

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα*

Master of Science in  
*Internetworked Electronic Systems*

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υλοποίηση πύλης δικτύου σταθμού βάσης για επικοινωνίες μικρού εύρους ζώνης / μεγάλης εμβέλειας για IoT εφαρμογές



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Ιωάννης Μητρόπουλος, Α.Μ. IES-0004  
Επιβλέπων: Παναγιώτης Παπαγέωργας, Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019

---

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
*Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα*

Master of Science in  
*Internetworked Electronic Systems*

## MSc Thesis

Implementation of a base station gateway for the support of short bandwidth / long\_\_\_\_  
range communications for IoT application



Student: Mitropoulos, Ioannis, Reg. Nr. IES-0004

MSc Thesis Supervisor: Papageorgas, Panagiotis, Professor

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2019

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η εξέταση των διαθέσιμων τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας, για την υλοποίηση εφαρμογών του διαδικτύου των πραγμάτων. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιείται μία παρουσίαση των χαρακτηριστικών κάθε τεχνολογίας και σύγκριση αυτών συναρτήσει των απαιτήσεων που προδιαγράφονται από τις πιθανές εφαρμογές.

Εν συνεχεία πραγματοποιείται μία εξέταση της δομής και της λειτουργίας του πρωτοκόλλου LoRaWAN τόσο σε φυσικό επίπεδο όσο και σε επίπεδο δικτύου, καθώς το LoRaWAN είναι μία από τις ισχυρότερες προτάσεις και μία από τις περισσότερο αναπτυσσόμενες τεχνολογίες όσον αφορά τις παγκόσμιες επενδύσεις στην υλοποίηση των υποδομών και των τελικών συσκευών για την εξυπηρέτηση των σκοπών του διαδικτύου των πραγμάτων.

Τέλος, πραγματοποιείται η ανάπτυξη ενός ιδιωτικού δικτύου LoRaWAN μέσω της υλοποίησης μίας πύλης δικτύου και μίας τελικής συσκευής, οι οποίες συνδέονται με τον εξυπηρετητή δικτύου και τον εξυπηρετητή εφαρμογής. Για την εξέταση της λειτουργίας του δικτύου υλοποιήθηκε μία δοκιμαστική εφαρμογή ώστε να είναι εφικτή η καταγραφή των διακινούμενων δεδομένων και η επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας, βάσει των λεπτομερειών λειτουργίας που προδιαγράφει το πρωτόκολλο δικτύωσης.

**ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ:** LoRa, LoRaWAN, Δίκτυα χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας, Διαδίκτυο των πραγμάτων, Επικοινωνίες στενού εύρους ζώνης, Πύλη Δικτύου, Τελικός Κόμβος

## ABSTRACT

The purpose of this thesis is to examine the available low-power, wide area wireless networking technologies for implementing internet of things oriented applications. For this purpose, a presentation of the characteristics of each technology is performed and these are compared to the requirements specified by the potential applications.

Thereafter, an examination of the structure and operation of the LoRaWAN protocol at both physical and network level is being undertaken as LoRaWAN is one of the strongest proposals and one of the most evolving technologies in terms of global investment in infrastructure and end-device implementation for the purposes of the Internet of Things.

Finally, a private LoRaWAN network is realised by implementing a network gateway and an end device that are connected to the network server and the application server. To test the operation of this network, a test application was implemented to enable the recording of the transferred data and to confirm the correct operation of the system on the basis of the operating details specified by the networking protocol.

**KEYWORDS:** End Node, Gateway, Internet of Things, LoRa, LoRaWAN, Low Power Wide Area Networks , Ultra Narrow Band Communications

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ-ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ-ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

3GPP	3rd Generation Partnership Project
ABP	Activation By Personalization
ADR	Adaptive Data Rate
AP	Access Point
AppEUI	Application Unique Identifier
AppSKey	Application Session Key
AR	Automatic Reply
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BER	Bit Error Rate
BW	Band Width
CAT-M1	Category M1
CAT-NB1	Category Narrowband IoT 1
CBOR	Concise Binary Object Representation
CF	Carrier Frequency
CH	Channel
CLK	Clock
CPU	Central Processing Unit
CR	Coding Rate
CRC	Cyclic Redudancy Check
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSS	Chirp Spread Spectrum
dB	Decibel
Dcycle	Duty cycle
DevAddr	Device Address
DevEUI	Device Unique Identifier
DL	Downlink
DnCTR	Downlink Counter
Drange	Data rate range
DRX	Discontinuous Reception
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory

ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCC	Federal Communications Commission
FDD	Frequency Division Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FOTA	Firmware Over The Air
FSK	Frequency Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPIO	General Purpose Input Output
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GSM A	GSM Association
GW	GateWay
HAL	Hardware Abstraction Layer
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific and Medical
JSON	JavaScript Object Notation
LBT	Listen Before Transmit
LoRa	Semtech's Long Range modulation
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long-term Evolution
LTE MTC	Long-Term Evolution Machine Type Communications
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
MCU	MicroController Unit
MIC	Message Integrity Code
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave In
NB	Narrowband
NB-IoT	Narrowband IoT
NwkSKey	Network Session Key
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
O-QPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying

OTAA	Over The Air Activation
PCB	Printed Circuit Board
PHY	Physical Layer
PwrIdx	Power Index
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RAM	Random Access Memory
ReTX	ReTransmission
RF	Radio Frequency
RSSI	Received Signal Strength Indication
RTC	Real Time Clock
Rx	Receiver
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SF	Spreading Factor
SIG	Special Interest Group
SMT	Surface Mounted Technology
SNR	Signal to Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
TOA	Time On Air
TRX	Transceiver
TTN	The Things Network
TVWS	TV White Space
Tx	Transmitter
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UHF	Ultra High Frequencies
UL	Uplink
UNB	Ultra Narrow Band
UpCTR	Uplink Counter
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultra Violet
VoLTE	Voice over LTE
WAN	Wide Area Network
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1. Το διαδίκτυο των πραγμάτων.....	17
1.1. Τι είναι το διαδίκτυο των πραγμάτων.....	17
1.2. Πεδία εφαρμογής του διαδικτύου των πραγμάτων.....	18
1.3. Τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης LPWAN.....	22
1.3.1. SigFox.....	22
1.3.2. Weightless.....	24
1.3.3. LoRa.....	25
1.3.4. Symphony Link.....	26
1.3.5. NB-IoT.....	27
1.3.6. LTE-M.....	28
1.4. Σύγκριση ασυρμάτων τεχνολογιών LPWAN.....	29
2. Το LoRaWAN πρωτόκολλο.....	34
2.1. Τι είναι το LoRaWAN.....	34
2.2. LoRa Alliance.....	35
2.3. Η αρχιτεκτονική του LoRaWAN.....	36
2.3.1. Τελικές συσκευές.....	38
2.3.1.1. Οι κλάσεις των τελικών συσκευών.....	39
2.3.2. Η πύλη δικτύου.....	42
2.3.2.1. Η χωρητικότητα της πύλης.....	43
2.3.2.2. Παράμετροι εγκατάστασης / προστασία.....	43
2.3.2.3. Ενεργειακές απαιτήσεις.....	45
2.3.3. Ο εξυπηρετητής δικτύου.....	46
2.3.4. Ο εξυπηρετητής εφαρμογής.....	47
2.4. Τα επίπεδα του LoRaWAN.....	48
2.4.1. Το φυσικό επίπεδο.....	48
2.4.1.1. Η τεχνολογία LoRa.....	48



2.4.1.1.1. Διαμόρφωση διευρυμένου φάσματος.....	49
2.4.1.1.2. Διαμόρφωση διευρυμένου φάσματος LoRa.....	52
2.4.1.2. Παράμετροι μεταδόσεως LoRa.....	55
2.4.2. Το επίπεδο δικτύου.....	56
2.4.2.1. Βασικές παράμετροι του LoRaWAN.....	56
2.4.2.2. Ενεργοποίηση τελικής συσκευής.....	59
2.4.2.2.1. Ενεργοποίηση μέσω του αέρα.....	59
2.4.2.2.2. Απευθείας ενεργοποίηση.....	63
2.4.3 Το επίπεδο εφαρμογής.....	64
2.5. Η μορφή των πακέτων δεδομένων.....	65
2.6. Η ασφάλεια του Δικτύου.....	68
2.7. Απώλεια δεδομένων.....	69
2.8. Οι Περιορισμοί / κανόνες δίκαιας χρήσεως του δικτύου.....	71
2.8.1. Προτυποποίηση χρήσεως ραδιοσυχνοτήτων.....	72
2.8.2. Κύκλος λειτουργίας και χρόνος στον αέρα.....	73
2.8.3. Τα συχνοτικά κανάλια του LoRaWAN.....	76
2.9. Ισοζύγιο ισχύος ασύρματης ζεύξεως.....	77
3. Υλοποίηση ιδιωτικού δικτύου	
LoRaWAN.....	79
3.1. Υλοποίηση της πύλης δικτύου.....	79
3.1.1. Το WiMOD iC880A LoRa concentrator board.....	79
3.1.2. Το Raspberry Pi 3.....	82
3.1.3. Σύνδεση του Raspberry Pi 3 με το iC880A.....	84
3.2. Σύνδεση της πύλης δικτύου στον εξυπηρετητή δικτύου.....	86
3.3. Υλοποίηση του τελικού κόμβου.....	89
3.3.1. Το RN2483 LoRa transceiver module.....	89
3.3.1.1. Η λειτουργία του RN2483.....	91
3.3.2. Το STM32F401 Nucleo-64 development board.....	93

3.3.3. Διασύνδεση του STM32F401 Nucleo-64 με την διάταξη RN2483 .....	94
3.3.4. Προγραμματισμός του τελικού κόμβου.....	95
3.4. Δημιουργία εφαρμογής.....	99
3.5. Επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του συστήματος.....	102
3.5.1. Επικοινωνία STM32F401 Nucleo-64 και RN2483.....	103
3.5.2. Διακίνηση δεδομένων στον TTN εξυπηρετητή δικτύου.....	106
3.5.3. Διακίνηση δεδομένων στον εξυπηρετητή εφαρμογής.....	107
3.5.4. Μετρήσεις απαιτήσεων ισχύος πύλης δικτύου.....	109
3.5.5. Μετρήσεις απαιτήσεων ισχύος τελικού κόμβου.....	110
3.5.6. Έλεγχος εμβελείας καλύψεως της πύλης δικτύου.....	111
3.5.7. Μετρήσεις ταχύτητας δεδομένων και χρόνου στον αέρα.....	113
4. Συμπεράσματα – προτάσεις.....	115
5. Βιβλιογραφία - πηγές.....	120
6. Παραρτήματα .....	124
6.1. Κώδικας τελικού κόμβου στην πλατφόρμα ARM mbed online.....	124
6.2. Σχηματικά / PCB layout για το RN2483 breakout board.....	128
6.3. Λίστα υλικών / κοστολόγιο πύλης δικτύου.....	130
6.4. Λίστα υλικών / κοστολόγιο τελικού κόμβου.....	131

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών ανά πληθυσμό παγκοσμίως και ανάπτυξη της αγοράς IoT έως το έτος 2020 [3].....	17
Εικόνα 2: Ενδεικτικά πεδία εφαρμογής του διαδικτύου των πραγμάτων [48].....	21
Εικόνα 3: Το λογότυπο της τεχνολογίας sigfox.....	23
Εικόνα 4: Το λογότυπο της τεχνολογίας Weightless.....	25
Εικόνα 5: Το λογότυπο της τεχνολογίας LoRa.....	26
Εικόνα 6: Το λογότυπο της τεχνολογίας NB-IoT.....	27
Εικόνα 7: Το λογότυπο της τεχνολογίας LTE-M.....	28
Εικόνα 8: Αριθμός λειτουργιών δικτύων LPWAN για το IoT το έτος 2018 [40].....	30
Εικόνα 9: Σύγκριση του NB-IoT με τις τεχνολογίες LPWAN και LTE με κριτήρια την απαιτούμενη ισχύ και τους υποστηριζόμενους ρυθμούς δεδομένων [2].....	32
Εικόνα 10: Σύγκριση των SigFox, LoRa και NB-IoT συναρτήσει των παραγόντων ενδιαφέροντος όσον αφορά το διαδίκτυο των πραγμάτων [6].....	33
Εικόνα 11: Επίπεδα πρωτοκόλλου LoRaWAN (LoRaWAN stack) [32].....	34
Εικόνα 12: Τοπολογία δικτύου LoRaWAN [11].....	36
Εικόνα 13: Βασικά δομικά μέρη ενός τυπικού τελικού κόμβου.....	38
Εικόνα 14: Παράθυρα λήψεως τελικής συσκευής μετά την αποστολή [14].....	40
Εικόνα 15: Ενεργειακές απαιτήσεις και εφαρμογές κλάσεων LoRaWAN [11].....	41
Εικόνα 16: Δομικό-Block διάγραμμα συγκεντρωτή LoRa υλοποιημένου με το SX1301 ολοκληρωμένο της Semtech [29].....	42
Εικόνα 17: Διαμόρφωση διευρυμένου φάσματος [15].....	50
Εικόνα 18: Αποδιαμόρφωση διευρυμένου φάσματος [15].....	51
Εικόνα 19: Διαμόρφωση LoRa για διαφορετικούς συντελεστές διευρύνσεως.....	53
Εικόνα 20: Διαμόρφωση δεδομένων LoRa για ορισμένο συντελεστή διευρύνσεως [39].....	54
Εικόνα 21: Η διαδικασία ενεργοποίησης OTAA [43].....	60
Εικόνα 22: Η δομή του πακέτου Join Request [32].....	60
Εικόνα 23: Η δομή του πακέτου Join Accept [32].....	61
Εικόνα 24: Τα επίπεδα ασφαλείας της ενεργοποίησης OTAA [43].....	62
Εικόνα 25: Η διαδικασία ενεργοποίησης ABP [43].....	63
Εικόνα 26: Δομή πακέτου στο φυσικό επίπεδο [32].....	66
Εικόνα 27: Δομή πλαισίου PHYPayload [32].....	66
Εικόνα 28: Δομή πλαισίου MACPayload [32].....	67
Εικόνα 29: Δομή πλαισίου FHDR [32].....	67
Εικόνα 30 : Τα επίπεδα ασφαλείας του LoRaWAN [19].....	68
Εικόνα 31: Ισοζύγιο ισχύος ζεύξεως και περιθώριο ισχύος ασύρματης ζεύξεως [43].....	78
Εικόνα 32: Το WiMOD iC880A .....	81
Εικόνα 33: Τα GPIO του Raspberry Pi 3 Model B .....	83
Εικόνα 34: Το Raspberry Pi 3 Model B .....	83
Εικόνα 35: Σύνδεση του RPI 3 με το WiMOD iC880A.....	85
Εικόνα 36: Η υλοποίηση της πύλης δικτύου LoRaWAN.....	85

Εικόνα 37: Τοπογραφική απεικόνιση των συνδεδεμένων πυλών δικτύου LoRaWAN στο TTN .....	86
Εικόνα 38: Στιγμιότυπο της εγκατάστασης λογισμικού πύλης δικτύου TTN - LoRaWAN στην γραμμή εντολών του RPI 3.....	87
Εικόνα 39: Επισκόπηση της πύλης δικτύου στην κονσόλα του TTN.....	88
Εικόνα 40: Επισκόπηση και καταγραφή της κινήσεως δικτύου στο πεδίο Gateway Traffic της κονσόλας TTN.....	88
Εικόνα 41: Η μονάδα RN2483 της Microchip και το σχηματικό της διάγραμμα [24].....	89
Εικόνα 42: Περιγραφικό Δομικό-block διάγραμμα της μονάδος RN2483 της Microchip [24] .....	90
Εικόνα 43: Το STM32F401 Nucleo-64 αναπτυξιακό.....	93
Εικόνα 44: Σχηματικό διάγραμμα του τελικού κόμβου.....	94
Εικόνα 45: Φωτογραφίες των δύο όψεων του τελικού κόμβου LoRaWAN.....	94
Εικόνα 46: Ο embed online compiler.....	95
Εικόνα 47: Η κυρίως συνάρτηση του προγράμματος της τελικής συσκευής.....	96
Εικόνα 48: Διάγραμμα ροής της συναρτήσεως αποστολής πακέτου της τελικής συσκευής .....	97
Εικόνα 49: Διάγραμμα ροής της συναρτήσεως αρχικοποιήσεως των παραμέτρων LoRaWAN και συνδέσεως της τελικής συσκευής.....	98
Εικόνα 50: Οι καταχωρημένες τελικές συσκευές στο περιβάλλον AllThingsTalk Maker.....	99
Εικόνα 51: Οι τύποι μεταβλητών στο περιβάλλον AllThingsTalk Maker.....	100
Εικόνα 52: Πίνακας καταχωρημένων μεταβλητών στο περιβάλλον AllThingsTalk Maker .....	100
Εικόνα 53: Ο καθορισμός της μορφής των δεδομένων εφαρμογής στο περιβάλλον AllThingsTalk Maker.....	101
Εικόνα 54: Η πειραματική διάταξη με την πύλη δικτύου και την τελική συσκευή.....	102
Εικόνα 55: Εντολές αρχικοποιήσεως ASCII που αποστέλλονται στην μονάδα RN2483.....	103
Εικόνα 56: Απόκριση της μονάδος RN2483 στις εντολές αρχικοποιήσεως.....	103
Εικόνα 57: Δεδομένα εφαρμογής που αποστέλλονται στην μονάδα RN2483.....	104
Εικόνα 58: Απόκριση της μονάδος RN2483 μετά την αποστολή των δεδομένων εφαρμογής .....	104
Εικόνα 59: Απόκριση της μονάδος RN2483 μετά την αποστολή των δεδομένων εφαρμογής όταν υπάρχει εισερχόμενο πακέτο από την εφαρμογή.....	104
Εικόνα 60: Ο συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων της εφαρμογής.....	105
Εικόνα 61: Καταγραφή διακινούμενων δεδομένων στον εξυπηρετητή δικτύου.....	106
Εικόνα 62: Ανάλυση περιεχομένων ανερχόμενου πακέτου στον εξυπηρετητή δικτύου.....	107
Εικόνα 63: Καταγραφή διακινούμενων δεδομένων στο επίπεδο της εφαρμογής.....	107
Εικόνα 64: Ανάλυση περιεχομένου ανερχόμενου πακέτου δεδομένων στο επίπεδο της εφαρμογής.....	108
Εικόνα 65: Ανάλυση περιεχομένου κατερχόμενου πακέτου δεδομένων στο επίπεδο της εφαρμογής.....	108
Εικόνα 66: Μετρούμενη ζήτηση κατανάλωσης ρεύματος της πύλης δικτύου (RPI 3 και iC880) και του συγκεντρωτή ανεξάρτητα .....	109
Εικόνα 67: Μετρούμενη ζήτηση ρεύματος του συγκεντρωτή για διάφορους ρυθμούς διακινήσεως πακέτων του δικτύου.....	109
Εικόνα 68: Μετρούμενη ζήτηση ρεύματος του τελικού κόμβου σε δραστηριότητα και σε κατάσταση reset του μικροελεγκτή.....	110

Εικόνα 69: Μετρούμενη ζήτηση ρεύματος του τελικού κόμβου κατά την αποστολή και την λήψη πακέτου.....	110
Εικόνα 70: Γεωγραφική απεικόνιση της καλύψεως της πύλης δικτύου στον χάρτη.....	111
Εικόνα 71: Γεωγραφική απεικόνιση του εμβαδού καλύψεως της πύλης δικτύου στον χάρτη .....	112
Εικόνα 72: Σημασία του χρωματικού κώδικα ενδείξεως των απωλειών ζεύξεως.....	112
Εικόνα 73: Καταγραφή διακινούμενων πακέτων δεδομένων σε διαφορετικές συνθήκες απωλειών ασύρματης ζεύξεως.....	114
Εικόνα 74: Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας RN2483 Breakout board.....	128
Εικόνα 75: PCB Layout της πλακέτας RN2483 Breakout board.....	128
Εικόνα 76: Τριδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας RN2483 Breakout board.....	129
Πίνακας 1: Σύνοψη χαρακτηριστικών των τεχνολογιών ασύρματης δικτυώσεως IoT [1]....	31
Πίνακας 2: Απαιτήσεις ρεύματος συγκεντρωτή IC880 της Semtech με το SX1301 [21].....	45
Πίνακας 3: Απαιτήσεις ρεύματος ολοκληρωμένου SX1301 της Semtech [29].....	45
Πίνακας 4: Απαιτήσεις ρεύματος της WiMOD Lite Gateway της Semtech [30].....	46
Πίνακας 5: Κανονισμοί βάσει του ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012-01) [8].....	75
Πίνακας 6: Τοπικές παράμετροι χρήσεως ραδιοσυχνοτήτων LoRaWAN [11].....	76
Πίνακας 7: Προκαθορισμένα κανάλια LoRaWAN EU868MHz [33].....	77
Πίνακας 8: Συνδέσεις ακροδεκτών Raspberry Pi 3 Model B και WiMOD iC880A.....	84
Πίνακας 9: Οι διαθέσιμες παράμετροι προς επεξεργασία μέσω της εντολής mac set [23]....	91
Πίνακας 10: Καταγραφές χαρακτηριστικών μεταδόσεως ακραίων συνθηκών απωλειών ασύρματης ζεύξεως.....	113
Πίνακας 11: Λίστα υλικών και κοστολόγιο της πύλης δικτύου LoRaWAN.....	130
Πίνακας 12: Λίστα υλικών και κοστολόγιο του τελικού κόμβου LoRaWAN.....	131

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ:

### Αντικείμενο, ερευνητικά ερωτήματα και διάρθρωση της εργασίας

---

Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας και η παράλληλη μείωση του κόστους υλοποίησης, κτήσεως και χρήσεως της έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων μεθόδων επιλύσεως των διαφόρων προβλημάτων που αφορούν την καθημερινότητα, το αστικό περιβάλλον, την βιομηχανία, την γεωργία, το περιβάλλον και πολλών άλλων τομέων της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Το διαδίκτυο αρχικά όντας ένα μέσο επικοινωνίας των ανθρώπων έχει αρχίσει να μετατρέπεται και σε ένα μέσο επικοινωνίας των αντικειμένων με σκοπό την βέλτιστη εξυπηρέτηση των ανθρωπίνων αναγκών. Έτσι, έχει δημιουργηθεί ο σύγχρονος όρος «διαδίκτυο των πραγμάτων» που περιγράφει μία διαδικασία επικοινωνίας μεταξύ συσκευών και αντικειμένων για την συλλογή πληροφοριών και την εκτέλεση διαφόρων ενεργειών χωρίς να είναι αναγκαία η ανθρώπινη παρέμβαση.

Η υλοποίηση της διαδικασίας αυτής οδηγεί στην ανάγκη αναπτύξεως ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας με χαρακτηριστικά χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων και μεγάλης εμβέλειας ζεύξεως. Οι ασύρματες αυτές επικοινωνίες έχουν σαν σκοπό να συντελέσουν στην υλοποίηση δικτύων αισθητήρων και ενεργοποιητών και για την επιλογή της κατάλληλης ασύρματης λύσεως τίθενται ερωτήματα που σχετίζονται με τις παραμέτρους της εκάστοτε εφαρμογής όπως ο όγκος των διακινούμενων δεδομένων, η ασφάλεια, η αξιοπιστία επικοινωνίας, το κόστος, η εμβέλεια και η ενεργειακή αυτονομία. Έτσι πρέπει να πραγματοποιηθεί μία σύγκριση τόσο όσον αφορά τις ανάγκες μίας δεδομένης εφαρμογής όσο και όσον αφορά τις κοινές απαιτήσεις που καθορίζονται από την φιλοσοφία του διαδικτύου των πραγμάτων.

Τα αποτελέσματα αυτής της συγκρίσεως βγάζουν μεταξύ άλλων στο προσκήνιο την τεχνολογία διαμορφώσεως LoRa και την προδιαγραφή δικτύωσης LoRaWAN. Οπότε μέσω της παρούσας εργασίας θα πραγματοποιηθεί η εξέταση αυτής της τεχνολογίας στο λειτουργικό μέρος και στις διάφορες παραμέτρους του διαδικτύου των πραγμάτων με σκοπό να απαντηθούν τα προαναφερθέντα ερωτήματα που αφορούν την χρήση στο διαδίκτυο των

πραγμάτων. Ακόμη μέσω της υλοποίησης ενός δικτύου LoRaWAN και των βασικών συσκευών του θα μελετηθεί τόσο η αποτελεσματικότητα, όσο και η περιπλοκότητα και το κόστος της λύσεως αυτής.

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε τέσσερα κεφάλαια όπου σε κάθε ένα από αυτά εξετάζεται από μία συστατική συνιστώσα του διαδικτύου των πραγμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στο περιεχόμενο του διαδικτύου των πραγμάτων και τις διαθέσιμες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας μέσω των οποίων δύναται να υλοποιηθεί. Εν συνεχεία πραγματοποιείται μία σύγκριση των τεχνολογιών αυτών με γνώμονα τις κοινές απαιτήσεις που οριοθετούνται για την υλοποίηση των διαφόρων εφαρμογών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζεται η δομή και η λειτουργία του πρωτοκόλλου δικτύωσης LoRaWAN τόσο στο φυσικό επίπεδο το οποίο είναι η διαμόρφωση LoRa, όσο και στο επίπεδο δικτύου όπου αναλύονται οι διεργασίες και η μορφή των δεδομένων κατά την συμμετοχή στο δίκτυο μίας τελικής συσκευής καθώς και οι αρμοδιότητες της πύλης δικτύου (Gateway) , του εξυπηρετητή δικτύου (network server) και του εξυπηρετητή εφαρμογής (application server). Ακόμη αναλύονται λεπτομέρειες που αφορούν την χωρητικότητα του δικτύου, την εμβέλεια, τις λεπτομέρειες εγκαταστάσεως της υποδομής, τις ενεργειακές απαιτήσεις, την απώλεια δεδομένων και την ασφάλεια.

Στο τρίτο κεφάλαιο υλοποιείται ένα ιδιωτικό δίκτυο LoRaWAN μέσω της υλοποίησης μίας πύλης δικτύου και ενός τελικού κόμβου καθώς και της συνδέσεως αυτών στους εξυπηρετητές δικτύου και εφαρμογής. Ακόμη υλοποιείται μία τελική εφαρμογή με σκοπό την ολοκληρωμένη λειτουργία του συστήματος, την καταγραφή των διακινούμενων δεδομένων και την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας συναρτήσει του θεωρητικού υποβάθρου που εξετάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι παρατίθεται μία αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας υλοποίησης ακολουθούμενη από την μελέτη της λειτουργίας των χρησιμοποιούμενων φυσικών συστημάτων και των σχετιζόμενων παραμέτρων που συμμετέχουν στο LoRaWAN.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα εξαγόμενα συμπεράσματα από την διαδικασία της υλοποίησης και το αν αυτά συμφωνούν με το θεωρητικό υπόβαθρο καθώς και προτάσεις που αφορούν την βελτίωση της υλοποίησης.

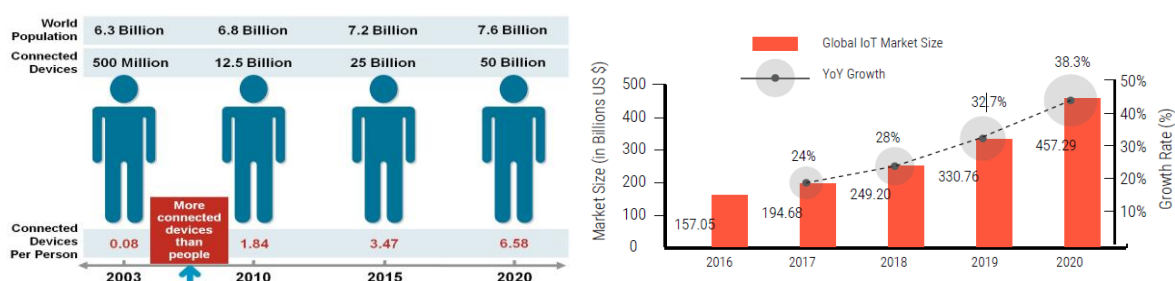
# 1. Το διαδίκτυο των πραγμάτων

## 1.1. Τι είναι το διαδίκτυο των πραγμάτων

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet Of Things - IoT) είναι ένας σύγχρονος όρος που αναφέρεται στη χρήση ευφυών δικτυωμένων συσκευών και συστημάτων με σκοπό την αξιοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται μέσω ενσωματωμένων αισθητήρων σε συσκευές ή άλλα φυσικά αντικείμενα και την πιθανή αλληλεπίδραση με αυτά τα συστήματα μέσω κατάλληλων ενεργοποιητών χωρίς να είναι αναγκαία πάντα η ανθρώπινη παρέμβαση (M2M Machine to Machine).

Το Διαδίκτυο των πραγμάτων αναμένεται να εξαπλωθεί γρήγορα τα επόμενα χρόνια και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση μίας νέας διαστάσεως υπηρεσιών που έχουν στόχο την εξυπηρέτηση της καθημερινότητας των ανθρώπων και την αύξηση της παραγωγικότητας των επιχειρήσεων. Οι λύσεις που προσφέρονται μέσω του διαδικτύου των πραγμάτων αφορούν την διαχείριση της ενέργειας, την ασφάλεια, την υγεία, την εκπαίδευση και πολλές άλλες πτυχές της καθημερινής ζωής.

Η ανάπτυξη του διαδικτύου των πραγμάτων ακολουθεί την εξέλιξη πολλών τεχνολογιών και κυρίως αυτών που αφορούν την υλοποίηση ασύρματων δικτύων χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων και αυξημένου τοπικού εύρους καλύψεως. Η τεχνολογία αυτή ορίζεται ως LPWAN (Low Power Wide Area Networks) και οι βασικότερες υλοποιήσεις της αναλύονται στο επόμενο υποκεφάλαιο.



**Εικόνα 1: Αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών ανα πληθυσμό παγκοσμίως και ανάπτυξη της αγοράς IoT έως το έτος 2020 [3]**



## **1.2. Πεδία εφαρμογής του διαδικτύου των πραγμάτων**

Η απαρίθμηση των πιθανών πεδίων εφαρμογής του διαδικτύου των πραγμάτων είναι σχεδόν αδύνατη αφού συνεχώς δημιουργούνται νέοι τρόποι ενσωμάτωσης αυτής της τεχνολογίας σε αναρίθμητους τομείς των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων με σκοπό την εξυπηρέτηση και την βελτιστοποίηση τους.

Ενδεικτικά θα αναφερθούν κάποιες εφαρμογές σε καίριους τομείς όπου δύναται να προστεθεί η λειτουργικότητα αυτής της τεχνολογίας [5]:

### **Έξυπνες πόλεις :**

- Παρακολούθηση της διαθεσιμότητας χώρων σταθμεύσεως στην πόλη.
- Παρακολούθηση κραδασμών και φυσικής καταστάσεως σε δομικές κατασκευές όπως κτίρια, γέφυρες και ιστορικά μνημεία.
- Μέτρηση της ποιότητας της ατμόσφαιρας και της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που εκπέμπεται από διάφορες πηγές.
- Παρακολούθηση οχημάτων και διαβάσεων πεζών με σκοπό την βελτιστοποίηση της οδήγησεως και της πεζοπορίας.
- Ανίχνευση των ποσοτήτων σκουπιδιών στους κάδους απορριμμάτων για την βελτιστοποίηση των διαδρομών συλλογής απορριμμάτων.
- Ευφυείς αυτοκινητόδρομοι με προειδοποιητικά μηνύματα και ενημερώσεις αλλαγής πορείας αναλόγως των κλιματικών συνθηκών και των απροσδόκητων συμβάντων όπως τα ατυχήματα και ή κυκλοφοριακή συμφόρηση.

### **Ασφάλεια και έκτακτες ανάγκες :**

- Έλεγχος προσβάσεως περιμέτρου: Ανίχνευση και έλεγχος για παρουσία ατόμων μη εξουσιοδοτημένων και περιορισμός αυτών.
- Ανίχνευση υγρών σε κέντρα δεδομένων, ευαίσθητα κτίρια και αποθήκες για την πρόληψη καταστροφών και διαβρώσεως.
- Μέτρηση επιπέδων ακτινοβολίας σε πυρηνικά εργοστάσια και παροχή σχετικών προειδοποιήσεων.
- Ανίχνευση διαρροών εκρηκτικών και επικίνδυνων αερίων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, χημικά εργοστάσια ορυχεία.

### **Έξυπνη γεωργία :**

- Βελτίωση της ποιότητας του κρασιού με παρακολούθηση της υγρασίας του εδάφους και της διαμέτρου του κορμού σε αμπελώνες για τον έλεγχο της ποσότητας σακχάρων στα σταφύλια και της υγείας της παραγωγής.
- Έλεγχος των μικροκλιματικών συνθηκών στις καλλιέργειες για την μεγιστοποίηση της παραγωγής και της ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος.
- Δίκτυα Μετεωρολογικών Σταθμών για την μελέτη του καιρού με σκοπό την πρόβλεψη του σχηματισμού πάγου, βροχής, ξηρασίας, χιονιού ή αλλαγών του ανέμου.
- Έλεγχος της υγρασίας και των επιπέδων θερμοκρασίας στα αποθηκευμένα γεωργικά προϊόντα για την πρόληψη αναπτύξεως μυκήτων και άλλων μικροβιακών παθογενειών.

### **Οικιακός αυτοματισμός :**

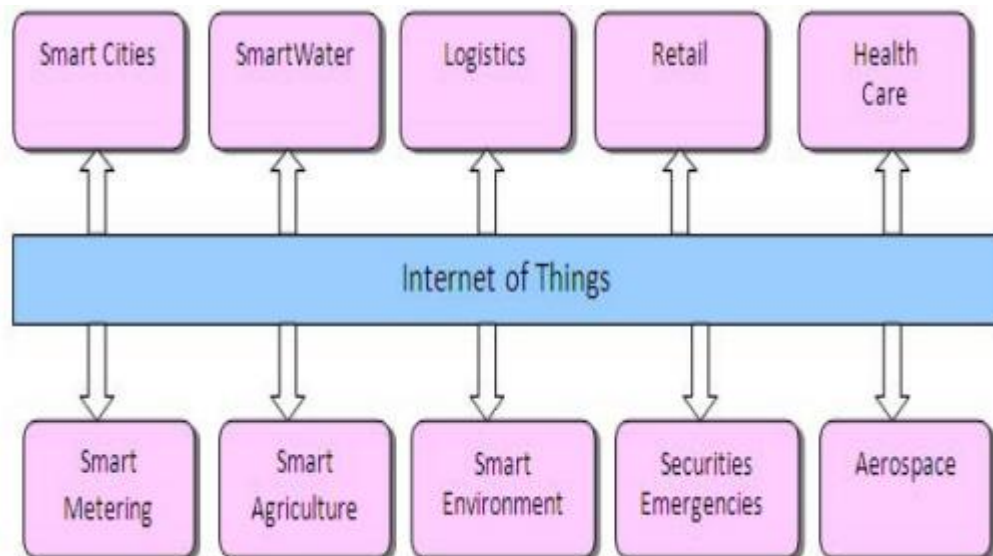
- Από απόσταση παρακολούθηση και διαχείριση των ηλεκτρικών οικιακών συσκευών με σκοπό τον περιορισμό των ενεργειακών δαπανών και μείωση των μηνιαίων λογαριασμών.
- Παρακολούθηση της καταναλώσεως νερού ώστε να είναι εφικτή η διαμόρφωση ενός σχεδίου εξοικονομήσεως.
- Τηλεχειρισμός ηλεκτρικών συστημάτων εξ αποστάσεως.
- Συστήματα ανιχνεύσεως εισβολών όπου εντοπίζονται παραβιάσεις παραθύρων η θυρών με σκοπό την αποτροπή των εισβολέων.
- Συστήματα παρακολουθήσεως και διατηρήσεως κατάλληλων ατμοσφαιρικών και οπτικών συνθηκών εντός των μουσείων για την προστασία έργων τέχνης και αρχαιολογικών ευρημάτων.

### **Ιατρικές εφαρμογές :**

- Συστήματα παρακολουθήσεως φυσιολογικών παραμέτρων για ηλικιωμένους ή άτομα με ειδικές ανάγκες όπου παρέχουν ειδοποίηση στα κέντρα υγείας και βοήθειας σε περίπτωση εντοπισμού επικίνδυνων καταστάσεων υγείας.
- Έξυπνα συστήματα παρακολουθήσεως και ελέγχου των συνθηκών μέσα σε καταψύκτες που αποθηκεύονται φάρμακα, εμβόλια και οργανικά στοιχεία.
- Παρακολούθηση των προπονήσεων αλλά και των τραυματισμών αθλητών με σκοπό την βελτίωση των επιδόσεων.
- Δυνατότητα για διαρκή παρακολούθηση ασθενών είτε στον χώρο των νοσοκομείων είτε στην οικία τους.
- Μέτρηση των επιπέδων των ακτινοβολιών UV και παροχή ειδοποιήσεων για την μη έκθεση του κοινού στην ηλιακή ακτινοβολία κατά τα επικίνδυνα χρονικά διαστήματα.

## Βιομηχανικός αυτοματισμός :

- Εφαρμογές μηχανής προς μηχανή (M2M) που επιτρέπουν την αυτόματη διάγνωση του πιθανού προβλήματος και την λήψη μέτρων.
- Παρακολούθηση και έλεγχος συνθηκών παραγωγής με σκοπό την βελτιστοποίηση του εμπορεύματος καθώς και την εξασφάλιση υγιών συνθηκών εργασίας για τους ανθρώπους.
- Παρακολούθηση και έλεγχος διαφόρων μεγεθών των συστημάτων αυτοματισμών όπως η θερμοκρασία, η ισχύς, η τάση, η πίεση, τα επίπεδα καυσίμων και λιπαντικών με σκοπό τον έγκαιρο εντοπισμό σφαλμάτων καθώς και την πρόληψη επικίνδυνων καταστάσεων.
- Μέτρηση και έλεγχος επιπέδων όζοντος σε εργοστάσια παραγωγής τροφίμων και κατά τη διαδικασία ξήρανσης του κρέατος.
- Αυτόματες λειτουργίες διαγνώσεως οχημάτων με σκοπό τον εντοπισμό επικίνδυνων καταστάσεων και ειδοποίηση σε πραγματικό χρόνο των οδηγών ή των τοπικών αρμόδιων αρχών.



**Εικόνα 2: Ενδεικτικά πεδία εφαρμογής του διαδικτύου των πραγμάτων [48]**

### 1.3. Τεχνολογίες ασύρματης δικτύωσης LPWAN

Το διαδίκτυο των πραγμάτων έρχεται να καλύψει ένα κενό επικοινωνίας μεταξύ των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και των ηλεκτρονικών συστημάτων τοπικής επικοινωνίας οικιακής, βιομηχανικής και γενικής χρήσεως. Το γεγονός αυτό οδηγεί στην απαίτηση χρήσεως τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης που επιτρέπουν την ενεργειακή αυτονομία και δύνανται εν παραλλήλω να προσφέρουν υψηλή εμβέλεια επικοινωνίας με σκοπό την απλοποίηση της εφαρμογής και την ελαχιστοποίηση του κόστους υλοποίησης. [7]

Οι κύριες τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας που προσφέρονται για την εξυπηρέτηση των αναγκών του διαδικτύου των πραγμάτων καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 1.3.1. SigFox

Το SigFox είναι μια κλειστή τεχνολογία στενής ζώνης (ultra narrowband) η οποία χρησιμοποιεί διαμόρφωση δυαδικής κωδικοποίησης μετατοπίσεως φάσεως (BPSK). Το γεγονός αυτό επιτρέπει στον δέκτη να λαμβάνει μόνο σε μια μικρή περιοχή φάσματος πράγμα που μετριάζει την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.

Στην υλοποίηση της η τεχνολογία SigFox απαιτεί σχετικά χαμηλού κόστους τελικούς κόμβους και πιο σύνθετους σταθμούς βάσεις για την διαχείριση του δικτύου. Η επικοινωνία του Sigfox τείνει να είναι αποδοτικότερη αν κατευθύνεται από τον τελικό κόμβο προς την βάση. Έχει αμφίδρομη λειτουργικότητα αλλά η χωρητικότητά της στην κατεύθυνση από τους σταθμούς βάσεως πίσω στους τελικούς κόμβους είναι περιορισμένη με αποτέλεσμα τον περιορισμό του αριθμού των κατερχόμενων ζεύξεων σε σχέση με τις ανερχόμενες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι η ευαισθησία λήψεως του δέκτη στον τελικό κόμβο δεν είναι τόσο υψηλή όσο είναι στην πιο σύνθετη υλοποίηση του σταθμού βάσεως. [37]

Το SigFox χρησιμοποιεί τις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων βιομηχανικής, επιστημονικής και ιατρικής χρήσεως (Industrial Scientific Medical – ISM) και λόγω των διεθνών κανονισμών που αφορούν την εύρυθμη χρήση των ραδιοσυχνοτήτων υφίσταται κάποιους περιορισμούς όσον αφορά την διακίνηση και την ποσότητα των δεδομένων. Έτσι, το υφιστάμενο πρότυπο για τις επικοινωνίες Sigfox υποστηρίζει έως και 140 μηνύματα ανερχόμενης ζεύξης την ημέρα, καθένα από τα οποία μπορεί να μεταφέρει ένα ωφέλιμο φορτίο 12 bytes με ρυθμό δεδομένων μέχρι 100 bytes ανά δευτερόλεπτο.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας SigFox είναι οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις των τελικών κόμβων, η μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας και ο μικρή ποσότητα διακινούμενων δεδομένων. Τα παραπάνω στοιχεία κάνουν την χρήση αυτής της τεχνολογίας σε εφαρμογές IoT συγκεντρώσεως και επεξεργασίας δεδομένων από πλήθος καταναμημένων τελικών κόμβων που διαθέτουν κατάλληλους αισθητήρες για την μέτρηση διαφόρων μεγεθών.



**Εικόνα 3: Το λογότυπο της τεχνολογίας sigfox**

### 1.3.2. Weightless

Το Weightless είναι μία ασύρματη τεχνολογία δικτυώσεως που είναι ειδικά σχεδιασμένη για τις ανάγκες του διαδικτύου των πραγμάτων. Ο ορισμός και η προώθηση της τεχνολογίας αυτής πραγματοποιείται από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό παγκόσμιας προτυποποίησης Weightless Special Interest Group (SIG) . Ο οργανισμός αυτός παρέχει τρεις διαφορετικές εκδόσεις πρωτοκόλλων έκαστη των οποίων υποστηρίζει διαφορετικές διαμορφώσεις και περιπτώσεις χρήσεως για τις ανάγκες του IoT. Οι τρεις αυτές εκδόσεις είναι οι Weightless-N, Weightless-P και Weightless-W. Τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών προτυποποιήσεων του Weightless είναι : [49]

#### **Weightless-N :**

Το Weightless-N είναι ένα ανοικτό σύστημα εξαιρετικά μικρού εύρους ζώνης (Ultra Narrow Band – UNB) που μοιάζει αρκετά με την τεχνολογία SigFox. Χρησιμοποιεί διαμόρφωση BPSK διαφορικού τύπου σε στενά κανάλια συχνότητας και προορίζεται για δεδομένα αισθητήρων ανερχόμενης ζεύξης. Το Weightless-N είναι κατάλληλο για εφαρμογή σε δίκτυα αισθητήρων και την παρακολούθηση διαφόρων παραμέτρων.

#### **Weightless-P :**

Το Weightless-P είναι η τελευταία τεχνολογία Weightless και προσφέρει αμφίδρομα χαρακτηριστικά επικοινωνίας με αυξημένα επίπεδα ποιότητας υπηρεσιών. Χρησιμοποιεί ένα σχετικά μικρού εύρους κανάλι 12,5 kHz και διαμορφώσεις GMSK και QPSK . Η δυνατότητα καλύψεως του Weightless-P αναφέρεται στα περίπου δύο χιλιόμετρα και σε αντίθεση με το Weightless-N πιθανώς δεν θα είναι κατάλληλη για δίκτυα ευρείας περιοχής.

Το Weightless-P είναι ιδανικό για ιδιωτικά δίκτυα και σε πιο περίπλοκες περιπτώσεις χρήσεως όπου ο έλεγχος των παραμέτρων της ανερχόμενης ζεύξεως όσο και της κατερχόμενης ζεύξεως παίζουν σημαντικό ρόλο.

#### **Weightless-W :**

Το πρότυπο Weightless-W έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί στο τηλεοπτικό φάσμα λευκού χώρου (TVWS). Η χρήση του TVWS είναι ελκυστική θεωρητικά, επειδή

εκμεταλλεύεται ένα διαθέσιμο φάσμα εξαιρετικά υψηλής συχνότητας (UHF) που δεν χρησιμοποιείται αλλιώς. Ωστόσο στην πράξη μπορεί να είναι αρκετά δύσκολο αφού οι κανονισμοί για τη χρήση του TVWS για το Διαδίκτυο των πραγμάτων ποικίλλουν και δεν είναι διαθέσιμο παντού. Οι τελικοί κόμβοι σχεδιάζονται συνήθως για να λειτουργούν μόνο σε ένα μικρό μέρος του φάσματος αφού είναι αδύνατο να υλοποιηθεί μια μικρή κεραία που μπορεί να δουλεύει ικανοποιητικά σε εύρος ζώνης 400MHz – 800MHz πράγμα που δυσκολεύει την χρήση του συστήματος σε διαφορετικές περιοχές όπου είναι διαθέσιμες και διαφορετικές περιοχές του φάσματος. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται είναι QAM και το πρότυπο δύναται να προσφέρει επίπεδα υπηρεσιών με υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Το Weightless-W προτείνεται για χρήση στον ευφυή τομέα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου, επειδή εκεί υπάρχει πιθανή διαθεσιμότητα του TVWS.



**Εικόνα 4: Το λογότυπο της τεχνολογίας Weightless**

### **1.3.3. LoRa**

Η τεχνολογία LoRa (Long Range) είναι μια ιδιόκτητη από την εταιρεία Semtech τεχνική διαμόρφωσης διευρυμένου φάσματος που στηρίζεται στην μέθοδο chirp spread spectrum (CSS) και επιτρέπει χαμηλού κόστους υλοποιήσεις με σκοπό την εμπορική χρήση.

Το LoRa χρησιμοποιεί για την μετάδοση τις ζώνες ραδιοσυχνοτήτων ISM και επιτρέπει εκπομπές μεγάλης εμβέλειας (πάνω από 10 χιλιόμετρα σε επαρχιακές περιοχές) με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι ρυθμοί δεδομένων που υποστηρίζονται είναι χαμηλοί και δεν είναι κατάλληλοι για μετάδοση εικόνας, ήχου ή εφαρμογές πραγματικού χρόνου



αλλά είναι υπερεπαρκείς για εφαρμογές συλλογής δεδομένων από αισθητήρες ή τον έλεγχο ενεργοποιητών (actuators). Τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LoRa είναι ιδιαίτερος συμβατά με τις ανάγκες των περισσότερων εφαρμογών του διαδικτύου των πραγμάτων πράγμα που καθιστά το LoRa σημαντικό παράγοντα που συμμετέχει στην εξέλιξη του IoT.

Η τεχνολογία LoRa μπορεί να περιγραφεί σε δύο σκέλη, το ένα σκέλος είναι το φυσικό επίπεδο ασύρματης ζεύξεως και το δεύτερο σκέλος είναι το επίπεδο δικτύου όπου περιγράφεται με τον όρο LoRaWAN. Το LoRaWAN είναι ένα πρωτόκολλο δικτύωσης συσκευών LoRa το οποίο αναπτύσσεται από την ανοικτή μη κερδοσκοπική ένωση LoRa Alliance η οποία καθορίζει τον τρόπο και τους κανόνες υλοποίησης των δικτύων LoRa.



**Εικόνα 5: Το λογότυπο της τεχνολογίας LoRa**

#### **1.3.4. Symphony Link**

Το Symphony Link είναι ένα ιδιόκτητο επίπεδο MAC που στηρίζεται στο φυσικό επίπεδο LoRa και έχει δημιουργηθεί από την εταιρεία Link Labs σαν εναλλακτική λύση δικτύωσης από το LoRaWAN η οποία και προσφέρει κάποιες επιπρόσθετες παροχές.

Κάποια από τα επιπλέον χαρακτηριστικά που προσφέρει η υλοποίηση του Symphony Link είναι η εγγυημένη λήψη των μηνυμάτων, η δυνατότητα αναβαθμίσεως του firmware από αέρος, η διεύρυνση του κύκλου λειτουργίας των συσκευών και η δυνατότητα υπάρξεως επαναληπτών (repeaters). [47]

### 1.3.5. NB-IoT

Το NB-IoT (Narrowband Internet of Things) είναι ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN) που αναπτύχθηκε από τον οργανισμό προτυποποίησης 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) για να επιτρέψει ένα ευρύ φάσμα κινητών συσκευών και υπηρεσιών.

Η τεχνολογία NB-IoT επικεντρώνεται στην κάλυψη εσωτερικών χώρων, το χαμηλό κόστος υλοποίησης και χρήσεως, τη μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και την υψηλή πυκνότητα συνδέσεων. Το NB-IoT χρησιμοποιεί ένα υποσύνολο του προτύπου LTE (Long Term Evolution) όπου περιορίζει το εύρος ζώνης σε μία στενή ζώνη των 200kHz. Χρησιμοποιεί την διαμόρφωση OFDM για τις επικοινωνίες κατερχόμενης ζεύξης και την διαμόρφωση SC-FDMA για τις επικοινωνίες ανερχόμενης ζεύξης. Το χρησιμοποιούμενο φάσμα ραδιοσυχνοτήτων είναι κοινό με αυτό που χρησιμοποιείται από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 2G / 3G / 4G και βρίσκεται στην περιοχή 450 MHz – 3,5 GHz ενώ η υπολογιζόμενη εμβέλεια επικοινωνίας μπορεί να φτάσει και τα 15 χιλιόμετρα.

Το NB-IoT είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία και η συμβατότητα της με τα προϋπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας καθιστούν την υλοποίηση της διαρκώς αναπτυσσόμενη με στόχο την ενσωμάτωση του διαδικτύου των πραγμάτων στην παγκόσμια καθημερινότητα.



**Εικόνα 6: Το λογότυπο της τεχνολογίας NB-IoT**

### 1.3.6. LTE-M

Το LTE-M είναι μία συντομογραφία για το πρότυπο LTE Cat-M1 του οργανισμού προτυποποίησης 3GPP το οποίο ορίζει μία τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας χαμηλής ισχύος και μεγάλου εύρους (LPWAN) η οποία στοχεύει σε εφαρμογές του διαδικτύου των πραγμάτων.

Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας είναι η συμβατότητα με τα προϋπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το χαμηλό εύρος ζώνης, οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις και η χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης των συσκευών του δικτύου. Το μεγαλύτερο εύρος ζώνης του LTE-M σε σχέση με άλλες τεχνολογίες LPWAN επιτρέπει την επίτευξη μεγαλύτερων ρυθμών δεδομένων και χαμηλότερης καθυστέρησης. Το LTE-M χρησιμοποιεί το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων των κινητών επικοινωνιών με εύρος ζώνης επικοινωνίας 1MHz και δυνατότητα για ταχύτητες ανερχόμενων ή κατερχόμενων δεδομένων της τάξεως των 375 kb / s.

Σε σύγκριση με το NB-IoT, το LTE Cat M1 είναι ιδανικό για περιπτώσεις κινητής χρήσεως καθώς δύναται να χειρίζεται τη μεταφορά μεταξύ κυψελών του δικτύου. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η υποστήριξη της φωνητικής λειτουργικότητας μέσω του VoLTE (voice over LTE).



**Εικόνα 7: Το λογότυπο της τεχνολογίας LTE-M**

## 1.4. Σύγκριση ασυρμάτων τεχνολογιών LPWAN

Το διαδίκτυο των πραγμάτων είναι ένα πεδίο αναπτύξεως πολυάριθμων εφαρμογών με εφαρμογή σε μεγάλο εύρος των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Παρά την ποικιλομορφία των εφαρμογών αυτών παρουσιάζονται κάποιες κοινές απαιτήσεις όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των ασύρματων τεχνολογιών που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση. Τα κοινά αυτά χαρακτηριστικά είναι : [7]

**Χαμηλό κόστος :** Οι πιο σημαντικές εφαρμογές IoT προβλέπουν την ανάγκη για πολλές εκατοντάδες, χιλιάδες ή και εκατομμύρια συσκευές τελικών κόμβων σε κάθε υλοποίηση. Σε μία τέτοιου μεγέθους έκταση δικτύου το κόστος κατασκευής και χρήσεως των δικτυακών μονάδων αποτελεί μείζονα παράγοντα για τον προσδιορισμό της απόδοσης των σχετικών επενδύσεων και της ικανότητας διεισδύσεως της προτεινόμενης τεχνολογίας στις κοινωνίες.

**Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας :** Πολλές από τις εφαρμογές του IoT απαιτούν την τοποθέτηση τελικών συσκευών σε σημεία όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη παροχή ενέργειας από τα ηλεκτρικά δίκτυα διανομής. Το γεγονός αυτό ισχυροποιεί την εξάρτηση των συσκευών από τις μπαταρίες τροφοδοσίας ή την συγκομιδή ενέργειας (energy harvesting) από το περιβάλλον. Στις υλοποιήσεις που χρησιμοποιούν μπαταρίες για την λειτουργία των συσκευών δικτύου η αντικατάσταση των εξαντλημένων μπαταριών αντιπροσωπεύει μία υλικοτεχνική πρόκληση και ένα επιπρόσθετο κόστος. Γενικώς ισχύει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε μία συσκευή τελικού κόμβου, τόσο το καλύτερο.

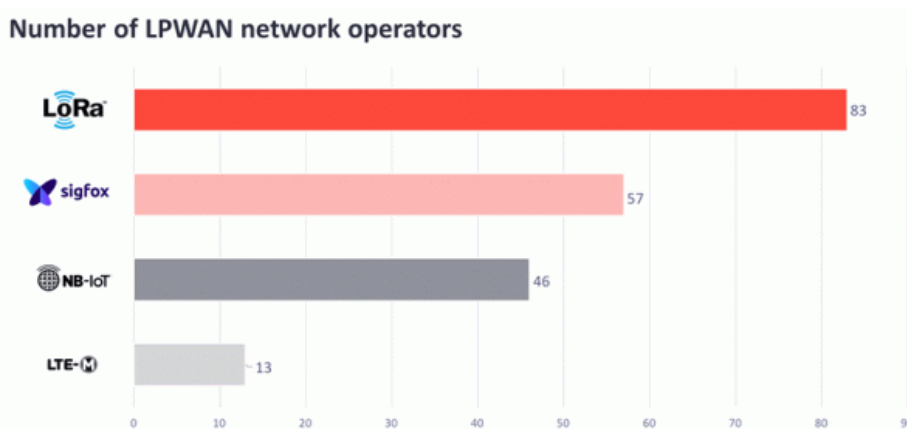
**Εκτεταμένο εύρος επικοινωνίας :** Όλα τα ασύρματα δίκτυα που συνδέονται με το διαδίκτυο πρέπει να λειτουργούν μέσω ενός σημείου πρόσβασης (AP) όπως μία πύλη δικτύου ή ένας συγκεντρωτής (aggregator). Ένας σχεδιασμός IoT πρέπει να λαμβάνει υπόψη τόσο το κόστος του τελικού σημείου όσο και το κόστος της πρόσβασης για την υποστήριξη της εφαρμογής. Η εμβέλεια λειτουργίας του δικτύου μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος υποδομής. Το εύρος επικοινωνίας καθορίζει τον

αριθμό και τη θέση των σημείων πρόσβασης που απαιτούνται για την κάλυψη της περιοχής λειτουργίας της εφαρμογής και γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η εμβέλεια τόσο δύναται να περιοριστεί το κόστος υποδομής.

**Ευελιξία :** Μια δεδομένη εγκατάσταση που χρησιμοποιεί ασύρματο δίκτυο IoT σε μία μεγάλη περιοχή μπορεί να λειτουργήσει καλά και το δίκτυο μπορεί να έχει την ικανότητα να χειρίζεται κάθε αναμενόμενο χρήστη. Με την πάροδο του χρόνου είναι λογικό να αναμένεται ότι πολλές διαφορετικές εγκαταστάσεις θα γίνουν στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Εάν αυτές οι διαφορετικές εγκαταστάσεις μοιράζονται κοινά σημεία πρόσβασης, τότε ο αριθμός των συσκευών που μπορεί να υποστηρίξει ένα σημείο προσβάσεως μπορεί να αποτελέσει έναν περιοριστικό παράγοντα και να απαιτήσει την αύξηση της υποδομής. Ακόμα κι αν δεν πραγματοποιείται κοινή χρήση σημείων προσβάσεως αλλά κοινή χρήση του φάσματος συχνοτήτων τότε μια αύξηση των συμμετεχόντων συσκευών μπορεί να περιορίσει το λειτουργικό εύρος της εφαρμογής μέσω αυξημένων επιπέδων θορύβου και να περιορίσει την χωρητικότητα του δικτύου.

Έτσι οι προτυποποιήσεις των χρησιμοποιούμενων ασύρματων τεχνολογιών δικτυώσεως πρέπει να προβλέπουν ευελιξία και επεκτασιμότητα των υλοποιημένων συστημάτων.

Οι τεχνολογίες που βρίσκονται σε μεγαλύτερη ανάπτυξη και έχουν ως στόχο να καλύπτουν τις προαναφερθείσες απαιτήσεις του IoT είναι το LoRaWAN, το SigFox, το NB-IoT και το LTE-M. [40]



**Εικόνα 8: Αριθμός λειτουργών δικτύων LPWAN για το IoT το έτος 2018 [40]**

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των πιο διαδομένων τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας για εφαρμογές του διαδικτύου των πραγμάτων :

Ασύρματη τεχνολογία	Συχνотικό φάσμα λειτουργίας	Εμβέλεια ζεύξεως	Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων	Διάρκεια ζωής μπαταρίας	Τοπολογία δικτύωσης	Πρότυπο	Οργανισμός καθορισμού προτύπου
SigFox	<1GHz ISM	10 – 50 km	100 bps	10+ έτη	Αστέρας	ιδιωτικό	SigFox
Weightless	<1GHz TVWS	2 – 5 km	100 kbps (-N, -P) / 10 Mbps (-W)	3 - 10 έτη	Αστέρας	ανοικτό	Weightless SIG
LoRaWAN	<1GHz ISM	10 – 15 km	50 kbps	10+ έτη	Αστέρας αστέρων	ανοικτό	Lora Alliance
Symphony Link	<1GHz ISM	10 – 15 km	50 kbps	10+ έτη	Αστέρας	ιδιωτικό	Link Labs
NB-IoT	450MHz – 3,5GHz 2G/3G/4G	10 – 15 km	250 kbps	10+ έτη	Αστέρας	ανοικτό	3GPP
LTE-M	450MHz – 3,5GHz LTE	10 – 15 km	375 kbps	10+ έτη	Αστέρας	ανοικτό	3GPP

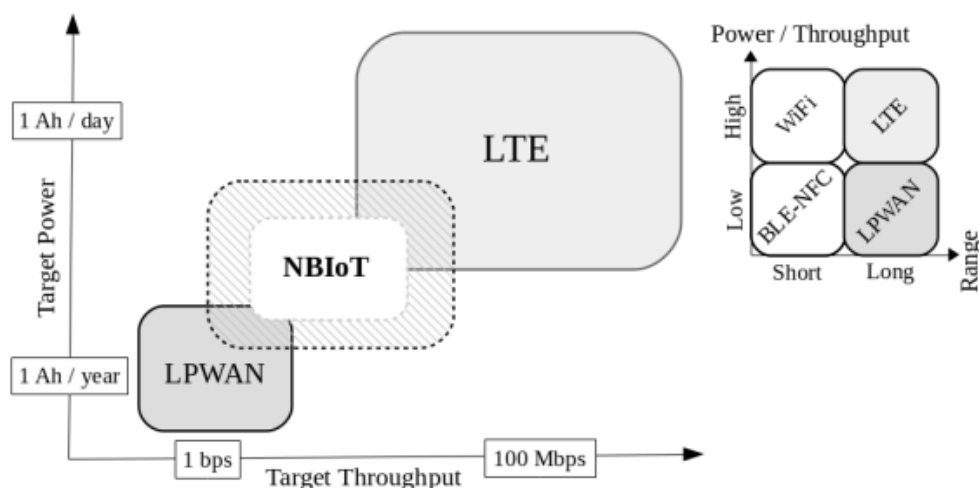
**Πίνακας 1: Σύνοψη χαρακτηριστικών των τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης IoT [1]**

Βλέποντας των πάνω πίνακα παρατηρούμε πώς οι τεχνολογίες SigFox, LoRaWAN και Symphony Link λειτουργούν στην ελεύθερη ζώνη συχνοτήτων ISM με το SigFox να παρέχει τους χαμηλότερους ρυθμούς δεδομένων. Ακόμη βλέπουμε πώς το Weightless – W παρέχει ρυθμούς δεδομένων έως 1Mbps αλλά υστερεί όσον αφορά τις απαιτήσεις ισχύος και την εμβέλεια επικοινωνίας. Έτσι τα NB-IoT και LTE-M παρέχουν τους μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων κάνοντας χρήση του συχνοτικού φάσματος των

δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Όσον αφορά την εμβέλεια και τις ενεργειακές απαιτήσεις όλες οι παραπάνω τεχνολογίες εκτός του Weightless κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα. Αξίζει να σημειωθεί πώς οι τεχνολογίες SigFox και Symphony Link διαθέτουν ιδιωτικά κλειστά πρότυπα λειτουργίας σε αντίθεση με τις άλλες τεχνολογίες. [1]

Τα NB-IoT και LTE-M είναι πρότυπα του οργανισμού 3GPP και στοχεύουν στην ενσωμάτωση της λειτουργικότητας IoT με βάση την προϋπάρχουσα παγκόσμια υποδομή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Το NB-IoT προσεγγίζει καλύτερα τις απαιτήσεις του διαδικτύου των πραγμάτων ενώ το LTE-M δίνει μία μεγαλύτερη έμφαση στις ταχύτητες δεδομένων και την δυνατότητα μεταφοράς εικόνας και ήχου. [47]

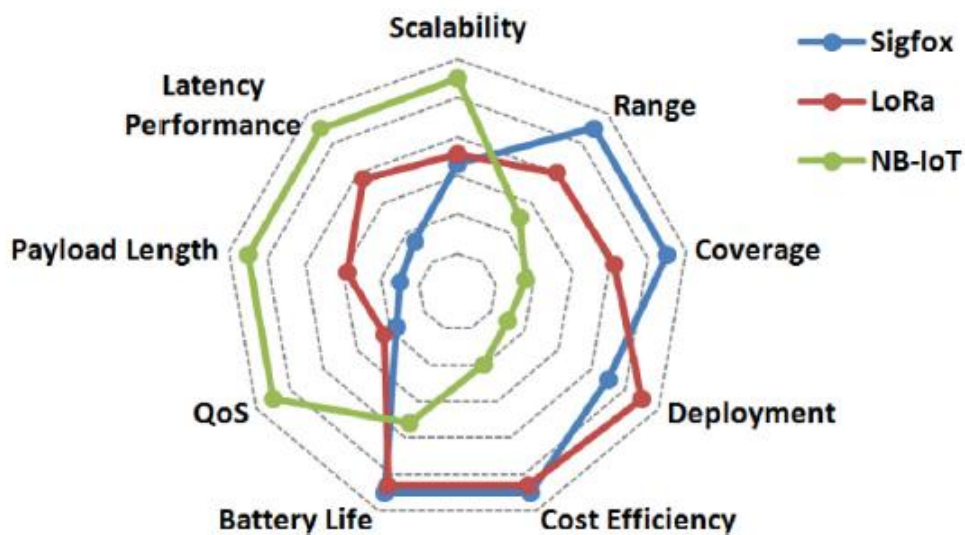
Η τεχνολογία LoRa με το πρωτόκολλο δικτύωσης LoRaWAN είναι η περισσότερο αναπτυσσόμενη τεχνολογία του IoT και συνεχώς υλοποιούνται νέες υποδομές και δίκτυα. Λόγω αυτού του γεγονότος και του ανοικτού χαρακτήρα του προτύπου LoRaWAN η ανάπτυξη της υποδομής του SigFox τείνει να περιορίζεται. Το Symphony Link είναι μία εναλλακτική υπό ανάπτυξη πρόταση που στηρίζεται στην τεχνολογία LoRa και προτείνει ένα διαφορετικό πρωτόκολλο δικτύωσης από το LoRaWAN. [37]



**Εικόνα 9: Σύγκριση του NB-IoT με τις τεχνολογίες LPWAN και LTE με κριτήρια την απαιτούμενη ισχύ και τους υποστηριζόμενους ρυθμούς δεδομένων [2]**

Η τεχνολογία LoRa σε σύγκριση με τις ανταγωνιστικές προτάσεις, παρουσιάζει πολύ καλά χαρακτηριστικά όσον αφορά την εμβέλεια καλύψεως, το κόστος υλοποίησης και χρήσεως, τις ενεργειακές απαιτήσεις των τελικών συσκευών και την ευκολία υλοποίησης. [6]

Έτσι στο επόμενο κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μία εμβάθυνση τόσο στο φυσικό επίπεδο LoRa όσο και στο πρωτόκολλο δικτύωσης LoRaWAN με σκοπό την καλύτερη αντίληψη των λεπτομερειών λειτουργίας της τεχνολογίας αυτής.



**Εικόνα 10: Σύγκριση των SigFox, LoRa και NB-IoT συναρτήσεων των παραγόντων ενδιαφέροντος όσον αφορά το διαδίκτυο των πραγμάτων [6]**

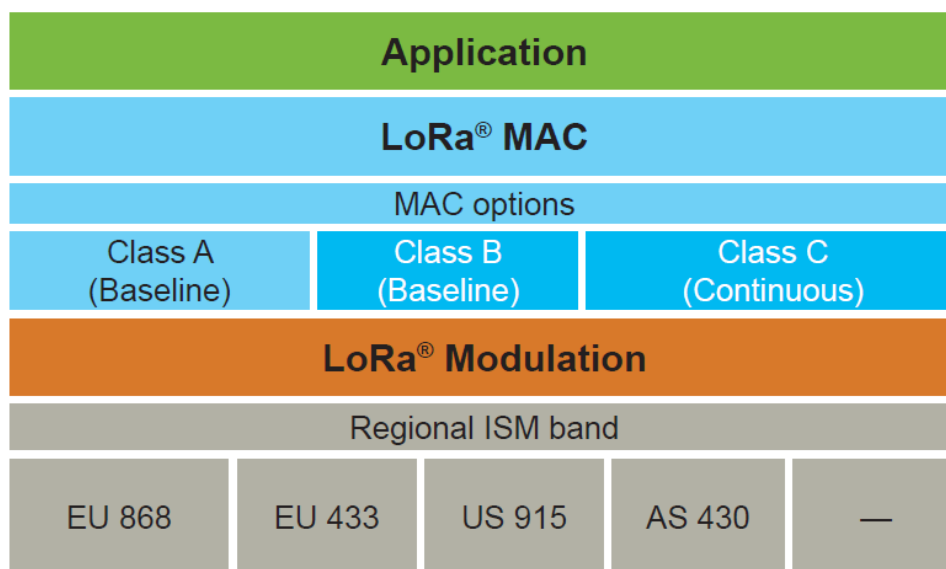


## 2. Το LoRaWAN πρωτόκολλο

### 2.1. Τι είναι το LoRaWAN

Με τον όρο LoRaWAN ορίζεται ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας και μία αρχιτεκτονική συστήματος για ένα δίκτυο το οποίο βασίζεται στο φυσικό του επίπεδο στην τεχνολογία διαμορφώσεως LoRa. Το LoRaWAN δίκτυο επιτρέπει τις μεγάλης εμβέλειας επικοινωνίες και διατηρεί τις ενεργειακές απαιτήσεις αρκετά χαμηλά ώστε να είναι εφικτή η συμμετοχή σε αυτό συσκευών τροφοδοτούμενων από μπαταρίες με μεγάλη αυτονομία λειτουργίας. [11]

Το πρωτόκολλο και η αρχιτεκτονική του δικτύου LoRaWAN είναι δομημένα έτσι ώστε να βελτιστοποιούνται παράμετροι όπως η διάρκεια ζωής της μπαταρίας ενός κόμβου, η χωρητικότητα του δικτύου, η ποιότητα των υπηρεσιών, η ασφάλεια και η ποικιλία εφαρμογών που εξυπηρετεί το δίκτυο.



Εικόνα 11: Επίπεδα πρωτοκόλλου LoRaWAN (LoRaWAN stack) [32]

Η δομή του LoRaWAN καθορίζεται μέσω των προδιαγραφών LoRaWAN (LoRaWAN specifications) οι οποίες εκδίδονται από την LoRa alliance.

Η προδιαγραφή LoRaWAN είναι ένα πρωτόκολλο δικτύωσης χαμηλής ισχύος και ευρείας περιοχής (LPWA) σχεδιασμένο για να συνδέει ασύρματα τα «πράγματα» που λειτουργούν με μπαταρία στο διαδίκτυο σε περιφερειακά, εθνικά ή παγκόσμια δίκτυα και στοχεύει σε βασικές απαιτήσεις του Internet of Things (IoT) όπως είναι η αμφίδρομη επικοινωνία (bi-directional communication) , οι υπηρεσίες ασφάλειας από άκρο σε άκρο (End to End Security) , η φορητότητα και ο γεω-εντοπισμός (localization). [11]

## **2.2. LoRa Alliance**

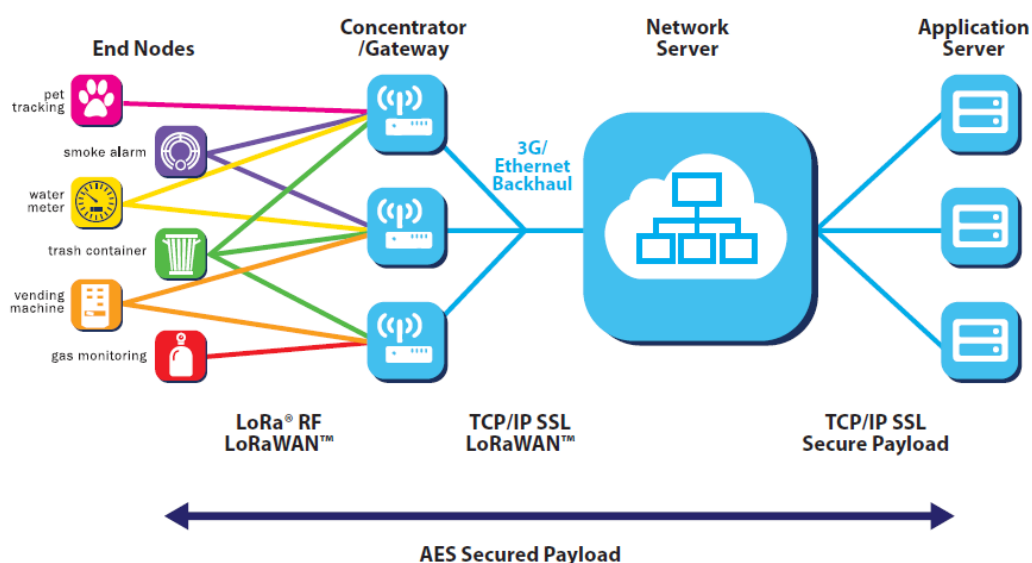
Το LoRa Alliance είναι μια ανοιχτή, μη κερδοσκοπική ένωση που έχει αυξηθεί σε περισσότερα από 500 μέλη από την ίδρυσή της τον Μάρτιο του 2015, καθιστώντας τη την μεγαλύτερη και ταχύτερα αναπτυσσόμενη συμμαχία στον τομέα της τεχνολογίας. Τα μέλη της συνεργάζονται στενά και μοιράζονται εμπειρίες για να προωθήσουν και να οδηγήσουν την επιτυχία του πρωτοκόλλου LoRaWAN ως το κορυφαίο ανοιχτό παγκόσμιο πρότυπο για ασφαλή συνδεσιμότητα IoT LPWAN.

Με την τεχνική ευελιξία να αντιμετωπίσει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών IoT, τόσο στατικών όσο και κινητών, καθώς και ένα πρόγραμμα πιστοποίησης που εγγυάται τη διαλειτουργικότητα, το LoRaWAN έχει ήδη αναπτυχθεί από μεγάλους διαχειριστές δικτύων κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως, με συνεχή μεγάλη επέκταση το 2019 και πέρα. [50]

### 2.3. Η αρχιτεκτονική του LoRaWAN

Η αρχιτεκτονική δικτύου LoRaWAN αναπτύσσεται σε μια τοπολογία αστέρι-αστέρων στην οποία τα μηνύματα μεταδίδονται από τις πύλες δικτύου (gateways) μεταξύ τελικών συσκευών και κεντρικού εξυπηρετητή δικτύου. [32]

Οι πύλες δικτύου συνδέονται με τον εξυπηρετητή δικτύου μέσω τυπικών συνδέσεων IP και λειτουργούν ως διαφανής γέφυρα, μετατρέποντας απλά πακέτα RF σε πακέτα IP και αντίστροφα. Η ασύρματη επικοινωνία εκμεταλλεύεται τα χαρακτηριστικά μεγάλης εμβέλειας του φυσικού στρώματος LoRa, επιτρέποντας μια σύνδεση μεταξύ της τελικής συσκευής και μιας ή πολλών πυλών. Όλες οι συσκευές μπορούν να υποστηρίξουν αμφίδρομη επικοινωνία και υπάρχει δυνατότητα μαζικής αποστολής (multicast) για αποτελεσματική χρήση του φάσματος κατά τη διάρκεια εργασιών όπως αναβαθμίσεις του FOTA (Firmware over-the-air) ή άλλων μηνυμάτων μαζικής διανομής.



Εικόνα 12: Τοπολογία δικτύου LoRaWAN [11]

Η επικοινωνία μεταξύ των τελικών συσκευών και των πυλών δικτύου διανέμεται σε διαφορετικά συχνοτικά κανάλια (channels) και ρυθμούς δεδομένων (data rates). Η επιλογή του ρυθμού δεδομένων είναι μια αντιστάθμιση μεταξύ του εύρους επικοινωνίας και της διάρκειας του μηνύματος, οι επικοινωνίες με διαφορετικούς ρυθμούς δεδομένων δεν παρεμβάλλονται μεταξύ τους. [32]

Οι ταχύτητες δεδομένων κυμαίνονται από 0,3 kbps έως 50 kbps. Για να μεγιστοποιηθεί η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των τελικών συσκευών και η συνολική χωρητικότητα του δικτύου, η υποδομή δικτύου LoRa μπορεί να διαχειρίζεται το ρυθμό δεδομένων και την εκπεμπόμενη ισχύ RF για κάθε τελική συσκευή ξεχωριστά μέσω ενός συστήματος προσαρμοστικού ρυθμού δεδομένων (Adaptive Data Rate - ADR). Οι τελικές συσκευές μπορούν να μεταδίδουν σε οποιοδήποτε διαθέσιμο κανάλι ανά πάσα στιγμή, χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε διαθέσιμο ρυθμό δεδομένων, εφόσον τηρούνται οι ακόλουθοι κανόνες:

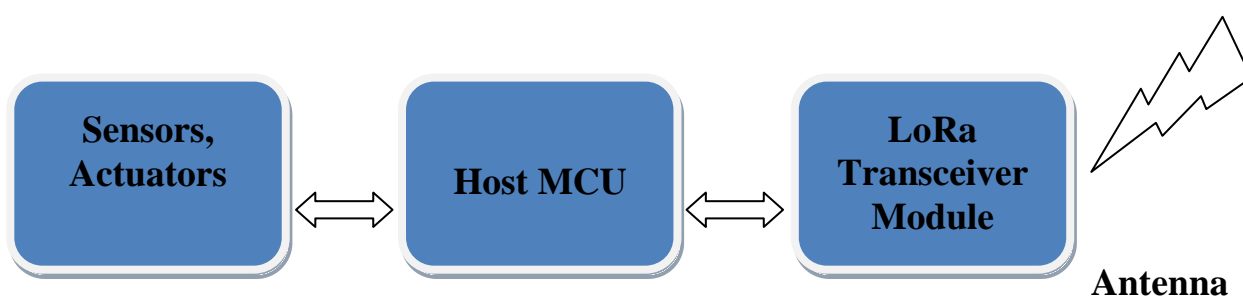
- Η τελική συσκευή αλλάζει κανάλι με ψευδοτυχαίο τρόπο για κάθε μετάδοση. Η προκύπτουσα ποικιλία συχνοτήτων καθιστά το σύστημα πιο ισχυρό στις παρεμβολές.
- Η τελική συσκευή σέβεται τη μέγιστη διάρκεια εκπομπής (ή χρόνο παραμονής) σε σχέση με την φασματική ζώνη που χρησιμοποιείται και τους τοπικούς κανονισμούς.

### 2.3.1. Τελικές συσκευές

Οι τελικές συσκευές ή κόμβοι είναι τα τελικά στοιχεία του δικτύου LoRaWAN όπου πραγματοποιείται η ανίχνευση, η μέτρηση ή ο έλεγχος.

Συνήθως βρίσκονται σε απόσταση μεταξύ τους και λειτουργούν με μπαταρία. Αυτά τα τελικά σημεία μπορούν να ρυθμιστούν για να επικοινωνούν με μια ή περισσότερες πύλες δικτύου (Gateways) χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο δικτύου LoRaWAN.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το LoRaWAN δεν προβλέπει απευθείας επικοινωνία μεταξύ των τελικών κόμβων και αυτό δύναται να επιτευχθεί μόνο εκτός δικτύου με αξιοποίηση του φυσικού επιπέδου της διαμορφώσεως LoRa.



**Εικόνα 13: Βασικά δομικά μέρη ενός τυπικού τελικού κόμβου**

### 2.3.1.1. Οι κλάσεις των τελικών συσκευών

Το LoRaWAN διαθέτει τρεις διαφορετικές κατηγορίες τελικών συσκευών για την αντιμετώπιση των διαφορετικών αναγκών που παρουσιάζονται στο ευρύ φάσμα εφαρμογών: [32]

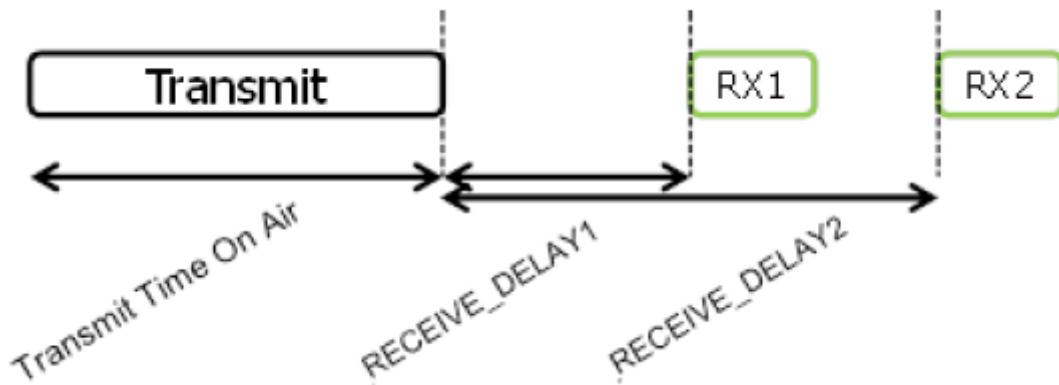
**-Κλάση A** – Χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων, αμφίδρομες τελικές συσκευές:

Η κλάση A είναι η προεπιλεγμένη κλάση που πρέπει να υποστηρίζεται από όλες τις τελικές συσκευές LoRaWAN, η επικοινωνία κλάσης A εκκινείται πάντα από την τελική συσκευή και είναι πλήρως ασύγχρονη.

Κάθε αποστολή δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί ανά πάσα στιγμή και ακολουθείται από δύο σύντομα παράθυρα λήψεως, δίνοντας την ευκαιρία για αμφίδρομη επικοινωνία ή λήψη εντολών ελέγχου δικτύου, εάν χρειάζεται. Αυτό είναι ένα πρωτόκολλο τύπου ALOHA.

Η τελική συσκευή δύναται να εισέλθει σε λειτουργία χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας για όσο διάστημα ορίζεται από τη δική της εφαρμογή καθώς δεν υπάρχει ανάγκη δικτύου για περιοδικές επανεκκινήσεις της τελικής συσκευής. Το γεγονός αυτό καθιστά την κλάση A ως την λειτουργία χαμηλότερης ισχύος, ενώ παράλληλα επιτρέπει την αποστολή δεδομένων από την τελική συσκευή ανά πάσα στιγμή.

Επειδή η λήψη κατερχόμενων δεδομένων πρέπει πάντα να ακολουθεί μια μετάδοση ανερχόμενων δεδομένων με ένα χρονοδιάγραμμα που ορίζεται από την εφαρμογή της τελικής συσκευής, τα κατερχόμενα δεδομένα προς την τελική συσκευή πρέπει να είναι αποθηκευμένα στον εξυπηρετητή δικτύου μέχρι το επόμενο συμβάν ανερχόμενης ζεύξης.



Εικόνα 14: Παράθυρα λήψεως τελικής συσκευής μετά την αποστολή [32]

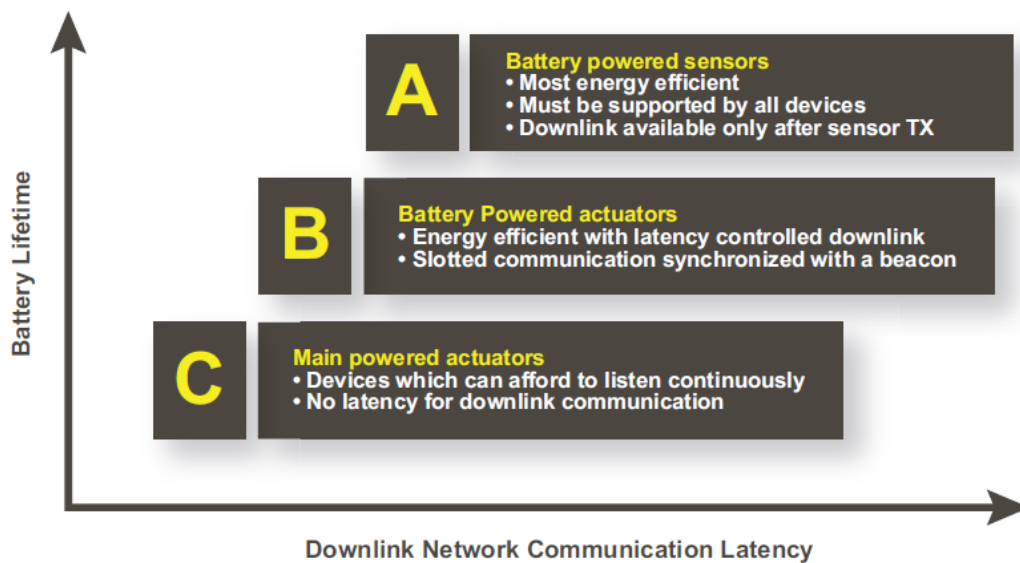
**-Κλάση B** - αμφίδρομες τελικές συσκευές με χρονικά καθορισμένη κατάσταση λήψεως: Εκτός από τα παράθυρα λήψεως που ξεκινούν από την κατηγορία A, οι συσκευές κλάσεως B συγχρονίζονται στο δίκτυο χρησιμοποιώντας περιοδικά σήματα φάρους (Beacons) και τίθενται σε κατάσταση λήψεως στις προγραμματισμένες χρονικές στιγμές. Αυτό παρέχει στο δίκτυο τη δυνατότητα να στέλνει δεδομένα στους τελικούς κόμβους με μία ντετερμινιστικά ορισμένη περίοδο αδρανείας, αλλά σε βάρος κάποιας πρόσθετης κατανάλωσης ισχύος στην τελική συσκευή. Η περίοδος αδρανείας είναι προγραμματιζόμενη μέχρι 128 δευτερόλεπτα για να ταιριάζει σε διαφορετικές εφαρμογές και η πρόσθετη κατανάλωση ενέργειας είναι αρκετά χαμηλή ώστε να επιτρέπει ακόμα και την χρήση τελικών συσκευών με μπαταρίες.

**-Κλάση C** - Αμφίδρομες τελικές συσκευές, συνεχούς λήψεως:

Εκτός από την λειτουργία σε κλάση A, επιπρόσθετα η κλάση C μειώνει περαιτέρω τον χρόνο αδρανείας μεταξύ παραθύρων λήψεως διατηρώντας τον δέκτη της τελικής συσκευής ανοιχτό ανά πάσα στιγμή που η συσκευή δεν μεταδίδει (Half Duplex επικοινωνία).

Βάσει των παραπάνω, ο εξυπηρετητής δικτύου μπορεί να εκκινήσει μετάδοση δεδομένων οποιαδήποτε στιγμή με την παραδοχή ότι ο δέκτης της τελικής συσκευής είναι ανοικτός, επομένως δεν υπάρχει καθυστέρηση.

Το μειονέκτημα της λειτουργίας αυτής είναι η αυξημένη κατανάλωση ισχύος του δέκτη (κατανάλωση έως 50mW) και έτσι η κατηγορία C δεν μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη για εφαρμογές που στηρίζουν την λειτουργία τους σε μπαταρίες. Για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, είναι δυνατή η εναλλαγή προσωρινής λειτουργίας μεταξύ των κατηγοριών A και C και είναι χρήσιμη για περιστασιακές εργασίες, όπως αναβαθμίσεις του firmware over-the-air.



**Εικόνα 15: Ενεργειακές απαιτήσεις και εφαρμογές κλάσεων LoRaWAN [11]**



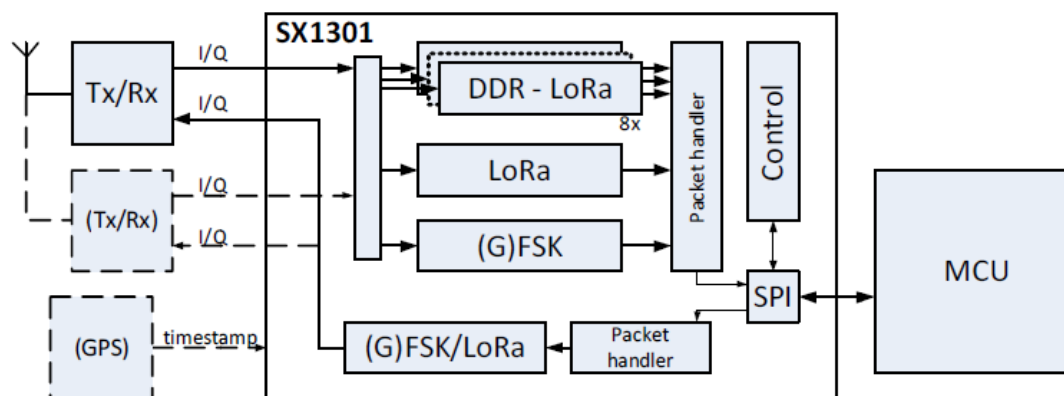
### 2.3.2. Η πύλη δικτύου

Οι πύλες δικτύου (Gateway) LoRaWAN είναι συστήματα σχεδιασμένα για χρήση στις τοπολογίες αστέρος μεγάλου βεληνεκούς και χρησιμοποιούνται σαν συστατικά μέρη για την υλοποίηση των δικτύων LoRaWAN. [51]

Είναι πολυκάναλοι πομποδέκτες πολλαπλών καναλιών και μπορούν να αποδιαμορφώνουν ταυτόχρονα πολλά κανάλια και ακόμη και να αποδιαμορφώνουν πολλαπλά σήματα στο ίδιο κανάλι ταυτόχρονα λόγω των ιδιοτήτων του φυσικού επιπέδου LoRa.

Οι πύλες δικτύου χρησιμοποιούν διαφορετικά RF υποσυστήματα από τις τελικές συσκευές για να επιτρέπουν την υψηλή χωρητικότητα δικτύου και να λειτουργούν ως διαφανείς γέφυρες που μεταφέρουν μηνύματα μεταξύ των τελικών συσκευών και του εξυπηρετητή δικτύου.

Τα RF υποσυστήματα που χρησιμοποιούνται ονομάζονται συγκεντρωτές LoRa (LoRa concentrators) που σε συνδυασμό με επεξεργαστικά και δικτυακά υποσυστήματα υλοποιούν σε μία συσκευή την πύλη διαδικτύου .



**Εικόνα 16: Δομικό-Block διάγραμμα συγκεντρωτή LoRa υλοποιημένου με το SX1301 ολοκληρωμένο της Semtech [29]**

Οι πύλες συνδέονται με τον εξυπηρετητή δικτύου μέσω τυπικών συνδέσεων IP, ενώ οι τελικές συσκευές χρησιμοποιούν ασύρματη επικοινωνία LoRa για την ζεύξη με μία ή περισσότερες πύλες.

Η επικοινωνία στο τελικό σημείο του δικτύου είναι γενικά αμφίδρομη, αλλά υποστηρίζει επίσης λειτουργίες όπως τη δυνατότητα πολλαπλής διανομής (multicast) , την αναβάθμιση λογισμικού μέσω του αέρα ή άλλων μηνυμάτων μαζικής διανομής για τη μείωση του χρόνου επικοινωνίας στον αέρα.

Υπάρχουν διαφορετικές εκδόσεις δικτυακών πυλών ανάλογα με την επιθυμητή χωρητικότητα και θέση εγκατάστασης (πχ εσωτερικού / εξωτερικού χώρου).

### **2.3.2.1. Η χωρητικότητα της πύλης**

Η χωρητικότητα εκφράζει τον αριθμό των πακέτων που μπορούν να ληφθούν σε δεδομένο χρόνο.

Μία τυπική υλοποίηση πύλης διαδικτύου με το ολοκληρωμένο SX1301 το οποίο υποστηρίζει 8 κανάλια παράλληλης λήψεως, μπορεί να λαμβάνει περίπου 1,5 εκατομμύρια πακέτα την ημέρα χρησιμοποιώντας πρωτόκολλο LoRaWAN.

Έτσι, εάν μία εφαρμογή είναι ρυθμισμένη να στέλνει ένα πακέτο ανά ώρα, τότε μια μοναδική πύλη βασισμένη στο SX1301 μπορεί να χειριστεί περίπου 62.500 τελικές συσκευές που συμμετέχουν σε αυτήν την εφαρμογή ανά ημέρα.

### **2.3.2.2. Παράμετροι εγκατάστασής / προστασία**

Η λειτουργία της πύλης δικτύου απαιτεί σταθερή παροχή ενέργειας και πρόσβαση στο διαδίκτυο είτε ασύρματη είτε ενσύρματη.

Η τοποθέτηση της πύλης μπορεί να γίνει σε εσωτερικό χώρο είτε σε εξωτερικό. Και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να γίνει ένας υπολογισμός εύρους εμβελείας της πύλης συναρτήσει παραγόντων που επηρεάζουν την ασύρματη ζεύξη όπως τα φυσικά εμπόδια και οι πηγές ηλεκτρομαγνητικού θορύβου.

Στην περίπτωση της εξωτερικής εγκατάστασής πρέπει να ληφθεί μέριμνα και για κάποιες επιπρόσθετες προστασίες από τα φυσικά φαινόμενα:

- **Στεγανοποίηση της πύλης και προστασία από σκόνη και υγρασία :** Η τοποθέτηση των υποσυστημάτων της πύλης δικτύου πρέπει να γίνει εντός στεγανών κουτιών κατασκευής με προτεινόμενη μόνωση τουλάχιστον κλάσεως IP 68 (Μόνωση από σωματίδια σκόνης και αντοχή σε συνεχή ρίψη νερού). Ακόμη προσοχή πρέπει να δοθεί στις εισόδους καλωδίων τροφοδοσίας/δικτύου η οποία πρέπει να πραγματοποιείται μέσω πιστοποιημένων στυπιοθλιπτών.
- **Μέριμνα για την σωστή απαγωγή θερμότητας :** Λόγω της στεγανοποίησης του κουτιού τοποθέτησής της πύλης θα υπάρξει αύξηση της συσσωρευόμενης θερμότητας από την λειτουργία της πύλης ή λόγω της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Οπότε μέσω της κατάλληλης τοποθέτησής ψυκτών απαγωγής θερμότητας ή με την προσθήκη ενός ενεργού συστήματος ψύξεως (π.χ πλακίδια Peltier) μπορεί να αποφευχθεί μία ενδεχόμενη υπερθέρμανση που θα είχε καταστροφική επίδραση στον χρόνο ζωής των ηλεκτρονικών στοιχείων του συστήματος.
- **Αντικεραυνική και ηλεκτροστατική προστασία:** Η αντικεραυνική προστασία των μπορεί να πραγματοποιηθεί με κατάλληλη γείωση των μεταλλικών στοιχείων του κουτιού και με την προσθήκη συσκευών απορροφήσεως κρουστικών υπερτάσεων στις συνδέσεις της κεραίας , των καλωδίων δικτύου και τροφοδοσίας.

### 2.3.2.3. Ενεργειακές απαιτήσεις

Οι ενεργειακές απαιτήσεις μίας πύλης δικτύου LoRaWAN είναι ένα άθροισμα των απαιτήσεων των υποσυστημάτων που την συντελούν όπως ο συγκεντρωτής LoRa και το σύστημα επεξεργασίας και σύνδεσης με το δίκτυο.

Η μέση κατανάλωση μίας ολοκληρωμένης πύλης με την ελάχιστη χωρητικότητα βάσει των εμπορικά διαθέσιμων συστημάτων υπολογίζεται στα 5 – 15 W. Η κατανάλωση αυτή επηρεάζεται άμεσα από την δραστηριότητα διακίνησης πακέτων και το μέγεθος του υποδικτύου τοπολογίας αστέρα στο οποίο συμμετέχει. Αυτό συνεπάγεται μία μέση ενεργειακή απαίτηση 120 – 360 Wh ανά ημέρα.

Λόγω των σχετικά υψηλών απαιτήσεων καθίσταται δύσκολη η τοποθέτηση αυτόνομων ενεργειακά πυλών δικτύου (Με παροχή ενέργειας από τον ήλιο ή τον αέρα) σε απομακρυσμένες περιοχές και προτείνεται η τοποθέτηση σε σημεία με πρόσβαση σε αδιάλειπτη παροχή ισχύος από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Parameter	Condition	Min	Typ.	Max	Unit
Supply Voltage (VDD)		4.5	5.0	5.5	V
Receiver Current Consumption	medium activity (2 radios, 4 active paths)		288		mA
	high activity (2radios, 10 active paths)		428		

**Πίνακας 2: Απαιτήσεις ρεύματος συγκεντρωτή IC880 της Semtech με το SX1301 [21]**

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>Current Consumption</b>						
Current in idle mode	$I_{VDDCORE,IDLE}$	1.8V supply current in Idle mode <sup>1</sup>		120	5000	uA
	$I_{VDDIO,IDLE}$	3.3V supply current in idle mode		1	2	uA
Current in medium active	$I_{VDDCORE,MED}$	1.8V supply current with 4 active paths		330	550	mA
	$I_{VDDIO,MED}$	3.3V supply current with 4 active paths – no load		5	10	mA
Current in full active	$I_{VDDCORE,FULL}$	1.8V supply current with 8 active paths		550	750	mA
	$I_{VDDIO,FULL}$	3.3V supply current with 8 active paths – no load		5	10	mA

**Πίνακας 3: Απαιτήσεις ρεύματος ολοκληρωμένου SX1301 της Semtech [29]**

Electrical Characteristic	
Supply Voltage (VDD)	5 V
Current Consumption	Depending on the operating mode up to 2300mA

**Πίνακας 4: Απαιτήσεις ρεύματος της WiMOD Lite Gateway της Semtech [30]**

### 2.3.3. Ο εξυπηρετητής δικτύου

Ο εξυπηρετητής δικτύου είναι ένα σύνολο εφαρμογών που καλύπτουν το χάσμα μεταξύ των πυλών που λαμβάνουν μηνύματα από τους τελικούς κόμβους και την λήψη των δεδομένων από τις εφαρμογές. Παρέχει μηχανισμούς για τη διαχείριση των πυλών δικτύου στο LoRaWAN, τις υποστηριζόμενες εφαρμογές και τις συσκευές που σχετίζονται με τις εφαρμογές.

Οι βασικές αρμοδιότητες του εξυπηρετητή δικτύου είναι :

- Συλλέγει τα μηνύματα από όλες τις πύλες και φιλτράρει τα ταυτόσημα μηνύματα , αντιγράφει δεδομένα και καθορίζει την πύλη που έχει την καλύτερη λήψη για την επικοινωνία με δεδομένο τελικό κόμβο.
- Προωθεί το κάθε πακέτο στον σωστό εξυπηρετητή εφαρμογών όπου ο τελικός χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τα δεδομένα.
- Προαιρετικά, ο εξυπηρετητής εφαρμογής μπορεί να στείλει μια απάντηση στον τελικό κόμβο. Όταν αποστέλλεται μια απάντηση, ο εξυπηρετητής δικτύου λαμβάνει την απάντηση και καθορίζει ποια πύλη θα χρησιμοποιήσει για να μεταδώσει την απόκριση πίσω στον τελικό κόμβο.

### 2.3.4. Ο εξυπηρετητής εφαρμογής

Ο εξυπηρετητής εφαρμογών είναι ένα μικτό πλαίσιο λογισμικού που επιτρέπει τόσο τη δημιουργία εφαρμογών LoRaWAN όσο και ενός περιβάλλοντος εξυπηρετητών για την εκτέλεση αυτών. Συχνά είναι μια πολύπλοκη στοίβα διαφορετικών υπολογιστικών στοιχείων που εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες και πρέπει να λειτουργούν ως ένα για να ικανοποιήσουν της ανάγκες της εφαρμογής.

Στο LoRaWAN ο εξυπηρετητής εφαρμογής είναι άμεσα συνδεδεμένος με τον εξυπηρετητή δικτύου με σκοπό την πρόσβαση σε κάθε κόμβο του συστήματος και την αξιοποίηση των παρεχόμενων δεδομένων.

Ένας εξυπηρετητής εφαρμογών έχει σχεδιαστεί για να εγκαθιστά, να λειτουργεί και να φιλοξενεί εφαρμογές και συναφείς υπηρεσίες για τελικούς χρήστες, υπηρεσίες πληροφορικής, οργανισμούς και να διευκολύνει τη φιλοξενία και την παροχή εφαρμογών υψηλής τεχνολογίας για καταναλωτές ή επιχειρήσεις.

Ανάλογα με το τι είναι εγκατεστημένο, ένας εξυπηρετητής εφαρμογών μπορεί να ταξινομηθεί με διάφορους τρόπους όπως ένας εξυπηρετητής εφαρμογής βάσεως δεδομένων, ένας εξυπηρετητής εφαρμογής γενικού σκοπού ή ένας εξυπηρετητής επιχειρησιακής εφαρμογής.

Οι εξυπηρετητές εφαρμογών συνήθως παρέχουν δικές τους γραφικές διεπαφές χρήστη για τη διαχείριση μέσω υπολογιστών, αλλά μπορούν επίσης να φροντίζουν τους δικούς τους πόρους, καθώς και την επεξεργασία συναλλαγών, την ανταλλαγή μηνυμάτων, τη συγκέντρωση πόρων και συνδέσεων και την εκτέλεση επιπρόσθετων καθηκόντων ασφαλείας.

Οι εφαρμογές LoRaWAN είναι λογισμικό που εκτελείται στους εξυπηρετητές εφαρμογών και είναι γραμμένες σε γλώσσα που αυτοί υποστηρίζουν όπου και αξιοποιούν τις βιβλιοθήκες και τα στοιχεία εκτέλεσης που προσφέρει ο κάθε εξυπηρετητής

## **2.4. Τα επίπεδα του LoRaWAN**

### **2.4.1. Το φυσικό επίπεδο**

#### **2.4.1.1. Η τεχνολογία LoRa**

Το LoRa είναι μία ιδιόκτητη από την εταιρεία Semtech μέθοδος ασύρματης διαμορφώσεως φάσματος η οποία στηρίζεται στην τεχνολογία Chirp Spread Spectrum (CSS). Η τεχνολογία CSS έχει χρησιμοποιηθεί στη στρατιωτική και διαστημική επικοινωνία εδώ και δεκαετίες λόγω της μεγάλης εμβελείας και της ανθεκτικότητας στις παρεμβολές. Το LoRa είναι η πρώτη εφαρμογή χαμηλού κόστους αυτής της τεχνολογίας για εμπορική χρήση.

Πολλά ασύρματα συστήματα παλαιού τύπου χρησιμοποιούν διαμόρφωση μετατοπίσεως συχνότητας (Frequency Shift Keying - FSK) στο φυσικό τους επίπεδο επειδή είναι πολύ αποτελεσματική στην επίτευξη χαμηλών απαιτήσεων ισχύος.

Η διαμόρφωση LoRa υλοποιεί μεταβλητό ρυθμό δεδομένων, χρησιμοποιώντας ορθογωνικούς συντελεστές εξάπλωσης (Spread Factors – SF) , που επιτρέπει στο σύστημα να ανταλλάσει ρυθμό δεδομένων για εύρος ή ισχύ, έτσι ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση του δικτύου εντός δεδομένου εύρους ζώνης καναλιού. Το γεγονός κάνει το το LoRa εξίσου ενεργειακά αποδοτικό με το FSK αλλά του δίνει σημαντικό πλεονέκτημα όσον αφορά την εμβέλεια επικοινωνίας.

Το LoRa είναι μια υλοποίηση φυσικού επιπέδου (PHY) και είναι ανεξάρτητη από τις εφαρμογές υψηλότερων επιπέδων καθώς αυτές δεν υποχρεούνται να έχουν γνώση των λεπτομερειών λειτουργίας του. Αυτό επιτρέπει στο LoRa να είναι συμβατό και να συνυπάρχει με τις υπάρχουσες αρχιτεκτονικές δικτύου. [15]

Οι συσκευές τεχνολογίας LoRa χρησιμοποιούνται σε πολλά δίκτυα Internet of Things (IoT) παγκοσμίως καθώς τεχνολογία LoRa λόγω των χαρακτηριστικών της επιτρέπει μια ποικιλία έξυπνων εφαρμογών IoT που στοχεύουν στην επίλυση προκλήσεων όπως η διαχείριση ενέργειας, η μείωση των φυσικών πόρων, ο έλεγχος της ρύπανσης, η αποδοτικότητα των υποδομών, η πρόληψη καταστροφών και άλλα. Το LoRa ανταγωνίζεται άλλες ασύρματες τεχνολογίες χαμηλής ισχύος ευρείας ζώνης (LPWAN) όπως το στενής ζώνης IoT (NB IoT) ή το LTE Cat M1.

#### **2.4.1.1.1. Διαμόρφωση διευρυμένου φάσματος**

Στη θεωρία των πληροφοριών, το θεώρημα Shannon-Hartley δηλώνει το μέγιστο ρυθμό με τον οποίο μπορούν οι πληροφορίες να μπορούν να μεταδίδεται μέσω ενός καναλιού επικοινωνιών συγκεκριμένου εύρους ζώνης παρουσία θορύβου.

Το θεώρημα καθορίζει την χωρητικότητα του καναλιού για μια σύνδεση επικοινωνίας και ορίζει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων (πληροφορίες) που μπορούν να μεταδοθούν εντός συγκεκριμένου εύρους ζώνης παρουσία παρεμβολών θορύβου: [15]

$$\text{Θεώρημα Shannon-Hartley : } C = B * \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right)$$

Όπου:

C = Χωρητικότητα καναλιού - channel capacity (bit/s)

B = Εύρος ζώνης καναλιού - channel bandwidth (Hz)

S = Μέση λαμβανόμενη ισχύς σήματος - average received signal power (Watts)

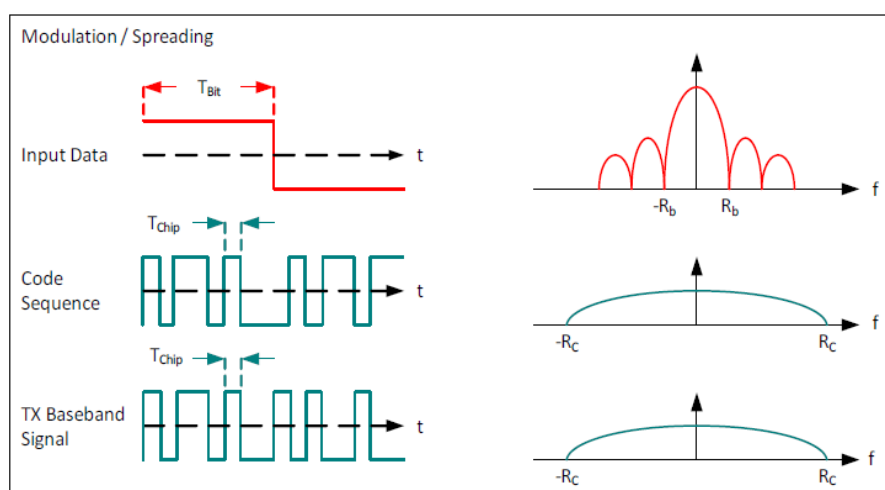
N = Μέση ισχύς θορύβου η παρεμβολής - average noise or interference power (Watts)

S/N = Λόγος σήματος προς θόρυβο - signal to noise ratio (SNR) expressed as a linear power ratio



Από το παραπάνω θεώρημα προκύπτει πώς αυξάνοντας το εύρος ζώνης του σήματος μπορούμε να αντισταθμίσουμε την υποβάθμιση του λόγου σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise ratio) ενός καναλιού.

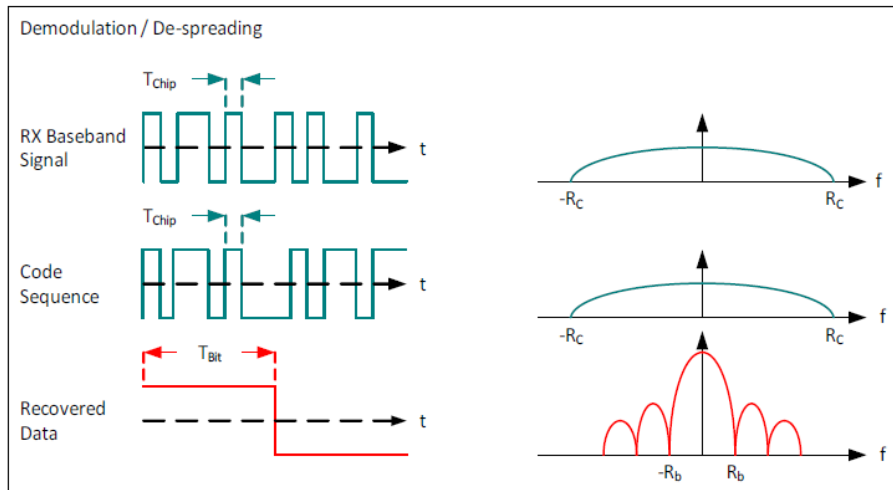
Στα παραδοσιακά συστήματα DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum), η μετάθεση φάσεως της φέρουσας συχνότητας του πομπού πραγματοποιείται βάσει μίας κωδικής ακολουθίας. Αυτή η διαδικασία γενικά επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό του επιθυμητού σήματος δεδομένων με έναν κωδικό διασποράς, γνωστό και ως ακολουθία chip. Η ακολουθία chip εμφανίζεται σε πολύ ταχύτερο ρυθμό από τον ρυθμό του σήματος δεδομένων και έτσι απλώνεται το εύρος ζώνης διαμορφωμένου σήματος πέρα από το πρωτότυπο εύρος ζώνης που καταλαμβάνει μόνο το αρχικό σήμα. [15]



**Εικόνα 17: Διαμόρφωση διευρυμένου φάσματος [15]**

Στον δέκτη, το επιθυμητό σήμα δεδομένων ανακτάται πολλαπλασιάζοντας το λαμβανόμενο φάσμα με ένα τοπικά παραγόμενο αντίγραφο της κωδικής ακολουθίας εξάπλωσης. Αυτή η διαδικασία πολλαπλασιασμού στον δέκτη συμπιέζει αποτελεσματικά την εξάπλωση και το λαμβανόμενο σήμα επιστρέφει στο αρχικό εύρος ζώνης του.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ίδια κωδική ακολουθία chip πρέπει να χρησιμοποιηθεί στον δέκτη όπως στο πομπό για να ανακτηθούν σωστά οι πληροφορίες.



**Εικόνα 18: Αποδιαμόρφωση διευρυμένου φάσματος [15]**

Το εύρος της φασματικής διευρύνσεως, για την διαμόρφωση DSSS, εξαρτάται από την αναλογία των "chip ανά bit" - ο λόγος των ακολουθιών chip προς τον επιθυμητό ρυθμό δεδομένων, αναφέρεται συνήθως ως κέρδος επεξεργασίας ( $G_p$ ) συνήθως εκφρασμένη σε dB. [15]

$$\text{Κέρδος επεξεργασίας } (G_p) : G_p = 10 * \log_{10} \left( \frac{R_c}{R_b} \right) \text{ (dB)}$$

Όπου:

$$R_c = \text{Ρυθμός chip (chip / δευτερόλεπτο)}$$

$$R_b = \text{Ρυθμός δυαδικών ψηφίων (bit / δευτερόλεπτο)}$$

Η παροχή κέρδους επεξεργασίας για την επιθυμητή μετάδοση επιτρέπει στον δέκτη να ανακτήσει σωστά το σήμα δεδομένων ακόμη και όταν το SNR του καναλιού είναι αρνητική τιμή. Τα μη επιθυμητά σήματα μειώνονται επίσης από το κέρδος επεξεργασίας του δέκτη, αφού αυτά ξεπερνούν το επιθυμητό εύρος ζώνης δεδομένων και μπορούν εύκολα να αφαιρεθούν με φιλτράρισμα.

### 2.4.1.1.2. Διαμόρφωση διευρυμένου φάσματος LoRa

Στην διαμόρφωση LoRa η διεύρυνση του φάσματος επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ενός σήματος chirp διαρκώς μεταβαλλόμενης συχνότητας. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι αντισταθμίσεις χρονισμού και συχνότητας μεταξύ του πομπού και του δέκτη είναι ισοδύναμες, μειώνοντας σημαντικά την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού του δέκτη.

Το εύρος συχνοτήτων του σήματος chirp είναι ισοδύναμο με το φασματικό εύρος ζώνης του σήματος. Το επιθυμητό σήμα δεδομένων κωδικοποιείται μέσω σημάτων chirp με υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και διαμορφώνεται εντός του σήματος chirp.

Η σχέση μεταξύ του επιθυμητού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, του ρυθμού συμβόλων και του ρυθμού chirp για τη διαμόρφωση LoRa μπορεί να εκφραστεί ως εξής: [15]

Μπορούμε να ορίσουμε το ρυθμό δυαδικής διαμόρφωσης,  $R_b$ , ως:

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

ή

$$R_b = SF * \frac{\left[ \frac{4}{4 + CR} \right]}{\left[ \frac{2^{SF}}{BW} \right]} \text{ (bits/sec) Για λειτουργία διορθώσεως σφαλμάτων}$$

Όπου:

SF = συντελεστής διασποράς – Spreading Factor (7 - 12)

BW = εύρος ζώνης διαμόρφωσης – modulation BandWidth (Hz)

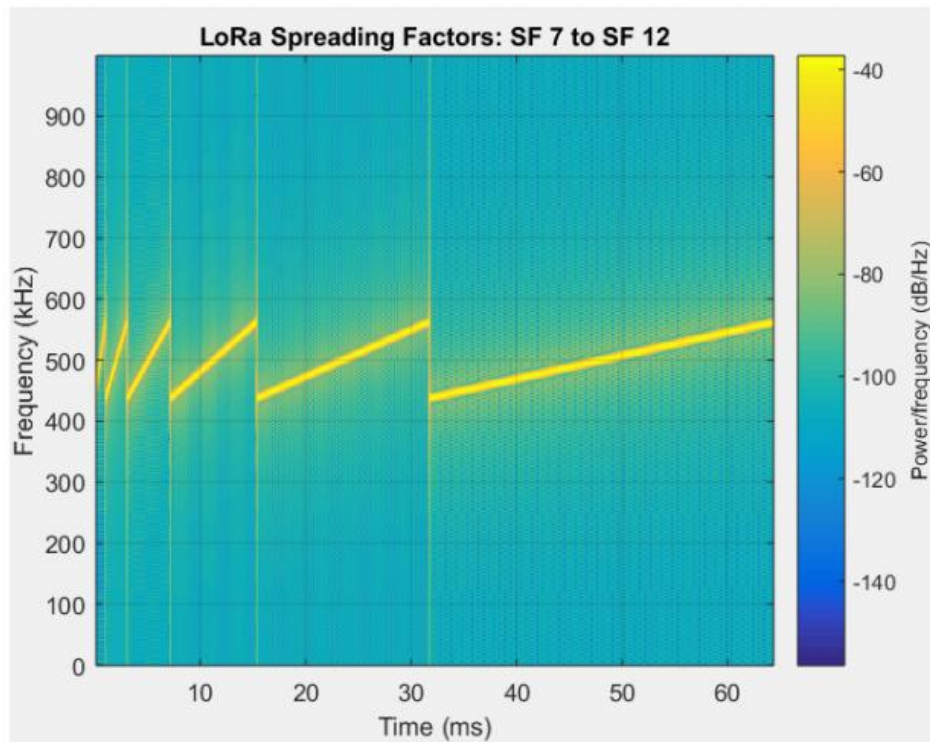
CR = Ρυθμός κωδικοποίησης – Coding Rate (1 - 4)

Ο ρυθμός συμβόλων  $R_s$ , είναι αντίστροφος της περιόδου συμβόλου  $T_s$  και ορίζεται:

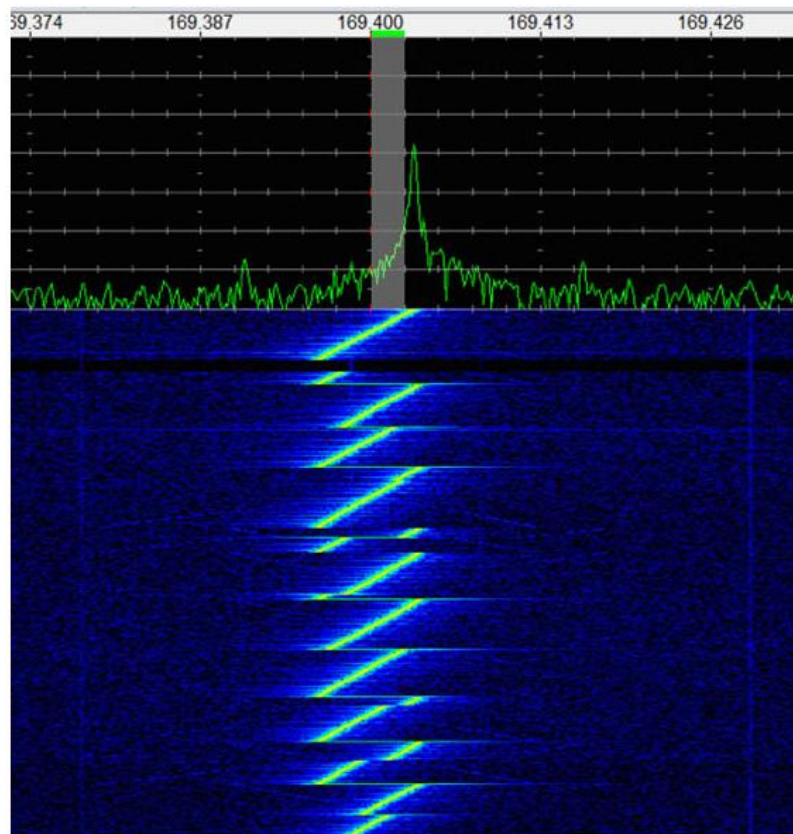
$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \text{ (bits/sec)}$$

Τέλος μπορούμε να καθορίσουμε τον ρυθμό chip  $R_c$ , ως εξής:

$$R_c = R_s * 2^{SF} \Leftrightarrow R_c = BW \text{ (chips/sec)} \text{ Λόγω της προηγούμενης σχέσεως}$$



**Εικόνα 19: Διαμόρφωση LoRa για διαφορετικούς συντελεστές διεύρυνσεως**



**Εικόνα 20: Διαμόρφωση δεδομένων LoRa για ορισμένο συντελεστή διεύρυνσεως [39]**

### 2.4.1.2. Παράμετροι μεταδόσεως LoRa

Οι βασικές παράμετροι της τεχνολογίας μεταδόσεως Lora είναι οι εξής: [17]

- **Bandwidth (BW):** Το εύρος του συχνοτικού φάσματος που χρησιμοποιείται.
- **Carrier Frequency (CF):** Η κεντρική / φέρουσα συχνότητα του καναλιού επικοινωνίας.
- **Coding Rate (CR):** Ο ρυθμός Απευθείας διορθώσεως σφαλμάτων (Forward Error Correction – FEC) που χρησιμοποιείται από το Lora Modem.
- **Spreading Factor (SF):** Ο συντελεστής διευρύνσεως ο οποίος ορίζεται ως:  $SF = \text{Chip Rate} / \text{Symbol Rate}$  όπου Chip Rate είναι ο αριθμός των συχνοτικών μεταβάσεων ανά bit πληροφορίας και Symbol Rate είναι ο ρυθμός μεταδόσεως της πληροφορίας (Symbols/second , Bits/second). Ένας υψηλότερος συντελεστής διευρύνσεως έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη ευαισθησία και εμβέλεια διαδόσεως αλλά και αυξημένη απαιτούμενη ενέργεια και διάρκεια διαδόσεως (Time On Air – TOA). Στα δίκτυα LoRaWAN Χρησιμοποιούνται συντελεστές διευρύνσεως μεταξύ 7 και 10.
- **Transmission Power (Tx Power):** Η ισχύς εκπομπής η οποία προδιαγράφεται στα όρια μεταξύ -4dbm και +20dbm (0,4mW – 100mW).

## 2.4.2. Το επίπεδο δικτύου

### 2.4.2.1. Βασικές παράμετροι του LoRaWAN

Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι που συμμετέχουν στην λειτουργία του LoRaWAN και οι βρίσκονται είναι υπό την διαχείριση της τελικής συσκευής, του εξυπηρετητή δικτύου ή του εξυπηρετητή εφαρμογής : [32]

- **DevAddr** (Device Address): Είναι η μοναδική διεύθυνση δικτύου της τελικής συσκευής η οποία καθορίζεται από την τελική συσκευή ή τον εξυπηρετητή εφαρμογής ανάλογα με τον τύπο ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται.
- **DevEUI** (Device Unique Identifier): Είναι ο παγκοσμίως μοναδικός αναγνωριστικός αριθμός της τελικής συσκευής ο οποίος πολλές φορές είναι ήδη καταχωρημένος από τον κατασκευαστή του τελικού πομποδέκτη ή συσκευής.
- **AppEUI** (Application Identifier): Είναι ο αναγνωριστικός αριθμός της εφαρμογής στην οποία απευθύνεται ο τελικός κόμβος.
- **NwkSKey** (Network Session Key) : Είναι το κλειδί κρυπτογράφησης που αφορά την σύνδεση της τελικής συσκευής με τον εξυπηρετητή δικτύου και ανατίθεται από τον τελικό χρήστη ή τον εξυπηρετητή δικτύου ανάλογα με τον τύπο ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται.
- **AppSKey** (Application Session Key): Είναι το κλειδί κρυπτογράφησης που αφορά την σύνδεση της τελικής συσκευής με τον εξυπηρετητή εφαρμογής και ανατίθεται από τον τελικό χρήστη ή τον εξυπηρετητή δικτύου ανάλογα με τον τύπο ενεργοποίησης που χρησιμοποιείται.

- **AppKey** (Application Key): Είναι το κλειδί κρυπτογράφησης που αφορά την κρυπτογράφηση των περιεχομένων του πακέτου μεταξύ της τελικής συσκευής και της τελικής εφαρμογής και πρέπει να είναι γνωστός από την τελική συσκευή όταν χρησιμοποιείται η μέθοδος ενεργοποίησης κόμβου από αέρος.
- **PwrIdx** (Power Index): Είναι η παράμετρος που καθορίζει την εκπεμπόμενη ισχύ του τελικού κόμβου και είναι σταθερά ορισμένη ή ορίζεται προσαρμοστικά από το δίκτυο για την ικανοποιητική επίτευξη ζεύξεως με παράλληλη ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ενέργειας.
- **DR** (Data Rate): Είναι παράμετρος που καθορίζει τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων και συνήθως είναι δυναμικά οριζόμενη από το δίκτυο με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας την ασφαλή ζεύξη.
- **ADR** (Adaptive Data Rate): Είναι παράμετρος που καθορίζει στον τελικό κόμβο εάν θα ενεργοποιηθεί ο προσαρμοστικός έλεγχος του ρυθμού δεδομένων ή όχι.
- **Bat** (Battery Level): Είναι το επίπεδο μπαταρίας του τελικού κόμβου το οποίο είναι διαθέσιμο όταν ζητηθεί από το δίκτυο η αναφορά καταστάσεως του κόμβου.
- **ReTX** (Retransmissions Number): Παράμετρος που ορίζει τον αριθμό των επαναποστολών σε περίπτωση που δεν έχει επιβεβαιωθεί η λήψη πακέτου που έχει αποσταλεί, εφόσον η αποστολή έχει οριστεί να παρέχει επιβεβαίωση (Confirmed packet transmission).
- **LinkCHK** (Link Check Interval): Παράμετρος που ορίζει το χρονικό διάστημα μεταξύ ελέγχων παρουσίας ζεύξεως .
- **RXdelay1** (Receive Slot 1 delay): Ο χρόνος που καθορίζει την εμφάνιση του πρώτου παραθύρου λήψεως μετά μία uplink σύνδεση.



- **AR** (Automatic Reply): Παράμετρος που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την λειτουργία αυτόματης αποκρίσεως του κόμβου μετά την λήψη κάποιου πακέτου δεδομένων. Η χρήση της λειτουργίας αυτής γίνεται στην επικοινωνία με επιβεβαίωση λήψεως.
- **RX2** (Receive Slot 2 Parameters): Παράμετρος που ορίζει τον ρυθμό δεδομένων και την συχνότητα που θα χρησιμοποιηθούν στο δεύτερο παράθυρο λήψεως μετά την αποστολή πακέτου από τον κόμβο.
- **Sync** (Synchronization Word): Παράμετρος που ορίζει την λέξη συγχρονισμού στην έναρξη της επικοινωνίας LoRaWAN.
- **UpCTR** (Uplink Frame Counter) : Παράμετρος που ορίζει την τιμή του μετρητή ανερχόμενου πλαισίου (uplink frame counter) η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην επόμενη αποστολή.
- **DnCTR** (Downlink Frame Counter) : Παράμετρος που ορίζει την τιμή του μετρητή κατερχόμενου πλαισίου (downlink frame counter) η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην επόμενη λήψη.
- **CH Freq** (Channel Frequency) : Παράμετρος που ορίζει την φέρουσα συχνότητα του εκάστοτε καναλιού.
- **CH Dcycle** (Channel Duty Cycle) : Παράμετρος που ορίζει τον κύκλο λειτουργίας του εκάστοτε καναλιού.
- **CH DRrange** (Channel Data Rate Range) : Παράμετρος που ορίζει το εύρος ρυθμών δεδομένων του εκάστοτε καναλιού.

## 2.4.2.2. Ενεργοποίηση τελικής συσκευής

Για την συμμετοχή μίας συσκευής στο LoRaWAN δίκτυο , πρέπει αυτή να ταυτοποιηθεί και να ενεργοποιηθεί.

Η ενεργοποίηση της συσκευής μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε μέσω του δικτύου στο οποίο ζητεί να συμμετέχει ( Over The Air Activation - OTAA) το οποίο και της αναθέτει τις παραμέτρους ταυτοποίησης, είτε απευθείας ενεργοποίηση της συσκευής εφόσον αυτή διαθέτει τις παραμέτρους ταυτότητας (Activation By Personalization – ABP). [32]

Σε κάθε περίπτωση η συσκευή πρέπει να διαθέτει τα κατάλληλα κλειδιά/ταυτότητες μέσω των οποίων θα είναι εφικτή η ενεργοποίηση της με τον εκάστοτε τρόπο.

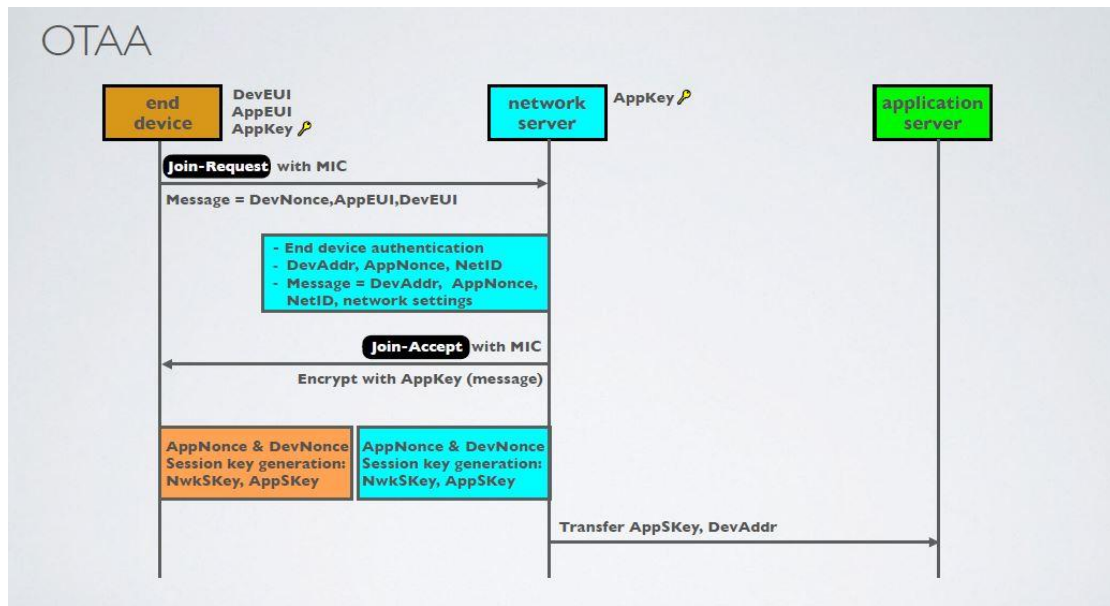
### 2.4.2.2.1. Ενεργοποίηση μέσω του αέρα

Για την ενεργοποίηση μέσω δικτύου (OTAA) η συσκευή πρέπει να έχει καταχωρημένα τρία κλειδιά : DevEUI, AppEUI και AppKey.

**DevEUI:** Είναι ένας μοναδικός αναγνωριστικός αριθμός για κάθε συσκευή LoRaWAN και είναι αντίστοιχος της διεύθυνσεως MAC. Πολλές συσκευές διαθέτουν ήδη τον αριθμό αυτό καταχωρημένο από τον κατασκευαστή.

**AppEUI:** Είναι ένας μοναδικός αναγνωριστικός αριθμός του εξυπηρετητή εφαρμογής (Application Server) και είναι αντίστοιχος με έναν αριθμό πόρτας (Port Number).

**AppKey:** Είναι ένα κλειδί συμμετρικής κρυπτογράφησης AES-128 bit και χρησιμοποιείται για την παραγωγή του κώδικα ακεραιότητας μηνύματος (Message Integrity Code - MIC) κατά την επικοινωνία της τελικής συσκευής με τον εξυπηρετητή δικτύου (Network Server) καθώς και για την κρυπτογράφηση του περιεχομένου του πακέτου μέχρι τον εξυπηρετητή εφαρμογής και αντίστροφα. Η τελική συσκευή καθώς και ο εξυπηρετητής Δικτύου πρέπει να γνωρίζουν αυτό το κλειδί για να είναι εφικτή η ενεργοποίηση. [32]



**Εικόνα 21: Η διαδικασία ενεργοποίησης OTAA [43]**

Η διαδικασία ενεργοποίησης OTAA πραγματοποιείται στα παρακάτω βήματα: [32]

1. Η τελική συσκευή παράγει προς τον εξυπηρετητή δικτύου ένα πακέτο αιτήσεως συμμετοχής (Join Request) που περιέχει έναν τυχαίο αριθμό DevNonce, (με σκοπό την εξάλειψη της πιθανότητας αντιγραφής του πακέτου και επαναλήψεως του από άλλη συσκευή) τους αριθμούς AppEUI DevEUI, καθώς και τον MIC ο οποίος δημιουργείται μέσω του κλειδιού AppKey βάσει της παρακάτω συναρτήσεως κρυπτογραφήσεως:

$$\text{MIC} = \text{aes128\_cmac}(\text{AppKey}, \text{MHDR} \mid \text{AppEUI} \mid \text{DevEUI} \mid \text{DevNonce})$$

Size (bytes)	8	8	2
Join Request	AppEUI	DevEUI	DevNonce

**Εικόνα 22: Η δομή του πακέτου Join Request [32]**

2. Εφόσον το πακέτο πληροί τις προδιαγραφές, ο εξυπηρετητής δικτύου αποκρίνεται με ένα μήνυμα αποδοχής συμμετοχής (Join Accept) , αλλιώς δεν υπάρχει κάποια απόκριση. Το μήνυμα αποδοχής συμμετοχής περιέχει τους αριθμούς: AppNonce, NetID, DevAddr, DLSettings, RxDelay, CFList(προαιρετικό).

Size (bytes)	3	3	4	1	1	(16) Optional
Join Accept	AppNonce	NetID	DevAddr	DLSettings	RxDelay	CFList

**Εικόνα 23: Η δομή του πακέτου Join Accept [32]**

Όπου:

**AppNonce:** Είναι τυχαίος αριθμός ή καθορισμένη ταυτότητα που συμμετέχει στην παραγωγή των κλειδιών NwkSKey και AppSKey.

**NetID:** Αναγνωριστικός αριθμός δικτύου.

**DevAddr:** Η διεύθυνση που ανατίθεται στην τελική συσκευή από τον εξυπηρετητή δικτύου και ο οποίος την προωθεί και στον εξυπηρετητή εφαρμογής.

**DLSettings:** Οι ρυθμοί δεδομένων που θα χρησιμοποιούνται στην λήψη.

**RxDelay:** Η χρονική καθυστέρηση μεταξύ αποστολής και λήψεως (Tx,Rx).

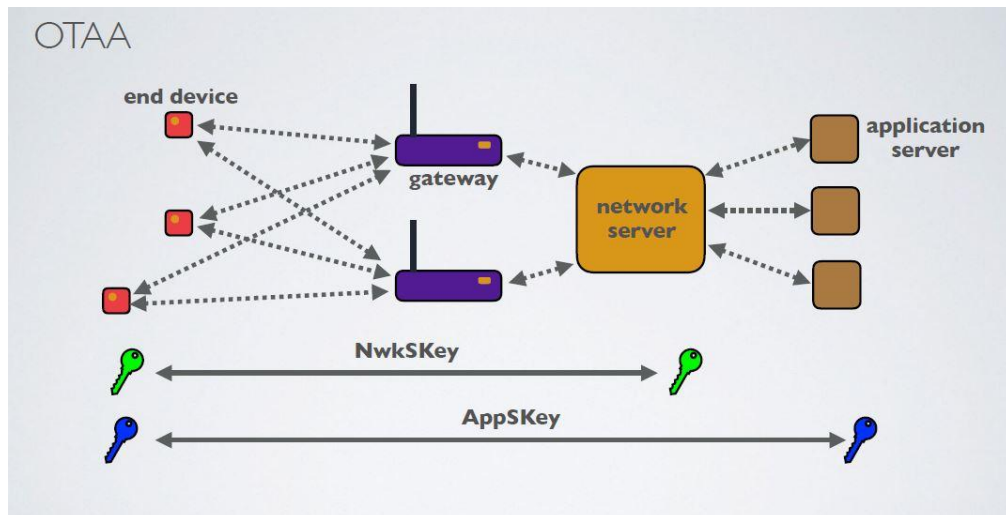
**CFList:** Μία προαιρετική λίστα των συχνοτήτων των καναλιών που θα χρησιμοποιούνται.

Μέσω του παραπάνω πακέτου η τελική συσκευή μπορεί να εξάγει τα κλειδιά NwkSKey και AppSKey βάσει των εξής συναρτήσεων:

$$\text{NwkSKey} = \text{aes128\_encrypt}(\text{AppKey}, 0x01 \mid \text{AppNonce} \mid \text{NetID} \mid \text{DevNonce} \mid \text{pad16})$$

$$\text{AppSKey} = \text{aes128\_encrypt}(\text{AppKey}, 0x02 \mid \text{AppNonce} \mid \text{NetID} \mid \text{DevNonce} \mid \text{pad16})$$

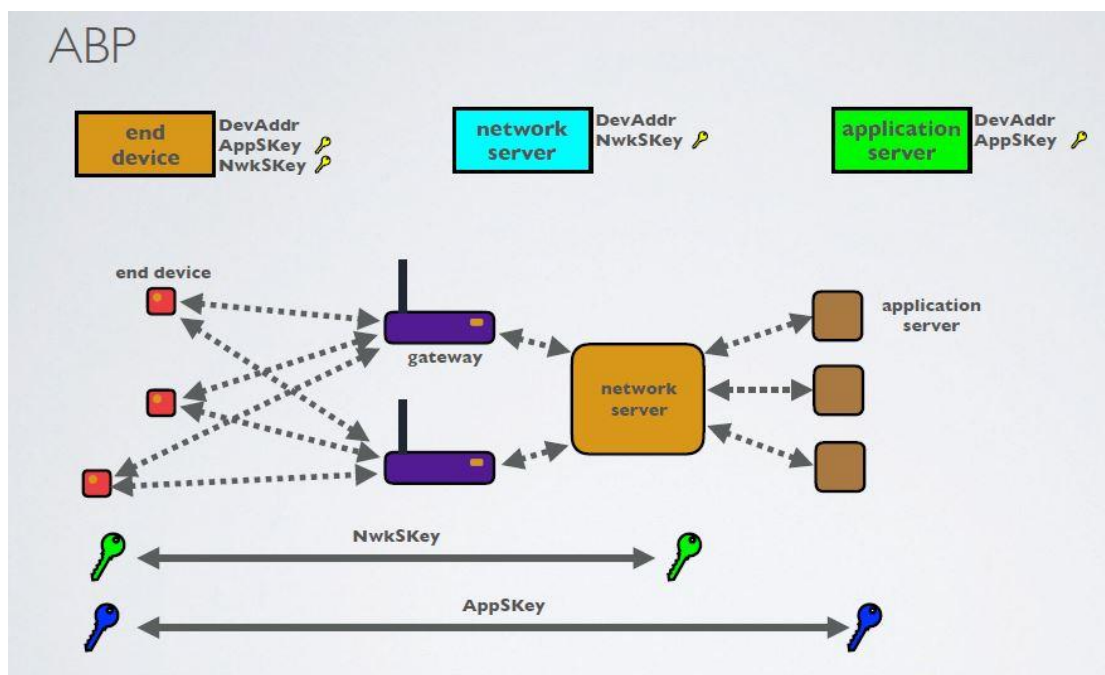
Όπου το NwkSKey χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του MIC μεταξύ της τελικής συσκευής και του εξυπηρετητή δικτύου, ενώ το AppSKey χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση του περιεχομένου του πακέτου που αφορά την εφαρμογή, μεταξύ της τελικής συσκευής και του εξυπηρετητή εφαρμογής.



Εικόνα 24: Τα επίπεδα ασφαλείας της ενεργοποίησης OTAA [43]

#### 2.4.2.2.2. Απευθείας ενεργοποίηση

Στην περίπτωση απευθείας ενεργοποίησης ABP, δεν υπάρχει η διαδικασία Join Request – Join Accept αλλά η τελική συσκευή κατέχοντας τους αριθμούς DevAddr, NwkSKey και AppSKey μπορεί απευθείας να ενταχθεί σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο LoRaWAN. [32]



Εικόνα 25: Η διαδικασία ενεργοποίησης ABP [43]

### 2.4.3. Το επίπεδο εφαρμογής

Το επίπεδο εφαρμογής του LoRaWAN έχει πρόσβαση στην διαχείριση των παρακάτω παραμέτρων του δικτύου :

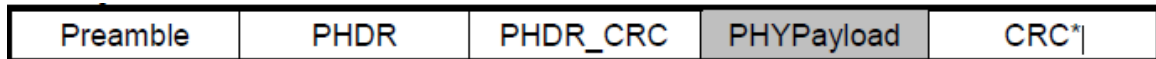
- Δημιουργία, επεξεργασία,αποστολή/λήψη και αποθήκευση των δεδομένων της εκάστοτε εφαρμογής.
- Καταχώρηση, ενεργοποίηση και διευθυνσιοδότηση τελικών συσκευών.
- Διαχείριση των παραμέτρων προσαρμοστικού ελέγχου ρυθμού δεδομένων, του κύκλου λειτουργίας και των παραμέτρων διαμορφώσεως συναρτήσει των απαιτήσεων του δικτύου (π.χ ρύθμιση του συντελεστή διευρύνσεως με σκοπό την επίτευξη ζεύξεως).
- Διαχείριση της εκπεμπόμενης ισχύος των τελικών συσκευών με σκοπό την ικανοποιητική κάλυψη με ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας.
- Ορισμός των συχνοτήτων καναλιών που θα χρησιμοποιηθούν.
- Διαχείριση του μηχανισμού επιβεβαιώσεως λήψεως καθώς και της επαναλήψεως αποστολών σε περίπτωση μη επιβεβαιώσεως.
- Διαχείριση των διαδικασιών συμμετοχής στο δίκτυο.

## 2.5. Η μορφή των πακέτων δεδομένων

Όλα τα μηνύματα ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης LoRa στο φυσικό επίπεδο μεταδόσεως λαμβάνουν την μορφή πακέτων τα φέρουν τα εξής περιεχόμενα με την μορφή πλαισίων εντός του πακέτου: [32]

- **Preamble:** Είναι μία ακολουθία συχνοτικών σαρώσεων (Chirps) που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό εκπεμπόμενου του μηνύματος LoRa από τον δέκτη / αποδιαμορφωτή. Μέσω του πλαισίου Preamble ο δέκτης δύναται να αντιληφθεί τις παραμέτρους διαμορφώσεως LoRa που χρησιμοποιείται για το φυσικό πακέτο, αφού είναι διαμορφωμένο με τον ίδιο συντελεστή διευρύνσεως (Spreading Factor) που έχει εφαρμοστεί και στα υπόλοιπα πλαίσια.
- **PHDR :** Η κεφαλίδα του φυσικού μηνύματος η οποία περιέχει πληροφορίες όπως το μέγεθος του πακέτου, η παραμετροποίηση της απευθείας διορθώσεως σφαλμάτων (Forward Error Correction – FEC), και η ενημέρωση για την παρουσία του τελικού πλαισίου CRC.
- **PHDR\_CRC :** Ο κωδικός CRC (Cyclic Redundancy Check) του πλαισίου PHDR ο οποίος εισάγεται με σκοπό την επαλήθευση από τον δέκτη και τον εντοπισμό πιθανών σφαλμάτων.
- **PHYPayload :** Το περιεχόμενο δεδομένων του πακέτου που είναι στην ουσία η μεταδιδόμενη πληροφορία από τον πομπό.
- **CRC :** Ο κωδικός CRC (Cyclic Redundancy Check) ολόκληρου του πακέτου ο οποίος εισάγεται με σκοπό την επαλήθευση από τον δέκτη και τον εντοπισμό πιθανών σφαλμάτων. Αυτό το πλαίσιο υπάρχει μόνο στα ανερχόμενα πακέτα (εκπεμπόμενα από την τελική συσκευή προς το δίκτυο)

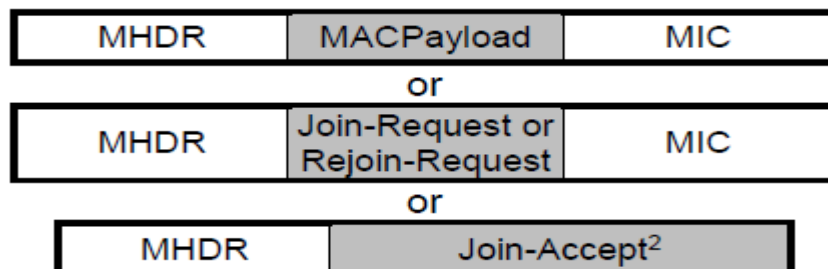




Εικόνα 26: Δομή πακέτου στο φυσικό επίπεδο [32]

Το PHYPayload αναλύεται στα ακόλουθα περιεχόμενα:

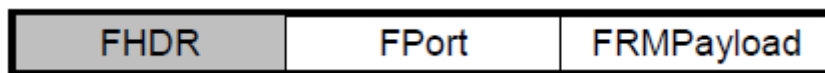
- **MHDR** : Η κεφαλίδα του PHYPayload. Περιέχει πληροφορίες όπως ο τύπος του μηνύματος (όπως ανερχόμενα / κατερχόμενα δεδομένα με/χωρίς επιβεβαίωση) και η δομή του.
- **MACPayload** ή Join Request ή Join Accept : Το περιεχόμενο δεδομένων του πλαισίου PHYPayload που είναι στην ουσία η μεταδιδόμενη πληροφορία από τον πομπό στο επίπεδο του δικτύου LoRaWAN. Σε περίπτωση αιτήσεως συμμετοχής της τελικής συσκευής, το πλαίσιο αυτό περιέχει τον προκαθορισμένο κωδικό που σημαίνει αυτήν του την πρόθεση. Εφόσον η αίτηση συμμετοχής γίνει δεκτή από τον εξυπηρετητή δικτύου τότε η απάντηση αποδοχής αποστέλλεται εντός αυτού του πλαισίου. Τα περιεχόμενα αυτού του πλαισίου είναι κρυπτογραφημένα βάσει του NwkSKey.
- **MIC** : Ο κώδικας ακεραιότητας (Message Integrity Code) του πλαισίου PHYPayload ο οποίος εισάγεται με σκοπό την επαλήθευση από τον εξυπηρετητή δικτύου και τον εντοπισμό πιθανών σφαλμάτων ή για την επαλήθευση κατοχής ορθών κλειδιών κρυπτογράφησης κατά την αίτηση της τελικής συσκευής για ενεργοποίηση από αέρος .



Εικόνα 27: Δομή πλαισίου PHYPayload [32]

Το MACPayload περιέχει τα ακόλουθα :

- **FHDR** : Η κεφαλίδα πλαισίου.
- **FPort** : Μεταβλητή που περιέχει στοιχεία που σχετίζονται με το επίπεδο εφαρμογής όπως ο τύπος της εφαρμογής.
- **FRMPayload** : Είναι τα περιεχόμενα δεδομένα του πακέτου τα οποία απευθύνονται στο επίπεδο εφαρμογής του LoRaWAN και είναι κρυπτογραφημένα βάσει του AppSKey.



Εικόνα 28: Δομή πλαισίου MACPayload [32]

Το FHDR περιέχει:

- **DevAddr** : Η διεύθυνση της τελικής συσκευής.
- **FCtrl** : Πλαίσιο ελέγχου που περιέχει πληροφορίες που έχουν να κάνουν με την κατάσταση / έλεγχο του προσαρμοστικού ελέγχου ρυθμού δεδομένων (ADR) , την επιβεβαίωση λήψεως δεδομένων (ACK), τα αποστελλόμενα πλαίσια σε αναμονή ή την ισχύ εκπομπής των τελικών συσκευών.
- **FCnt** : Μετρητής πλαισίου για την αρίθμηση των ακολουθιών δεδομένων.
- **FOpts** : Πλαίσιο ελέγχου που περιέχει εντολές που έχουν να κάνουν με τον προσαρμοστικό έλεγχο του ρυθμού δεδομένων (ADR) , την επιβεβαίωση λήψεως δεδομένων (ACK) ή τον καθορισμό ισχύος εκπομπής των τελικών συσκευών.



Εικόνα 29: Δομή πλαισίου FHDR [32]

## 2.6. Η ασφάλεια του Δικτύου

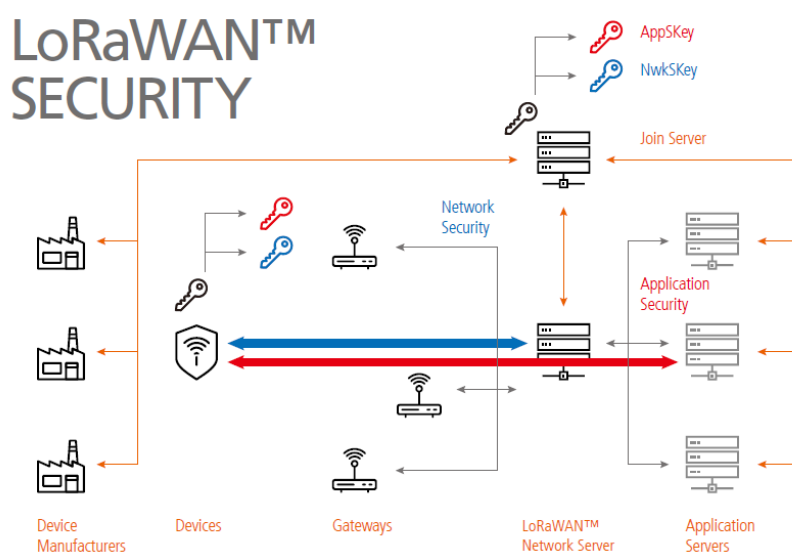
Όλες οι συσκευές LoRa είναι υποχρεωμένες να κρυπτογραφούν τα μεταδιδόμενα πακέτα με κρυπτογράφηση AES και κλειδιά των 128 Bit, όπου το περιεχόμενο των πακέτων τελικά κρυπτογραφείται από άκρη σε άκρη του δικτύου ( End to End Encryption).

Το Δίκτυο επικοινωνίας LoRaWAN προσφέρει δύο επίπεδα ασφαλείας: [19]

- Στο επίπεδο δικτύου (End Device – Network Server) κρυπτογραφείται ο κώδικας ακεραιότητας του πακέτου (MIC) μέσω του κλειδιού NwkSKey.

Το περιεχόμενο του πακέτου (Payload) είναι κρυπτογραφημένο για τον εξυπηρετητή δικτύου. Αξίζει να σημειωθεί πώς ο εξυπηρετητής δικτύου δύναται να αλλοιώσει το περιεχόμενο των πακέτων (πιθανή κακόβουλη παρέμβαση) και αυτός είναι ο λόγος που ο εξυπηρετητής δικτύου πρέπει να επιλέγεται και να αξιολογείται ως προς την αξιοπιστία.

- Στο επίπεδο εφαρμογής (End Device – Application Server) το περιεχόμενο του πακέτου κρυπτογραφείται μέσω του κλειδιού AppSKey.



Εικόνα 30 : Τα επίπεδα ασφαλείας του LoRaWAN [19]

## 2.7. Απώλεια δεδομένων

Η τεχνολογία LoRaWAN , δεν διαθέτει κάποιον μηχανισμό αποφυγής διενέξεων πακέτων με αποτέλεσμα η αύξηση του αριθμού των συμμετεχόντων συσκευών να αυξάνει και την πιθανότητα απώλειας μεταδιδόμενων δεδομένων.

Οι τρεις βασικές περιπτώσεις απώλειας πακέτων είναι: [17]

- Μη επαρκής λαμβανόμενη ισχύς συναρτήσει της ευαισθησίας του δέκτη όπου μπορεί να οφείλεται στην απόσταση επικοινωνίας, σε φυσικά εμπόδια ή στην μη κατάλληλη ρύθμιση της ισχύος εκπομπής στις τελικές συσκευές.
- Κορεσμός του δέκτη / Gateway όπου την στιγμή εκπομπής από την τελική συσκευή , είναι κατειλημμένα τα διαθέσιμα κανάλια της Πύλης δικτύου-Gateway από άλλες συσκευές.
- Παρεμβολή πακέτων, όπου διαφορετικές τελικές συσκευές εκπέμπουν ταυτόχρονα στο ίδιο κανάλι με τις ίδιες παραμέτρους εκπομπής (Spreading Factor, Bandwidth) .

Γενικά οι παράμετροι εκπομπής LoRa είναι υπολογισμένες ώστε να καθιστούν τα εκπεμπόμενα σήματα ορθογώνια μεταξύ τους και άρα να είναι εφικτή η παράλληλη εκπομπή / αποδιαμόρφωση πακέτων στο ίδιο κανάλι. Αξίζει να σημειωθεί πώς υπάρχουν κάποιοι συνδυασμοί παραμέτρων εκπομπής που παράγουν μη ορθογώνια σήματα.

Στην τεχνολογία επικοινωνίας διευρυμένου φάσματος (Spread Spectrum) , τα σήματα μεταδίδονται μέσω φασματικών σαρώσεων (Chirps). Όταν οι φασματικές αυτές σαρώσεις παρουσιάζουν διαφορετικότητα μεταξύ δύο μεταδιδόμενων σημάτων τότε τα σήματα αυτά θεωρούνται ορθογώνια και δεν υπάρχει πρόβλημα διενέξεως.

Το Chirp Rate υπολογίζεται ως εξής :  $Chirp_{rate} = BW * \frac{BW}{2^{SF}}$  (Chirps / sec)

Αφού  $Chirp_{rate} = BW * Symbol_{rate}$  και  $Symbol_{rate} = \frac{BW}{2^{SF}}$  (Symbols / sec)

Για την ελαχιστοποίηση των πιθανοτήτων διενέξεως / κορεσμού πρέπει να τίθενται σε εφαρμογή οι κανόνες ορθής χρήσεως που επιβάλλονται από τους διεθνείς οργανισμούς (ETSI , FCC) μέσω των οποίων καθορίζεται ένας ημερήσιος μέγιστος χρόνος πακέτων στον αέρα καθώς περιορισμοί ισχύος εκπομπής. Ακόμη ο εκάστοτε Network Service πάροχος (πχ TTN) έχει δικαίωμα να θέτει ακόμη αυστηρότερους κανόνες και περιορισμούς που αφορούν την διακίνηση των δεδομένων με σκοπό την αξιόπιστη λειτουργία του συνολικού συστήματος.

Μία ακόμη δυνατότητα που διατίθεται στο LoRaWAN είναι η αποστολή πακέτων με επιβεβαίωση (Confirmed Packet Transmission) , όπου εάν δεν υπάρξει επιβεβαίωση λήψεως του πακέτου από τον δέκτη λόγω κάποιου εκ των προαναφερθέντων προβλημάτων , τότε είναι εφικτή η επαναποστολή μετά από καθορισμένο χρόνο. Βέβαια τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η υψηλότερη ενεργειακή κατανάλωση των τελικών συσκευών και η αύξηση της χρήσεως του δικτύου.

## **2.8. Οι Περιορισμοί / κανόνες δίκαιας χρήσεως του δικτύου**

Το φυσικό επίπεδο LoRa λειτουργεί στην ελεύθερη ζώνη συχνοτήτων ISM όπου ισχύουν διεθνώς προτυποποιημένα όρια και κανόνες λειτουργίας τα οποία εξαρτώνται από την γεωγραφική περιοχή λειτουργίας.

Οι ζώνες συχνοτήτων ISM (Industrial Scientific Medical) είναι φασματικές ζώνες που προορίζονται διεθνώς για τη χρήση ραδιοσυχνοτήτων (RF) για βιομηχανικούς, επιστημονικούς και ιατρικούς σκοπούς. Ο εξοπλισμός επικοινωνιών που λειτουργεί σε αυτές τις ζώνες πρέπει να αντέχει τις παρεμβολές που προκαλούνται από τις εφαρμογές ISM.

Παρά τον αρχικό προσανατολισμό χρήσεως, τα τελευταία χρόνια η ταχύτερα αναπτυσσόμενη χρήση αυτών των ζωνών ήταν για συστήματα ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας και μικρής ισχύος, δεδομένου ότι αυτές οι ζώνες είναι συχνά εγκεκριμένες για τέτοιες συσκευές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς κυβερνητική άδεια, όπως διαφορετικά θα απαιτούνταν για τους πομπούς.

### 2.8.1. Προτυποποίηση χρήσεως ραδιοσυχνοτήτων

Στην Ευρώπη τα πρότυπα και οι κανόνες χρήσεως του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ορίζονται από το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI) το οποίο είναι ένας ανεξάρτητος, μη κερδοσκοπικός οργανισμός τυποποίησης στον τομέα των τηλεπικοινωνιών (κατασκευαστές εξοπλισμού και φορείς εκμεταλλεύσεως δικτύων). Το ETSI παράγει παγκοσμίως εφαρμόσιμα πρότυπα για τις Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνιών (ΤΠΕ), συμπεριλαμβανομένων των σταθερών, κινητών, ραδιοφωνικών, ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών και διαδικτυακών τεχνολογιών.

Στις Η.Π.Α η Ομοσπονδιακή Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) είναι μια ανεξάρτητη υπηρεσία που δημιουργήθηκε με νόμο για τη ρύθμιση των διακρατικών ραδιοφωνικών, ραδιοτηλεοπτικών, δορυφορικών και ενσύρματων επικοινωνιών. Η FCC διατηρεί δικαιοδοσία στους τομείς της ευρυζωνικής πρόσβασης, του θεμιτού ανταγωνισμού, της χρήσης ραδιοσυχνοτήτων, της υπευθυνότητας των μέσων ενημέρωσης, της δημόσιας και της εθνικής ασφάλειας.

Όσον αφορά την περιορισμούς που αφορούν τις επικοινωνίες LoRa στην Ευρώπη το ETSI ορίζει τους παρακάτω κανονισμούς για την περιοχή ISM EU 863 MHz - 870 MHz:  
[8]

- Για uplink η μέγιστη ισχύς μετάδοσης ορίζεται στα 14 dBm (25mW).
- Για downlink (στα 869.525MHz) η μέγιστη ισχύς μετάδοσης περιορίζεται στα 27 dBm (0.5W).
- Επιτρεπόμενος κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle) 0,1% και 1,0% ανά ημέρα (24 ώρες) ανάλογα με το κανάλι.
- Μέγιστο επιτρεπόμενο κέρδος κεραίας +2,15 dBi.

Αξίζει να σημειωθεί πώς πέραν των νομικών περιορισμών ο εκάστοτε πάροχος υπηρεσιών LoRaWAN δύναται να καθορίζει επιπρόσθετα αυστηρότερα μέτρα δίκαιας χρήσεως του δικτύου στους χρήστες.

Εάν επί παραδείγματος γίνεται χρήση του δικτύου The Things Network (TTN), ισχύουν οι ακόλουθες πολιτικές δίκαιης χρήσης: [41]

- Ο χρόνος ομιλίας ανερχόμενης ζεύξης (Uplink) περιορίζεται στα 30 δευτερόλεπτα την ημέρα ανά κόμβο.
- Τα μηνύματα κατερχόμενης ζεύξης (Downlink) περιορίζονται σε 10 μηνύματα την ημέρα ανά κόμβο

### 2.8.2. Κύκλος λειτουργίας και χρόνος στον αέρα

Όταν ένα σήμα αποστέλλεται από έναν πομπό, απαιτείται ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα πριν από την λήψη του σήματος από τον δέκτη. Αυτός ο χρόνος ονομάζεται χρόνος στον αέρα (Time on Air - ToA).

Ο κύκλος λειτουργίας (Duty Cycle) είναι η αναλογία του χρόνου κατά τον οποίο εκπέμπει ένα σύστημα . Ο κύκλος λειτουργίας μπορεί να είναι εκφρασμένος ως λόγος ή ως ποσοστό. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στην Ευρώπη, υπάρχει κύκλος εργασιών 0,1% και 1,0% ανά ημέρα ανάλογα με το κανάλι.

Επί παραδείγματος για να τηρηθεί ο κύκλος λειτουργίας 1% για πακέτο δεδομένων με ToA 100ms θα πρέπει μετά την αποστολή του πακέτου πρέπει ο πομπός να αναμείνει 9,9 δευτερόλεπτα πριν πραγματοποιήσει την επόμενη αποστολή αφού ισχύει:

$$Duty\_Cycle = \frac{ToA}{Wait\_time + ToA}$$



Όπου θα έχουμε:

$$1\% = \frac{100mS}{Wait\_time + 100mS} \Rightarrow Wait\_time = \frac{100mS}{0.01} - 100mS = 9900mS$$

Όταν έχουμε μια συσκευή που μεταδίδει 3 κανάλια σε μία υποζώνη ISM με κύκλο λειτουργίας 1% ανά κανάλι, το κάθε επιμέρους κανάλι εξακολουθεί να καταλαμβάνεται από 1% του χρόνου και η συσκευή θα εκπέμπει με συνολικό κύκλο λειτουργίας 3%. Στην παραπάνω περίπτωση και εφόσον έχουμε περιορισμό για μέγιστο κύκλο λειτουργίας 1% στην υποζώνη συχνοτήτων τότε η συσκευή δεν θα πληροί τους κανονισμούς που ορίζονται. Εάν η ίδια συσκευή εκπέμπει τα 3 κανάλια σε τρεις διαφορετικές υποζώνες με περιορισμό του κύκλου λειτουργίας στο 1% έκαστη, τότε η συσκευή θα συμμορφώνεται με τους περιοριστικούς κανονισμούς.

Στην Ευρώπη, οι κύκλοι λειτουργίας ρυθμίζονται από την παράγραφο 7.2.3 του προτύπου ETSI EN300.220. Το πρότυπο αυτό ορίζει τις ακόλουθες υποζώνες και τους κύκλους λειτουργίας τους όσον αφορά την τεχνολογία LoRa : [8]

- **Υποζώνη 0** : Συχνότητες: 863,0 - 868,0 MHz Κύκλος λειτουργίας: 1%
- **Υποζώνη 1** : Συχνότητες: 868,0 - 868,6 MHz: Κύκλος λειτουργίας: 1%
- **Υποζώνη 2** : Συχνότητες: 868,7 - 869,2 MHz: Κύκλος λειτουργίας: 0,1%
- **Υποζώνη 3** : Συχνότητες: 869,4 - 869,65 MHz: Κύκλος λειτουργίας: 10%
- **Υποζώνη 4** : Συχνότητες: 869,7 - 870,0 MHz: Κύκλος λειτουργίας: 1%

Frequency Bands/frequencies	Applications	Maximum radiated power, e.r.p. / power spectral density	Channel spacing	Spectrum access and mitigation requirement (e.g. Duty cycle or LBT + AFA)
868,000 MHz to 868,600 MHz (see note 4)	Non-specific use	25 mW	No requirement (see note 6)	1 % or LBT + AFA (see note 3)
868,600 MHz to 868,700 MHz	Alarms	10 mW	25 kHz The whole stated frequency band may be used as 1 wideband channel for high speed data transmission	1 %
868,700 MHz to 869,200 MHz (see note 4)	Non-specific use	25 mW	No requirement (see note 6)	0,1 % or LBT + AFA (see note 3)
869,200 MHz to 869,250 MHz	Social alarms	10 mW	25 kHz	0,1 %
869,250 MHz to 869,300 MHz	Alarms	10 mW	25 kHz	0,1 %
869,300 MHz to 869,400 MHz	Alarms	10 mW	25 kHz	1 %
869,400 MHz to 869,650 MHz	Non-specific use	500 mW	≤25 kHz The whole stated frequency band may be used as 1 wideband channel for high speed data transmission	10 % or LBT + AFA (see note 3)
869,650 MHz to 869,700 MHz	Alarms	25 mW	25 kHz	10 %
869,700 MHz to 870,000 MHz (see note 5)	Non-specific use	25 mW	No requirement	1 % or LBT+AFA (see notes 2 and 3)
869,700 MHz to 870,000 MHz (see note 5)	Non-specific use	5 mW	No requirement	No restriction
<p>NOTE 1: The power limits, channel arrangement and duty cycle for FHSS equipment are given in clause 7.4.1.2; for DSSS and other non-FHSS spread spectrum equipment are given in clause 7.4.1.3.</p> <p>NOTE 2: For frequency agile devices without LBT (or equivalent techniques) operating in the frequency range 863 MHz to 870 MHz, the duty cycle limit applies to the total transmission unless specifically stated otherwise (e.g. clause 7.10.3).</p> <p>NOTE 3: When either a duty cycle, Listen Before Talk (LBT) or equivalent technique applies then it shall not be user dependent/adjustable and shall be guaranteed by appropriate technical means. For LBT devices without Adaptive Frequency Agility (AFA) or equivalent techniques, the duty cycle limit applies.</p> <p>NOTE 4: Devices supporting audio and video applications shall use a digital modulation method with a maximum bandwidth of 300 kHz. Devices supporting analogue and/or digital voice shall have a maximum bandwidth not exceeding 25 kHz.</p> <p>NOTE 5: Devices shall not support audio and/or video applications. Devices supporting voice applications shall not exceed 25 kHz bandwidth and shall use spectrum access technique such as LBT or equivalent; the transmitter shall include a power output sensor controlling the transmitter to a maximum transmit period of 1 minute for each transmission.</p> <p>NOTE 6: The preferred channel spacing is 100 kHz allowing for subdivision into 50 kHz or 25 kHz.</p> <p>NOTE 7: The power density can be increased to +6,2 dBm/100 kHz and -0,8 dBm/100 kHz, if the band is limited to 865 MHz to 868 MHz and 865 MHz to 870 MHz respectively.</p> <p>NOTE 8: For wideband modulation other than FHSS and DSSS with a bandwidth of 200 kHz to 3 MHz, duty cycle can be increased to 1 % if the band is limited to 865 MHz to 868 MHz and power to ≤10 mW e.r.p.</p> <p>NOTE 9: Duty cycle may be increased to 1 % if the band is limited to 865 MHz to 868 MHz.</p>				

**Πίνακας 5: Κανονισμοί βάσει του ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012-01) [8]**

### 2.8.3. Τα συχνοτικά κανάλια του LoRaWAN

Τα Κανάλια ασύρματης ζεύξης του LoRaWAN ορίζονται στην Ευρώπη στο συχνοτικό εύρος 867 – 869 MHz και έκαστο κανάλι δύναται να έχει εύρος 125 KHz ή 250 KHz για Uplink και 125 KHz για Downlink. Οι συντελεστές διευρύνσεως που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην διαμόρφωση κυμαίνονται από 7 – 12 για Uplink συνδέσεις. [11]

	Europe	North America	China	Korea	Japan	India
Frequency band	867-869MHz	902-928MHz	470-510MHz	920-925MHz	920-925MHz	865-867MHz
Channels	10	64 + 8 + 8	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee	In definition by Technical Committee
Channel BW Up	125/250kHz	125/500kHz				
Channel BW Dn	125kHz	500kHz				
TX Power Up	+14dBm	+20dBm typ (+30dBm allowed)				
TX Power Dn	+14dBm	+27dBm				
SF Up	7-12	7-10				
Data rate	250bps- 50kbps	980bps-21.9kbps				
Link Budget Up	155dB	154dB				
Link Budget Dn	155dB	157dB				

**Πίνακας 6: Τοπικές παράμετροι χρήσεως ραδιοσυχνοτήτων LoRaWAN [11]**

Τα κανάλια δικτύου μπορούν να αποδοθούν ελεύθερα από τον διαχειριστή του δικτύου ωστόσο, ορίζονται 3 προκαθορισμένα κανάλια τα οποία πρέπει να εφαρμοστούν σε κάθε τελική συσκευή με σκοπό να υλοποιούνται κάποιες λειτουργίες του δικτύου μέσω αυτών (π.χ αιτήσεις συμμετοχής). Τα κανάλια αυτά είναι το ελάχιστο σύνολο που όλες οι πύλες δικτύου πρέπει να ακούνε πάντα.

Modulation	Bandwidth [kHz]	Channel Frequency [MHz]	FSK Bitrate or LoRa DR / Bitrate	Nb Channels	Duty cycle
LoRa	125	868.10 868.30 868.50	DR0 to DR5 / 0.3-5 kbps	3	<1%

Πίνακας 7: Προκαθορισμένα κανάλια LoRaWAN EU868MHz [33]

## 2.9. Ισοζύγιο ισχύος ασύρματης ζεύξεως

Ο προϋπολογισμός ζεύξεως ενός ασύρματου συστήματος ή δικτύου είναι το άθροισμα όλων των κερδών και των απωλειών που υφίσταται το διακινούμενο σήμα μέσω του καναλιού διαδόσεως, από τον πομπό έως τον δέκτη.

Αυτό το άθροισμα περιλαμβάνει τα κέρδη και τις απώλειες του συστήματος που σχετίζονται με την κεραία, την προσαρμογή των γραμμών μεταφοράς και τις απώλειες του ίδιου του καναλιού διαδόσεως λόγω του θορύβου, των φυσικών εμποδίων ή της αποστάσεως υπολογισμένων είτε μέσω θεωρητικού μοντέλου είτε μέσω πραγματικών μετρήσεων. Συνήθως τυχαία μεταβαλλόμενοι μηχανισμοί εξασθνήσεως, όπως η πολλαπλή διάδοση (multipath propagation) και η εξασθνήση Doppler (Doppler fading) υπολογίζονται με πρόσθετο περιθώριο ανάλογα με τις απαιτήσεις και την σημαντικότητα της ζεύξεως.

Ο προϋπολογισμός ζεύξεως μίας ασύρματης συνδέσεως δικτύου μπορεί να εκφραστεί ως: [15]

$$P_{RX} (dBm) = P_{TX} (dBm) + G_{SYSTEM} (dB) - L_{SYSTEM} (dB) - L_{CHANNEL} (dB) - M (dB)$$

Όπου:

$$P_{RX} = \text{Η αναμενόμενη λαμβανόμενη ισχύς στον δέκτη.}$$

$P_{TX}$  = Η ισχύς εκπομπής.

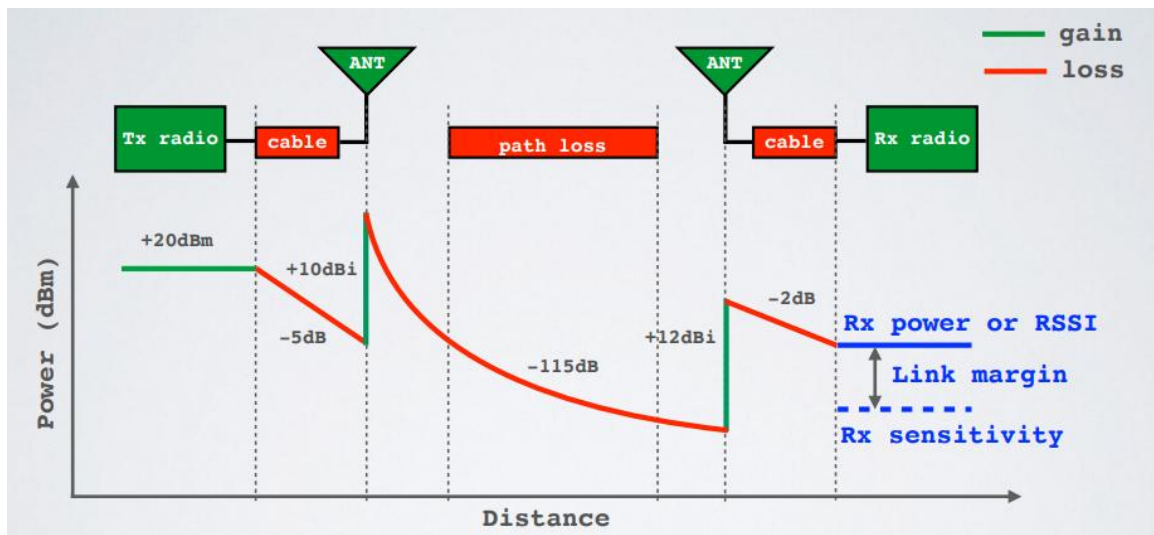
$G_{SYSTEM}$  = Τα κέρδη συστήματος όπως αυτά που σχετίζονται με κατευθυντικές κεραίες.

$L_{SYSTEM}$  = Οι απώλειες που σχετίζονται με το σύστημα, όπως γραμμές μεταφοράς ή κεραίες (στην περίπτωση χρήσεως μικρών μη αποδοτικών κεραιών όπως μερικές φορές συνηθίζεται σε φορητούς πομποδέκτες) .

$L_{CHANNEL}$  = Οι απώλειες που οφείλονται στο κανάλι διαδόσεως οι οποίες υπολογίζονται μέσω μοντέλων διαδόσεως ή από εμπειρικά δεδομένα.

$M$  = Το περιθώριο εξασθένησεως είτε θεωρητικώς υπολογισμένο είτε από εμπειρικά δεδομένα.

Ένα κανάλι επικοινωνίας λέγεται ότι συνδέεται περιοριστικά όταν οι απώλειες που σχετίζονται με την διάδοση οδηγούν σε επίπεδο λαμβανόμενης ισχύος στον δέκτη το οποίο είναι χαμηλότερο από αυτό που απαιτείται για την σωστή αποδιαμόρφωση των ληφθέντων δεδομένων (SNR χαμηλής τιμής). Συνήθως στον προϋπολογισμό ζεύξεως υπολογίζεται ένα περιθώριο ζεύξεως ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη ισχύς λήψεως στον δέκτη συνυπολογιζόμενων των αστάθμητων παραγόντων απωλειών.



Εικόνα 31: Ισοζύγιο ισχύος ζεύξεως και περιθώριο ισχύος ασύρματης ζεύξεως [43]

## 3. Υλοποίηση ιδιωτικού δικτύου LoRaWAN

### 3.1. Υλοποίηση της πύλης δικτύου

#### 3.1.1. Το WiMOD iC880A LoRa concentrator board

Ο συγκεντρωτής iC880A της εταιρείας IMST GmbH είναι ένας πομποδέκτης ειδικά σχεδιασμένος να μπορεί να διαχειριστεί ταυτόχρονα αρκετά πακέτα LoRa με διαφορετικούς συντελεστές διευρύνσεως σε πολλαπλά κανάλια.

Η μονάδα iC880A μπορεί να ενσωματωθεί σε πύλη δικτύου LoRaWAN ως το πλήρες υποσύστημα ραδιοζεύξεως και συγκεντρώσεως πακέτων. Παρέχει τη δυνατότητα να επιτραπεί η ισχυρή επικοινωνία μεταξύ μιας πύλης LoRaWAN και ενός μεγάλου αριθμού τελικών κόμβων που κατανέμονται σε ένα μεγάλο εύρος αποστάσεως. Το iC880A χρειάζεται ένα σύστημα επεξεργασίας που αναλαμβάνει την διαχείριση και την λειτουργία του. Ένα τέτοιο σύστημα διαχείρισεως μπορεί να είναι ένας υπολογιστής ή ένας μικροελεγκτής που θα συνδεθεί στο iC880A μέσω SPI επικοινωνίας.

Το iC880A είναι σε θέση να λαμβάνει έως και 8 πακέτα LoRa που αποστέλλονται ταυτόχρονα με διαφορετικούς συντελεστές διευρύνσεως και σε διαφορετικά κανάλια. Αυτή η μοναδική δυνατότητα επιτρέπει την εφαρμογή πρωτοποριακών αρχιτεκτονικών δικτύων πλεονεκτικών σε σχέση με άλλα συστήματα μικρής εμβέλειας: [22]

- Οι τελικοί κόμβοι μπορούν να αλλάζουν συχνότητα σε κάθε μετάδοση σε τυχαίο τρόπο. Αυτό παρέχει βελτίωση της ευρωστίας του συστήματος από την άποψη της ασυμβατότητας και του θορύβου.
- Οι κόμβοι τελικών σημείων μπορούν να πραγματοποιήσουν δυναμική προσαρμογή του ρυθμού δεδομένων (βάσει προσαρμογής του συντελεστή

διευρύνσεως) καθώς και του περιθώριου ασύρματης ζεύξεως δίχως να προστίθεται πολυπλοκότητα στο πρωτόκολλο επικοινωνίας.

- Λόγω της μεγάλης εμβέλειας του LoRa μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια τοπολογία αστέρα που οδηγεί σε απλούστερη υλοποίηση, αποφεύγοντας σύνθετα επίπεδα δικτύου, ασύρματους δρομολογητές και πρόσθετη κίνηση δικτύου.

Η λειτουργία του iC880A στηρίζεται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα SX1301 και SX1257 της Semtech. Το SX1301 είναι ένας επεξεργαστής δεδομένων σχεδιασμένος να εξυπηρετεί την υλοποίηση μίας πύλης δικτύου LoRa με ενσωματωμένες τις λειτουργίες συγκεντρωτή πακέτων της Semtech. Το SX1257 είναι ένας ασύρματος πομποδέκτης σχεδιασμένος να λειτουργεί αποδοτικά στην περιοχή συχνοτήτων ISM 862 – 960 MHz με χαμηλή κατανάλωση και δυνατότητα για δυναμική προσαρμογή των παραμέτρων αποστολής, λήψεως. Αξίζει να σημειωθεί πως και τα δύο παραπάνω ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν στην θερμοκρασιακή περιοχή από -40 C° έως 85°C πράγμα που επιτρέπει μεγαλύτερη αντοχή στον χρόνο στην περίπτωση στεγανοποίησης της πύλης έναντι των καιρικών συνθηκών και εφόσον ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την απαγωγή της συσσωρευόμενης θερμότητας.

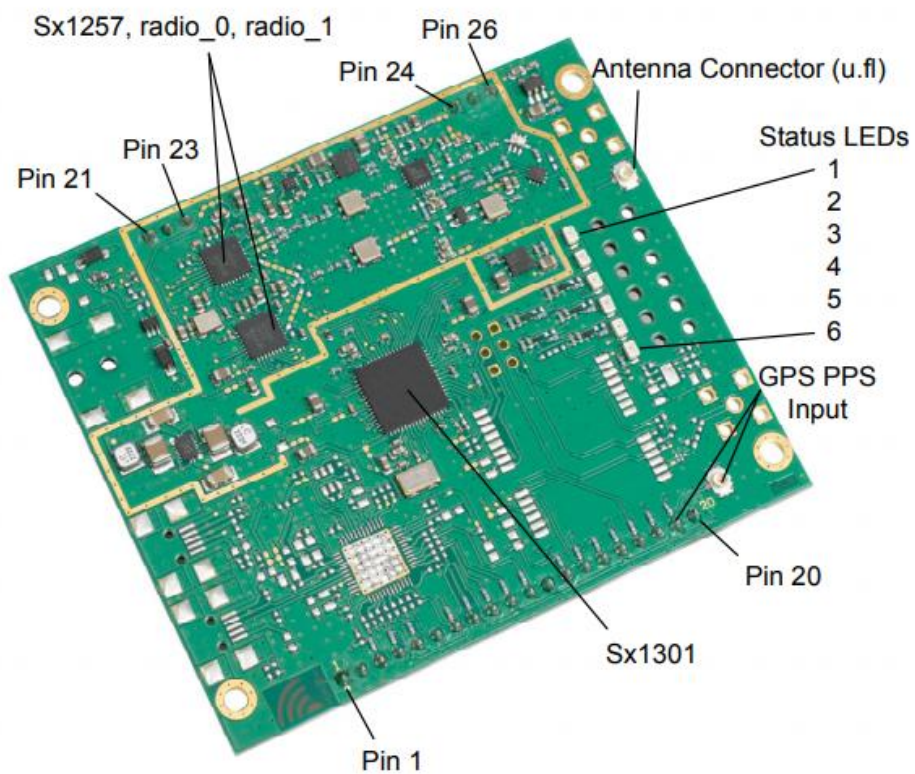
Η οδήγηση και ο χειρισμός του συγκεντρωτή iC880A γίνεται μέσω του επιπέδου περιγραφής υλικού (Hardware Abstraction Layer – HAL) το οποίο παρέχεται ελεύθερα και υπακούει στους κανονισμούς λειτουργίας που καθορίζονται από την LoRa Alliance.

Συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά της μονάδος συγκεντρωτή iC880A είναι:

- Μικρό μέγεθος (79.8 x 67.3 mm).
- Συχνοτική περιοχή λειτουργίας στα 868 MHz.
- Ευαισθησία δέκτη έως -137 dBm (Αναλόγως του συντελεστή διευρύνσεως και της συχνότητας καναλιού).



- Επικοινωνία μέσω SPI διασυνδέσεως.
- Τάση τροφοδοσίας 5 V.
- Ισχύς εξόδου πομπού έως 20 dBm.
- Δυνατότητα για ενσωματωμένο δέκτη GPS (προαιρετική έκδοση).
- Εμβέλεια επικοινωνίας LoRa έως 15 km (οπτική επαφή).
- Ελεύθερα διαθέσιμο HAL.



**Εικόνα 32: Το WiMOD iC880A**



### 3.1.2. Το Raspberry Pi 3

Τα Raspberry Pi είναι μια σειρά από μικρούς υπολογιστές υλοποιημένους σε μία ηλεκτρονική πλακέτα διαστάσεων αντίστοιχων με μίας τηλεκάρτας. Η σχεδίαση των υπολογιστών αυτών πραγματοποιείται στο Ηνωμένο Βασίλειο από το Ίδρυμα Raspberry Pi για την προώθηση της διδασκαλίας της βασικής πληροφορικής στα σχολεία και στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Τα χαρακτηριστικά αυτών των υπολογιστών ποικίλουν ανάλογα με το μοντέλο και την έκδοση και συνεχώς βελτιώνονται. Τα βασικά χαρακτηριστικά του Raspberry Pi 3 model B που κυκλοφόρησε το έτος 2016 συνοψίζονται ως εξής: [25]

- Επεξεργαστής : Τετραπύρηνος ARMv7 στα 1,25 GHz.
- Μνήμη RAM : 1GB SDRAM στα 400 MHz
- Αποθηκευτικός χώρος : Μνήμη MicroSD
- Γραφικά : Διπύρηνος επεξεργαστής Video Core IV
- Ενσύρματη συνδεσιμότητα : 4 θύρες USB , θύρα Ethernet 10/100 LAN
- Ασύρματη συνδεσιμότητα : WiFi , Bluetooth
- Εικόνα / Ήχος : 1 θύρα HDMI , 1 θύρα CAMERA CSI , 1 θύρα οθόνης DSI, τετραπολικός connector 3,5mm για έξοδο composite video και ήχου
- Συνδέσεις γενικής χρήσεως : 2X20 Pin αρσενική ακιδοσειρά για GPIO και τροφοδοσίες.
- Διαστάσεις ηλεκτρονικής πλακέτας : 85,6 mm X 56 mm X21 mm (Μ X Π X Υ)
- Απαιτήσεις τροφοδοσίας : 5 V / 2,5 A

Τα Raspberry Pi συνήθως τρέχουν λειτουργικό σύστημα Linux και διαθέτουν GPIO (General Purpose Input Output) pins των οποίων η λειτουργικότητα μπορεί να καθοριστεί μέσω κατάλληλου λογισμικού. Αυτό κάνει δημοφιλή την χρήση του Raspberry Pi σε

εφαρμογές ρομποτικής , αισθητήρων και διάφορων άλλων πεδίων όπου αντικαθίσταται η χρήση μικροελεγκτών από ένα επεξεργαστικά ισχυρότερο σύστημα.

Raspberry Pi 3 GPIO Header				
Pin#	NAME		NAME	Pin#
01	3.3v DC Power	Red	DC Power 5v	02
03	GPIO02 (SDA1 , I <sup>2</sup> C)	Blue	DC Power 5v	04
05	GPIO03 (SCL1 , I <sup>2</sup> C)	Blue	Ground	06
07	GPIO04 (GPIO_GCLK)	Green	(TXD0) GPIO14	08
09	Ground	Black	(RXD0) GPIO15	10
11	GPIO17 (GPIO_GEN0)	Green	(GPIO_GEN1) GPIO18	12
13	GPIO27 (GPIO_GEN2)	Green	Ground	14
15	GPIO22 (GPIO_GEN3)	Green	(GPIO_GEN4) GPIO23	16
17	3.3v DC Power	Red	(GPIO_GEN5) GPIO24	18
19	GPIO10 (SPI_MOSI)	Purple	Ground	20
21	GPIO09 (SPI_MISO)	Purple	(GPIO_GEN6) GPIO25	22
23	GPIO11 (SPI_CLK)	Purple	(SPI_CE0_N) GPIO08	24
25	Ground	Black	(SPI_CE1_N) GPIO07	26
27	ID_SD (I <sup>2</sup> C ID EEPROM)	Yellow	(I <sup>2</sup> C ID EEPROM) ID_SC	28
29	GPIO05	Green	Ground	30
31	GPIO06	Green	GPIO12	32
33	GPIO13	Green	Ground	34
35	GPIO19	Green	GPIO16	36
37	GPIO26	Green	GPIO20	38
39	Ground	Black	GPIO21	40

Rev. 2  
29/02/2016

www.element14.com/RaspberryPi

**Εικόνα 33: Τα GPIO του Raspberry Pi 3 Model B**



**Εικόνα 34: Το Raspberry Pi 3 Model B**

### 3.1.3. Σύνδεση του Raspberry Pi 3 με το iC880A

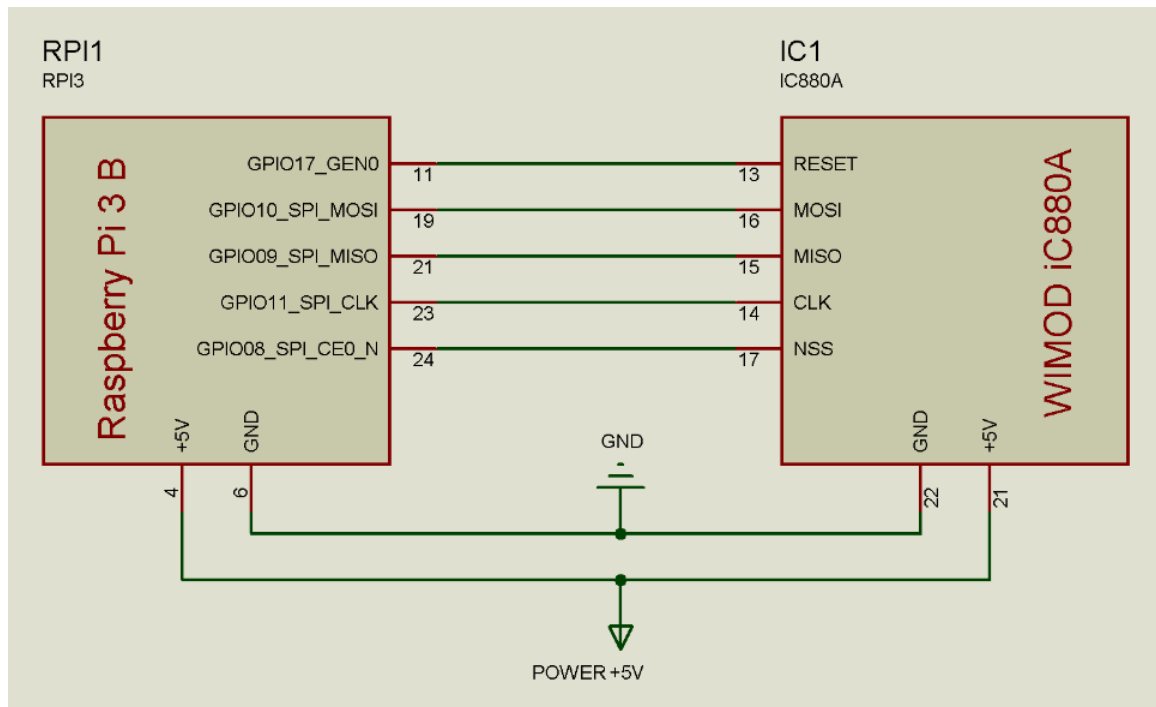
Για να είναι εφικτή η διασύνδεση και η επικοινωνία ενός RPI 3 με την μονάδα συγκεντρωτή iC880A θα πρέπει να αξιοποιηθούν τα GPIO pins του RPI 3 που αφορούν την επικοινωνία SPI καθώς και ένα pin για την εφαρμογή του reset στο iC880A. Ακόμη πρέπει να συνδεθούν οι ακροδέκτες τροφοδοσίας καθώς και η ίδια η τροφοδοσία η οποία μπορεί να παρασχεθεί από την micro USB θύρα στο Raspberry Pi και μέσω αυτού να τροφοδοτηθεί και ο συγκεντρωτής.

Στον κάτω πίνακα φαίνονται τα συμμετέχοντα pins από τις δύο συσκευές:

<b>Raspberry Pi 3 Model B</b>	<b>WiMOD iC880A</b>
Pin 11 - GPIO17 - GPIO_GEN0	Pin 13 - Reset
Pin 23 - GPIO11 - SPI_CLK	Pin 14 - CLK
Pin 21 - GPIO09 - SPI_MISO	Pin 15 - MISO
Pin 19 - GPIO10 - SPI_MOSI	Pin 16 - MOSI
Pin 24 – GPIO08 – SPI_CEO_N	Pin 17 - NSS
Pin 4 – DC POWER +5V	Pin 21 - VDD
Pin 6 - GROUND	Pin 22 - GND

**Πίνακας 8: Συνδέσεις ακροδεκτών Raspberry Pi 3 Model B και WiMOD iC880A**

Για την οδήγηση και διαχείριση του συγκεντρωτή από το Raspberry Pi 3 απαιτείται η εγκατάσταση του απαραίτητου λογισμικού που θα επιτρέψει την ορθή λειτουργία της πύλης δικτύου καθώς και την σύνδεσή της με τους εξυπηρετητές δικτύου και εφαρμογής. Για την επίτευξη των παραπάνω, απαιτείται η σύνδεση του RPI 3 στο διαδίκτυο είτε ασύρματα είτε ενσύρματα.



**Εικόνα 35: Σύνδεση του RPI 3 με το WiMOD iC880A**

Παρακάτω φαίνονται εικόνες από την διαδικασία υλοποίησης της πύλης δικτύου μέσω της συνδέσεως των RPI 3 και iC880A καθώς και της κεραίας για την ζώνη των 868 MHz.



**Εικόνα 36: Η υλοποίηση της πύλης δικτύου LoRaWAN**

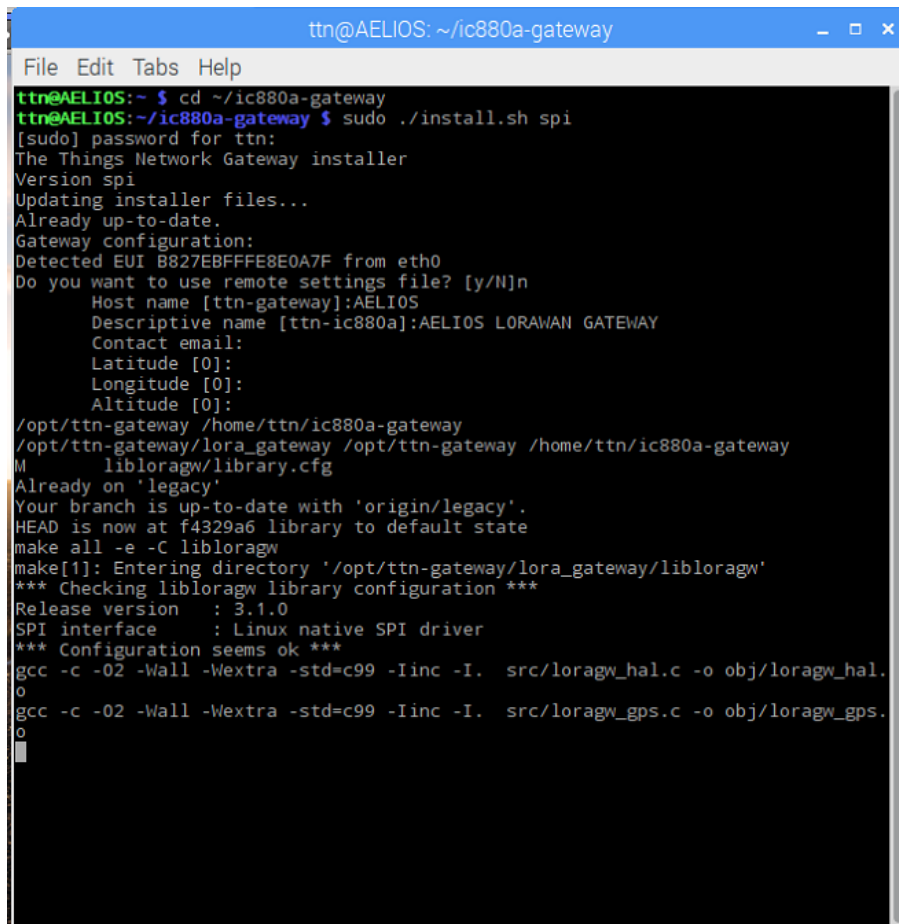
### 3.2. Σύνδεση της πύλης δικτύου στον εξυπηρετητή δικτύου

Ο εξυπηρετητής δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση του δικτύου LoRaWAN είναι το The Things Network (TTN). Το TTN είναι ένας από τους πρώτους οργανισμούς που παρέχει υπηρεσίες δικτυώσεως IOT και προσφέρει δωρεάν εργαλεία για την υλοποίηση και την διαχείριση LoRaWAN δικτύων.



**Εικόνα 37: Τοπογραφική απεικόνιση των συνδεδεμένων πυλών δικτύου LoRaWAN στο TTN**

Για να είναι εφικτή η σύνδεση της πύλης δικτύου με τον εξυπηρετητή δικτύου πρέπει να αποθηκευτεί και να εγκατασταθεί το λογισμικό οδήγησης μέσω κατάλληλων εντολών στην γραμμή εργασιών που παρέχει το λειτουργικό του Raspberry Pi. Το εγκατεστημένο λειτουργικό είναι το Raspbian Buster Lite το οποίο και παρέχει γραφικό περιβάλλον διεπαφής.

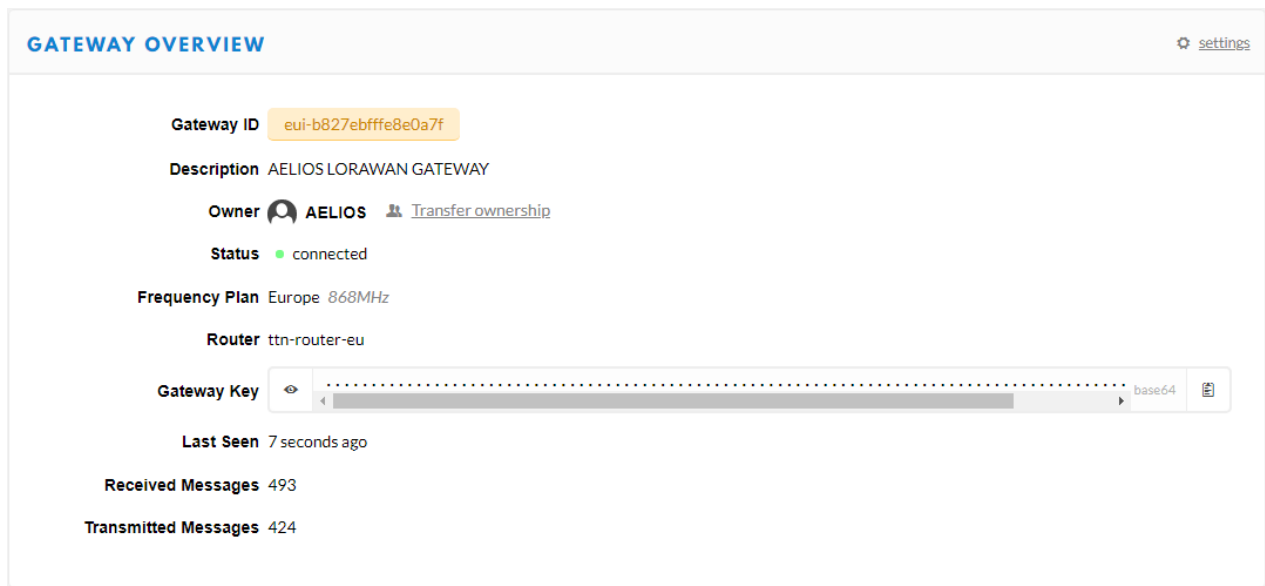


```
ttn@AELIOS: ~/ic880a-gateway
File Edit Tabs Help
ttn@AELIOS:~ $ cd ~/ic880a-gateway
ttn@AELIOS:~/ic880a-gateway $ sudo ./install.sh spi
[sudo] password for ttn:
The Things Network Gateway installer
Version Spi
Updating installer files...
Already up-to-date.
Gateway configuration:
Detected EUI B827EBFFFE8E0A7F from eth0
Do you want to use remote settings file? [y/N]n
Host name [ttn-gateway]:AELIOS
Descriptive name [ttn-ic880a]:AELIOS LORAWAN GATEWAY
Contact email:
Latitude [0]:
Longitude [0]:
Altitude [0]:
/opt/ttn-gateway /home/ttn/ic880a-gateway
/opt/ttn-gateway/lora_gateway /opt/ttn-gateway /home/ttn/ic880a-gateway
M libloragw/library.cfg
Already on 'legacy'
Your branch is up-to-date with 'origin/legacy'.
HEAD is now at f4329a6 library to default state
make all -e -C libloragw
make[1]: Entering directory '/opt/ttn-gateway/lora_gateway/libloragw'
*** Checking libloragw library configuration ***
Release version : 3.1.0
SPI interface : Linux native SPI driver
*** Configuration seems ok ***
gcc -c -O2 -Wall -Wextra -std=c99 -Iinc -I. src/loragw_hal.c -o obj/loragw_hal.o
gcc -c -O2 -Wall -Wextra -std=c99 -Iinc -I. src/loragw_gps.c -o obj/loragw_gps.o
```

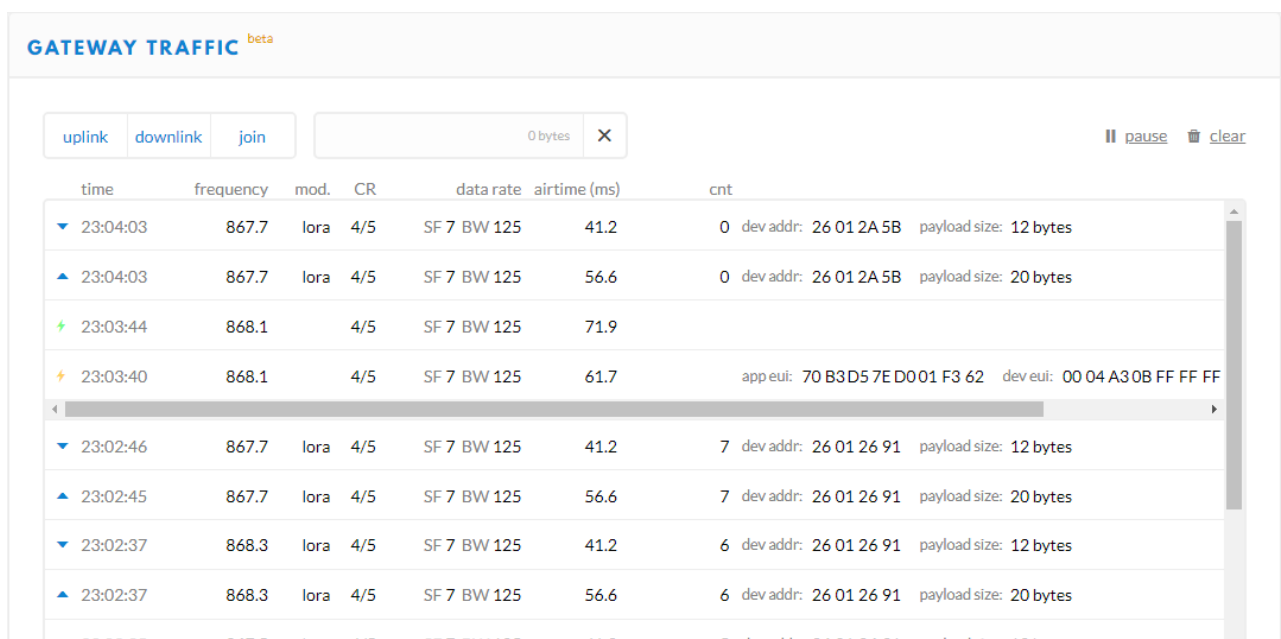
**Εικόνα 38: Στιγμιότυπο της εγκατάστασης λογισμικού πύλης δικτύου TTN - LoRaWAN στην γραμμή εντολών του RPI 3**

Με την ολοκλήρωση της εγκατάστασης του λογισμικού, η λειτουργία της πύλης διαδικτύου ενεργοποιείται και πραγματοποιείται σύνδεση με τον εξυπηρετητή εφαρμογής σε κάθε εκκίνηση του Raspberry Pi.

Για να είναι εφικτή η αναγνώριση της πύλης δικτύου από τον εξυπηρετητή δικτύου πρέπει να ολοκληρωθεί μία διαδικασία καταχώρησης στην κεντρική κονσόλα που παρέχεται από το TTN όπου αποθηκεύονται στοιχεία όπως ο αναγνωριστικός αριθμός πύλης , η ονομαστική περιγραφή , το πλάνο χρήσεως συχνοτήτων συναρτήσει της περιοχής λειτουργίας καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σημείου τοποθέτησεως της πύλης δικτύου.



**Εικόνα 39: Επισκόπηση της πύλης δικτύου στην κονσόλα του TTN**

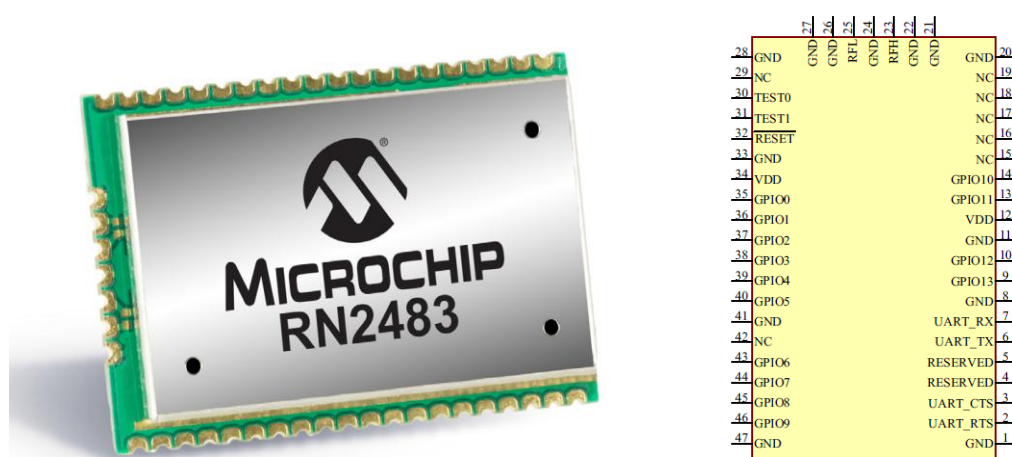


**Εικόνα 40: Επισκόπηση και καταγραφή της κινήσεως δικτύου στο πεδίο Gateway Traffic της κονσόλας TTN**

### 3.3. Υλοποίηση του τελικού κόμβου

#### 3.3.1. Το RN2483 LoRa transceiver module

Η μονάδα RN2483 της εταιρείας Microchip παρέχει LoRaWAN συνδεσιμότητα μέσω μίας απλής διεπαφής UART εντολών κειμένου. Το RN2483 είναι ένας πομποδέκτης LoRa ο οποίος περιέχει το επίπεδο του πρωτοκόλλου LoRaWAN που αφορά την λειτουργία τελικών συσκευών κλάσεως A. Η δικτυακή παραμετροποίηση της συσκευής καθώς και τα απαραίτητα δεδομένα για την λειτουργία της τελικής συσκευής είναι εφικτό να αποθηκεύονται στην ενσωματωμένη μνήμη EEPROM της μονάδος ώστε να μην απαιτείται η ανάκληση τους εφόσον δεν είναι απαραίτητο από την κεντρική μονάδα ελέγχου (πχ. εξωτερική MCU). [24]



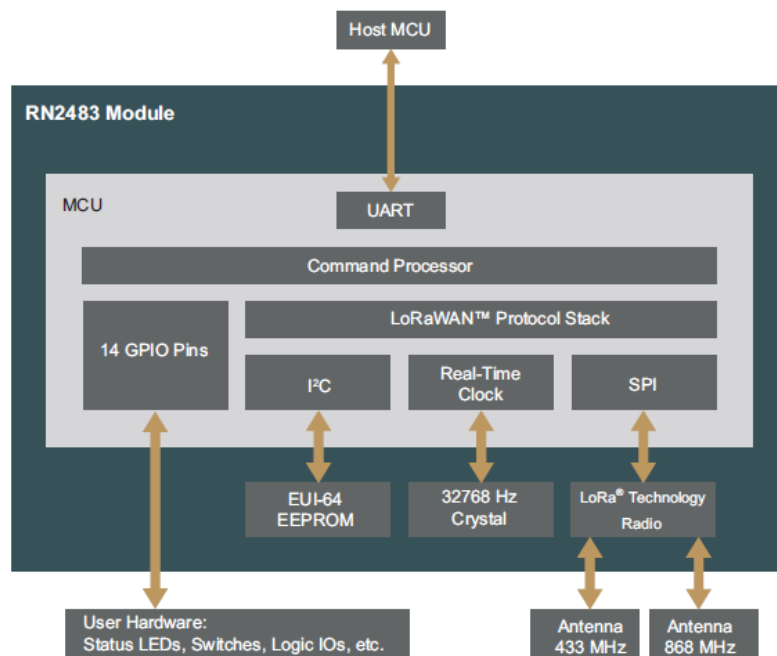
Εικόνα 41: Η μονάδα RN2483 της Microchip και το σχηματικό της διάγραμμα [24]

Τα βασικά χαρακτηριστικά του πομποδέκτη RN2483 όπως περιγράφονται στο φύλλο δεδομένων του κατασκευαστή είναι:

- Συμπαγές μέγεθος (17.8 x 26.7 x 3.34 mm) το οποίο διευκολύνει την υλοποίηση φορητών τελικών συσκευών.
- Αναβαθμίσιμο λογισμικό οδηγήσεως ώστε να είναι εφικτή η βελτίωση και η ενημέρωση σε πιθανές τροποποιήσεις του πρωτοκόλλου δικτύωσης.



- Χαμηλή τάση τροφοδοσίας από 2.1V έως 3.6V η οποία όντας συνηθισμένη και στους σύγχρονους μικροελεγκτές επιτρέπει την ελαχιστοποίηση των επιπρόσθετων συστημάτων τροφοδοσίας στην τελική ηλεκτρονική πλακέτα.
- Θερμοκρασιακή περιοχή λειτουργίας από  $-40^{\circ}\text{C}$  έως  $+85^{\circ}\text{C}$  η οποία συνεισφέρει στην αυξημένη αντοχή και μακροζωία των συσκευών.
- 14 γενικής χρήσεως προγραμματιζόμενες εισόδου/εξόδου (GPIO).
- Δυνατότητα λειτουργίας στις δύο φασματικές περιοχές 433 MHz και 868 MHz όπου η μονάδα διαθέτει υποδοχές για δύο ανεξάρτητες κεραίες.
- Ευαίσθησια ραδιοδέκτη έως και τα  $-146\text{ dBm}$  η οποία επιτρέπει αυξημένα περιθώρια ασύρματης ζεύξης.
- Ρυθμιζόμενη ισχύς ραδιοεκπομπής έως και τα  $+14\text{ dBm}$  όπου είναι και το ανώτατο επιτρεπτό όριο βάσει της προδιαγραφής LoRaWAN και των διεθνών κανονισμών.
- Εμβέλεια επικοινωνίας έως και 15 km σε ελεύθερο πεδίο ενώ έως και 5 km εντός κατοικημένων περιοχών.



**Εικόνα 42: Περιγραφικό Δομικό-block διάγραμμα της μονάδος RN2483 της Microchip**

[24]

### 3.3.1.1. Η λειτουργία του RN2483

Η διαχείριση της μονάδος RN2483 συνήθως γίνεται από ένα μικροελεγκτή ο οποίος μέσω ASCII εντολών καταχωρεί και αποκτά τα LoRaWAN δεδομένα και παραμέτρους. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικές από τις βασικές εντολές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραμετροποίηση μίας τελικής συσκευής με σκοπό την συμμετοχή σε ένα LoRaWAN : [23]

- Η εντολή mac set (mac set <παράμετρος> <τιμή>)

Αυτή η εντολή χρησιμοποιείται από τον χειριστή για να καταχωρηθούν οι παράμετροι LoRaWAN στην μονάδα RN2483.

Parameter	Description
devaddr	Sets the unique network device address for the RN2483 module.
deveui	Sets the globally unique identifier for the RN2483 module.
appEui	Sets the application identifier for the RN2483 module.
nwkskey	Sets the network session key for the RN2483 module.
appskey	Sets the application session key for the RN2483 module.
appkey	Sets the application key for the RN2483 module.
pwrIdx	Sets the output power to be used on the next transmissions.
dr	Sets the data rate to be used for the next transmissions.
adr	Sets if the adaptive data rate is to be enabled, or disabled.
bat	Sets the battery level needed for Device Status Answer frame command response.
retx	Sets the number of retransmissions to be used for an uplink confirmed packet.
linkchk	Sets the time interval for the link check process to be triggered.
rxdelay1	Sets the value used for the first Receive window delay.
ar	Sets the state of the automatic reply.
rx2	Sets the data rate and frequency used for the second Receive window.
sync	Sets the synchronization word for the LoRaWAN™ communication.
upctr	Sets the value of the uplink frame counter that will be used for the next uplink transmission.
dnctr	Sets the value of the downlink frame counter that will be used for the next downlink reception.
ch	Allows modification of channel related parameters.

**Πίνακας 9: Οι διαθέσιμες παράμετροι προς επεξεργασία μέσω της εντολής mac set [23]**

- Η εντολή `mac join` (`mac join <τύπος συμμετοχής>`)

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για να εκκινήσει την διαδικασία συμμετοχής σε ένα LoRaWAN δίκτυο είτε OTTA είτε ABP.

- Η εντολή `mac get` (`mac get <παράμετρος>`)

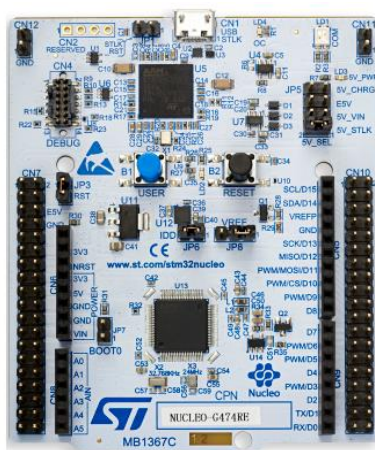
Χρησιμοποιείται από τον χειριστή για την απόκτηση των αποθηκευμένων παραμέτρων LoRaWAN εντός της μονάδος RN2483. Αξίζει να σημειωθεί πως μέσω της εντολής `mac get` δεν είναι εφικτή η πρόσβαση στα αποθηκευμένα κλειδιά κρυπτογραφήσεως του LoRaWAN. Το γεγονός αυτό μειώνει την πιθανότητα μίας κακόβουλης υποκλοπής αυτών των στοιχείων μέσω φυσικής προσβάσεως στην μονάδα RN2483 και αυξάνει τα επίπεδα ασφαλείας καθώς οι κρίσιμες πληροφορίες αυτές θα είναι προσβάσιμες μόνο κατά την πρώτη αρχικοποίηση των δεδομένων της τελικής συσκευής εφόσον αυτά αποθηκευτούν στην μνήμη EEPROM της μονάδος.

- Η εντολή `mac save` (`mac save`)

Αυτή η εντολή πρέπει να εκτελεστεί αμέσως μετά την ολοκλήρωση καταχωρήσεως των παραμέτρων LoRaWAN μέσω της εντολής `mac set`. Με την εκτέλεση της `mac save` εντολής πραγματοποιείται αποθήκευση στην μνήμη EEPROM όλων των παραμέτρων που αφορούν την λειτουργία της τελικής συσκευής σε LoRaWAN κλάση A. Τα αποθηκευμένα δεδομένα θα είναι εσωτερικά διαθέσιμα στην μονάδα RN2483 μετά από κάθε επανεκκίνηση λειτουργίας.

### 3.3.2. Το STM32F401 Nucleo-64 development board

Η αναπτυξιακή πλακέτα STM32F401 Nucleo-64 της εταιρείας ST αποτελεί ένα προγραμματιζόμενο σύστημα με αρκετά υψηλές επιδόσεις στον τομέα της επεξεργαστικής ισχύος το οποίο στηρίζεται σε μικροελεγκτή τεχνολογίας ARM Cortex και διαθέτει μνήμη προγράμματος Flash 512KB καθώς και μνήμη δεδομένων SRAM 96KB. Τα παραπάνω στοιχεία καθιστούν αυτό το αναπτυξιακό σύστημα αρκετά χρήσιμο σε υλοποίηση εφαρμογών με αυξημένες επεξεργαστικές και αποθηκευτικές απαιτήσεις με παράλληλες χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις.



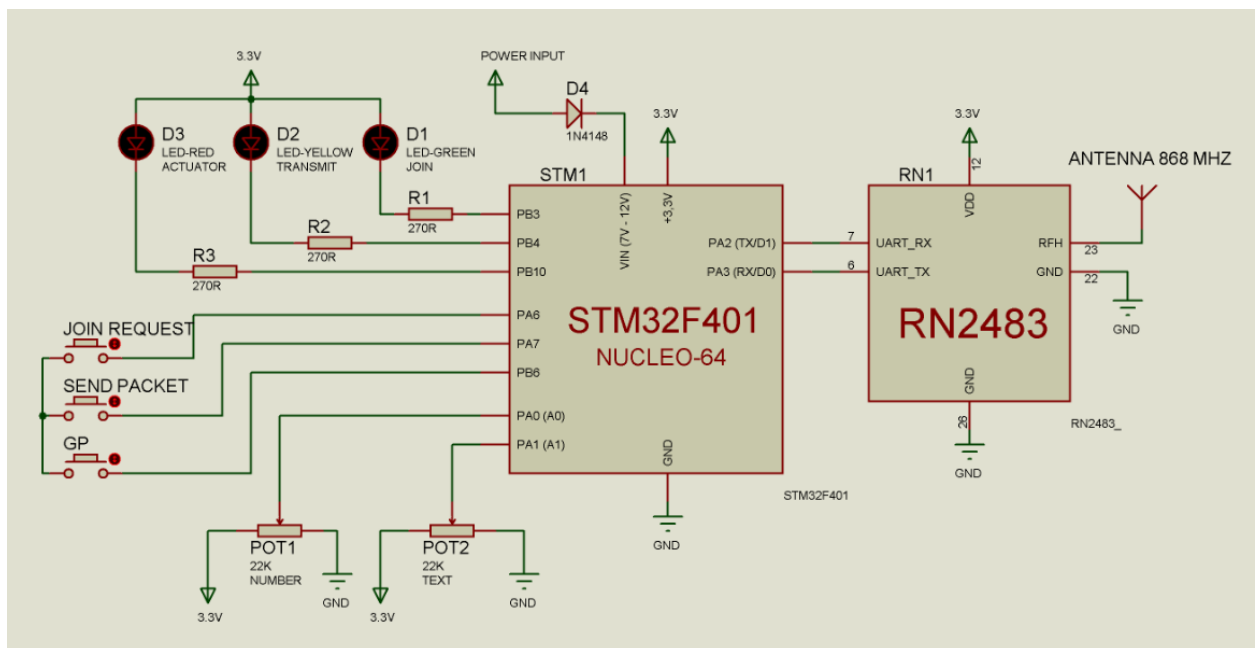
Εικόνα 43: Το STM32F401 Nucleo-64 αναπτυξιακό

Τα βασικά χαρακτηριστικά του STM32F401 Nucleo-64 είναι : [31]

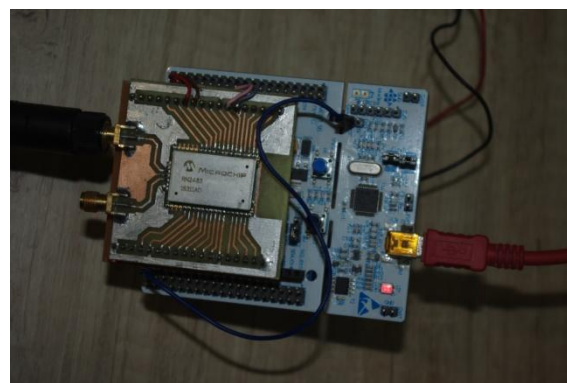
- ARM Cortex – M4 84 MHz CPU.
- Flash memory 512KB.
- SRAM memory 96KB.
- Μεγάλος αριθμός GPIO pins και διαθέσιμα ένα led και δύο button.
- Ενσωματωμένα voltage regulator για παραγωγή τάσεων τροφοδοσίας 3.3V, 5V.
- Ενσωματωμένος κρύσταλλος 32,768 KHz για υλοποίηση RTC (Real Time Clock)
- Συμβατότητα με την αναπτυξιακή πλατφόρμα Arm Mbed.
- Ενσωματωμένο σύστημα προγραμματισμού και προσομοίωσης λειτουργίας.

### 3.3.3. Σύνδεση του STM32F401 Nucleo-64 με την διάταξη RN2483

Στο ακόλουθο διάγραμμα φαίνονται η σύνδεση UART επικοινωνίας μεταξύ των μονάδων STM32F401 Nucleo-64 και RN2483 , η σύνδεση της κεραίας και οι συνδέσεις των πλήκτρων χειρισμού , των ενδεικτικών led και των ποτενσιομέτρων παροχής των αναλογικών τιμών. Ο τελικός κόμβος LoRaWAN δύναται να λειτουργήσει με απευθείας τροφοδότηση τάσεως 3,3 V ή μέσω των ενσωματωμένων ρυθμιστών τάσεως όπου μπορούν να λειτουργήσουν σε μία περιοχή τάσεων από 7 V έως 12 V.



Εικόνα 44: Σχηματικό διάγραμμα του τελικού κόμβου

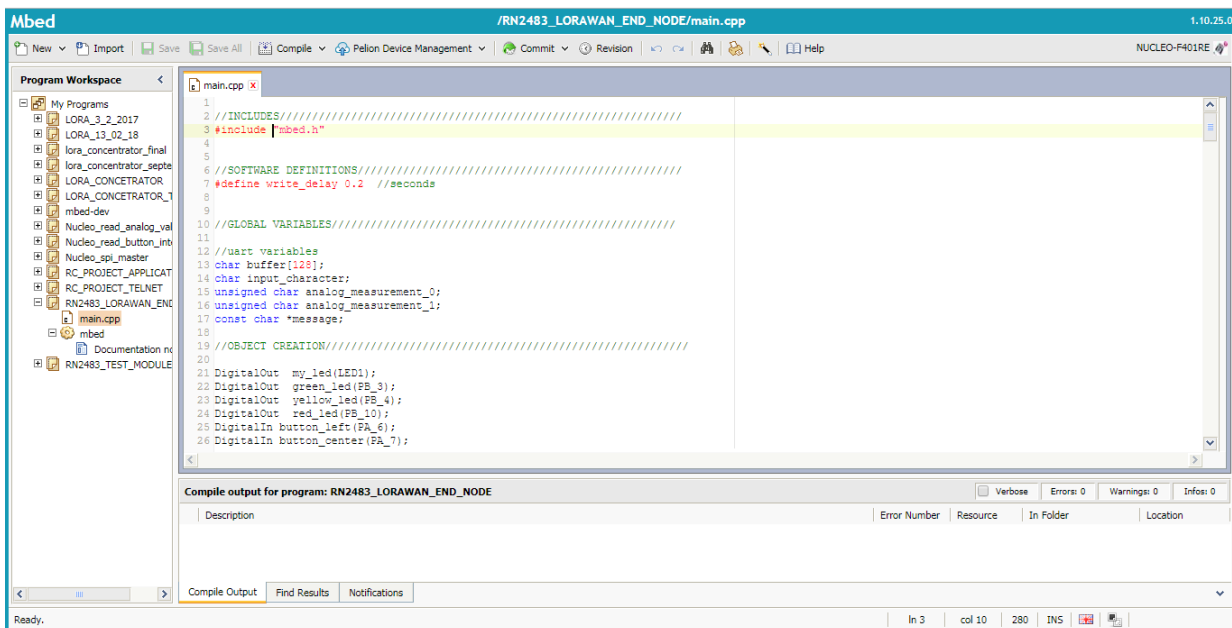


Εικόνα 45: Φωτογραφίες των δύο όψεων του τελικού κόμβου LoRaWAN

### 3.3.4. Προγραμματισμός του τελικού κόμβου

Η λειτουργία του τελικού κόμβου που θα σχεδιαστεί, στηρίζεται στο STM32F401 Nucleo-64 το οποίο θα είναι διασυνδεδεμένο με την μονάδα RN2483 και θα υλοποιεί μία LoRaWAN εφαρμογή βάσει κατάλληλου προγραμματισμού.

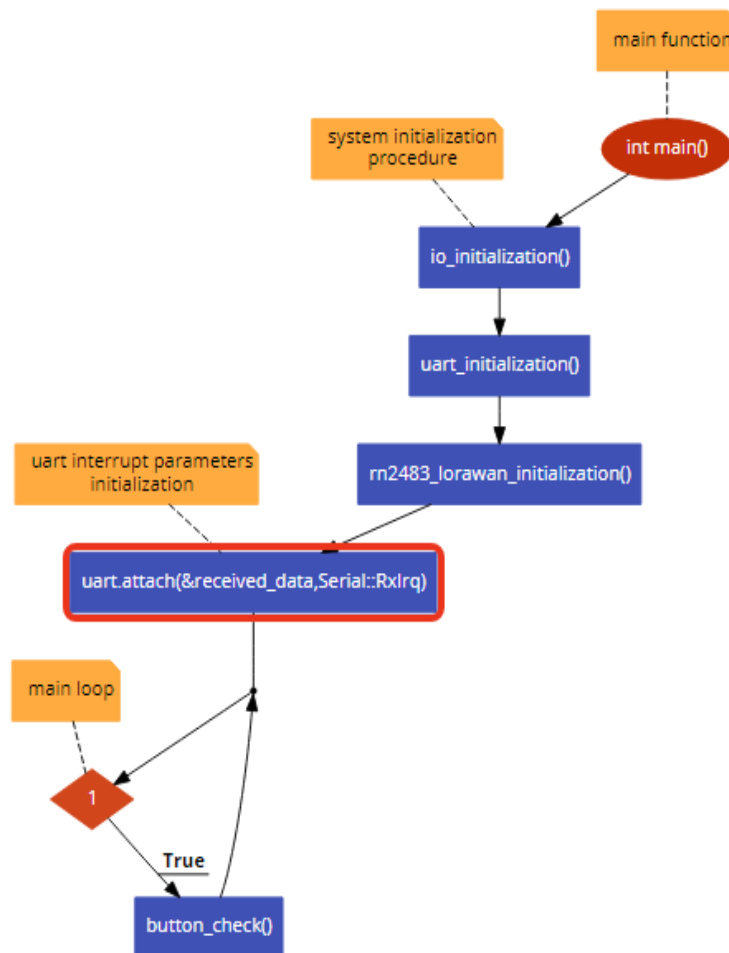
Ο προγραμματισμός του STM32F401 Nucleo-64 θα γίνει μέσω της πλατφόρμας Arm Mbed η οποία είναι ένα σύστημα εργαλείων που αφορούν την ανάπτυξη IoT στοχευμένων εφαρμογών που στηρίζονται στην οικογένεια μικροελεγκτών ARM Cortex-M. Η πλατφόρμα προσφέρει διαδικτυακό (Online) ολοκληρωμένο σύστημα ανάπτυξης εφαρμογών (IDE) πράγμα που κάνει εφικτό τον προγραμματισμό των τελικών συσκευών δίχως την εγκατάσταση κάποιου λογισμικού τοπικά αλλά αρκεί ένας περιηγητής διαδικτύου και μία σύνδεση στο διαδίκτυο. [46]



Εικόνα 46: Ο embed online compiler

Ο προγραμματισμός πραγματοποιείται σε γλώσσα C++ και εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία το αρχείο προγράμματος σε μορφή .hex μπορεί να αποθηκευτεί στην τελική συσκευή.

Η δομή του κυρίως προγράμματος φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής όπου φαίνεται η διαδικασία αρχικοποίησης του υλικού καθώς και η αρχικοποίηση των παραμέτρων LoRaWAN που καταχωρούνται στην μονάδα RN2483. Έν συνεχεία η συσκευή βρίσκεται σε αναμονή πίεσεως κάποιου πλήκτρου ή κάποιου εισερχόμενου UART μηνύματος ώστε να πράξει τις απαραίτητες ενέργειες.

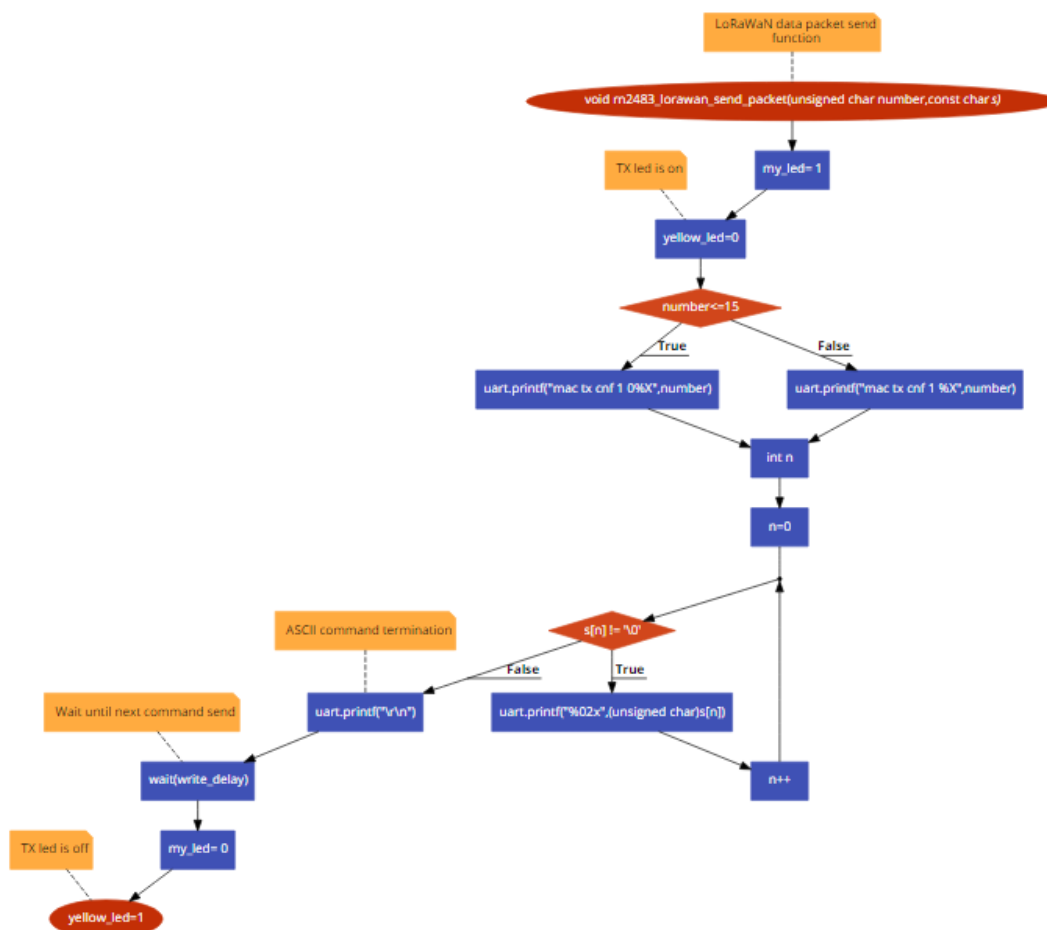


Εικόνα 47: Η κυρίως συνάρτηση του προγράμματος της τελικής συσκευής



Η δοκιμαστική τελική συσκευή που προέκυψε από την συνένωση ενός STM32F401 Nucleo-64 , μίας μονάδος RN2483 και μίας επιπρόσθετης πλακέτας διεπαφής παρέχει τα εξής μέσα διεπαφής με τον φυσικό χρήστη:

- 2 Ποτενσιόμετρα τα οποία παρέχουν από μία αναλογική τιμή στο σύστημα.
- 2 πλήκτρα που ενεργοποιούν τις διαδικασίες συμμετοχής (Join) και αποστολής πακέτου έκαστο.
- 3 led που σηματοδοτούν την αποστολή πακέτου / αρχικοποίηση (κίτρινο led) , την κατάσταση συμμετοχής (πράσινο led) και την λειτουργία ενεργοποιητή (κόκκινο led).
- 2 πλήκτρα και 1 led γενικής χρήσεως όπου το led μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ενεργοποιητής για εισερχόμενα δεδομένα.
- 1 πλήκτρο mcu reset.



Εικόνα 48: Διάγραμμα ροής της συναρτήσεως αποστολής πακέτου της τελικής συσκευής



Κατά την λειτουργία του δοκιμαστικού τελικού κόμβου ο χρήστης δύναται να ενεργοποιήσει χειροκίνητα όποτε επιθυμεί την διαδικασία συμμετοχής στο δίκτυο LoRaWAN με σκοπό την μελέτη και καταγραφή των σχετικών δεδομένων στο επίπεδο εξυπηρετητή δικτύου και εφαρμογής.

Ακόμη ο χρήστης δύναται μέσω του πλήκτρου αποστολής πακέτου να αποστείλει δεδομένα προς την τελική εφαρμογή LoRaWAN. Τα δεδομένα αυτά είναι ένας αριθμός και ένα μήνυμα κειμένου των οποίων η τιμή μεταβάλλεται συναρτήσει της ρυθμίσεως των δύο ποτενσιομέτρων. Μετά από κάθε αποστολή γίνεται η λήψη δεδομένων που αφορούν τον ενεργοποιητή (Λόγω των παραθύρων λήψεως της κλάσεως A).



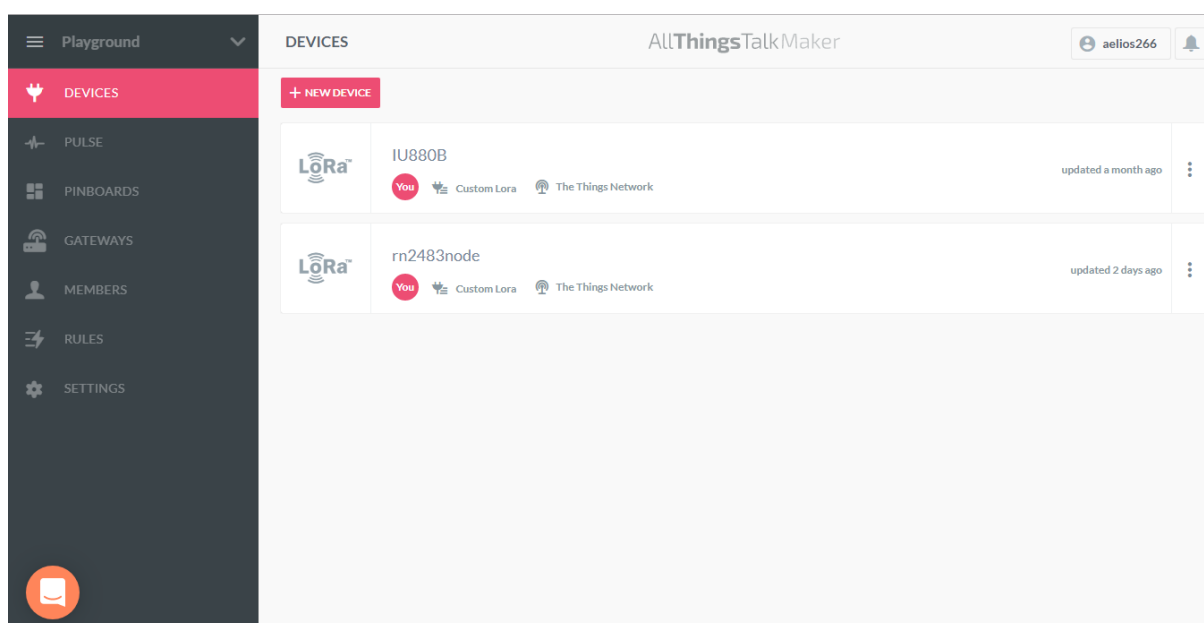
**Εικόνα 49: Διάγραμμα ροής της συναρτήσεως αρχικοποιήσεως των παραμέτρων LoRaWAN και συνδέσεως της τελικής συσκευής**

### 3.4. Δημιουργία εφαρμογής

Η υλοποίηση της εφαρμογής LoRaWAN θα πραγματοποιηθεί μέσω της IoT πλατφόρμας AllThingsTalk η οποία παρέχει μία σειρά δωρεάν εργαλείων για την ανάπτυξη απλών εφαρμογών που διασυνδέονται μέσω του TTN. [42]

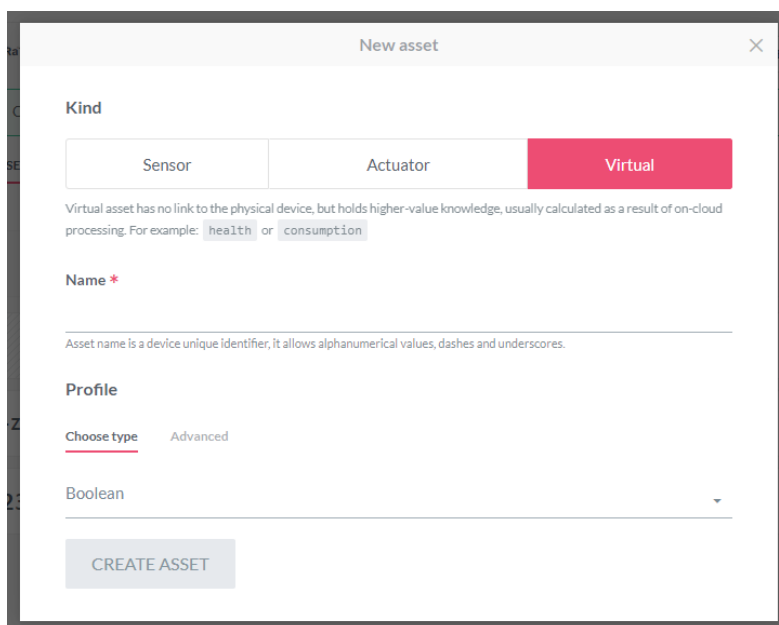
Αρχικά πρέπει να οριστεί η δημιουργία της εφαρμογής στην κονσόλα του TTN και να οριστεί ενσωμάτωση (integration) του AllThingsTalk επιπέδου εφαρμογής καθώς και να καταχωρηθούν τα στοιχεία των τελικών συσκευών που θα συμμετέχουν.

Εν συνεχεία με την είσοδο στο AllThingsTalk maker όπου είναι το περιβάλλον διαμορφώσεως και χειρισμού της τελικής εφαρμογής μπορούν να οριστούν οι μεταβλητές και τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και η μορφή του πακέτου που αφορά το επίπεδο εφαρμογής.



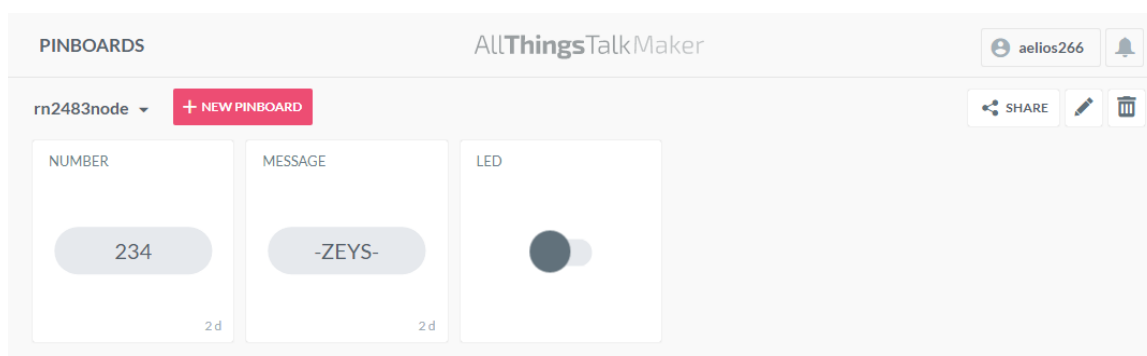
Εικόνα 50: Οι καταχωρημένες τελικές συσκευές στο περιβάλλον AllThingsTalk Maker

Το AllThingsTalk Maker δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να δημιουργήσει τύπους μεταβλητών Sensor, Actuator, Virtual οι οποίες αφορούν αντίστοιχα τα εισερχόμενα στην εφαρμογή δεδομένα , τα εξερχόμενα από την εφαρμογή δεδομένα και τα δεδομένα που προκύπτουν μέσω υπολογισμών και επεξεργασίας.



**Εικόνα 51: Οι τύποι μεταβλητών στο περιβάλλον AllThingsTalk Maker**

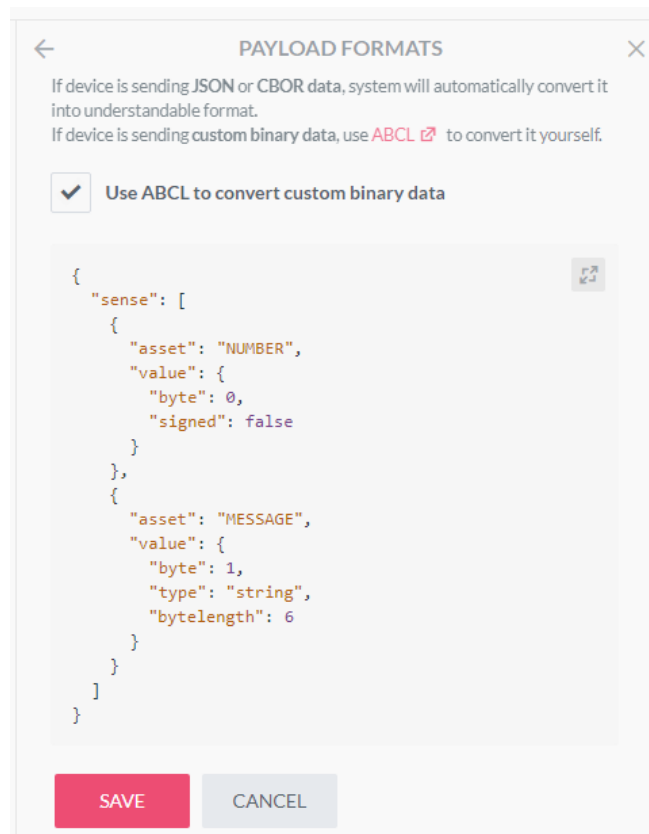
Οι από τον χρήστη καταχωρημένες μεταβλητές της εφαρμογής δύνανται να εμφανίζονται σε συγκεντρωτικό πίνακα όπου και ενημερώνονται συνεχώς οι τιμές τους.



**Εικόνα 52: Πίνακας καταχωρημένων μεταβλητών στο περιβάλλον AllThingsTalk Maker**

Για τις ανάγκες δημιουργίας της δοκιμαστικής εφαρμογής καθορίστηκαν 3 τύποι μεταβλητών οι οποίες είναι NUMBER (sensor data) , MESSAGE (sensor data) και LED (actuator data). Λαμβάνοντας υπόψιν την προαναφερθήσα φυσική δημιουργία του τελικού κόμβου, η μεταβλητή NUMBER είναι ένας αριθμός που αντιστοιχεί στην θέση του ποτενσιομέτρου 1 , η μεταβλητή MESSAGE είναι ένα μήνυμα κειμένου που αντιστοιχεί στην θέση του ποτενσιομέτρου 2 και η μεταβλητή LED αντιστοιχεί στην εντολή καταστάσεως του κόκκινου led που λαμβάνει ο τελικός κόμβος.

Ο καθορισμός της μορφής και της επεξεργασίας των δεδομένων εφαρμογής πραγματοποιείται στο πεδίο payload formats του περιβάλλοντος AllThingsTalk maker και λειτουργεί είτε με μορφή δεδομένων JSON είτε με CBOR είτε με δυαδικά δεδομένα καθορισμένα από τον χρήστη μέσω του εργαλείου μετατροπής ABCL (AllThingsTalk Binary Conversion Language). [36]



**Εικόνα 53: Ο καθορισμός της μορφής των δεδομένων εφαρμογής στο περιβάλλον AllThingsTalk Maker**

### 3.5. Επιβεβαίωση ορθής λειτουργίας του υλοποιημένου συστήματος

Για την επαλήθευση της ορθής λειτουργίας του υλοποιημένου LoRaWAN δικτύου και των συσκευών που συμμετέχουν σε αυτό θα πραγματοποιηθούν καταγραφές της λειτουργίας των υποσυστημάτων και των διακινούμενων δεδομένων στα τρία επίπεδα του συστήματος. Για τον σκοπό θα υλοποιηθεί η εξής ακολουθία ενεργειών στην τελική συσκευή και την τελική εφαρμογή:

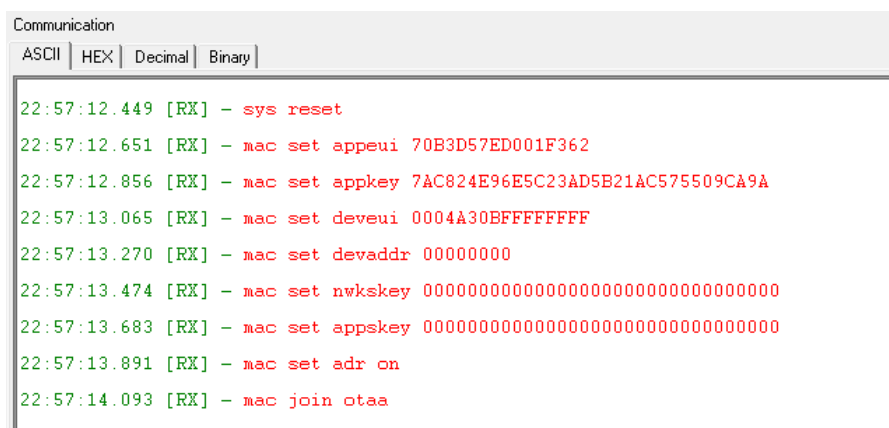
- Αρχικοποίηση της τελικής συσκευής με τις παραμέτρους του δικτύου.
- Αίτημα συμμετοχής της τελικής συσκευής δια ενεργοποίησης από αέρος.
- Αποστολή ανερχόμενου πακέτου δεδομένων προς την τελική εφαρμογή το οποίο θα περιέχει μία αριθμητική τιμή και ένα μήνυμα κειμένου 6 χαρακτήρων. Η αριθμητική τιμή θα είναι το 172 και το μήνυμα κειμένου θα είναι το «-ZEYS-» .
- Αλλαγή της κατάστασης του ενεργοποιητή LED στην τελική εφαρμογή.
- Επαναποστολή του ίδιου πακέτου δεδομένων από την τελική συσκευή και λήψη του κατερχόμενου πακέτου από την εφαρμογή όπου θα αφορά την ενημέρωση της καταστάσεως του ενεργοποιητή (Led της τελικής συσκευής). Η λήψη του κατερχόμενου πακέτου θα γίνει αμέσως μετά την αποστολή από την τελική συσκευή αφού τότε θα ανοίξουν τα παράθυρα λήψεως όσον αφορά την λειτουργία σε τάξη Α.



**Εικόνα 54:** Η πειραματική διάταξη με την πύλη δικτύου και την τελική συσκευή

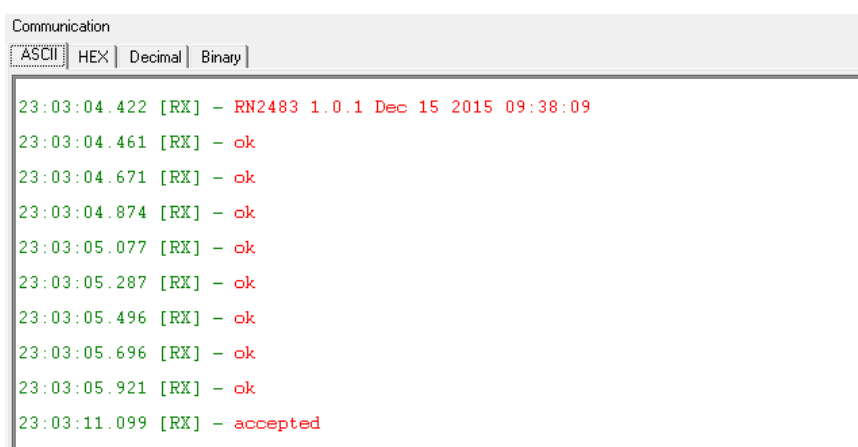
### 3.5.1. Επικοινωνία STM32F401 Nucleo-64 και RN2483

Κατά την εκκίνηση λειτουργίας της τελικής συσκευής το STM32F401 Nucleo-64 αποστέλλει μέσω UART μία ακολουθία εντολών αρχικοποίησης προς την μονάδα RN2483. Δεδομένου πώς ο τρόπος ενεργοποίησης της τελικής συσκευής έχει οριστεί να είναι από αέρος (OTAA) , τα μόνα δεδομένα που απαιτούνται είναι το κλειδί AppKey και οι αναγνωριστικοί κωδικοί AppEUI, DevEUI. Οι παράμετροι DevAddr, NwksKey και AppSKey καθορίζονται από το ίδιο το δίκτυο όταν ενεργοποιηθεί η τελική συσκευή. Μετά την καταχώρηση των παραμέτρων δίνεται η εντολή για αποστολή αιτήσεως συμμετοχής (Join OTAA) και αναλόγως του αν θα γίνει δεκτή από το δίκτυο η μονάδα RN2483 παρέχει την αναφορά επιτυχίας ή αποτυχίας.



```
Communication
ASCII | HEX | Decimal | Binary
22:57:12.449 [RX] - sys reset
22:57:12.651 [RX] - mac set appeui 70B3D57ED001F362
22:57:12.856 [RX] - mac set appkey 7AC824E96E5C23AD5B21AC575509CA9A
22:57:13.065 [RX] - mac set deveui 0004A30BFFFFFFFF
22:57:13.270 [RX] - mac set devaddr 00000000
22:57:13.474 [RX] - mac set nwkskey 00000000000000000000000000000000
22:57:13.683 [RX] - mac set appskey 00000000000000000000000000000000
22:57:13.891 [RX] - mac set adr on
22:57:14.093 [RX] - mac join otaa
```

Εικόνα 55: Εντολές αρχικοποίησης ASCII που αποστέλλονται στην μονάδα RN2483



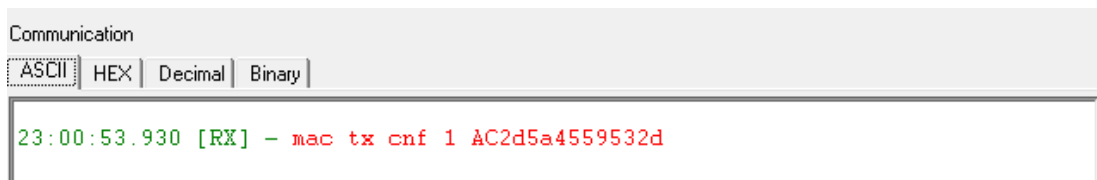
```
Communication
ASCII | HEX | Decimal | Binary
23:03:04.422 [RX] - RN2483 1.0.1 Dec 15 2015 09:38:09
23:03:04.461 [RX] - ok
23:03:04.671 [RX] - ok
23:03:04.874 [RX] - ok
23:03:05.077 [RX] - ok
23:03:05.287 [RX] - ok
23:03:05.496 [RX] - ok
23:03:05.696 [RX] - ok
23:03:05.921 [RX] - ok
23:03:11.099 [RX] - accepted
```

Εικόνα 56: Απόκριση της μονάδος RN2483 στις εντολές αρχικοποίησης

Εν συνεχεία δίνεται η εντολή αποστολής του πακέτου δεδομένων σε λειτουργία επιβεβαιώσεως αποστολής (cnf). Τα δεδομένα προς αποστολή γράφονται σε δεκαεξαδική μορφή όπου συναρτήσει της εφαρμογής που έχει δημιουργηθεί, το πρώτο byte αντιστοιχεί στην αποστελλόμενη αριθμητική τιμή και τα υπόλοιπα 6 bytes είναι οι δεκαεξαδικές τιμές των χαρακτήρων ASCII του μηνύματος κειμένου που αποστέλλεται. Μετά από κάθε αποστολή δεδομένων η μονάδα RN2483 αποκρίνεται με την αναφορά επιτυχίας της αποστολής ή με τα πιθανά εισερχόμενα δεδομένα, πράγμα που λογικά συνεπάγεται και ότι η αποστολή ήταν επιτυχής.

Έτσι έχοντας το δεκαεξαδικό πακέτο: AC – 2D – 5A – 45 – 59 – 53 – 2D

Έχουμε στην εφαρμογή: 172 – ‘-’ – ‘Z’ – ‘E’ – ‘Y’ – ‘S’ – ‘-’



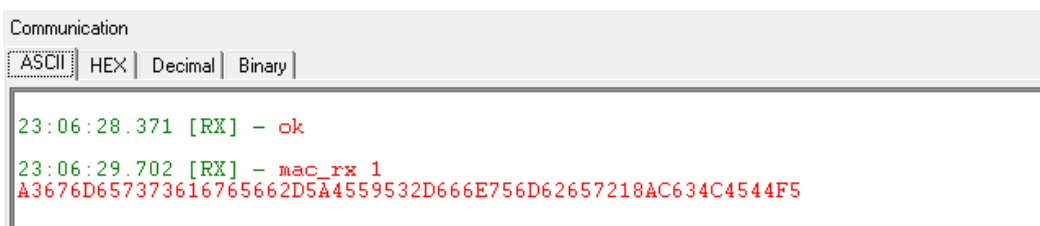
```
Communication
[ASCII] [HEX] [Decimal] [Binary]
23:00:53.930 [RX] - mac tx cnf 1 AC2d5a4559532d
```

**Εικόνα 57: Δεδομένα εφαρμογής που αποστέλλονται στην μονάδα RN2483**



```
Communication
[ASCII] [HEX] [Decimal] [Binary]
23:04:38.037 [RX] - ok
23:04:43.244 [RX] - mac_tx_ok
```

**Εικόνα 58: Απόκριση της μονάδος RN2483 μετά την αποστολή των δεδομένων εφαρμογής**



```
Communication
[ASCII] [HEX] [Decimal] [Binary]
23:06:28.371 [RX] - ok
23:06:29.702 [RX] - mac_rx 1
A3676D6573736167656662D5A4559532D666E756D62657218AC634C4544F5
```

**Εικόνα 59: Απόκριση της μονάδος RN2483 μετά την αποστολή των δεδομένων εφαρμογής όταν υπάρχει εισερχόμενο πακέτο από την εφαρμογή**

Τα κατερχόμενα δεδομένα από την εφαρμογή προς τον τελικό κόμβο είναι σε μορφή CBOR οπότε για το ακόλουθο εισερχόμενο πακέτο θα ισχύει μετά την μετατροπή σε κείμενο:

Εισερχόμενο πακέτο δεκαεξαδικών δεδομένων :

A3-67-6D-65-73-73-61-67-65-66-2D-5A-45-59-53-2D-66-6E-75-6D-62-65-72-18-AC-63-4C-45-44-F5

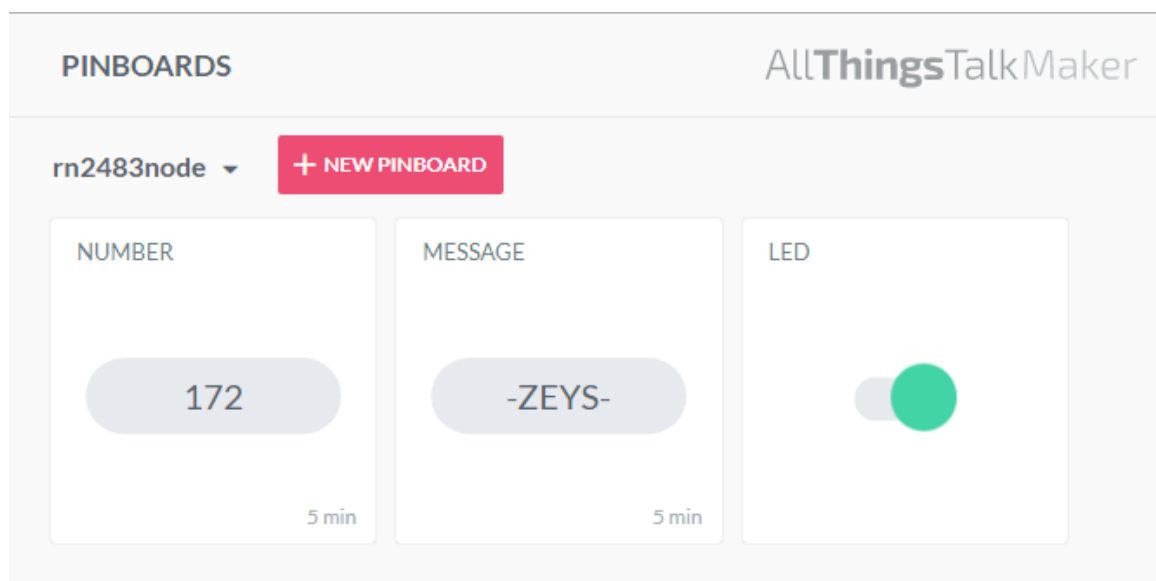
Μετατροπή στο περιεχόμενο κείμενο:

```
{"message": "-ZEYS-", "number": 172, "LED": true}
```

Όπου αναλύεται:

```
A3 # map(3) 67 # text(7) 6D657373616765 # "message 66 # text(6)
2D5A4559532D # "-ZEYS-" 66 # text(6) 6E756D626572 # "number"
18 AC # unsigned(172) 63 # text(3) 4C4544 # "LED" F5 # primitive(21)
```

Τα διακινούμενα δεδομένα παρουσιάζονται σε κατάλληλο συγκεντρωτικό πίνακα που δημιουργήθηκε στην τελική εφαρμογή.



**Εικόνα 60: Ο συγκεντρωτικός πίνακας δεδομένων της εφαρμογής**

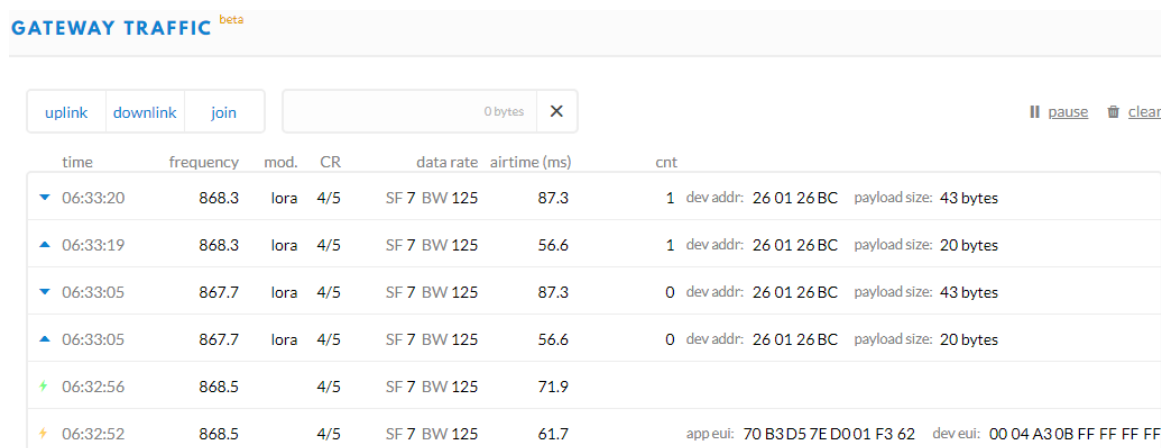


### 3.5.2. Διακίνηση δεδομένων στον TTN εξυπηρετητή δικτύου

Ο εξυπηρετητής TTN μέσω της εικονικής κονσόλας χειρισμού που παρέχει, κάνει εφικτή την καταγραφή όλων των διακινούμενων δεδομένων που περνάνε μέσα από την πύλη δικτύου.

Τα στοιχεία που καταγράφονται είναι:

- Χρόνος καταγραφής
- Συχνότητα καναλιού που χρησιμοποιήθηκε
- Τύπος διαμορφώσεως (LoRa)
- Ρυθμός κωδικοποίησης (Coding Rate – CR)
- Ρυθμός δεδομένων (συντελεστής διευρύνσεως και φασματικό εύρος)
- Χρόνος στον αέρα πακέτου (TOA)
- Μετρητής πακέτων σε αναμονή προς αποστολή
- Διεύθυνση τελικής συσκευής
- Μέγεθος περιεχόμενων δεδομένων
- Τα περιεχόμενα δεδομένα (κρυπτογραφημένα)



The screenshot shows the 'GATEWAY TRAFFIC' interface with a table of traffic data. The table has columns for time, frequency, mod., CR, data rate, airtime (ms), and cnt. Each row includes a dropdown arrow and detailed information like dev addr and payload size.

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt
▼ 06:33:20	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	87.3	1 dev addr: 26 01 26 BC payload size: 43 bytes
▲ 06:33:19	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	56.6	1 dev addr: 26 01 26 BC payload size: 20 bytes
▼ 06:33:05	867.7	lor	4/5	SF 7 BW 125	87.3	0 dev addr: 26 01 26 BC payload size: 43 bytes
▲ 06:33:05	867.7	lor	4/5	SF 7 BW 125	56.6	0 dev addr: 26 01 26 BC payload size: 20 bytes
⚡ 06:32:56	868.5		4/5	SF 7 BW 125	71.9	
⚡ 06:32:52	868.5		4/5	SF 7 BW 125	61.7	appeui: 70 B3D57E D001 F3 62 dev eui: 00 04 A3 0B FF FF FF FF

**Εικόνα 61: Καταγραφή διακινούμενων δεδομένων στον εξυπηρετητή δικτύου**

**GATEWAY TRAFFIC** Delta

uplink downlink join 0 bytes X || pause clear

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt
06:33:20	868.3	loro	4/5	SF 7 BW 125	87.3	1 dev addr: 26 01 26 BC payload size: 43 bytes
06:33:19	868.3	loro	4/5	SF 7 BW 125	56.6	1 dev addr: 26 01 26 BC payload size: 20 bytes

**Uplink**

**Dev Address**

26 01 26 BC

Network: The Things Network  
 Net ID: 0x13  
 Region: World

**Physical Payload**

80 BC 26 01 26 80 01 00 01 50 FF 94 79 61 EE 35 75 58 FC C7

**Event Data**

**Εικόνα 62: Ανάλυση περιεχομένων ανερχόμενου πακέτου στον εξυπηρετητή δικτύου**

### 3.5.3. Διακίνηση δεδομένων στον εξυπηρετητή εφαρμογής

Μέσω της κονσόλας του TTN είναι εφικτή και η καταγραφή των αποκρυπτογραφημένων δεδομένων που αφορούν την τελική εφαρμογή. Έτσι είναι δυνατή η πρόσβαση στην ταυτότητα της τελικής συσκευής και στα δεδομένα που απέστειλε ή έλαβε. [41]

**APPLICATION DATA** || pause clear

Filters: uplink downlink activation ack error

time	counter	port	dev id	payload
06:45:59	1		rn2483node	A3 67 6D 65 73 73 61 67 65 66 2D 5A 45 59 53 2D 66 6E 75 6D 62 65 72 18 AC
06:45:57	1	1	confirmed rn2483node	AC 2D 5A 45 59 53 2D
06:45:58	1		scheduled rn2483node	A3 67 6D 65 73 73 61 67 65 66 2D 5A 45 59 53 2D 66 6E 75 6D 62 65 72 18 AC
06:45:52	0		rn2483node	
06:45:50	0	1	confirmed rn2483node	AC 2D 5A 45 59 53 2D
06:45:39			rn2483node	dev addr: 26 01 20 13 app eui: 70 B3 D5 7E D0 01 F3 62 dev eui: 00 04 A3 0B FF FF F

**Εικόνα 63: Καταγραφή διακινούμενων δεδομένων στο επίπεδο της εφαρμογής**

Στις κάτωθι καταγραφές βλέπουμε την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του συστήματος όπου ταυτοποιούνται τα δεδομένα που εστάλλησαν και ελήφθησαν από την τελική συσκευή με τα αναμενόμενα.

**APPLICATION DATA** || pause 🗑 clear

Filters: uplink downlink activation ack error

time	counter	port	dev id	payload
06:45:59	1		rn2483node	A3 67 6D 65 73 73 61 67 65 66 2D 5A 45 59 53 2D 66 6E 75 6D 62 65 72 18
06:45:57	1	1	confirmed rn2483node	AC 2D 5A 45 59 53 2D

**Uplink**

**Payload**

AC 2D 5A 45 59 53 2D

**Fields**

no fields

**Metadata**

```
{
  "time": "2019-08-29T03:45:57.93303469Z",
  "frequency": 868.1,
  "modulation": "LORA",
  "data_rate": "SF7BW125",
  "coding_rate": "4/5",
}
```

**Εικόνα 64: Ανάλυση περιεχομένου ανερχόμενου πακέτου δεδομένων στο επίπεδο της εφαρμογής**

**APPLICATION DATA** || pause 🗑 clear

Filters: uplink downlink activation ack error

time	counter	port	dev id	payload
06:45:59	1		rn2483node	A3 67 6D 65 73 73 61 67 65 66 2D 5A 45 59 53 2D 66 6E 75 6D 62 65 72 18 AC 63 4C 45 44 F5

**Downlink**

**Payload**

A3 67 6D 65 73 73 61 67 65 66 2D 5A 45 59 53 2D 66 6E 75 6D 62 65 72 18 AC 63 4C 45 44 F5

**Fields**

no fields

**Metadata**

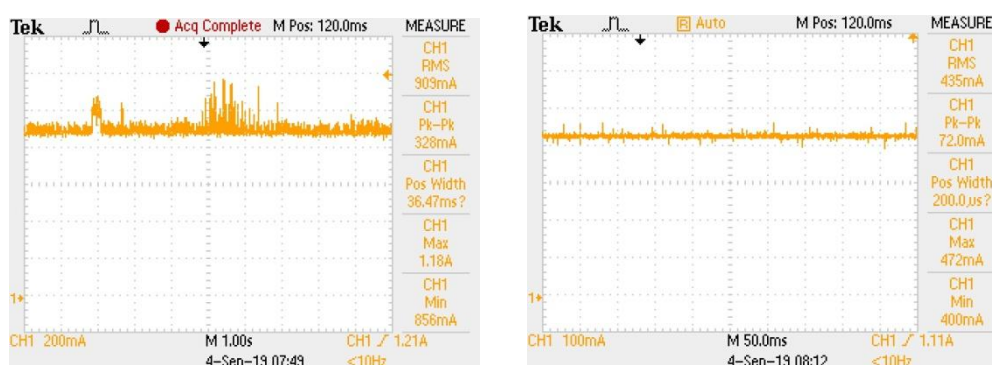
```
{
}
```

**Εικόνα 65: Ανάλυση περιεχομένου κατερχόμενου πακέτου δεδομένων στο επίπεδο της εφαρμογής**

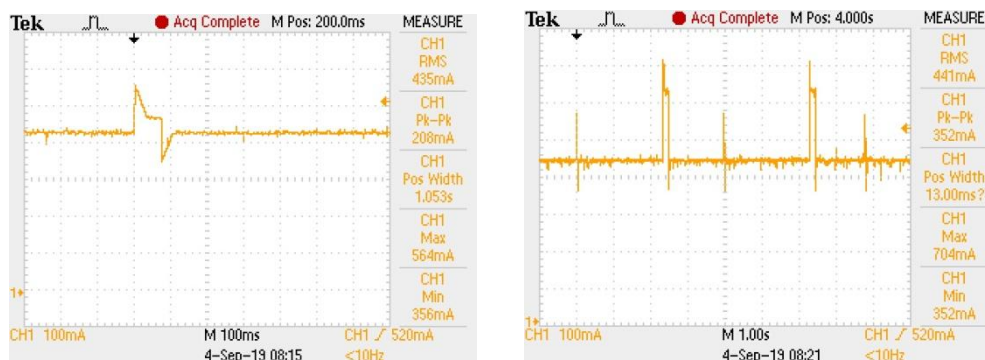
### 3.5.4. Μετρήσεις απαιτήσεων ισχύος πύλης δικτύου

Ένας μεγάλος αριθμός εφαρμογών IoT προβλέπει την κατανομημένη εγκατάσταση τελικών συσκευών σε περιοχές όπου δεν διατίθεται πρόσβαση σε δίκτυα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες εφαρμογές θα μπορούσαν να είναι η έξυπνη γεωργία, η δασική πυροπροστασία ή η μέτρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας και του εδάφους. Έτσι ο παράγοντας της ενεργειακής αυτονομίας καθίσταται κομβικής σημασίας στις υλοποιήσεις του διαδικτύου των πραγμάτων.

Ακολουθούν μετρήσεις των απαιτήσεων ρεύματος της υλοποιηθείσας πύλης δικτύου LoRaWAN με σκοπό την εξέταση της δυνατότητας αυτονομίας μίας τέτοιας συσκευής σε μία εγκατάσταση εκτός του αστικού περιβάλλοντος. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω κατάλληλων αντιστάσεων μετρήσεως ρεύματος (Shunt Resistors).



Εικόνα 66: Μετρούμενη ζήτηση κατανάλωσης ρεύματος της πύλης δικτύου (RPI 3 και iC880) και του συγκεντρωτή ανεξάρτητα



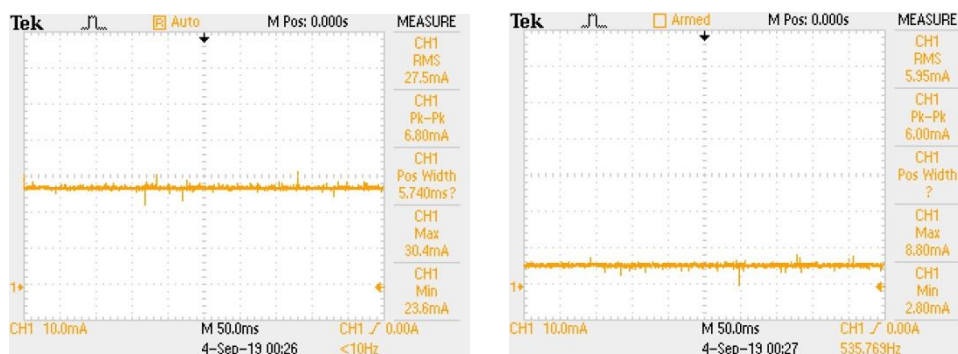
Εικόνα 67: Μετρούμενη ζήτηση ρεύματος του συγκεντρωτή για διάφορους ρυθμούς διακινήσεως πακέτων του δικτύου

Από τις μετρήσεις βλέπουμε πώς σε κατάσταση λειτουργίας χαμηλής δραστηριότητας διακινήσεως πακέτων η πύλη δικτύου απαιτεί περίπου 1 A με τον συγκεντρωτή να χρησιμοποιεί το μισό ρεύμα. Αυτό συνεπάγεται μία ελάχιστη ισχύ τροφοδοσίας περίπου στα 5 W πράγμα που οδηγεί σε μία σχετικά σύνθετη αλλά όχι ανέφικτη υποδομή αντλήσεως ενέργειας από το περιβάλλον στις περιπτώσεις που ζητείται η μακροχρόνια αυτονομία.

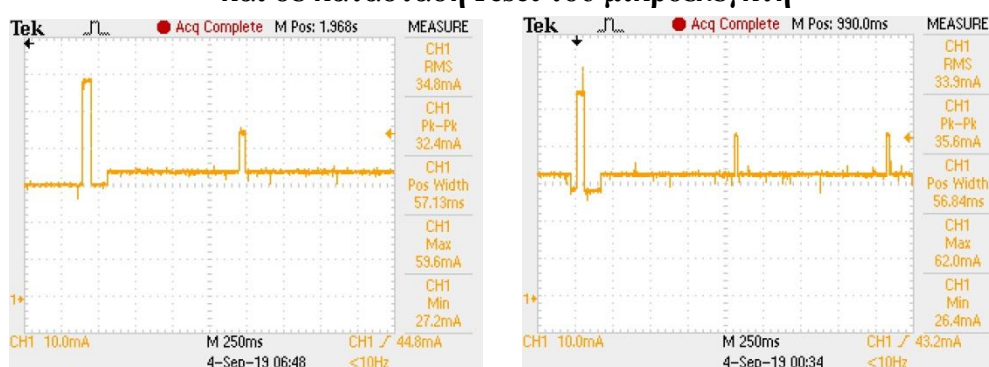
### 3.5.5. Μετρήσεις απαιτήσεων ισχύος τελικού κόμβου

Οι ενεργειακές απαιτήσεις των τελικών κόμβων του συστήματος LoRaWAN είναι καθοριστικής σημασίας στην υλοποίηση των δικτύων καθώς ζητείται η ικανότητα αυτόνομης λειτουργίας μέσω τροφοδοσίας από μπαταρίες και η φορητότητα.

Ακολουθούν οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στον υλοποιηθέντα τελικό κόμβο ο οποίος και τροφοδοτήθηκε με τάση 2,3 V :



**Εικόνα 68: Μετρούμενη ζήτηση ρεύματος του τελικού κόμβου σε δραστηριότητα και σε κατάσταση reset του μικροελεγκτή**



**Εικόνα 69: Μετρούμενη ζήτηση ρεύματος του τελικού κόμβου κατά την αποστολή και την λήψη πακέτου**

Βλέποντας τις μετρήσεις παρατηρούμε μία μέση απαίτηση ρεύματος περίπου στα 30 mA και κατά την αποστολή ή λήψη δεδομένων η ζήτηση ρεύματος αυξάνεται έως και τα 60 mA για όσο χρόνο πραγματοποιείται η ασύρματη ζεύξη. Οι μετρούμενες τιμές οδηγούν σε μία απαιτούμενη ισχύ περίπου στα 70 mW η οποία επιτρέπει την αυτόνομη λειτουργία μερικών ωρών ή ημερών με μπαταρίες αλλά δεν είναι ικανοποιητική για πραγματικά μακροχρόνια αυτονομία.

Αξίζει να τονιστεί πώς η σχεδίαση του τελικού κόμβου πραγματοποιήθηκε για δοκιμαστικούς σκοπούς και όχι με γνώμονα την βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Βλέπουμε πώς η κύρια κατανάλωση ενέργειας ευθύνεται στον μικροελεγκτή και αυτή δύναται να περιοριστεί σημαντικά μέσω του κατάλληλου προγραμματισμού όπου θα αξιοποιηθούν οι δυνατότητες Sleep και τα σήματα διακοπής που παρέχει η μονάδα.

### 3.5.6. Έλεγχος εμβελείας καλύψεως της πύλης δικτύου

Για την διαπίστωση της ικανότητας και του εύρους καλύψεως της πύλης δικτύου εντός πυκνοκατοικημένης αστικής περιοχής πραγματοποιήθηκε μία τοπογραφική καταγραφή της δυνατότητας ζεύξεως της πύλης με τον τελικό κόμβο.

Για την πραγματοποίηση της καταγραφής χρησιμοποιήθηκε η android εφαρμογή TTN Mapper η οποία επιτρέπει την καταγραφή της γεωγραφικής θέσεως της ζεύξεως μέσω του ενσωματωμένου δέκτη GPS του κινητού τηλεφώνου και κάνει εφικτή την αναπαράσταση της τοπικής καλύψεως στον χάρτη.

Για την απεικόνιση της καλύψεως της πύλης δικτύου πραγματοποιήθηκαν συνολικά 100 επιτυχημένες αποστολές πακέτων από τον τελικό κόμβο και καταγράφηκαν τα σημεία μέγιστης αποστάσεως από την πύλη. Αξίζει να σημειωθεί πώς η πύλη δικτύου κατά την διάρκεια των δοκιμών βρισκόταν σε εσωτερικό οικιακό περιβάλλον.



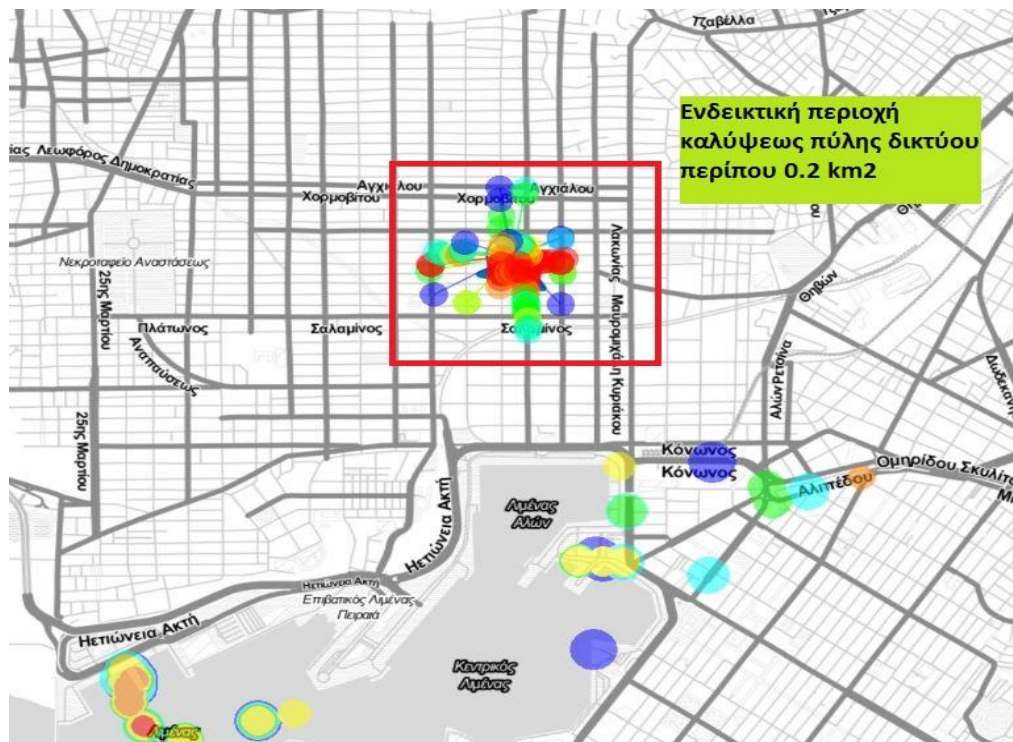
Εικόνα 70: Γεωγραφική απεικόνιση της καλύψεως της πύλης δικτύου στον χάρτη

Όπως φαίνεται στην άνω εικόνα η μέγιστη εμβέλεια ζεύξεως φτάνει τα περίπου 300 μέτρα και ο χρωματισμός των σημείων καταγραφής υποδηλώνει τις απώλειες ζεύξεως συναρτήσει της μετρήσεως του RSSI. Το κόκκινο χρώμα δηλώνει τις ελάχιστες απώλειες ενώ το μπλέ τις μέγιστες.



Θεωρώντας μία ενδεικτική ακτίνα καλύψεως στα 250 μέτρα γύρω από την πύλη υπολογίζεται ένα εμβαδό καλύψεως περίπου 0,2 τετραγωνικά χιλιόμετρα για την παρούσα υλοποίηση εντός του συγκεκριμένου αστικού περιβάλλοντος. Η πραγματοποίηση μίας μελετημένης εγκατάστασης με εξωτερική τοποθέτηση της πύλης δικτύου σε κατάλληλη θέση και ύψος με σκοπό τον περιορισμό των παραγόντων ηλεκτρομαγνητικής εξασθένησης ενδεχομένως θα βελτιώσει σημαντικά την δυνατότητα καλύψεως της περιοχής.

Βλέποντας την κάτω εικόνα παρατηρούμε πώς δυνητικά η περιοχή του λιμανιού του πειραιά θα μπορούσε να καλυφθεί από μία ή δύο κατάλληλα τοποθετημένες πύλες δικτύου σε κεντρικά σημεία δεδομένου πώς ο χώρος του λιμένα περιλαμβάνει μικρότερο αριθμό ηλεκτρομαγνητικών εμποδίων αν εξαιρέσουμε τα ίδια τα πλοία.



Εικόνα 71: Γεωγραφική απεικόνιση του εμβαδού καλύψεως της πύλης δικτύου στον χάρτη

Colour	Link Cost
Red	< 100 dB
Orange	100 - 105
Yellow	105 - 110
Green	110 - 115
Cyan	115 - 120
Blue	> 120 dB

Εικόνα 72: Σημασία του χρωματικού κώδικα ενδείξεως των απωλειών ζεύξεως

### 3.5.7. Μετρήσεις ταχύτητας δεδομένων και χρόνου στον αέρα

Κατά την διαδικασία ιχνηλατήσεως της περιοχής καλύψεως της πύλης δικτύου έγινε μία παράλληλη καταγραφή των διακινούμενων δεδομένων στην κονσόλα του TTN. Βλέποντας τις καταγραφές των πακέτων δεδομένων παρατηρούμε πώς λόγω της ενεργοποίησης της δυναμικής ρυθμίσεως του ρυθμού δεδομένων (ADR) έχουμε διαφορετικές ταχύτητες αποστολής και χρόνους στον αέρα τα οποία εξαρτώνται από τα επίπεδα απωλειών που παρουσιάζονται στην ασύρματη ζεύξη μεταξύ πύλης δικτύου και τελικού κόμβου.

Η ενεργοποίηση της λειτουργίας ADR έχει ως σκοπό την κάλυψη κινουμένων τελικών συσκευών ή συσκευών που βρίσκονται εντός περιβάλλοντος μεταβλητών ηλεκτρομαγνητικών απωλειών και η ρύθμιση της ταχύτητας επικοινωνίας γίνεται με γνώμονα την ελάχιστη ενεργειακή επιβάρυνση των τελικών συσκευών. Για την επίτευξη του ανωτέρω σκοπού, ο εξυπηρετητής δικτύου TTN τηρεί ένα αρχείο 20 καταγραφών του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR) των ανερχόμενων πακέτων από την εκάστοτε τελική συσκευή και ένα αρχείο των πυλών δικτύου που συνδέθηκαν με αυτήν την συσκευή κατά τις αποστολές. Από το αρχείο αυτό ο εξυπηρετητής δικτύου εντοπίζει τις πύλες δικτύου που είχαν το υψηλότερο SNR και υπολογίζει τα περιθώρια ζεύξεως ώστε να αυξήσει τον ρυθμό δεδομένων ή να μειώσει την εκπεμπόμενη ισχύ της τελικής συσκευής. Η παραπάνω καταγραφή εκκινεί με την ενεργοποίηση της λειτουργίας ADR από την τελική συσκευή και ακυρώνεται με την απενεργοποίηση της λειτουργίας.

Σε εφαρμογές όπου οι τελικοί κόμβοι είναι τοποθετημένοι σε σταθερά σημεία με σταθερό περιβάλλον απωλειών ζεύξεως δεν είναι απαραίτητα η χρήση της λειτουργίας ADR και οι συσκευές μπορούν να ρυθμιστούν σε έναν σταθερό ρυθμό δεδομένων και μία σταθερή ισχύ εκπομπής για την ικανοποίηση των αναγκών επικοινωνίας και ενέργειας.

Η μεταβολή των παραμέτρων διαμορφώσεως όπως ο συντελεστής διευρύνσεως (SF) από την λειτουργία ADR προκαλεί μία αλλαγή του ρυθμού δεδομένων καθώς και της διάρκειας εκπομπής ή λήψεως (ToA). Από τις καταγραφές που πραγματοποιήθηκαν μπορούμε να εντοπίσουμε τις ακραίες μεταβολές των δύο άνω παραμέτρων και έτσι έχουμε:

Χαρακτηριστικά ζεύξεως	SF	BW	CR	ToA
Χαμηλές απώλειες (A)	7	125 KHz	4/5 (1)	56,6 msec
Υψηλές απώλειες (B)	12	125 KHz	4/5 (1)	1318,9 msec

**Πίνακας 10: Καταγραφές χαρακτηριστικών μεταδόσεως ακραίων συνθηκών απωλειών ασύρματης ζεύξεως**



time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt	
14:13:03	867.1	lor	4/5	SF 7 BW 125	41.2	2	dev addr: 26 01 22 D4 payload size: 12 bytes
14:13:02	867.1	lor	4/5	SF 7 BW 125	56.6	2	dev addr: 26 01 22 D4 payload size: 20 bytes
14:12:59	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	41.2	1	dev addr: 26 01 22 D4 payload size: 12 bytes
14:12:58	868.3	lor	4/5	SF 7 BW 125	56.6	1	dev addr: 26 01 22 D4 payload size: 20 bytes
14:12:53	867.5	lor	4/5	SF 7 BW 125	41.2	0	dev addr: 26 01 22 D4 payload size: 12 bytes
14:12:53	867.5	lor	4/5	SF 7 BW 125	56.6	0	dev addr: 26 01 22 D4 payload size: 20 bytes
14:12:51	868.1		4/5	SF 7 BW 125	71.9		
14:12:47	868.1		4/5	SF 7 BW 125	61.7		app eui: 70 B3D5 7E D001 F3 62 dev eui: 00 04 A30B FF FF FF
14:11:59	869.525	lor	4/5	SF 12 BW 125	1482.8	56	dev addr: 26 01 2B C2 payload size: 22 bytes
14:11:58	868.3	lor	4/5	SF 12 BW 125	1318.9	30	dev addr: 26 01 2B C2 payload size: 20 bytes
14:11:53	869.525	lor	4/5	SF 12 BW 125	1482.8	55	dev addr: 26 01 2B C2 payload size: 22 bytes

**Εικόνα 73: Καταγραφή διακινούμενων πακέτων δεδομένων σε διαφορετικές συνθήκες απωλειών ασύρματης ζεύξεως**

Για τον υπολογισμό των δύο ακραίων ταχυτήτων δεδομένων που προκύπτουν από τον παραπάνω πίνακα θα χρησιμοποιήσουμε την σχέση που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 2.4.1.1.2 :

$$\text{Έχουμε ρυθμό } Rb = SF * \frac{\left[ \frac{4}{4 + CR} \right]}{\left[ \frac{2^{SF}}{BW} \right]} \text{ (bits/sec) για λειτουργία διορθώσεως σφαλμάτων}$$

Οπότε την περίπτωση Α των χαμηλών απωλειών ζεύξεως θα έχουμε:

$$Rb_A = 7 * \frac{\left[ \frac{4}{4 + 1} \right]}{\left[ \frac{2^7}{125000} \right]} = 5468,75 \text{ bps}$$

Και στην περίπτωση Β των υψηλών απωλειών ζεύξεως θα έχουμε:

$$Rb_B = 12 * \frac{\left[ \frac{4}{4 + 1} \right]}{\left[ \frac{2^{12}}{125000} \right]} = 292,96 \text{ bps}$$

Όπου βλέπουμε μία δραματική μεταβολή της ταχύτητας δεδομένων συναρτήσει της ποιότητας ζεύξεως.

## 4. Συμπεράσματα – προτάσεις

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μία εξέταση των διαθέσιμων τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης για τις ανάγκες του διαδικτύου των πραγμάτων. Σε αυτό το πλαίσιο εξετάστηκε η δομή και η λειτουργία του πρωτοκόλλου LoRaWAN τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και σε πρακτικό.

Μέσω της υλοποίησης ενός δοκιμαστικού ιδιωτικού δικτύου LoRaWAN εξετάστηκε η διαδικασία υλοποίησης μίας πύλης δικτύου και ενός τελικού κόμβου καθώς και σύνδεση αυτών με τους εξυπηρετητές δικτύου και εφαρμογής.

Μέσω της θεωρητικής μελέτης και της πρακτικής εφαρμογής εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα όσον αφορά την ικανοποίηση των βασικών παραμέτρων του διαδικτύου των πραγμάτων μέσω της τεχνολογίας LoRaWAN:

- **Απαιτήσεις ισχύος :** Οι μετρήσεις ζητούμενου ρεύματος που πραγματοποιήθηκαν στην πύλη δικτύου έδειξαν μία ελάχιστη απαίτηση ισχύος 5 W για χαμηλή δραστηριότητα διακινήσεως πακέτων, πράγμα που αποδεικνύει πώς είναι εφικτή η σχεδίαση συστημάτων με ενεργειακά αυτόνομες πύλες οι οποίες θα μπορούσαν να αντλούν ενέργεια από το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την κάλυψη επαρχιακών ή δασικών περιοχών όπου είναι ανέφικτη η πρόσβαση στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά τον δοκιμαστικό τελικό κόμβο που υλοποιήθηκε χωρίς να δοθεί έμφαση στην ενεργειακή του απόδοση βλέπουμε μία απαίτηση ισχύος περίπου στα 70 mW η οποία επιτρέπει την φορητότητα και την ενεργειακή αυτονομία μέσω μπαταριών στο πλαίσιο μερικών ημερών εάν επί παραδείγματος τροφοδοτηθεί από μπαταρίες χωρητικότητας 2 Ah.
- **Εμβέλεια καλύψεως:** Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν για την καταγραφή του τοπικού πεδίου καλύψεως της πύλης δικτύου για μία εγκατάσταση σε εσωτερικό οικιακό χώρο και περιοχή αστικού περιβάλλοντος, έδειξαν μία ακτίνα εμβελείας η οποία προσέγγισε έως και τα 300 μέτρα. Το γεγονός αυτό

αποδεικνύει την ικανότητα υλοποίησης ενός μεγάλου εύρους δικτύου συναρτήσει των αναγκών του διαδικτύου των πραγμάτων.

- **Ποσότητα και ταχύτητα δεδομένων:** Το γεγονός ότι η τεχνολογία LoRa λειτουργεί στο ελεύθερο συχνοτικό φάσμα ISM εισάγει περιορισμούς στους ημερήσιους συνολικούς χρόνους εκπομπής και λήψεως δεδομένων ανά τελική συσκευή. Οι περιορισμοί αυτοί καθορίζονται από τις εκάστοτε αρχές προτυποποίησης της χρήσεως των ραδιοσυχνοτήτων και από τους εξυπηρετητές υπηρεσιών με σκοπό την αξιόπιστη λειτουργία των δικτύων. Οι καταγραφές και οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν στα διακινούμενα δεδομένα έδειξαν εύρος ταχυτήτων δεδομένων από 293 bps έως 5,47 Kbps και διάρκειες εκπομπής από 56,6 ms έως 1319 ms αναλόγως των απωλειών ζεύξεως. Από τα ανωτέρω δεδομένα συμπεραίνουμε πως οι ταχύτητες επικοινωνίας είναι επαρκείς για την μεταφορά μετρήσεων αισθητήρων αλλά δεν είναι ικανοποιητικές για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ακόμη η αύξηση του χρόνου εκπομπής για την επίτευξη ζεύξεως σε περιβάλλοντα υψηλών απωλειών οδηγεί σε δυνητική μείωση της ποσότητας διακινούμενων δεδομένων συναρτήσει των παγκόσμιων κανονισμών χρήσεως του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που ορίζουν περιορισμούς στον ημερήσιο συνολικό χρόνο εκπομπής και τον κύκλο λειτουργίας των τελικών συσκευών.
- **Ασφάλεια:** Η τεχνολογία LoRaWAN παρέχει δύο επίπεδα ασφαλείας στην διακίνηση των δεδομένων μέσω κρυπτογράφησης AES 128 bit. Το πρώτο επίπεδο αφορά την κρυπτογράφηση των δεδομένων δικτύου στην επικοινωνία μεταξύ τελικών συσκευών και εξυπηρετητή δικτύου και το δεύτερο επίπεδο αφορά την κρυπτογράφηση των δεδομένων εφαρμογής μεταξύ των τελικών συσκευών και του εξυπηρετητή εφαρμογής. Η ασφάλεια των διακινούμενων δεδομένων είναι διασφαλισμένη εφόσον οι ανωτέρω εξυπηρετητές είναι αξιόπιστοι. Κατά την υλοποίηση του τελικού κόμβου διαπιστώθηκε η πιθανότητα κλοπής των κλειδιών κρυπτογράφησης μέσω φυσικής προσβάσεως στην επικοινωνία μεταξύ του μικροελεγκτή και της μονάδος πομποδέκτη LoRa εφόσον δεν τηρηθούν κάποια πρωτόκολλα

προλήψεως μέσω του κατάλληλου προγραμματισμού. Μία ενδεχόμενη απόκτηση των παραμέτρων κρυπτογραφήσεως και των παραμέτρων δικτύου της τελικής συσκευής μπορεί να επιτρέψει την υλοποίηση πλαστών κόμβων οι οποίοι μεταδίδουν πλαστά δεδομένα και έχουν πρόσβαση στα κατερχόμενα δεδομένα της εφαρμογής.

- **Ποιότητα υπηρεσιών:** Ένα από τα χαρακτηριστικά του LoRaWAN είναι η απουσία συστήματος αποφυγής διενέξεων καθώς και δεσμεύσεως παραδόσεως των δεδομένων στον προορισμό τους. Παρόλα αυτά, διατίθεται ένας μηχανισμός επιβεβαίωσης λήψεως και επαναποστολής δεδομένων σε περίπτωση μη επιβεβαίωσης ο οποίος όμως δεν υπόσχεται απαραίτητα την επιτυχή επικοινωνία αφού ο αριθμός των επαναποστολών είναι περιορισμένος. Έτσι σε περιπτώσεις υπάρξεων πολλών τελικών συσκευών και έντονης δραστηριότητας του δικτύου είναι πιθανά τα προβλήματα επικοινωνίας. Το γεγονός αυτό θέτει κάποιους προβληματισμούς σε εφαρμογές που σχετίζονται με ασφάλεια , με υγεία ή βιομηχανικές διεργασίες και επιβάλλεται μία προσεκτική μελέτη της εγκαταστάσεως και της λειτουργίας του εκάστοτε σχετικού συστήματος.
- **Περιπλοκότητα υλοποίησης και εγκαταστάσεως:** Η περιπλοκότητα υλοποίησης ενός δικτύου LoRaWAN είναι σχετικά χαμηλή και όσον αφορά την υλοποίηση των τελικών συσκευών και της πύλης δικτύου παρέχονται αρκετά στοιχεία για την δομή και την λειτουργία του πρωτοκόλλου επικοινωνίας καθώς αυτό είναι ανοικτό και διαθέσιμο. Ακόμη παρέχεται ελεύθερα το επίπεδο περιγραφής υλικού (HAL) που αφορά την οδήγηση και την λειτουργία του συγκεντρωτή LoRa της Semtech.
- **Κόστος υλοποίησης και χρήσεως:** Το κόστος υλοποίησης ενός δικτύου LoRaWAN είναι αρκετά χαμηλό σε σχέση με ανταγωνιστικές τεχνολογίες. Το κόστος υλοποίησης της πύλης δικτύου είναι της τάξεως των 170 € ενώ του τελικού κόμβου είναι της τάξεως των 60 €. Προφανώς μία υποδομή κεντρικού σταθμού βάσεως με ικανότητες καλύψεως ενός μεγάλου αριθμού τελικών

κόμβων θα πρέπει περιλαμβάνει έναν αριθμό συγκεντρωτών LoRa μεγαλύτερο του ενός για την ομαλή λειτουργία του δικτύου με αντίστοιχο πολλαπλασιασμό του κόστους υλοποίησης. Η χρήση του δικτύου εφόσον η ασύρματη επικοινωνία πραγματοποιείται στο ελεύθερο φάσμα ISM μπορεί να περιλαμβάνει μόνο τις ενδεχόμενες χρεώσεις συνδρομής των διακομιστών δικτύου, παρόλα αυτά η εξυπηρέτηση μικρών πειραματικών δικτύων παρέχεται δωρεάν. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που σχετίζεται με το κόστος χρήσεως των τελικών συσκευών είναι το κόστος και η διάρκεια ζωής της μπαταρίας.

Από τις δοκιμές και τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν μέσω της υλοποιηθείσας πειραματικής διατάξεως προκύπτουν κάποιες προτάσεις για την βελτίωση των χαρακτηριστικών του συστήματος :

- **Βελτίωση ενεργειακών απαιτήσεων:** Η βελτίωση των ενεργειακών απαιτήσεων των τελικών κόμβων μπορεί να επιτευχθεί μέσω της κατάλληλης επιλογής υλικού και κυρίως μέσω του κατάλληλου προγραμματισμού όπου θα αξιοποιηθούν οι δυνατότητες αδρανείας (Sleep) των μικροελεγκτών καθώς και λειτουργία μέσω διεγέρσεως των σημάτων διακοπής (Interrupts) όπου θα ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος άσκοπης λειτουργίας και το σύστημα θα ενεργοποιείται μόνο για την διενέργεια μετρήσεων, τον χειρισμό ενεργοποιητών και την αποστολή ή λήψη δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτή η υλοποίηση τελικών κόμβων με χρόνους αυτονομίας της τάξεως μερικών ετών οι οποίοι μειώνουν το τεχνικό και υλικό κόστος της αντικαταστάσεως ή φορτίσεως των μπαταριών. Ακόμη όσον αφορά την πύλη δικτύου μπορεί να γίνει μία προσεκτική επιλογή του συστήματος οδηγήσεως και επικοινωνίας με το διαδίκτυο ώστε η επεξεργαστική του ισχύς και κατάσταση ηρεμίας να μην πλεονάζει των απαιτήσεων. Έτσι θα είναι εφικτό να ελαχιστοποιηθούν οι ενεργειακές ανάγκες στις αναγκαίες για την ορθή λειτουργία της μονάδος συγκεντρωτή LoRa και είναι πιθανή η υλοποίηση ενεργειακά αυτόνομων πυλών δικτύου οι οποίες θα αντλούν ενέργεια από το περιβάλλον.

- **Βελτίωση της εμβέλειας καλύψεως:** Η προσεκτική μελέτη των χαρακτηριστικών του τόπου εφαρμογής του δικτύου με σκοπό την ελαχιστοποίηση των παραγόντων απωλειών ζεύξεως και η κατάλληλη τοποθέτηση των πυλών δικτύου καθώς και των τελικών συσκευών εφόσον αυτές θα είναι στατικές, είναι ένας τρόπος μεγιστοποίησης της ωφέλιμης εμβέλειας του συστήματος. Επι παραδείγματι η εξωτερική τοποθέτηση μίας πύλης εντός αστικής περιοχής σε ένα ύψος μεγαλύτερο από το μέσο ύψος των κτηρίων θα περιορίσει τα φυσικά εμπόδια που εμπλέκονται στην ζεύξη με τις τελικές συσκευές και άρα θα εξασφαλίσει μεγαλύτερο πεδίο καλύψεως.
- **Αύξηση της ασφαλείας:** Όπως φάνηκε κατά την διαδικασία υλοποίησης του τελικού κόμβου τα βασικά δεδομένα δικτύου και κρυπτογραφήσεως είναι εκτεθειμένα στην φάση της αρχικοποίησης της συσκευής με σκοπό την ενεργοποίηση. Παρόλα αυτά, τα δεδομένα αυτά είναι εφικτό να αποθηκευτούν στην εσωτερική μνήμη της μονάδος πομποδέκτη και στην ουσία να μην εμφανιστούν ξανά στην επικοινωνία του μικροελεγκτή με τον πομποδέκτη. Έτσι θα είναι εφικτή η συμμετοχή της συσκευής στο δίκτυο μετά από κάθε επανεκκίνηση λειτουργίας και τα κρίσιμα δεδομένα θα είναι εκτεθειμένα μόνο κατά την πρώτη και μοναδική αρχικοποίηση παραμέτρων για μία δεδομένη εφαρμογή. Ακόμη, εφόσον μία τελική συσκευή κατασκευάζεται για χρήση σε μία συγκεκριμένη εφαρμογή τα δεδομένα αρχικοποίησης μπορούν να αποθηκεύονται στην εσωτερική μνήμη του πομποδέκτη ήδη από το εργοστάσιο.
- **Αύξηση της ποιότητας υπηρεσιών:** Ο κατάλληλος προγραμματισμός των τελικών συσκευών για την συνεχόμενη επαναποστολή κρίσιμων δεδομένων των οποίων δεν επιβεβαιώνεται η λήψη καθώς και η ενεργοποίηση τοπικού συναγερμού θα μπορούσε να μειώσει το ποσοστό των ενδεχόμενων αστοχιών επικοινωνίας. Βεβαίως, πρέπει να συνυπολογιστεί η επίδραση της αυξημένης αυτής δραστηριότητας επαναποστολών στην ομαλή λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου και το ενεργειακό αποτέλεσμα επι των τελικών συσκευών.

## 5. Βιβλιογραφία – πηγές

- [1] Jozef Mocnej, Adrian Pekar, Winston K.G. Seah, Iveta Zolotova , “Network Traffic Characteristics of the IoT Application Use Cases” , [www.semanticscholar.org](http://www.semanticscholar.org) , 2018
- [2] Borja Martinez, Ferran Adelantado, Andrea Bartoli, Xavier Vilajosana, “Exploring the Performance Boundaries of NB-IoT” , IEEE Internet of Things Journal 2018 , 2018
- [3] Dave Evans, “The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything” , Cisco Internet Business Solutions Group, 2011
- [4] Mahdi H. Miraz, Maaruf Ali, Peter S. Excell 3, Richard Picking, “Internet of Nano-Things, Things and Everything: Future Growth Trends” , MDPI , 2018
- [5] Vandana Sharma, Ravi Tiwari, “A review paper on “IoT” & It’s Smart Applications” , International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), 2016
- [6] Kais Mekkia, Eddy Bajica, Frederic Chaxela, Fernand Meyerb, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment” , The Korean Institute of Communications and Information Sciences (KICS), 2017
- [7] Richard Quinnell, “Low power wide-area networking alternatives for the IoT”, EDN NETWORK, 2015
- [8] “Final draft ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012-01)”, European Telecommunications Standards Institute , 2012
- [9] Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, William Mark Townsley, “A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things” , MDPI , 2016
- [10] Lorenzo Vangelista, Marco Centenaro, “Worldwide Connectivity for the Internet of Things Through LoRaWAN” , MDPI , 2019
- [11] “A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™” , LoRa® Alliance Technical Marketing Workgroup , 2015
- [12] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melià-Seguí, Thomas Watteyne, “Understanding the Limits of LoRaWAN” , IEEE Communications Magazine , 2017

- [13] Jansen C. Liando, Amalinda Gamage, Agustinus W. Tengourtius, Mo Li, “Known and Unknown Facts of LoRa: Experiences from a Large Scale Measurement Study” , ACM Trans. Sensor Netw , 2018
- [14] Pradeep Shamanna, “AN1631-Simple Link Budget Estimation and Performance Measurements of Microchip Sub-GHz Radio Modules” Microchip Technology Inc , 2013
- [15] “AN1200.22 - LoRa™ Modulation Basics” , Semtech Corporation , 2015
- [16] Guillaume Ferre , “Collision and Packet Loss Analysis in a LoRaWAN Network” , 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO) , 2017
- [17] Andri Rahmadhani, Fernando Kuipers, “When LoRaWAN Frames Collide” , 12th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization (WiNTECH’18) , 2018
- [18] Jetmir Haxhibeqiri, Floris Van den Abeele, Ingrid Moerman, Jeroen Hoebeke, “LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements”, MDPI, 2017
- [19] “LoRaWAN™ SECURITY”, LoRa ALLIANCE™ , 2017
- [20] Congduc Pham, “A Low-Cost LoRa Gateway with QoS Features” , Université de Pau France , 2016
- [21] “WiMOD iC880A Datasheet” , IMST GmbH , 2019
- [22] “iC880A-SPI QuickStart Guide” , IMST GmbH , 2015
- [23] “RN2483 LoRa® Technology Module Command Reference User’s Guide” , Microchip Technology Inc , 2016
- [24] “RN2483 Datasheet” , Microchip Technology Inc , 2015
- [25] “RASPBerry PI 3 MODEL B Technical Specification” , element 14 , 2018
- [26] “Lora Network System Overview” , Semtech Corporation , 2012
- [27] “AN1200.23 - SX1272 Settings for LoRaWAN” , Semtech Corporation , 2015
- [28] “SX1272/73 Datasheet” , Semtech Corporation , 2015
- [29] “SX1301 Datasheet” , Semtech Corporation , 2017
- [30] “WiMOD Lite Gateway Data Sheet” , IMST GmbH , 2017
- [31] “STM32 Nucleo-64 boards (MB1136) User manual” , STMicroelectronics , 2019



- [32] “LoRaWAN™ 1.1 Specification” , LoRa Alliance Technical Committee , 2017
- [33] “LoRaWAN™ 1.1 Regional Parameters” , LoRa Alliance Technical Committee Regional Parameters Workgroup , 2018
- [34] “LoRaWAN™ 1.0 Specification” , LoRa Alliance Technical Committee , 2015
- [35] “LoRaWAN® AND NB-IoT: COMPETITORS OR COMPLEMENTARY?” , ABI Research, 2019
- [36] “AllThingsTalk Binary Conversion Language (ABCL) 1.0.0” , AllThingsTalk , 2017
- [37] Brian Ray, “SigFox Vs. LoRa: A Comparison Between Technologies & Business Models” , Link-Labs , 2018 , available at: <https://www.link-labs.com/blog/sigfox-vs-lora>
- [38] Sacha Kavanagh, “What is LPWAN?” , 5G website , 2019 , available at: <https://5g.co.uk/guides/what-is-lpwan/>
- [39] Brian Ray, “What Is LoRa? A Technical Breakdown” , Link-Labs , 2018 , available at: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-lora>
- [40] Eugenio Pasqua, “LPWAN technologies: How cellular MNOs are placing their bets”, IoT analytics , 2018 , available at: <https://iot-analytics.com/lpwan-technologies-cellular-mnos/>
- [41] The Things Network website, 2019 , available at: <https://www.thethingsnetwork.org>
- [42] The AllThingsTalk website, 2019 , available at: <https://www.allthingstalk.com>
- [43] Robert Lie, “LoRaWAN” , mobilefish website, 2019 , available at: [https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan\\_quickguide\\_tutorial.html](https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html)
- [44] CBOR online converter , 2019 , available at: <http://cbor.me/>
- [45] Online code to flow chart converter, 2019 , available at : <https://code2flow.com/app>
- [46] Mbed on line c compiler, 2019 , available at : <https://ide.mbed.com/compiler>
- [47] Calum McClelland, “IoT Connectivity – Comparing NB-IoT, LTE-M, LoRa, SigFox, and other LPWAN Technologies” , IoT for all website , 2018 , available at: <https://www.iotforall.com/iot-connectivity-comparison-lora-sigfox-rpma-lpwan-technologies/>
- [48] Dr. V. Bhuvaneshwari, Dr. R Porkodi, “The Internet of Things (IoT) Applications and Communication Enabling Technology Standards: An Overview” , International Conference on Intelligent Computing Applications , 2014

[49] Brian Ray, “What Is Weightless?” , Link-Labs , 2015 , available at: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-weightless>

[50] LoRa Alliance website, 2019 , available at: <https://lora-alliance.org/>

[51] “LoRa™ FAQs” , Semtech Corporation, 2015

[52] TTN Mapper website , 2019 , available at: <https://ttnmapper.org/>

## 6. Παραρτήματα

### 6.1. Κώδικας τελικού κόμβου στην πλατφόρμα ARM mbed online

```
//includes////////////////////////////////////  
#include "mbed.h"  
  
//software definitions////////////////////////////////////  
#define write_delay 0.2 // UART Command to RN2483 delay in seconds for proper  
operation  
  
//global variables////////////////////////////////////  
  
//uart variables  
char buffer[128];  
char input_character;  
//adc variables  
unsigned char analog_measurement_0;  
unsigned char analog_measurement_1;  
//LoRaWan variables  
const char *message;  
  
//object creation////////////////////////////////////  
  
DigitalOut my_led(LED1); // Embedded Led  
DigitalOut green_led(PB_3); //Green Led - joined/activated  
DigitalOut yellow_led(PB_4); //Yellow Led - transmit/receive  
DigitalOut red_led(PB_10); //Red Led actuator received command  
DigitalIn button_left(PA_6); //Join request button  
DigitalIn button_center(PA_7); //Transmit data button  
DigitalIn button_right(PB_6); //General purpose button  
AnalogIn analog_value_0(A0); //Pot 1 analogue input - number output to LoRaWaN  
AnalogIn analog_value_1(A1); //Pot 2 analogue input - string output to LoRaWaN  
  
//interrupts////////////////////////////////////  
  
//button  
InterruptIn my_button(USER_BUTTON); //Interrupt attached to embedded user button  
  
//UART  
Serial uart(SERIAL_TX, SERIAL_RX); //Interrupt attached to UART activity  
  
//functions////////////////////////////////////  
  
//IO initialization Function  
void io_initialization(void)  
{  
    //set pull up button inputs  
    button_left.mode(PullUp);  
    button_center.mode(PullUp);  
    button_right.mode(PullUp);  
}
```

```

        //set leds to off state
        green_led=1;
        yellow_led=1;
        red_led=1;
    }

    //UART initialization function
    void uart_initialization(void)
    {
        uart.baud(57600); //set baudrate at 57600 bps
    }

    //RN2483 write command function
    void rn2483_write(const char *s)
    {
        my_led= 1;
        uart.printf(s); //Command and data
        uart.printf("\r\n"); //Termination of ASCII command
        wait(write_delay); //Wait until next command send
        my_led= 0;
    }

    //LoRaWaN data packet send function
    void rn2483_lorawan_send_packet(unsigned char number,const char *s)
    {
        my_led= 1;
        yellow_led=0; //TX led is on
        if(number<=15){
            uart.printf("mac tx cnf 1 0%X",number);
        }
        else{
            uart.printf("mac tx cnf 1 %X",number);
        }

        int n;
        for(n=0; s[n] != '\0'; n++){
            uart.printf("%02x",(unsigned char)s[n]);
        }

        uart.printf("\r\n"); //ASCII command termination
        wait(write_delay); //Wait until next command send
        my_led= 0;
        yellow_led=1; //TX led is off
    }

    //ADC function
    void adc_conversion(void){
        analog_measurement_0= (analog_value_0.read_u16())>>8; //read position of
        potentiometer 1 and use 8 msb of 16-bit value
        analog_measurement_1= (analog_value_1.read_u16())>>8; //read position of
        potentiometer 2 and use 8 msb of 16-bit value
    }

    //RN2483 LoRaWaN initialization function
    void rn2483_lorawan_initialization(void)
    {
        rn2483_write("sys reset");
    }

```

```

rn2483_write("mac set appeui 70B3D57ED001F362");
rn2483_write("mac set appkey 7AC824E96E5C23AD5B21AC575509CA9A");
rn2483_write("mac set deveui 0004A30BFFFFFFFF");
rn2483_write("mac set devaddr 00000000");
rn2483_write("mac set nwkskey 00000000000000000000000000000000");
rn2483_write("mac set appskey 00000000000000000000000000000000");
rn2483_write("mac set adr on");
green_led=1; //join led is off
yellow_led=0; // initialization/transmit/receive led is on
rn2483_write("mac join otaa"); //send join request
if(uart.getc()=='a'){ //get join status
    green_led=0; //if joined then green led status is on
}
yellow_led=1;//if joined then yellow led status is off
}

//Check if transmittion-center button is pressed function
void button_check(void){
    if(!button_center){

        adc_conversion();//get potentiometer positions
        //check potentiometer 2 position and send the position related message
        if((analog_measurement_1>25)&&(analog_measurement_1<50)){
            message="-PADA-";
        }
        else if ((analog_measurement_1>50)&&(analog_measurement_1<75)){
            message= "UNIWA ";
        }
        else if ((analog_measurement_1>75)&&(analog_measurement_1<100)){
            message= "-LoRa-";
        }
        else if ((analog_measurement_1>100)&&(analog_measurement_1<125)){
            message= "StrinG";
        }
        else if ((analog_measurement_1>125)&&(analog_measurement_1<150)){
            message= " MsG ";
        }
        else if ((analog_measurement_1>150)&&(analog_measurement_1<175)){
            message= "-TeSt-";
        }
        else if ((analog_measurement_1>175)&&(analog_measurement_1<200)){
            message= "-NoDe-";
        }
        else if ((analog_measurement_1>200)&&(analog_measurement_1<225)){
            message= "-TTN- ";
        }
        else if ((analog_measurement_1>225)){
            message= "-ZEYS-";
        }
        else{
            message= "AELIOS";
        }

        rn2483_lorawan_send_packet(analog_measurement_0,message); //send number
and text message
    }
}

```

```

        if(!button_left){
            rn2483_lorawan_initialization(); //start initialization and join
        }
    }
//interrupt attached to UART receive for actuator function
void received_data()
{
    unsigned char input_character;
    while(uart.readable()) {
        input_character = uart.getc();
        if(input_character=='4') {
            input_character=uart.getc();
            if(input_character=='5') {
                input_character=uart.getc();
                if(input_character=='4') {
                    input_character=uart.getc();
                    if(input_character=='4') {
                        input_character=uart.getc();
                        if(input_character=='F') {
                            input_character=uart.getc();
                            if(input_character=='4') {
                                red_led=1; //Red Led state is off
                            }
                            else if(input_character=='5') {
                                red_led=0; //Red led state is on
                            }
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

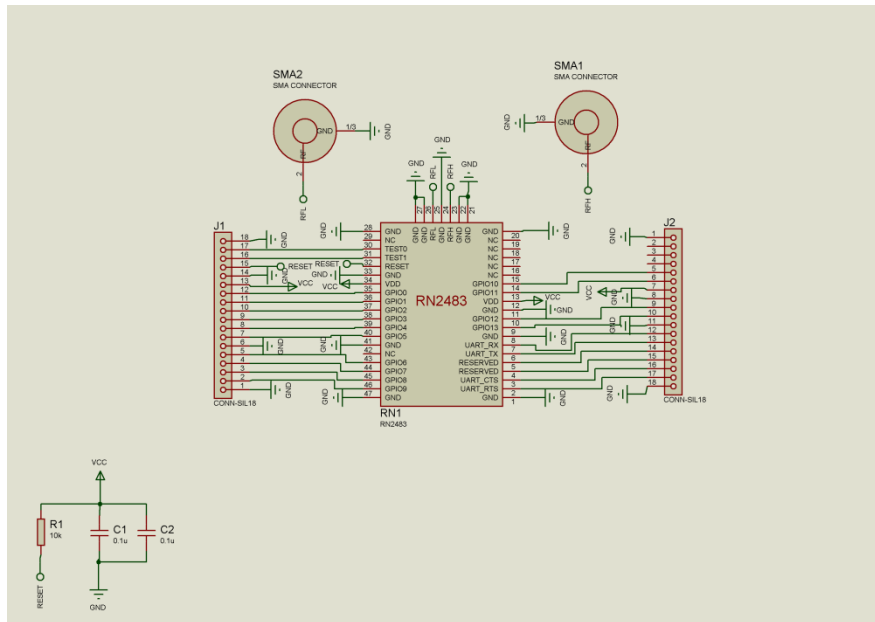
//interrupt attached to embedded button
void pressed()
{
    adc_conversion();
    rn2483_lorawan_send_packet(analog_measurement_0,"AELIOS");
}

//main function//////////////////////////////////////
int main()
{
    //system initialization procedure
    io_initialization();
    uart_initialization();
    rn2483_lorawan_initialization();
    uart.attach(&received_data,Serial::RxIrq);//uart interrupt parameters
    initialization

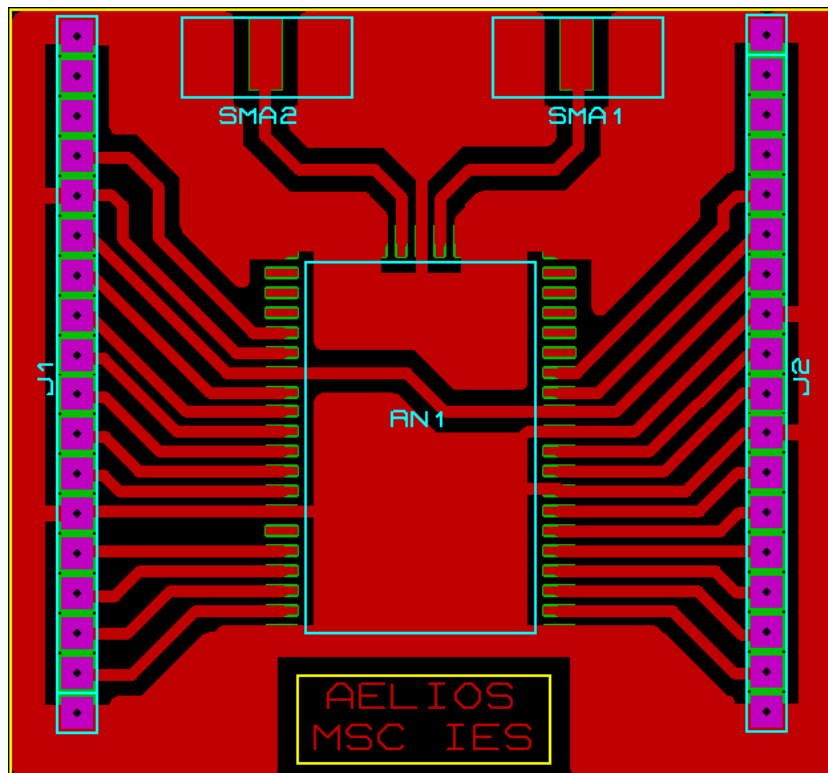
    //main loop
    while (1){
        button_check();//polling check
    }
}

```

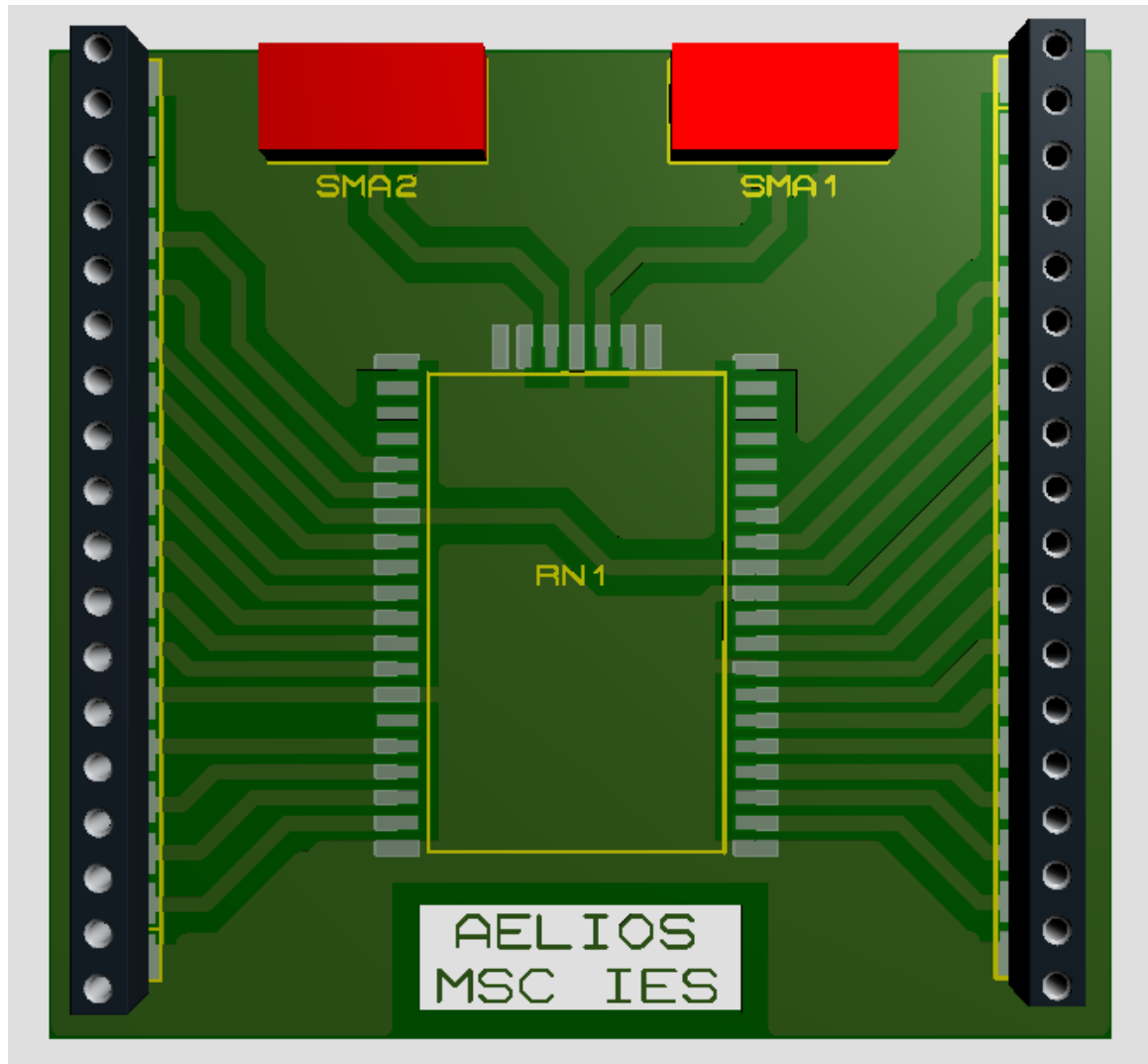
## 6.2. Σχηματικά / PCB layout για το RN2483 breakout board



Εικόνα 74: Σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας RN2483 Breakout board



**Εικόνα 75: PCB Layout της πλακέτας RN2483 Breakout board**



**Εικόνα 76: Τρισδιάστατη απεικόνιση της πλακέτας RN2483 Breakout board**



### 6.3. Λίστα υλικών / κοστολόγιο πύλης δικτύου

Λίστα υλικών και κοστολόγιο της πύλης δικτύου LoRaWAN

<b>Είδος</b>	<b>Ποσότητα</b>	<b>Κόστος τεμαχίου</b>	<b>Κόστος</b>
iC880A-SPI - LoRaWAN Concentrator 868 MHz	1	119,00 €	119,00 €
Raspberry Pi 3 Model B	1	36,20 €	36,20 €
RF Solutions Telemetry Antenna ANT-8WHIP3H- SMA	1	7,35 €	7,35 €
Raspberry Pi 3 Transparent Case	1	3,60 €	3,60 €
Cables and connectors	1	3,80 €	3,80 €
<b>Συνολικό κόστος</b>			<b>169,95 €</b>

**Πίνακας 11: Λίστα υλικών και κοστολόγιο της πύλης δικτύου LoRaWAN**

#### 6.4. Λίστα υλικών / κοστολόγιο τελικού κόμβου

Λίστα υλικών και κοστολόγιο του τελικού κόμβου LoRaWAN

Είδος	Ποσότητα	Κόστος τεμαχίου	Κόστος
NUCLEO STM32F4 STM32F401RE 512K	1	17,00 €	17,00 €
Microchip RN2483- I/RM101 3.6V LoRa Module	1	23,09 €	23,09 €
RF Solutions Telemetry Antenna ANT-8WHIP3H- SMA	1	7,35 €	7,35 €
SMA Connector PCB Edge Mount	2	1,94 €	3,88 €
Tactile push button	3	0,25 €	0,75 €
LED 5mm	3	0,05 €	0,15 €
Resistor 270R 1/4W	3	0,01 €	0,03 €
Prototyping PCB	2	2,20 €	4,40 €
Diode 1N4148	1	0,02 €	0,02 €
Potentiometer linear 22K	2	1,76 €	3,52 €
Terminal block 3p	3	0,20 €	0,60 €
Battery case 9V	1	0,20 €	0,20 €
<b>Συνολικό κόστος</b>			<b>60,99 €</b>

**Πίνακας 12: Λίστα υλικών και κοστολόγιο του τελικού κόμβου LoRaWAN**