

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE

Corso di Laurea in Ingegneria elettronica

Dipartimento di (DPIA) Dipartimento Politecnico di
Ingegneria e Architettura

Tesi di Laurea

LORA E INTERNET OF THINGS: EVERYWARE SOFTWARE COME CASO DI STUDIO

Relatore:

Prof. Antonio Abramo

Laureando:

Enrico Tolotto

Correlatore:

Marco Carrer

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 LoRaTM, implementata attraverso l'utilizzo del framework open-source KuraTM sviluppato da EurotechTM.

Note

■ Riscrivere	5
■ Completare	7
■ Riscrivere	9
■ Completare	9
■ Inserire Link	24
■ inserire link	27
■ Aggiunger link	38
■ inserire link	45

Indice

Indice	v
Elenco delle figure	vii
1 IoT	1
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
2 LPWAN	7
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
3 LoRa	17
3.1 Narrow Band e Spread Spectrum	17
3.1.1 NarrowBand	18
3.1.2 Spread spectrum	18
3.2 Layer fisico LoRa	19
3.2.1 Chirp Spread Spectrum	19
3.2.2 Tuning LoRa	22
3.2.3 LoRa packet	24
3.3 LoRaWAN	27
3.3.1 Tipologia di rete e classi di dispositivi	27

3.3.2 Bande di frequenze	29
3.3.3 Sicurezza	30
3.4 Adaptive Data Rate	31
3.5 Limitazioni	32
4 Caso di studio	35
4.1 OSGi	36
4.1.1 Ciclo vitale dei bundle	36
4.1.2 Registrazione del servizio	37
4.1.3 Architettura del software	38
4.1.4 ESF	38
4.2 Everyware Software	38
4.2.1 Semtech packet forwarder	39
4.2.2 LoRa Gateway Bridge	42
4.2.3 Realizzazione	42
4.2.4 Mqtt Bridge Config	43
4.3 Hardware utilizzato	45
4.3.1 SX1301	45
4.3.2 ReliaGATE	47
4.3.3 Misurazioni	47
4.3.4 Osservazioni	48
Bibliografia	53

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	24
3.5	Struttura pacchetto Lora	26
3.6	Pacchetto codificato dal layer fisico	26
3.7	Comparazione del modello OSI con la struttura definita in LoRaWAN	28
3.8	Struttura rete a stella LPWAN	29
3.9	Stack del protocollo della rete LoRaWAN	30
3.10	Simulazione prestazioni LoRa	32
4.1	Layer OSGi	37
4.2	Architettura del software	39
4.3	OSGi services	40
4.4	Interfaccia web ESF	41
4.5	Architettura del software	44
4.6	Architettura del software	45
4.7	Struttura interna ricevitore SX1301	46

4.8 Caratteristiche elettriche SX1301	48
4.9 Dispositivo LoRa Mote	49
4.10 Installazione dell'antenna	50
4.11 Copertura Lora	51

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^{1.1} (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 fallo 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]

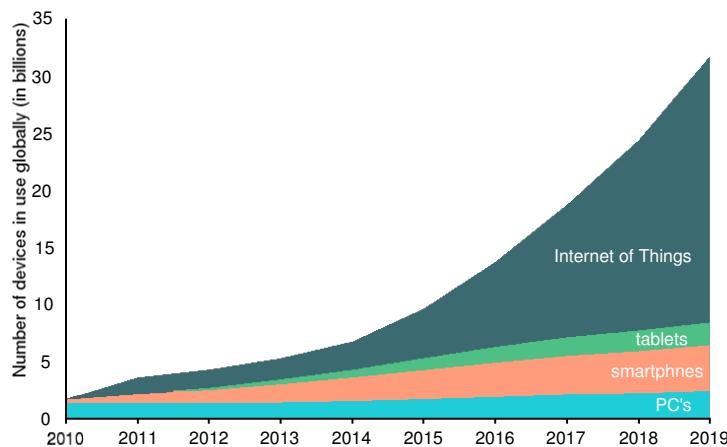


Figura 1.2: Numero di dispositivi per anno

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

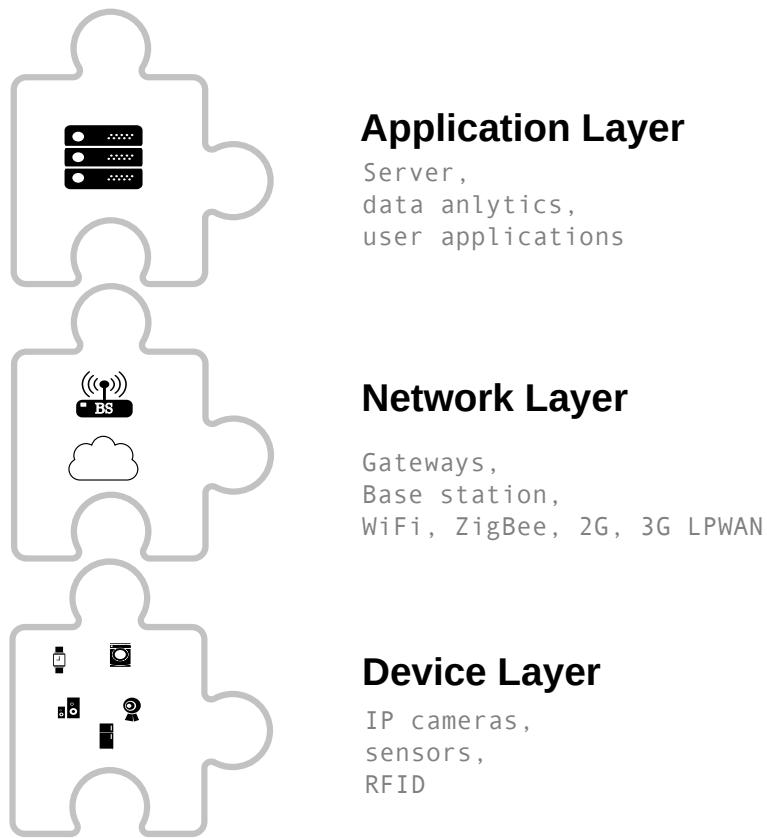


Figura 1.3: Layer del IoT

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

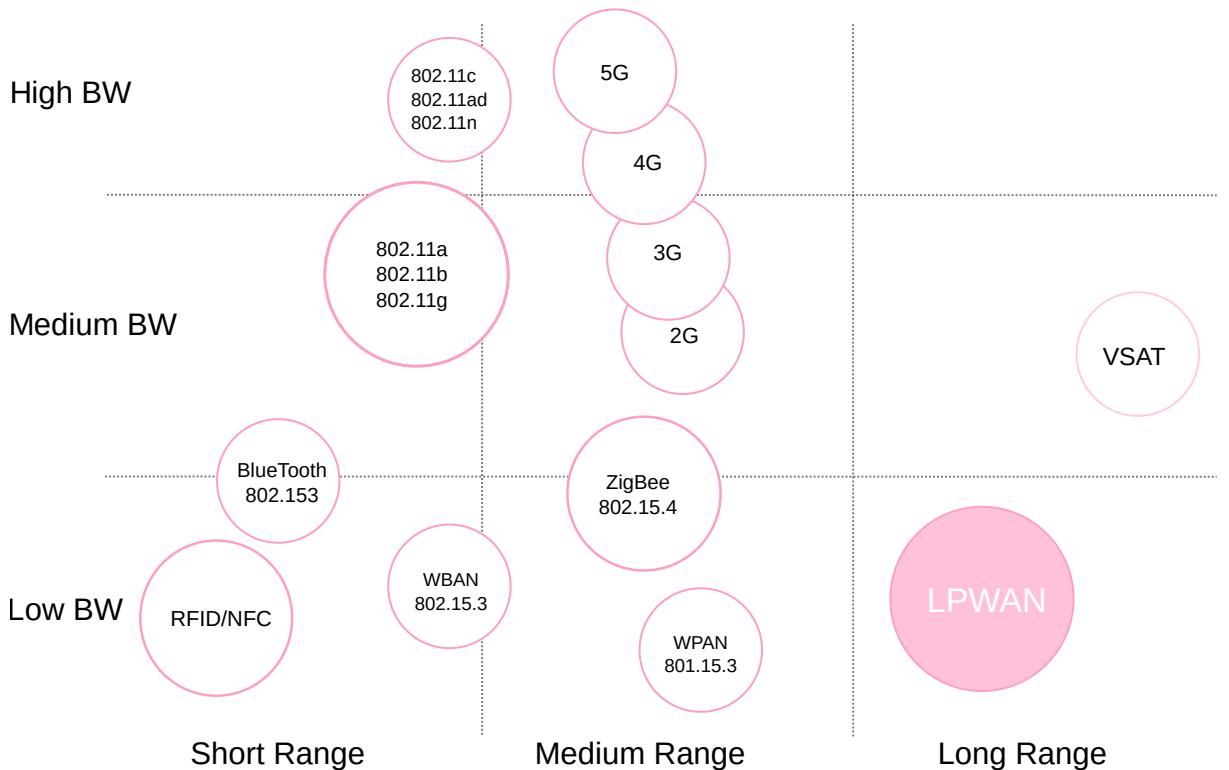


Figura 2.1: Comparazione tipologia di reti

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.

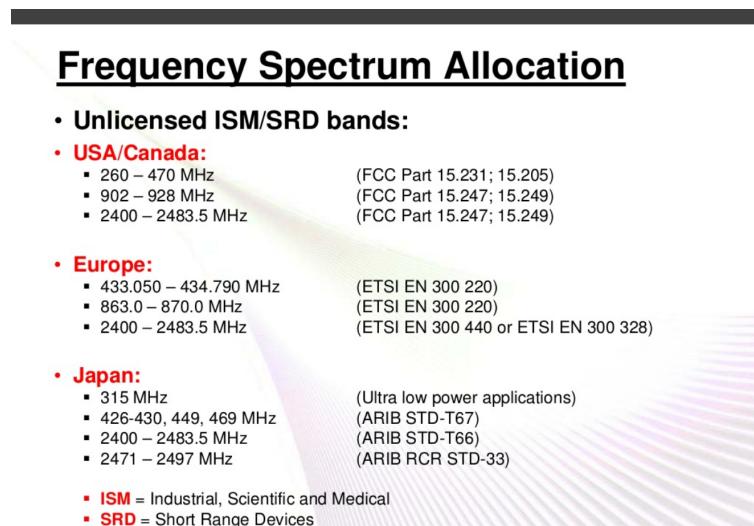


Figura 2.2: Comparazione tipologia di reti

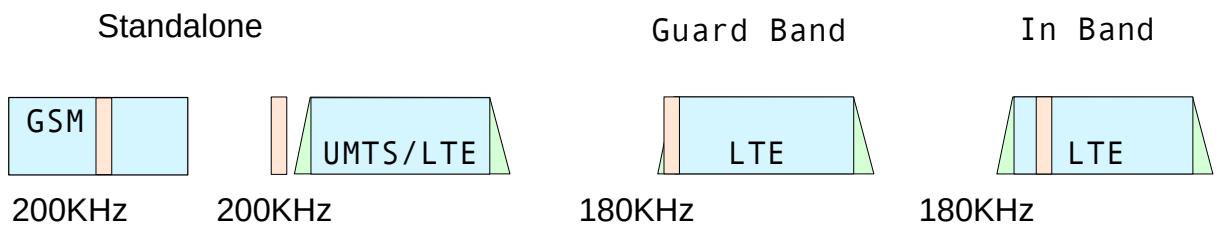


Figura 2.3: Modalità di funzionamento NB-IoT

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.

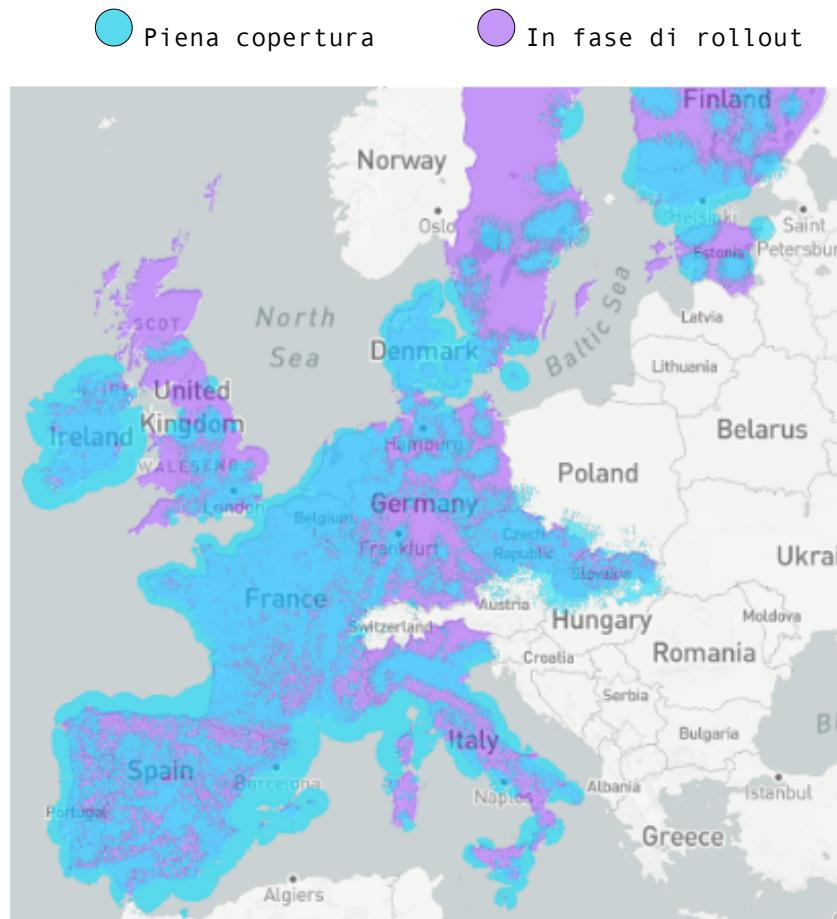


Figura 2.4: Mappa copertura SigFox

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.

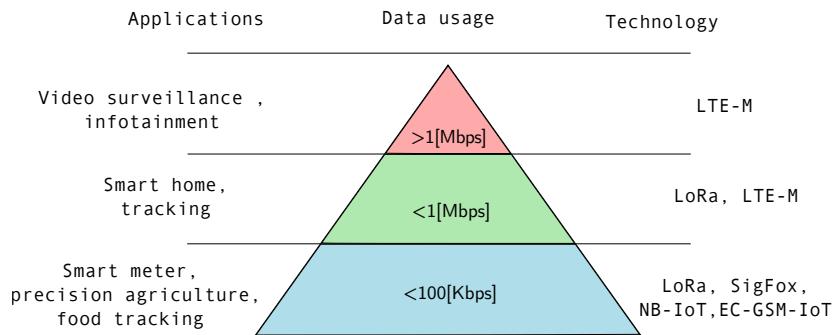


Figura 2.5: Capacità delle reti LPWA

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

Il successo delle tecnologie LPWAN risiede nella loro abilità di offrire una connessione a bassa potenza per connettere un gran numero di devices distribuiti in una vasta area geografica. Una delle tecnologie che sta riscuotendo un grande successo ,nel ambito europeo, è LoRa. Brevettata dalla francese Cycleo e successivamente acquistata da Semtech, LoRa è una tecnologia che offre un buon compromesso tra data-rate, battery life e area coverage. Grazie all'adozione di un protocollo open, la facile implementazione della rete ed il costo contenuto dei devices, LoRa ha già una grande community attiva alle spalle. Per comprender il funzionamento di questa tecnologia, ed i vantaggi che ne derivano dal suo utilizzo rispetto alle tecnologie concorrenti, è necessario studiare la modulazione utilizzata nel layer fisico.

3.1 Narrow Band e Spread Spectrum

Per garantire la copertura wireless di una vasta area geografica, le reti LPWAN sono state ideate basandosi su bilanci di collegamento (link budget) ideali dell'ordine dei 150 ± 10 [dB]. Queste specifiche, permettono un range di operatività pari ad una decina di chilometri nelle zone rurali. In aggiunta, il basso data-rate richiesto dalle applicazioni IoT permette a queste tecniche di concentrare una elevata energia in ogni simbolo trasmesso; rendendo possibile ai gateways la decodifica di segnali con una attenuazione pari o superiore ai -110[dBm]. Per ottenere queste prestazioni la maggior parte delle LPWA utilizza tecniche di comunicazioni *Narrow Band* o *Spread Spectrum*.

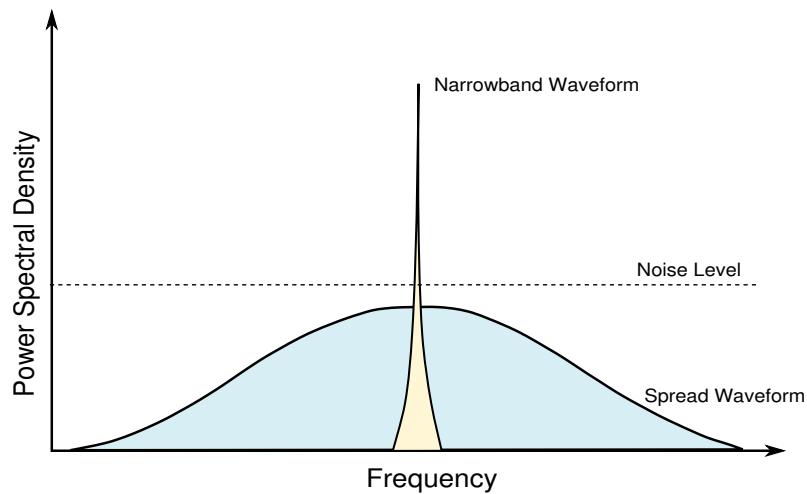


Figura 3.1: Comparazione tra UNB e SSP

3.1.1 NarrowBand

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 portante una banda siffatta, la modulazione NB è in grado di utilizzare l'intero spettro in maniera efficace e al contempo stesso ridurre il rumore al interno del singolo canale. Oltre a questi due vantaggi, il basso livello di rumore facilita la demodulazione del segnale da parte del gateway, rendendo i moduli radio semplici da implementare a livello hardware 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 hanno estremizzato il concetto di narrowband andando ad implementare quella che viene chiamata *Ultra Narrow Band*. Questa modulazione assegna ad ogni portante una banda di appena $100[\text{Hz}]$. Inequivocabilmente, soluzioni così estreme portano con se vari compromessi che ne riducono di molto gli scenari applicativi.

3.1.2 Spread spectrum

Per Spread spectrum si intende una tecnica di trasmissione in grado di diffondere il segnale informativo in una banda più ampia di quella originariamente occupata dal segnale. Come risultato otteniamo una trasmis-

sione che incorpora un quantitativo di rumore maggiore all'interno del singolo canale rispetto ad una trasmissione NB, rendendola però molto più resistente alle interferenze naturali, al rumore e agli attacchi basati sul jamming. Per ottimizzare l'uso dello spettro, è possibile inviare segnali composti da frequenze ortogonali tra loro, in questo modo è realizzabile la decodifica in maniera concorrente di segnali diversi, andando ad aumentare la capacità della rete. LoRa utilizza una tecnica di modulazione basata su di una tecnica di a spettro espanso che prende il nome di Chirp Spread Spectrum (CSS).

3.2 Layer fisico LoRa

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. Il più generico segnale chirp può essere rappresentato da una sinusoide che come argomento ha una funzione $\theta(t)$ che varia nel 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 della frequenza. Il modo più semplice per ottenere un segnale siffatto, è andando a

scegliere $\theta(t)$ come un argomento che dipende in modo quadratico dal tempo.

$$\theta(t) = 2\pi\mu t^2 + 2\pi f_i t + \varphi \quad (3.4)$$

In questo modo $\gamma(t)$ avrà una dipendenza lineare da t .

$$\gamma(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \theta(t) = 2\mu t + f_i \quad (3.5)$$

In 3.5 f_i rappresenta la frequenza iniziale del segnale e $2\mu = k$ ovvero alla chirpizzazione discreta definita come

$$k = 2\mu = \frac{f_e - f_i}{T} \quad (3.6)$$

la quale non dipende più dal tempo ma è una costante. 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 . Ricapitolando, il segnale $s(t)$ sarà uguale a

$$\begin{aligned} s(t) &= A \cos(\theta(t)) = A \cos \left(2\pi t \left(\frac{k}{2} t + f_i \right) + \varphi \right) \\ &= A \cos \left(2\pi \frac{k}{2} t^2 + 2\pi f_0 t \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Dall'ultima equazione è possibile trarre 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.

Per aumentare l'efficienza delle trasmissioni, LoRa, utilizza i segnali chirp in combinazione ad una modulazione Spread Spectrum. Prima di analizzare in dettaglio l'implementazione dello Spread Spectrum nella modulazione LoRa, è utile introdurre un risultato derivante dal teorema di *Shannon-Hartley*. Nella teoria delle telecomunicazioni il teorema di Shannon-Hartley stabilisce il data-rate massimo ottenibile attraverso l'utilizzo di un canale di comunicazione rumoroso, senza la perdita di dati ad una larghezza di banda fissata.

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.8)$$

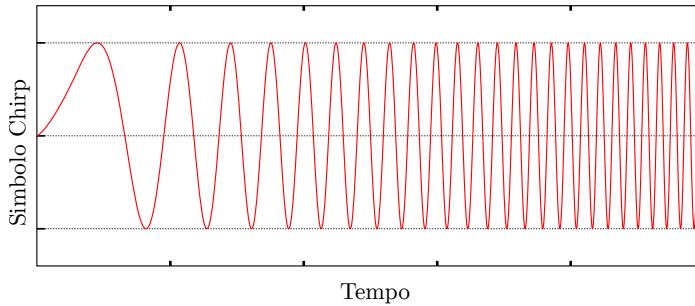


Figura 3.2: Esempio di segnale Chirp nel dominio del tempo

Dove C è la capacità del canale in [bit/s], B la larghezza di banda , S la potenza utile del segnale [Watts] e N la potenza del rumore presente nel sistema e $\frac{S}{N} = SNR$. Riformulando l'equazione precedente e passando al logaritmo naturale otteniamo

$$\frac{C}{B} = 1,442 \cdot \frac{S}{N} \quad (3.9)$$

Sapendo ora che le trasmissioni Spread Spectrum sono molto rumorose, non è sbagliato assumere $\frac{S}{N} \ll 1$. In questo caso l'equazione 3.9 diventa,

$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \quad (3.10)$$

dalla quale si evince un importante risultato: Per aumentare il data-rate di una comunicazione ,senza la perdita di informazioni, in un canale trasmissivo molto rumoroso, è necessario aumentare la larghezza di banda. Basandosi su questo risultato, Semtech ha progettato LoRa in modo tale che i segnali Chirp vengano distribuiti in modo uniforme in tutta la banda. Con questo si intende che, data una banda $B = [f_0, f_1]$, il segnale Chirp inviato dai dispositivi LoRa sarà distribuito uniformemente all'interno di 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 ad aumentare 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 *3.3. Utilizzando una modulazione Spread Spectrum in combinazione con i segnali di tipo Chirp, sono ottenibili numerosi vantaggi.

- L'utilizzo dello spettro in maniera efficace.

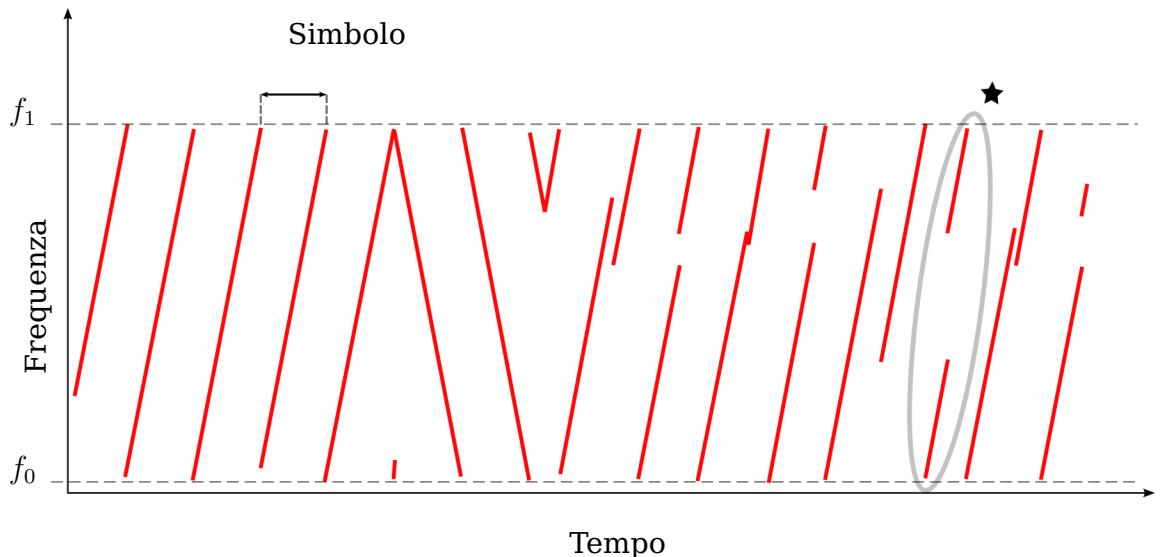


Figura 3.3: Segnale Chirp nel dominio della frequenza

- La possibilità di evitare collisioni nelle trasmissioni utilizzando segnali ortogonali.
- Ottima immunità all'effetto Doppler, rendendo possibile l'utilizzo dei dispositivi in mobilità.
- Ottima resistenza alle interferenze naturali.
- Ottima resistenza alle interferenze da parte di altri segnali.
- Per una fissata potenza di trasmissione e un data-rate fissato, LoRa permette di raggiungere distanze maggiori rispetto ad altre modulazioni.

3.2.2 Tuning LoRa

Uno degli aspetti peculiari del layer fisico è la possibilità di andare a variare tre parametri, in modo dinamico, per ottenere la massima efficienza nella trasmissione. Il primo parametro, che prende il nome di Spread Factor (SF), è l'indice di quanti bit sono utilizzati, all'interno di un segnale Chirp, per rappresentare un simbolo. Questo vuol dire che, preso uno SF pari a X , il segnale utilizzerà 2^X bit per la rappresentazione del 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

Il secondo dei parametri variabili, è la larghezza di banda utilizzata. Questo parametro, in combinazione allo Spreading Factor, determina il data rate del dispositivo. Nel modello di trasmettitore SX1272 è possibile utilizzare tre lunghe 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]. In alternativa, 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]. Per capire come questi due parametri insieme influenzino il data-rate, ci poniamo nel caso in cui la banda utilizzata nella comunicazione sia fissata a priori. Variando di un'unità lo Spread Factor, il trasmettitore impiegherà il doppio del tempo per l'invio del segnale 3.4.

$$T_s = \frac{2^X}{B}. \quad (3.11)$$

Nella formula 3.11 T_s rappresenta il tempo necessario per l'invio del simbolo, X lo Spreading Factor usato e B la banda. Analogamente un incremento della banda B comporterà un incremento della velocità con cui i segnali chirp vengono trasmessi ottenendo quindi un aumento del bit rate .

L'ultimo dei parametri variabili è la potenza impiegata nella trasmissione. Maggiore sarà la potenza impiegata, maggiore risulterà la distanza percorribile dal messaggio andando però a degradare la durata della

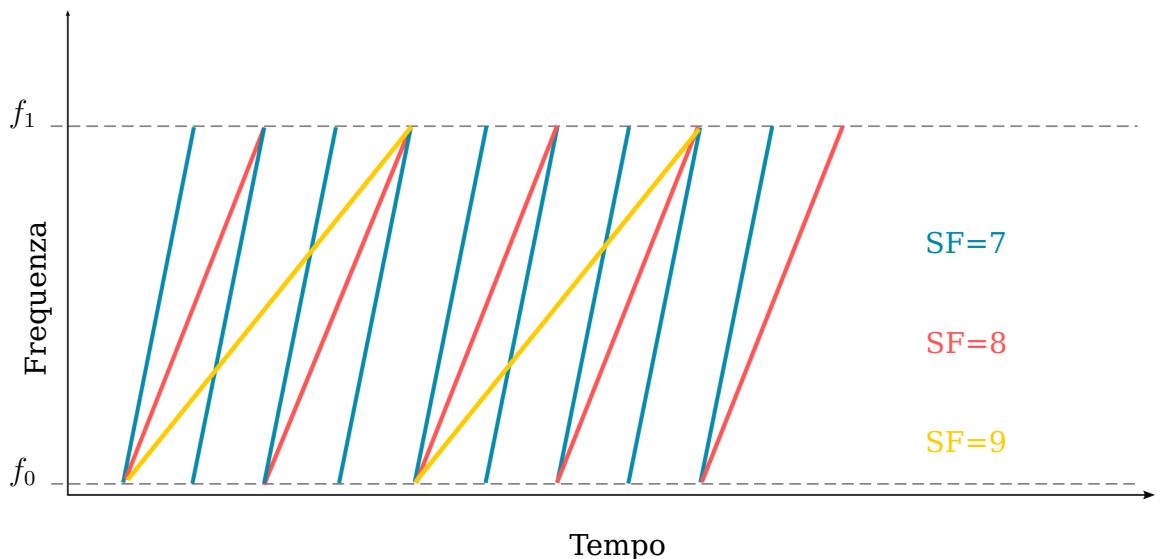


Figura 3.4: Comparazione simbolica dei vari SF

batteria.

Per ottenere la massima efficienza della rete, è necessario calibrare in modo opportuno questi tre parametri per ogni singolo device. Per questo motivo è necessario sottolineare che, un aumento del tempo impiegato per la trasmissione di un simbolo, permette al messaggio di essere più robusto alle interferenze e al rumore. In contrasto a ciò, un aumento dello Spread Factor comporta un aumento del numero di simboli codificabili nel segnale il quale ne renderà più difficile la decodifica. 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

$$S = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR \quad (3.12)$$

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 varia a seconda dell'hardware utilizzato e SNR è il valore del rapporto segnale rumore utilizzato in base alla tabella 3.1

3.2.3 LoRa packet

La durata della batteria dei dispositivi è un punto fondamentale sul quale la tecnologia LoRa è stata costruita. Per ottenere una durata della

batteria pari ad una decina d'anni, è necessario che i devices spendano la maggior parte del tempo in modalità deep-sleep e comunicino con il server solo in presenza di input esterni o all'attivazione di un timer. Inoltre, per utilizzare le risorse in maniera ancora più efficace, i devices non implementa nessun tipo di sincronizzazione con i gateways, utilizzano quindi un tipo di comunicazione asincrona. Queste scelte hanno portato all'implementazione di quello che può essere chiamato pacchetto del layer fisico 3.5. Ogni pacchetto inviato è composto da,

- *Preambolo*: data la scelta dell'utilizzo di una connessione asincrona, è necessario utilizzare un preambolo, composto da soli *UpChirp* in modo che il gateway sia in grado di determinare quando un dispositivo inizia l'invio dei dati. .
- *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 ridondanza 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 conterrà l'header. Per garantire il corretto funzionamento è dunque necessario che il payload sia di lunghezza fissata e nota al gateway al quale il messaggio è indirizzato. L'immagine 3.6 rappresenta la struttura di un pacchetto "fisico" LoRa. La prima parte della trasmissione, nonché il preambolo stesso è codificato con una serie di *UpChirp*. Tramite il preambolo, il gateway è in grado di capire quando un dispositivo inizia la comunicazione, così facendo, riesce ad allocare le risorse in maniera preventiva per la ricezione del dato. Concluso l'invio del preambolo, il dispositivo invia da una serie di *DownChirp* i quali rappresentano lo SFD *Start Frame Delimiter* tramite il quale il gateway è in grado di sincronizzarsi in maniera esatta nella frequenza utilizzata dal dispositivo. L'ultima parte, è composta da cambiamenti istantanei della frequenza da parte del segnale *UpChirp* il quale è un chiaro segno della presenza di "dati". Oltre alla modulazione,

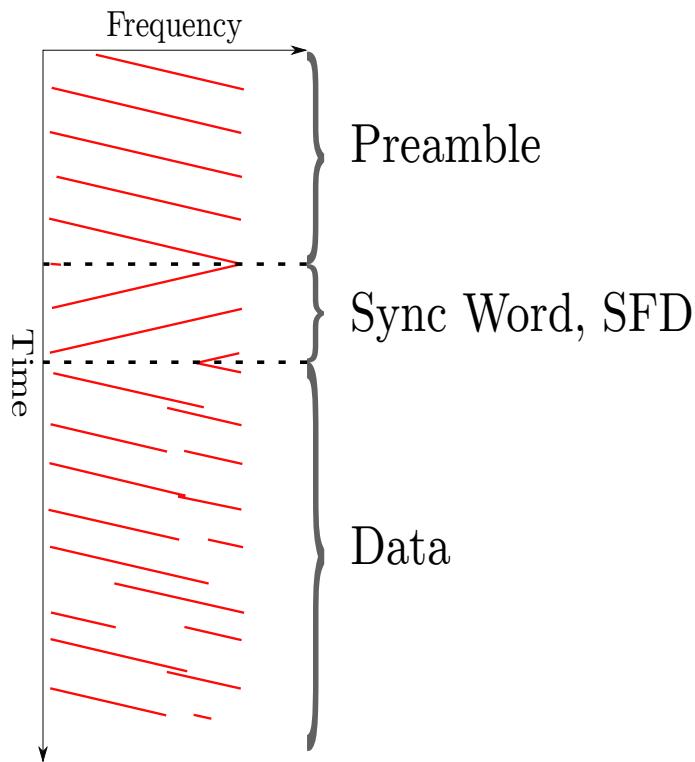


Figura 3.5: Struttura pacchetto Lora

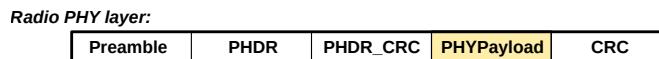


Figura 3.6: Pacchetto codificato dal layer fisico

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

- **Gray Indexing** procedura simile alla codifica Grey. È utilizzata per diminuire la probabilità di errore nel sistema.
- **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.
- **Interliving** è una tecnica utilizzata per diminuire la possibilità di errori nelle comunicazioni. Se il numero di errori presenti in una parola di codice, eccede il numero di errori correggibili, la parola non potrà più essere recuperata. L'interliving aumenta la proba-

bilità di compiere una trasmissione corretta, andando a scambiare in modo random i simboli all'interno del messaggio creando quindi una più uniforme distribuzione degli errori.

- **Forward Error Correction** è implementata tramite l'utilizzo dei codici di Hamming, la lunghezza della parola del codice è fissa e pari a 4, mentre la lunghezza della parola di controllo è un parametro che può variare da 5 a 8.

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

$$L_{payload} = 8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 44 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right\rceil + (CR + 4), 0 \right) \quad (3.13)$$

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 .

3.3 LoRaWAN

Basato sul layer fisico LoRa, LoRaWAN è un protocollo MAC o *media access control* open source, utilizzabile nelle comunicazioni LPWAN. Standardizzato tramite la LoRa Alliance, si prefigge il compito di mettere in comunicazione il device layer con l'application layer. Volendo fare un confronto con il modello OSI, LoRaWAN può essere collocato tra il secondo e terzo layer del suddetto modello.

[inserire link](#)

3.3.1 Tipologia di rete e classi di dispositivi

Per garantire un elevato numero di devices contemporaneamente connessi, LoRaWAN si basa su una topologia di rete a stella. In questa topologia gerarchica, gli *end devices* comunicano con il server solo attraverso i gateways, i quali, traducono i pacchetti LoRa in pacchetti UDP/TCP per poi inviarli server. Data la struttura della rete, ogni messaggio inviato dagli *end devices*, potrà essere ricevuto da uno o più gateways; starà

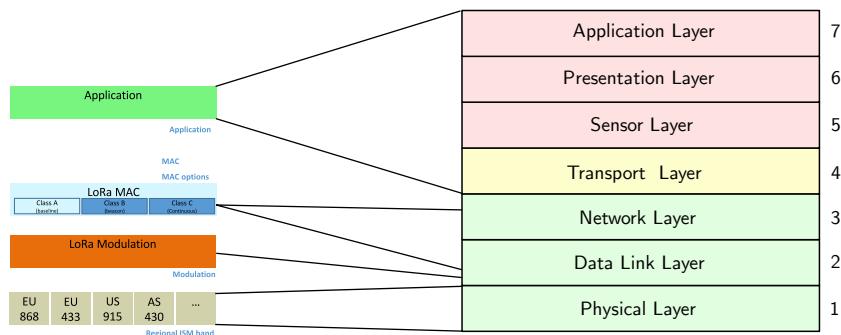


Figura 3.7: Comparazione del modello OSI con la struttura definita in LoRaWAN

quindi al server eliminare i duplicati e selezionare il gateway più adatto per rispondere al device.

Nella documentazione LoRaWAN sono definite tre classi di dispositivi ideate per diversi tipi di utilizzo. La classe principale è la classe A, questa classe è implementata in ogni dispositivo ed è quella usata nei dispositivi alimentanti tramite batteria. Le classi B, e C invece, sono una estensione della classe A. Questo tipo di classi sono riservate a devices alimentati tramite la rete elettrica oppure tramite fonti di energia esterne.

- **Class A** è la modalità di funzionamento predefinita. In questa modalità il device comunica in modo asincrono con il gateways. 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 l'invio di un nuovo messaggio da parte del device.
- **Class B** sono devices che estendono le funzionalità della classe A. Questi dispositivi sono sincronizzati con la Base Station attraverso messaggi *beacon* inviati dal gateway. Grazie a questa sincronizzazione, il gateway è in grado di comunicare con il dispositivo in intervalli di tempo prestabiliti.
- **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. Questa classe è adatta per comunicazioni che richiedono una bassa latenza. Ovviamente, ri-

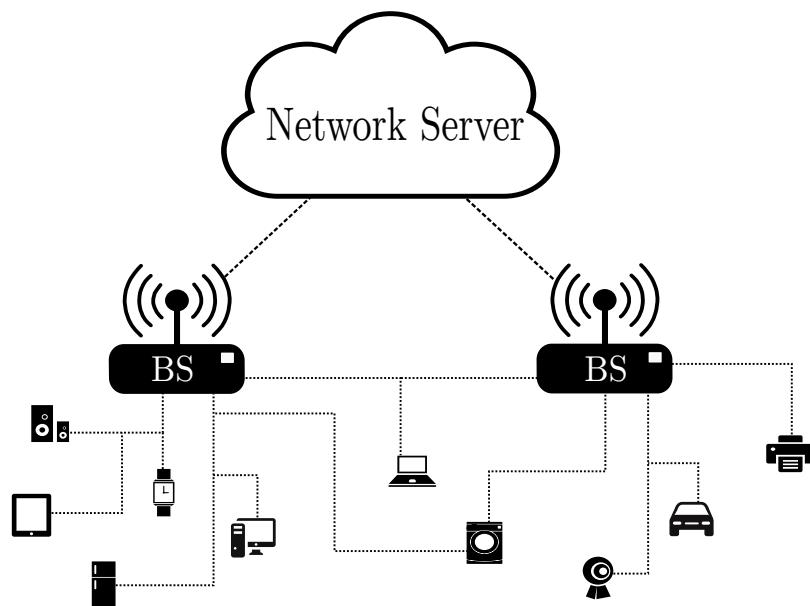


Figura 3.8: Struttura rete a stella LPWAN

manendo per la maggior parte del tempo in ascolto, i devices che operano con questa classe dovranno essere connessi ad una fonte di energia esterna

3.3.2 Bande di 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. A discapito di ciò, la regolamentazione in vigore per l'utilizzo di queste bande impone limiti severi sulla potenza di trasmissione utilizzabile e l'occupazione del canale nella trasmissione da ogni singolo dispositivo. Il protocollo LoRaWAN supporta sia le frequenze che vanno dagli 863-868[MHz] sia la banda dei 433[MHz]. Per la banda 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 dovrà rimanere in ascolto su tutti e tre questi canali, in particolare, essi formano un set comune utilizzabile nella *join procedure* di un nuovo device. Per quanto riguarda la banda dei 433[MHz], si hanno a disposizione sempre tre tipi diversi di canali

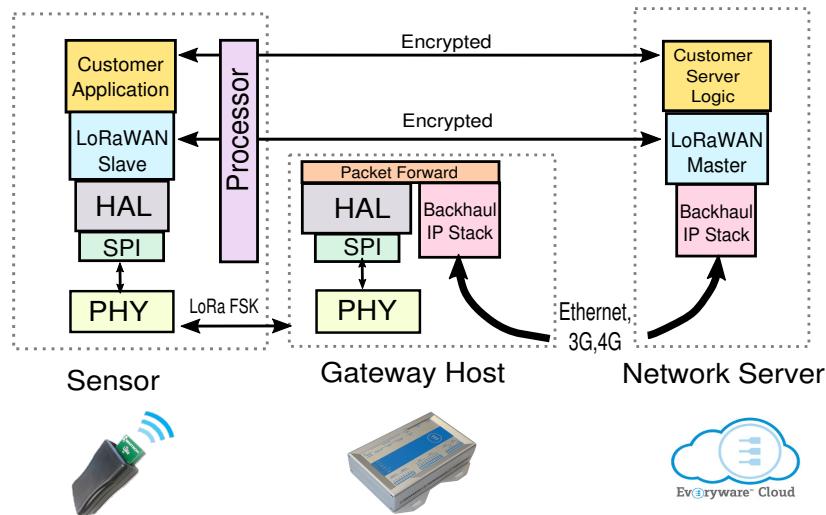


Figura 3.9: Stack del protocollo della rete LoRaWAN

per la *join procedure* (433.175, 433.375 433.575 MHz). 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

3.3.3 Sicurezza

Un aspetto fondamentale che non viene sottovalutato nella specifica LoRaWAN è la sicurezza. Ogni device LoRa implementa al suo interno due chiavi di sicurezza uniche *AppSkey* e *NwkSkey*, le quali sono criptate secondo le specifiche 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. Tramite questa chiave viene garantito lo scambio di informazioni in modo sicuro tra il device layer e l'application layer. Queste due chiavi (AppSkey, NwkSkey) sono uniche per ogni devices, e vengono rigenerate ad ogni volta che il dispositivo si spegne o cambia rete. Se il devices è attivato ,in modo dinamico, tramite la procedura OTAA *Over the air activation* queste chiavi vengono generate utilizzando una terza chiave chiamata AppKey sempre lunga 128 bits. Contrariamente, i devices che utilizzano la procedura APB *Activation by personalization*, manterranno invariate le chiavi anche per sessioni diverse, rendendo necessario un intervento manuale nella eventualità di un aggiornamento delle stesse.

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'applicatation 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 ,la bandwidth o la potenza utilizzata nella trasmissione 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 algo-

ritmo utilizzabile è quello consigliato da Semtech nella documentazione ufficiale.

3.5 Limitazioni

Essendo una tecnologia molto giovane, non sono ancora chiaro il limite della rete LoRa e delle reti LPWAN in generale. Un punto cruciale che pone ancora molti interrogativi, è la scalabilità di queste reti. Per cercare di rispondere a questa domanda, il ricercatore Maarten Wey e successivamente M.C.Bor e U.Roedig, hanno effettuato delle simulazioni sulla base dei dati forniti da Semtech. Il grafico precedente 3.10 è tratto dalla

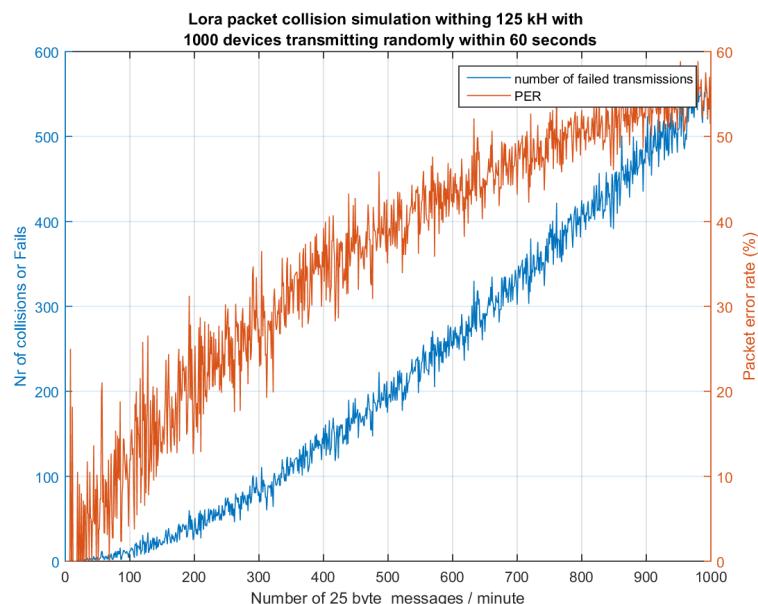


Figura 3.10: Simulazione prestazioni LoRa

simulazione di Maarten Wey. In esso, sono riportate il numero di collisioni avvenute durante la simulazione di una rete LoRa alla quale erano connessi 1000 devices tramite un solo gateway. Considerando un numero di messaggi per minuto pari a 300, si avrà una media di 100 collisioni. In concordanza con questi risultati, la simulazione effettuata da M.C.Bor e U.Roedig, dimostra che per un corretto funzionamento delle reti LoRa, il numero massimo di devices contemporaneamente connessi per gateway è 120. È importante osservare che i risultati, ottenuti da queste simulazioni, sono basati su di una rete composta da un solo gateway e l'utilizzo

di SF scelti in maniera casuale. È possibile inoltre osservare che, data la struttura della rete LoRa, raddoppiando il numero di gateway e ottimizzando l'algoritmo ADR, si ha la possibilità di raddoppiare ampiamente le capacità della rete.

Capitolo 4

Caso di studio

Con l'evolversi della tecnologia, ed in particolare con l'avvento dell'IoT, l'aspettativa delle applicazioni basate sul cloud è cambiata. La necessità di elaborare un numero sempre maggiore di dati ha spinto, sempre più aziende, ad adottare strumenti forniti da terzi. Ed è qui che l'architettura classica del software monolitico ha mostrato i suoi limiti. Con architettura monolitica si intende una applicazione self-contained, la quale è indipendente dalle altre applicazioni presenti nel sistema. Basandosi su questa architettura, ogni applicazione necessita di essere disinstallata e reinstallata nel momento in cui sia necessario apportare delle semplici modifiche andando a creare molti disagi all'utilizzatore finale della applicazione. Per superare i limiti della architettura monolitica, sono stati introdotte software basato su *microservices*. La differenza ,tra una architettura monolitica ed una basata su microservizi, è la modularità che quest'ultima garantisce. Prendiamo ad esempio una applicazione formata da un database, un interfaccia web (client-side user interface) e una applicazione server (server-side application). L'applicazione server-side interpreterà le richieste fatte dall'utente andando ad eseguire operazioni interne al server, aggiornerà il database e fornirà il risultato all'utente finale tramite l'interfaccia web. Questo tipo di architettura viene comunemente definita monolitica; è infatti necessario riscrivere o aggiornare l'intera applicazione per apportare delle modifiche o aggiungere delle funzionalità.

Con il termine *microservices* si intende una architettura basata su oggetti chiamati *component* ognuno dei quali fornisce ed utilizza *servizi*. Con *component*, si intende una "parte" di software che può essere aggiornata e sostituita indipendente dalla applicazione principale. Ogni

component si basa sull'utilizzo e la condivisione di servizi. I servizi sono l'equivalente delle librerie in una architettura monolitica, al contrario di queste ultime però, i servizi sono sviluppabili indipendentemente dalla applicazione principale. Se per esempio la nostra applicazione utilizza una libreria basata su altre librerie, un cambiamento ad una di queste ultime, necessita la riscrittura dell'intera applicazione. Contrariamente, se una applicazione è composta da tanti servizi, si ha la possibilità di risviluppare o aggiornare localmente il servizio senza dover riscrivere l'intera applicazione. In questo capitolo si studierà l'implementazione di applicativi per la gestione e l'interazione di sensori basati su LoRa tramite l'utilizzo del framework EveryWare Software Framework ESF sviluppato da Eurotech basato sul framework OSGi.

4.1 OSGi

La tecnologia OSGi è un insieme di specifiche che definiscono dei componenti dinamici per l'ambiente Java. Queste specifiche, garantiscono lo sviluppo di applicazioni composte da "moduli" i quali possono essere riutilizzati per applicazioni future. Nel framework OSGi questi moduli prendono il nome di *bundle*. Similmente alle applicazioni *jar*, ogni bundle è composto dai files contenuti le classi ed i metodi specifici per la applicazione che implementa. Quello che lo differenzia da un'applicazione *jar* è la presenza al suo interno di metadati utili al framework OSGi per determinare quali classi sono private ed utilizzabili solo all'interno dell'esecuzione del modulo, da quelle che possono essere esposte e riutilizzate dagli altri moduli. La possibilità del riutilizzo di questi moduli permette di creare applicazioni di ridotta complessità che utilizzano le API di . Il framework OSGi ha una struttura a layer la quale garantisce una maggiore sicurezza .

4.1.1 Ciclo vitale dei bundle

Data la modularità che questo framework offre, può capitare che dei bundle richiedano di utilizzare delle API messe a disposizione da un bundle non ancora presente nel sistema. Inoltre è necessario che questi errori vengano gestiti dal framework in modo tale da non bloccare l'esecuzione delle applicazioni. Per questo motivo OSGi ha implementato vari stati in cui un bundle può trovarsi:

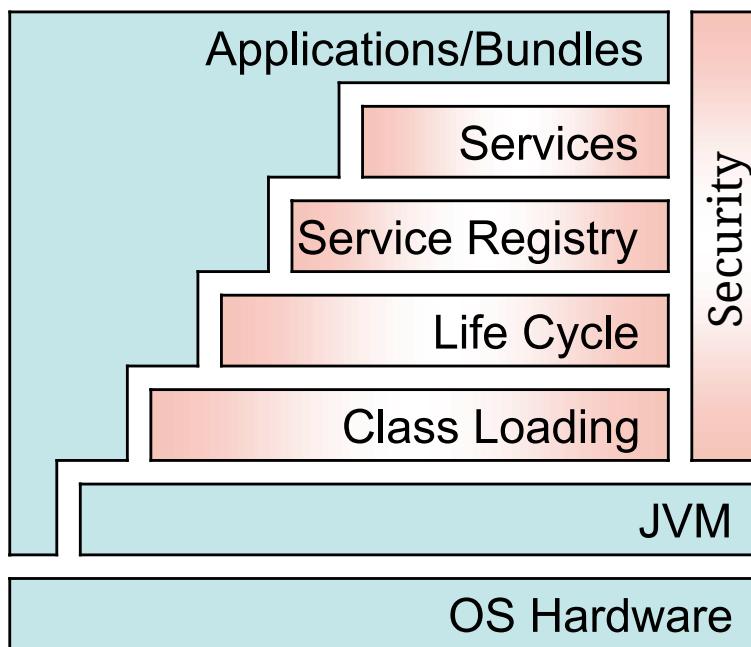


Figura 4.1: Layer OSGi

- *Installed* Il bundle è stato installato nel sistema, ma non sono presenti alcune delle sue dipendenze.
- *Resolved* Il bundle è installato e le sue dipendenze presenti nel sistema.
- *Starting* Uno stadio temporaneo attraverso il quale il bundle passa prima di essere attivato.
- *Active* Il bundle è stato correttamente attivato e sta eseguendo le sue funzioni all'interno del sistema.
- *Stopping* Uno stadio temporaneo in cui il bundle passa prima di essere disattivato.
- *Uninstalled* Il bundle è stato rimosso dal container OSGi

4.1.2 Registrazione del servizio

Dovendo garantire la modularità, è necessario da parte del framework essere costruito basandosi su di una architettura fail safe. La soluzione a questo, è l'utilizzo di registri di servizio. Ogni bundle può esporre dei

metodi ed registrarli attraverso il service registry. In questo modo, altri bundle possono accedere al service registry e utilizzare i metodi listati nel registro. Un bundle quindi può registrare un servizio, può utilizzare un servizio oppure può mettersi in attesa aspettando che un servizio venga registrato o eliminato. Inoltre i servizi sono dinamici, ogni bundle può mettersi in lista per richiedere un servizio mentre altri stanno ancora utilizzando il servizio.

4.1.3 Architettura del software

Per integrare ESF con il ricevitore lora SX1301, è stato necessario l'utilizzo di due software aggiuntivi. Il primo è LoRa packet forwarder, il quale è fornito da Semtech. Questo applicativo permette di astrarre ad un più alto livello i dati ricevuti dal ricevitore SX1301. L'altra applicazione utilizzata, è LoRa Gateway Bridge, la quale permette il reindirizzamento dei dati forniti dal packet forwarder ad un server Mqtt. 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 brohaar .

4.1.4 ESF

Everyware software framework, è la versione commerciale del software Kura preinstallata nel ReliaGATE 10-11..

4.2 Everyware Software

ESF o Everyware Software, è framework che si interpone tra il sistema operativo e le applicazioni utente. Basato su Java/OSGi, ESF si pone l'obiettivo di offrire al consumatore la possibilità di sviluppare in maniera semplice e veloce applicazioni per il mercato M2M. Ideato per operare all'interno di gateway industriali, fornisce al consumatore servizi e librerie per l'accesso delle più comuni porte di comunicazione RS232/485, GPIO, CAN. Grazie all'utilizzo di bundle, il consumatore, sarà in grado di aggiornare e riconfigurare l'applicazione a seconda del tipo di utilizzo.

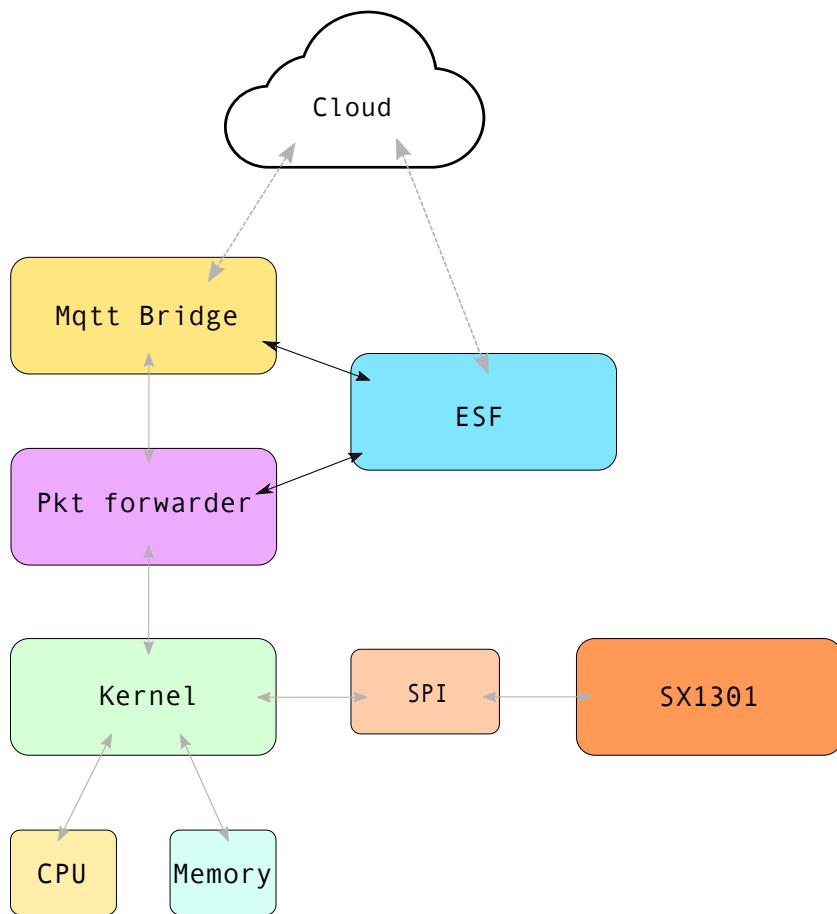


Figura 4.2: Architettura del software

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 4.4.

4.2.1 Semtech packet forwarder

Il packet forwarder, è un software che permette la ricezione e l'invio di 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 UDP, e li ritrasmette nella rete internet/intranet. Per la sua configurazione viene utilizzato un file Json nel quale troviamo tutte le varie opzioni di configurazione per i moduli radio presenti al interno del chip.

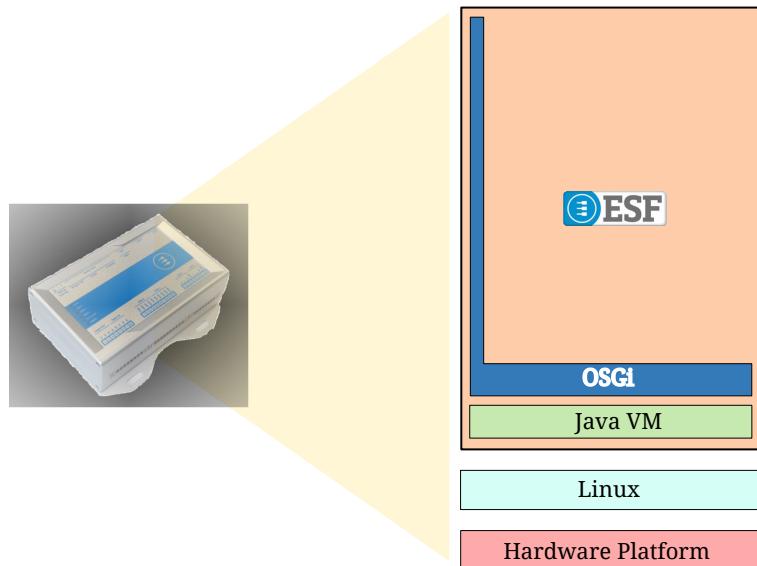


Figura 4.3: OSGi services

```
1 "SX1301_conf": {
2     "lorawan_public": true,
3     "clksrc": 1,
4     "radio_0": {
5         "enable": true,
6         "type": "SX1257",
7         "freq": 867500000,
8         "rss_offset": -166.0,
9         "tx_enable": true
10    },
11    "radio_1": {
12        "enable": true,
13        "type": "SX1257",
14        "freq": 868500000,
15        "rss_offset": -166.0,
16        "tx_enable": false
17    },
18    "chan_multiSF_0": {
19        "enable": true,
20        "radio": 1,
```

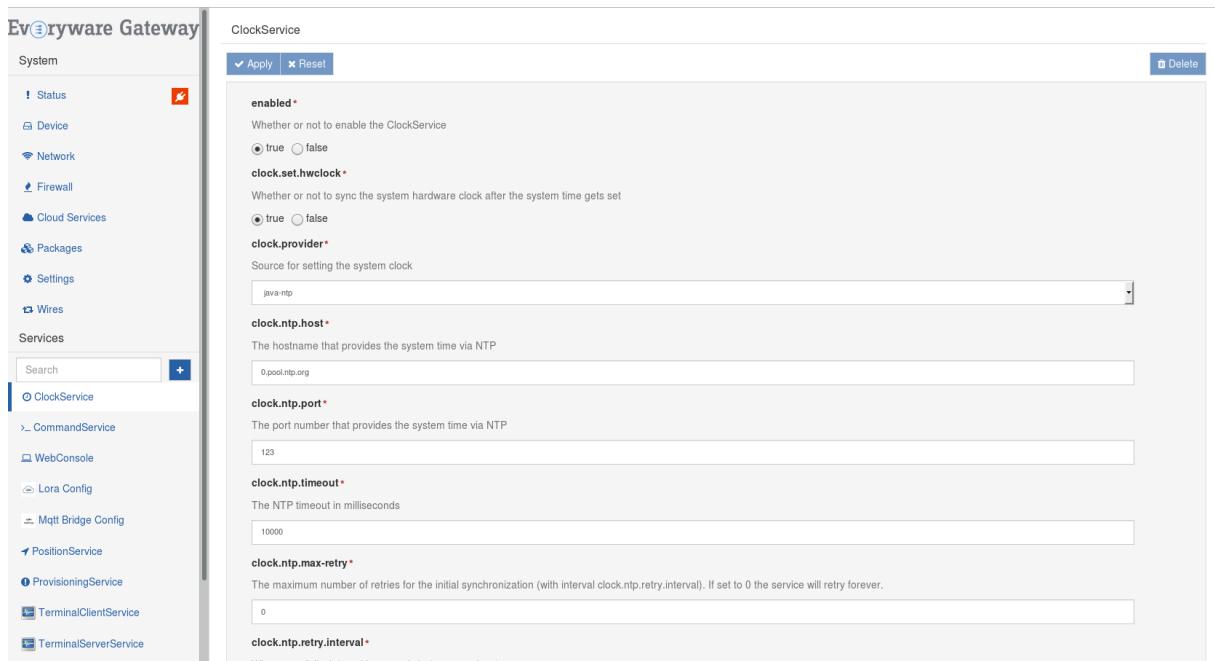


Figura 4.4: Interfaccia web ESF

```
22      "if": -400000
23  } ,
```

```
173  "gateway_conf": {
174    "gateway_ID": "AA55A00000000000",
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 }
```

4.2.2 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. Questo applicativo insieme ad altri, fa parte del software utilizzato da The Things Network. 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.

4.2.3 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
```

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
7          pktExecutor.execute(pktCmdLine);
8          s_logger.info("start PKT");
9      } catch (Exception e) {
10         s_logger.warn("Couldn't start pkt forwarder");
11     }
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 }
```

4.2.4 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 necessa-

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 4.5: Architettura del software

rio il riavvio del applicativo per fare in modo che le modifiche abbiano effetto, anche in questo caso è stata usata la libreria

```
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.

Mqtt Bridge Config

Apply Reset Delete

mqtt.settings.publish.topic*
Name of the topic for the forwarded packets.
 EnricoTopic3

mqtt.settings.subscribed.topic*
Name of the subscribed topic.
 MAC_address/rx

mqtt.settings.udp.server.and.port*
Udp server and port.
 0.0.0.0:1780

mqtt.settings.server.and.port*
Address and port of the mqtt broker.
 tcp://test.mosquitto.org:1883

mqtt.settings.username
Username.

mqtt.settings.password
Password.

Figura 4.6: Architettura del software

4.3 Hardware utilizzato

4.3.1 SX1301

Per ricevere i pacchetti LoRa, è stato utilizzato il ricevitore SX1301 prodotto da Semtech collegato al gateway ReliaGate 10-11.

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 del modulo radio.

Come scritto nella documentazione e intuibile dalla figura 4.7 il gateway rimane in ascolto su 8 canali diverse, permettendoli di coprire tutti i vari SF. Questo è possibile data la quasi ortogonalità degli Spreading

[inserire link](#)

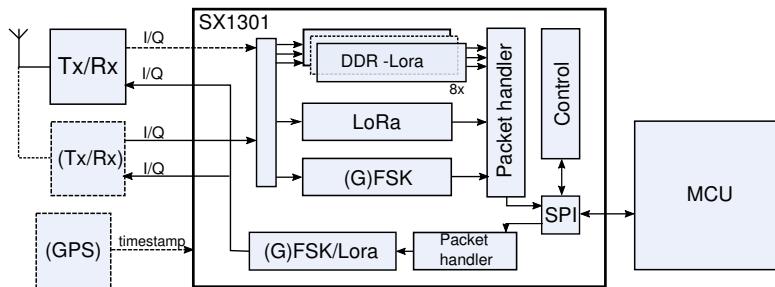


Figura 4.7: Struttura interna ricevitore SX1301

Factor , 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. 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 ideale 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 $VDDIO + 0.3$ 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_{DDIO}	Operating Conditions for Electrical Specification	3.0		3.6	V
Digital core supply	V_{DDCORE}	Operating Conditions for Electrical Specification	1.75		1.85	V
Ambient operating temperature	T_A	With chip paddle soldered to PCB ground plan with minimum 100 cm ² air exposed area and heat sink	-40		85	°C

Tabella 4.2: Caratteristiche elettriche SX1301

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

4.3.2 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) versione 5.

4.3.3 Misurazioni

Finito lo sviluppo dei bundle, si è scelto di testare la distanza massima di comunicazione raggiungibile utilizzando il device LoRa Mote ed il ricevitore in possesso. In via sperimentale, è stato installato il gateway ReliaGate 10-11 ad una altezza di circa 11m. La prova di ricezione è stata condotta per tentativi, cercando, per quanto possibile, di testare diversi punti distribuiti alla stessa distanza radiale. Per constatare l'avvenuta ricezione del messaggio, è stata utilizzata l'applicazione Android gratuita My MQTT, tramite la quale è stato possibile iscriversi ad un topic predefinito ed rimanere in ascolto dei messaggi pubblicati in esso. Come broker MQTT si è scelto di utilizzare il broker open source "mosquitto.org".



Figura 4.8: Caratteristiche elettriche SX1301

4.3.4 Osservazioni

Come è facile osservare dalla mappa in figura 4.11, la distanza massima raggiunta varia molto a seconda della conformazione del territorio. In assenza di edifici in linea d'aria, punto 8 nella figura 4.11, è stato possibile inviare un pachetto lora ad una distanza di 8.2[km]. Nelle effettuare la prova è stato scelto di inviare al server Mqtt solo i pacchetti ricevuti correttamente riga 10

```
1     "gateway_ID": "AA555A000000000000",
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
```



Figura 4.9: Dispositivo LoRa Mote

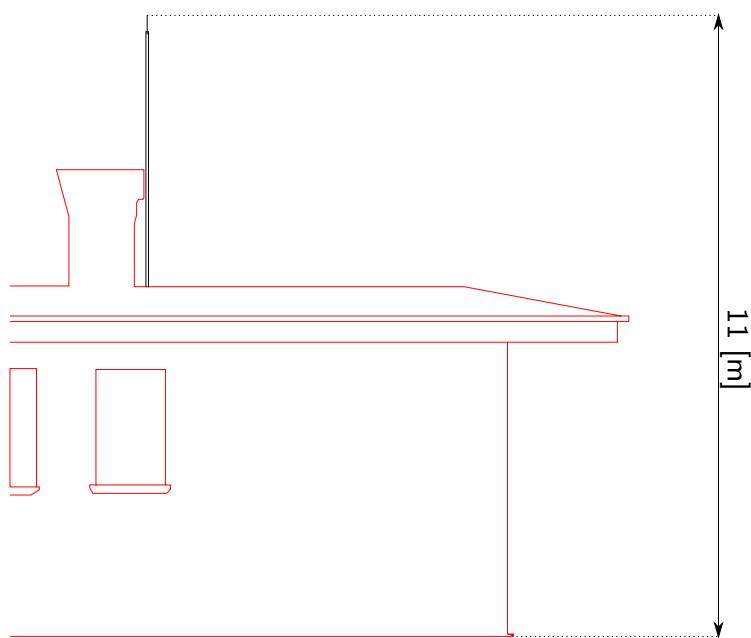


Figura 4.10: Installazione dell'antenna

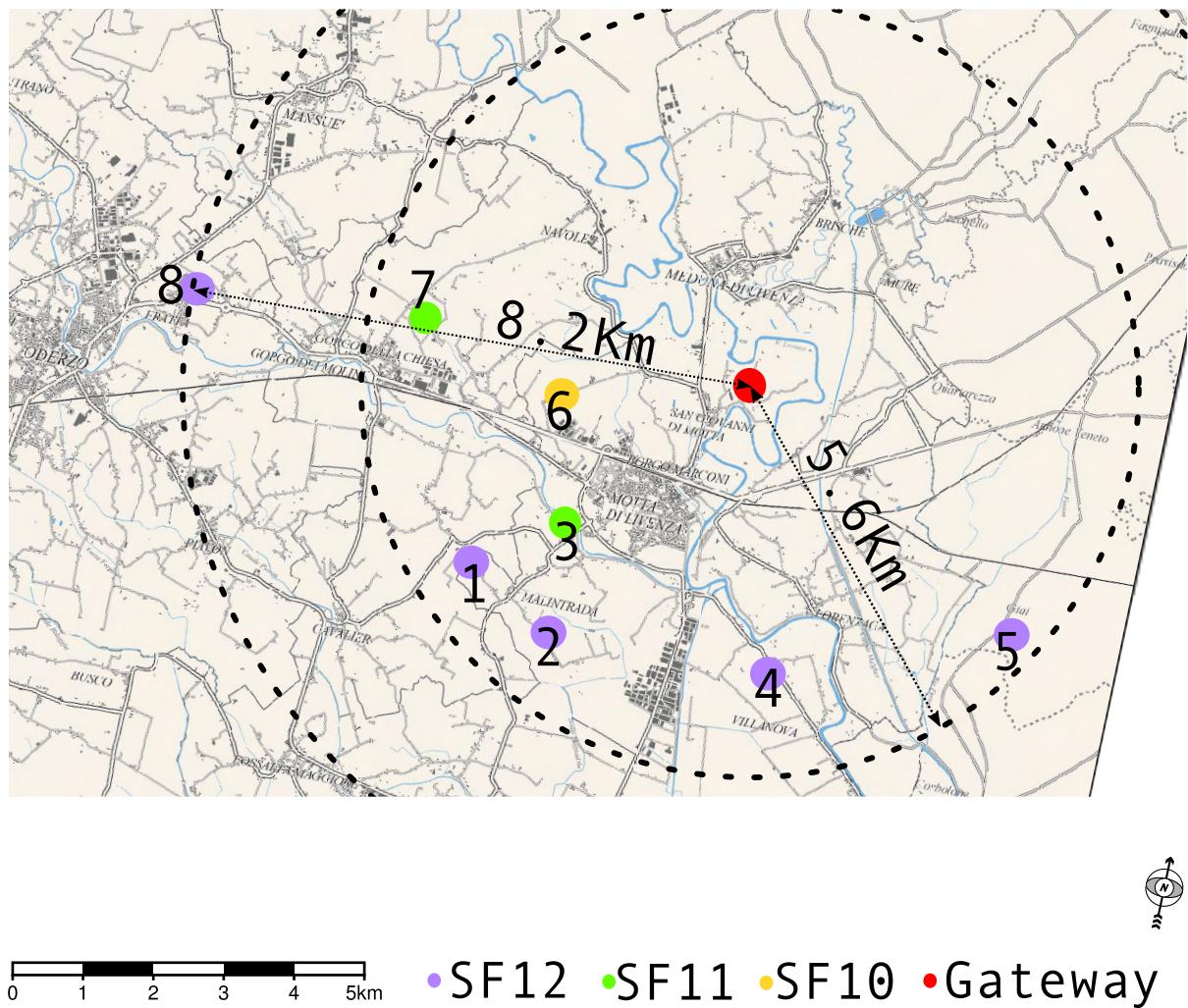


Figura 4.11: Copertura Lora

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.
- [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.