



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA
INFORMATICA

NUOVE SOLUZIONI 6G PER LA COPERTURA DI RETI MOBILI

Relatore:
Prof. ROBERTO CORVAJA

Laureando:
RICCARDO SCALCO

ANNO ACCADEMICO 2023-2024
DATA DI LAUREA 23/09/2024

INDICE

INDICE.....	3
INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1 MOBILE NETWORKS.....	7
1.1 Definizione di rete mobile (mobile networks)	7
1.2 Architettura di una rete mobile.....	8
1.3 Vantaggi e svantaggi delle reti mobili.....	9
1.4 Storia delle diverse generazioni di mobile networks.....	10
1.4.1 1G	10
1.4.2 2G	11
1.4.3 3G	11
1.4.4 4G	11
1.4.5 5G	11
1.5 Standardizzazioni e organizzazioni di regolamentazione	12
CAPITOLO 2 6G	13
2.1 Introduzione al 6G.....	13
2.2 Reti eterogenee ultra-dense	14
2.3 Backhaul.....	15
2.4 Banda di frequenza.....	16
2.5 Frequenze terahertz	18
2.6 C-Band e Q/V-Band	19
CAPITOLO 3 RETI NON TERRESTRI	21
3.1 Definizione di rete non terrestre	21
3.2 Orbite.....	21
3.3 Tipi di nodi non terrestri.....	22
3.3.1 Nodi deterministici	23
3.3.2 Nodi flessibili.....	23
3.4 Droni, veicoli aerei senza pilota e piattaforme ad alta quota	23
3.5 Tipi di collegamento.....	25
3.5.1 Feeder links.....	26

3.5.2 Inter-node links	26
3.5.3 Service links.....	27
3.6 Architettura convenzionale e architettura distribuita	28
CAPITOLO 4 ARCHITETTURE DI RETE PER SISTEMI SATELLITARI.....	28
4.1 Satellite trasparente	29
4.2 gNodeB (gNB)	30
4.3 Satellite rigenerativo con gNB completo a bordo	31
4.4 Satellite rigenerativo misto.....	32
CONCLUSIONE.....	34
BIBLIOGRAFIA	35

INTRODUZIONE

Dagli anni Ottanta fino al giorno d'oggi le reti mobili hanno subito diverse innovazioni per gestire il crescente bisogno di connettività. Le prime generazioni erano create per soddisfare bisogni come invio di SMS o piccole ricerche sul web. Al giorno d'oggi invece, si richiede una prestazione migliore in termini di bit-rate e latenza per supportare nuove tecnologie come auto a guida autonoma, telemedicina e intelligenza artificiale.

Un obiettivo del 6G sarà quello di garantire connettività e migliori prestazioni sempre e ovunque. Il punto debole del 5G, infatti, è la gestione di aree remote o di aree particolarmente congestionate.

Per superare questo problema una possibile soluzione sono le reti non terrestri. Questa tipologia di rete vuole integrare i satelliti e in genere veicoli aerei all'infrastruttura terrestre per coprire più zone possibili.

La tesi è così strutturata:

Nel primo capitolo ho fornito una panoramica generale sulle reti mobili.

Il secondo capitolo è dedicato alla presentazione del 6G. Ho analizzato le caratteristiche tecniche e funzionali che queste reti dovranno soddisfare, e le tecnologie chiave che le supporteranno, come le reti eterogenee ultra-dense. Vengono inoltre descritte le principali bande di frequenza previste per il 6G, tra cui la C-Band e la Q/V-Band, e si esamina il ruolo delle frequenze terahertz nel garantire velocità di trasmissione dati senza elevate.

Nel terzo capitolo ho analizzato il concetto di reti non terrestri (NTN - Non-Terrestrial Networks), concentrandomi sui vari componenti. Si approfondisce lo studio delle diverse tipologie di orbite e di nodi non terrestri, tra cui nodi deterministici e flessibili, e delle piattaforme utilizzate, come droni, veicoli aerei senza pilota (UAV) e piattaforme ad alta quota (HAP). Inoltre, il capitolo descrive i diversi tipi di collegamento nelle reti NTN, quali i feeder links, gli inter-node links e i service links, e discute le differenze tra architetture

convenzionali e architetture distribuite, evidenziando i vantaggi di ciascun approccio in diversi scenari.

Nel quarto capitolo ho esaminato le architetture di rete specifiche per i sistemi satellitari. Si analizzano i satelliti trasparenti, che fungono da semplici ripetitori, e i satelliti rigenerativi, che includono capacità di elaborazione dati avanzata a bordo.

Capitolo 1

MOBILE NETWORKS

1.1 Definizione di rete mobile (mobile networks)

“Una rete cellulare o rete mobile è una rete radio distribuita su aree terrestri chiamate celle, ciascuna servita da almeno un ricetrasmittitore a postazione fissa, noto come stazione base (base station)”. Questa è la definizione di rete mobile data da Samsung, una tra le principali aziende produttrici di dispositivi mobile. [1]

Le celle possono essere unite per ottenere una copertura per un'ampia area geografica. In questo modo i dispositivi (ad esempio i telefoni cellulari) possono comunicare tra loro anche se durante la comunicazione cambiano cella.

Il compito principale della rete mobile è quello di instradare le comunicazioni da e verso gli utenti. [5]

Con il termine handover (o handoff) si fa riferimento a un processo di trasferimento di una connessione da una cella ad un'altra, mantenendo la continuità del servizio quando il dispositivo è in movimento. Durante l'handover la connessione del dispositivo viene spostata dalla cella di origine alla cella di destinazione. In base alla destinazione della connessione, si possono distinguere tre tipi di handover:

- Intracell handover: il trasferimento avviene all'interno della stessa cella, a cambiare è il canale radio. È usato per migliorare la qualità del segnale o per gestire la congestione della rete;
- Intercell handover: il trasferimento avviene tra celle diverse, ma controllate dalla stessa stazione base;
- External handover: il trasferimento avviene tra celle diverse e controllate da stazioni base diverse.

Con il termine handover verticale, invece, si fa riferimento ad un trasferimento tra sistemi wireless con tecnologia differente (ad esempio da una rete cellulare 4G ad una rete Wi-Fi).

Un concetto importante riguardo le reti mobili è quello di roaming. Si parla di roaming quando un dispositivo si sposta al di fuori dell'area di copertura della propria rete e utilizza un'altra rete appartenente ad un operatore diverso.

1.2 Architettura di una rete mobile

Come si può intuire dalla definizione precedente, il principale componente è la stazione base (base station), un ricetrasmittitore fisso che rappresenta il punto principale delle comunicazioni con uno o più dispositivi. Le comunicazioni sono dei segnali radiofrequenza che vengono gestiti tramite antenne RF.

Le stazioni base sono anche comunemente chiamate torri cellulari, cell towers in inglese. Le dimensioni di queste torri sono molto varie e dipendono soprattutto dall'area coperta e dal numero di dispositivi supportati. Nel caso la copertura sia di qualche chilometro l'altezza di queste torri può essere fino a 60 metri circa. Se ci troviamo invece in ambienti urbani la copertura può essere di pochi isolati e la grandezza delle base station è molto contenuta.

Nei prime generazioni di mobile network (1G e 2G) venivano utilizzate solamente celle di grandi dimensioni. L'aggiunta delle microcelle è avvenuta nel 3G [\[6\]](#). Questo ha portato dei vantaggi:

- Utilizzo efficiente dello spettro: utilizzando celle più piccole la stessa frequenza può essere utilizzata in un numero maggiore di celle. In questo modo le frequenze disponibili vengono usate in modo più efficiente. La condizione da rispettare è che queste celle non siano vicine per evitare di avere interferenze.
- Riduzione del consumo energetico: celle più piccole richiedono meno consumo energetico. Si tratta di un vantaggio anche per i dispositivi mobili in quanto viene richiesto un consumo di potenza minore e quindi meno utilizzo di batteria.

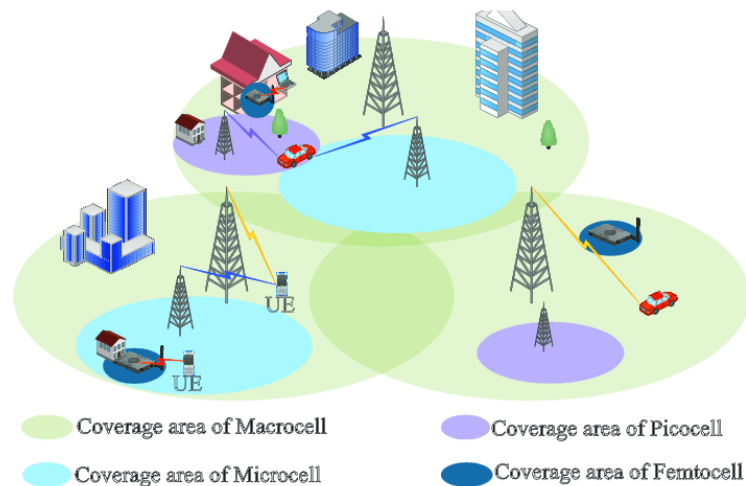


Figura 1 – Differenti grandezze di celle

Con l'avvenire di nuove generazioni (5G e 6G), emergono nuove possibili tecnologie che possono influenzare l'architettura. In particolare, le reti non terrestri, di cui parlerò nei capitoli 3 e 4, rappresentano un'innovazione per coprire aree rurali o difficilmente accessibili con una rete terrestre tradizionale.

1.3 Vantaggi e svantaggi delle reti mobili

Tra i principali pro delle reti mobili troviamo:

- Possono coprire una vasta area geografica e non sono dipendenti dai cavi fisici. In questo modo diventa possibile raggiungere anche aree più remote e rurali. Al giorno d'oggi però questo non è sempre considerabile un vantaggio in quanto in zone più remote manca l'infrastruttura.
- Gli utenti possono comunicare e accedere a Internet ovunque ci sia copertura.
- È possibile grazie all'architettura rimanere connessi anche quando si è in movimento: il dispositivo passerà automaticamente da una cella ad un'altra.

Gli svantaggi principali sono invece:

- Dipendono dall'infrastruttura: se questa venisse danneggiata il servizio offerto dalle reti mobili potrebbe essere limitato o nel caso peggiore scomparire.

- Mancanza di un servizio affidabile in aree densamente popolate o nelle ore di punta: ad esempio in un concerto o in uno stadio con molte persone collegate alla rete, spesso la connessione è lenta o del tutto assente.
- Impatto ambientale: le torri cellulari e più in generale l'infrastruttura possono un impatto visivo-ambientale negativo e contribuiscono al consumo energetico del pianeta. Per limitare questa cosa nelle città le microcelle spesso vengono camuffate in strutture già esistenti.
- Velocità: la velocità è sicuramente inferiore alle reti cablate in fibra. Con le nuove generazioni, però si sta cercando di limitare questa cosa.

1.4 Storia delle diverse generazioni di mobile networks

Nel corso degli anni si sono sviluppate diverse generazioni di rete mobili. Ogni dieci anni circa viene rilasciata una nuova generazione con l'obiettivo di migliorare e potenziare la precedente.

1.4.1 1G

Il 1G fu introdotto negli anni '80. Permetteva di effettuare chiamate. Le trasmissioni audio erano analogiche. Nasce in Giappone ma in breve tempo fu adottata anche nel resto del mondo. Venne utilizzata per una decina d'anni per poi essere sostituita dal 2G. I due principali standard utilizzati erano:

- Advanced Mobile Phone System (AMPS): richiede frequenze diverse per ogni conversazione, di conseguenza è necessaria una larghezza di banda considerevole se il numero di utenti è elevato. Il vantaggio è, rispetto alle tecnologie precedenti, che questo protocollo riusciva ad utilizzare frequenze uguali se le posizioni dei dispositivi erano abbastanza distanti.
- Nordic Mobile Telephony (NMT): un protocollo simile a AMPS utilizzato nei paesi nordici.

In generale entrambi gli standard avevano problemi legati alla sicurezza: le chiamate non erano crittografate e quindi era possibile ascoltarle utilizzando semplicemente uno scanner o una TV via cavo.

1.4.2 2G

Il 2G sostituì il 1G intorno agli anni '90. La differenza principale con il predecessore è che i segnali radio sono digitali. I tre vantaggi principali sono

- Conversazioni in parte crittografate (non in tutta la rete ma solo in alcuni punti).
- Utilizzo più efficiente della banda.
- Introduzione degli SMS.

Lo standard più comune in questo caso fu “Global System for Mobile Communications” (GSM) che si basa su una tecnica mista FDMA/TDMA in cui per ogni canale in frequenza, si suddivide il tempo in intervalli (slot). Questa tecnica divide il canale di comunicazione in fasce temporali, e ogni dispositivo può trasmettere solo nel proprio intervallo di tempo assegnato. In questo modo, più utenti possono condividere la stessa frequenza.

1.4.3 3G

Negli anni 2000 il 3G comincia ad essere commercializzato. Il grande passo in avanti rispetto alla generazione precedente è dovuto al fatto che consente di connettersi a Internet. Nonostante il grande impatto iniziale al giorno d'oggi è quasi dismesso a favore del 4G e 5G.

1.4.4 4G

Il 4G viene introdotto intorno al 2010. Le migliorie rispetto al 3G riguardano soprattutto la velocità, la latenza, la capacità di supportare più dispositivi collegati contemporaneamente e nuove antenne.

Negli anni è diventata la tecnologia più utilizzata nelle reti mobili.

1.4.5 5G

Negli ultimi anni è entrato in commercio anche il 5G. Le principali innovazioni riguardano, come per il 4G, la velocità, la latenza e la densità di utenti collegati.

Una possibile innovazione riguarda le reti non terrestri. Queste vengono permesse dallo standard 5G ma al momento non sono state utilizzate.

Come si può notare nelle prime generazioni le innovazioni erano notevoli e il passaggio tra diverse generazioni portava nuove funzionalità. Il confine tra le nuove generazioni invece non è così netto, ma si cerca semplicemente di migliorare l'architettura per fornire servizi migliori.

1.5 Standardizzazioni e organizzazioni di regolamentazione

Il processo di standardizzazione assicura che le tecnologie evolvano in modo sicuro e coerente a livello globale. Sono coinvolte diverse organizzazioni tra cui:

- 3GPP (3rd Generation Partnership Project): nasce nel 1998 con l'obiettivo di creare requisiti e specifiche per il 3G. Definisce inoltre protocolli per la comunicazione tra gli elementi della rete [\[7\]](#)
- ITU (International Communication Union): nasce nel 1865 e lo scopo principale è quello di gestire in modo efficiente lo spettro radio. Oltre a questo, cerca di portare la connettività a tutti.
- ETSI (European Telecommunications Standard Institute): nasce nel 1988 con l'obiettivo di creare standard europei per le telecomunicazioni. Diversi standard sviluppati poi sono stati adottati a livello globale e non solo europeo. Collabora inoltre a stretto contatto con 3GPP.

Capitolo 2

6G

2.1 Introduzione al 6G

L'introduzione del 6G nelle comunicazioni è prevista circa nel 2030 (seguendo quindi le tendenze per cui ogni nuova generazione è sviluppata ogni 10 anni).

Negli ultimi anni la comunicazione machine-to-machine ha avuto una crescita esponenziale dovuta dall'incremento elevato di dispositivi connessi. Ci si aspetta che nel 2030 il traffico nelle reti mobile sarà aumentato di 670 volte rispetto al 2010 [\[11\]](#).

Questo richiede alcuni cambiamenti e migliorie dell'infrastruttura di rete, in modo da aumentare capacità e resilienza.

Lo sviluppo del 6G deve quindi tenere in considerazione i seguenti fattori:

- il numero di dispositivi connessi è molto elevato, quindi dovrà supportare una grande densità. Inoltre, bisognerà cercare di coprire quando più possibile anche le aree più remote, tramite tecnologie come le reti non terrestri (NTN);
- il bit-rate deve essere elevato e la latenza bassa;
- il consumo di energia deve essere contenuto. Bisogna garantire un basso consumo sia per i dispositivi sia per l'infrastruttura stessa;
- bisogna prevedere un supporto per l'intelligenza artificiale e il machine learning, in modo da poter avere reti "intelligenti" che siano in grado di adattarsi dinamicamente alle condizioni del traffico e ottimizzare le prestazioni.

Di seguito viene mostrata una tabella per confrontare il 5G e il 6G in alcune caratteristiche:

	5G	6G
Picco della velocità dati (Peak Data Rate)	10 Gbps	1 Tbps
Latenza	10 ms	1 ms
Frequenza massima	90 GHz	10 THz

2.2 Reti eterogenee ultra-dense

Le microcelle rappresentano uno dei componenti fondamentali nel 5G. Anche nel 6G sarà così. Queste continueranno ad essere integrate in reti eterogenee ultra-dense. Con questa tipologia di rete ci si riferisce alle seguenti caratteristiche principali:

- Reti di densità estrema: la concentrazione di punti di accesso e di dispositivi all'interno di un'area geografica piccola è estremamente elevata (circa 10 milioni di dispositivi per chilometro quadrato [\[24\]](#)). L'alta densità di punti di accesso permette di ridurre la congestione e migliorare la performance e la qualità del servizio.
- Reti eterogenee: si utilizzano vari tipi di nodi di accesso, come macrocelle, microcelle, picocelle, e in generale celle di dimensioni diverse. Oltre a questi diversi tipi di celle sono comprese anche reti satellitari e in generale reti non terrestri.

Un esempio si può vedere in figura 2 [\[14\]](#). Le macrocelle (rappresentate da quadrati neri) seguono una configurazione ordinata e regolare. Le microcelle invece sono disposte in modo quasi casuale all'interno della zona coperta da una macrocella, cercando di coprire quanto più possibile tutto lo spazio della zona.

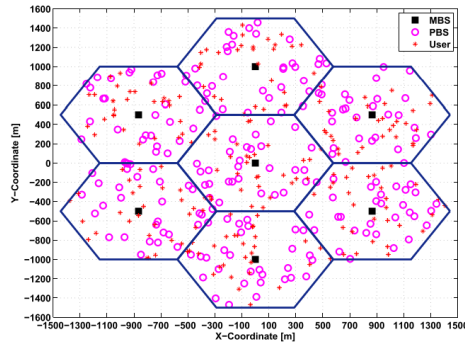


Figura 2 – Rete eterogenea ultra-densa [14]

2.3 Backhaul

Un altro aspetto che sarà da gestire in modo efficace nel 6G sarà quello riguardante il backhaul. Con questo termine ci si riferisce alla parte della rete che collega i punti periferici (nodi di accesso) con i nodi centrali della rete, dove i dati vengono elaborati e instradati.

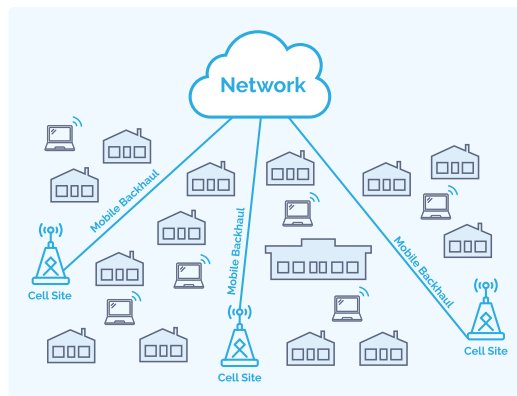


Figura 3: backhaul

[<https://tektelic.com/wp-content/uploads/25-Backhaul.svg>]

Con il 6G, la quantità di dati prodotti e trasmessi aumenterà in modo esponenziale grazie ad applicazioni come la realtà aumentata e virtuale, i dispositivi IoT, i veicoli autonomi e la comunicazione continua in tempo reale. Di conseguenza, il backhaul dovrà essere in grado di gestire questo aumento di traffico senza diventare un “collo di bottiglia”. Un backhaul inefficiente può causare ritardi, perdita di pacchetti di dati e riduzione delle prestazioni complessive della rete.

Per affrontare efficacemente questo problema, la soluzione più solida è l'utilizzo della fibra ottica, che garantisce una capacità di trasmissione estremamente elevata, bassa latenza e un'affidabilità anche su lunghe distanze. Tuttavia, in contesti dove l'installazione della fibra è impraticabile o troppo costosa, i sistemi ottici in spazio libero ("Free Space Optical" – FSO) offrono un'alternativa valida. Questi sistemi utilizzano fasci di luce laser per trasmettere dati attraverso l'aria, eliminando la necessità di cavi fisici. Richiedono una linea di vista diretta tra trasmettitore e ricevitore, e sono sensibili a fattori atmosferici come nebbia o pioggia. [\[11\]](#)

2.4 Banda di frequenza

Una banda di frequenza rappresenta un intervallo di frequenze elettromagnetiche utilizzato per la trasmissione di dati nelle comunicazioni wireless. Ogni banda è definita e identificata da un intervallo di frequenze specifiche.

La gestione delle bande di frequenze è regolata da enti che cercano di garantire un uso efficiente dello spettro e di ridurre al minimo le interferenze. Tra questi enti troviamo ITU (International Telecommunication Union) e FCC (Federal Communications Commission).

Le caratteristiche principali che influenzano le prestazioni e l'efficacia delle trasmissioni di dati attraverso una banda di frequenza sono:

- Copertura: rappresenta la capacità di un segnale di propagarsi attraverso l'atmosfera e di attraversare ostacoli, come edifici o alberi. Si misura in termini di distanza (ad esempio chilometri o metri);
- Capacità: rappresenta la quantità di dati che un sistema di comunicazione con una certa banda può trasportare in un dato intervallo di tempo. Le bande a frequenze più elevate offrono una capacità maggiore. Si può misurare con il teorema di Shannon:

$$C = B \log_2(1 + SNR)$$

dove B è la larghezza di banda del canale e SNR rappresenta il rapporto segnale-rumore (signal-to-noise ratio). La capacità viene misurata in bit per secondo (bps);

- Penetrazione del segnale: è la capacità di un segnale di attraversare ostacoli fisici. Misura come si comportano le onde radio quando incontrano un ostacolo. Viene calcolata in termini di attenuazione, quindi spesso si utilizza il decibel. L'attenuazione del segnale dipende dalla frequenza e dalla distanza e si può misurare attraverso la seguente formula:

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4 \pi f d}{c} \right)$$

dove c rappresenta la velocità della luce. Si può notare come l'attenuazione del segnale aumenti sia con la frequenza sia con la distanza, influenzando negativamente le prestazioni delle bande a frequenza più elevata.

Le bande vengono classificate in modo differente in base al loro intervallo di frequenze:

- Bande a frequenza bassa (“Low frequency” – LF): utilizzano frequenze tra i 30kHz e i 300kHz. Il loro vantaggio è di avere una capacità di penetrazione molto elevata, di conseguenza vengono usate principalmente per le comunicazioni a lungo raggio, tra cui quelle marittime e la radio AM;
- Bande a frequenza media (“Medium frequency” – MF): l'intervallo di frequenze utilizzate è 300kHz-3000kHz. Forniscono una buona combinazione tra copertura e capacità. Sono state usate principalmente per radio FM, per 2G e per 3G;
- Bande a frequenza alta (“High frequency” – HF): utilizzano frequenze tra 3MHz e 30MHz. Sono molto utilizzate per 4, 5G e comunicazioni satellitari. Offrono maggiore capacità, ma la copertura e la penetrazione del segnale sono ridotte rispetto a bande con frequenze minore;

- Bande a frequenza molto alta (“Very High Frequency” – VHF): le frequenze utilizzate vanno da 30MHz a 300MHz. Sono già in parte utilizzate per il 5G ma entreranno in funzione con il 6G. Le velocità offerte sono estremamente elevate. Presentano, però, limitazioni importanti in quanto il segnale è molto suscettibile all’atmosfera e agli ostacoli fisici.

Le frequenze più basse hanno lunghezze d'onda maggiori, in questo modo possono attraversare ostacoli fisici con maggiore facilità. Al contrario, le frequenze più alte, hanno lunghezze d'onda più corte, il che le rende più suscettibili a interferenze da parte di edifici o altri ostacoli fisici. La lunghezza d’onda di un segnale si può misurare attraverso la seguente formula:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

dove c è la velocità della luce e f la frequenza.

2.5 Frequenze terahertz

Nello spettro elettromagnetico la banda terahertz copre frequenze tra 100GHz e 10THz. È situata tra le onde millimetriche (utilizzate nel 5G) e le onde infrarosse (figura 4) [\[16\]](#).

Le frequenze terahertz offrono larghezze di banda di molto superiori rispetto a quelle utilizzate al giorno d’oggi nel 5G, che portano a velocità di trasmissioni dati di gran lunga maggiori, potenzialmente fino a 1 Tbps, come detto in precedenza.

Un altro fattore che porta al cambio di frequenze è la crescita del numero di dispositivi connessi. Questo numero sempre più elevato sta portando alla congestione delle frequenze più basse e passare a frequenze maggiori può aiutare a risolvere il problema. Queste frequenze permettono non solo di diminuire la congestione, ma permettono anche di supportare una maggiore densità di dispositivi.

Uno dei motivi principali per cui queste frequenze non sono ancora state utilizzate è la necessità di avere componenti (ricevitori, trasmettitori e antenne) che supportano la comunicazione a frequenze così elevate. I progressi fatti negli ultimi anni in materia di semiconduttori stanno rendendo invece possibile utilizzare anche frequenze terahertz.

Nonostante i vantaggi ci sono alcuni fattori che condizioneranno queste frequenze. In particolar modo hanno una portata ridotta e sono facilmente assorbite dall'atmosfera. Saranno quindi più adatte per comunicazioni a corto raggio in ambienti particolarmente congestionati.

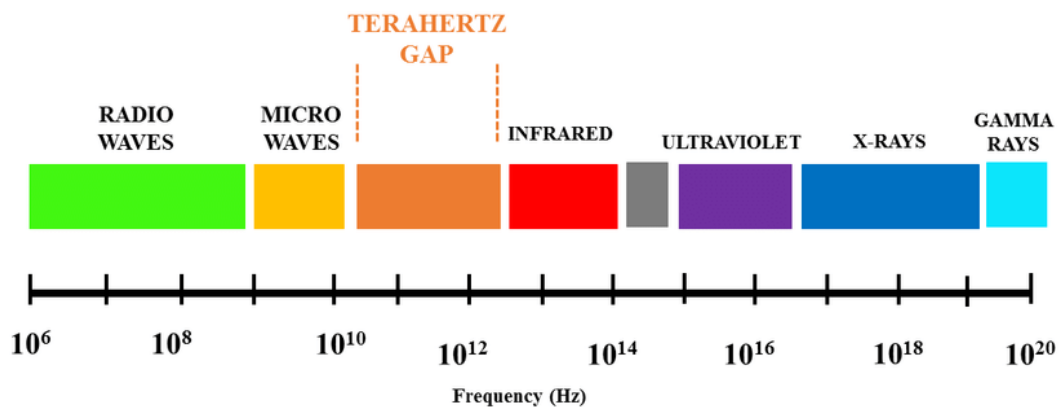


Figura 4 – Spettro delle frequenze

2.6 C-Band e Q/V-Band

Oltre alla banda terahertz si pensa di usare anche bande inferiori per gestirle al meglio tutte le possibili situazioni. Due tra queste bande sono [\[17\]](#) [\[21\]](#):

- C-Band: utilizza un intervallo di frequenze comprese tra circa 4 GHz e 8 GHz. Questa banda è stata utilizzata molto per comunicazioni satellitari. Offre un buon compromesso tra capacità di trasmissione dei dati e copertura. Ha due grandi limiti. Il primo è la congestione di queste frequenze, in quanto la C-Band è utilizzata per diversi utilizzi commerciali, tra cui telecomunicazioni terrestri, radar e recentemente reti mobili. Il secondo invece riguarda la larghezza di banda: frequenze

relativamente più basse significano larghezza di banda più limitata rispetto a bande con frequenze più elevate.

- Q/V-Band: l'intervallo di frequenze utilizzate è più alto, tipicamente tra 30 e 75 GHz. La larghezza di banda è molto maggiore, quindi la velocità di trasmissione dati è estremamente elevata. Gli svantaggi sono la scarsa penetrazione di ostacoli e l'elevata attenuazione atmosferica. Di conseguenza è più adatta per comunicazioni a corto raggio o per collegamenti satellitari nello spazio profondo in cui non sono presenti ostacoli.

Capitolo 3

RETI NON TERRESTRI

3.1 Definizione di rete non terrestre

Con il termine rete non terrestre (non-terrestrial network, in inglese) ci si riferisce ad ogni rete che comprende oggetti volanti. Fanno parte di questo ambito i satelliti, le piattaforme ad alta quota (high-altitude platform systems – HAPS) e le reti aria-terra (air-to-ground networks). [\[10\]](#)

3.2 Orbite

I satelliti possono viaggiare in diverse orbite [\[18\]](#):

- Low Earth Orbit (LEO): è l'orbita più bassa. Solitamente è compresa tra 500 e 2.000 chilometri. Il ritardo di comunicazione con i satelliti presenti in quest'orbita è minore vista la minor distanza. Serve però un numero elevato di satelliti per gestire in modo ottimale la copertura.

Un esempio di costellazione in quest'orbita è Starlink [\[19\]](#).

- Medium Earth Orbit (MEO): si trova ad altitudini comprese tra 8.000 e 20.000 chilometri. Offrono un buon compromesso tra copertura e ritardo. In ogni caso almeno inizialmente non verranno presi in considerazioni satelliti su quest'orbita.

- Geostationary Earth Orbit (GEO): è l'orbita che si trova a 35.786 km dall'equatore terrestre. Per trovare quest'altezza si può ricorrere alla terza legge di Keplero che dice:

“il quadrato medio del periodo di rivoluzione di un pianeta attorno al sole è proporzionale al cubo della sua distanza media dal sole”.

Consideriamo r come il raggio dell'orbita del satellite e si può ricavare:

$$r = \left(\frac{T^2 GM}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

dove T è il periodo orbitale (24 ore), G la costante di gravitazione universale e M la massa della terra. Successivamente conoscendo il raggio della terra si può ricavare l'altitudine del satellite:

$$\text{altitudine} = r - \text{raggio della Terra}$$

A quest'altitudine il satellite risulta fermo per un osservatore terrestre visto che ruota con la stessa velocità angolare della terra. I satelliti presenti qui risultano utili per comunicazioni costanti senza la necessità di passare da un satellite all'altro. Inoltre, la copertura che offrono è molto vasta; idealmente basterebbero 3 satelliti GEO per coprire tutta la superficie terrestre.

- Highly Elliptical Orbiting (HEO): nell'orbita ellittica questi satelliti si avvicinano e si allontanano dalla Terra durante il loro percorso. Questo particolare tipo di orbita, a differenza di quella circolare, permette di coprire alcune aree terrestri per periodi più lunghi.

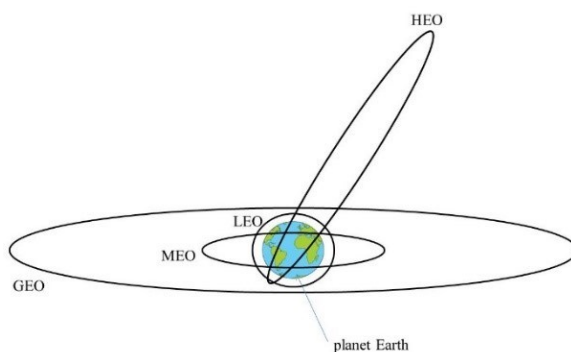


Figura 5 – orbite differenti [18]

3.3 Tipi di nodi non terrestri

Un nodo rappresenta un dispositivo o un punto di connessione all'interno di una rete. Sono componenti fondamentali in quanto consentono lo scambio di informazioni tra diversi dispositivi o segmenti della rete.

In particolare, i nodi non terrestri non sono collocati sulla superficie terrestre e compongono quindi la struttura delle reti non terrestri.

In base alle loro caratteristiche, possono essere divisi in due categorie principali: nodi deterministici (deterministic nodes) e nodi flessibili (flexible nodes) [20]. Combinando queste due tipologie di nodi si prevede di poter raggiungere aree più remote e offrire un servizio più affidabile anche nei momenti di elevata congestione.

3.3.1 Nodi deterministici

I nodi deterministici orbitano in un'orbita fissa (ad esempio quelle descritte in precedenza). Grazie alla loro posizione stabile e prevedibile sono utili per fornire un servizio di rete costante e regolare. Per questo motivo il loro compito sarà quello di creare e fornire un'infrastruttura non terrestre permanente e ben definita.

3.3.2 Nodi flessibili

I nodi flessibili non occupano posizioni specifiche e sono progettati per essere attivati o spostati in base alle necessità per gestire al meglio il traffico della rete. Sono quindi particolarmente utili per situazioni di emergenza o di particolare congestione. Non sono però destinati a formare una copertura permanente e globale.

Tra questi nodi troviamo le piattaforme ad alta quota e droni pesanti specializzati.

3.4 Droni, veicoli aerei senza pilota e piattaforme ad alta quota

I droni e gli “Unmanned Aerial Vehicle – UAVs” sono velivoli senza equipaggio. Vengono controllati da remoto o sono programmati per essere autonomi. Viaggiano ad un'altezza di poche centinaia di metri. Potranno avere un ruolo fondamentale nella copertura di aree remote e nella gestione di eventi di emergenza. I principali vantaggi sono:

- Flessibilità: possono diventare operativi in pochi minuti (il che è essenziale durante situazioni di emergenza).

- Costi ridotti: se usati solo quando necessario, il costo è sicuramente inferiore rispetto a un'infrastruttura fissa.
- Copertura maggiore in determinate situazioni. Può non essere vero, ad esempio, in situazioni di condizioni meteorologiche non favorevoli.

Non possono però essere usati per creare un'architettura fissa. Infatti, gli UAV hanno autonomia ridotta e necessitano di rifornimento rendendo impossibile il loro utilizzo per periodi di tempo prolungato. Inoltre, se usati in posizione fissa si andrebbe a perdere la mobilità, uno dei vantaggi principali degli UAV.

Più in alto degli UAV, ad un'altezza compresa tra venti e cinquanta chilometri si trovano le piattaforme ad alta quota (High Altitude Platform – HAPs). L'altezza corrisponde alla stratosfera quindi si trovano più in alto rispetto alle rotte terrestri ma sono al di sotto delle orbite satellitari. Si tratta, quindi, di una tecnologia intermedia tra i satelliti e le tecnologie terrestri.

L'autonomia è molto più elevata rispetto agli UAV. Le HAPs, infatti, possono rimanere in volo per diverse settimane o mesi, sfruttando energie rinnovabili, tra cui principalmente pannelli solari, per alimentarsi.

Uno dei vantaggi principali è la flessibilità: possono essere usate in punti fissi e mantenere la posizione per diverso tempo per raggiungere aree remote o possono essere rapidamente spostate per esigenze specifiche come, ad esempio, emergenze o catastrofi naturali.

Un esempio di utilizzo degli UAV è il progetto Loon gestito da Google [\[21\]](#). Tale progetto ha avuto inizio dieci anni fa e lo scopo principale era quello di fornire connettività ovunque e in ogni momento. Per raggiungere tale obiettivo si è scelto di utilizzare palloni stratosferici (figura 6). Nella stratosfera, i venti possono raggiungere velocità di 100 km/h e le temperature sono estremamente basse. Per questo motivo, i palloni dovevano essere progettati per operare in condizioni estremamente difficili. Dopo numerosi test, è emerso che i venti nella stratosfera si muovono a livelli o "strati" di altitudine. Ciò significa che i venti nella stratosfera non sono uniformi, ma variano in intensità e direzione a seconda

dell'altitudine. Scegliendo la giusta altezza, è possibile controllare la direzione del volo seguendo le correnti d'aria più favorevoli.

Il primo impiego concreto di questa tecnologia avvenne nei primi mesi del 2017, in seguito ad un'alluvione che colpì il Perù. L'inondazione distrusse gran parte delle infrastrutture terrestri, lasciando molte aree completamente isolate e senza accesso alla rete. Per far fronte a questa emergenza e ristabilire una connessione, furono lanciati tre palloni stratosferici. Questi palloni, capaci di operare ad alta quota, riuscirono a coprire l'area colpita garantendo l'accesso a Internet anche in assenza di infrastrutture a terra, colmando temporaneamente la mancanza.

Questa soluzione innovativa dimostrò l'efficacia della tecnologia dei palloni per ripristinare rapidamente le comunicazioni in situazioni di emergenza, dove le infrastrutture tradizionali erano assenti o danneggiate.

Nonostante i successi tecnologici raggiunti e i benefici dimostrati in situazioni di emergenza, il progetto è stato chiuso nel 2021 perché non riusciva a diventare economicamente sostenibile su larga scala.



Figura 6 – Pallone Stratosferico [\[21\]](#)

3.5 Tipi di collegamento

Un “link” è un canale (può essere visto come un percorso) che viene usato per trasmettere dati tra due o più dispositivi o più entità all’interno della rete. Per

quanto riguarda le reti non terrestri ci sono tre tipologie principali di collegamento [\[20\]](#).

3.5.1 Feeder links

Questa tipologia di collegamento ha il compito di trasmettere dati tra i nodi non terrestri (ad esempio i satelliti) e una stazione di terra chiamata “Ground Station”. Queste stazioni solitamente sono composte da antenne che garantiscono un maggiore guadagno, quindi una maggiore potenza trasmessa e ricevuta e un’affidabilità migliore rispetto ad un collegamento diretto con l’utente finale. Possono essere collegamenti in downlink (dallo spazio alla Terra) o uplink (dalla Terra allo spazio).

3.5.2 Inter-node links

Questo collegamento gestisce la connessione tra nodi non terrestri. Se entrambi i nodi sono satelliti il link può essere chiamato anche “Inter-Satellite Link”. Se, inoltre vengono usate comunicazioni ottiche la connessione si può chiamare “Optical Inter-Satellite Link”.

In base ai due tipi di nodi tra cui avviene la connessione si possono distinguere cinque casi:

- Collegamento HAP – satellite LEO: questo link è particolarmente utile visto che la piattaforma HAP non sempre sarà visibile ad una stazione terrestre. In questo modo un HAP può comunicare passando attraverso i satelliti LEO. Il trasferimento di dati avviene attraverso collegamenti ottici.
- Collegamento HAP – satellite GEO: il collegamento HAP-GEO risulta particolarmente complesso visto la grande distanza che c’è tra le due tipologie di nodi.
- Collegamento satellite LEO – satellite GEO
- Collegamento tra satelliti LEO
- Collegamento tra satelliti GEO

3.5.3 Service links

I service link forniscono un collegamento diretto tra i nodi non terrestri e gli utenti finali a terra. Anche in questo caso il collegamento può essere bidirezionale (downlink e uplink).

Capitolo 4

ARCHITETTURE DI RETE PER SISTEMI SATELLITARI

4.1 Architettura convenzionale e architettura distribuita

Per garantire una copertura uniforme e costante serve progettare in modo corretto l'architettura dei satelliti LEO. Questi satelliti si muovono più velocemente rispetto alla terra, quindi, è necessario fare in modo che si abbia la possibilità di passaggio da uno all'altro (è il processo di handover descritto nel capitolo 1).

Due possibili soluzioni per gestire al meglio la creazione di questo insieme di satelliti sono l'architettura convenzionale e quella distribuita [\[20\]](#).

Considero prima l'architettura convenzionale. In questo caso i satelliti sono tutti uguali tra loro. Ogni satellite è dotato di feeder link per comunicare verso la Ground Station ma tale collegamento viene usato solo se è disponibile la stazione a terra. Nel caso non fosse possibile per mancanza della stazione a terra i satelliti LEO hanno la possibilità di comunicare tra loro tramite comunicazioni ottiche (internode links).

L'architettura distribuita (figura 7) invece permette satelliti diversi. Si possono dividere in due gruppi principali:

- **Satelliti di servizio:** sono dedicati a fornire connettività agli utenti ma senza l'utilizzo di feeder link (usano quindi service link per connettersi all'utente finale). Non gli è permesso comunicare tra loro ma possono appoggiarsi ai satelliti feeder e per gestire questa comunicazione vengono usati i collegamenti "Inter-Satellite" descritti in precedenza.
- **Satelliti feeder:** non hanno collegamenti diretti con gli utenti e implementano lo scambio di informazioni tramite collegamenti

“Inter-Satellite” e tramite feeder links per comunicare con le Ground Station.

Ognuna delle due tipologie ha i suoi vantaggi. Quella convenzionale risulta più semplice visto che è composta da elementi uguali e risulta anche più economica perché necessita di meno satelliti (nell’architettura distribuita ogni satellite ha solo una funzionalità, ne servono di più quindi per coprire tutte le funzionalità). Però, rispetto all’architettura distribuita quella convenzionale ha capacità ridotta: ogni satellite deve dedicare una parte delle proprie risorse a più collegamenti diversi (sia service link sia feeder link), limitando quelle disponibili per gli utenti.

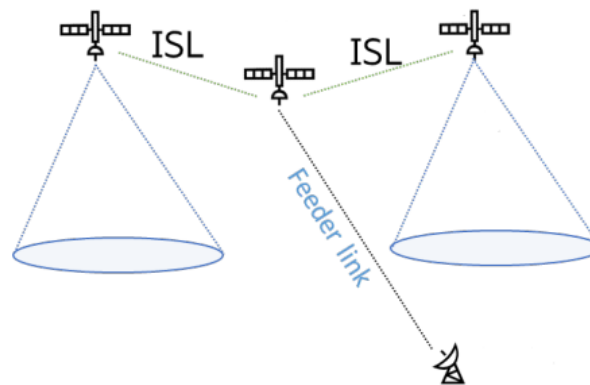


Figura 7 – Architettura distribuita

4.2 Satellite trasparente

Il satellite trasparente è una tipologia di satellite il cui unico scopo è di ritrasmettere il segnale nello spazio, senza elaborare o modificare significativamente i dati che trasporta. I grandi vantaggi di questi tipi di satelliti sono la semplicità e il costo: non deve gestire elaborazione di dati, quindi, richiede software e hardware meno complesso.

Il satellite trasparente è costituito principalmente da una serie di antenne riceventi e trasmettenti e da un transponder, che è l’elemento chiave per la

ritrasmissione del segnale. Le antenne ricevono il segnale dalla stazione terrestre, il quale viene amplificato e ritrasmesso verso la destinazione senza subire alcuna elaborazione significativa.

È utilizzato nella progettazione delle reti 5G non terrestri in cui l'obiettivo è fornire connettività maggiore utilizzando i satelliti come ripetitori di segnale.

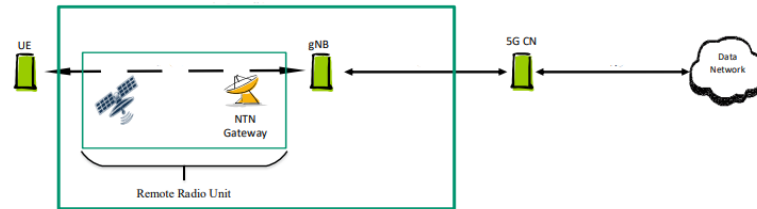


Figura 8- Satellite Trasparente [20]

4.3 gNodeB (gNB)

Il gNodeB è la stazione base responsabile della gestione delle comunicazioni radio tra l'utente finale e la rete di accesso.

È suddiviso in tre componenti principali:

- gNB-CU (Central Unit): è l'unità responsabile delle funzioni di controllo e gestione della rete, in particolar modo di quelle che richiedono elevata elaborazione ma sono meno sensibili alla latenza. Tra i compiti di questa unità c'è quello di gestire il protocollo RRC (Radio Resource Control). Si tratta di un protocollo di livello 3 il cui compito principale è la gestione del collegamento tra il dispositivo utente e la rete [23].

Un altro protocollo che risiede nell'unità centrale è il PDCP (Packet Data Convergence Protocol) che si occupa della compressione dei dati a livello di pacchetto. Altri compiti di questo protocollo sono la cifratura e decifratura dei dati e il controllo dell'ordine dei pacchetti per ricostruire i dati in modo corretto all'arrivo [22].

- gNB-DU (Distributed Unit): è l'unità con il compito di gestire funzioni di rete sensibili alla latenza. Si occupa della gestione di due protocolli:

- RLC (Radio Link Control): è responsabile della segmentazione e del riassettaggio dei pacchetti;
- MAC (Medium Access Control): è utilizzato per determinare in che modo i dispositivi possono accedere alla rete e condividere la sua larghezza di banda.
- RU (Remote Radio Unit): è l'unità che gestisce le operazioni a livello 1 (fisico), come la modulazione e la demodulazione del segnale radio. Gestisce le operazioni di trasmissione e ricezione delle onde radio e ottimizza la qualità del segnale con tecniche di beamforming e amplificazione.

Nelle reti non terrestri il gNB può essere implementato parzialmente o completamente a bordo di satelliti.

4.4 Satellite rigenerativo con gNB completo a bordo

In questo caso il satellite prevede l'integrazione delle funzionalità del gNB (le unità distribuite e centralizzate) completamente a bordo del satellite. In questo modo si può fornire una maggiore autonomia e capacità di elaborazione direttamente nello spazio, riducendo la dipendenza dalle stazioni di terra.

La capacità di elaborare dati direttamente nel satellite consente di gestire e instradare i pacchetti in modo più efficiente, riducendo la latenza del sistema. La latenza può essere scritta come:

$$L = d_{prop} + d_{trans}$$

d_{prop} rappresenta il ritardo di propagazione e si calcola $d_{prop} = \frac{x}{c}$.

c è la velocità della luce e x la distanza del collegamento.

d_{trans} invece è il ritardo di trasmissione che dipende dal bit-rate del nodo R e dalla lunghezza del pacchetto l : $d_{trans} = \frac{l}{R}$.

Sommando queste quantità per tutti i collegamenti si ottiene il ritardo totale del sistema. Si può notare banalmente che la latenza del sistema scende usando il

gNB completamente a bordo in quanto si necessitano di meno nodi (non è necessario il collegamento a terra per l'elaborazione dei dati).

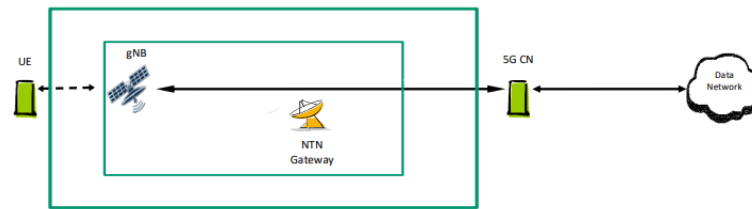


Figura 9 – satellite rigenerativo con gNB completo a bordo [20]

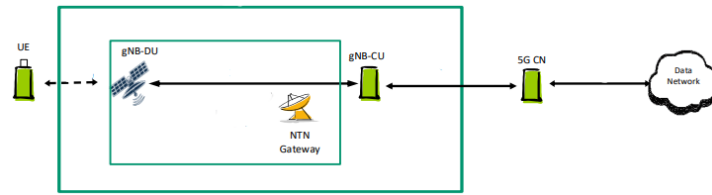
Ci sono però due possibili svantaggi da tenere in considerazione. Il primo riguarda il maggiore consumo energetico. L'aumento di elaborazione all'interno del satellite porta ad un consumo di potenza maggiore e di conseguenza ad una necessaria gestione corretta dell'alimentazione.

Il secondo riguarda la gestione della mobilità. I satelliti in orbita LEO si muovono costantemente a velocità elevate. È necessario garantire un rapido handover tra satelliti.

4.5 Satellite rigenerativo misto

È possibile una configurazione mista in cui viene mantenuto a bordo del satellite l'unità radio RU e l'unità distribuita. L'unità centralizzata rimane nelle stazioni a terra. In questo modo si possono bilanciare i carichi di elaborazione tra satellite e stazione terrestre.

Mantenendo l'unità radio e l'unità distribuita a bordo del satellite, è possibile gestire direttamente le operazioni fisiche e le funzioni di rete sensibili alla latenza nello spazio. L'unità centralizzata a terra, invece, si occupa delle funzioni che richiedono maggiore elaborazione e meno sensibilità alla latenza, come la gestione del protocollo RRC e PDCP.



*Figura 10 –
Satellite Rigenerativo Misto [\[20\]](#)*

CONCLUSIONE

Un aspetto cruciale per il futuro delle comunicazioni è l'integrazione delle reti non terrestri, come i satelliti e i droni. Grazie alla loro capacità di operare in ambienti poco serviti dalle reti terrestri, le reti non terrestri possono garantire una copertura globale più uniforme e continua, migliorando l'accesso alle comunicazioni in zone isolate e vulnerabili e superando le limitazioni attuali imposte da infrastrutture terrestri tradizionali.

Inoltre, le architetture di rete per i sistemi satellitari, che variano dai satelliti trasparenti ai satelliti rigenerativi, sono fondamentali per realizzare reti mobili più adattabili. La scelta dell'architettura dipenderà dalle specifiche esigenze di copertura e dalle risorse disponibili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Samsung – What is a cellular network or mobile network
<https://www.samsung.com/in/support/mobile-devices/what-is-a-cellular-network-or-mobile-network/>
- [2] Rohde-Schwarz – Breve storia delle comunicazioni mobili: dall'1G al 6G
https://www.rohde-schwarz.com/it/informazioni/magazine/brief-history-1g-to-6g/breve-storia-dal-1g-al-6g_256390.html
- [3] NordVPN – Cellular Network Definition
<https://nordvpn.com/it/cybersecurity/glossary/cellular-network/>
- [4] TechTarget – Base Station
<https://www.techtarget.com/whatis/definition/base-station>
- [5] Dialogic – Mobile Network (MN)
<https://www.dialogic.com/glossary/mobile-network-mn>
- [6] Structure and network control of a hierarchical mobile network architecture
<https://www.ieeexplore.ieee.org/document/472421>
- [7] 3GPP – Introducing 3GPP
<https://www.3gpp.org/about-us/introducing-3gpp>
- [8] ITU – About ITU
<https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>
- [9] ETSI
<https://www.etsi.org/about>
- [10] 5G from Space: an Overview of 3GPP Non-Terrestrial Networks
<https://www.arxiv.org/abs/2103.09156>
- [11] 6G Wireless Communication Systems
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9144301>
- [12] CCM
<https://it.ccm.net/contents/631-telefonia-mobile>
- [13] 5G Backhaul Challenges and Emerging Research Directions: A Survey
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7456186>

- [14] Joint Cell Activation and Selection for Green Communications in Ultra-Dense Heterogeneous Networks
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8169674>
- [15] Frequency Bands & Applications
<https://jemengineering.com/blog-frequency-bands-and-applications/>
- [16] Terahertz Technology
<https://terasense.com/terahertz-technology/>
- [17] Frequency Bands
<https://www.everythingrf.com/tech-resources/frequency-bands>
- [18] Non-Terrestrial Network
<https://www.3gpp.org/technologies/ntn-overview>
- [19] Starlink
<https://www.starlink.com/>
- [20] 6G NTN
<https://www.6g-ntn.eu/download/6g-ntn-d3-5/>
- [21] Loon Project
<https://x.company/projects/loon/>
- [22] PDCP
<https://www.techplayon.com/5g-nr-layer-2-packet-data-convergence-protocol-pdcp-overview/>
- [23] RRC
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/radio-resource-control>
- [24] The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey
<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9349624>