



## UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE

Corso di Laurea in Ingegneria elettronica

Dipartimento di (DPIA) Dipartimento Politecnico di  
Ingegneria e Architettura

### Tesi di Laurea

### LORA AND IOT

Relatore:

Prof. Antonio Abramo

Laureando:

Enrico Tolotto

Correlatore:

Prof.

---

Anno Accademico 2016/2017.



## **Sommario**

La richiesta di device dotati di una connessione wireless è in continuo aumento, seguendo il trend del *Internet delle cose*(IoT). Questa continua crescita ha portato alla creazione di nuove tecnologie, le quali sono in competizione per aggiudicarsi la maggioranza del mercato. In questo campo le cosiddette (LPWAN) *Low Power Wide Area Networks* sono in forte aumento, grazie alla loro connettività a lungo raggio sfruttando bande d frequenza libere. Questa tesi si focalizzerà sulla tecnologia LoRa<sup>TM</sup>, implementata attraverso l'utilizzo del framework open-source Kura<sup>TM</sup> sviluppato da Eurotech<sup>TM</sup>.



# Note

■ Riscrivere . . . . .	5
■ Completare . . . . .	7
■ Riscrivere . . . . .	9
■ Completare . . . . .	9
■ Trovare termine per multipath . . . . .	21
■ Inserire Link . . . . .	24
■ Rivedere i vari punti e cambiare il linguaggio . . . . .	25
■ Completare . . . . .	27
■ Riguardare ultimo punto della documentazione pagina 14 . . . . .	28
■ Chiedere se il termine protocollo è appropriato . . . . .	28
■ inserire link . . . . .	29
■ Riscrivere . . . . .	31
■ Aggiunger link . . . . .	36



# Indice

<b>Indice</b>	<b>v</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>vii</b>
<b>1 IoT</b>	<b>1</b>
1.1 Big Data . . . . .	3
1.2 La diffusione dell'Internet delle cose . . . . .	3
1.3 Business . . . . .	4
1.4 La tecnologia alla base dell'IoT . . . . .	5
<b>2 LPWAN</b>	<b>7</b>
2.1 Alla base delle reti LPWAN . . . . .	7
2.2 LPWAN . . . . .	9
2.3 NB-IoT . . . . .	9
2.4 LTE-M . . . . .	11
2.5 EC-GSM-IoT . . . . .	12
2.6 Sigfox . . . . .	13
2.7 LoRaWAN . . . . .	14
2.8 Osservazioni . . . . .	14
<b>3 LoRa</b>	<b>17</b>
3.1 Narrow Band e Spread Spectrum . . . . .	17
3.1.1 Narrow Band . . . . .	18
3.1.2 Spread spectrum . . . . .	18
3.2 LoRa . . . . .	19
3.2.1 Chirp Spread Spectrum . . . . .	19
3.2.2 LoRa packet . . . . .	25
3.2.3 Chip interno . . . . .	27
3.3 LoRaWAN . . . . .	28
3.3.1 Tipologia di rete . . . . .	29

3.3.2 Tipi di devices . . . . .	30
3.3.3 Frequenze . . . . .	31
3.3.4 Sicurezza e LoRaWAN packets . . . . .	32
3.4 Adaptive Data Rate . . . . .	33
<b>4 Implementazione</b>	<b>35</b>
4.0.1 SX1301 . . . . .	35
4.0.2 ReliaGATE . . . . .	36
4.0.3 Architettura del software . . . . .	36
4.0.4 Semtech packet forwarder . . . . .	36
4.0.5 LoRa Gateway Bridge . . . . .	39
4.0.6 ESF . . . . .	39
4.0.7 Realizzazione . . . . .	39
4.0.8 Mqtt Bridge Config . . . . .	41
4.0.9 Misurazioni . . . . .	43
4.0.10 Osservazioni . . . . .	43
<b>Bibliografia</b>	<b>47</b>

# Elenco delle figure

1.1	Catena del valore dell'IoT . . . . .	2
1.2	Numero di dispositivi per anno . . . . .	4
1.3	Layer del IoT . . . . .	6
2.1	Comparazione tipologia di reti . . . . .	10
2.2	Comparazione tipologia di reti . . . . .	11
2.3	Modalità di funzionamento NB-IoT . . . . .	11
2.4	Mappa copertura SigFox . . . . .	13
2.5	Capacità delle reti LPWA . . . . .	15
2.6	Comparazione feature reti LPWAN . . . . .	15
3.1	Comparazione tra UNB e SSP . . . . .	18
3.2	Esempio di segnale Chirp nel dominio del tempo . . . . .	21
3.3	Segnale Chirp nel dominio della frequenza . . . . .	22
3.4	Comparazione simbolica dei vari SF . . . . .	23
3.5	Lora bandwidth . . . . .	24
3.6	Struttura pacchetto Lora . . . . .	26
3.7	Pacchetto codificato dal layer fisico . . . . .	26
3.8	Struttura interna ricevitore SX1301 . . . . .	27
3.9	Comparazione del modello OSI con la struttura definita in LoRaWAN . . . . .	29
3.10	Struttura rete a stella LPWAN . . . . .	29
3.11	Stack del protocollo della rete LoRaWAN . . . . .	30
3.12	Stack del protocollo della rete LoRaWAN . . . . .	32
4.1	Caratteristiche elettriche SX1301 . . . . .	37
4.2	Architettura del software . . . . .	38
4.3	Architettura del software . . . . .	40
4.4	Architettura del software . . . . .	42
4.5	Architettura del software . . . . .	43

4.6 Architettura del software . . . . .	44
4.7 Copertura Lora . . . . .	45

# **Capitolo 1**

## **IoT**

L'Internet delle cose (Internet of Things, IoT) è un paradigma riferito all'estensione di internet al mondo degli oggetti. Nel 1999 il ricercatore britannico Kevin Ashton durante una presentazione teorizzò per primo un mondo nel quale oggetti dotati di sensori, interagiscono utilizzando la rete. La continua evoluzione delle tecnologie wireless e satellitari ha permesso l'ideazione di oggetti sempre più connessi, in grado di generare una grande mole di informazioni e dati. Oltre ai computer, smartphone e tablet, sempre più oggetti di uso quotidiano dispongono di una connessione ad internet. Smartwatch e smart band, lampadine e prese elettriche "intelligenti", sono già da tempo reperibili nel mercato con un prezzo accessibile alla stragrande maggioranza dei consumatori. Data la bassa complessità del hardware implementato in questi devices, essi si servono di un server esterno per l'elaborazione dei dati. Sfruttando la connessione ad internet, gli oggetti riescono ad instaurare uno scambio di dati bidirezionale tra loro ed il server. Il dispositivo, infatti, dopo aver convertito la grandezza fisica di suo interesse in un dato comprensibile al server, invia l'informazione al server il quale, dopo un'elaborazione della stessa, formulerà dei comandi di risposta all'oggetto.

I dati sono la materia prima del mondo dell'IoT, sono essi che giocano il ruolo principale sulla catena del valore<sup>1.1</sup> (value chain) dando una svolta importante dal punto di vista economico a nuovi settori quali il *data mining* e la *business analysis*. Attraverso lo studio delle informazioni presenti, si potrà aumentare l'efficienza di un servizio oppure migliorare la user experience di una applicazione. Muovendoci verso un modo sempre più connesso, nove problematiche riguardanti la privacy e la sicurezza emergono. Molto spesso, per ridurre i costi di produzione e di sviluppo di

## The internet of Things

From connectiong devices to human value



Figura 1.1: Catena del valore dell'IoT

questi gadget tecnologici, le aziende tendo a ridurre gli investimenti nel R&D (Ricerca e Sviluppo), andando a produrre dispositivi con un software non aggiornato o con componenti hardware di bassa qualità. Per di più , il ciclo vitale di un prodotto, non sarà più determinato solo dalla rottura o dal mal funzionamento del dispositivo stesso ma, verrà ridotto dalla impossibilità di un aggiornamento del firmware. Le falte di sicurezza presenti nel software , ed il sempre più alto numero di attacchi hacker, rappresentano un grave pericolo per la sicurezza e la privacy del utente finale. È necessario quindi trovare un accordo, tra case produttrici e consumatori ,al fine di garantire una life span minima di alcuni anni per quanto riguarda gli aggiornamenti software, cercando di ridurre quello che più comunemente viene chiamato il fenomeno della obsolescenza programmata andando a fornire al consumatore una maggiore sicurezza.

## 1.1 Big Data

Oltre all'innumerabile quantità di dati che verrà prodotta da questi milioni di devices intelligenti, noi stessi, navigando il web, ne produciamo una grande quantità. Nel 2013 si è stimato che ogni secondo nel web venivano generati una quantità di dati pari a 28875GB ogni secondo. Con il termine Big Data si vuole rappresentare l'insieme di tutti i datieterogenei che ogni giorno vengono prodotti e scambiati nella rete. Con il progredire della tecnologia il dataset (aggregazione di dati) a disposizione delle aziende è in continuo aumento. Secondo un articolo pubblicato da Verizon, si stima che il 92% delle aziende usa meno del 25% dei dati raccolti e che solo la metà di esse prevede di riuscire a fare fruttare più del 25% di dati nei prossimi due anni [?]. Con "Data mining" o "Data analytics" si identificano tutte le tecniche e le metodologie finalizzate all'estrazione di sapere e conoscenza partendo da una vasta mole di dati. L'enorme disponibilità di ogni sorta di informazione è una prospettiva che apre innumerevoli scenari di ricerca; ad esempio, predire con largo anticipo i trend del mercato, permetterebbe ad una azienda di investire in maniera più efficace le proprie risorse, andando a creare un maggiore profitto. È importante però ricordare che questi vasti dataset contengono molto spesso informazioni quali indirizzi email, username ecc. È quindi essenziale che le soluzioni IoT adottino tecniche di cifratura del dato e si affidino a connessioni sicure per la comunicazione con il server, garantendo la privacy e l'anonimato del utilizzatore.

## 1.2 La diffusione dell'Internet delle cose

Nel 2008 il numero di oggetti quali personal-computer, server, telefoni cellulari, connessi ad internet ha superato il numero di persone presenti nell'intero pianeta. Il continuo sviluppo tecnologico, la sempre maggior facilità d'uso e l'abbattimento dei costi, ha reso disponibile al mondo consumer tecnologie che fino a poco tempo fa erano destinate ad un uso aziendale ed universitario. Con l'avvento dell'IoT si prevede una crescita esponenziale di devices connessi ad Internet; secondo una stima da parte di Gartner, il numero di smart device presenti nell'anno 2020, sarà superiore a 20 miliardi [1]. In previsione di una crescita così esponenziale, è d'obbligo cercare soluzioni per prevenire il congestionamento della rete. Se l'IPv6 è in grado di risolvere ampiamente il problema del-

l'indirizzamento, non è ancora stato definito uno standard per il tipo di comunicazione da adottare in questi devices.

Categoria	2016	2017	2018	2019
Consumer	3963	5244,3	7063,3	12863
Business	1418	2135,4	4152,7	6171
<i>Totale</i>	6381	8380	11196	20415

Tabella 1.1: Stima di dispositivi IoT (Milioni di unità) Gartner[1]

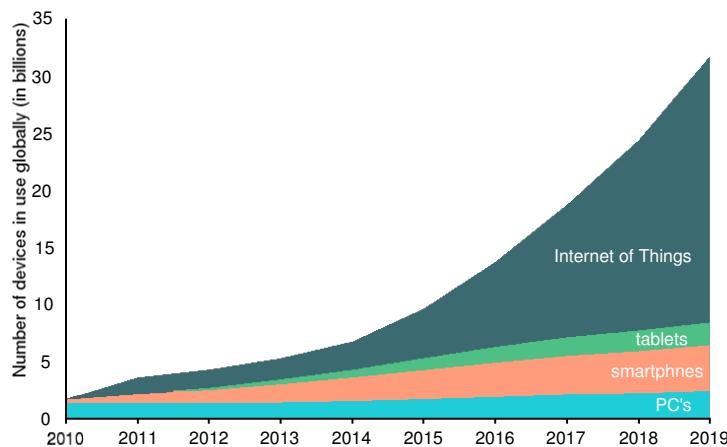


Figura 1.2: Numero di dispositivi per anno

### 1.3 Business

Considerando le statistiche precedenti immediato notare come l'IoT sia un business che agisce in maniera trasversale su tutti i settori. Se da molto tempo si parla di domotica e smart city, grazie all'abbattimento del costi del singolo device e la facile implementazione di queste nuove tecnologie, nuovi mercati e nuove possibilità di investimento sono nate. Prendiamo come esempio l'agricoltura di precisione, che grazie a sensori in grado di estrapolare dati quali l'umidità del suolo, l'indice di piovosità oppure l'umidità fogliare, e in grado di aiutare l'agricoltore a capire quando è il momento di intervenire per il trattamento delle colture. In

questo modo è possibile dispiegare le risorse in maniera più efficace, andando ad agire solo nelle culture che necessitano della lavorazione. Questo voleva essere solo un esempio della vasta rete di opportunità offerte dall'IoT. Gartner, stima che entro il 2020 la cifra investita nell'industria del IoT sarà pari a circa \$3,000,000 milioni di dollari con un investimento annuo di circa \$500,000 milioni di dollari. È utile osservare che la più grande fetta e quella riservata al mercato consumer dove smart TV, set-top box e smart cars saranno i prodotti maggiormente richiesti. [1].

## 1.4 La tecnologia alla base dell'IoT

Nell'industria il concetto di M2M (Machine to Machine) non è un concetto nuovo, già Kevin Ashton, durante la presentazione in cui introdusse il termine IoT, comprese le potenzialità della tecnologia RFID applicate alla supply chain. Dal 1999 ad oggi molte cose sono cambiate, ma molte domande non hanno ancora trovato una risposta. Come accadde agli albori di Internet, quello che manca al modo dell'IoT è una standardizzazione dei protocolli e del linguaggio con cui questi oggetti devono comunicare. Astraendoci dal problema e portandoci ad una visione di più alto livello problema, è possibile individuare in questo paradigma tre livelli.

- **Device layer** o sensor layer, è il layer più basso. Esso raggruppa tutti i gli oggetti "smart". Questo layer è quello che mette in comunicazione il mondo reale con gli altri layer superiori. A loro spetta lo scopo di convertire una misura fisica in un segnale interpretabile da altri calcolatori. La maggior parte di questi sensori, utilizzerà una connessione Bluetooth, ZigBee, Wifi o una si baserà su una rete LPWAN per comunicare il dato al layer superiore.
- **Network layer** o mediation layer raggruppa l'intera infrastruttura di rete e gateway che ricevono i dati da i vari sensori. Questo layer è semplicemente un layer di mediazione dove l'informazione (dato) non viene alterata ma semplicemente trasmesso all'Application layer.
- **Application layer** è il layer nel quale l'informazione viene immagazzinata ed elaborata. Questo layer è il più importante, e qui dove il dato viene trasformato da una semplice misurazione fisica ad una possibile revenue per l'azienda che lo gestisce.

Risrivere

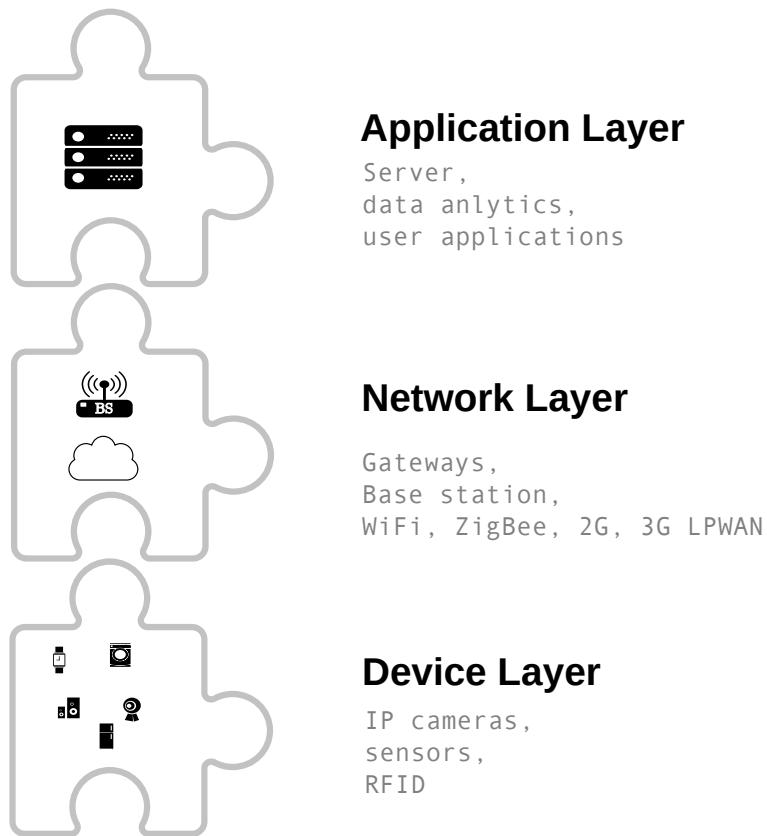


Figura 1.3: Layer del IoT

Già molte sono le aziende che si sono mosse per cercare di imporsi in questo mercato fiorente. Data la vastità dei campi di applicazione, non è semplice prevedere quale standard predominerà sugli altri. Aziende del calibro di Samsung con la piattaforma artik , Zigbee con DotDot e Google con Weave, hanno già proposto delle possibili soluzioni per il "linguaggio" universale utilizzabile dai vari dispositivi. Un dibattito ancora più acceso riguarda i protocolli e la topologia di rete da utilizzare. Dovendo superare i limiti delle tecnologie attuali, sono molteplici le problematiche che devono essere affrontate per poter offrire una architettura adattabile ai vari use-case dell'IoT. Con questa tesi si cercherà di approfondire lo stato dell'arte del network layer andando a esporre le principali tecnologie ad oggi presenti sul mercato. In particolare verrà posta l'attenzione sulla tecnologia LoRaWAN e una sua possibile implementazione all'interno del framework Kura/ESF sviluppato da Eurotech.

# **Capitolo 2**

## **LPWAN**

Data la grande varietà dei possibili scenari applicativi dell'IoT , trovare uno standard capace di adattarsi, in modo dinamico, ad ognuno di essi, non è un compito facile. Le tecnologie wireless tradizionali, non sono in grado di soddisfare la dinamicità dell'IoT. Già diverse soluzioni sono nate per cercare di fronteggiare questi problemi, optando per metodi risolutivi anche molto distanti l'uno dall'altro. Con questo capitolo si approfondiranno le problematiche, che i nuovi standard, riguardanti il network layer, dovranno essere in grado di risolvere.

### **2.1 Alla base delle reti LPWAN**

Le tecnologie wireless com ZigBee, WiFi, non sono ideate per connettere devices alimentati a batteria distribuiti in una vasta area geografica. Il range di queste tecnologie è limitato a poche centinaia di metri al massimo. Tutto ciò implica che i devices, non possono essere implementati in tutti gli ambienti, ma solo in uno spazio ristretto alla portata del segnale del gateway. Quindi scenari quali la sicurezza sanitaria, agricoltura di precisione, logistica ecc. Non permette l'utilizzo di questa tecnologia. La grande copertura offerta dalle tecnologie cellulari è la ragione per la quale è ad oggi la tecnologia più utilizzata nelle comunicazioni M2M. Tuttavia, il continuo progresso tecnologico, sta portando l'abbandono della rete GSM da parte degli operatori telefonici, per poter riutilizzare le bande da essa occupata con tecnologie nuove. In generale, la tecnologia cellulare non garantisce una durata della batteria molto prolungata ed inoltre il costo complessivo dei moduli cellulari è molto elevato, data la complessità delle forme d'onda .

[Completere](#)

Dovendo ingegnerizzare il network layer, è importante capire quali sono le principali problematiche che le tecnologie attuali non sono in grado di colmare.

- *Indirizzabilità*: a causa dell'elevato numero di oggetti che entrano in gioco in IoT, la capacità di indirizzamento di IPv4 non è più sufficiente. IPv4 usa 32 bit per gli indirizzi, quindi ce ne possono essere massimo  $2^{32}$  diversi. Il passaggio a IPv6 risolverà il problema, in quanto si passerà da 32 bit a 128 bit per gli indirizzi.
- *Scalabilità*: Dato l'elevato numero di devices previsti nei scenari urbani ed industriali, la network technology alla base della rete dovrà essere adattabile, in modo dinamico, al carico di dispositivi connessi.
- *"Arrive and operate"*: dispositivi mobili eventualmente aggiunti dopo la formazione iniziale del sistema, non devono aver bisogno di configurazione, ma devono essere in grado di stabilire connessioni autonomamente con gli altri oggetti già presenti.
- *Costo unitario*: Il costo del end device, dovrà essere conveniente per garantire la più ampia fetta di mercato.
- *Fonti di energia*: Gli oggetti nella maggior parte dei casi sono mobili, quindi non hanno sempre la possibilità di essere collegati a una fonte di energia. Le batterie inoltre sono pesanti e grandi. È necessario quindi andare a ridurre la quantità di energia richiesta dagli oggetti, andando ad aumentare il tempo di deep-sleep .
- *Interoperabilità*: gli oggetti sono di natura diversa (per esempio possono avere requisiti di larghezza di banda diversi, o hardware diverso). Questo implica la necessità di standard, in modo che oggetti di tipo diverso possano comunicare tra loro
- *Costo computazionale*: La modulazione, alla base di queste nuove tipologie di rete, dovrà essere concepita in modo da non richiedere un costo computazionale elevato .
- *Raggio d'azione*: La necessità di utilizzare questi devices in ambienti difficili o rurali, rende necessario l'utilizzo di tecnologie wireless con un raggio di azione dell'ordine di una decina di chilometri.

- *Sicurezza:* Lo scambio dei dati dovrà avvenire in maniera sicura, implementando algoritmi di cifratura dei dati o procedure di handshaking.
- *Tolleranza ai guasti:* Il mal funzionamento o il guasto di un nodo della rete, non dovrà compromettere il funzionamento dell'intera rete a lui connessa.

## 2.2 LPWAN

Per colmare il gap tra tecnologie esistenti e la necessità di connettere milioni di devices diversi, sono nate le LPWAN *Low power wide area network*. Le reti LPWAN rappresentano un modello di comunicazione innovativo, che integra le tecnologie cellulari tradizionali e quelle a corto raggio per affrontare diverse esigenze delle applicazioni IoT. Le reti LPWA, andando a sacrificare il massimo throughput dei devices, ne sono in grado di gestire un gran numero contemporaneamente, cosa che con le tecnologie wireless tradizionali non è possibile realizzare.

Risrivere

In questo contesto, i maggiori competitor sono NB-IoT, EC-GSM-IoT LTE-M, SigFox e Lora. Le prime tre sono una evoluzione delle precedenti reti cellulari 2G, 3G e 4G. Operando su bande di frequenza licenziate, è necessario che ognuna di queste tecnologie sia approvata dalla 3GPP (3rd Generation Partnership Project), la quale si occupa della standardizzazione dei sistemi di telecomunicazione a livello internazionale. All'opposto, Sigfox e Lora sono due tecnologie che operano sulle frequenze ISM (Industrial, Scientific and Medical). Le frequenze ISM sono uno spettro radio riservato alle applicazioni di radiocomunicazione non commerciali.

In particolare entrambe le tecnologie operano nella banda degli 868[MHz] la quale permette una potenza del segnale inviato massima pari a 14[dbm] ed un duty cycle inferiore al 1%.

Completare

## 2.3 NB-IoT

Narrowband IoT (NB-IoT) o LTE Cat NB1 è uno standard certificato nella release 13 del 3GPP, la quale riutilizza le infrastrutture già presenti, quali 2G, 3G, 4G per la rapida realizzazione di una rete LPWA per l'IoT. Focalizzandosi sulla durata della batteria, i moduli NB-IoT risultano avere un

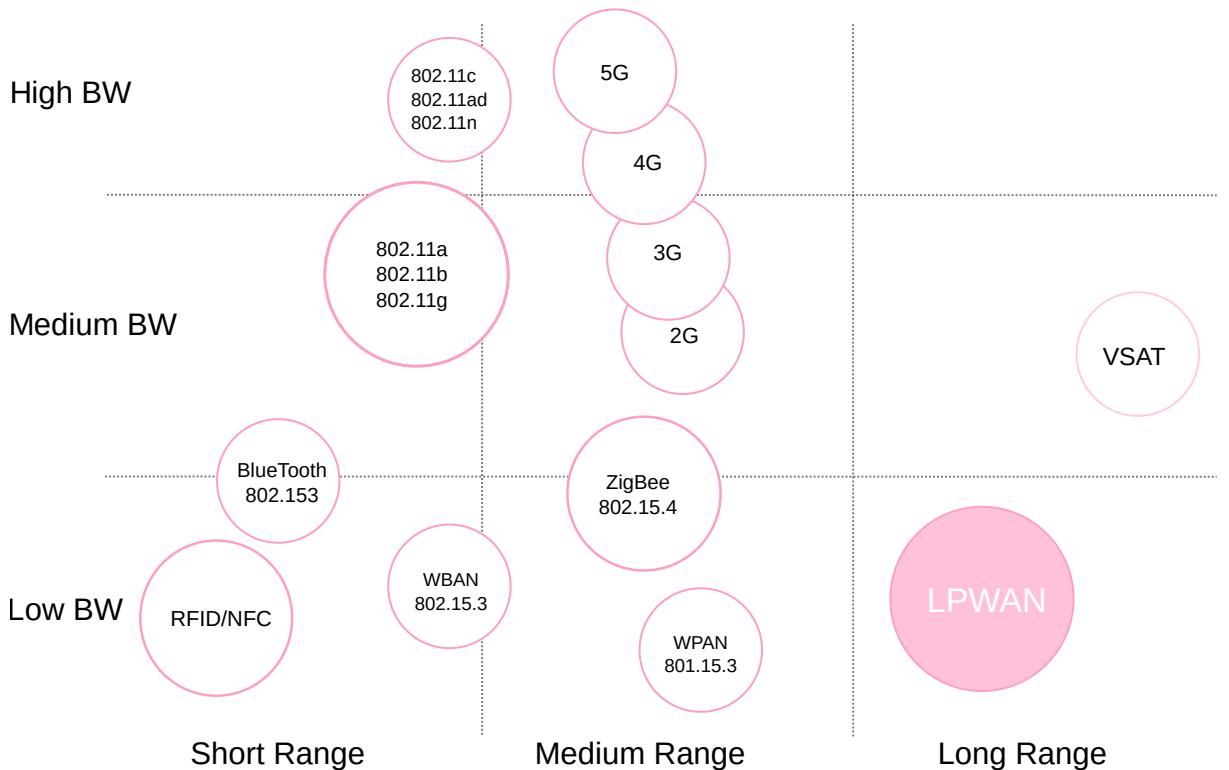


Figura 2.1: Comparazione tipologia di reti

costo all’unità minore del 75% rispetto ad un normale modulo LTE. Basato su frequenze licenziate, NB-IoT è in grado di offrire tre diversi scenari di sviluppo [2]

- *standalone*, utilizzando qualsiasi spettro disponibile del operatore.
- *guard band*, utilizzando lo spettro libero presente tra due bande radio, per prevenire interferenze.
- *in band*, utilizzando lo stesso spettro della banda LTE.

L’obiettivo che NB-IoT si prefigge è quello di mettere a disposizione una tecnologia con una elevata copertura ed un basso data-rate. La possibilità di riutilizzare strutture già esistenti, ed il basso costo per device , rende NB-IoT, una delle tecnologie che sta riscuotendo maggiore successo nel abito IoT.

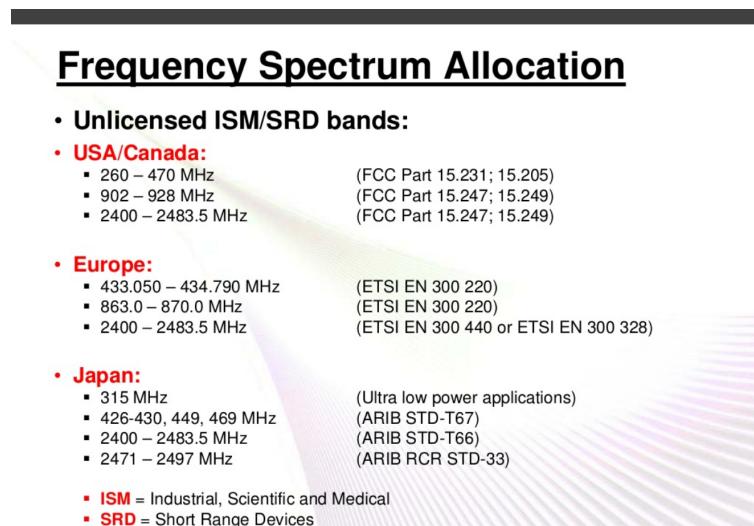


Figura 2.2: Comparazione tipologia di reti

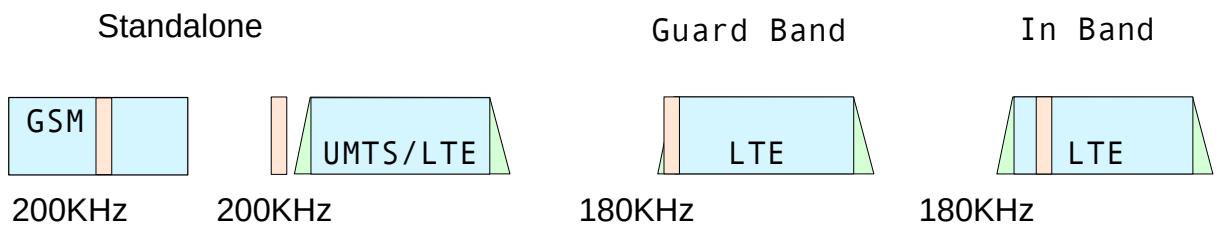


Figura 2.3: Modalità di funzionamento NB-IoT

## 2.4 LTE-M

Dalla realise 8 del 3GPP, diverse nuove tipologie di rete LTE sono disponibili. La categoria che offre le migliori performance batteria/data-rate è la categoria LTE Cat-M1 o LTE-M. LTE-M a differenza del NB-IoT, rispecchia LTE in pieno, quindi implementa due moduli di ricezione, è full duplex supportando la Frequency Division Multiplexing (FDM) e Time Division Multiplexing (TDM). Risultando adatto per applicazioni con esigenze diverse da quelle del NB-IoT, è in grado di raggiunger i 5Mbps in uplink e 10[Mbps] in downlink teorici. Questo tipo di connessione sarà utile per tutte quelle applicazioni in cui è richiesta una elevata sicurezza del dato da trasmettere, come ad esempio applicazioni di video-sorveglianza o automotive .Questa tecnologia ,già disponibile negli Stati Uniti tramite la rete Verizon, è in fase di roll out per molti operatori europei.

## 2.5 EC-GSM-IoT

EC-GSM-IoT si basa su funzionalità aggiuntive a partire da EGPRS che consentono ad una rete GSM/EDGE di essere predisposta per fornire servizi IoT. Lo standard è stato pensato in particolare per quei Paesi, come quelli in via di sviluppo, dove una rete LTE non è ancora disponibile. L'occupazione spettrale di ogni canale corrisponde a 200 kHz. Tuttavia, al fine di dispiegare EC-GSM-IoT, si richiede una banda utile di 2.4 MHz per permettere il frequency hopping, che, con l'aggiunta di 2 canali di guardia di 200 kHz ciascuno agli estremi della banda, porta l'occupazione di banda complessiva a 2.8 MHz. La potenza di trasmissione del Il data rate di picco raggiungibile sia in DL sia in UL è di 491 kbps, mentre il valore mediato nominale è di 98 kbps sia in DL sia in UL. Al fine di soddisfare i requisiti di capacità (più di 50.000 terminali in ogni singolo settore di una cella trisetoriale).

La figura 2.1 riassume in breve le varie caratteristiche delle reti cellulari facenti parte della categoria LPWA

	LTE-M	NB-IoT	EC-GSM-IoT
Dispiegamento	In-band LTE	In-band LTE, Guard-band LTE, Stand-alone	In-band GSM
Copertura radioelettrica	155.7 dB (20 dBm)	164 dB (23 dBm)	154 dB (23 dBm) 164 dB (33 dBm)
Canalizzazione	1.08 MHz	180 KHz	200 kHz
Banda minima richiesta	1.4 MHz	180 kHz (In-band LTE, Guard-band LTE) 200 kHz (Stand-alone)	2.4 MHz (con servizi voce GSM) 600kHz (senza servizi voce GSM)
Duplexing	HD-FDD, FD-FDD, TDD	HD-FDD	HD-FDD
Data rate di picco	HD-FDD e FD-FDD 1 Mbps DL HD-FDD e FD-FDD 1 Mbps UL	In-band LTE 170 kbps DL Stand-alone 226.7 kbps DL 250 kbps UL	491 kbps DL 491 kbps UL
Data rate mediati nominali	FD-FDD 800 kbps DL FD-FDD 1 Mbps UL HD-FDD 300 kbps DL HD-FDD 375 kbps UL	21.25 kbps DL 62.5 kbps UL	98 kbps DL 98 kbps UL
Classi di potenza dei terminali	20 dBm / 23 dBm	20 dBm / 23 dBm	23 dBm / 33 dBm

Tabella 2.1: Comparazione reti cellulari per l'IoT

## 2.6 Sigfox

SigFox, azienda francese, sta sviluppando in partnership con altri operatori di rete una soluzione LPWAN basata sulla sua tecnologia. Sigfox punta alla costruzione di una rete mondiale proprietaria basata su frequenze ISM. Correntemente SigFox è presente in Francia, Belgio, Olanda e Portogallo come illustrato nella figura 2.4.

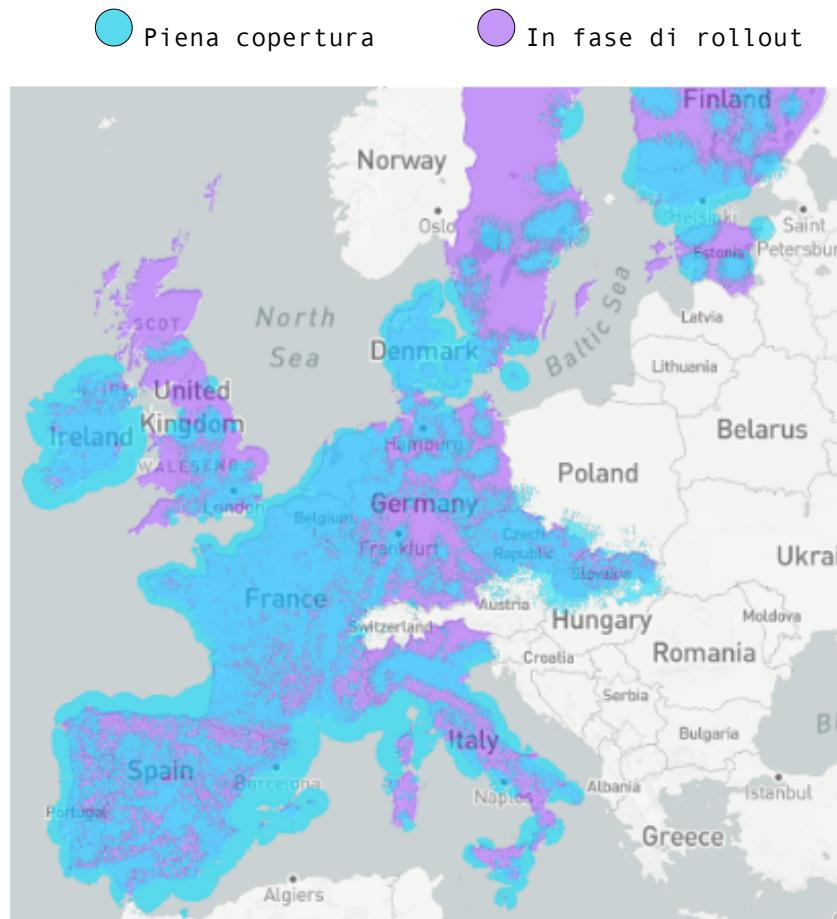


Figura 2.4: Mappa copertura SigFox

Gli end-devices comunicano con le varie base stations usando una modulazione (BPSK) *Binary Phase Shift Keying* con una banda di soli 100[Hz]. Per via delle regolazioni vigenti nello spettro ISM, è per garantire una durata della batteria pari ad una decina di anni, il numero massimo di messaggi inviabili in un giorno è 140, con lunghezza del payload pari a 12[byte] e un throughput pari a 100[bps]. SigFox si collo-

ca come rete LPWAN con il minore throughput, limitando il numero di use-case possibili. Inizialmente SigFox supportava solo comunicazioni unidirezionali, successivamente, ha introdotto la possibilità di avere una comunicazione bidirezionale, limitando il numero di byte trasmissibili da gateway a devices a 4-8 bytes per giorno.

## 2.7 LoRaWAN

*LoraWAN* è una tecnologia di modulazione wireless semi-proprietaria sviluppata da Semtech. Essa è composta da un layer fisico ,proprietario, che prende il nome di *Lora*[3] , e una parte libera chiamata LoRaWAN[4] nella quale viene definito un protocollo di comunicazione, il quale usa LoRa come layer fisico. Basandosi su una tecnica di comunicazione a *spread spectrum*, LoRa è in grado di instaurare una comunicazione bidirezionale tra device e gateway. I punti chiave dei questa tecnologia, sono il grande raggio di copertura , il basso consumo energetico e la capacità di adattare in maniera dinamica il data rate, il quale può variare dai 0.3 ai 50[Kbps] a seconda dell'utilizzo. Come per SigFox, la tecnologia sviluppata da Semtech, si basa sulle bande ISM, inoltre Essendo il protocollo LoRaWAN open source, si ha la possibilità di creare delle reti pubbliche o private senza disporre di alcuna licenza, riducendo così il time to market di questa tecnologia. Progetti come The Things Network mirano a creare una rete LoRa ,pubblica è privata, a livello globale.

## 2.8 Osservazioni

In questo mercato frammentato, non è semplice capire quale tecnologia sia adatta a ricoprire una data applicazione. Essendo questi standard molto giovani, è difficile comprendere le reali potenzialità di ognuna di queste soluzioni. Quello che è possibile prevedere, sarà un incremento esponenziale di device che stanno alla base della piramide in figura 2.5, devices i quali potranno essere utilizzati in innumerevoli settori, non ancora esplorati dalle tecnologie attuali, come per esempio i contatori della dell'acqua, applicazioni per l'agricoltura di precisione ecc.

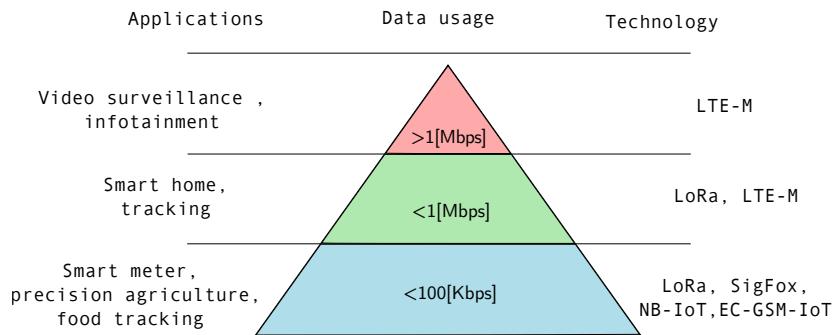


Figura 2.5: Capacità delle reti LPWA

Per le aziende, che si apprestano ad investire sul mondo dell'IoT, la scelta della corretta tecnologia su cui andare a sviluppare i loro servizi non risulta semplice, in quanto, fattori quali sicurezza, aggiornamenti software, affidabilità devono essere ancora testate a pieno. Con la figura 2.6 si vuole riassumere in breve i punti chiave delle tecnologie appena trattate.



Figura 2.6: Comparazione feature reti LPWAN

Nel prossimo capitolo verrà analizzata in dettaglio la soluzione che

Semtech propone, approfondendo il layer fisico *Lora* e la struttura del protocollo LoRaWAN.

# **Capitolo 3**

## **LoRa**

Ideata dalla francese Semtech, LoRa è una tecnologia in grado di offrire un mix tra basso consumo e lunga distanza per le comunicazioni radio. Basata su frequenze ISM ed un protocollo open source, LoRa è già la base funzionale di moltissime reti pubbliche e private. Data la natura open source del protocollo che implementa e la facile reperibilità dei moduli radio, LoRa ha già un grande seguito e una community in rete. Con questo capitolo si intende analizzare in dettaglio il funzionamento del layer fisico alla base della modulazione LoRa e il protocollo LoRaWAN costruito a partire da esso.

### **3.1 Narrow Band e Spread Spectrum**

Il successo delle tecnologie LPWAN risiede nella loro abilità di offrire una connessione a bassa potenza per un grande numero di devices distribuiti in una vasta area geografica. Per capire il funzionamento alla base del layer fisico LoRa, è necessario comprendere il tipo di modulazione utilizzata e i vantaggi che ne derivano. Le principali tecniche di modulazione utilizzate dalle reti LPWAN sono state ideate in modo da offrire un bilancio di collegamento (link budget) pari a  $150 \pm 10$ [dB], il quale garantisce un range di operatività pari ad una decina di chilometri. Sfruttando data rate bassi, le tecniche di modulazione usate nelle reti LPWAN, sono in grado di concentrare più energia in ogni simbolo trasmesso. In questo modo i gateways sono in grado di decodificare segnali con una attenuazione pari o superiore ai -110[dBm]. Per ottenere questi risultati è possibile utilizzare due tipi di modulazione, una modulazione *Narrow Band* oppure una modulazione *Spread Spectrum*.

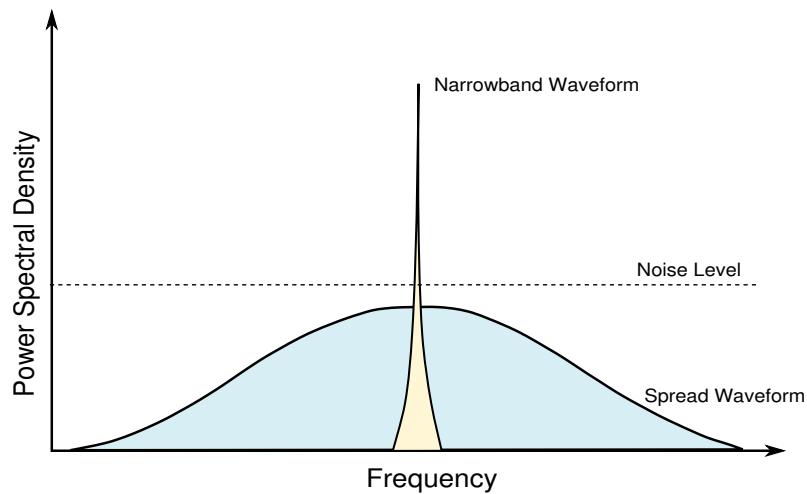


Figura 3.1: Comparazione tra UNB e SSP

### 3.1.1 Narrow Band

La modulazione narrowband è in grado di offrire il link budget desiderato, andando a codificare il segnale in una banda molto ristretta ( $\approx 25[\text{KHz}]$ ). Assegnando ad ogni frequenza portante una banda molto ristretta, la NB è in grado di utilizzare l'intero spettro in maniera efficace e al contempo stesso ridurre il rumore al interno del canale. Oltre a questi due vantaggi, il basso livello di rumore facilita la demodulazione da parte del gateway, rendendo i moduli radio semplici e poco costosi. Per aumentare la capacità di ricezione del singolo gateway e diminuire di molto la complessità dei moduli radio, SigFox e altre tecnologie estremizzano il concetto di narrowband andando ad utilizzare quella che viene chiamata *Ultra Narrow Band*, andando così ad assegnare ad ogni portante una banda di appena  $100[\text{Hz}]$ . Inequivocabilmente, soluzioni così estreme portano con se dei compromessi quali un data rate dei dispositivi molto basso, il tempo di trasmissione del segnale aumenta, costringendo il trasmettitore a rimanere acceso per più tempo.

### 3.1.2 Spread spectrum

Come dice il nome di Spread spectrum si intende una modulazione in grado di distribuire un segnale con una data larghezza di banda, il quale viene volutamente "diffuso" + in un banda di frequenze maggiore di quel-

la iniziale. Come risultato otteniamo una trasmissione che incorpora più rumore di una trasmissione NB, riuscendo però ad essere molto più resistente alle interferenze naturali, al rumore e agli attacchi basati sul jamming. Per la natura rumorosa del segnale, il ricevitore dovrà compiere uno sforzo maggiore per la decodifica dello stesso, il quale molto spesso sarà ricevuto con un livello di rumore maggiore di quello intrinseco. Per ottimizzare l'uso dello spettro, è possibile inviare segnali codificati con frequenze ortogonali, in questo modo è possibile decodificare in maniera concorrente segnali diversi, andando ad aumentare la capacità della rete. La modulazione LoRa utilizza una variante di questa modulazione che prende il nome di Chirp Spread Spectrum (CSS).

## 3.2 LoRa

Ideata dalla francese Semtech, LoRa è una tecnologia in grado di offrire un mix tra basso consumo e lunga distanza per le comunicazioni radio. Basata su frequenze ISM ed un protocollo open source, LoRa è già la base funzionale di moltissime reti pubbliche e private. Data la natura open source del protocollo che implementa e la facile reperibilità dei moduli radio, LoRa ha già un grande seguito e una community in rete. Con questo capitolo si intende analizzare in dettaglio il funzionamento del layer fisico alla base della modulazione LoRa e il protocollo LoRaWAN costruito a partire da esso.

### 3.2.1 Chirp Spread Spectrum

CSS o Chirp Spread Spectrum è la modulazione alla base del layer fisico LoRa. Con Chirp (Compressed High Intensity Radar Pulse) si intende un segnale di ampiezza costante, il quale incrementa o decrementa la sua frequenza nel tempo. Parliamo quindi di *UpChirp* nel caso di un aumento di frequenza e di *DownChirp* nel caso di un decremento. L'utilizzo di segnali di tipo Chirp non è nuovo nel campo delle telecomunicazioni; infatti, questa tecnica di compressione del segnale, è molto utilizzata in applicazioni radar o sonar poiché tramite essa è possibile aumentare il range di risoluzione spaziale e il rapporto segnale rumore. Il più generico segnale chirp può essere rappresentato da una sinusoide che come argomento ha una funzione  $\theta(t)$  che varia in funzione del tempo.

$$s(t) = A \cos(\theta(t)) \quad (3.1)$$

Andando ora a derivare la funzione  $\theta(t)$  nel tempo, possiamo definire due nuovi parametri, la frequenza istantanea  $\gamma(t)$  3.2 ed un parametro che chiameremo chirpizzazione istantanea  $c(t)$  3.3.

$$\gamma(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (3.2)$$

$$c(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = \frac{d\gamma(t)}{dt} \quad (3.3)$$

A seconda di come viene scelta la funzione  $\theta(t)$  il segnale avrà andamenti diversi nel dominio del tempo; per semplificare la modulazione e demodulazione del segnale LoRa utilizza una variazione lineare dell'argomento  $\theta(t)$ . Il modo più semplice per costruire la funzione arbitraria  $\theta(t)$  è partire costruendo  $\gamma(t)$  come una funzione lineare di del tempo e  $c(t)$  costante. Per cercare una funzione  $\theta(t)$  che rispecchi questo andamento Una possibile scelta di  $\gamma$  è

$$\gamma(t) = \frac{k}{2}t + f_i \quad (3.4)$$

Dove  $f_i$  rappresenta la frequenza iniziale del segnale e  $k$  è la chirpizzazione "discreta" la quale non dipende più dal tempo ma è definita come 3.5 dove  $f_e$  è la frequenza di finale,  $f_i$  è la frequenza iniziale e  $T$  è il tempo impiegato dal segnale per passare da  $f_i$  a  $f_e$ .

$$k = \frac{f_e - f_i}{T} \quad (3.5)$$

Ricapitolando, il segnale  $s(t)$  sarà uguale a

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(\theta(t)) = A \cos \left( 2\pi t \left( \frac{k}{2}t + f_i \right) + \varphi \right) \\ &= A \cos \left( 2\pi \frac{k}{2}t^2 + 2\pi f_0 t \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Dall'ultima equazione si possono fare alcune osservazioni,

- Se la chirpizzazione è nulla la frequenza non varia in funzione del tempo, quindi  $s(t)$  rappresenta una normale sinusoida.
- Se  $\theta(t)$  è lineare, la frequenza è costante.
- Se  $\theta(t)$  dipende in modo quadratico dal tempo, allora la frequenza varia in modo lineare.

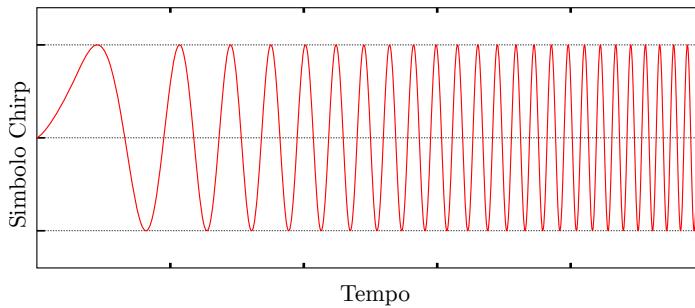


Figura 3.2: Esempio di segnale Chirp nel dominio del tempo

Per aumentare l'efficienza delle trasmissioni, LoRa, utilizza i segnali Chirp in combinazione ad una modulazione Spread Spectrum. Con questo si intende che, data una banda  $B = [f_0, f_1]$ , il segnale Chirp inviato dai dispositivi LoRa sarà distribuito in tutta la banda  $B$ . Nel caso in cui il segnale , aumentando linearmente la sua frequenza, arrivi all'istante  $t_c$  ad uno degli estremi della banda  $f_0, f_1$ , non potendo continuare o diminuire la sua frequenza, è costretto all'istante  $t_{c+1}$  a ripartire dalla frequenza opposta a quella dell'estremo raggiunto. È possibile osservare questo fenomeno in \*. Utilizzando una modulazione Spread Spectrum in combinazione con i segnali di tipo Chirp, sono ottenibili numerosi vantaggi.

- Uno spettro idealmente rettangolare, il quale utilizza tutta la capacità del canale e fornisce un ottima densità spettrale di potenza rispetto agli altri tipi di trasmissione.
- *Segnali di tipo Chirp* possono essere sovrapposti in modo tale da poter variare il data-rate e l'energia per bit in modo adattativo per aumentare l'efficienza complessiva.
- *Hanno guadagno programmabile*, il quale permette di raggiungere distanze considerevoli mantenendo un buon SNR .
- *Ottima risoluzione nel asse del tempo*, quindi ottimi per coprire lunghe distanze.
- *Immuni al effetto Doppler*
- *Immuni alle degenerazioni per effetto di multipath*

Trovare termine per multipath

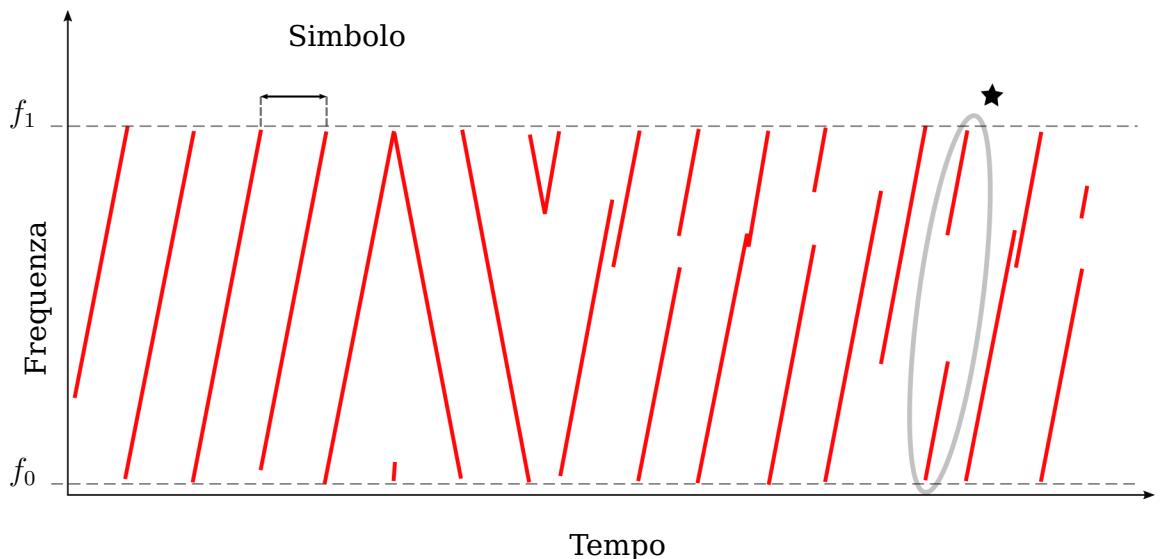


Figura 3.3: Segnale Chirp nel dominio della frequenza

Uno degli aspetti peculiari del layer fisico, è la possibilità di andare a variare un parametro che prende il nome di Spread Factor ,in modo dinamico ,per massimizzare l'efficienza della comunicazione. Lo Spread Factor è l'indice di quanti bit sono utilizzati in un segnale Chirp per rappresentazione di un simbolo; questo vuol dire che, preso uno SF pari a  $X$ , il segnale utilizzerà  $2^X$  bit per rappresentare il simbolo a lui associato. Variando il SF variano anche le possibili frequenze iniziali del segnale; infatti, ogni segnale avrà  $M = 2^X$  frequenze iniziali possibili. Nella documentazione tecnica fornita da Semtech troviamo 6 possibili Spread Factor partendo dal 7SF fino ad arrivare al 12SF, ad ognuno di essi è associato un rapporto segnale rumore, che sarà più elevato per SF maggiori 3.1.

SF	SNR
7	-7.5[dB]
8	-10[dB]
9	-12.5[dB]
10	-15[dB]
11	-17.5[dB]
12	-20[dB]

Tabella 3.1: Rapporto segnale rumore dei diversi Spreading Factors

In combinazione allo Spreading Factor LoRa utilizza differenti lunghezze di banda per codificare i segnali. Le possibili lunghezze di banda variano in base al modello di trasmettitore utilizzato. Nel modello SX1272 è possibile utilizzare tre lunghezze di banda diverse, 125[KHz], 250[KHz] e 500[KHz] ed è ottimizzato per lavorare nelle frequenze che vanno dagli 850[MHz] fino a 1[GHz]. Il modello più recente, SX1276, ha la possibilità di variare la banda partendo da 7.8[KHz] fino a 500[KHz], offre una maggiore sensitività in ricezione rispetto al suo predecessore ed è ottimizzato per funzionare nelle bande degli 150[MHz] 433[MHz] e 850[MHz]-1[GHz]. Ponendoci ora nel caso in cui la banda utilizzata nella comunicazione sia fissata a priori, una variazione dello Spread Spectrum comporterà la necessità utilizzare il doppio del tempo per inviare il simbolo 3.4.

$$T_s = \frac{2^X}{B}. \quad (3.7)$$

Nella formula 3.7  $T_s$  rappresenta il tempo necessario per l'invio del simbolo,  $X$  lo Spreading Factor usato e  $B$  la banda. Analogamente è possibile andare un incremento della banda  $B$  comporterà un incremento della velocità con cui i segnali chirp vengono trasmessi ottenendo quindi un aumento del bit rate .

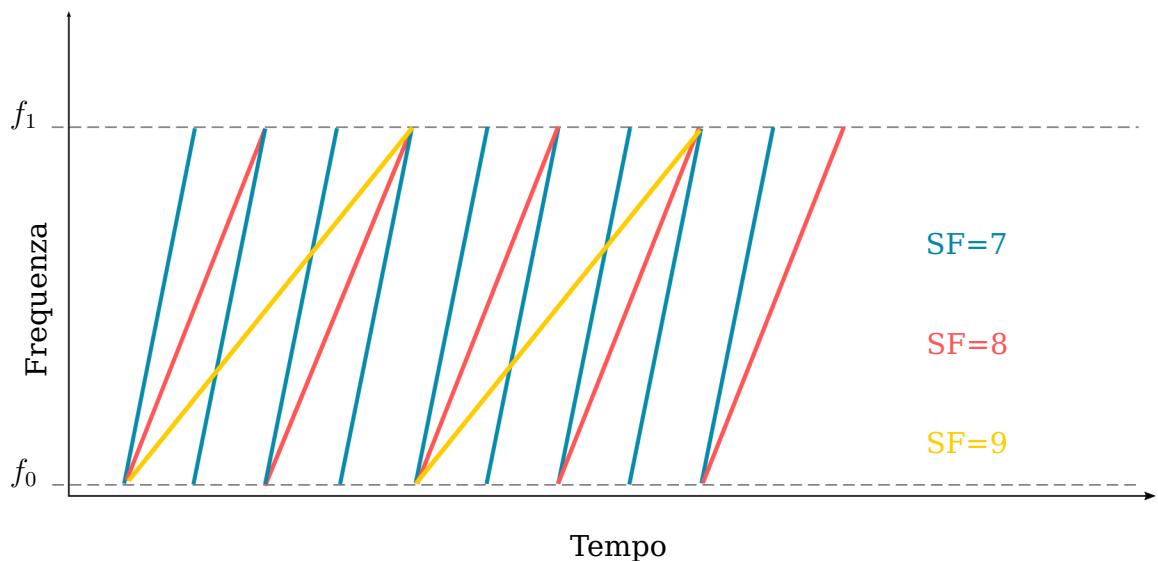


Figura 3.4: Comparazione simbolica dei vari SF

Un aumento del tempo impiegato per la trasmissione di un simbolo permette al messaggio di essere più robusto alle interferenze e al rumore, è importante però ricordare che aumentando il Spread Factor anche il numero di simboli codificabili nel segnale aumenterà rendendo critica la decodifica del segnale quando si è in presenza di bassi data rate. Per questo motivo è necessario scegliere il SF in maniera efficace. Semtech fornisce nella documentazione ufficiale una formula per il calcolo empirico dello Spreading Factor

Inserire Link

$$S = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR \quad (3.8)$$

Dove il primo termine è dovuto al rumore termico alla temperatura ambiente nella banda di 1[Hz],  $NF$  è il rumore intrinseco del ricevitore, il quale è un parametro che varia a seconda dell'hardware utilizzato e  $SNR$  è il valore del rapporto segnale rumore utilizzato in base alla tabella 3.1

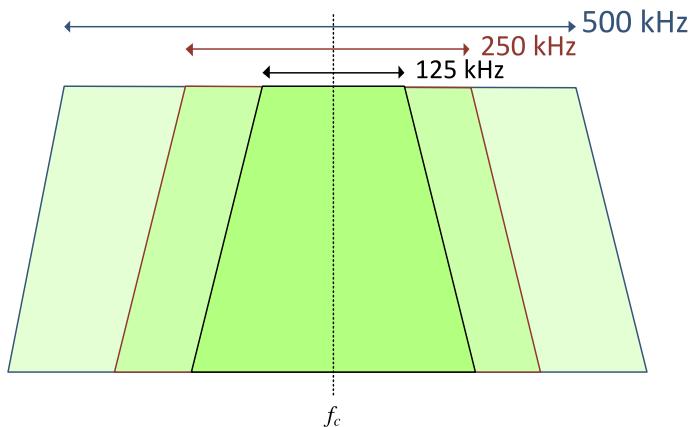


Figura 3.5: Lora bandwidth

Questa nuovo modo di trasmettere i vari dati porta con se molti vantaggi.

- La modulazione Lora è semplice da implementare nei dispositivi, quindi i moduli radio al loro interno saranno economici.
- Resistente alle interferenze in banda e fuori banda.
- Resistente all'effetto Doppler, in questo modo è possibili utilizzare cristalli non molto accurati al interno dei devices, in modo tale da abbattere i costi di produzione.

- Il modulo di ricezione è altrettanto semplice da costruire, quindi non molto costoso.

Rivedere i vari punti e cambiare il linguaggio

### 3.2.2 LoRa packet

Per ottimizzare la durata della batteria dei dispositivi, è necessario che il devices rimanga in deep-sleep per la maggior parte del tempo. Inoltre per utilizzare le risorse in maniera più efficace, una comunicazione LoRa è priva di handshake e ACK. Queste scelte hanno portato all'implementazione di quello che può essere chiamato pacchetto del layer fisico 3.6. Ogni pacchetto inviato è composto da:

- *Preamble* data la scelta del non utilizzo di tecniche di handshaking e ACK, è necessario che il ricevitore sia in grado di sincronizzarsi con il messaggio inviato dal dispositivo. Per questo motivo la parte iniziale di ogni messaggio è composta da una serie di simboli byte utili alla sincronizzazione. La lunghezza prestabilita è di 12 simboli.
- *Header e CRC* l'header contiene le informazioni riguardanti il payload quali , la sua lunghezza , il code rate utilizzato nel payload e la presenza o meno del CRC. Da specifica, l'header ha sempre un code-rate pari a 4/8 che rappresenta la massima rindondanza con correlato CRC.
- *Payload* il quale può essere di lunghezza variabile fino ad un massimo di 255[byte].
- *Payload CRC*

In caso di specifiche stringenti, è possibile far operare i moduli LoRa in modalità *implicita*. In questa modalità, il pacchetto non utilizza l'header; per garantire il corretto funzionamento e dunque necessario che il payload sia di lunghezza fissata e nota al gateway al quale il messaggio è indirizzato. Osservando l'immagine 3.7 è facile notare come è strutturato un pacchetto "fisico". La prima parte della trasmissione, nonché il preamble stesso è codificato con una serie di *up-chirp*. In questo modo il gateway riesce a sintonizzarsi sulla stessa frequenza del dispositivo trasmittente. Successivamente vengono inviati una serie di *down-chirp*

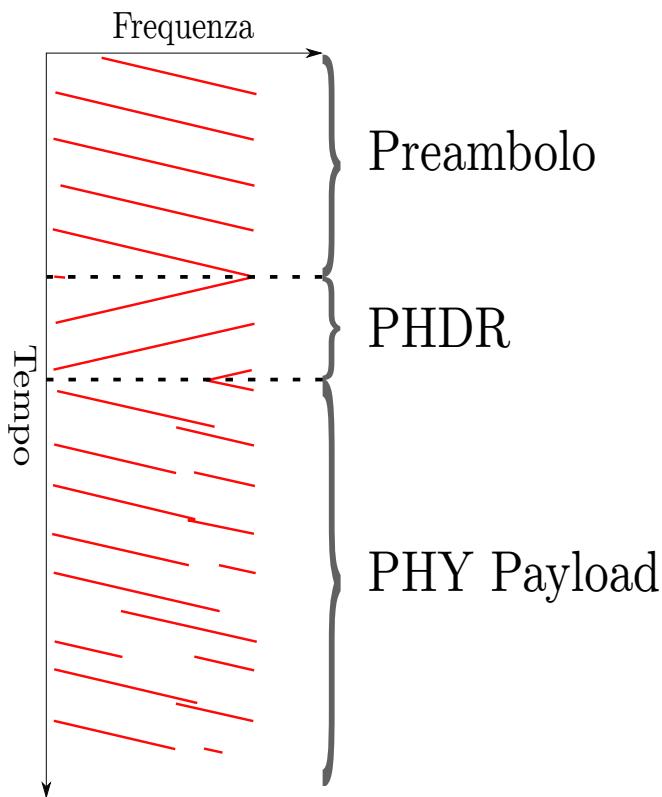


Figura 3.6: Struttura pacchetto Lora

i quali rappresentano l'header codificato dal layer fisico, dove sono presenti dei bit di controllo e correzione degli errori. L'ultima parte rappresenta il payload, in questa parte, formata solo da *UpChirp* i dati vengono codificati tramite un cambiamento istantaneo della frequenza. Oltre al-



Figura 3.7: Pacchetto codificato dal layer fisico

la modulazione, LoRa specifica delle operazioni di codifica che vengono fatte prima che il segnale venga modulato.

- **Data whitening** è una tecnica utilizzata per ridurre la probabilità di avere lunghe sequenze di 1 e 0. Oltre a semplificare la decodifica, il data whitening aiuta a distribuire l'informazione in tutta la banda.

- **Forward Error Correction** è implementata tramite l'utilizzo dei codici di Hamming, la lunghezza della parola del codice è fissata e pari a 4, mentre la code-word è un parametro che può variare da 5 a 8.
- **Codice Gray** utilizzato per m Completare
- **Interliving**

La lunghezza del payload come detto prima è un numero variabile il quale dipende da molti fattori

$$L_{payload} = 8 + \max \left( \left[ \frac{8PL - 4SF + 44 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right] + (CR + 4), 0 \right) \quad (3.9)$$

Dove PL è il numero di byte del payload iniziale, H può essere 1 o 0 a seconda se il device opera in modalità "implicita" oppure no, CR è il numero di bits di parità e DE può essere 0 o 1 a seconda dell'abilitazione o meno della funzione di *low data rate*. L'opzione di low data rate è attivabile in caso di trasmissioni lunghe e lente, attivandola si forzerà il dispositivo trasmittente ad aumentare la stabilità della frequenza scelta per la comunicazione .

### 3.2.3 Chip interno

Per quanto riguarda la struttura interna dei moduli radio, non si hanno molte informazioni dato che la tecnologia è proprietaria di Semtech. Nella documentazione ufficiale è presente una rappresentazione grafica dei vari blocchi presenti al interno dei moduli radio.

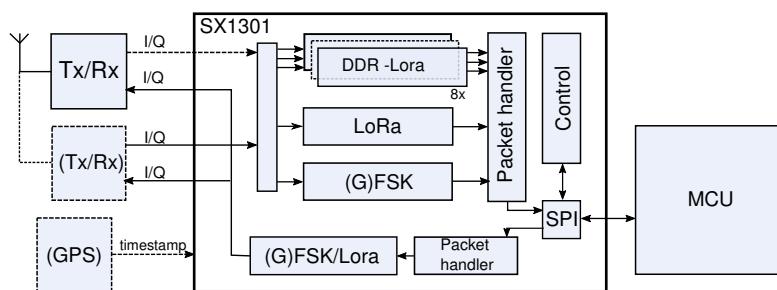


Figura 3.8: Struttura interna ricevitore SX1301

Dalla figura 3.8 è evidente che il gateway rimane in ascolto su 8 frequenze diverse, le quali permettono di coprire tutti i vari SF. Tutto ciò è possibile anche grazie al fatto che i vari SF sono quasi ortogonali fra di loro, in questo modo il ricevitore è in grado di ricevere un pacchetto con uno Spreading Factor  $i$  anche nel caso in cui si sovrapponga ad un altro pacchetto con Spreading Factor pari a  $j$ , fintanto che  $i \neq j$ . Questa pseudo-ortogonalità utilizzata in LoRa, permette di utilizzare differenti SF per ottenere un maggiore throughput rispetto a schemi di modulazione tradizionale. Il ricevitore SX1301 può demodulare fino ad un massimo di 8 pacchetti contemporaneamente, questo non vuol dire che ricevitori futuri non possano demodulare contemporaneamente un numero di pacchetti maggiore. Oltre a ciò grazie alla modulazione utilizzata abbiamo vantaggi quali:

- I vari nodi della rete, possono cambiare frequenza in ogni trasmissione in modo casuale, andando a migliorare di molto la robustezza del sistema alle varie interferenze.
- Non è necessario avere tabelle contenenti informazioni riguardanti il data-rate dei vari nodi. Ogni data-rate viene demodulato contemporaneamente.
- È possibile utilizzare più antenne nel gateway per realizzare il cosiddetto true antenna diversity, per aumentare la robustezza al multi-path

Riguardare ultimo punto della documentazione pagina 14

### 3.3 LoRaWAN

Chiedere se il termine protocollo è appropriato

Se la scelta di utilizzare un layer fisico proprietario comporta l'utilizzo di chip prodotti esclusivamente da Semtech, LoRaWAN è un protocollo MAC o *media access control* utilizzabile nelle comunicazioni che richiedono una vasta copertura di rete. Sviluppato in modo da poter essere utilizzato per devices a basso consumo energetico, permette a quest'ultimi la possibilità di interagire con applicazioni internet attraverso una rete wireless a lungo raggio. Riprendendo il modello OSI LoRaWAN può

essere collocato tra il secondo e terzo layer del sudetto modello. Il protocollo LoRaWAN è sviluppato dalla LoRa Alliance e formalizzato tramite la documentazione LoRaWAN

inserire link

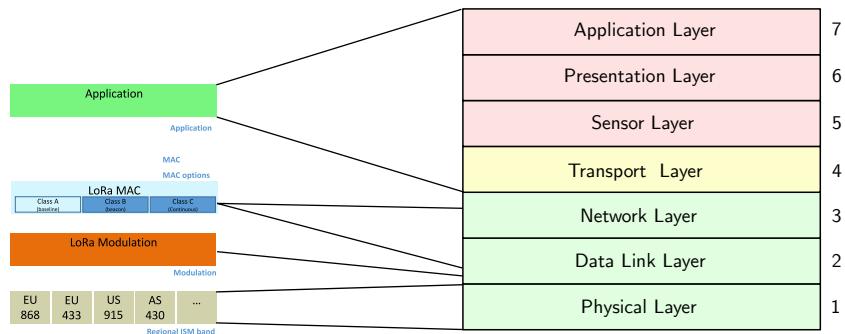


Figura 3.9: Comparazione del modello OSI con la struttura definita in LoRaWAN

### 3.3.1 Tipologia di rete

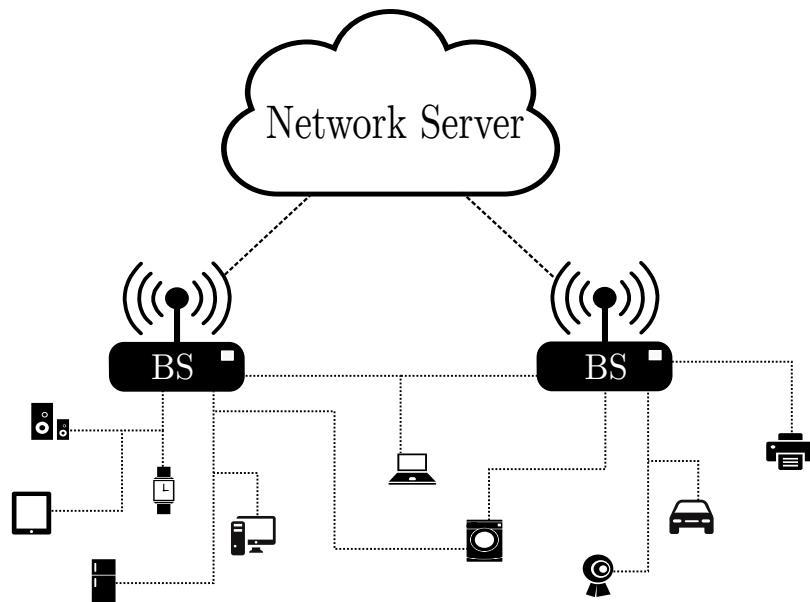


Figura 3.10: Struttura rete a stella LPWAN

Per garantire un elevato numero di devices contemporaneamente connessi, LoRaWAN si basa su una topologia di rete a stella. In questa topo-

logia gerarchica, gli *end devices* comunicano con il server solo attraverso i gateways, i quali, traducono i pacchetti LoRa in pacchetti Data la struttura della rete, è evidente che ogni messaggio, inviato dagli *end devices*, potrà essere ricevuto da uno o più gateways; starà quindi al server eliminare i duplicati e selezionare il gateway più adatto per rispondere al device.

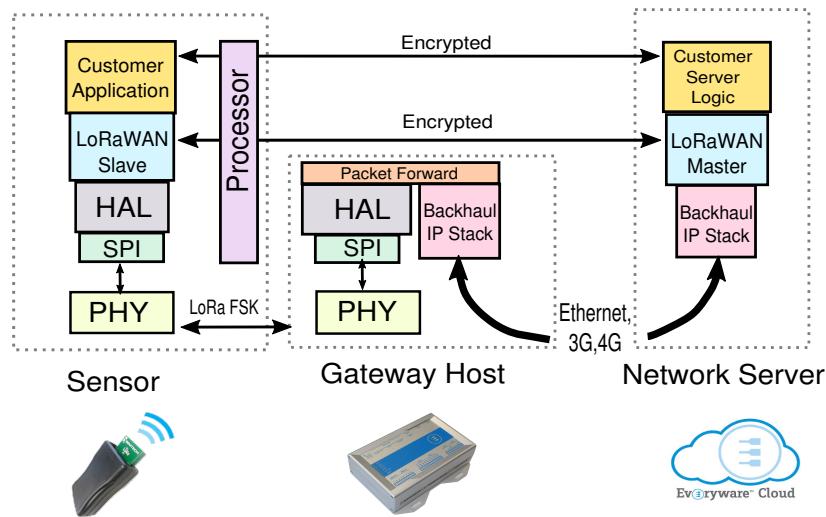


Figura 3.11: Stack del protocollo della rete LoRaWAN

### 3.3.2 Tipi di devices

Nella documentazione LoRaWAN sono definite tre classi di devices possibili per diversi tipi di utilizzo. La classe basilare è la classe A, questo vuol dire che in ogni dispositivo implementa questa classe. Le classi B, e C sono una estensione della classe A. Questo tipo di classi sono riservate a devices i quali hanno la possibilità di essere alimentati tramite la rete elettrica oppure tramite fonti di energia esterne.

- **Class A** è la modalità di funzionamento predefinita. In questa modalità il device è in grado di iniziare la comunicazione in qualsiasi istante di tempo. Questa classe implementa due finestre di ascolto da parte del devices dopo 1[s] e 2[s] dalla fine della trasmissione. Se il gateway non risponde al messaggio ricevuto durante uno di questi intervalli, è necessario aspettare che il device torni ad aprire

le sue finestre di ascolto, quindi è necessario aspettare l'invio di un nuovo messaggio .

- **Class B** sono devices che estendono le funzionalità della classe A. Questi devices sono sincronizzati con la Base Station attraverso messaggi *bacon* inviati dal gateway. Essendo sincronizzato con il gateway, il device è in grado di aprire finestre di ascolto nei tempo prestabilito potendo così essere contatto dal server.
- **Class C** è anch'essa una estensione della classe A. Questa classe permette il funzionamento quasi complementare del device; infatti il device che opera in questa classe rimarrà continuamente in ascolto finché non necessita di comunicare con altri devices. Questa classe è adatta per comunicazioni che richiedono una bassa latenza. Ovviamente, rimanendo per la maggior parte del tempo in ascolto, i devices che operano con questa classe dovranno essere connessi ad una fonte di energia esterna

Risrivere

### 3.3.3 Frequenze

La tecnologia LoRa opera nelle bande non licenziate dello spettro radio. Come accade per le più comuni tecnologie wireless, WiFi, Bluetooth, ZigBee, anche LoRa può essere utilizzata dal consumatore senza la necessità di possedere una licenza o pagare un abbonamento. LoRaWAN supporta sia le frequenze che vanno dagli 863-868[MHz] sia la banda dei 433[MHz]. Per le frequenze centrate nella fascia degli 860[MHz], LoRaWAN specifica tre diversi canali (868.10, 868.30 and 868.50 MHz), con una bandwidth di 125[KHz] ciascuno, i quali, dovranno essere supportati da ogni device. Inoltre ogni gateway che opera in queste frequenze dovrà rimanere in ascolto su tutti e tre questi canali, in particolare, essi formano un set comune nel quale un possibile nuovo devices che entra nella rete comunicherà in questi canali durante la *Procedura di inserimento*. Per quanto riguarda la banda dei 433[MHz], si hanno a disposizione sempre tre tipi diversi di canali usabili per la *join procedure* i quali sono 433.175, 433.375 433.575 MHz. Terminata la procedura, il gateway potrà dare istruzione di utilizzare altri canali oltre ad i 3 principali. La regolamentazione Europea impone un duty-cycle molto ristretto per l'utilizzo delle frequenze ISM, in particolare nella banda degli 868 si è imposto l'utilizzo di duty cycle inferiori al 1% e per i 433 duty cycle inferiori al 0,1%.

Stato	Frequenza [MHz]
Europa	868-870
US	902-928
China	779-787

Tabella 3.2: Bande di frequenza per le varie regioni

### 3.3.4 Sicurezza e LoRaWAN packets

Un aspetto fondamentale che non viene sottvalutato nella specifica LoRaWAN è la sicurezza. Ogni device LoRa implementa al suo interno due chiavi di sicurezza uniche *AppSkey* e *NwkSkey* le quali utilizzano una criptazione AES a 128 bits. La network session key (*NwkSkey*) è la chiave che viene utilizzata per garantire l'affidabilità nella comunicazione tra dispositivo e la rete. Questa chiave inoltre, è utilizzata per verificare la validità del messaggio tramite la procedura di controllo MIC (Message Integrity Check). La application session key (*AppSkey*) viene utilizzata per la criptazione e decriptazione del payload. Questa chiave, che è unica per ogni dispositivo, garantisce lo scambio di informazioni in modo sicuro tra il dispositivo e l'application server.

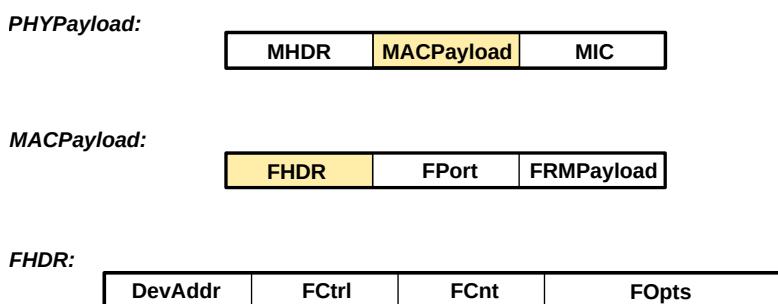


Figura 3.12: Stack del protocollo della rete LoRaWAN

LoRa specifica due tipi di chiave di sicurezza che sono uniche a tutti i devices LoRa. All'interno del frame *PHYPayload* del pacchetto LoRa, è il pacchetto LoRaWAN. Questo pacchetto è strutturato nel seguente modo: Per garantire la sicurezza nelle comunicazioni, LoRa utilizza tre diverse chiavi di sicurezza lunghe ognuna 128[bits].

## 3.4 Adaptive Data Rate

Adaptive data rate (ADR), è un meccanismo utilizzato per ottimizzare il data rate dei dispositivi in modo dinamico. Questo meccanismo, implementato tramite l'application layer, permette di modificare il Spread Factor a seconda delle condizioni della rete a cui i devices sono connessi. Dal momento in cui il nodo richiede la possibilità di usufruire di ADR, l'application layer inizierà a collezionare le prestazioni delle ultime 20 trasmissioni effettuate dal nodo. In base ai dati collezionati, l'application layer sarà in grado di ottimizzare la connessione con il nodo in esame andandone a variare lo SF o la bandwidth utilizzata. I parametri utilizzati per l'ADR, sono il frame counter, il rapporto segnale rumore e il numero di gateways che hanno ricevuto i messaggi inviati. Basandosi su questi tre parametri, è evidente che ADR è applicabile solo ai nodi fissi della rete oppure a quei nodi che hanno periodi di mobilità limitata. Come esempio è possibile considerare un nodo fisso che comunica con la rete utilizzando uno SF pari a 12 , una bandwidth pari a 125[KHz] e ha un SNR pari a 2.0[dB]. Un rapporto segnale rumore positivo è indice che il nodo si trova ad una distanza ravvicinata dal gateway e non sono presenti elementi che possono interferire con la comunicazione; avendo un margine pari a 22[dB] è ragionevole andare ad abbassare il SF di 2-3 valori (10/9 Sf) oppure andare a diminuire la potenza con cui il nodo trasmette. Determinare i parametri ottimi con cui questi device devono operare non è una scelta semplice, essa varia dalla regione in cui i devices operano e dallo stato della rete. Un possibile algoritmo utilizzabile è quello consigliato da Semtech nella documentazione ufficiale.



# Capitolo 4

## Implementazione

Utilizzando il modulo SX1301 in combinazione con il gateway prodotto da Eurotech ReliaGATE 10-11, si è andato a sviluppare un software in grado di ricevere i pacchetti inviati da dispositivi LoRa e inviarli ad un Broker Mqtt.

### 4.0.1 SX1301

Nella tabella 4.1 sono riportate le caratteristiche elettriche massime del chip SX1301. Il Chip, supporta tensioni di alimentazione fino a 4V e come è possibile osservare il range di temperatura in cui il chip può operare è molto ampio, rendendolo ideali per applicazioni esterne ed interne.

Parameter	Symbol	Conditions	Value
IO power supply to VSS	$V_{DDIO,ABSMAX}$		-0.5 V to 4.0 V
Core power supply to VSS	$V_{DDCORE,ABSMAX}$		-0.5 V to 2.0 V
Storage temperature	$T_{J,STORE}$		-50 °C to 150 °C
Junction temperature	$T_{J,ABSMAX}$		-40 °C to 125 °C
Pin voltage on IO and Clock pins	$V_{DPIN,ABSMAX}$		-0.3 V to $V_{DDIO} + 0.3$ V
Peak reflow temperature	$T_{PKG}$		260 °C
Latchup	$I_{LUP}$	JESD78D, class I	+/-100 mA
Humidity	$H_R$		0 – 95 %
ESD	HBM	Human Body Model JESD22-A114 CLASS 2	2 kV
	CDM	Charged Device Model JESD22-C101 CLASS III	300 V

Tabella 4.1: Caratteristiche elettriche SX1301

Utilizzando i valori nominali riportati nella tabella 4.2, si hanno valori di corrente pari a 1[uA] in idle e di 5[mA] in pieno funzionamento. Il chip è equipaggiato con un connettore sma al quale è collegata una antenna

Parameter	Symbol	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Digital IO supply	V <sub>DDIO</sub>	Operating Conditions for Electrical Specification	3.0		3.6	V
Digital core supply	V <sub>DDCORE</sub>	Operating Conditions for Electrical Specification	1.75		1.85	V
Ambient operating temperature	T <sub>A</sub>	With chip paddle soldered to PCB ground plan with minimum 100 cm <sup>2</sup> air exposed area and heat sink	-40		85	°C

Tabella 4.2: Caratteristiche elettriche SX1301

omindirezionale, ideata per la frequenza 868[MHz] con un guadagno pari a 3dB.

#### 4.0.2 ReliaGATE

Il gateway a cui è collegato il modulo SX1301 è il ReliaGATE 10-11 prodotto da Eurotech. Al suo interno troviamo un processore Texas Instruments TI AM335X Cortex-A8 equipaggiato con 512MB di RAM e 4GB di storage eMMC. Il ReliaGATE offre una vasta gamma di porte tra cui 232/485, 2CAN bus, 2 porte USB e 2 porte Ethernet, inoltre ha connettività Bluetooth, WiFi e GPS. Al suo interno è installato Everyware™ Software Framework (ESF), la versione commerciale del software Kura.

#### 4.0.3 Architettura del software

Lo scopo di questa tesi era riuscire ad implementare dei moduli osgi, installabili al interno del framework ESF, in grado di controllare il comportamento del devices SX1301. In particolare utilizzando l'utility messa a disposizione da Semtech per l'interfacciamento con il dispositivo denominata packet forwarder, e l'utility LoRa Gateway Bridge , sotto licenza MIT, sviluppata da brocaar .

#### 4.0.4 Semtech packet forwarder

Il packet forwarder, è un software il quale riceve o invia pacchetti radio Lora , tramite una connessione SPI con il device SX1301. Nel caso di ricezione di un pacchetto, l'applicativo incapsula i dati ricevuti in un formato IP/UDP, e li ritrasmette nella rete internet/intranet. Per la sua



Figura 4.1: Caratteristiche elettriche SX1301

configurazione viene utilizzato un file Json nel quale trviamo tutte le varie opzioni di configurazione per i moduli radio presenti al interno del chip.

---

```
1  "SX1301_conf": {  
2      "lorawan_public": true,  
3      "clksrc": 1,  
4      "radio_0": {  
5          "enable": true,  
6          "type": "SX1257",  
7          "freq": 867500000,  
8          "rssи_offset": -166.0,  
9          "tx_enable": true  
10     },  
11     "radio_1": {  
12         "enable": true,  
13         "type": "SX1257",  
14     }  
15 }
```

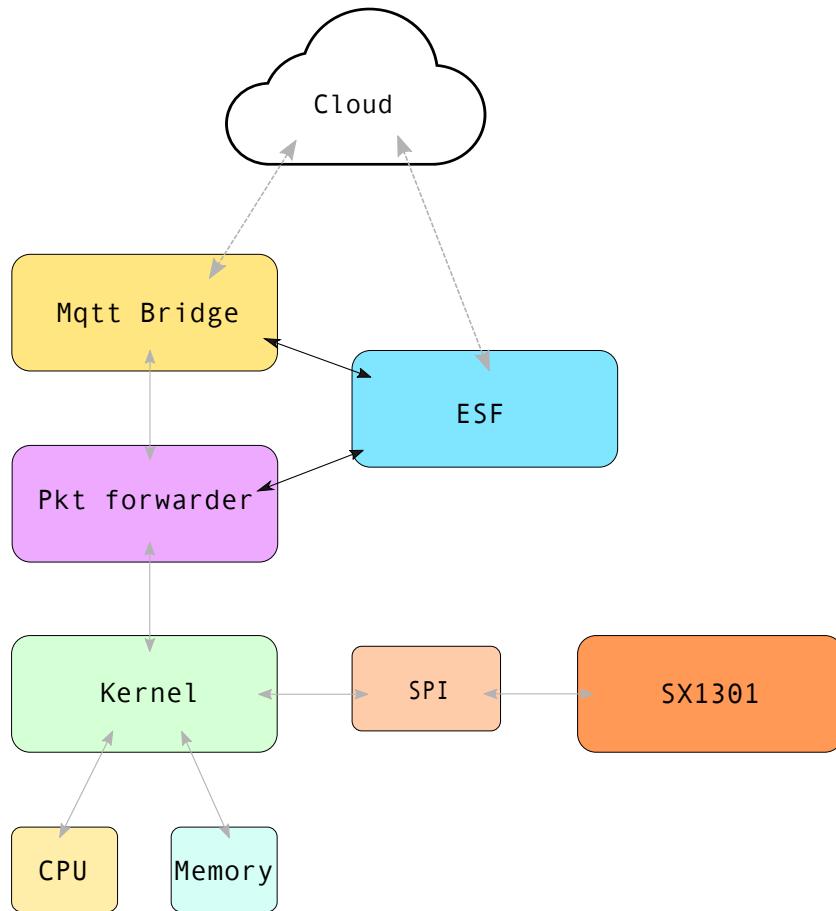


Figura 4.2: Architettura del software

```

15      "freq": 868500000,
16      "rssI_offset": -166.0,
17      "tx_enable": false
18  },
19  "chan_multisf_0": {
20      "enable": true,
21      "radio": 1,
22      "if": -400000
23  },


---


173  "gateway_conf": {
174      "gateway_ID": "AA555A0000000000",
175      "server_address": "0.0.0.0",
  
```

---

```

176     "serv_port_up": 1703,
177     "serv_port_down": 1702,
178     "keepalive_interval": 10,
179     "stat_interval": 30,
180     "push_timeout_ms": 100,
181     "forward_crc_disabled": false,
182     "forward_crc_valid": true,
183     "forward_crc_error": false
184 }
```

---

#### 4.0.5 LoRa Gateway Bridge

LoRa Gateway Bridge, è l'applicativo il quale riceve i vari pacchetti UDP inviati dal packet forwarder e li trasmette ad un Broker MQTT. Il software è scritto nel linguaggio GO. Per renderlo interfacciabile con ESF, sono state apportate delle modifiche al codice, in particolare è stata aggiunta la possibilità di specificare il publish e il subscribed topic, i quali erano hard-coded.

#### 4.0.6 ESF

Everyware software framework, è la versione commerciale del software Kura preinstallata nel ReliaGATE 10-11. ESF si pone l'obiettivo di offrire un container Java/OSGi per le applicazioni M2M. Gli applicativi installati in ESF sono sviluppati come OSGi Declarative Service, dando la possibilità di configurare i vari applicativi del gateway tramite una semplice interfaccia web.

#### 4.0.7 Realizzazione

Per gestire i due software preinstallati si è optato per la creazione di due applicativi osgi distinti. Il primo applicativo chiamato Lora Config si pone il compito di leggere ed interpretare il file di configurazione utilizzato dal programma *Packet Forwarder*, per poi andare ad esporre i punti principali al utente finale. La libreria utilizzata per manipolare i file di tipo Json è

```
import com.eclipsesource.json
```

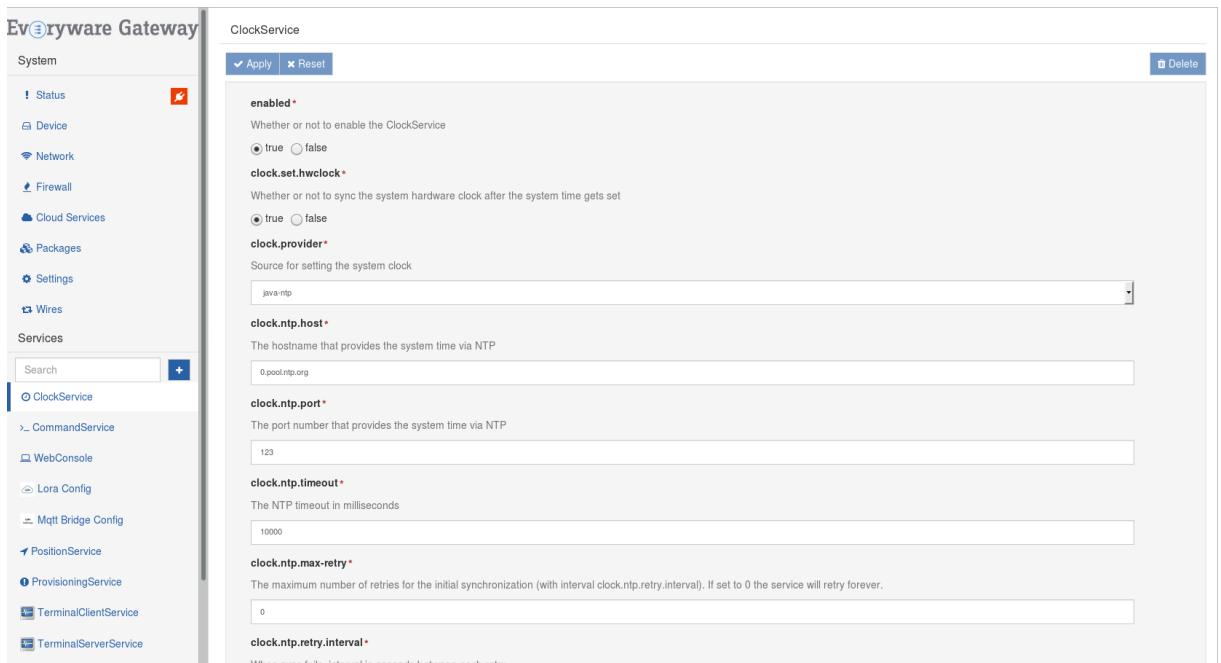


Figura 4.3: Architettura del software

Tramite la quale vengono riempiti i campi della classe LoraSettings. Il file Json, come detto precedentemente è composto da due parti. Nella prima parte troviamo tutte le impostazioni per la configurazione del SX1301, nella seconda parte sono presenti le impostazioni per il forward dei pacchetti. Per questa ragione due classi diverse sono state create, SX1301Configuration e GatewayConfiguration, accessibili tramite la classe LoraSettings.

---

```

1  public class LoraSettings {
2      public static final String KEY_GATEWAY_CONFIG = "gateway_conf";
3      public static final String KEY_SX1301 = "SX1301_conf";
4      private SX1301Configuration sx1301Conf;
5      private GatewayConfiguration gatewayConf;
6  }

```

---

Per applicare le modifiche eseguite alla configurazione, è necessario che l'applicativo sia riavviato. Per eseguire questa operazione, si è scelto di utilizzare la libreria

```
import com.apache.commons.exec
```

---

la quale fornisce delle *API* per chiamare processi esterni, in particolare si è scelto di utilizzare l’utility di sistema *pkill* per terminare il processo del pkt forwarder.

---

```

1   public void startPktForwarder() {
2       DefaultExecutor pktExecutor = new DefaultExecutor();
3       CommandLine pktCmdLine = new CommandLine(KEY_PKT_BIN);
4       pktCmdLine.addArgument("start");
5       pktExecutor.setExitValue(0);
6       try {
7
8           pktExecutor.execute(pktCmdLine);
9           s_logger.info("start PKT");
10      } catch (Exception e) {
11          s_logger.warn("Couldn't start pkt forwarder");
12      }
13  }
14
15  public void stopPktForwarder() {
16      DefaultExecutor pktExecutor = new DefaultExecutor();
17      CommandLine pktCmdLine = new CommandLine("pkill");
18      pktCmdLine.addArgument("basic_pkt_fwd");
19      pktExecutor.setExitValue(0);
20      try {
21
22          pktExecutor.execute(pktCmdLine);
23          s_logger.info("Stop PKT");
24      } catch (Exception e) {
25          s_logger.warn("Couldn't stop pkt forwarder");
26      }
27  }

```

---

#### 4.0.8 Mqtt Bridge Config

Il secondo bundle creato ha lo scopo di esporre all’utente un facile modo per configurare *Lora Gateway Bridge*. Anche in questo caso è necessario il riavvio del applicativo per fare in modo che le modifiche abbiano effetto, anche in questo caso è stata usata la libreria

Lora Config

Apply    Reset    Delete

**gateway.ID \***  
Lora MAC gateway.  
AA555A0000000000

**server.address \***  
Udp server address.  
0.0.0.0

**server.port.forward \***  
Port of the forwarded UDP packet.  
1780

**server.port.receiving \***  
Port of the receiving UDP packet.  
1782

**keepalive.interval \***  
Keep alive interval.  
10

**stat.interval \***  
Interval between statistics notifications.  
30

**push.timeout.ms \***  
Push notification timeout in ms.  
100

**forward.crc.valid \***  
Enable forward of crc.  
 true    false

**forward.crc.error \***  
Enable forward of package with incorrect crc.  
 true    false

**forward.crc.disabled \***  
Enable forward package crc.  
 true    false

Figura 4.4: Architettura del software

```
import com.apache.commons.exec
```

Tramite questo bundle l'utente finale ha la possibilità di decidere

- il topic sul quale pubblicare i messaggi ricevuti in formato UDP dal *pkt forwarder*.
- il topic al quale rimanere in ascolto .
- su quale indirizzo e porta mandare/ricevere i pacchetti UDP.
- a quale broker Mqtt iscriversi.
- l'username e password per connettersi al broker.

The screenshot shows a configuration interface for an MQTT bridge. At the top, there are buttons for 'Apply' and 'Reset'. On the right, there is a 'Delete' button. The configuration fields include:

- mqtt.settings.publish.topic\***: Name of the topic for the forwarded packets. Value: Enrico/Topic/3
- mqtt.settings.subscribed.topic\***: Name of the subscribed topic. Value: MAC\_address/rx
- mqtt.settings.udp.server.and.port\***: Udp server and port. Value: 0.0.0.0:1780
- mqtt.settings.server.and.port\***: Address and port of the mqtt broker. Value: tcp://test1.mosquitto.org:1883
- mqtt.settings.username**: Username. Value: (empty)
- mqtt.settings.password**: Password. Value: (empty)

Figura 4.5: Architettura del software

#### 4.0.9 Misurazioni

In via sperimentale, è stato scelto di installare il gateway ReliaGate 10-11 ad una altezza di 11m. Configurato il gateway per l'utilizzo del broker open source mosquitto.org. La prova di ricezione è stata condotta per tentativi, cercando di testare la massima distanza di trasmissione del dispositivo LoRa Mote .

Per constatare l'avvenuta ricezione del messaggio è stata utilizzata l'applicazione Android gratuita MyMQTT, tramite la quale è possibile iscriversi ad un topic predefinito ed rimanere in ascolto dei messaggi pubblicati in esso.

#### 4.0.10 Osservazioni

Come è facile osservare dalla mappa in figura 4.7, la distanza massima raggiunta varia molto a seconda della conformazione del territorio. In assenza di edifici in linea d'aria, punto 8 nella figura 4.7, è stato possibile inviare un pachetto lora ad una distanza di 8.2[km]. Nelle effettuare



Figura 4.6: Architettura del software

la prova è stato scelto di inviare al server Mqtt solo i pachetti ricevuti correttamente riga 10

---

```
1      "gateway_ID": "AA555A0000000000",
2      "server_address": "0.0.0.0",
3      "serv_port_up": 1703,
4      "serv_port_down": 1702,
5      "keepalive_interval": 10,
6      "stat_interval": 30,
7      "push_timeout_ms": 100,
8      "forward_crc_disabled": false,
9      "forward_crc_valid": true,
10     "forward_crc_error": false
11 }
```

---

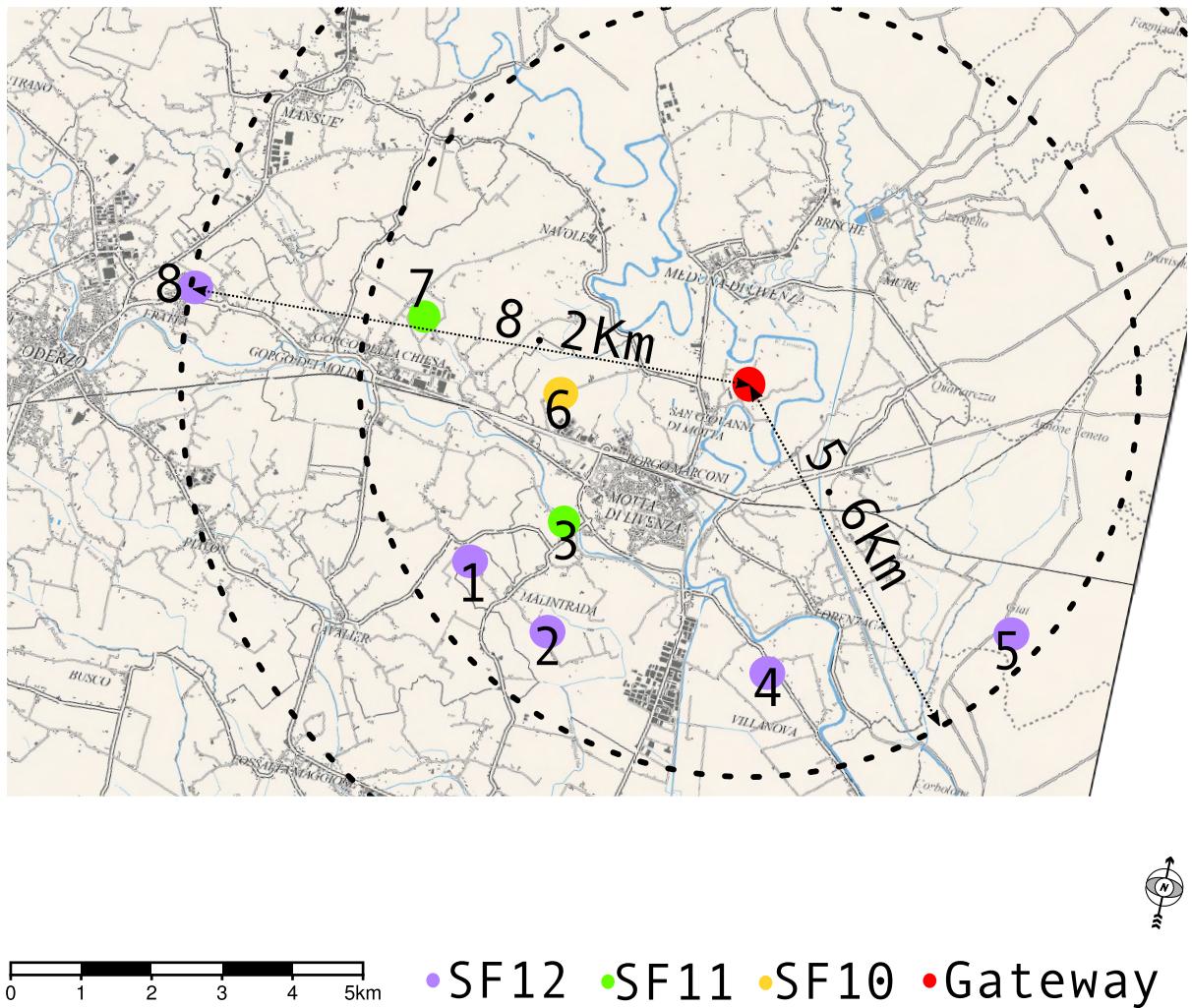


Figura 4.7: Copertura Lora



# Bibliografia

- [1] Gartner. Gartner says 8.4 billion connected 'things' will be in use in 2017, up 31 percent from 2016. *[Online]*, 2016. <http://www.gartner.com/newsroom/id/3598917>.
- [2] LTD Hauwei Technologies co. Nb-iot white paper. *[Online]*, 2015. [http://www.huawei.com/minisite/iot/img/nb\\_iot\\_whitepaper\\_en.pdf](http://www.huawei.com/minisite/iot/img/nb_iot_whitepaper_en.pdf).
- [3] Semtech. An1200.22 lora™ modulation basics. *[Online]*, 2015. <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>.
- [4] Semtech. Lorawan 101 a technical introduction. *[Online]*, 2017. [https://docs.wixstatic.com/ugd/ecccla\\_20fe760334f84a9788c5b11820281bd0.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/ecccla_20fe760334f84a9788c5b11820281bd0.pdf).