**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~~ in 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~~ vasta community attiva alle spalle. Per comprendere il funzionamento

di questa tecnologia ed i vantaggi che ne derivano ~~dal suo utilizzo~~

rispetto alle tecnologie concorrenti, e 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.

**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 (

\_25[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[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 trasmissione 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~~  un sistema di modulazione

basato su una tecnica ~~di~~ a spettro espanso che prende il nome

di Chirp Spread Spectrum (CSS).

**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 \_(t)

che varia nel tempo.

Andando ora a derivare la funzione \_(t) nel tempo, possiamo definire due

nuovi parametri, la frequenza istantanea (t) 3.2 ed un parametro che

chiameremo chirpizzazione istantanea c(t) 3.3.

A seconda di come viene scelta la funzione \_(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 ascegliere \_(t) come un argomento che dipende in modo quadratico dal

tempo.

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

In 3.5 fi rappresenta la frequenza iniziale del segnale e 2\_ = k ovvero

alla chirpizzazione discreta definita come

la quale non dipende più dal tempo ma è una costante. Dove fe è la

frequenza di finale, fi è la frequenza iniziale e T è il tempo impiegato dal

segnale per passare da fi a fe. Ricapitolando, il segnale s(t) sarà uguale

a

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 sinusoide.

• Se \_(t) è lineare, la frequenza è costante.

• Se \_(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.

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 S

N = SNR. Riformulando l’equazione precedente e passando al

logaritmo naturale otteniamo

Sapendo ora che le trasmissioni Spread Spectrum sono molto rumorose,

non è sbagliato assumere S

N \_ 1. In questo caso l’equazione 3.9 diventa,

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 = [f0; f1], 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 tc ad uno degli estremi della bada f0; f1, non

potendo continuare ad aumentare o diminuire la sua frequenza, è costretto

all’istante tc+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.

**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 2X 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 = 2X 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.

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 datarate,

ci poniamo nella situazione ~~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.

Nella formula 3.11 Ts 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 batteria.

Per ottenere la massima efficienza della rete, è necessario calibrare in

modo opportuno questi tre parametri per ogni singolo devices. 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

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 comunichino 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

implementano nessun tipo di sincronizzazione con i gateways, ~~utilizzano~~ utilizzando

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,

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 probabilità 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 fissata

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

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 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~~ sono invece delle estensioni 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 necessità di comunicare . 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

**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], LoRa-

WAN 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 canaliper 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%.

**3.3.3 Sicurezza**

Un aspetto fondamentale che non viene sottovalutato nella specifica Lo-

RaWAN 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 devices devono operare non è una ~~scelta~~  decisione semplice, ~~essa varia~~ essi variano dalla

regione in cui i devices operano e dallo stato della rete. Un possibile algoritmo utilizzabile è quello consigliato da Semtech nella documentazione ufficiale.

**3.5 Limitazioni**

Essendo una tecnologia molto giovane, non sono ancora ~~chiaro il limite~~ chiari i limiti

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 ill 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