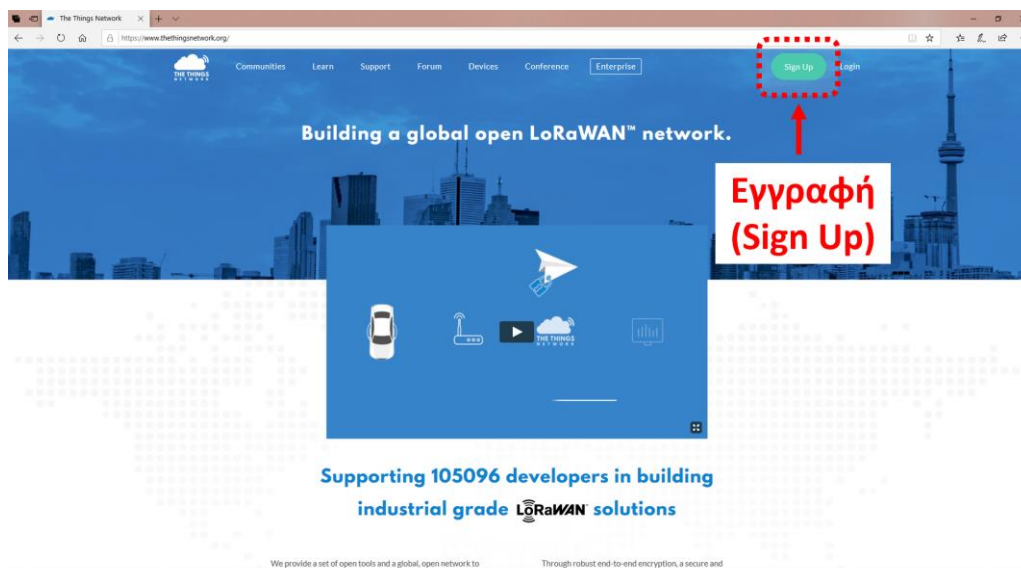
Τα παραπάνω ελήφθησαν υπόψη κατά τη σύνταξη των προγραμμάτων που υλοποιούν τη διασύνδεση (παράγραφος 7.4).

7.3 Αρχικοποίηση υποστηρικτικών συστημάτων και υποδομών

7.3.1 Αρχικοποίηση περιβάλλοντος TTN

7.3.1.1 Δημιουργία λογαριασμού TTN

Εισερχόμαστε στην ιστοσελίδα <https://www.thethingsnetwork.org/> και επιλέγουμε το πεδίο *Sign Up* (εγγραφή):



Εικόνα 7.2: Αρχική σελίδα TTN

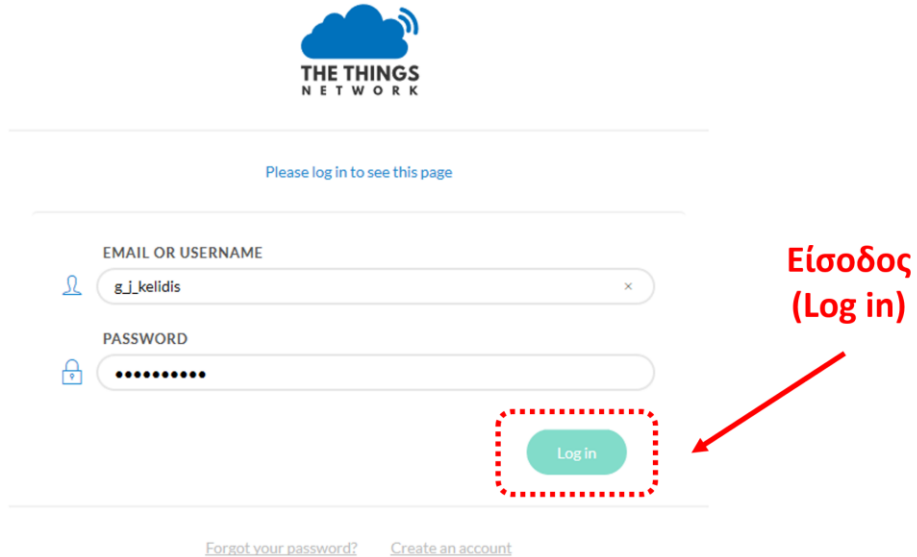
Στη συνέχεια καταχωρούμε τα στοιχεία και διαπιστευτήρια που ζητούνται και επιλέγουμε το πεδίο *Create account* (δημιουργία λογαριασμού):

Εικόνα 7.3: Καταχώρηση στοιχείων και διαπιστευτηρίων και δημιουργία λογαριασμού

Με τα βήματα αυτά, καθώς και μία τυπική διαδικασία ταυτοποίησης, ολοκληρώνουμε τη δημιουργία λογαριασμού στο TTN.

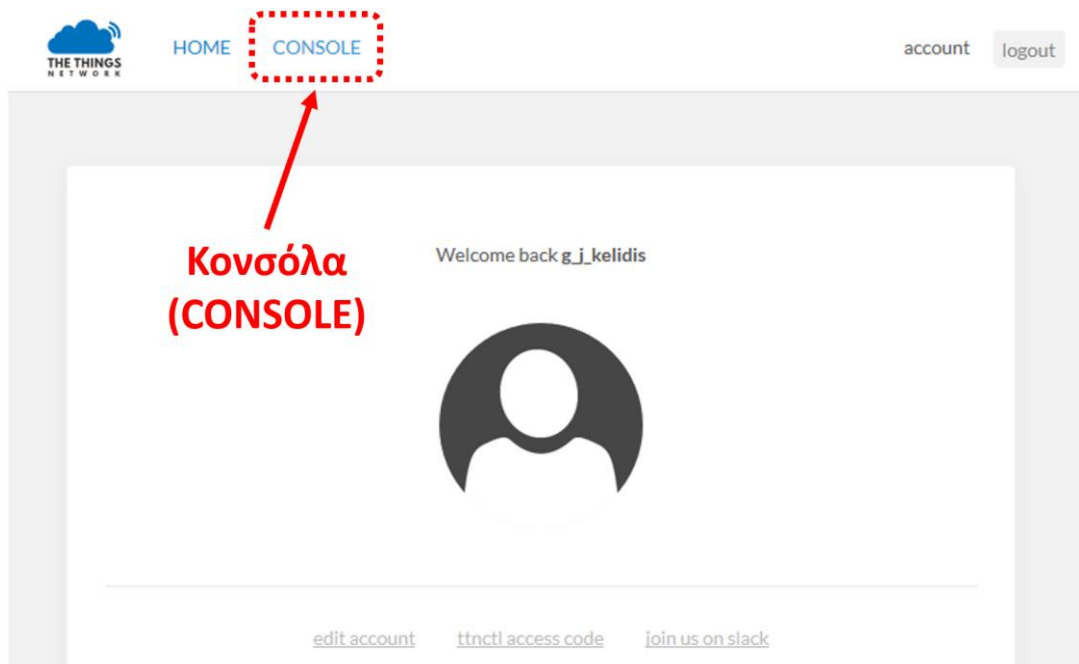
7.3.1.2 Προσθήκη εφαρμογής TTN

Εισερχόμαστε στο λογαριασμό μας στην ιστοσελίδα του TTN:



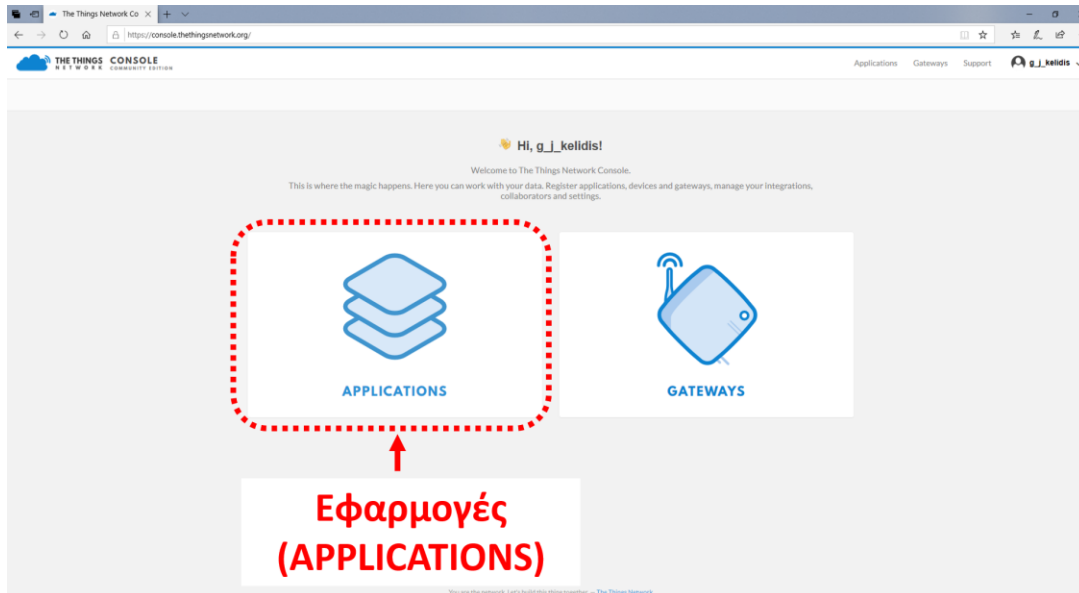
Εικόνα 7.4: Είσοδος στο λογαριασμό

Στη συνέχεια εισερχόμαστε στην κονσόλα, από όπου γίνονται η προσθήκη, η παραμετροποίηση και η διαχείριση των εφαρμογών και συσκευών:



Εικόνα 7.5: Είσοδος στην κονσόλα

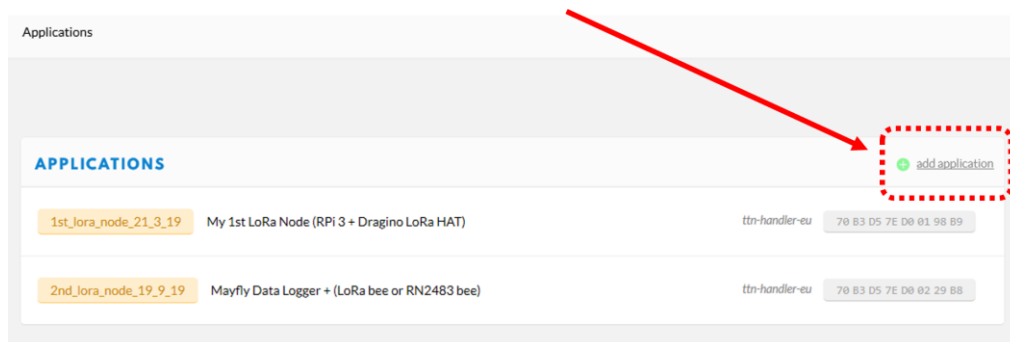
Έπειτα επιλέγουμε το πεδίο **APPLICATIONS** και εισερχόμαστε στο μενού διαχείρισης εφαρμογών:



Εικόνα 7.6: Είσοδος στο μενού εφαρμογών

Στο μενού διαχείρισης εφαρμογών επιλέγουμε **add application** (προσθήκη εφαρμογής):

Προσθήκη εφαρμογής (add application)

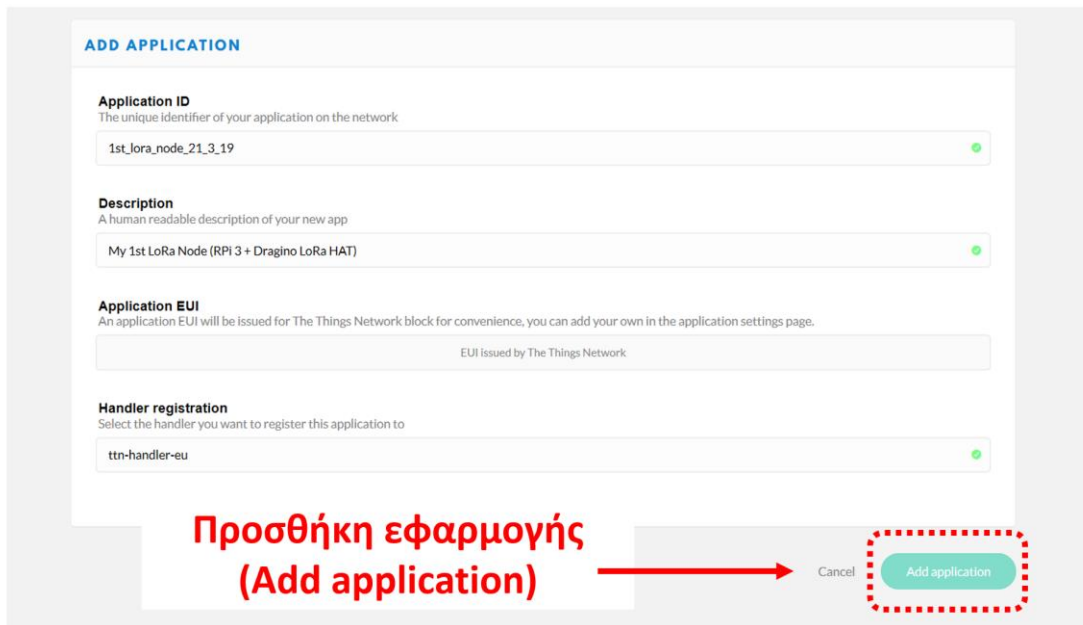


Εικόνα 7.7: Προσθήκη εφαρμογής

Στη συνέχεια καταχωρούμε τα εξής στοιχεία και επιλέγουμε **Add application**:

- Application ID (εδώ: *1st_lora_node_21_3_19*)
- Description (εδώ: *My 1st LoRa Node (RPI 3 + Dragino LoRa HAT)*)

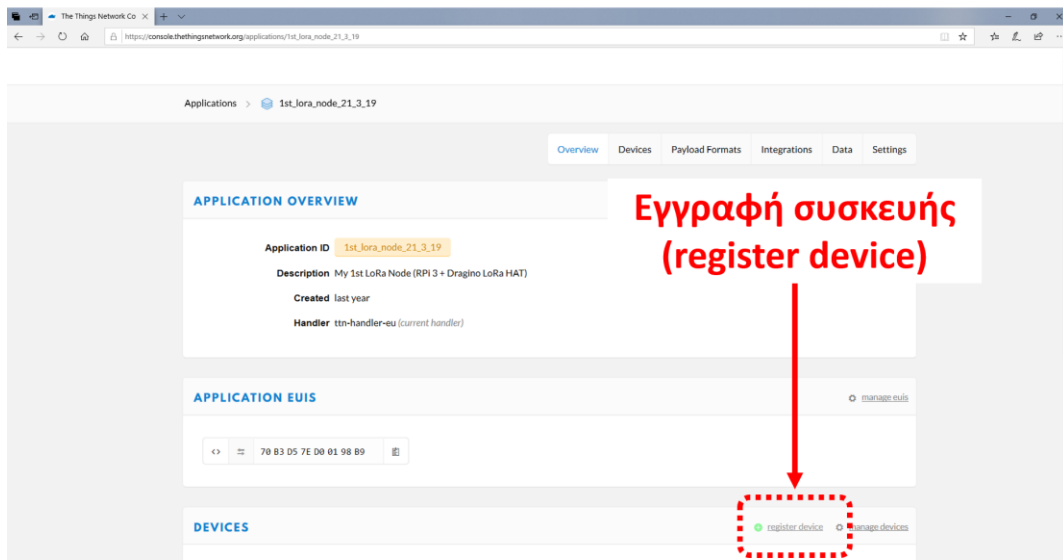
- Application EUI (καθορισμός από TTN)
- Handler registration (εδώ: *ttn-handler-eu*)



Εικόνα 7.8: Καταχώρηση στοιχείων εφαρμογής

7.3.1.3 Εγγραφή συσκευής

Ευρισκόμενοι στο μενού της εφαρμογής μας, επιλέγουμε **register device**:

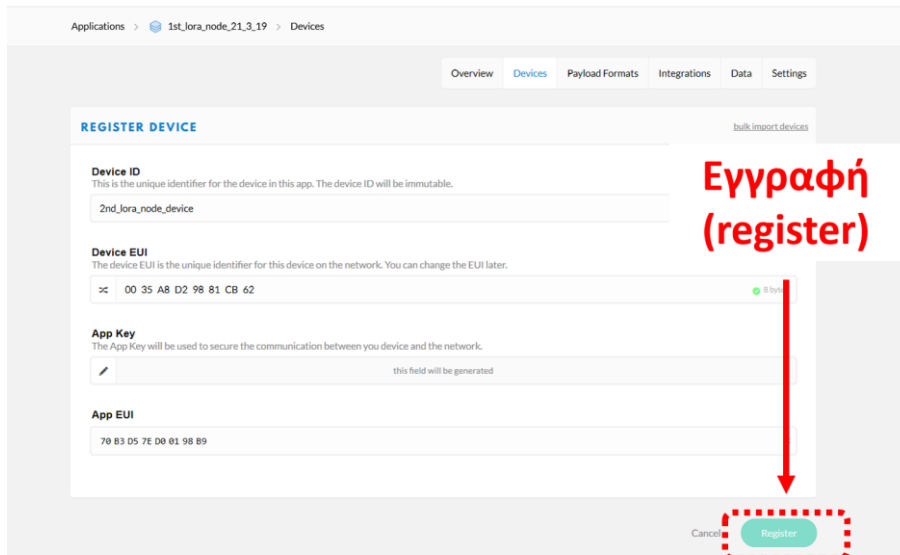


Εικόνα 7.9: Εγγραφή συσκευής

Στη συνέχεια καταχωρούμε τα εξής στοιχεία και επιλέγουμε **register**:

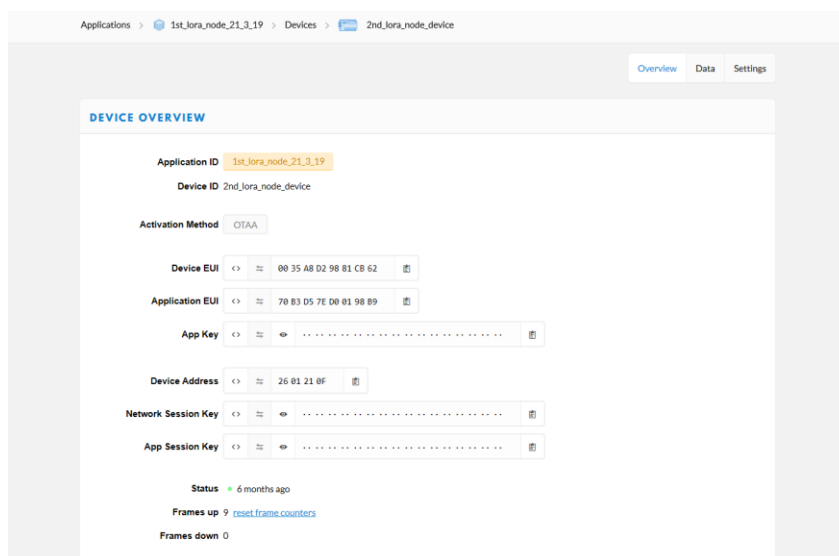
- Device ID (εδώ: *2nd_lora_node_device*)

- Device EUI (εδώ: *00 35 A8 D2 98 81 CB 62*)
- App Key (καθορισμός από TTN)
- App EUI (εδώ: *70 B3 D5 7E D0 01 98 B9*, καθορίστηκε από TTN)



Εικόνα 7.10: Καταχώρηση στοιχείων συσκευής

Μετά την εγγραφή, οδηγούμαστε στην καρτέλα επισκόπησης (*Overview*) της συσκευής. Προεπιλεγμένος τρόπος ενεργοποίησης της συσκευής είναι η δυναμική ενεργοποίηση (OTAA, εδάφιο 4.3.3.2), επομένως στην καρτέλα αυτή παρατίθενται συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία της συσκευής, προσαρμοσμένα σε αυτήν. Στην καρτέλα *Settings* υπάρχει η δυνατότητα επιλογής στατικής ενεργοποίησης (ABP, εδάφιο 4.3.3.2), με ανάλογη προσαρμογή των παρατιθέμενων στοιχείων.



Εικόνα 7.11: Επισκόπηση συσκευής (overview)

7.3.2 Αρχικοποίηση MQTT broker

Στον ενδιάμεσο host ανοίγουμε ένα τερματικό. Για την εγκατάσταση MQTT mosquito broker εκτελούμε την εντολή:

```
pi@mqtt:~ $ sudo apt-get install mosquito
```

Για την εγκατάσταση MQTT mosquito client εκτελούμε την εντολή:

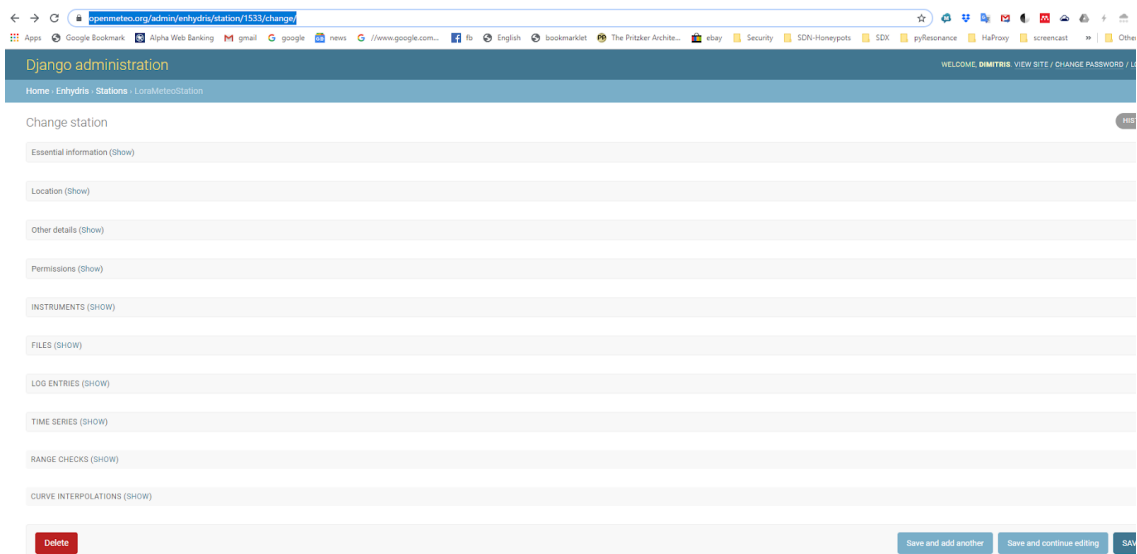
```
pi@mqtt:~ $ sudo apt-get install mosquitto-clients
```

Το στήσιμο του ενδιάμεσου host και η λειτουργία του παρουσιάζονται στην παράγραφο 7.6

7.3.3 Αρχικοποίηση περιβάλλοντος EnhydriS

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δημιουργήθηκε πιλοτικός μετεωρολογικός σταθμός **LoraMeteoStation** (<https://openmeteo.org/stations/1533/> [70]) μέσω της πλατφόρμας EnhydriS, με προσθήκη εικονικών οργάνων, που αντιστοιχούν ακριβώς σε αυτά που χρησιμοποιούνται στον πραγματικό μετεωρολογικό σταθμό του Ε.Μ.Π. (NTUA University Campus of Zografou, <https://openmeteo.org/stations/1334/>). Επίσης προστέθηκαν χρονοσειρές που αντιστοιχούν απόλυτα σε αυτές του πραγματικού σταθμού.

Για τη δημιουργία του σταθμού είναι απαραίτητη η δημιουργία λογαριασμού στο <https://openmeteo.org/> και η καταχώρηση των στοιχείων του σταθμού στη διαχειριστική διεπαφή χρήστη (UI) του σταθμού:



Εικόνα 7.12: Διαχειριστικό UI του πιλοτικού σταθμού 1533

Στην καρτέλα *Essential information* καθορίστηκε το όνομα του σταθμού (*LoraMeteoStation*), ο κωδικός του (*LoRA-NTUA Campus [E.M.II.]*) κ.ά., ενώ στην καρτέλα *Location* οι συντεταγμένες (long 23.78733, lat 37.9737) και το υψόμετρό του (219m).

The screenshot shows a web interface for station modification. The top navigation bar includes 'Accueil', 'Enhydriis', 'Stations', and 'LoraMeteoStation'. The main heading is 'Modification de station' with a 'HISTORIQUE' button. The 'Essential information (Masquer)' section contains:

- Name: LoraMeteoStation
- Code: LoRA-NTUA Campus [E.I.] (with a note: 'If the station has a code (e.g. one given by another agency), you can enter it here.')
 - Is automatic
- Owner: National Technical University of Athens - Dept. of Water Resources and Env. Engineering
- Copyright years: 3
- Copyright holder: National Technical University of Athens

 The 'Location (Masquer)' section contains:

- Co-ordinates: Longitude (23.78733) and Latitude (37.9737) in decimal degrees. Original SRID: 4326 (with a note: 'Set this to 4326 if you have no idea what we're talking about. If the latitude and longitude has been converted from another co-ordinate system, enter the SRID of the original co-ordinate system.')
 - Altitude: 214.0

 Below these are sections for 'Other details (Afficher)', 'FILES (AFFICHER)', and 'LOG ENTRIES (AFFICHER)'.

Εικόνα 7.13: Καρτέλες Essential information - Location

Μέσω της καρτέλας *INSTRUMENTS* δημιουργήθηκαν τα όργανα, ενώ μέσω της καρτέλας *TIME SERIES* οι αντίστοιχες χρονοσειρές, παραμετροποιώντας για κάθε μία όνομα, μεταβλητή, μονάδα μέτρησης, ακρίβεια, χρονικό βήμα μέτρησης, ωρική ζώνη κ.ά.

The screenshot shows the 'TIME SERIES (MASQUER)' form for 'Temperature_id232'. The 'ESSENTIAL INFORMATION (MASQUER)' section contains:

- Name: Temperature_id232
- Variable: [dropdown menu]
- Unit of measurement: °C
- Precision: 1 (with a note: 'The number of decimal digits to which the values of the time series will be rounded. It's usually positive, but it can be zero or negative, for example, for humidity it is usually zero; for wind direction in degrees, depending on the sensor, you might want to specify precision -1, which means the value will be 10, or 20, or 30, etc. This only affects the rounding of values when the time series is retrieved; values are always stored with all the decimal digits provided.')
 - Hidden
 - Remarks: Type: Raw data --ALT-- Τίπος: Πρωτογενής

 The 'TIME STEP (MASQUER)' section contains:

- Time step: 10min (with a note: 'E.g. "10min", "h" (hourly), "d" (daily), "M" (monthly), "Y" (yearly). More specifically, it's an optional number plus a unit, with no space in between. The units available are min, h, D, M, Y. Leave empty if the time series is irregular.')
 - Time zone: EET (UTC+0200)

Εικόνα 7.14: Καρτέλα TIME SERIES χρονοσειράς Temperature_id232

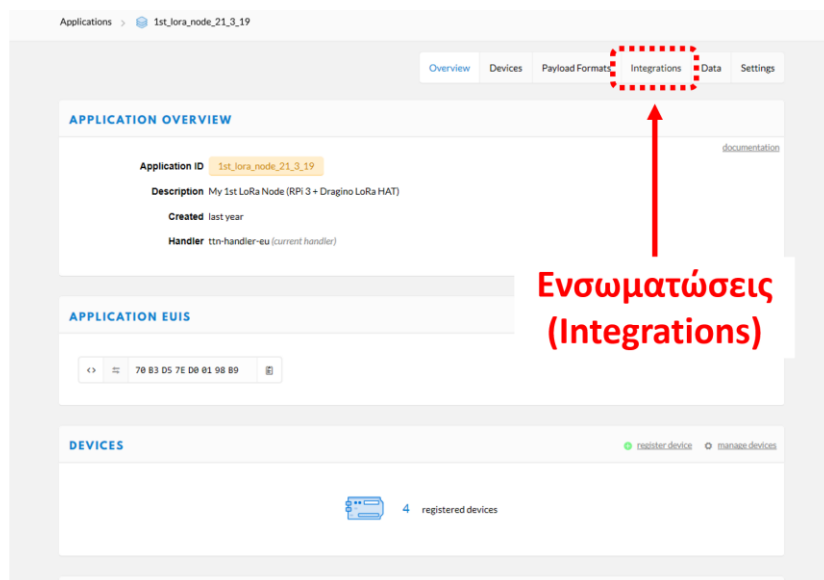
Τα όργανα που δημιουργήθηκαν αντιστοιχούν σε αυτά του πραγματικού σταθμού, η δε ονομασία τους αποτελεί σύνθεση ονόματος και κωδικού χρονοσειράς των οργάνων του πραγματικού σταθμού:

Όνομασία	Μεταβλητή	id χρονοσειράς πραγματικού σταθμού	id χρονοσειράς εικονικού σταθμού
Temperature_id232	Μέση θερμοκρασία	232	9886
Wind_direction_id240	Διεύθυνση ανέμου	240	9887
Sunshine_duration_id236	Ηλιοφάνεια	236	9888
Temperature_id247	Μέση θερμοκρασία	247	9889
Battery_level_id0	Στάθμη	0	9890
Barometric_pressure_id5461	Ατμοσφαιρική πίεση	5461	9891
Humidity_id248	Υγρασία	248	9892
Rainfall_id230	Βροχόπτωση	230	9893
Solar_radiation_id9141	Ηλιακή ακτινοβολία	9141	9894
Rainfall_id234	Βροχόπτωση	234	9895
Total_solar_radiation_id237	Ηλιακή ακτινοβολία	237	9896
Diffuse_solar_radiation_id238	Ηλιακή ακτινοβολία	238	9897
Humidity_id233	Υγρασία	233	9898
Wind_speed_id6659	Ταχύτητα ανέμου	6659	9899
Wind_gust_id9139	Ριπή ανέμου	9139	9900
Wind_direction_id6661	Διεύθυνση ανέμου	6661	9901
Wind_speed_id6539	Ταχύτητα ανέμου	6539	9902
Wind_gust_id6541	Ριπή ανέμου	6541	9903

Πίνακας 7.2: Μεταβλητές προς αποστολή

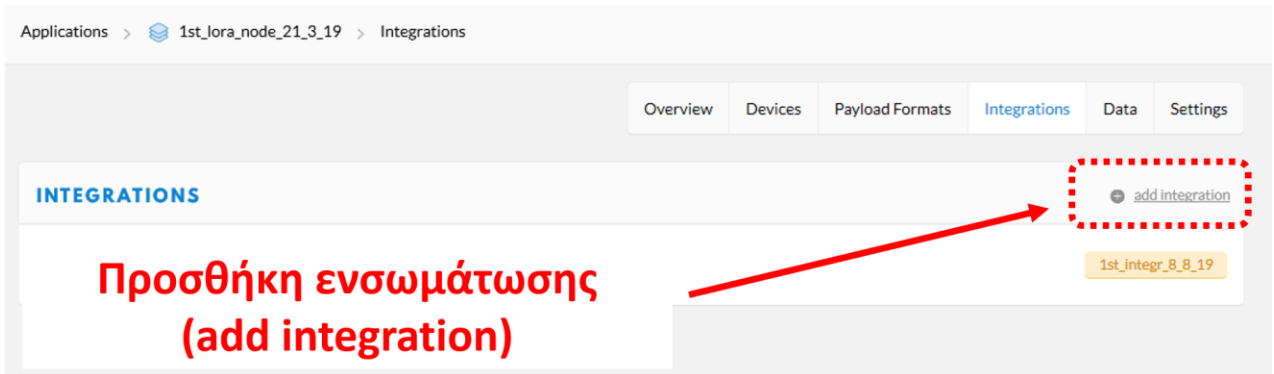
7.3.4 Αρχικοποίηση περιβάλλοντος *TagoIO*

Στο λογαριασμό TTN που έχουμε δημιουργήσει, εισερχόμαστε στην κονσόλα και στη συνέχεια στο μενού εφαρμογών (εικόνες 7.4 και 7.5). Επιλέγουμε εφαρμογή και οδηγούμαστε στην καρτέλα **Overview**. Επιλέγουμε την καρτέλα **Integrations**.



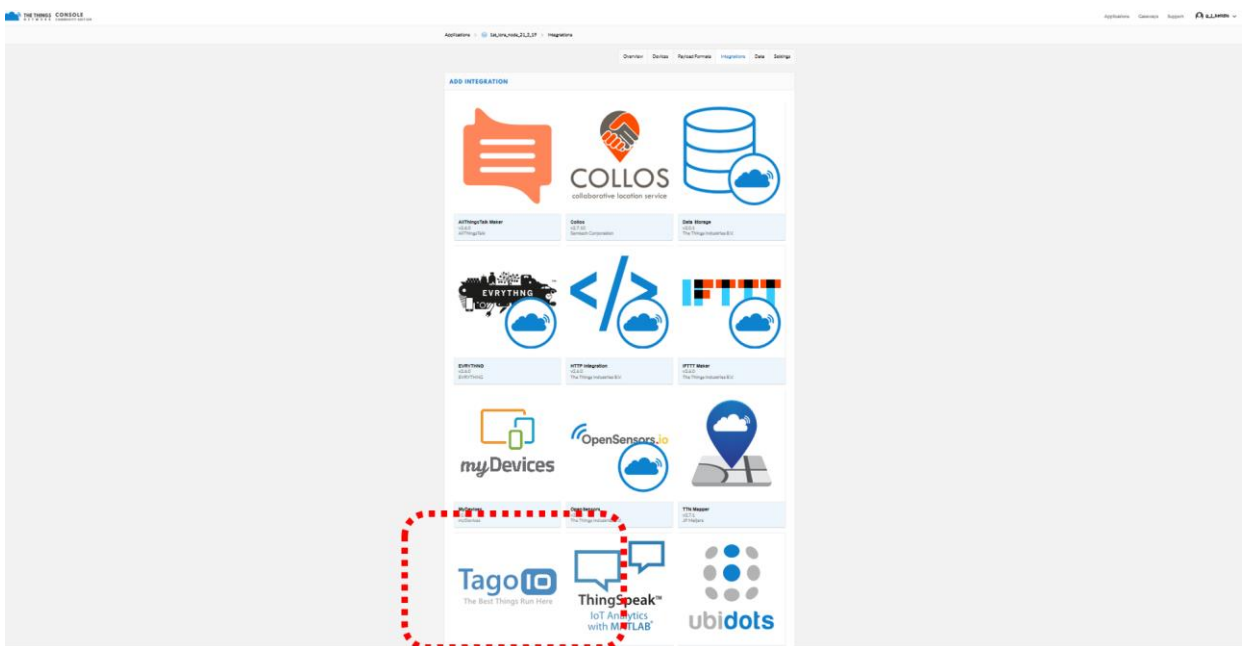
Εικόνα 7.15: Μετάβαση στην καρτέλα Integrations

Οδηγούμαστε στην καρτέλα *Integrations* κι εκεί επιλέγουμε *add integration*:



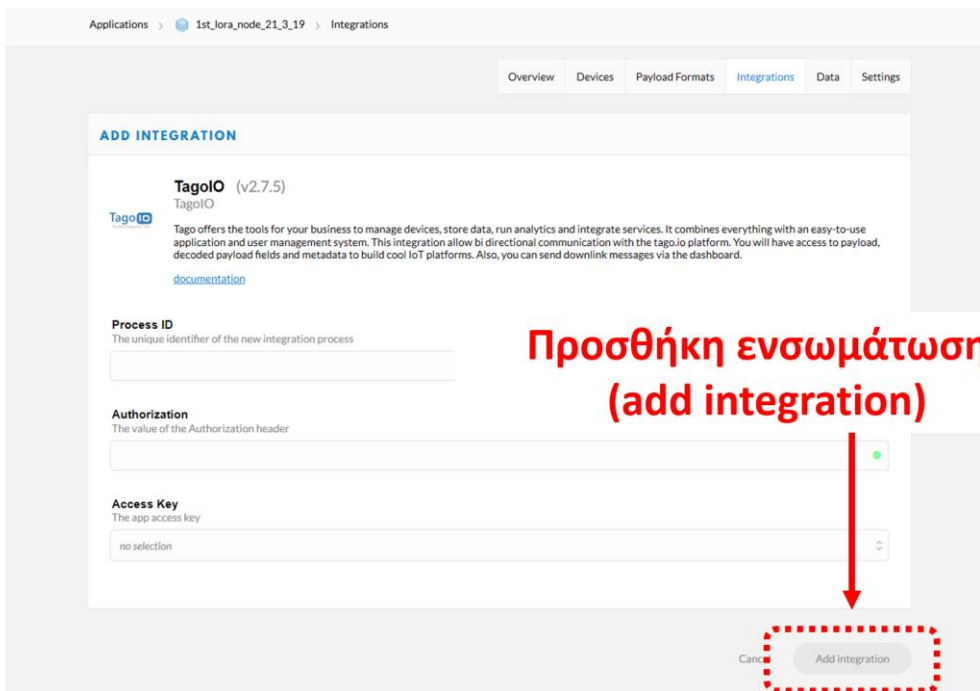
Εικόνα 7.16: Προσθήκη ενσωμάτωσης

Στη συνέχεια εμφανίζεται μία λίστα με όλα τα συνεργαζόμενα με το TTN integrations, από την οποία επιλέγουμε το *TagoIO*:



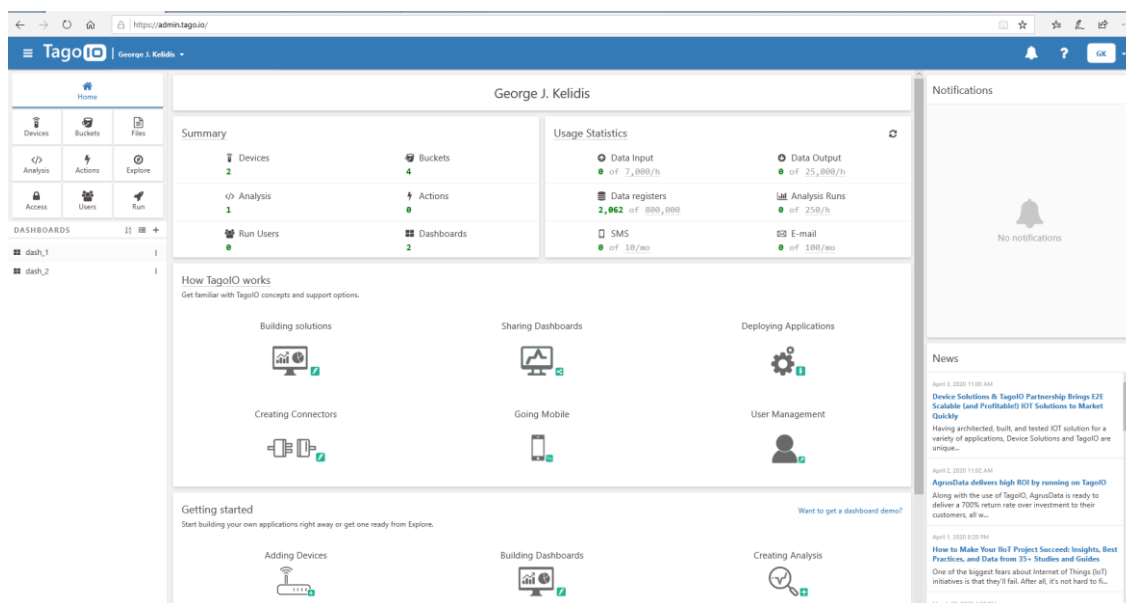
Εικόνα 7.17: Επιλογή TagoIO

Έπειτα συμπληρώνουμε Process ID, Authorization και Access Key και επιλέγουμε *Add integration*:



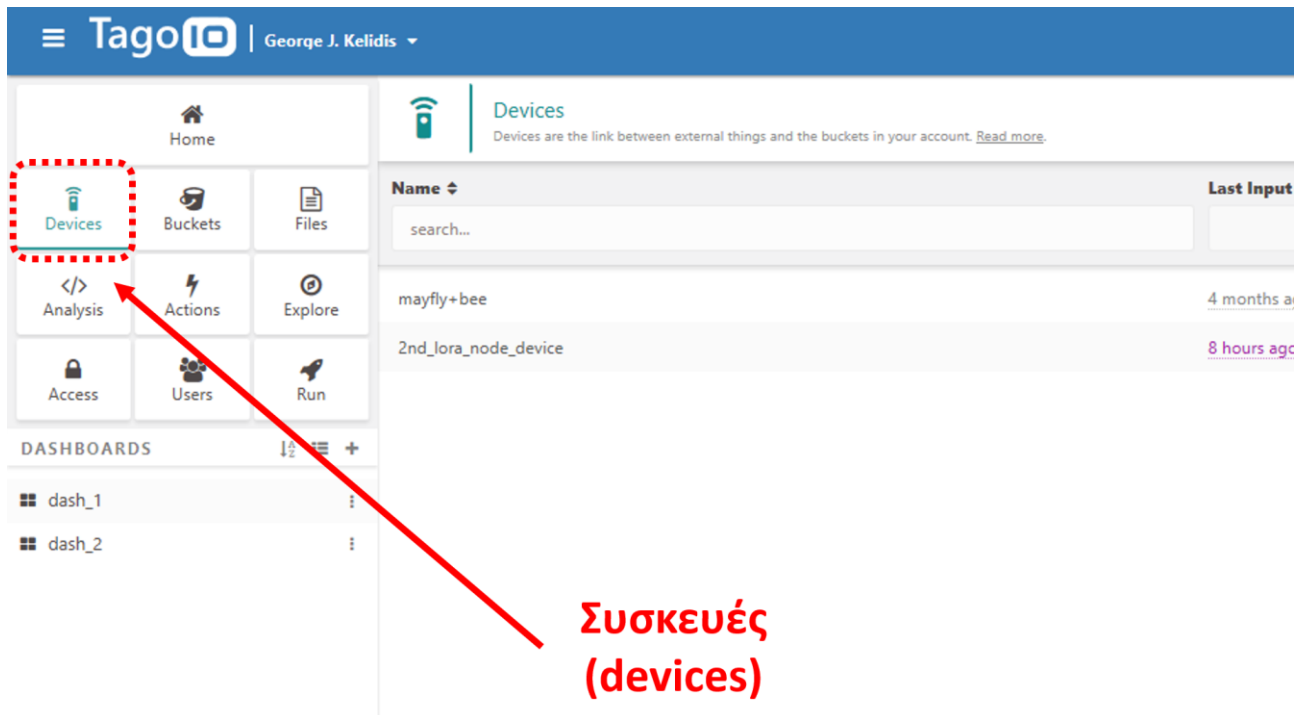
Εικόνα 7.18: Προσθήκη ενσωμάτωσης

Πρέπει τώρα να συνδέσουμε την εφαρμογή μας με την πλατφόρμα TagoIO. Εισερχόμαστε στην ιστοσελίδα <https://tago.io/> και δημιουργούμε λογαριασμό, ακολουθώντας μία τυπική διαδικασία εγγραφής. Στη συνέχεια, εισερχόμαστε στο λογαριασμό μας και οδηγούμαστε στη διεπαφή διαχείρισης:



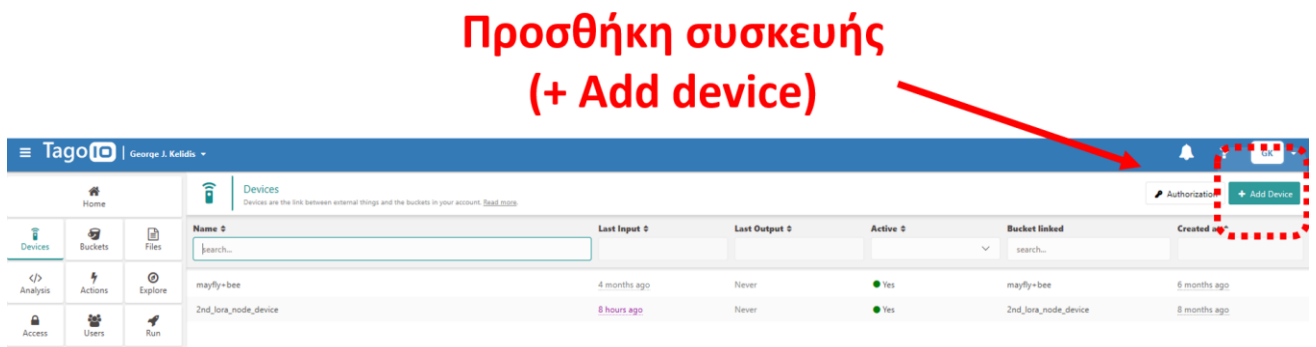
Εικόνα 7.19: Διεπαφή διαχείρισης λογαριασμού TagoIO

Στη διεπαφή διαχείρισης επιλέγουμε *devices*:



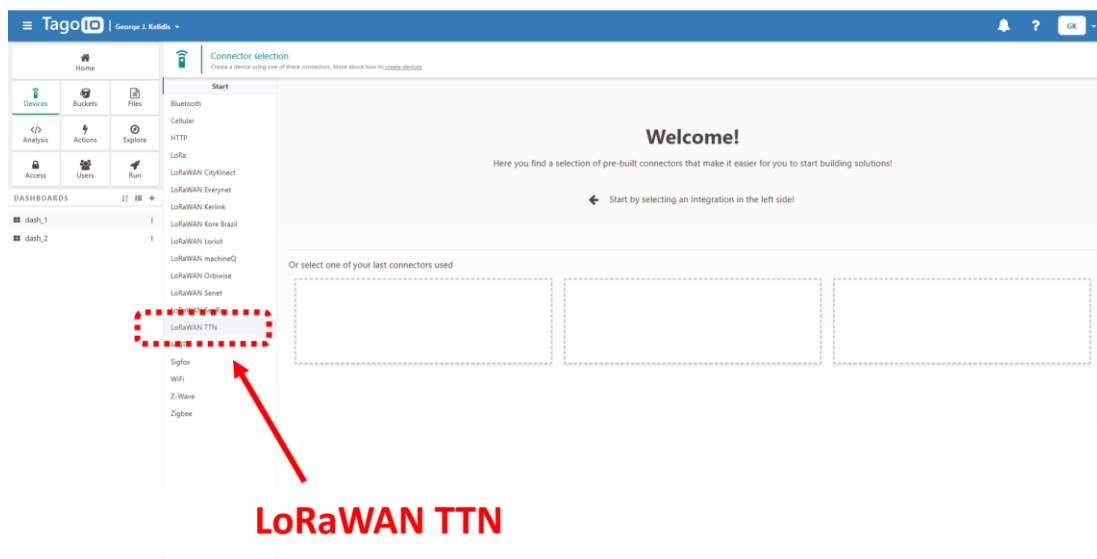
Εικόνα 7.20: Επιλογή συσκευής

Μεταφερόμαστε στην καρτέλα διαχείρισης συσκευών και επιλέγουμε + *Add Device*:



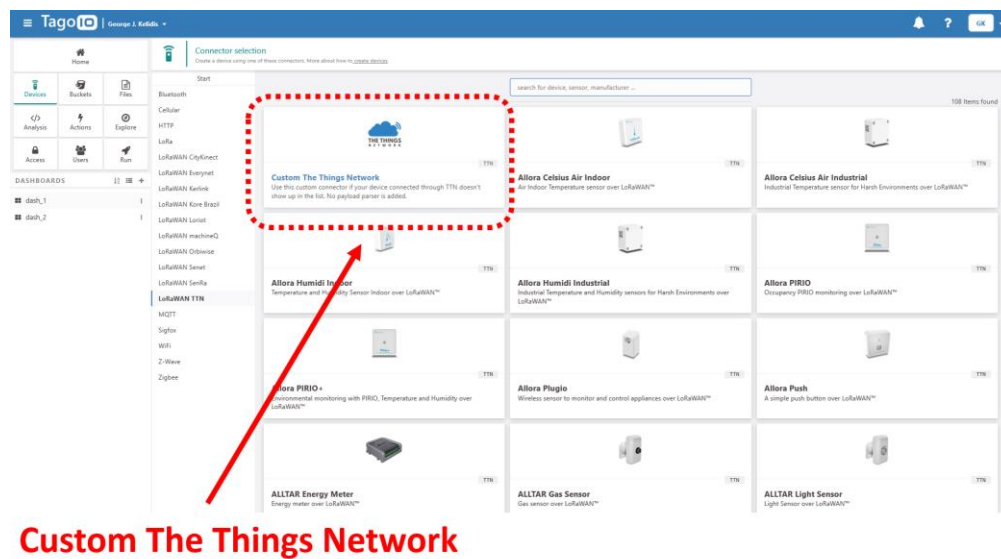
Εικόνα 7.21: Προσθήκη συσκευής

Στην επόμενη σελίδα επιλέγουμε *LoRaWAN TTN*:



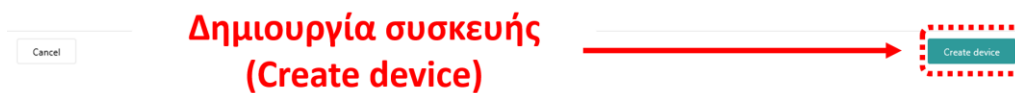
Εικόνα 7.22: Επιλογή LoRaWAN TTN

Έπειτα επιλέγουμε *Custom The Things Network*:



Εικόνα 7.23: Επιλογή Custom The Things Network

Στο αναδυόμενο παράθυρο *Complete your configuration* καταχωρούμε επιθυμητό Device name, το Device EU1 της συσκευής (εδάφιο 7.2.1.3) και επιλέγουμε *Create device*:



Εικόνα 7.24: Συμπλήρωση στοιχείων συσκευής

Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας συσκευής, αναδύεται το παρακάτω ενημερωτικό παράθυρο, που σηματοδοτεί την επιτυχημένη σύνδεση της εφαρμογής μας με το TagoIO:

Creating your device



Hold tight while we are creating your device!

- ✓ Creating device
- ✓ Creating and linking a bucket

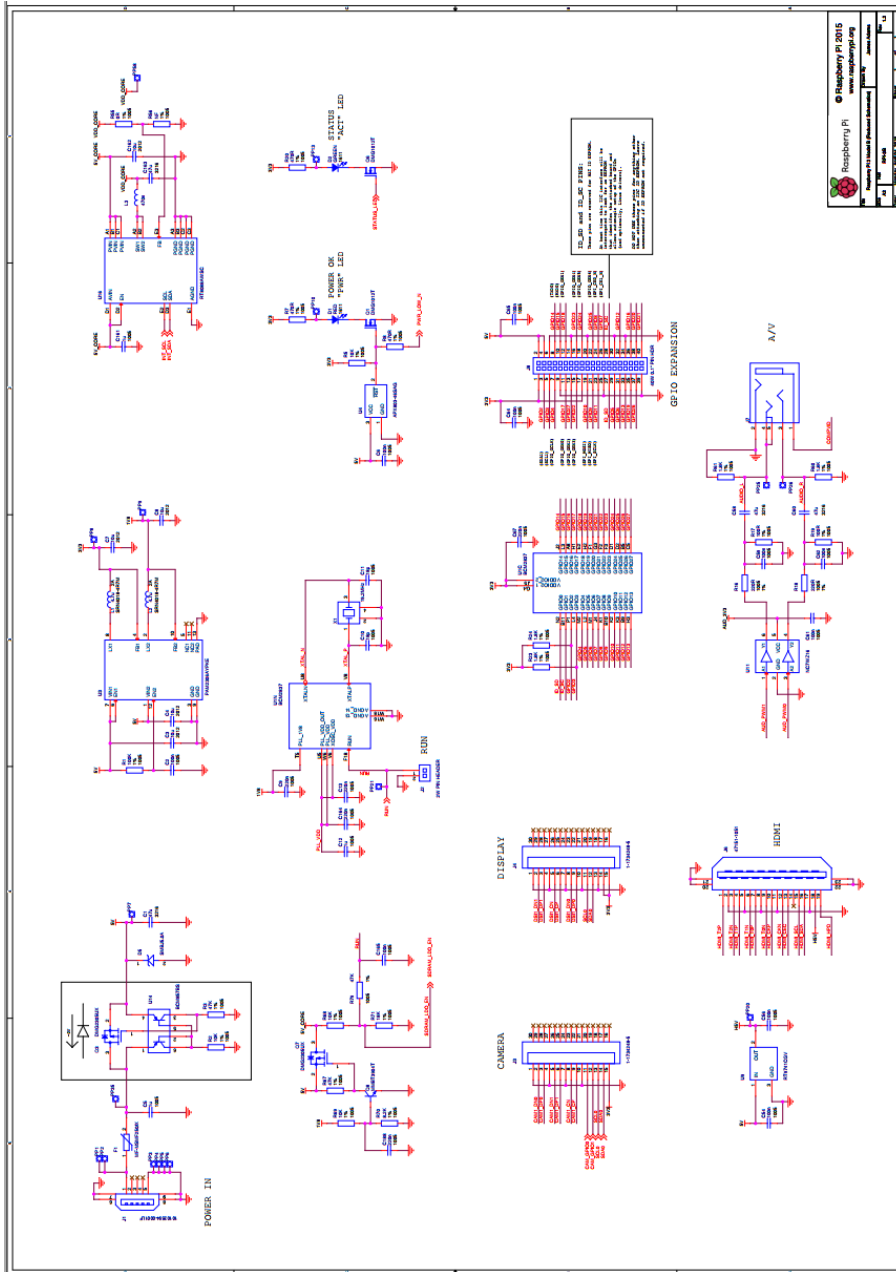
✓ Success! Click here to close

Εικόνα 7.25: Ολοκλήρωση δημιουργίας συσκευής

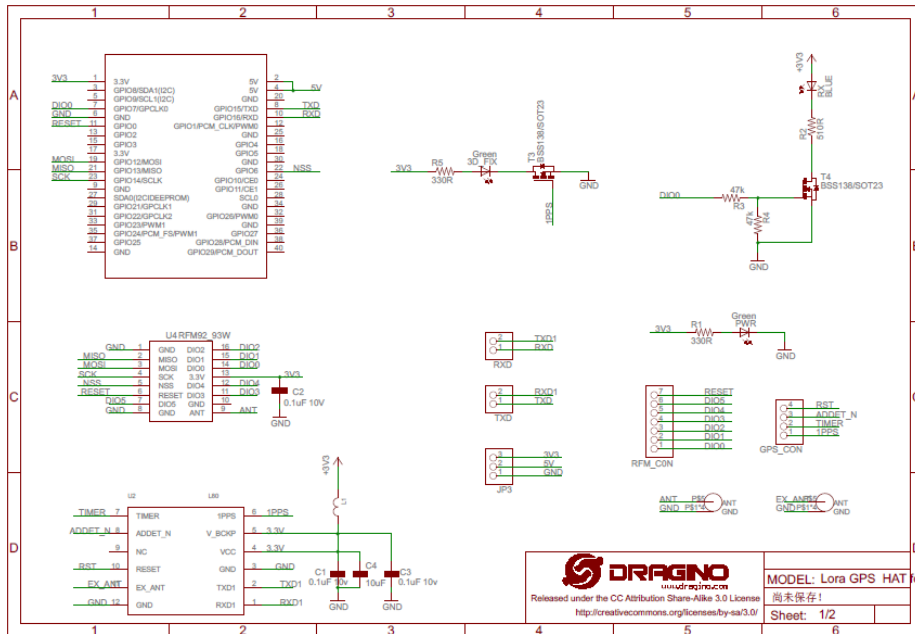
7.4 Στήσιμο κόμβου LoRa

7.4.1 Συνδεσμολογία

Ο κόμβος LoRa υλοποιείται από ένα Raspberry Pi 3 Model B (στο εξής RPi3) συνδεδεμένο με ένα Dragino LoRa/GPS HAT v1.4 (στο εξής LoRaHAT). Στη συνέχεια παρατίθενται τα ηλεκτρονικά διαγράμματα των δύο βαθμίδων.

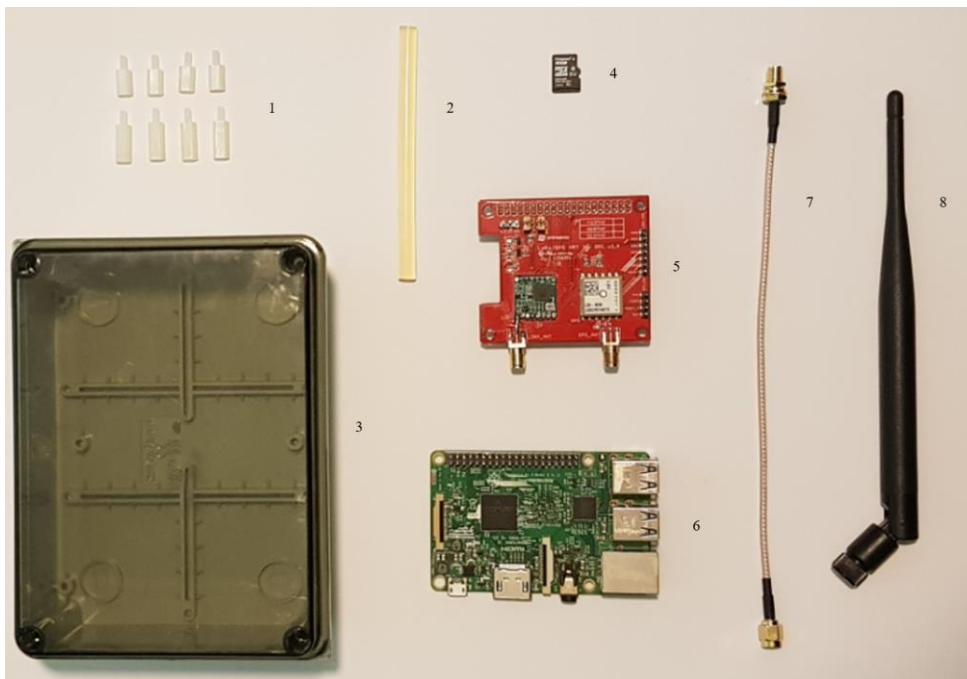


Διάγραμμα 7.2: Ηλεκτρονικό διάγραμμα Raspberry Pi Model B [64]



Διάγραμμα 7.3: Ηλεκτρονικό διάγραμμα Dragino LoRa/GPS HAT v1.4 [65]

Ο συνολικός εξοπλισμός και τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 7.26: Εξοπλισμός – υλικά κόμβου LoRa

Υπόμνημα:

- 1: Αποστάτες πλαστικοί, 2: Θερμοκόλλα, 3: Κυτίο, 4: microSD 8 GB, 5: Dragino LoRa/GPS HAT v1.4,
- 6: Raspberry Pi 3 Model B, 7: Καλώδιο SMA; 8: Κεραία 3dBi SMA

Το LoRaHAT αποτελεί βαθμίδα επέκτασης του RPi3, διαθέτει συνεπώς ίδια διάταξη pins. Προσαρμόζεται απλά επί του RPi3, υλοποιώντας τις παρακάτω αντιστοιχίσεις εισόδων/εξόδων μεταξύ των δύο βαθμίδων:

LoRaHAT	Raspberry Pi 3
3.3V	3V3 power
5V	5V
GND	Ground
DI00	GPIO7 (CE1)
RX	GPIO15 (RXD)
TX	GPIO16
RESET	GPIO0 (ID_SD)
NSS	GPIO6
MISO	GPIO13 (PWM1)
MODI	GPIO12 (PWM0)
SCK	GPIO14 (TXD)

Πίνακας 7.3: Αντιστοίχιση pins [65]

Οι βαθμίδες συνδέονται με αποστάτες και στη συνέχεια τοποθετούνται στο κυτίο με θερμοκόλληση. Ανοίγονται οπές σε 2 σημεία για την τροφοδοσία και για την έξοδο του SMA καλωδίου και γίνονται οι συνδέσεις των καλωδίων. Η τελική συναρμογή φαίνεται στις παρακάτω εικόνες:



Εικόνα 7.27: Τελική συναρμογή 1/2



Εικόνα 7.28: Τελική συναρμογή 2/2

7.4.2 Προγραμματισμός

Μεταβαίνουμε στην ιστοσελίδα <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/> και κατεβάζουμε το λειτουργικό σύστημα **Raspbian Buster Lite** (σε αρχείο ISO) το οποίο αποτελεί την πιο ελαφριά (434MB και δε διαθέτει desktop διεπαφή) και πιο πρόσφατη (Φεβ '20) έκδοση του Raspbian. Οι λεπτομέρειες της εγγραφής και εγκατάστασης του λειτουργικού, καθώς και οι διαδικαστικές παραμετροποιήσεις (αλλαγή στο όνομα χρήστη, κωδικοί σύνδεσης WiFi κ.ά.), εκτιμάται ότι εκφεύγουν από το πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επομένως δεν παρατίθενται. Καταγράφονται μόνον ρυθμίσεις αναγκαίες για τη λειτουργία της διαμόρφωσης LoRa και του πρωτοκόλλου LoRaWAN.

Στο τερματικό του RPi3 δίνουμε την παρακάτω εντολή, ώστε να προβεί σε επικαιροποίηση όλων των πακέτων του συστήματος:

```
pi@LoRa-node:~ $ sudo apt-get update
```

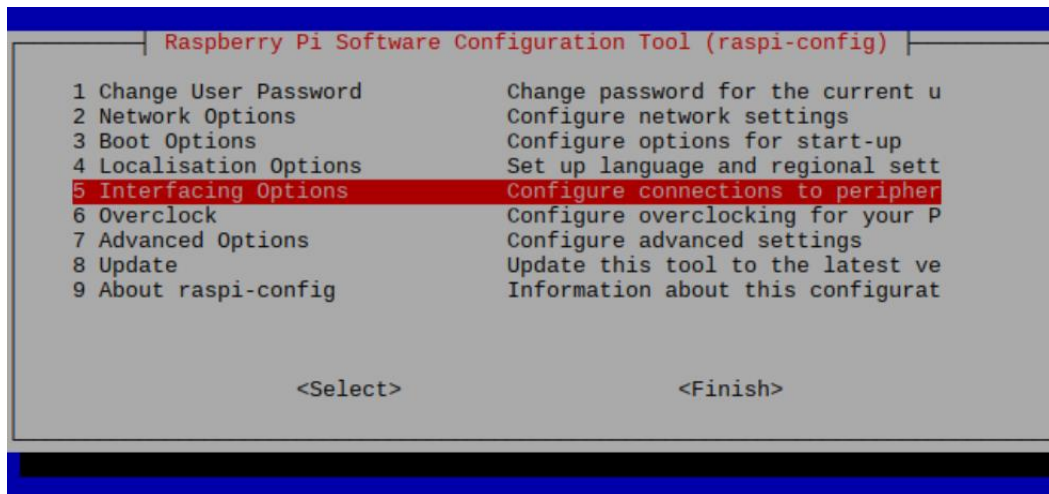
Για τον έλεγχο των θυρών γενικής χρήσης (GPIO), εγκαθιστούμε την αντίστοιχη βιβλιοθήκη:

```
pi@LoRa-node:~ $ sudo apt-get install wiringpi
```

Η επικοινωνία του LoRaHAT με το RPi3 γίνεται μέσω διεπαφής SPI, επομένως ενεργοποιούμε στο RPi αυτή τη δυνατότητα:

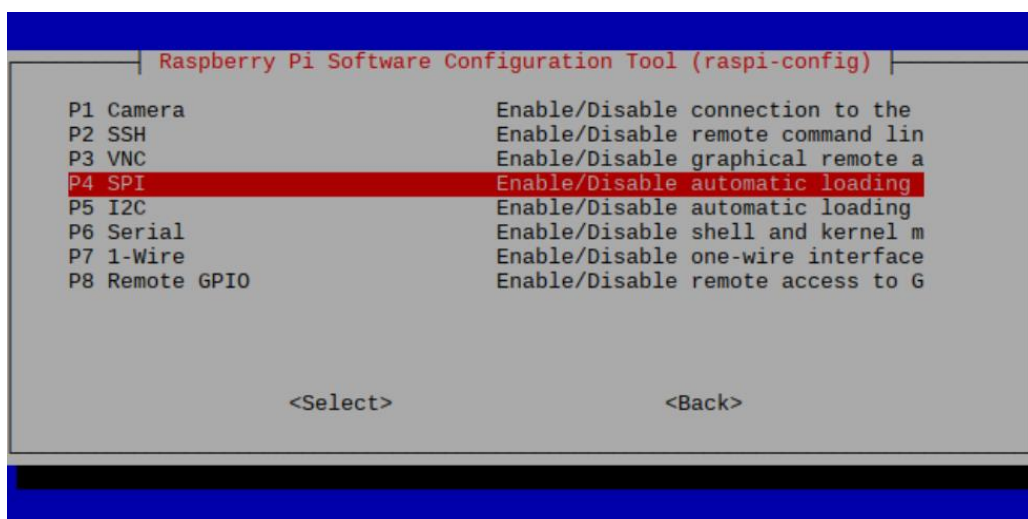
```
pi@LoRa-node:~ $ sudo raspi-config
```

Με την εντολή αυτή μεταβαίνουμε στο εργαλείο παραμετροποίησης λογισμικού (Raspberry Pi Software Configuration Tool) και επιλέγουμε **Interfacing Options**:



Εικόνα 7.29: Εργαλείο παραμετροποίησης λογισμικού Rpi3

Στη συνέχεια επιλέγουμε **SPI** και στη συνέχεια απαντούμε θετικά στα επιβεβαιωτικά παράθυρα που ακολουθούν:



Εικόνα 7.30: Επιλογή ενεργοποίησης SPI

Όπως έχουμε αναφέρει, το πρωτόκολλο LoRaWAN είναι ανοικτό και ελεύθερο, επομένως ελεύθερα βρίσκονται και οι ανάλογες βιβλιοθήκες, για το στήσιμο των συσκευών και την αποστολή δεδομένων. Οι βιβλιοθήκες που διατίθενται και χρησιμοποιούνται ευρέως είναι οι **Semtech LoRaMac-node library** και **IBM LMIC library** (LMIC: LoraMAC-in-C) [71]. Επιλέξαμε την **IBM LMIC library**, με ένα HAL (Hardware Abstraction Layer) διαμορφωμένο για συνδυασμό RPi και Dragino

LoRa/HAT. Στο τερματικό δίνουμε την παρακάτω εντολή, ώστε να προβεί σε λήψη της βιβλιοθήκης από το αποθετήριο στη διεύθυνση <https://github.com/wklenk/lmic-rpi-lora-gps-hat> [72] και στην αποθήκευσή της τοπικά:

```
pi@LoRa-node:~ $ sudo git clone https://github.com/wklenk/lmic-rpi-lora-gps-hat
```

Η βιβλιοθήκη αυτή περιέχει όλα τα απαραίτητα αρχεία για τη λειτουργία του πρωτοκόλλου LoRaWAN, καθώς και βασικά παραδείγματα προγραμμάτων. Το πρόγραμμα που αναπτύξαμε βασίζεται στο παράδειγμα *periodic*, το οποίο διαβάζει μία τιμή θερμοκρασίας από τον ενσωματωμένο αισθητήρα του RPi3 και τη στέλνει περιοδικά, με χρήση του πρωτοκόλλου LoRaWAN, ως ένα payload των 2 Bytes. Το πρόγραμμα που αναπτύξαμε εκτελεί περιοδική αποστολή πακέτων με payload των 35 Bytes, που περιλαμβάνει 18 τιμές μεταβλητών.

Τα βήματα που λαμβάνουν χώρα στον κόμβο έχουν ως εξής:

1. Λήψη του αρχείου *zeno.csv* από τον Zeno Data Logger.
2. Εξαγωγή, από το αρχείο *zeno.csv*, των πιο πρόσφατων δεδομένων, επεξεργασία για μείωση μεγέθους τους και αποθήκευσή τους στο προσωρινό αρχείο *delta.csv*, μέσω του προγράμματος *pll.py* (/home/pi/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/bin). Το *pll.py* εκτελείται με την εντολή:

```
pi@LoRa-node:~/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/bin $ python pll.1.py
```

Ο περιορισμός του μεγέθους του payload υλοποιείται μέσω μετατροπής των δεδομένων από string σε binary μορφή, αλλά και της αλλαγής της τάξης μεγέθους των τιμών των μεταβλητών και μετατροπής τους σε ακέραιους αριθμούς. **Έτσι, από έναν πίνακα των 216 Bytes καταλήγουμε σε έναν πίνακα των 35 Bytes.**

Η περιοδικότητα εκτέλεσης του *pll.py* καθορίστηκε σε 5min, χρόνος που εκτιμάται ότι καλύπτει τις απαιτήσεις της εφαρμογής, εξασφαλίζοντας το επίκαιρο των προς αποστολή δεδομένων.

3. Εξαγωγή των δεδομένων από το *delta.csv*, περαιτέρω επεξεργασία και ενσωμάτωσή τους σε πίνακα, που αντιστοιχεί σε πλαίσιο LoRa, και περιοδική αποστολή των πλαισίων μέσω του προγράμματος *periodic* (/home/pi/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic). Το *periodic.c* εκτελείται με την εντολή:

```
pi@LoRa-node:~/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/build $ sudo ./periodic.out
```

Η περιοδικότητα εκτέλεσης του *periodic.c* καθορίστηκε σε 1 μήνυμα ανά 10min (παράγραφος 7.2), ενώ επανεκκινεί ανά 12h.

Ο χρονισμός των παραπάνω διεργασιών υλοποιείται μέσω *crontab*, το οποίο κανονίζει την περιοδικότητα του *pll.py* και επανεκκινεί το *periodic.c*, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Συσκευή	Πρόγραμμα	Loop	Επανεκκίνηση/επανεκτέλεση crontab
RPi3	pll.py	Όχι	5 min
	periodic.c	10 min	12 h

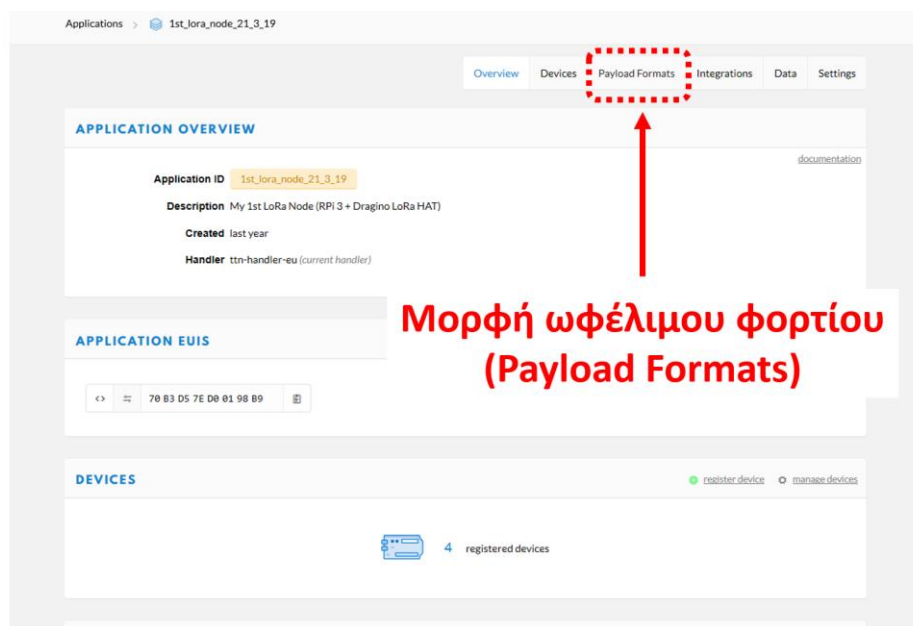
Πίνακας 7.4: Χρονοπρογραμματισμός λογισμικού (crontab)

Τα προγράμματα *pll.py*, *periodic.c* και το *crontab* παρατίθενται στο κεφάλαιο 10.

7.5 Οριστικοποίηση εφαρμογής TTN

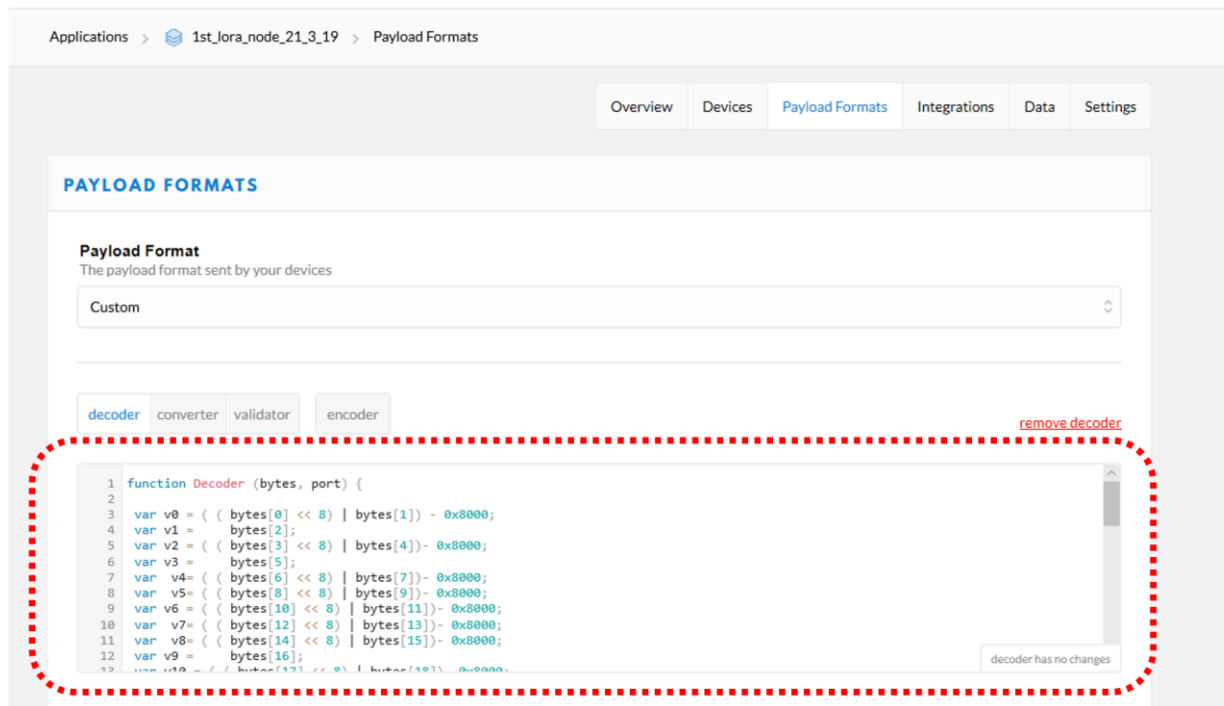
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 7.2, στον κόμβο γίνεται περιορισμός του μεγέθους του payload (ωφέλιμου φορτίου), με σκοπό τη συμμόρφωση με τους περιορισμούς που τίθενται. Στο πλαίσιο της εφαρμογής TTN, γίνεται η αντίστροφη διαδικασία, με σκοπό την ανάκτηση των κανονικών, αρχικών τιμών. Η διαδικασία αυτή βασίζεται στον καθορισμό της επιθυμητής μορφής του payload, μέσω μιας συνάρτησης αποκωδικοποίησης (decoder), η οποία μετατρέπει τα binary δεδομένα σε μορφή JSON, για την εύκολη ανάγνωσή τους.

Στο λογαριασμό TTN που έχουμε δημιουργήσει, εισερχόμαστε στην κονσόλα και στη συνέχεια στο μενού εφαρμογών (εικόνες 7.4 και 7.5) και επιλέγουμε **Payload Formats**:



Εικόνα 7.31: Επιλογή Payload Formats

Έπειτα, στο πλαίσιο **decoder** εισάγουμε κατάλληλη συνάρτηση, η οποία επαναφέρει τα δεδομένα που ελήφθησαν στην αρχική τους μορφή.



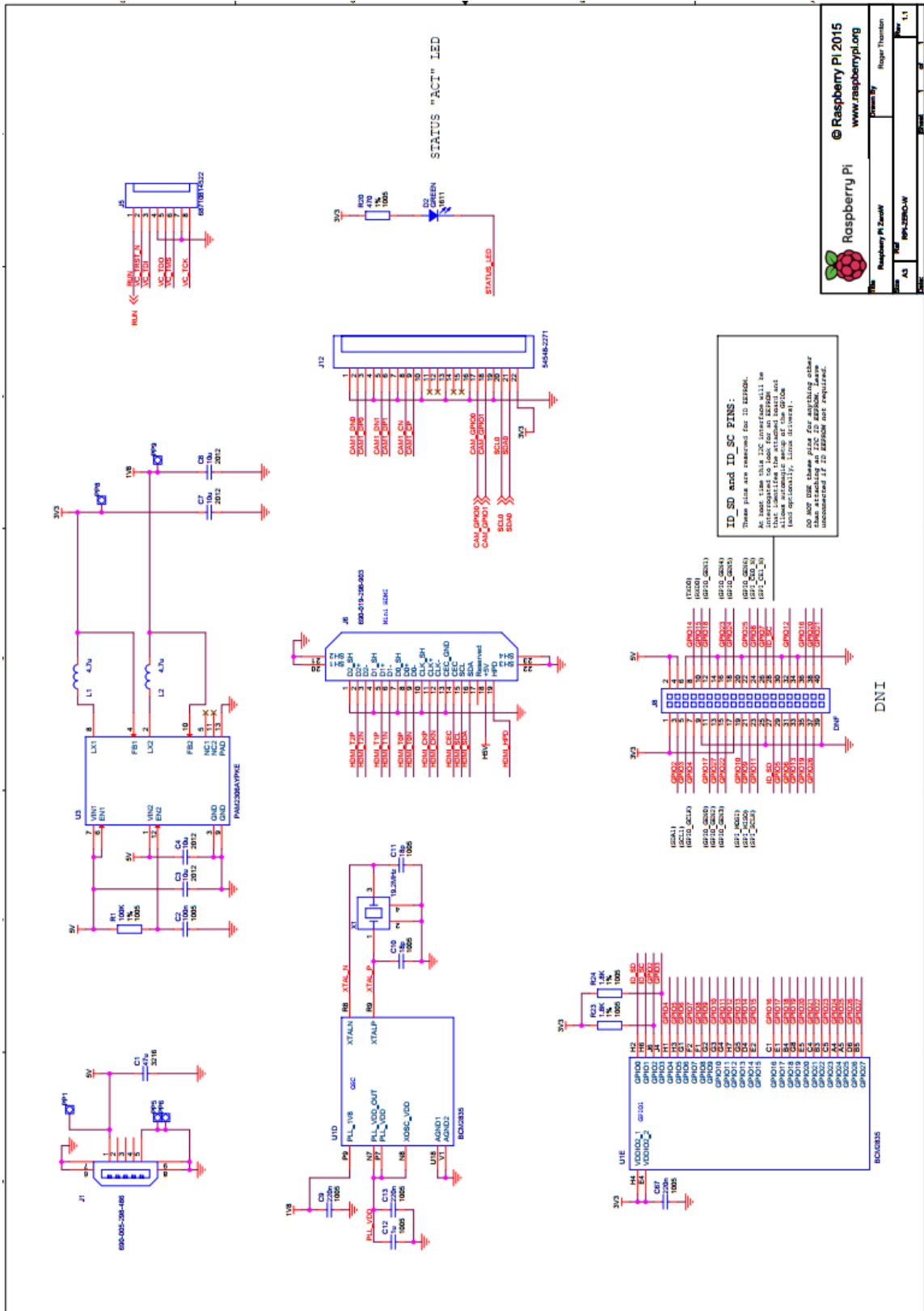
Εικόνα 7.32: Πλαίσιο συνάρτησης αποκωδικοποίησης (decoder)

Η συνάρτηση αποκωδικοποίησης **decoder** παρατίθεται στο κεφάλαιο 10.

7.6 Στήσιμο ενδιάμεσου host

7.6.1 Συνδεσμολογία

Ο ενδιάμεσος host υλοποιείται από ένα Raspberry Pi Zero W (στο εξής RPi0). Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιηθεί host διαφορετικού λειτουργικού, με πρόσβαση στο διαδίκτυο.



Διάγραμμα 7.4: Ηλεκτρονικό διάγραμμα Raspberry Pi Zero W [64]



Εικόνα 7.33: Εξοπλισμός – υλικά ενδιάμεσου host:

Υπόμνημα:

1: Raspberry Pi Zero W, 2: Κάρτα microSD 8GB, 3: Κυτίο, 4: Καλώδιο τροφοδοσίας USB



Εικόνα 7.34: Τελική συνδεσμολογία ενδιάμεσου host

7.6.2 Προγραμματισμός

Εγκαθιστούμε το λειτουργικό σύστημα *Raspbian Buster Lite* και προχωρούμε στις αναγκαίες παραμετροποιήσεις, με διαδικασία ταυτόσημη με αυτή του κόμβου LoRa (παράγραφος 7.4). Έπειτα ανοίγουμε ένα τερματικό.

Οι εντολές για την εγκατάσταση MQTT mosquito broker / client αναφέρθηκαν στην υποπαράγραφο 7.3.2, ωστόσο επαναλαμβάνονται για λόγους ευκολίας:

```
pi@mqtt:~ $ sudo apt-get install mosquito
pi@mqtt:~ $ sudo apt-get install mosquitto-clients
```

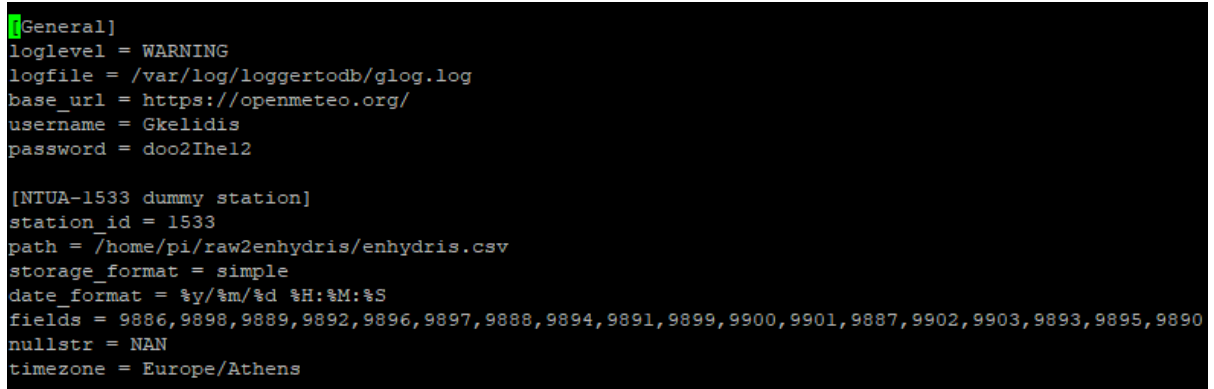
Στη συνέχεια εγκαθιστούμε την εφαρμογή loggertodb [73], που διαβάζει αρχεία δεδομένων και προωθεί στην πλατφόρμα Enhydris τα πιο επικαιροποιημένα εξ αυτών:

```
pi@mqtt:~ $ pip3 install loggertodb
```

Η λειτουργία της loggertodb απαιτεί τη σύνταξη και αποθήκευση αρχείου παραμετροποιήσεων (configuration file), το οποίο δημιουργούμε με την εντολή:

```
pi@mqtt:~ $ sudo nano /var/tmp/loggertodb.conf
```

Στο αρχείο αυτό εισάγουμε τα παρακάτω στοιχεία:



```
[General]
loglevel = WARNING
logfile = /var/log/loggertodb/glog.log
base_url = https://openmeteo.org/
username = Gkelidis
password = doo2Ihe12

[NTUA-1533 dummy station]
station_id = 1533
path = /home/pi/raw2enhydris/enhydris.csv
storage_format = simple
date_format = %y/%m/%d %H:%M:%S
fields = 9886,9898,9889,9892,9896,9897,9888,9894,9891,9899,9900,9901,9887,9902,9903,9893,9895,9890
nullstr = NAN
timezone = Europe/Athens
```

Εικόνα 7.35: Αρχείο loggertodb.conf

Τα πεδία *username*, *password*, *station_id*, *fields*, και *timezone* αντιστοιχούν στα στοιχεία του πιλοτικού μετεωρολογικού σταθμού (*LoraMeteoStation 1533*) της πλατφόρμας Enhydris.

Έχοντας εγκαταστήσει το απαραίτητο λογισμικό, προχωρούμε στην παρουσίαση των βημάτων που λαμβάνουν χώρα στον ενδιάμεσο host:

1. Μέσω του MQTT broker εξάγουμε τα δεδομένα από την εφαρμογή TTN *Ist_lora_node_21_3_19* και τα αποθηκεύουμε τοπικά στο αρχείο *raw.csv*, εκτελώντας την εντολή *mosquitto_sub*:

```
pi@mqtt:~ $ mosquitto_sub -h eu.thethings.network -t '+/devices/+/up' -u '1st_lora_node_21_3_19' -P 'ttn-account-v2.rzuih66KLRqXefBK4wUY6t7szrrEWWCWw7_PqhvROQ' -v > /home/pi/raw2enhydris/raw.csv
```

όπου: -h: hostname/Region (eu.thethings.network)

-t: message-topic (+/devices/+/up)

-u: username/AppID (1st_lora_node_21_3_19)

-P: password/AppKey (ttn-account-v2.rz.....WWCWw7_PqhvROQ)

Η *mosquitto_sub* εκτελεί τα παραπάνω κάθε φορά που νέα μηνύματα φτάνουν στην εφαρμογή TTN, δηλαδή τρέχει συνεχώς από τη στιγμή που θα δοθεί, ενώ επανεκκινεί ανά 12h.

2. Στο *raw.csv* αποθηκεύονται πλεονάζοντα δεδομένα για τη λειτουργία της διασύνδεσης, όπως metadata. Με χρήση του προγράμματος *raw2enhydris.py* (/home/pi/raw2enhydris/bin), φιλτράρουμε τα δεδομένα, κρατώντας μόνο τα επιθυμητά και στη σωστή σειρά, τα οποία αποθηκεύουμε στο αρχείο *enhydris.csv*. Το *raw2enhydris.py* εκτελείται με την εντολή:

```
pi@mqtt:~ $ python /home/pi/raw2enhydris/bin/raw2enhydris.py
```

Η περιοδικότητα εκτέλεσης του *raw2enhydris.py* καθορίστηκε σε 10min.

3. Με χρήση της *loggertodb* προωθούμε τα δεδομένα στην πλατφόρμα Enhydris, εκτελώντας την εντολή:

```
pi@mqtt:~ $ loggertodb /var/tmp/loggertodb.conf
```

Η περιοδικότητα εκτέλεσης της *loggertodb* καθορίστηκε σε 10min.

Ο χρονοσμός των παραπάνω διεργασιών υλοποιείται μέσω *crontab*, το οποίο κανονίζει την περιοδικότητα των *raw2enhydris.py* και *loggertodb* και επανεκκινεί την εντολή *mosquitto_sub*, σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:

Συσκευή	Πρόγραμμα/εντολή	Loop	Επανεκκίνηση/επανεκτέλεση crontab
	mosquitto_sub	Συνεχής	12 h
RPi0	raw2enhydris.py	Όχι	10 min
	loggertodb	Όχι	10 min

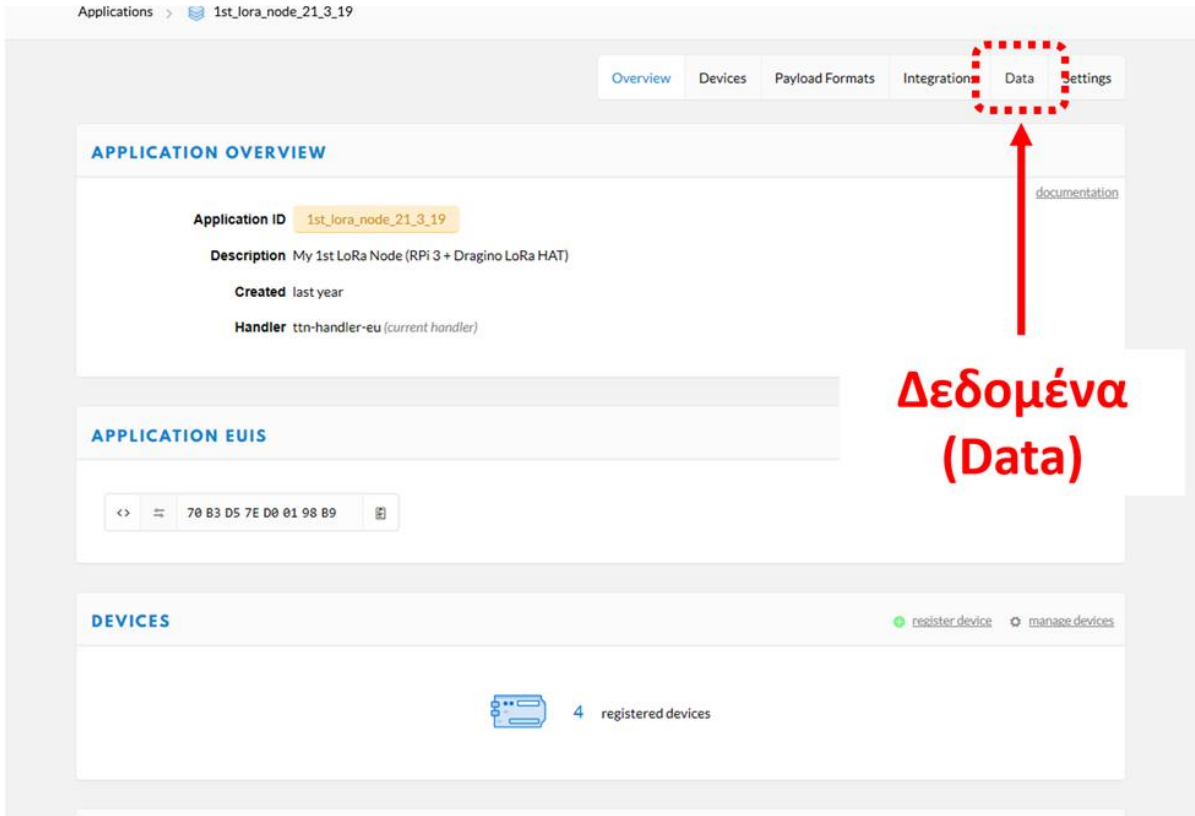
Πίνακας 7.5: Χρονοπρογραμματισμός λογισμικού (crontab)

Τα *loggertodb.conf*, *raw2enhydris.py* και το αντίστοιχο *crontab* παρατίθενται στο κεφάλαιο 10.

7.7 Παρουσίαση και διαχείριση δεδομένων

7.7.1 The Things Network

Στο λογαριασμό TTN που έχουμε δημιουργήσει, εισερχόμαστε στην κονσόλα και στη συνέχεια στο μενού εφαρμογών (εικόνες 7.4 και 7.5) και εισερχόμαστε στην εφαρμογή μας (application ID: *1st_lora_node_21_3_19*). Έπειτα επιλέγουμε **Data**.



Εικόνα 7.36: Είσοδος στην καρτέλα **Data**

Εφόσον έχει γίνει αποστολή πακέτων στη ζεύξη node – gateway, αυτά αποκωδικοποιούνται και παρουσιάζονται ως εγγραφές στην καρτέλα **Data**. Εμφανίζονται διαχειριστικές λεπτομέρειες και μεταδεδομένα (metadata), ενώ το ωφέλιμο φορτίο αποκωδικοποιείται περαιτέρω από τη συνάρτηση αποκωδικοποίησης (**decoder**, παράγραφος 7.5) και παρουσιάζεται ανάλογα.

APPLICATION DATA						pause	🗑 clear
Filters: uplink downlink activation ack error							
time	counter	port	dev id:	payload:			
▲ 14:37:55	0	1	2nd_lora_node_device	80 9E 43 80 97 43 86 86 86 72 80 00 81 20 A6 93 8D 80 59 80 CC 7F			
▲ 14:37:42	0	1	2nd_lora_node_device	80 9E 43 80 97 43 86 86 86 72 80 00 81 20 A6 93 8D 80 59 80 CC 7F			
▲ 14:37:28	0	1	2nd_lora_node_device	80 9E 43 80 97 43 86 86 86 72 80 00 81 20 A6 93 8D 80 59 80 CC 7F			
▲ 14:37:05	0	1	2nd_lora_node_device	80 9E 43 80 97 43 86 86 86 72 80 00 81 20 A6 93 8D 80 59 80 CC 7F			
▲ 14:36:33	0	1	2nd_lora_node_device	80 9E 43 80 97 43 86 86 86 72 80 00 81 20 A6 93 8D 80 59 80 CC 7F			
▲ 14:28:17	0	1	2nd_lora_node_device	80 9E 43 80 97 43 86 86 86 72 80 00 81 20 A6 93 8D 80 59 80 CC 7F			

Εικόνα 7.37: Παράδειγμα λίστας εγγραφών

Επιλέγοντας μία εγγραφή, αυτή αναπτύσσεται και παρουσιάζονται όλες οι πληροφορίες αναλυτικά:

The screenshot shows the 'APPLICATION DATA' interface with the record for time 14:28:17 expanded. The expanded view includes:

- Uplink Payload:** 80 9E 43 80 97 43 86 86 86 72 80 00 81 20 A6 93 8D 80 59 80 CC 7F A6 31 80 63 00 00 0B 14 04 15 0B 32 00
- Fields:**

```
{
  "Barometric_pressure_id5461": 987.5,
  "Battery_level_id0": 11,
  "Diffuse_solar_radiation_id238": 1650,
  "Humidity_id233": 67,
  "Humidity_id248": 67,
  "Rainfall_id230": 0,
  "Rainfall_id234": 0,
  "Solar_radiation_id9141": 288,
  "Sunshine_duration_id236": 0,
  "Temperature_id232": 15.8,
  "Temperature_id247": 15.1,
  "Timestamp": "20/4/21 11:50:0",
  "Total_solar_radiation_id237": 1670,
  "Wind_direction_id240": -90,
  "Wind_direction_id6661": 204,
  "Wind_gust_id6541": 9.9,
  "Wind_gust_id9139": 8.9,
  "Wind_speed_id6539": 4.9,
  "Wind_speed_id6659": 14.1
}
```
- Metadata:**

Red annotations on the left side of the image point to the 'Uplink Payload' section, labeled 'Ωφέλιμο φορτίο (Payload)', and the 'Fields' section, labeled 'Πεδία (Fields)'.

Εικόνα 7.38: Παράδειγμα εγγραφής ανεπτυγμένης (1/2)

Μεταδεδομένα (Metadata)

```
Metadata
{
  "time": "2019-07-10T11:53:48.942528684Z",
  "frequency": 868.3,
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF7BW125",
  "coding_rate": "4/5",
  "gateways": [
    {
      "gtw_id": "eui-fcc23dffffe0de7b2",
      "timestamp": 4105327315,
      "time": "2019-07-10T11:53:48.911937Z",
      "channel": 1,
      "rssi": -116,
      "snr": 0.5,
      "rf_chain": 1,
      "latitude": 37.978287,
      "longitude": 23.782259,
      "altitude": 50,
      "location_source": "registry"
    }
  ]
}
```

Estimated Airtime
30.976 ms


Εικόνα 7.39: Παράδειγμα εγγραφής ανεπτυγμένης (2/2)

Κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η καρτέλα **Data** της εφαρμογής TTN παρουσιάζει τρέχουσες εγγραφές ενεργών συνεδριών, δηλαδή με την αποσύνδεσή μας από το λογαριασμό μας ή με το κλείσιμο του browser, οι εγγραφές χάνονται. Κατά συνέπεια η καρτέλα **Data** της εφαρμογής TTN δεν είναι κατάλληλη για μακροπρόθεσμη αποθήκευση και παρουσίαση δεδομένων, παρά μόνο για εκτέλεση δοκιμών. Ωστόσο προτείνονται εφαρμογές από το ίδιο το TTN (integrations), που υλοποιούν την αποθήκευση, τη διαχείριση και την παρουσίαση των δεδομένων.

7.7.2 Enhydris

Μπαίνουμε στην ιστοσελίδα <https://openmeteo.org/>, βρίσκουμε στο χάρτη το σταθμό **LoraMeteoStation** και τον επιλέγουμε:

Stations Dashboard



[List stations visible on map](#)

Name	Owner	Last update
Accommodation Halls of UOI	Laboratory of Knowledge and Intelligent Computing (KIC)	il y a une heure
Agia Paraskevi	Laboratory of Knowledge and Intelligent Computing (KIC)	il y a 4 heures
Agios Spiridonas	University of Ioannina, Department of Agriculture	il y a 1 mois, 2 semaines
Aktion	University of Ioannina, Department of Agriculture	il y a 33 minutes
Alagonia (Neromilos Rentfil) - [ΑΛΑΓΟΝΙΑ (ΝΕΡΟΜΥΛΟΣ ΡΕΝΤΙΦΗ)]	Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών	il y a 3 jours, 22 heures
Alagonia - Rentfilis watermill [Αλαγονία - Νιρόμυλος Ρεντιφη]	Deukalion	il y a 5 ans, 11 mois
Alagonia [Αλαγονία]	Deukalion	il y a 5 ans, 11 mois
Alamania [Αλαμάνο]	Hellenic Centre for Marine Research	il y a 1 mois
Ano Kostilata [Άνω Κωστήλιδα]	TEI of Epirus	il y a 5 ans, 11 mois
Anthli [Ανθίλη]	Hellenic Centre for Marine Research	il y a 2 heures
Arlara [Αρλαρά]	Deukalion	il y a 5 ans, 11 mois
Arta's Bridge	Laboratory of Knowledge and Intelligent Computing (KIC)	il y a 6 jours, 1 heure
Arta/Vlachema [Άρτα/Βλαχέρνα]	Decentralised Administration of Epirus and Western Macedonia	il y a 4 ans, 4 mois

Εικόνα 7.40: Αρχική σελίδα openmeteo.org

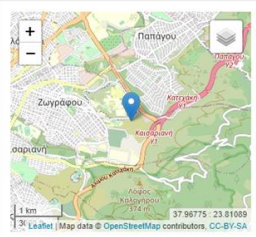
Στη συνέχεια μεταφερόμαστε στη σελίδα του *LoraMeteoStation* [70] όπου μπορούμε να δούμε γενικές πληροφορίες για το σταθμό και τη λίστα των οργάνων/χρονοσειρών:

openmeteo.org/stations/1533/

stations

LoraMeteoStation

[conventional]



φ, λ = 37,97370, 23,78733
z = 219,00

Start of operation: 19/10/2019 **Last update:** 21/04/2020 9:40 πμ.

Owner: National Technical University of Athens - Dept. of Water Resources and Env. Engineering

Location: NTUA University Campus, Zografou, Athens, about 4.5 km east of Syntagma square, on the west feet of mount Hymettus
Municipality: Zografou

---ALT---

Τοποθεσία: Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, Αθήνα, περίπου 4.5 km ανατολικά της Πλατείας Συντάγματος, στους δυτικούς πρόποδες του γηπέδου Δήμος Ζωγράφου

[Edit](#)

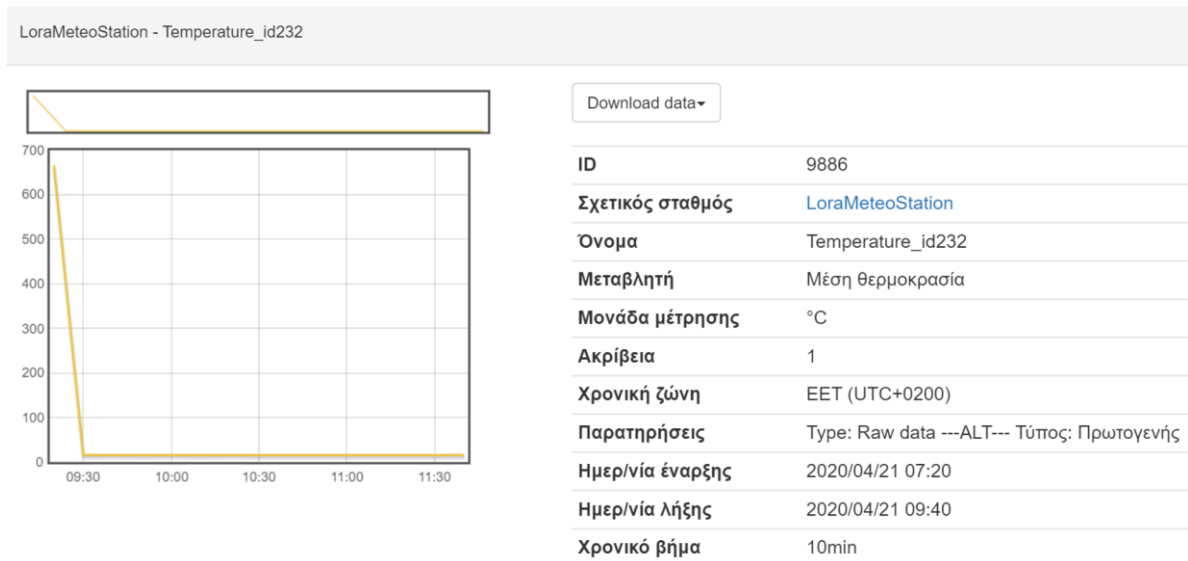
Χρονοσειρές

id	Device	Measurement	Resolution	Last Update
id=9886	"Temperature_id232"	Μέση θερμοκρασία	10min	21/04/2020 — 21/04/2020 9:40 πμ.
id=9887	"Wind_direction_id240"	Διεύθυνση ανέμου	10min	21/04/2020 — 21/04/2020 9:40 πμ.
id=9888	"Sunshine_duration_id236"	Ηλιοφάνεια	10min	21/04/2020 — 21/04/2020 9:40 πμ.
id=9889	"Temperature_id247"	Μέση θερμοκρασία	10min	21/04/2020 — 21/04/2020 9:40 πμ.
id=9890	"Battery_level_id0"	Στάθμη	10min	21/04/2020 — 21/04/2020 9:40 πμ.
id=9891	"Barometric_pressure_id5461"	Ατμοσφαιρική πίεση	10min	21/04/2020 — 21/04/2020 9:40 πμ.

Εικόνα 7.41: Σελίδα LoraMeteoStation

Επιλέγουμε μία χρονοσειρά (*Temperature_id232*) και μεταφερόμαστε στην αντίστοιχη σελίδα, όπου μπορούμε να τη δούμε αποτυπωμένη σε διάγραμμα.

Επιπρόσθετα, βλέπουμε διαχειριστικές πληροφορίες για το όργανο, ενώ μπορούμε να κατεβάσουμε αρχεία καταγραφής:

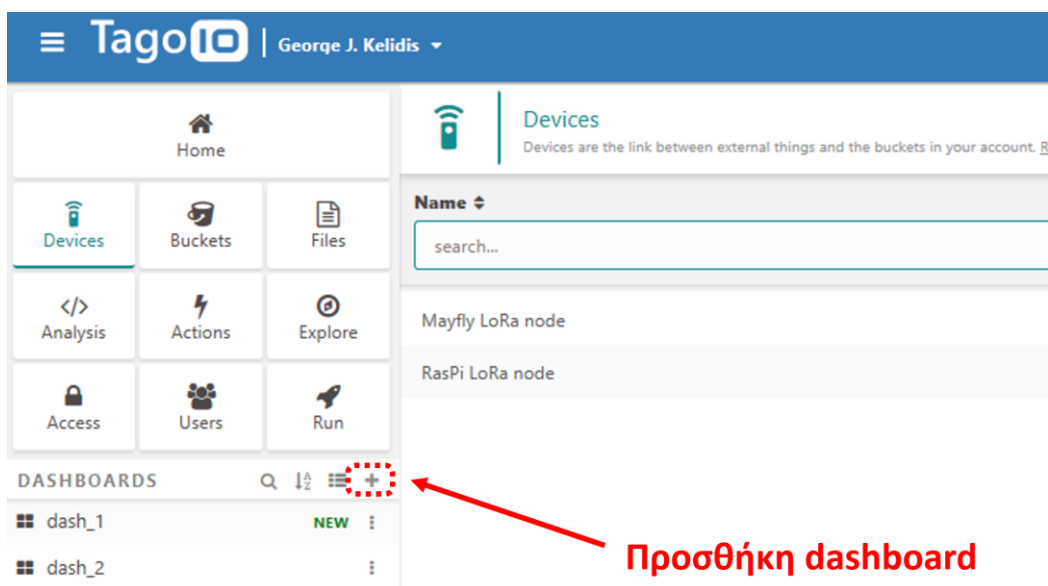


Εικόνα 7.42: Σελίδα χρονοσειράς Temperature_id232

Τα δεδομένα ενημερώνονται κάθε φορά που προωθούνται από τη loggertodb (παράγραφος 7.4) στο Enhydriς νέοι πίνακες με τις τιμές των μεταβλητών του σταθμού.

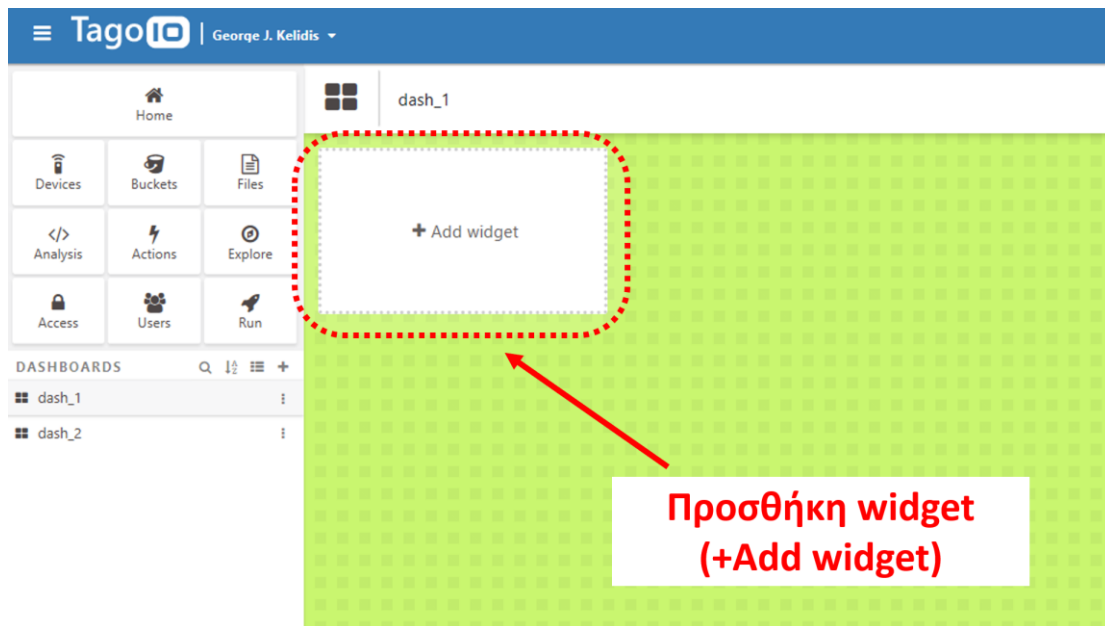
7.7.3 TagoIO

Εισερχόμαστε στο λογαριασμό που δημιουργήσαμε στην πλατφόρμα TagoIO (υποπαράγραφος 7.3.4) και επιλέγουμε **+** (δίπλα από το **DASHBOARDS**):



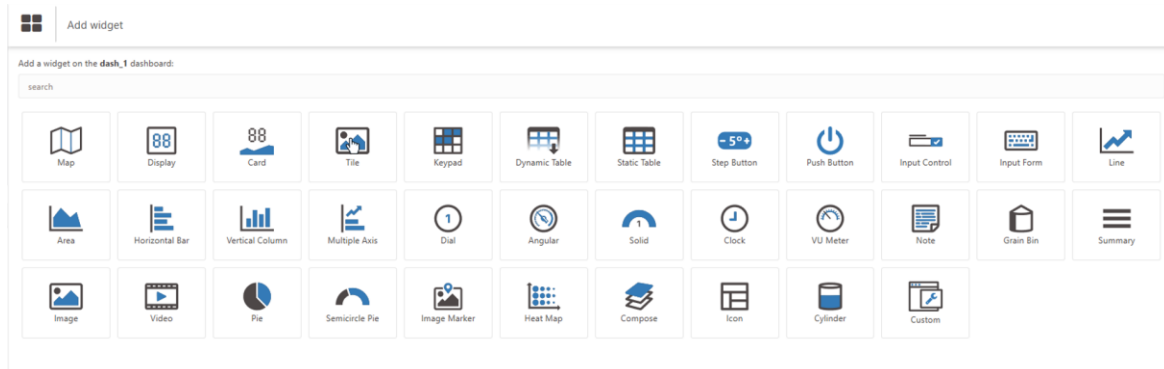
Εικόνα 7.43: Προσθήκη dashboard

Στη συνέχεια δίνουμε ένα όνομα στο *dashboard* (εδώ *dash_1*) και εισερχόμαστε σε αυτό. Δίνεται η δυνατότητα προσθήκης *widget* για την απεικόνιση των μεταβλητών:



Εικόνα 7.44: Προσθήκη widget

Τα *widgets* που διατίθενται είναι πίνακες, γραφήματα, μετρητές κ.ά:



Εικόνα 7.45: Διατιθέμενα widgets

Αφού επιλέξουμε *widget*, γίνεται αντιστοίχιση με μία συσκευή και μία ή περισσότερες μεταβλητές, ενώ διατίθενται πολλές δυνατότητες παραμετροποίησης των *widgets*. Επιλέγουμε τη συσκευή *RasPi LoRa node* και τη μεταβλητή *Temperature_id232*, καθώς και 3 τυχαία widgets. Το *dashboard* διαμορφώνεται όπως παρακάτω:



Εικόνα 7.46: Εικόνα dash_1

Τέλος, δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων και λήψης αρχείων καταγραφής.

7.8 Ενεργειακοί υπολογισμοί

Το Raspberry Pi 3 της παρούσας εγκατάστασης του μετεωρολογικού σταθμού τροφοδοτείται από το δίκτυο ηλεκτροδότησης, μέσω μετασχηματιστή και καλωδίου USB. Δεν τίθεται συνεπώς ανάγκη ενεργειακής αυτονομίας του κόμβου, που θα καθιστούσε απαραίτητη μία μελέτη της κατανάλωσής του. Κρίθηκε ωστόσο σκόπιμο, για λόγους πληρότητας, να γίνει μέτρηση της κατανάλωσης, καθώς και εύρεση τρόπων μείωσής της. Η μέτρηση έγινε με χρήση μετρητή USB (USB detector), η οποία μετράει: τάση (V), χρόνο (h, min), ρεύμα (A) και φορτίο (mAh).



Εικόνα 7.47: Μετρητής USB KEWEISI

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, καθώς και οι παρεμβάσεις που προτείνονται για τη μείωσή της.

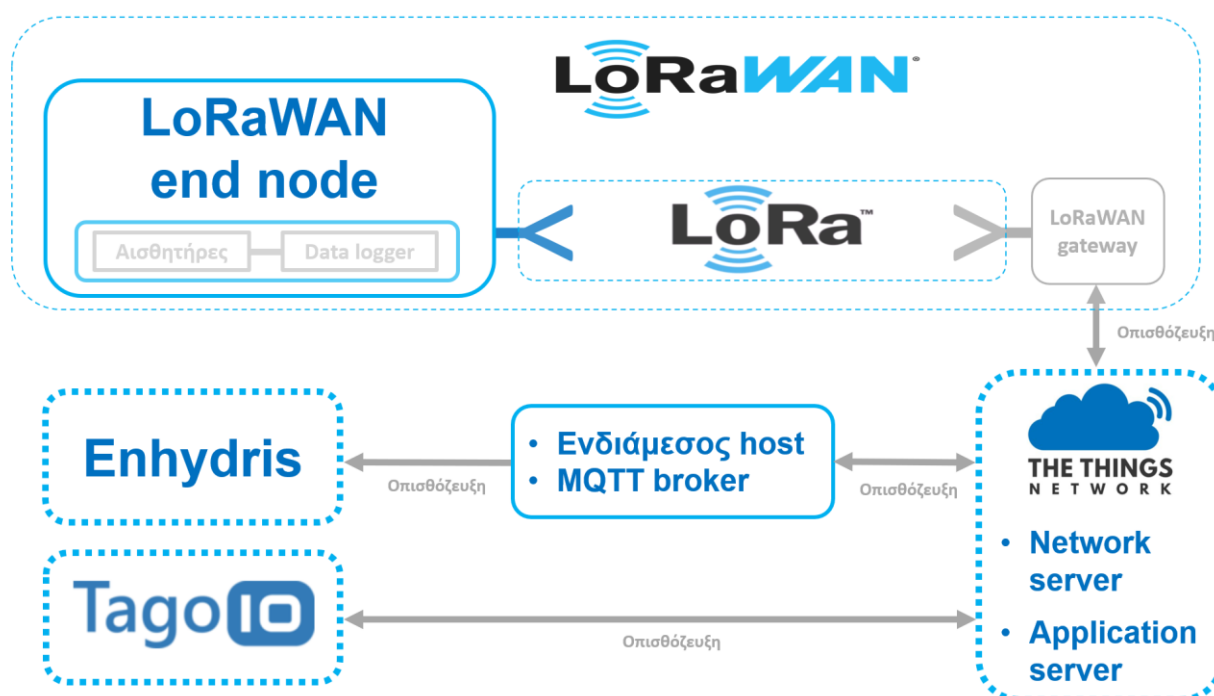
Κατάσταση	Παρέμβαση	Ρεύμα
Αναμονή	Καμία	230 mA
Αναμονή	Απενεργοποιημένα Bluetooth και HDMI	200 mA
Αναμονή	Απενεργοποιημένα Bluetooth, HDMI, USB και ETHERNET	110 mA
pll.py ή periodic.out	Καμία	260 mA
pll.py ή periodic.out	Απενεργοποιημένα Bluetooth και HDMI	230 mA
pll.py ή periodic.out	Απενεργοποιημένα Bluetooth, HDMI, USB και ETHERNET	140 mA
pll.py & periodic.out	Καμία	290 mA
pll.py & periodic.out	Απενεργοποιημένα Bluetooth και HDMI	260 mA
pll.py & periodic.out	Απενεργοποιημένα Bluetooth, HDMI, USB και ETHERNET	170 mA

Πίνακας 7.6: Κατανάλωση ρεύματος

Κεφάλαιο 8: Δοκιμή μικροελεγκτή EnviroDIY Mayfly

8.1 Γενικά

Η δοκιμή του μικροελεγκτή EnviroDIY Mayfly αποτελεί ουσιαστικά μια εναλλακτική προσέγγιση της υλοποίησης του 7^{ου} κεφαλαίου. Στόχος είναι και πάλι η πραγματοποίηση ασύρματης ζεύξης LoRa, για μεταφορά των δεδομένων μεταξύ LoRa node – LoRa gateway, καθώς και η περαιτέρω προώθησή τους στις γνωστές υποστηρικτικές backend υποδομές. Η διαφορά έγκειται στην υλοποίηση της ασύρματης ζεύξης, όπως φαίνεται από το παρακάτω σχήμα, συγκριτικά με το σχήμα 7.1:



Διάγραμμα 8.1: Πλήρες σύστημα διασύνδεσης

Με γαλάζιο χρώμα γραμματοσειράς/πλασιού επισημαίνονται τα υποσυστήματα που αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Συνοπτική περιγραφή:

- Ο κόμβος LoRa (1 μικροελεγκτής Mayfly Data Logger συνδεδεμένος με 1 expansion module LoRa Bee RN2483, κεφάλαιο 6), που στην προκειμένη περίπτωση είναι και data logger, λαμβάνει τιμές από 3 αισθητήρες, ενσωματωμένους σε αυτόν και τις στέλνει, μέσω ζεύξης LoRa, στην πύλη LoRa του Ε.Μ.Π.

- Η πύλη LoRa τα προωθεί μέσω του δικτύου οπισθόζευξης στο TTN (network – application servers, κεφάλαιο 5).
- Λοιπά όπως στην 1^η υλοποίηση.

8.2 Απαιτήσεις και περιορισμοί

Οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί που τίθενται είναι ταυτόσημοι με αυτούς της υλοποίησης του κεφαλαίου 7, όπως αναγράφονται στην παράγραφο 7.2 και συνοψίζονται σε ανάγκη για πακέτα μικρότερα των 51 Bytes και αποστολή τους τουλάχιστον 1 φορά ανά 20 min.

Οι τιμές μεταβλητών που αποστέλλονται αφορούν 3 αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι στον κόμβο, καθώς και στοιχεία για τη μπαταρία, που αντιστοιχούν συνολικά σε 9 Bytes:

Όνομασία	Μεταβλητή
Temperature_dht11	Θερμοκρασία (αισθητήρας DHT11)
Temperature_rtc	Θερμοκρασία (αισθητήρας RTC)
Humidity_dht11	Υγρασία (αισθητήρας DHT11)
Battery_voltage	Τάση μπαταρίας (V)
Battery_level	Στάθμη μπαταρίας (%)

Πίνακας 8.1: Μεταβλητές προς αποστολή

Ωστόσο, για λόγους σύγκρισης με την υλοποίηση του κεφαλαίου 7, γίνεται padding του πακέτου με επιπλέον Bytes, ώστε τελικά να αποστέλλονται 35 Bytes (όπως και στην υλοποίηση του κεφαλαίου 7).

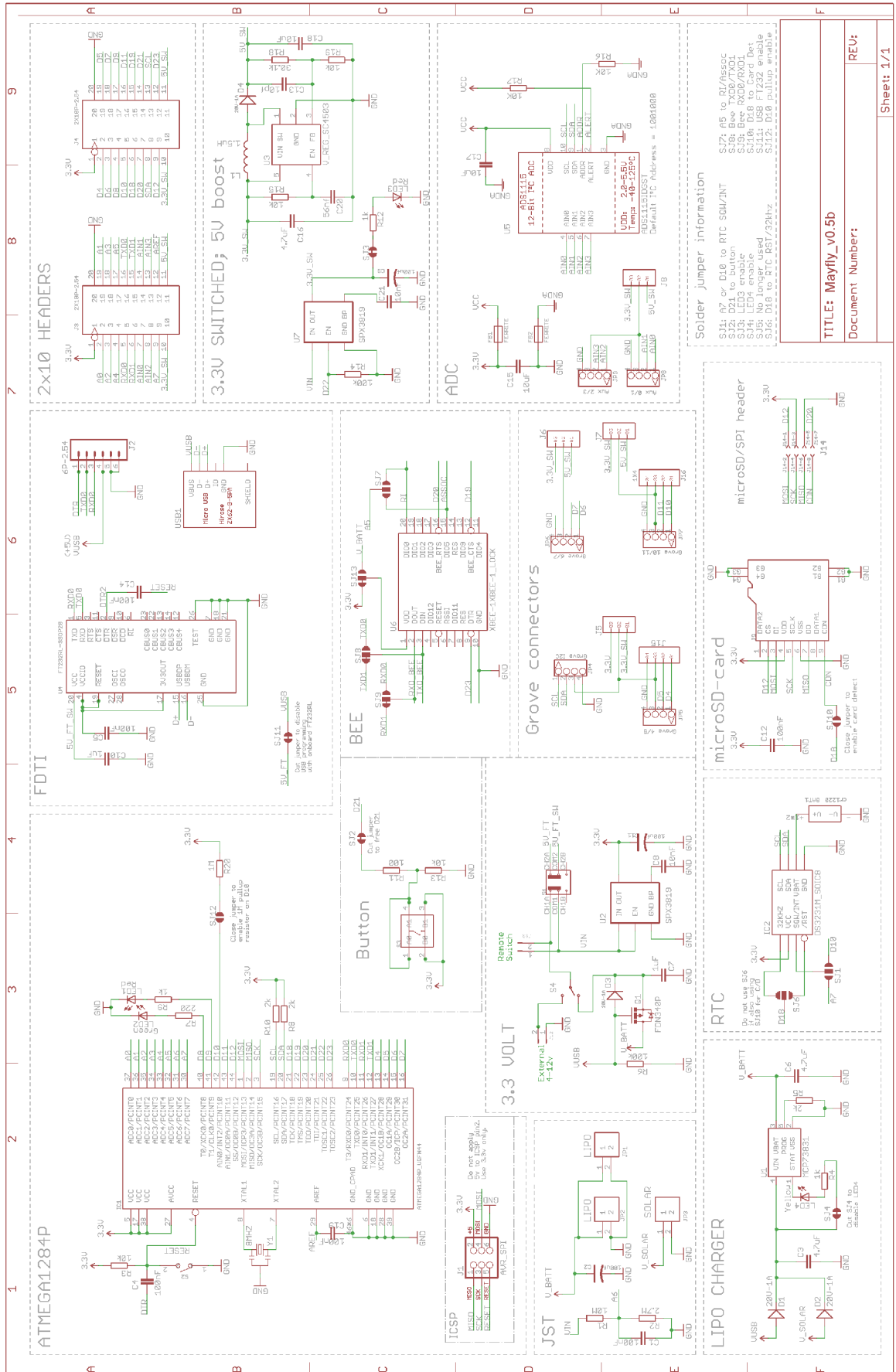
8.3 Αρχικοποίηση υποστηρικτικών συστημάτων και υποδομών

Η αρχικοποίηση των υποστηρικτικών υποδομών και εφαρμογών είναι ταυτόσημες με αυτές του κεφαλαίου 7.

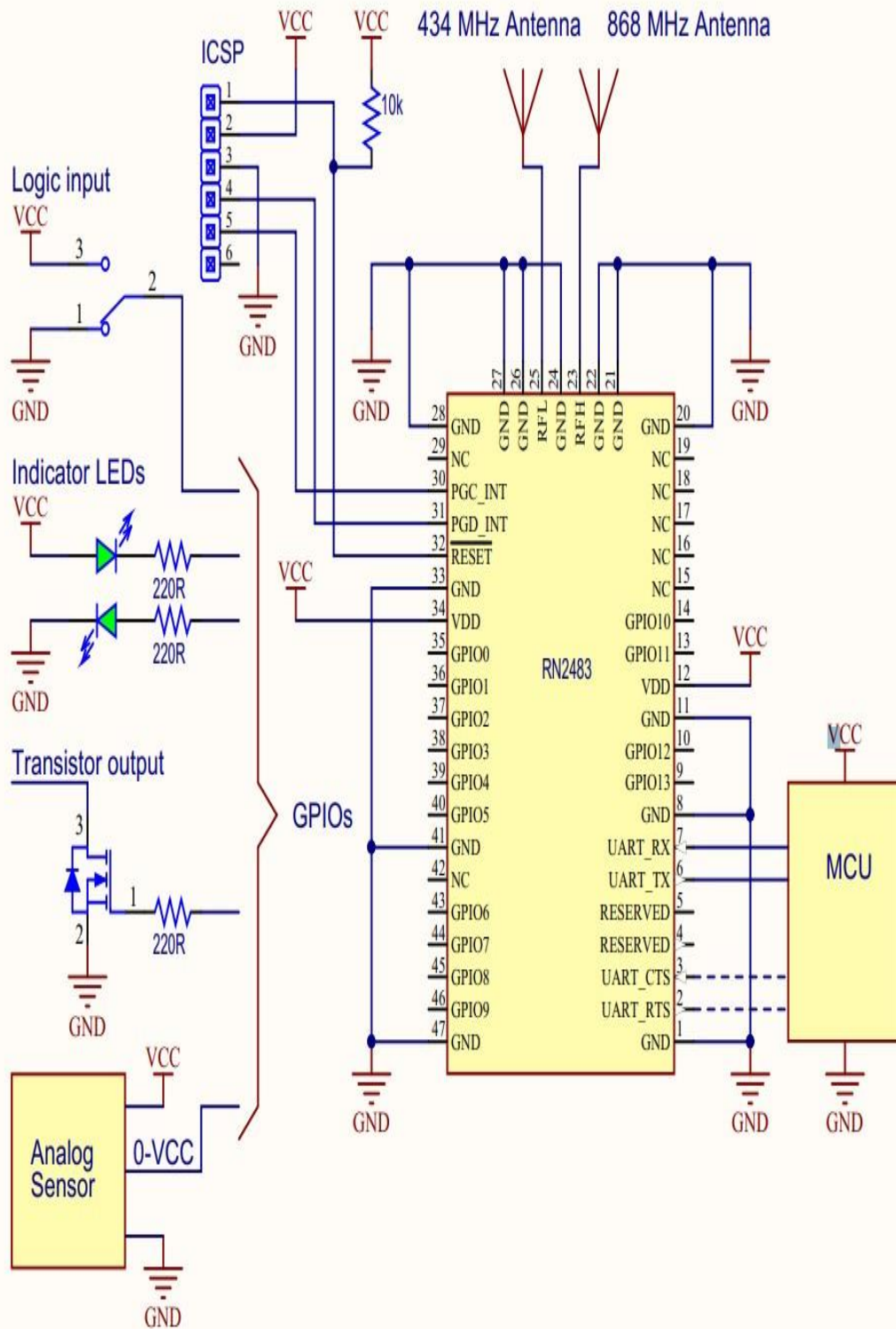
8.4 Στήσιμο κόμβου LoRa

8.4.1 Συνδεσμολογία

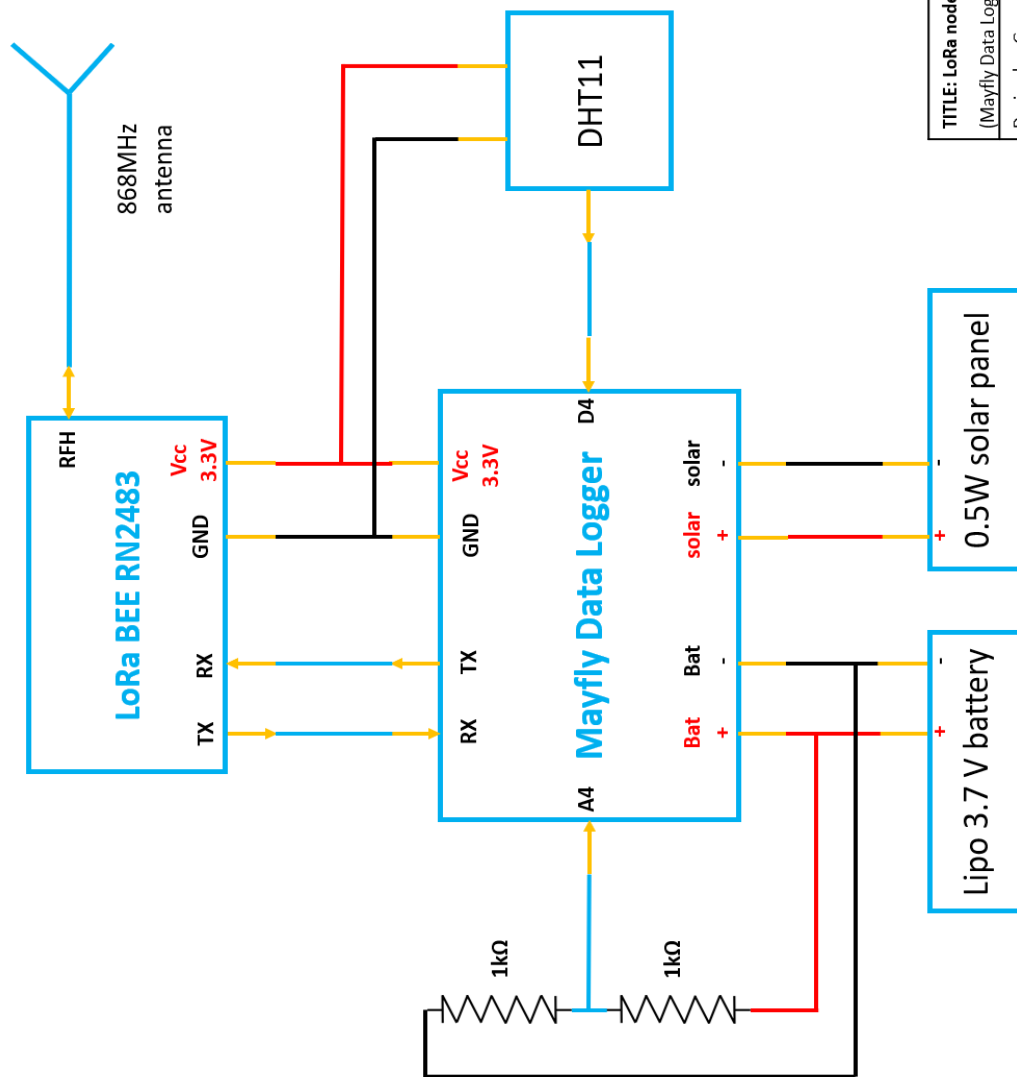
Ο κόμβος LoRa υλοποιείται από έναν μικροελεγκτή Mayfly Data Logger συνδεδεμένο με 1 expansion module LoRa Bee RN2483. Αρχικά παρατίθενται τα ηλεκτρονικά διαγράμματα των βαθμίδων που χρησιμοποιήθηκαν:



Διάγραμμα 8.2: Ηλεκτρονικό διάγραμμα Mayfly Data Logger [66]



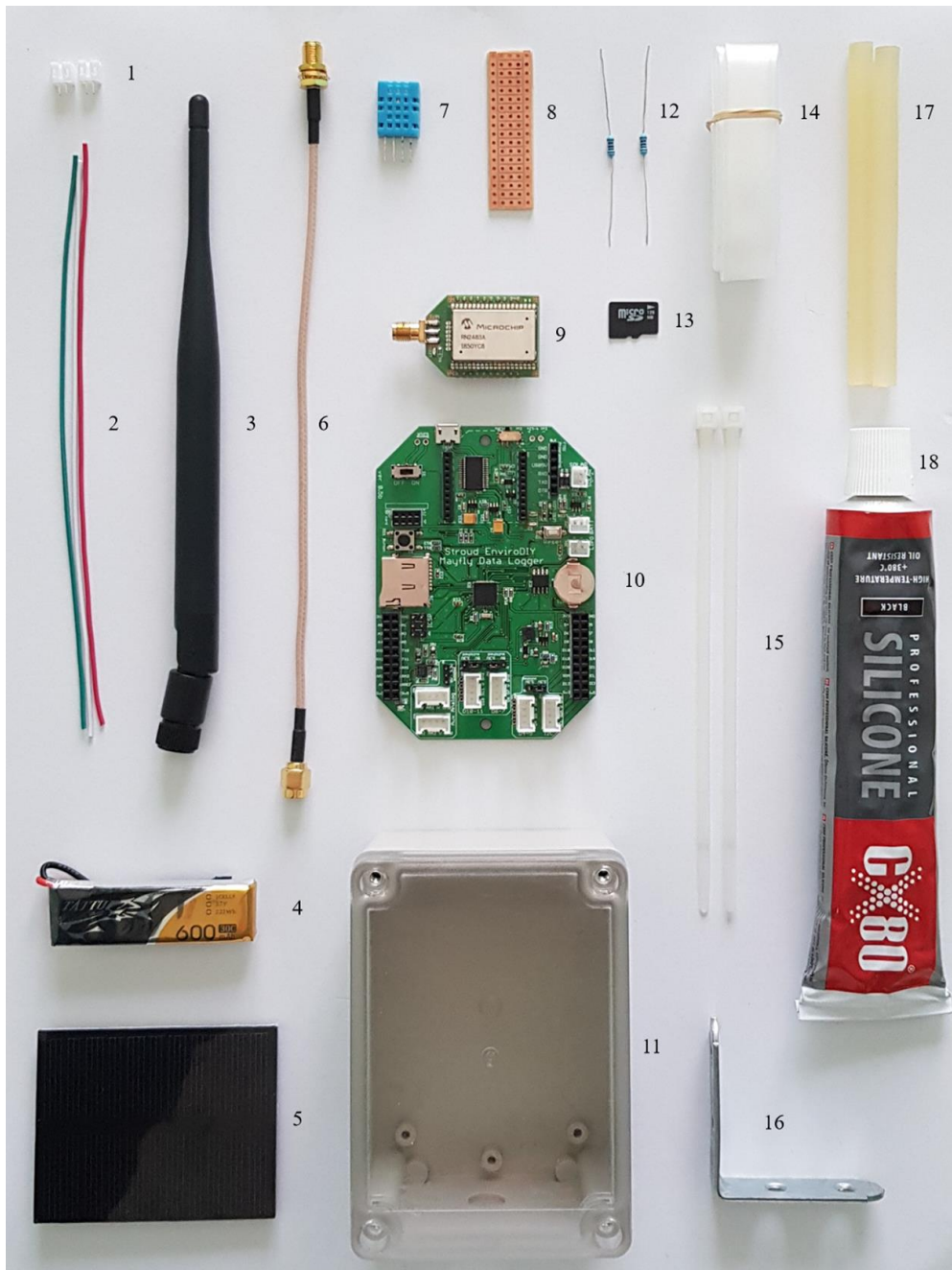
Διάγραμμα 8.3: Ηλεκτρονικό διάγραμμα βαθμίδας RN2483 [67]



TITLE: LoRa node	REV: 3
(Mayfly Data Logger + RN2483 LoRa bee)	
Design by: George Kelidis	
Date: 5 - 5 - 2020	Sheet: 1/1

Διάγραμμα 8.4: Ηλεκτρονικό διάγραμμα πλήρους συνδεσμολογίας

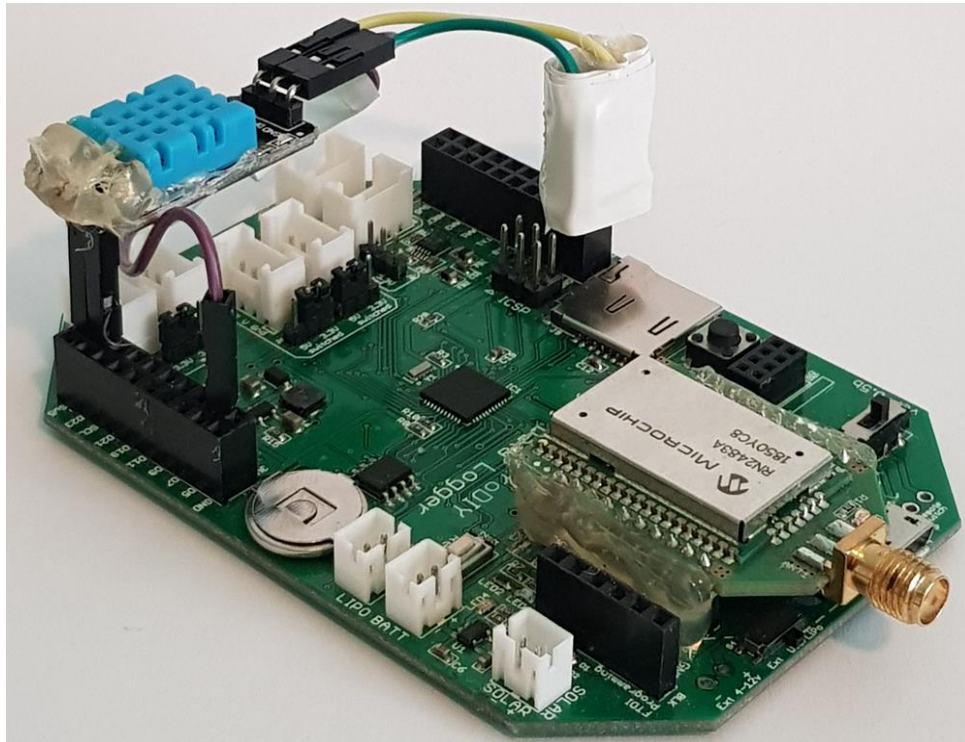
Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και οι συνδεσμολογίες παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες:



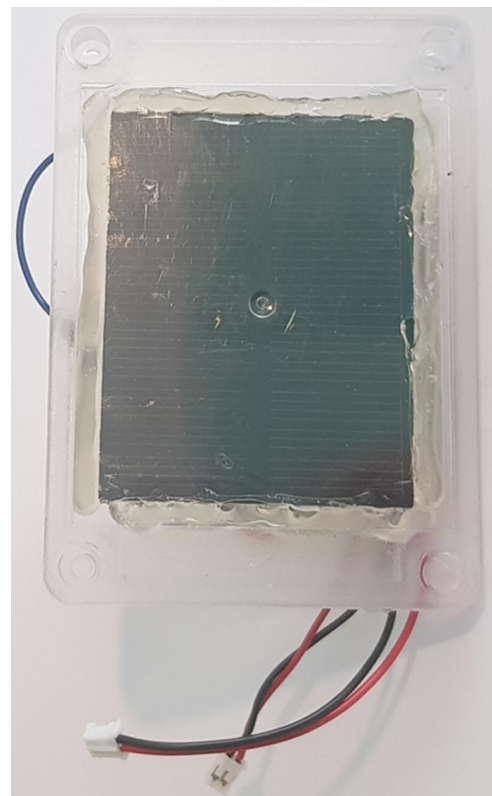
Εικόνα 8.1: Εξοπλισμός – υλικά κόμβου LoRa

Υπόμνημα:

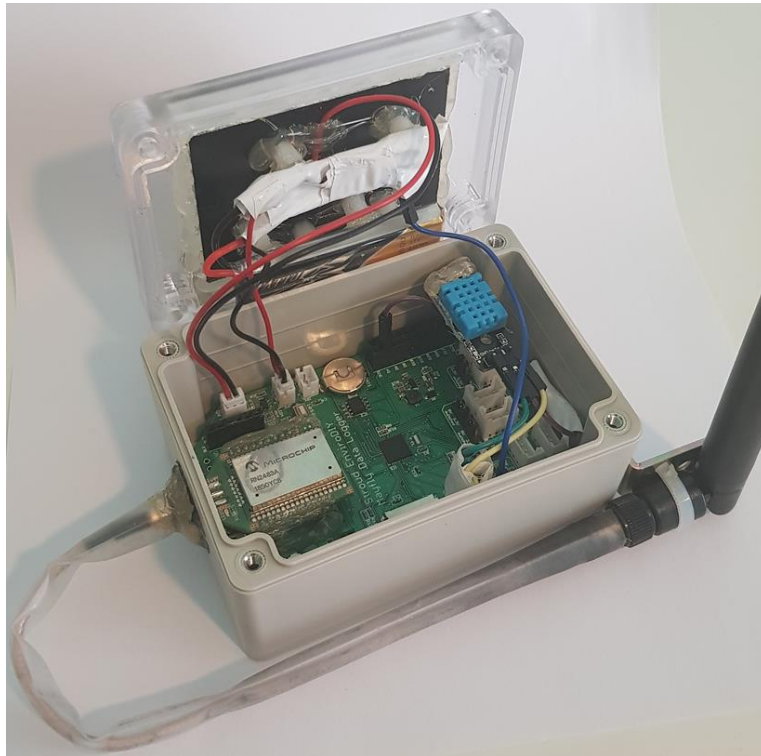
- 1: JST κονέκτορας, 2: Καλώδια, 3: Κεραία 3dBi SMA, 4: Συσσωρευτής Lipo Tattu 600mAh 3.7V,
- 5: ΦΒ πάνελ 0.5W, 6: Καλώδιο SMA, 7: Αισθητήρας DHT11, 8: Διάτρητη πλακέτα, 9: LoRa Bee RN2483,
- 10: Mayfly Data Logger, 11:Κυτίο Mayfly Data Logger, 12: Αντίσταση 1kΩ, 13: microSD 8 GB,
- 14: Θερμοσυστελλόμενο 9.5/4.7mm, 15: Δεματικά, 16: Μεταλλική γωνία στήριξης, 17:Θερμοκόλλα,
- 18: Σιλικόνη στεγανοποίησης



Εικόνα 8.2: Συνδεσμολογία 1^η: Mayfly – DHT11 – LoRa BEE



Εικόνα 8.3: Συνδεσμολογία 2^η : συσσωρευτής – διαίρετης τάσης – ΦΒ στοιχείο – καπάκι
(αριστερά: εσωτερική όψη, δεξιά: εξωτερική όψη)



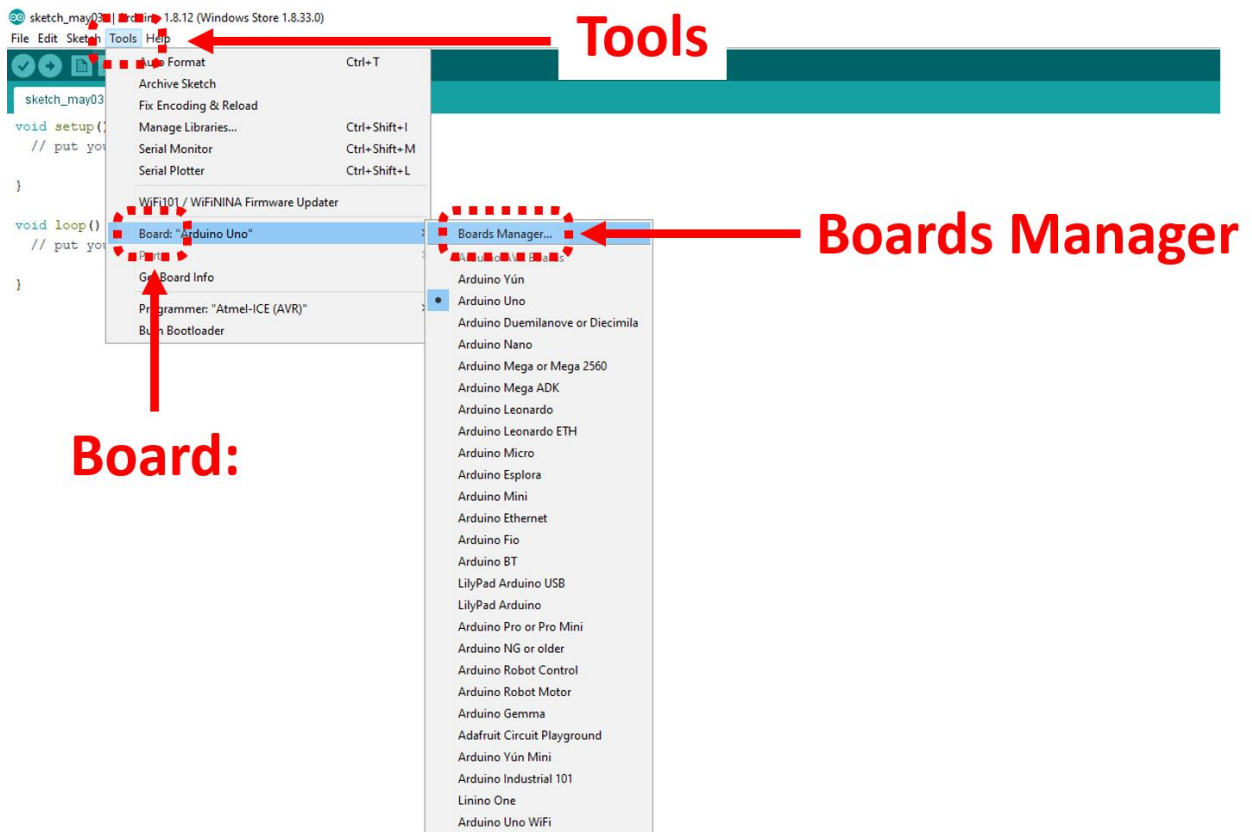
Εικόνα 8.4 Διασύνδεση 1^{ης} – 2^{ης} συνδεσμολογίας και κυτίου – καλωδίου SMA – κεραίας



Εικόνα 8.5: Τελική συναρμογή

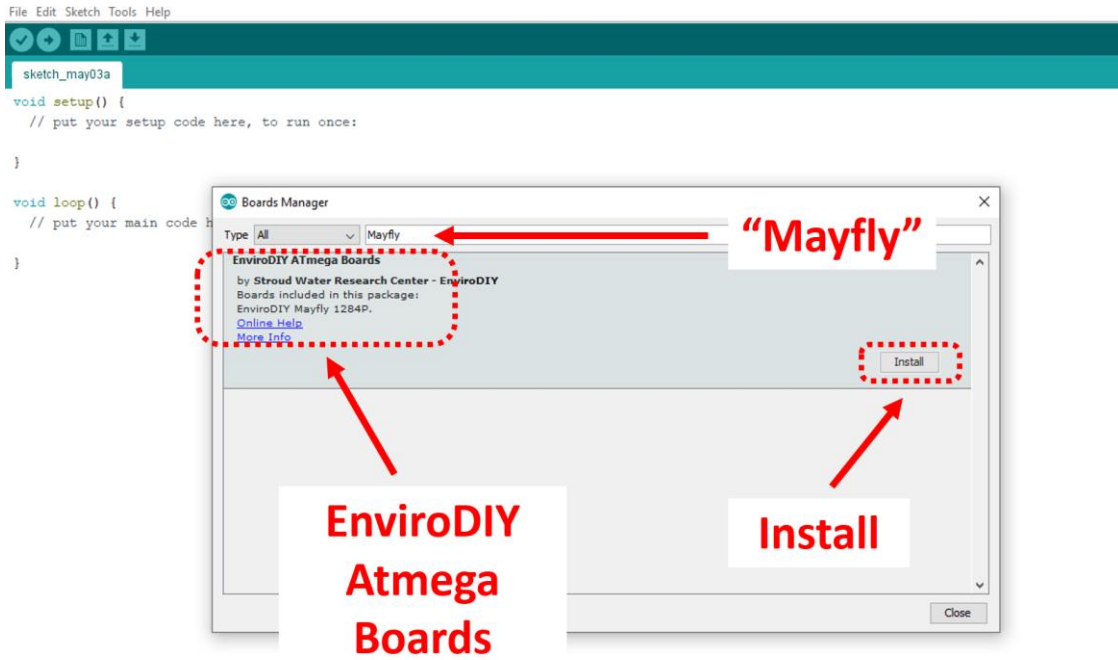
8.4.2 Προγραμματισμός

Ο Mayfly προγραμματίζεται σε περιβάλλον Arduino IDE. Αρχικά, στην ιστοσελίδα <https://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.htm>, βρίσκουμε και κατεβάζουμε drivers για εικονική FTDI θύρα COM (Virtual COM port – VCP), για τη χρήση της θύρας USB από τον Mayfly. Στη συνέχεια μεταβαίνουμε στην ιστοσελίδα <https://www.arduino.cc/en/Main/Software> [74], από όπου κατεβάζουμε την έκδοση του Arduino IDE που αντιστοιχεί στο λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιούμε και την εγκαθιστούμε. Έπειτα συνδέουμε τον Mayfly σε μία θύρα USB και ανοίγουμε την εφαρμογή Arduino IDE. Για την προσθήκη του Mayfly επιλέγουμε κατά σειρά: **Tools** → **Board:** → **Boards Manager**



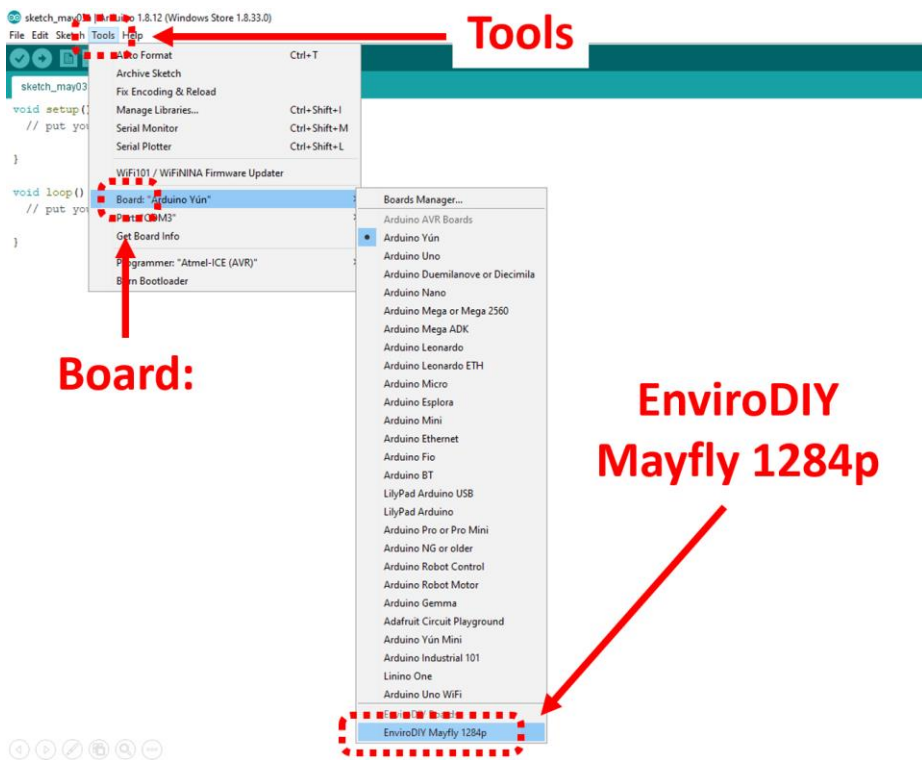
Εικόνα 8.6: Προσθήκη Mayfly Data Logger 1/3

Στη μπάρα αναζήτησης του αναδυόμενου παραθύρου γράφουμε **Mayfly**. Εμφανίζεται ένα board με το όνομα **EnviroDIY Atmega Boards**. Επιλέγουμε **Install**.



Εικόνα 8.7: Προσθήκη Mayfly Data Logger 2/3

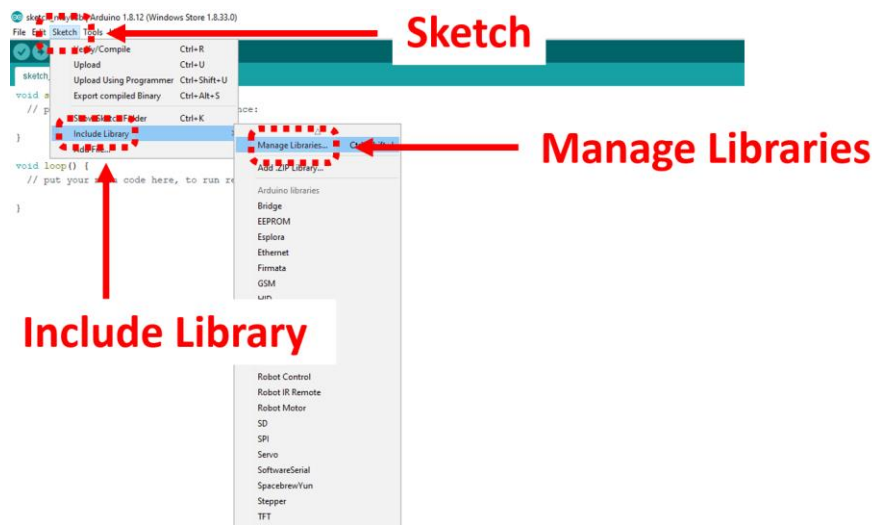
Επιλέγουμε κατά σειρά: **Tools** → **Board:** → **EnviroDIY Mayfly 1284p**



Εικόνα 8.8: Προσθήκη Mayfly Data Logger 3/3

Πλέον ο Mayfly είναι διαθέσιμος και επιλεγμένος προς χρήση από το Arduino IDE.

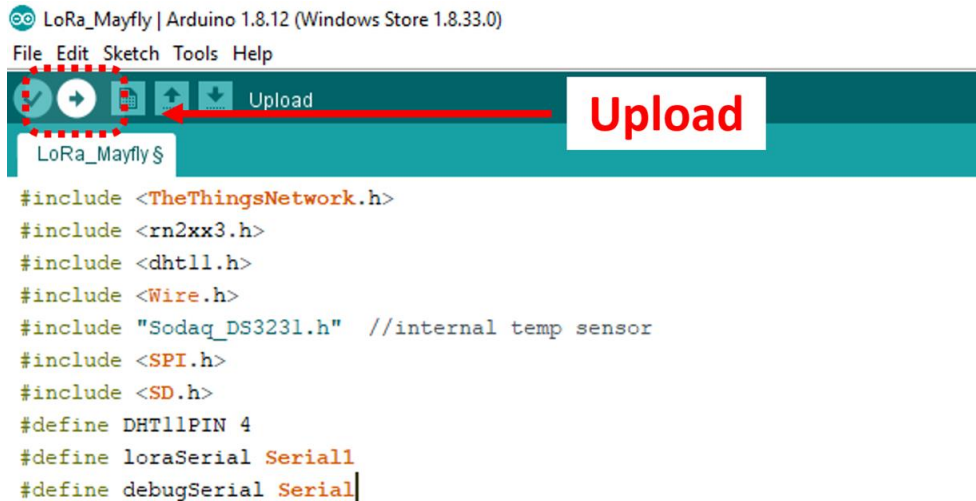
Οι βιβλιοθήκες που διατίθενται και χρησιμοποιούνται ευρέως για συστήματα βασισμένα σε Arduino είναι οι *The Things Network Arduino Library*, *The Things Node Arduino Library* και λοιπές που κατά κύριο λόγο βασίζονται στην *Arduino LMIC library*. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας επιλέχθηκε η *The Things Network Arduino Library*, λόγω της απλότητας και αποτελεσματικότητάς της. Για την προσθήκη της βιβλιοθήκης επιλέγουμε κατά σειρά: *Sketch* → *Include Library* → *Manage Libraries*



Εικόνα 8.9: Προσθήκη Mayfly Data Logger 3/3

Βρίσκουμε και εγκαθιστούμε τη βιβλιοθήκη, με διαδικασία παρόμοια με την προσθήκη του Mayfly.

Σε αντίθεση με την υλοποίηση του 7^{ου} κεφαλαίου, όπου οι λειτουργίες της καταγραφής δεδομένων (data logging) και της αποστολής τους τελούνται από διαφορετικά συστήματα (Zeno data logger και Raspberry Pi αντίστοιχα), στην υλοποίηση αυτή ο Mayfly συλλέγει και καταγράφει τα δεδομένα από τους αισθητήρες και εκτελεί την αποστολή τους. Η λειτουργία αυτή εκτελείται από το πρόγραμμα *LoRa_Mayfly.ino*, του οποίου η φόρτωση στη μνήμη του Mayfly γίνεται επιλέγοντας *Upload* από το μενού επιλογών του Arduino IDE:



Εικόνα 8.10: Φόρτωση (upload) LoRa_Mayfly.ino

Εφόσον φορτωθεί στη μνήμη του ελεγκτή, το *LoRa_Mayfly.ino* εκτελείται όταν ενεργοποιείται η συσκευή, τροφοδοτούμενη είτε μέσω καλωδίου USB, είτε μέσω μπαταρίας. Το πρόγραμμα *LoRa_Mayfly.ino* ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Λήψη τιμών από τους αισθητήρες.
2. Επεξεργασία για περιορισμό του μεγέθους τους.
3. Αποθήκευση των δεδομένων και της χρονοσφραγίδας στο αρχείο *donnees.txt*.
4. Ενσωμάτωση των δεδομένων σε πίνακα.
5. Αποστολή των δεδομένων.

Η περιοδικότητα εκτέλεσης του *LoRa_Mayfly.ino* καθορίστηκε σε 1 μήνυμα ανά 10min. Παρατίθεται στο κεφάλαιο 10.

8.5 Οριστικοποίηση εφαρμογής TTN

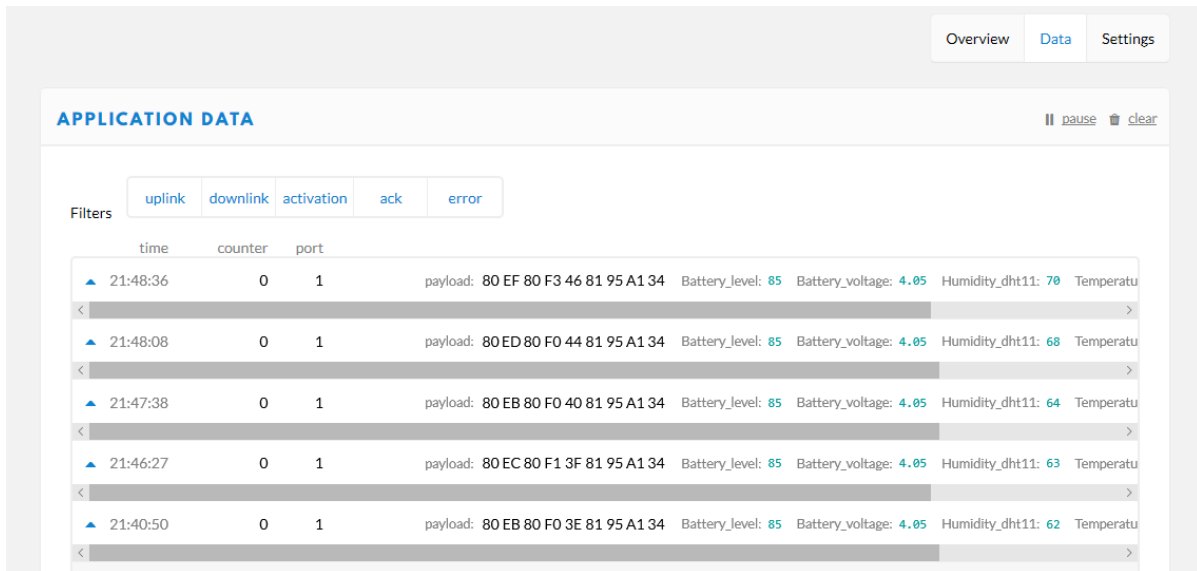
Η διαδικασία οριστικοποίησης της εφαρμογής TTN είναι ίδια με την αντίστοιχη του κεφαλαίου 7, ενώ η συνάρτηση αποκωδικοποίησης *decoder* παρατίθεται στο κεφάλαιο 10.

8.6 Παρουσίαση και διαχείριση δεδομένων

8.6.1 The Things Network

Όπως στην υποπαράγραφο 7.7.1, εισερχόμαστε στην κονσόλα του λογαριασμού TTN, στη συνέχεια στο μενού εφαρμογών και εισερχόμαστε στην εφαρμογή μας (application ID: *2nd_lora_node_19_9_19*).

Εφόσον έχει γίνει αποστολή πακέτων στη ζεύξη node – gateway, αυτά αποκωδικοποιούνται και παρουσιάζονται ως εγγραφές στην καρτέλα **Data**. Εμφανίζονται διαχειριστικές λεπτομέρειες και μεταδεδομένα (metadata), ενώ το ωφέλιμο φορτίο αποκωδικοποιείται περαιτέρω από τη συνάρτηση αποκωδικοποίησης (*decoder*, παράγραφος 8.5) και παρουσιάζεται ανάλογα.

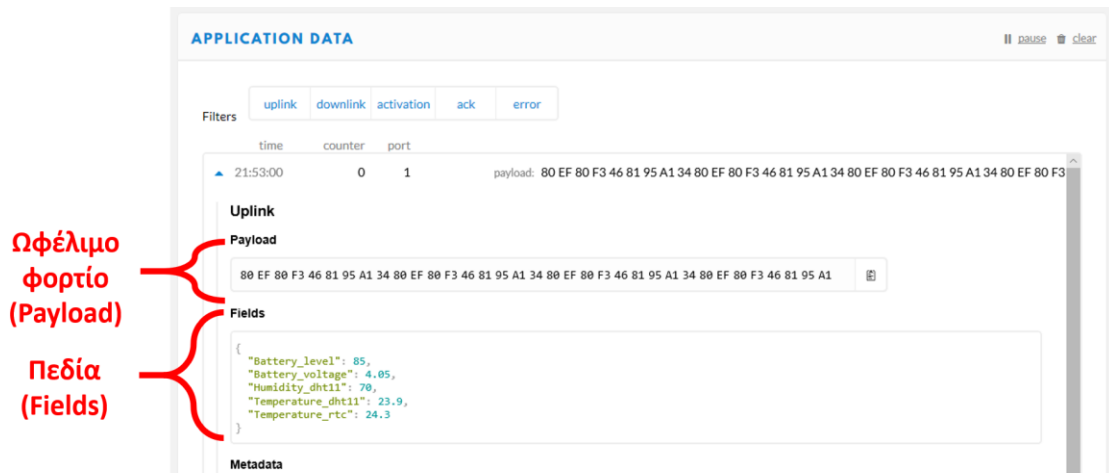


The screenshot shows the 'APPLICATION DATA' interface in the TTN console. It features a navigation bar with 'Overview', 'Data', and 'Settings' tabs. Below the title, there are 'pause' and 'clear' buttons. A 'Filters' section contains buttons for 'uplink', 'downlink', 'activation', 'ack', and 'error'. The main area displays a table of data records with columns for 'time', 'counter', and 'port'. Each record shows a timestamp, counter value, port number, and a detailed payload including battery level, voltage, humidity, and temperature.

time	counter	port	payload
21:48:36	0	1	payload: 80 EF 80 F3 46 81 95 A1 34 Battery_level: 85 Battery_voltage: 4.05 Humidity_dht11: 70 Temperatu
21:48:08	0	1	payload: 80 ED 80 F0 44 81 95 A1 34 Battery_level: 85 Battery_voltage: 4.05 Humidity_dht11: 68 Temperatu
21:47:38	0	1	payload: 80 EB 80 F0 40 81 95 A1 34 Battery_level: 85 Battery_voltage: 4.05 Humidity_dht11: 64 Temperatu
21:46:27	0	1	payload: 80 EC 80 F1 3F 81 95 A1 34 Battery_level: 85 Battery_voltage: 4.05 Humidity_dht11: 63 Temperatu
21:40:50	0	1	payload: 80 EB 80 F0 3E 81 95 A1 34 Battery_level: 85 Battery_voltage: 4.05 Humidity_dht11: 62 Temperatu

Εικόνα 8.11: Παράδειγμα λίστας εγγραφών

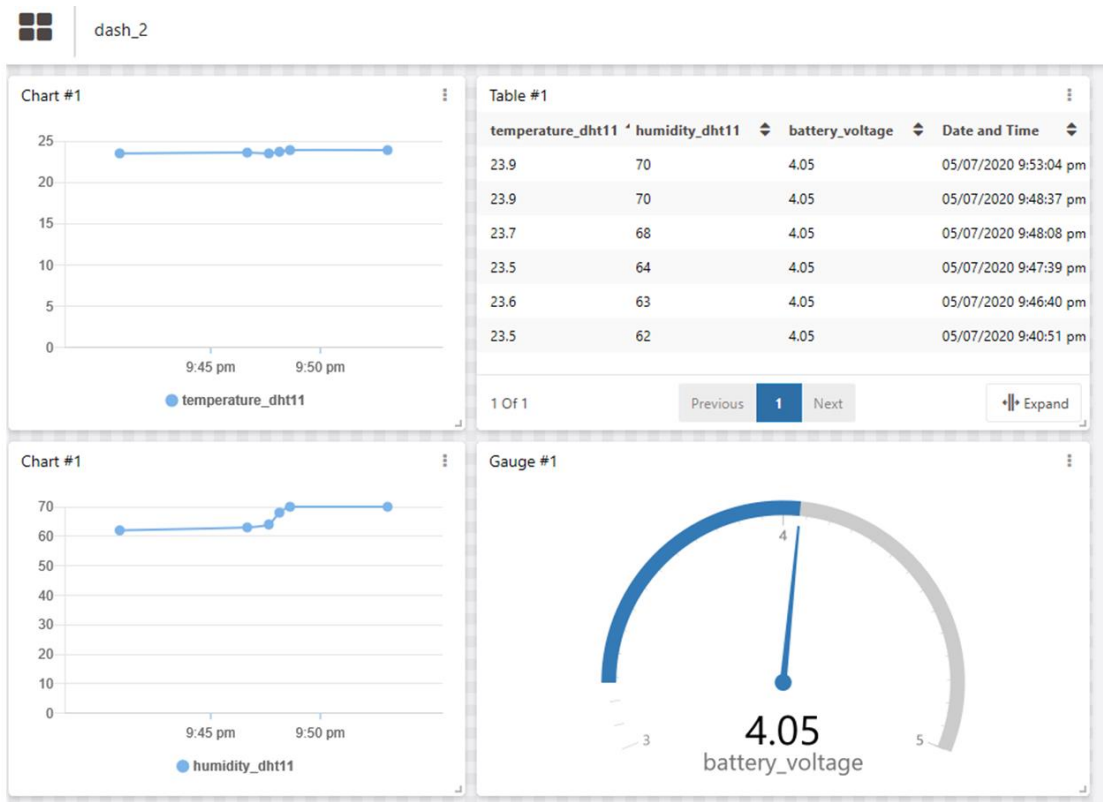
Επιλέγοντας μία εγγραφή, αυτή αναπτύσσεται και παρουσιάζονται όλες οι πληροφορίες αναλυτικά:



Εικόνα 8.12: Παράδειγμα εγγραφής ανεπτυγμένης (1/2)

8.6.2 TagoIO

Όπως στην υποπαράγραφο 7.7.3, εισερχόμαστε στο λογαριασμό που δημιουργήσαμε στην πλατφόρμα TagoIO και δημιουργούμε ένα *dashboard* (εδώ *dash_2*), στο οποίο προσθέτουμε επιθυμητά widgets. Κάνουμε αντιστοίχιση με τη συσκευή *Mayfly LoRa node* και τις μεταβλητές *temperature_dht11*, *humidity_dht11* και *battery_voltage*. Το dashboard διαμορφώνεται όπως παρακάτω:



Εικόνα 8.13: Εικόνα dash_2

Τέλος, δίνεται η δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων και λήψης αρχείων καταγραφής.

8.7 Ενεργειακοί υπολογισμοί

Σε αντίθεση με την υλοποίηση του κεφαλαίου 7, ο συνδυασμός Mayfly Data Logger/ LoRa Bee RN2483 τροφοδοτείται από συσσωρευτή πολυμερών λιθίου (Lipo) 3.7V/600mAh, με σκοπό την αυτονομία του.

Στο πλαίσιο αυτό είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των ενεργειακών καταναλώσεων όλων των βαθμίδων και διατάξεων που εμπλέκονται, για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν τα μέγιστα θεωρητικά ρεύματα:

Βαθμίδα	Κατάσταση	Ρεύμα	Τάση	Ισχύς	Χρόνος/24h	Ενέργεια (J)	Ενέργεια (Wh)
Mayfly	Αναμονή	6.5mA	3.3V	21.45mW	86370sec	1852	0.5
	Λειτουργία	50mA	3.3V	165mW	30sec	4.95	0.001
LoRa Bee	Αναμονή	2.8mA	3.3V	9.24mW	86370sec	798	0.22
	Λειτουργία	38.9mA	3.3V	128.37mW	30sec	3.85	0.001
DHT11	Αναμονή	150μΑ	3.3V	0.495mW	86370sec	42.75	0.012
	Λειτουργία	2.5mA	3.3V	8.25mW	30sec	0.25	0.00007
Διαιρέτης τάσης	Λειτουργία	1.85mA	3.7V	6.85mW	86400sec	592	0.16
Σύνολο 24h:						3294J	0.915Wh
Σύνολο μηνιαίο:						98.8kJ	27.5Wh
Σύνολο ετήσιο:						1.200kJ	334Wh

Πίνακας 8.2: Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας

Στη συνέχεια υπολογίζουμε την παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό (ΦΒ) στοιχείο ενέργεια, που αποδίδεται στο σύστημα προς φόρτιση του συσσωρευτή. Από σχετικούς πίνακες λαμβάνουμε στοιχεία για το ηλιακό δυναμικό της Αττικής ανά μήνα, με την υπόθεση βέλτιστης τοποθέτησης του ΦΒ στοιχείου, δηλαδή με νότιο προσανατολισμό και υπό γωνία 30° [75]. Το ΦΒ στοιχείο, που αποτελεί μέρος του Mayfly starter kit, αποδίδει ονομαστική ισχύ 0.5W. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη δυνατή απόδοση του στοιχείου, δηλαδή υπό ιδανικές συνθήκες θερμοκρασίας, κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας και με το μέγιστο δυνατό ηλιακό δυναμικό. Ο συντελεστής απόδοσης (η) του στοιχείου υπολογίζεται ως εξής:

$$n = P_m / (H \cdot A)$$

Όπου: P_m : παραγόμενη ισχύς (W)

H: ηλιακό δυναμικό (1000W/m²)

A: ενεργός επιφάνεια ΦΒ στοιχείου (33.5*10⁻⁴m²)

Προκύπτει ότι $n = 15\%$. Ωστόσο, προκειμένου να ληφθούν υπόψη διάφορες απώλειες μεταφοράς, η επίδραση της θερμοκρασίας και λοιποί παράγοντες που επιδρούν αρνητικά στην τελική ισχύ που αποδίδει ένα ΦΒ σύστημα, η απόδοση του ΦΒ στοιχείου θα θεωρηθεί 10%. Κατά συνέπεια η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα συντηρητική, με σκοπό την εξασφάλιση της λειτουργίας του κόμβου και στη χειρότερη δυνατή περίπτωση. Σημειώνεται ότι για τους υπολογισμούς θεωρήθηκαν 6 ανηγμένες ώρες ηλιακής ακτινοβολίας.

Μήνας	Ηλιακό δυναμικό /μήνα (Wh/m ²)	Ηλιακό δυναμικό /μήνα/στοιχείο (Wh)	Παραγόμενη ενέργεια /μήνα/στοιχείο με n=10% (Wh)	Παραγόμενη ενέργεια /24h/στοιχείο με n=10% (Wh)	Παραγόμενη ενέργεια /ανηγμένη ώρα /στοιχείο με n=10% (Wh)
Ιαν	87000	291.45	29.15	0.94	0.16
Φεβ	99000	331.65	33.17	1.18	0.20
Μαρ	129000	432.15	43.22	1.39	0.23
Απρ	152000	509.20	50.92	1.70	0.28
Μαϊ	179000	599.65	59.97	1.93	0.32
Ιουν	184000	616.40	61.64	2.05	0.34
Ιουλ	202000	676.70	67.67	2.18	0.36
Αυγ	203000	680.05	68.01	2.19	0.37
Σεπ	170000	569.50	56.95	1.90	0.32
Οκτ	136000	455.60	45.56	1.47	0.24
Νοε	105000	351.75	35.18	1.17	0.20
Δεκ	85000	284.75	28.48	0.92	0.15
		Σύνολο:	579.89		

Πίνακας 8.3: Προσδιδόμενη και παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα

Παρατηρούμε ότι ακόμη και στο χειρότερο από πλευράς ηλιακού δυναμικού μήνα (Δεκέμβριο), η μηνιαία παραγωγή ενέργειας ξεπερνά τη μηνιαία κατανάλωση του κόμβου (28.48 έναντι 27.5 Wh), ενώ σε ετήσια βάση, η παραγωγή είναι σχεδόν διπλάσια από την κατανάλωση (579.89 έναντι 334 Wh).

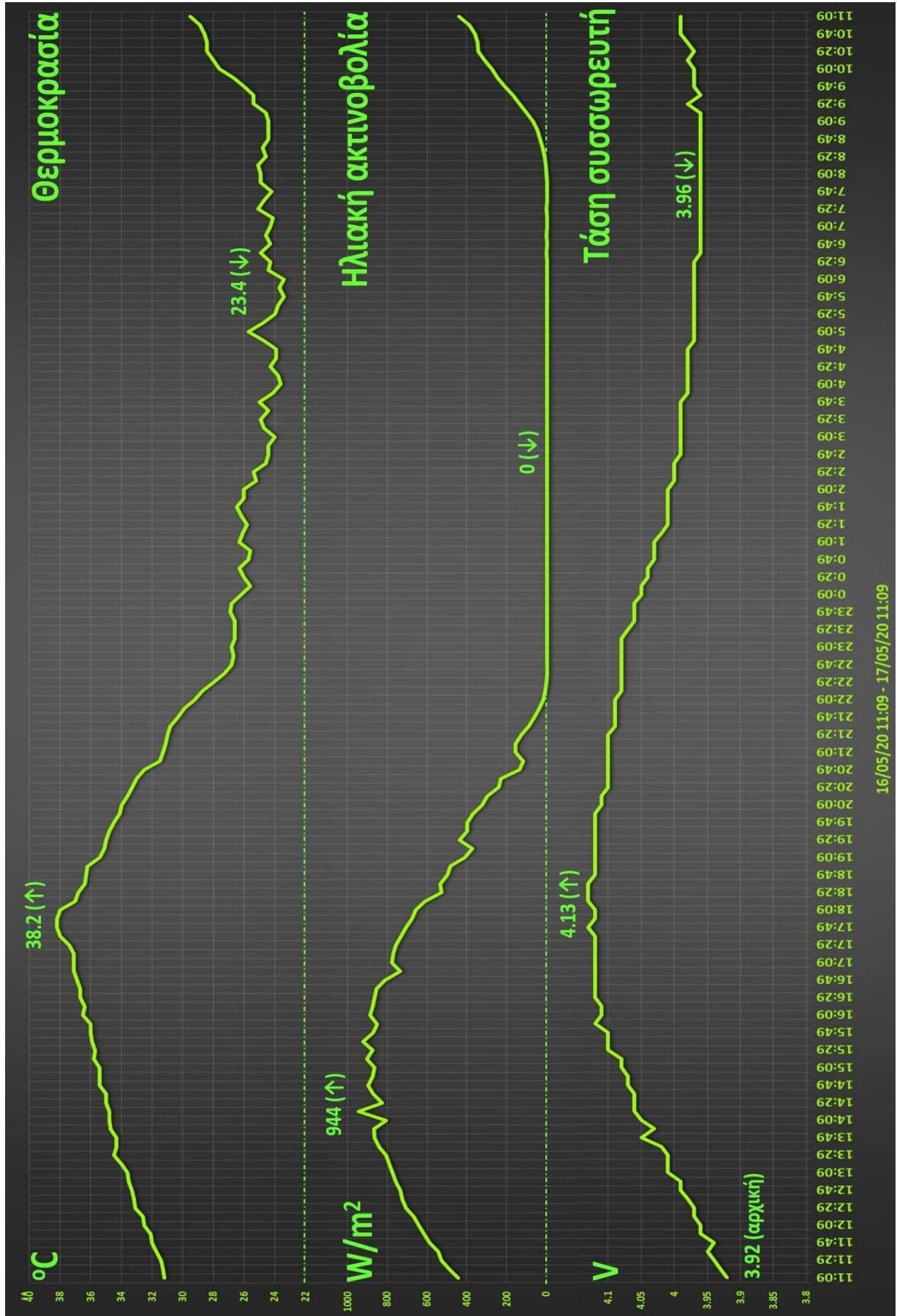
Προκειμένου να έχουμε μία ρεαλιστική εικόνα για τη δυνατότητα φόρτισης του συσσωρευτή Lipo των 600mAh από το ΦΒ στοιχείο, πραγματοποιήθηκε 24ωρη δοκιμή λειτουργίας του κόμβου. Ο κόμβος τοποθετήθηκε με νότιο προσανατολισμό και υπό γωνία 30° ως προς το επίπεδο, με το πρόγραμμα *LoRa_Mayfly.ino* να υλοποιεί την αποστολή πακέτων των 35 Bytes ανά 10min. Σημειώνεται ότι το 24ωρο της δοκιμής ήταν μεταξύ 16/05/20 11:09 και 17/05/20 11:09. Η θερμοκρασία κυμάνθηκε μεταξύ 23°C και 38°C και η ηλιακή ακτινοβολία μεταξύ 0 και 944 W/m².

Οι μετρήσεις καταγράφηκαν σε κάρτα microSD και από αυτές καταρτίστηκε ο παρακάτω πίνακας, στον οποίο φαίνεται ο ρυθμός φόρτισης και αποφόρτισης του συσσωρευτή, σε σχέση με την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία τόσο του περιβάλλοντος (πηγή: <https://openmeteo.org/stations/1334/>), όσο και εντός του κυτίου του κόμβου (τιμή από τον ενσωματωμένο RTC αισθητήρα του Mayfly):

Χρονικό διάστημα	Ηλιακή ακτινοβολία (W/m ²)	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	Θερμοκρασία εντός κυτίου (°C)	Μεταβολή τάσης (ΔV)	Ρυθμός (από)φόρτισης (ΔV/Δt, V/h)
11:09 – 13:29	444 – 805	31 – 35	43 – 52	+ 0.09 (4.01 – 3.92)	+ 0.04
13:29 – 16:49	805 – 944	35 – 37	52 – 55	+ 0.11 (4.12 – 4.01)	+ 0.03
16:49 – 19:59	735 – 367	38 – 34	49 – 32	0	0
19:59 – 22:19	323 – 4	34 – 29	32 – 26	- 0.04 (4.08 – 4.12)	- 0.02
22:19 – 08:09	0	29 – 23	26 – 23	- 0.12 (3.96 – 4.08)	- 0.01
08:09 – 09:39	0 – 169	24 – 25	30 – 40	0	0
09:39 – 11:09	169 – 440	25 – 30	40 – 45	+ 0.03 (3.99 – 3.96)	+ 0.02

Πίνακας 8.4: Χρονοδιάγραμμα φόρτισης/αποφόρτισης συσσωρευτή

Τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνονται στο διάγραμμα της επόμενης σελίδας:



Διάγραμμα 8.5: Αποτελέσματα 24ωρης δοκιμής

Παρατηρήσεις:

- Η δοκιμή ξεκίνησε με το συσσωρευτή στα 3.92V.
- Η φόρτιση του συσσωρευτή φτάνει οριακά τα 4.13V κι έπειτα κυμαίνεται μεταξύ 4.12V – 4.13V, μια διακύμανση που ελέγχεται από τη βαθμίδα φόρτισης του Mayfly (Lipo charger).
- Ο συσσωρευτής αποφορτίζεται όταν η ηλιακή ακτινοβολία πέφτει προσεγγιστικά κάτω από το κατώφλι των 200 W/m², στην προκειμένη κατά το διάστημα 20:29 με 09:29. Στο διάστημα αυτό ο συσσωρευτής έπεσε στα 3.96V, δηλαδή παρέμεινε σε σχετικά υψηλό επίπεδο φόρτισης. Επίσης, το κατώφλι των 200W/m² ξεπερνιέται σχεδόν καθημερινά κατά τη διάρκεια της ημέρας, δεδομένων των μετεωρολογικών συνθηκών στην Αττική.
- Ο ρυθμός φόρτισης το διάστημα 11:09 – 13:29 είναι μεγαλύτερος από αυτόν του διαστήματος 13:29 – 16:49 (+0.04 και +0.03 αντίστοιχα), παρόλο που η ηλιακή ακτινοβολία είναι αυξημένη στη 2^η περίπτωση. Εκτιμάται ότι αυτό οφείλεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος του συσσωρευτή, που στην 1^η περίπτωση βρίσκεται σε χαμηλότερο εύρος (31° – 35° C έναντι 35° – 37° C), πιο κατάλληλο για τη φόρτισή του.
- Σε αυτό εκτιμάται ότι οφείλεται και η διαφορά στο ρυθμό αποφόρτισης μεταξύ των διαστημάτων 19:59 – 22:19 και 22:19 – 08:09 (-0.02 και -0.01 αντίστοιχα). Η θερμοκρασία περιβάλλοντος του συσσωρευτή στη 2^η περίπτωση βρίσκεται σε χαμηλότερο εύρος (23° – 25° C έναντι 26° – 32° C), πιο κατάλληλο για τη λειτουργία του.

Κατόπιν των παραπάνω, εκτιμάται ότι ο κόμβος μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα. Οι ενεργειακές του ανάγκες καλύπτονται πλήρως μέσω της επαναφόρτισης του συσσωρευτή από το ΦΒ στοιχείο, διότι καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από αυτήν που παράγει. Αποτελεί συνεπώς ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα επωφελούς αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το χρονικό όριο της ενεργειακής αυτονομίας του κόμβου θα περιοριστεί από την αναπόφευκτη μείωση της απόδοσης του συσσωρευτή και του ΦΒ στοιχείου.

Κεφάλαιο 9: Σύνοψη, συμπεράσματα και επεκτάσεις

9.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκε με δύο τρόπους η ασύρματη μετάδοση δεδομένων, με χρήση της τεχνολογίας LoRa και η αποθήκευση, παρουσίαση και διάθεση της πληροφορίας στους ενδιαφερόμενους χρήστες μέσω διαδικτυακών υποστηρικτικών υποδομών.

Η 1^η υλοποίηση (κεφάλαιο 7) αποτελεί ουσιαστικά μία εναλλακτική της υπάρχουσας εγκατάστασης του μετεωρολογικού σταθμού του Ε.Μ.Π., εφόσον και αυτή βασίζεται για τη μετάδοση των δεδομένων σε ένα Raspberry Pi 3, με δεδομένο τον υφιστάμενο data logger. Η διαφορά έγκειται στη χρήση του ασύρματου διαύλου και στο πρωτόκολλο, με τη διαμόρφωση LoRa και το πρωτόκολλο LoRaWAN να παρέχουν μεγάλη εμβέλεια, ατρωσία έναντι θορύβου και παρεμβολών και ασφάλεια, με περιορισμούς όσον αφορά τους ρυθμούς μετάδοσης και το μέγεθος των πακέτων, όπως αναλύθηκε διεξοδικά.

Επιπρόσθετα, η υποστηρικτική υποδομή του The Things Network παρέχει ένα περιβάλλον εύκολης δημιουργίας, διαχείρισης, ελέγχου, δοκιμών και παρακολούθησης εφαρμογών. Συμπληρωματικά, η πλατφόρμα ενσωμάτωσης (integration) TagoIO παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης, ελέγχου, αποθήκευσης και περαιτέρω επεξεργασίας δεδομένων, σε ένα περιβάλλον φιλικό στο χρήστη.

Πλέον των παραπάνω, στήθηκε ένας MQTT broker (Mosquitto) για την εξαγωγή των δεδομένων από την εφαρμογή TTN και αξιοποιήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα για την προώθησή τους στο σύστημα Enhydriis, διαδικασία που συνδυαστικά με τα παραπάνω, μεταφέρει την ανάγκη επεξεργασίας των δεδομένων σε έναν μεμακρυσμένο host, απαλλάσσοντας τον τελικό κόμβο από περαιτέρω πολυπλοκότητα και επεξεργαστικές απαιτήσεις.

Η 2^η υλοποίηση (κεφάλαιο 8) αποτελεί μία συνολικά διαφορετική προσέγγιση, διότι ο κόμβος LoRa λειτουργεί αυτόνομα και ως data logger. Όπως και στην 1^η υλοποίηση, πραγματοποιήθηκε διασύνδεση με το TTN και το TagoIO.

Ειδοποιό διαφορά των δύο υλοποιήσεων αποτελεί η ενεργειακή αυτονομία της 2^{ης}, όπως αναλύθηκε διεξοδικά στο κεφάλαιο 8. Πέρα λοιπόν από τη μεγάλη εμβέλεια, την ευρωστία έναντι θορύβου και παρεμβολών και την ασφάλεια, που παρέχει και η 1^η

υλοποίηση, η 2^η αξιοποιεί και τις χαμηλές ενεργειακές ανάγκες ενός τυπικού κόμβου αισθητήρων LoRa, με σκοπό τη βιώσιμη λειτουργία, την αυτονομία και την ανεξαρτησία από την τροφοδοσία του δικτύου ηλεκτροδότησης:

Υλοποίηση	Ημερήσια κατανάλωση (Wh)	Αντιστοιχία με φορτίο συσσωρευτή (mAh)
1 ^η	13 Wh	2600 mAh
2 ^η	0.8 Wh	220 mAh

Πίνακας 9.1: Σύγκριση κατανάλωσης υλοποιήσεων κόμβων

Σε θεωρητικό επίπεδο μελετήθηκε σε βάθος η αναπτυσσόμενη τεχνολογία LoRa και υποστηρικτικές υποδομές και πλατφόρμες που σχετίζονται με αυτήν, καθώς και με το IoT εν γένει.

Σε πρακτικό επίπεδο δοκιμάστηκαν διάφορα περιβάλλοντα για τον προγραμματισμό των διατάξεων, ενώ παράλληλα δοκιμάστηκαν τρόποι βέλτιστης της φυσικής διασύνδεσης και προσαρμογής τους, για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

Συμπερασματικά, εκτιμάται ότι επιτεύχθηκαν οι στόχοι που τέθηκαν αρχικά.

9.2 Επεκτάσεις

Οι πληροφορίες αποτελούν κρίσιμη παράμετρο σε παντός είδους φορείς και οργανισμούς, διότι σε αυτές βασίζονται σε μεγάλο βαθμό οι αποφάσεις που λαμβάνονται. Η ιδέα της γεωγραφικής διασποράς πηγών πληροφοριών συνάδει με τη βασική δομή του IoT: πλήθος από τελικές συσκευές χρήστη διασυνδέονται μέσω κάποιας τεχνολογίας σε μία κεντρική διαχειριστική υποδομή, στην οποία μεταδίδουν τα επιθυμητά δεδομένα. Τα δεδομένα αποθηκεύονται ή/και επεξεργάζονται κεντρικά, αξιοποιούμενα κατά τον επιθυμητό τρόπο.

Η τεχνολογία LoRa αποτελεί μία πρόταση για υλοποίηση δικτύων LPWAN, ενός σημαντικού τομέα του IoT, ενώ οι εμπορικές της εφαρμογές ολοένα αυξάνονται. Η μεγάλη εμβέλεια, η ευρωστία και η αυξημένη ατρωσία έναντι θορύβου και παρεμβολών, η υψηλή ενεργειακή απόδοση και η ευκολία κλιμακωσιμότητας, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος, αποτελούν χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για τη συλλογή πληροφοριών, επ' ωφελεία κρατικών και δημοσίων φορέων και οργανισμών (π.χ. ΓΓΠΠ, ΟΤΑ, ΕΔ, ΣΑ), σε θέματα τόσο διοικητικής, όσο και επιχειρησιακής φύσης.

9.2.1 Πληροφορίες διοικητικής φύσης

Όσον αφορά τις πληροφορίες διοικητικής φύσης, αυτές αφορούν, μεταξύ άλλων, τους παρακάτω τομείς:

- Παρακολούθηση συνθηκών εργασίας (αέρας, υγρασία κ.ά.)
- Έλεγχος επιπέδων ηχορύπανσης
- Αποδοτική διαχείριση φωτισμού
- Δίκτυα αισθητήρων παρακολούθησης/ελέγχου εγκαταστάσεων
- Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης και ανταπόκρισης
- Παρακολούθηση στάθμης καυσίμων
- Διαχείριση αποθεμάτων
- Διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας
- Διαχείριση εφοδιασμού και στόλου οχημάτων
- Παρακολούθηση και εντοπισμός θέσης υπηρεσιακών οχημάτων
- Προληπτική συντήρηση εξοπλισμού και οχημάτων
- Προληπτική συντήρηση υποδομών
- Δίκτυα έξυπνων εγκαταστάσεων
- Μεμακρυσμένοι μετρητές ρεύματος
- Μεμακρυσμένοι ενεργοποιητές και διακόπτες
- Διαχείριση απορριμμάτων και αποβλήτων

Η συλλογή των σχετικών δεδομένων εξυπηρετεί στην αποδοτική διαχείριση των διαθέσιμων ανθρώπινων και οικονομικών πόρων, των μέσων, εγκαταστάσεων και του εξοπλισμού, με σκοπό την αποτελεσματική εκτέλεση της αποστολής του εκάστοτε φορέα ή οργανισμού.

9.2.2 Πληροφορίες επιχειρησιακής φύσης

Εκτός από τις απαιτήσεις διοικητικής φύσης, κρατικοί και δημόσιοι φορείς και οργανισμοί που αναλαμβάνουν επιχειρησιακή δράση, έχουν αυξημένες απαιτήσεις σε έγκαιρες και έγκυρες πληροφορίες, ανάλογα με το πεδίο δράσης τους. Ένα δίκτυο βασισμένο στην τεχνολογία LoRa αναπτύσσεται άμεσα και με χαμηλό κόστος, εξυπηρετώντας τους παρακάτω τομείς:

- Συλλογή μετεωρολογικών και γεωλογικών δεδομένων του πεδίου επιχειρήσεων και ανάλογος σχεδιασμός
- Παρακολούθηση κατάστασης/σύστασης εδάφους
- Αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων θέσης σε πραγματικό χρόνο και σε μεγάλες αποστάσεις, ακόμη και σε non – LOS ζεύξεις.
- Παρακολούθηση ζωτικών σημείων προσωπικού
- Αποτελεσματικός επιχειρησιακός έλεγχος προσωπικού και μέσων
- Κεντρική παρακολούθηση στάθμης καυσίμων οχημάτων και δυνατότητα αποδοτικής σχεδίασης ανεφοδιασμού
- Κεντρική παρακολούθηση στάθμης ύδατος μέσω πυρόσβεσης και προετοιμασία ανεφοδιασμού
- Αντιπυρικά συστήματα επιτήρησης δασικών εκτάσεων
- Κεντρική παρακολούθηση και άμεση συλλογή αναγκών σε υλικά, αποδοτική προτεραιοποίηση της διανομής τους
- Διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας
- Συντονισμός υποστηρικτικών μέσω και υποδομών
- Παρακολούθηση λειτουργικής κατάστασης μέσω και εξοπλισμού και προσανατολισμός πόρων τεχνικής υποστήριξης
- Συστήματα ειδοποίησης εκτάκτου ανάγκης

Σε κάθε περίπτωση, τονίζεται πως ενδεχόμενη χρήση της τεχνολογίας LoRa από κρατικούς και δημοσίους φορείς και οργανισμούς, προϋποθέτει την απόλυτη εξασφάλιση:

- Συμβατότητας και διαλειτουργικότητας του δικτύου LoRa με τα υφιστάμενα συστήματα διοίκησης και ελέγχου των υπόψη φορέων και οργανισμών
- Αποτροπής κυβερνοαπειλών
- Ατρωσίας έναντι παρεμβολών, δεδομένου ότι πρόκειται για πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί τις ISM ζώνες συχνοτήτων, που ως μη αδειοδοτούμενες χρησιμοποιούνται ελεύθερα.

Στο επιχειρησιακό πεδίο, όπου η διασπορά προσωπικού και μέσων είναι απαραίτητη, οι πληροφορίες είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για την εκτίμηση της τακτικής κατάστασης, την

προσαρμογή στις συνθήκες, αλλά και για την πρόβλεψη και το σχεδιασμό μελλοντικών κινήσεων.

Στο πλαίσιο αυτό, καθίσταται αναγκαίο ένα σύστημα ασφαλούς μετάδοσης δεδομένων. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LoRa είναι εκείνα που εκτιμάται ότι την καθιστούν ένα εν δυνάμει αξιόπιστο εργαλείο προς την κατεύθυνση αυτή.

Κεφάλαιο 10: Λογισμικό

10.1 Υλοποίηση κεφαλαίου 7

10.1.1 pll.py (LoRa node)

```
import csv, re, sys, zlib, base64, operator, time
import array as arr
from datetime import datetime

def delta_data():

    with open('/home/pi/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/zeno.csv', 'r') as f:
        lines = f.read().splitlines()
        last_line = lines[-1]
        data_list = (last_line.split())

        """
        Alternative 1
        Given that we don't have access at the original Zeno Data Logger, we cannot establish a PoC with
        our Rpi 3 B. Instead we use a basically static zeno.csv file, changing only the timestamp, in order to model the
        real procedure in a convenient way. We use temporarily the following code:
        """

        data_sens = data_list [2:20]
        dateTimeObj = datetime.today()
        data_time = [dateTimeObj.year-2000, dateTimeObj.month, dateTimeObj.day, dateTimeObj.hour,
dateTimeObj.minute, dateTimeObj.second]
        data_full = data_sens+data_time

        """
        Alternative 2
        When the PoC between Zeno Data Logger and Rpi 3 B will be established in the future, the
        following section should be uncommented and used (in that case, the Alternative 1 should be commented).
        Alternative 2 is intended to use the original zeno.csv, produced by and extracted from (via PoC) by Zeno Data
        Logger.

        data_time = data_list [0:2] # date & time
        data_sens = data_list [2:20] # sensors' data
        data_time[0] = list(map(int, re.findall(r'd+', data_time[0]))) # isolates the numbers of the str and
puts them in list -> date
        data_time[1] = list(map(int, re.findall(r'd+', data_time[1]))) # isolates the numbers of the str and
puts them in list -> time
        data_full = data_sens + data_time[0] + data_time[1]

        """

    for index, item in enumerate(data_full):
        data_full[index] = float(item)
    data_full [0] = data_full[0]*10; data_full [2] = data_full[2]*10; data_full [8] = data_full[8]*10
    data_full [9] = data_full[9]*10; data_full [10] = data_full[10]*10; data_full [13] = data_full[13]*10
    data_full [14] = data_full [14]*10; data_full [15] = data_full[15]*10; data_full [16] = data_full[16]*10
```

```

    for index, item in enumerate(data_full):
        data_full[index] = int(item)
    with open('/home/pi/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/delta.csv', 'w') as myfile:
        wr = csv.writer(myfile)
        wr.writerow(data_full)
        print(data_full) # -> for cli testing purposes

delta_data()

"""
while True:    # can be used as a loop -> we use crontab to achieve a periodic "refresh" of delta.csv
    delta_data()
    time.sleep(3) # every ... seconds
"""

```

10.1.2 periodic.c (LoRa node)

```

#include <stdio.h>
#include "lmic.h"
#include "debug.h"
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
////////////////////////////////////
// CONFIGURATION
////////////////////////////////////

// application router ID (LSBF)
static const u1_t APPEUI[8] = { 0xB9, 0x98, 0x01, 0xD0, 0x7E, 0xD5, 0xB3, 0x70 };

// unique device ID (LSBF)
static const u1_t DEVEUI[8] = { 0x62, 0xCB, 0x81, 0x98, 0xD2, 0xA8, 0x35, 0x00 };

// device-specific AES key (derived from device EUI)
static const u1_t DEVKEY[16] = { 0xAE, 0x4E, 0x32, 0x5A, 0x89, 0x55, 0x72, 0x32, 0x27, 0xC4, 0xB7, 0xE4,
0x07, 0xD0, 0xF3, 0xB1 };

////////////////////////////////////
// APPLICATION CALLBACKS
////////////////////////////////////

// provide application router ID (8 bytes, LSBF)
void os_getArtEui (u1_t* buf) {
    memcpy(buf, APPEUI, 8);
}

// provide device ID (8 bytes, LSBF)
void os_getDevEui (u1_t* buf) {

```



```

memcpy(buf, DEVEUI, 8);
}

// provide device key (16 bytes)
void os_getDevKey (u1_t* buf) {
    memcpy(buf, DEVKEY, 16);
}

////////////////////////////////////
// MAIN - INITIALIZATION AND STARTUP
////////////////////////////////////

// initial job
static void initfunc (osjob_t* j) {

    // reset MAC state
    LMIC_reset();
    // start joining
    LMIC_startJoining();
    // init done - onEvent() callback will be invoked...
}

// useful function for removing quotes from strings
void removeQuotes(char *s, int c) {
    int j, n = strlen(s);
    for (int i=j=0; i<n; i++)
        if (s[i] != c)
            s[j++] = s[i];
    s[j] = '\0';
}

// application entry point
int main () {

    osjob_t initjob;
    // initialize runtime env
    os_init();
    // initialize debug library
    debug_init();
    // setup initial job
    os_setCallback(&initjob, initfunc);
    // execute scheduled jobs and events
    os_runloop();

    // (not reached)
    return 0;
}

```

```

////////////////////////////////////
// UTILITY JOB
////////////////////////////////////

static osjob_t reportjob;
static void reportfunc (osjob_t* j) {

// collect, edit and prepare data
// opening file for reading
FILE *fp;
char str[300];
fp = fopen("/home/pi/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/delta.csv" , "r");

// writing content to stdout
while( fgets (str, sizeof(str), fp)!=NULL ) {
    puts(str); // prints it too
}
fclose(fp);

// removing quotes from string str
removeQuotes(str, "");

time_t t=time(NULL);
fprintf(stdout, "[%x] (%ld) %s\n", hal_ticks(), t, ctime(&t));

// tokenize string str
int i = 0;
char *p = strtok (str, ",");
char *val_str[18];
while (p != NULL) {
    val_str[i++] = p;
    p = strtok (NULL, ",");
}

// transform val_str[] into values[], i.e. from strs to long ints
long values[24];
char *ptr;
int e;
for (e=0; e<24; e++)
    values[e] = strtol(val_str[e], &ptr, 10);

// divide data into bytes and put them into LMIC.frame[]

//Temperature_id232
LMIC.frame[0] = (values[0]+0x8000) >> 8; //v0 left byte of values[0] (or &0xFF00)

```

```

LMIC.frame[1] = (values[0]+0x8000) & 0xFF; //right byte of values[0]
//Humidity_id233
LMIC.frame[2] = values[1]; //v1
//Temperature_id247
LMIC.frame[3] = (values[2]+0x8000) >> 8; ///v2
LMIC.frame[4] = (values[2]+0x8000) & 0xFF;
//Humidity_id248
LMIC.frame[5] = values[3]; //v3
//Total solar radiation_id237
LMIC.frame[6] = (values[4]+0x8000) >> 8; /// v4
LMIC.frame[7] = (values[4]+0x8000) & 0xFF;
//Diffuse solar radiation_id238
LMIC.frame[8] = (values[5]+0x8000) >> 8; //// v5
LMIC.frame[9] = (values[5]+0x8000) & 0xFF;
//Sunshine duration_id236
LMIC.frame[10] = (values[6]+0x8000) >> 8; //// v6
LMIC.frame[11] = (values[6]+0x8000) & 0xFF;
//Solar radiation_id9141
LMIC.frame[12] = (values[7]+0x8000) >> 8; //// v7
LMIC.frame[13] = (values[7]+0x8000) & 0xFF;
//Barometric pressure_id5461
LMIC.frame[14] = (values[8]+0x8000) >> 8; //// v8
LMIC.frame[15] = (values[8]+0x8000) & 0xFF;
//Wind speed_id6659
LMIC.frame[16] = values[9]; //v9
//Wind gust_id9139
LMIC.frame[17] = (values[10]+0x8000) >> 8; //// v10
LMIC.frame[18] = (values[10]+0x8000) & 0xFF;
//Wind_direction_id6661
LMIC.frame[19] = (values[11]+0x8000) >> 8; //// v11
LMIC.frame[20] = (values[11]+0x8000) & 0xFF;
//Wind_direction_id240
LMIC.frame[21] = (values[12]+0x8000) >> 8; //// v12
LMIC.frame[22] = (values[12]+0x8000) & 0xFF;
//Wind_speed_id6539
LMIC.frame[23] = values[13]; //v13
//Wind_gust_id6541
LMIC.frame[24] = (values[14]+0x8000) >> 8; //// v14
LMIC.frame[25] = (values[14]+0x8000) & 0xFF;
//Rainfall_id230
LMIC.frame[26] = values[15]; //v15
//Rainfall_id234
LMIC.frame[27] = values[16]; //v16
//Battery_level_id0
LMIC.frame[28] = values[17]; //v17
//year

```

```

LMIC.frame[29] = values[18]; //v18
//month
LMIC.frame[30] = values[19]; //v19
//day
LMIC.frame[31] = values[20]; //v20
//hour
LMIC.frame[32] = values[21]; //v21
//minute
LMIC.frame[33] = values[22]; //v22
//second
LMIC.frame[34] = values[23]; //v23

//total of 35 bytes payload

LMIC_setTxData2(1, LMIC.frame, 35, 1); // (port 1, 35 bytes, confirmed(1) or unconfirmed(0))

// reschedule job in .... seconds

os_setTimedCallback(j, os_getTime()+sec2osticks(600), reportfunc); ///desired interim between jobs
}

////////////////////////////////////
// LMIC EVENT CALLBACK
////////////////////////////////////

void onEvent (ev_t ev) {
    debug_event(ev);

    switch(ev) {

        case EV_JOINED:
            reportfunc(&reportjob);
            break;

    }
}
}

```

10.1.3 crontab (LoRa node)

```
MAILTO=""

# pll.1.py: Takes latest data from zeno.csv and puts them in delta.csv, which is continuously updated
*/5 * * * * python /home/pi/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/bin/pll.1.py

# data sending loop
# STOP periodic: kill periodic every 12 hours
57 11 * * * sudo pkill -f periodic

# START periodic: takes data from delta.csv and sends it via LoRa modulation to TTN
59 11 * * * /home/pi/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/build/periodic.out

# STOP periodic: kill periodic every 12 hours
57 23 * * * sudo pkill -f periodic

# START periodic: takes data from delta.csv and sends it via LoRa modulation to TTN
59 23 * * * /home/pi/lmic-rpi-lora-gps-hat-master/examples/periodic/build/periodic.out
```

10.1.4 TTN decoder

```
function Decoder (bytes, port) {
  var v0 = ( ( bytes[0] << 8) | bytes[1]) - 0x8000;
  var v1 =  bytes[2];
  var v2 = ( ( bytes[3] << 8) | bytes[4]) - 0x8000;
  var v3 =  bytes[5];
  var v4= ( ( bytes[6] << 8) | bytes[7]) - 0x8000;
  var v5= ( ( bytes[8] << 8) | bytes[9]) - 0x8000;
  var v6 = ( ( bytes[10] << 8) | bytes[11]) - 0x8000;
  var v7= ( ( bytes[12] << 8) | bytes[13]) - 0x8000;
  var v8= ( ( bytes[14] << 8) | bytes[15]) - 0x8000;
  var v9 =  bytes[16];
  var v10 = ( ( bytes[17] << 8) | bytes[18]) - 0x8000;
  var v11= ( ( bytes[19] << 8) | bytes[20]) - 0x8000;
  var v12 = ( ( bytes[21] << 8) | bytes[22]) - 0x8000;
```

```

var v13 = bytes[23];
var v14 = ( ( bytes[24] << 8) | bytes[25]) - 0x8000;
var v15 = bytes[26];
var v16 = bytes[27];
var v17 = bytes[28];
var v18 = bytes[29];
var v19 = bytes[30];
var v20 = bytes[31];
var v21 = bytes[32];
var v22 = bytes[33];
var v23 = bytes[34];
return {
    Temperature_id232: v0 / 10.0,
    Humidity_id233: v1,
    Temperature_id247: v2 / 10.0,
    Humidity_id248: v3,
    Total_solar_radiation_id237: v4,
    Diffuse_solar_radiation_id238: v5,
    Sunshine_duration_id236: v6,
    Solar_radiation_id9141: v7,
    Barometric_pressure_id5461: v8 / 10.0,
    Wind_speed_id6659: v9 / 10.0,
    Wind_gust_id9139: v10 / 10.0,
    Wind_direction_id6661: v11,
    Wind_direction_id240: v12,
    Wind_speed_id6539: v13 / 10.0,
    Wind_gust_id6541: v14 / 10.0,
    Rainfall_id230: v15 / 10.0,
    Rainfall_id234: v16 / 10.0,
    Battery_level_id0: v17,
    Timestamp: (v18+" "+v19+" "+v20+" "+v21+":"+v22+":"+v23)
};
}

```


10.1.6 crontab (ενδιάμεσος host)

```
PATH=/home/pi/.local/bin:/usr/local/sbin:/usr/local/bin:/usr/sbin:/usr/bin:/sbin:/bin:/usr/local/games:/usr/games:/home/pi/.local/bin/loggertodb:/var/tmp:/home/pi/raw2enhydris/bin

MAILTO=""

## mosquito subscribing loop (12h cycle)
# STOP mosquito MQTT server
57 8 * * * sudo pkill -f mosquito
# START mosquito MQTT server
59 8 * * * bash /home/pi/raw2enhydris/bin/mosquitto.sh
# STOP mosquito MQTT server
57 20 * * * sudo pkill -f mosquito
# START mosquito MQTT server
59 20 * * * bash /home/pi/raw2enhydris/bin/mosquitto.sh

## takes input from raw.csv and appends desired data to enhydris.csv (every 5 minutes)
*/5 * * * * python /home/pi/raw2enhydris/bin/raw2enhydris.py

## takes input from enhydris.csv and uploads it at enhydris (dummy) weather station 1533 (every 10 min)
*/10 * * * * sudo loggertodb /var/tmp/loggertodb.conf
```

10.2 Υλοποίηση κεφαλαίου 8

10.2.1 LoRa_Mayfly.ino

```
#include <TheThingsNetwork.h>
#include <rn2xx3.h>
#include <dht11.h>
#include <Wire.h>
#include "Sodaq_DS3231.h" //internal temp sensor
#include <SPI.h>
```



```

#include <SD.h>

#define DHT11PIN 4

#define loraSerial Serial1

#define debugSerial Serial

// int ledPin = 11; //optional blink for test purposes

byte voltPin = A4; //assigns the voltage input pin
int readValue; //value received from the voltPin
float voltage; //declare the voltage variable
float perc; //percentage of battery level

dht11 DHT11;
File myFile;
int pinCS = 12; // check schematic
String timestamp;

// Set your DevAddr, NwkSKey, AppSKey and the frequency plan
const char *devAddr = "2601181B";
const char *nwksKey = "A7966BB3EDDDDAC2D9417DCDD4EABA0A";
const char *appSKey = "43270D263391DE046801BCDE3385613B";

// Replace REPLACE_ME with TTN_FP_EU868 or TTN_FP_US915 to select frequency plan
#define freqPlan TTN_FP_EU868

TheThingsNetwork ttn(loraSerial, debugSerial, freqPlan);

void setup()
{
  loraSerial.begin(57600);
  debugSerial.begin(57600);
  Wire.begin(); //date/time
  rtc.begin(); //date/time

```

```

SD.begin(); //SD card

// Wait a maximum of 10s for Serial Monitor
while (!debugSerial && millis() < 10000);

debugSerial.println("-- PERSONALIZE");
ttn.personalize(devAddr, nwkSKey, appSKey);

debugSerial.println("-- STATUS");
ttn.showStatus();

pinMode(voltPin, INPUT); //input variable dc voltage
Serial.begin(57600); //start serial port

// pinMode(ledPin, OUTPUT);/////optional blink for test purposes

}
void loop()
{
  debugSerial.println("-- LOOP");

//reading sensors
  int chk = DHT11.read(DHT11PIN);
  int temp1 = int (10*DHT11.temperature);
  int temp2 = int(10*rtc.getTemperature());
  int hum = DHT11.humidity;

//reading battery voltage and computing % level (from 3.2 to 4.2 V -> 0 - 100%)
  int readValue = analogRead(voltPin); //read pin A4 value
  float voltage = (2*float(readValue)/1304)*4.2; //calculates real world voltage
  float perc = (voltage-3.2)*100; // 100%->4.2V, 90%->4.1V ... 10%->3.3V, 0%->3.2V >>>>>> BATTERY
  MUST BE >=3.2V!!!
  int batVolt = int(100*voltage);

```

```

int batLev = int (100*perc);

// get current time
DateTime now = rtc.now(); //get the current date-time
String d = String(now.date());
String h = String(now.hour());
String m = String(now.minute());
String M = String(now.month());
String y = String(now.year());
timestamp = (d+" "+h+"h"+m+" "+"B"+" "+M+" "+y);

// Create/Open file
myFile = SD.open("donnees.txt", FILE_WRITE);

// write file
myFile.println(timestamp+" "+"dht-temp:"+temp1/10+"oC"+" "+"rtc-temp:"+temp2/10+"oC"+" "+"dht-
hum:"+hum+"%"+" "+"battery:"+voltage+"V"+"("+perc+"%"+"");

// Close file
myFile.close(); // close the file

// pack data in array
byte samples[35];
samples[0] = (temp1+0x8000) >> 8;
samples[1] = (temp1+0x8000) & 0xFF;
samples[2] = (temp2+0x8000) >> 8;
samples[3] = (temp2+0x8000) & 0xFF;
samples[4] = hum;
samples[5] = (batVolt+0x8000) >> 8;
samples[6] = (batVolt+0x8000) & 0xFF;
samples[7] = (batLev+0x8000) >> 8;
samples[8] = (batLev+0x8000) & 0xFF;

```

```
samples[9] = (temp1+0x8000) >> 8;
samples[10] = (temp1+0x8000) & 0xFF;
samples[11] = (temp2+0x8000) >> 8;
samples[12] = (temp2+0x8000) & 0xFF;
samples[13] = hum;
samples[14] = (batVolt+0x8000) >> 8;
samples[15] = (batVolt+0x8000) & 0xFF;
samples[16] = (batLev+0x8000) >> 8;
samples[17] = (batLev+0x8000) & 0xFF;

samples[18] = (temp1+0x8000) >> 8;
samples[19] = (temp1+0x8000) & 0xFF;
samples[20] = (temp2+0x8000) >> 8;
samples[21] = (temp2+0x8000) & 0xFF;
samples[22] = hum;
samples[23] = (batVolt+0x8000) >> 8;
samples[24] = (batVolt+0x8000) & 0xFF;
samples[25] = (batLev+0x8000) >> 8;
samples[26] = (batLev+0x8000) & 0xFF;

samples[27] = (temp1+0x8000) >> 8;
samples[28] = (temp1+0x8000) & 0xFF;
samples[29] = (temp2+0x8000) >> 8;
samples[30] = (temp2+0x8000) & 0xFF;
samples[31] = (batVolt+0x8000) >> 8;
samples[32] = (batVolt+0x8000) & 0xFF;
samples[33] = (batLev+0x8000) >> 8;
samples[34] = (batLev+0x8000) & 0xFF;

Serial.println(DHT11.temperature);
Serial.println(temp2/10);
Serial.println(DHT11.humidity);
Serial.println(voltage);
```

```

Serial.println(perc);
Serial.println(timestamp);

// Send it: dst TTN backend, through some GW
ttn.sendBytes(samples, sizeof(samples));

/* //optional blink for test purposes
for (int i = 0; i <= 9; i++) {
  digitalWrite(ledPin, HIGH);
  delay(100);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  delay(100);
}
*/

delay(600000); // 10 min interval
}

```

10.2.2 TTN decoder

```

function Decoder (bytes, port) {
// decodes only the first 9 bytes (not the padding bytes [9] to [34])
var v0 = ( ( bytes[0] << 8) | bytes[1]) - 0x8000;
var v1 = ( (bytes[2] << 8) | bytes[3]) - 0x8000;
var v2 = bytes[4];
var v3 = ( ( bytes[5] << 8) | bytes[6]) - 0x8000;
var v4 = ( (bytes[7] << 8) | bytes[8]) - 0x8000;
return {
  Temperature_dht11: v0 / 10.0,
  Temperature_rtc: v1 / 10.0,
  Humidity_dht11: v2,
  Battery_voltage: v3 / 100,
  Battery_level: v4 / 100
};
}

```

Βιβλιογραφία

- [1] Towards a definition of the Internet of Things (IoT), May 2015, IEEE
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things
- [3] Slavica Tomovic, Kenji Yoshigoe, Ivo Maljevic, Igor Radusinovic (2016). Software-Defined Fog Network Architecture for IoT
- [4] <https://medium.com/datadriveninvestor/10-powerful-iot-examples-worth-your-attention-1c06276a2e54>
- [5] <https://www.linkedin.com/pulse/advantages-disadvantages-internet-things-iot-tommy-quek>
- [6] <https://www.jagranjosh.com/general-knowledge/internet-of-things-iot-1565609083-1>
- [7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
- [8] Bluetooth Core Specification v5.2, 2019-12-31, Bluetooth SIG Proprietary
- [9] <https://fr.wikipedia.org/wiki/ZigBee>
- [10] Navigating your way through the RFID jungle, 2014, Texas Instruments Incorporated
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Communication_en_champ_proche
- [12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Z-Wave>
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/WirelessHART>
- [14] EnOcean Radio Protocol 2, v1.2, June 20 2017, EnOcean
- [15] <https://fr.wikipedia.org/wiki/4G>
- [16] ETSI TS 138 101-2 V15.2.0 (2018-07) [5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (3GPP TS 38.101-2 version 15.2.0 Release 15)]
- [17] 3GPP TR 36.802 V13.0.0 (2016-06) [3rd Gener. Partnership Project; Tech. Spec. Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-[21]UTRA); NB-IOT; Tech. Rep. for BS and UE radio transmission and reception (Release 13)]

- [18] Sigfox connected objects: Radio specifications, Rev. 1.3, Feb 2019, SigFox
- [19] LoRaWAN™ 1.1 Specification (2017) , LoRa Alliance, Inc.
- [20] <https://en.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
- [21] <https://www.ingenu.com/technology/rpma/how-rpma-works/>
- [22] [https://en.wikipedia.org/wiki/Weightless_\(wireless_communications\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Weightless_(wireless_communications))
- [23] ETSI EN 301 428 v1.1.1 (1999-12) [Satellite Earth Stations and Systems (SES); Harmonized EN for Very Small Aperture Terminal (VSAT); Transmit-only, transmit/receive or receive-only satellite earth stations operating in the 11/12/14 GHz frequency bands covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE directive]
- [24] <https://de.wikipedia.org/wiki/Ethernet>
- [25] <https://de.wikipedia.org/wiki/PowerLAN>
- [26] <https://www.quora.com/What-are-the-advantages-and-disadvantages-of-the-Internet-of-Things>
- [27] Χρήστος Ν. Καψάλης, Παναγιώτης Θ. Τρακαδάς, *Εισαγωγή στην ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα*, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2006
- [28] K. Wiklundh, P. Stenumgaard, “EMC Challenges of the Internet of Things”, 2017
- [29] Kais Mekkia, Eddy Bajica, Frederic Chaxela, Fernand Meyerb (2017). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment
- [30] Jean-Paul Bardyn, Thierry Melly, Olivier Seller, Nicolas Sornin (2016). IoT : The Era of LPWAN is starting now
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/Narrowband_IoT
- [32] <https://enterpriseiotinsights.com/20181015/nb-iot/vodafone-announces-nbiot-networkexpansions-spain-germany>
- [33] <https://www.analysismason.com/Research/Content/Comments/China-IoT-benefits-RDME0-RDRP0/>
- [34] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sigfox>

- [35] LoRa Alliance End of Year Report, 2018, LoRa Alliance, Inc.
- [36] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, Seung-Hoon Hwang (2017). A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT
- [37] LoRaWAN™ What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™, 2015, LoRa Alliance, Inc.
- [38] AN1200.22: LoRa™ Modulation Basics, (2015), Semtech Corporation
- [39] https://en.wikipedia.org/wiki/Spread_spectrum
- [40] A. Bruce Carlson, Paul B. Crilly, *Communication Systems: An introduction to signals and noise in electrical communication*, McGraw – Hill International Edition, 5th edition, 2010
- [41] https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-the-a-transmitter-and-b-receiver-of-the-DSSS-system_fig2_329286286
- [42] https://www.researchgate.net/figure/General-form-of-frequency-hopping-system-a-transmitter-and-b-receiver-The_fig3_26623726
- [43] Brody Dunlop, Ha H. Nguyen, R. Barton and J. Henry (2019). Interference Analysis for LoRa Chirp Spread Spectrum Signals
- [44] Nikola Jovalekic , Vujo Drndarevic, Ermanno Pietrosemoli, Iain Darby, Marco Zennaro (2018). Experimental Study of LoRa Transmission over Seawater
- [45] <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#modulation-types-and-chirp-spread-spectrum>
- [46] <https://www.slideshare.net/ajal4u/chirps>
- [47] Aiju Thomas, N V Eldhose (2019). SCALABILITY CONCERNS OF CHIRP SPREAD SPECTRUM FOR LPWAN APPLICATIONS
- [48] https://www.mobilefish.com/download/lora/lora_part15.pdf
- [49] <https://www.thethingsnetwork.org/conference/videos/>
- [50] <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture.html>
- [51] Xing Ouyang, Octavia A. Dobre, Yong Liang Guan and Jian Zhao (2017). Chirp Spread Spectrum towards the Nyquist Signaling Rate Orthogonality Condition and Applications

- [52] <https://lora-alliance.org/>
- [53] RP002-1.0.0 LoRaWAN Regional Parameters, 2019, LoRa Alliance, Inc.
- [54] ETSI EN 300 220-2 V3.2.1 (2018-04) [Short Range Devices (SRD) operating in the frequency range 25 MHz to 1 000 MHz; Part 2: Harmonised Standard for access to radio spectrum for non specific radio equipment]
- [55] Κανονισμός Όρων Χρήσης Μεμονωμένων Ραδιοσυχνοτήτων ή Ζωνών Ραδιοσυχνοτήτων (EETT, ΦΕΚ 1241/Β/09-04-2020)
- [56] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melià-Seguí, Thomas Watteyne (2017). Understanding the Limits of LoRaWAN
- [57] www.thethingsnetwork.org
- [58] <https://www.thethingsnetwork.org/docs/network/>
- [59] <https://www.thethingsindustries.com/>
- [60] <https://lacuna.space/the-things-network-to-provide-lorawan-satellite-connectivity-for-evaluation-in-2020/>
- [61] <https://mosquitto.org/>
- [62] <https://openmeteo.org/>
- [63] <https://tago.io/>
- [64] <https://www.raspberrypi.org/>
- [65] https://wiki.dragino.com/index.php?title=Lora/GPS_HAT
- [66] <https://www.envirodiy.org/mayfly/>
- [67] <https://sodaq.com/>
- [68] http://www.teidasoponias.gr/site/news/xtra/morfologia/katataksi_klima.pdf
- [69] Παναγιώτης Γ. Κωττής, Παντελής – Δανιήλ Μ. Αράπογλου, *Ασύρματες Επικοινωνίες*, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2017

- [70] <https://openmeteo.org/stations/1533/>
- [71] IBM LoRaWAN in C (LMiC) Technical Specification, version 1.6 (2016), IBM Corporation
- [72] <https://github.com/wklenk/lmic-rpi-lora-gps-hat>
- [73] <https://github.com/openmeteo/loggertodb>
- [74] <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [75] Δέρβος Θ. Κωνσταντίνος, *Φωτοβολταϊκά συστήματα: από τη θεωρία στην πράξη*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2013