



# Seminario DGTCSI

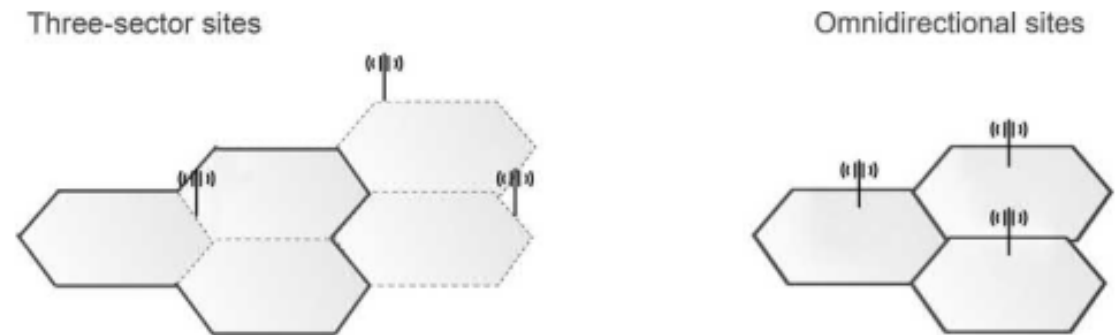
NEW RADIO – NR 5G &  
Beyond



- Evoluzione dello standard 3GPP per la New Radio
  - Requisiti per IMT2020 e capabilities di NR
  - Le tappe delle release approvate
  - Il percorso verso 5G-Advanced e Beyond 5G

- Una rete cellulare è un'infrastruttura progettata intorno alla necessità di servire più utenti disposti all'interno di una grande area geografica;
- La rete consiste in multipli siti d'accesso a cui gli utenti si connettono in base al segnale ricevuto offerto;
- L'area coperta da un'antenna è tradizionalmente chiamata «cella»;
- Le risorse, e.g. frequenze, sono limitate perciò è necessario applicare delle forme di riutilizzo tra i diversi siti;
- L'interferenza dovrà essere controllata in modo appropriato;
- Il riuso prevede che i siti dislocati nelle vicinanze utilizzino canali diversi ed è dimostrato che le topologie:
  - a griglia esagonale con antenne omnidirezionali;
  - a tre settori con antenne con apertura a  $120^\circ$

garantiscono le prestazioni migliori



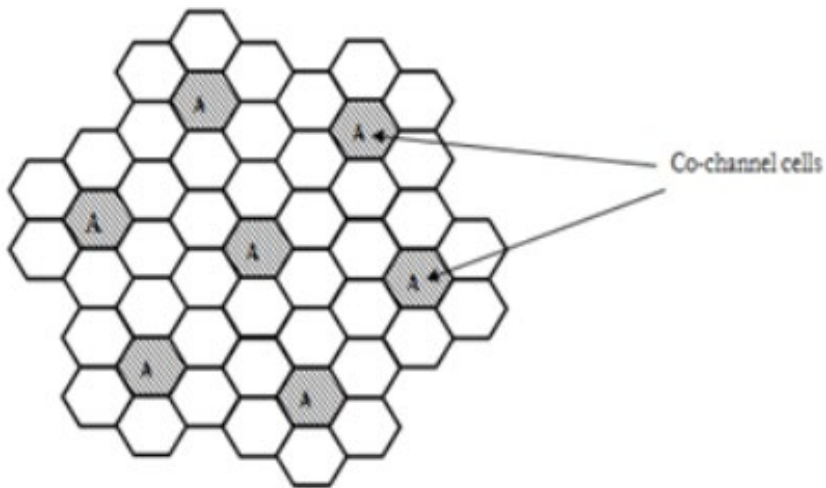
Per le celle esagonali la distanza di riuso è uguale a:

$$D = \sqrt{3N} \times R$$

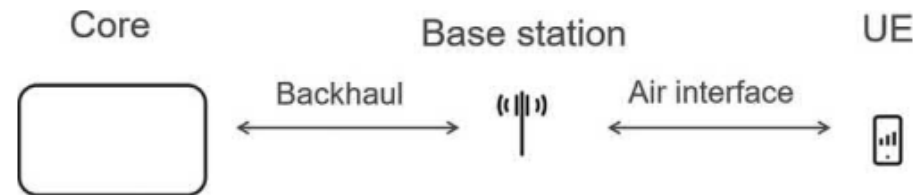
Dove R rappresenta il raggio della cella e N è il fattore di riuso (numero di celle per cluster)

Il fattore di riuso si calcola come:

$$\frac{D}{R} = \sqrt{3N}$$

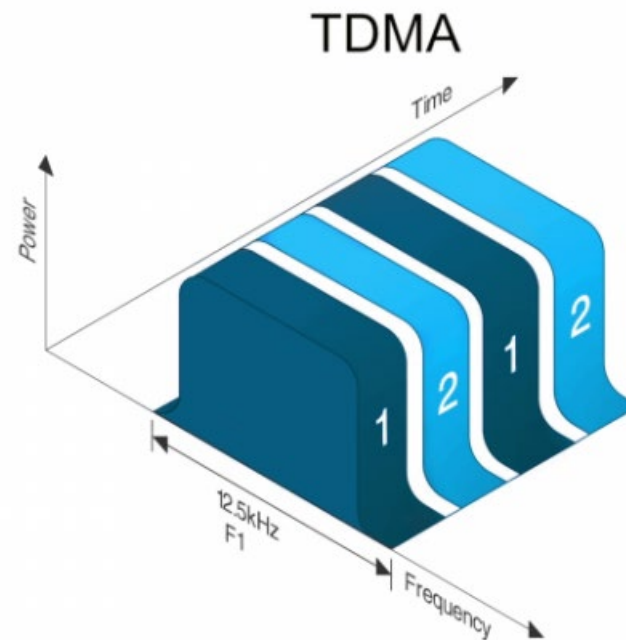


- Affinché sia possibile stabilire una comunicazione, la **Stazione Base** (BS) raccoglie i dati dell'**User Equipment** (UE) e li inoltra alla **Core Network** (CN);
- Il link tra la stazione base e la core network è chiamata **backhaul**;



- Un aspetto chiave della rete mobile è la gestione della mobilità dell'utente; in particolare il processo di trasferimento della connessione prevede la misurazione del campo relativo tra le diverse BS e la produzione di un report;
- In funzione dei risultati del report si attua il trasferimento della connessione, questo processo viene definito **handover**;

- Lo **Scheduling** è un'altra funzionalità chiave della stazione base che abilita l'*user multiplexing*;
- Tutti i dispositivi connessi serviti da una cella condividono una quantità limitata di risorse;
- Negli anni la complessità degli scheduler è aumentata; nel GSM gli utenti erano gestiti mediante una griglia temporale (time multiplexing) in cui l'accesso al canale avveniva periodicamente;

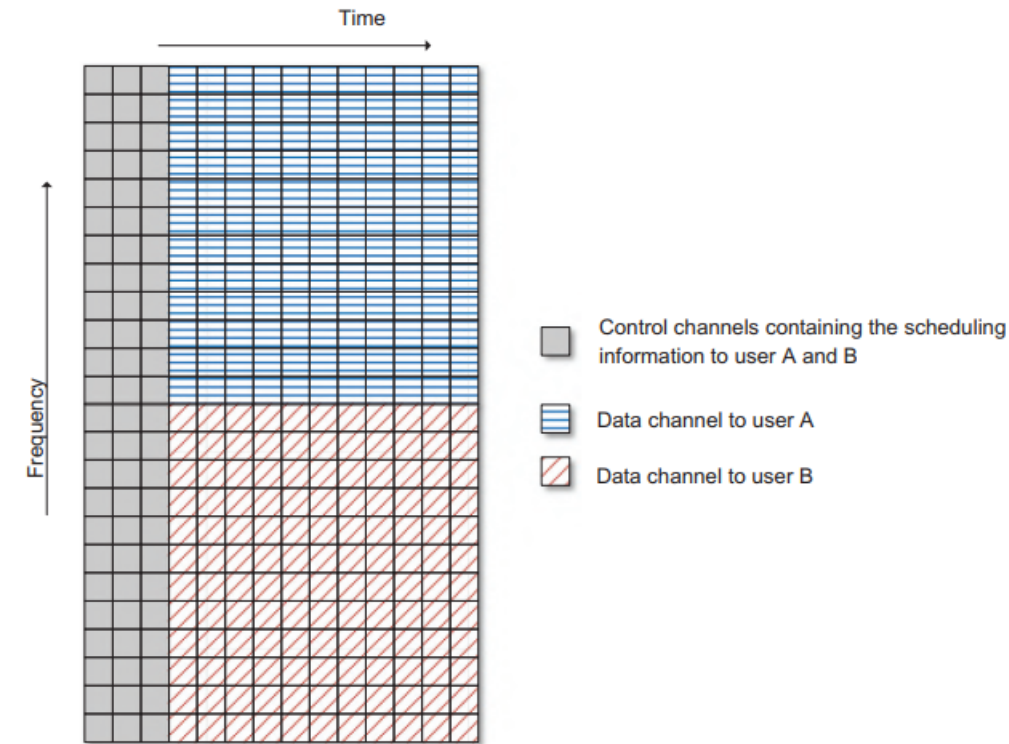


- All'inizio degli anni 90 sono stati introdotti i sistemi di comunicazione 2G;
- Banda 900 MHz;
- Accesso di tipo TDMA;
- Progettato per circuit-switched voice e servizi low data rate;
  - La circuit-switched network è una configurazione in cui le informazioni vengono scambiate lungo una connessione singola e dedicata. In questo tipo di rete la larghezza di banda ed il rate sono fissati;
  - Al contrario le packet switching network organizzano i dati in pacchetti (bits) composti da un header ed un payload e l'indirizzamento prevede l'utilizzo di più percorsi;
- Successivamente è stato introdotto l'utilizzo di nuove frequenze (e.g. 1800 MHz);
- I criteri di sviluppo non prevedevano più la sola massimizzazione della copertura ma si iniziò a lavorare anche sulla capacità: sviluppo rete 3G;

- Le frequenze di riferimento sono quelle nell'intorno dei 2 GHz (2.1 GHz);
- L'utilizzo di frequenze più elevate richiesero una densificazione delle stazioni base per compensare la maggiore attenuazione;
- Più tardi venne deciso l'utilizzo delle frequenze 850-900 MHz in quanto si era reso necessario il miglioramento della copertura deep indoor;
- Accesso di tipo CDMA: consente prestazioni migliori in termini di data rate;
- Nelle sue prime versioni questo incremento non fu garantito perciò venne introdotta l'evoluzione HSPA;
- Utilizzo dell'High-Speed Downlink Packet Access protocol (HSDPA): data rate 14.4 Mbps vs 384 Kbps;
- Le caratteristiche del traffico cambiarono rapidamente e, dalla visione voce-centrica, si passò ad una rete pacchetto-centrica;

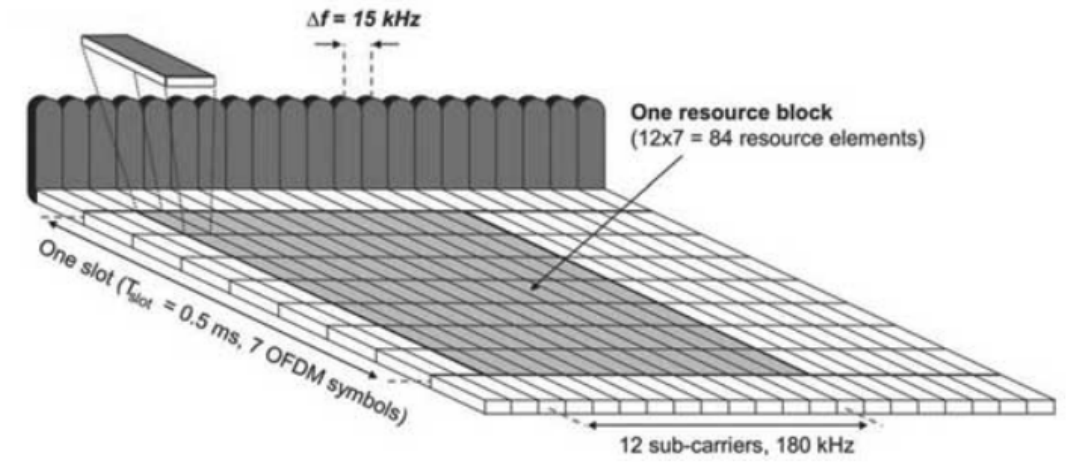
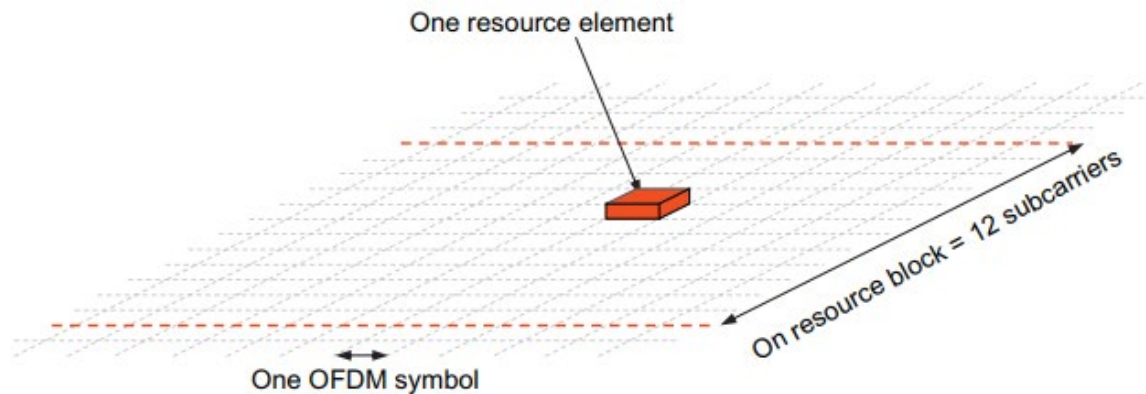


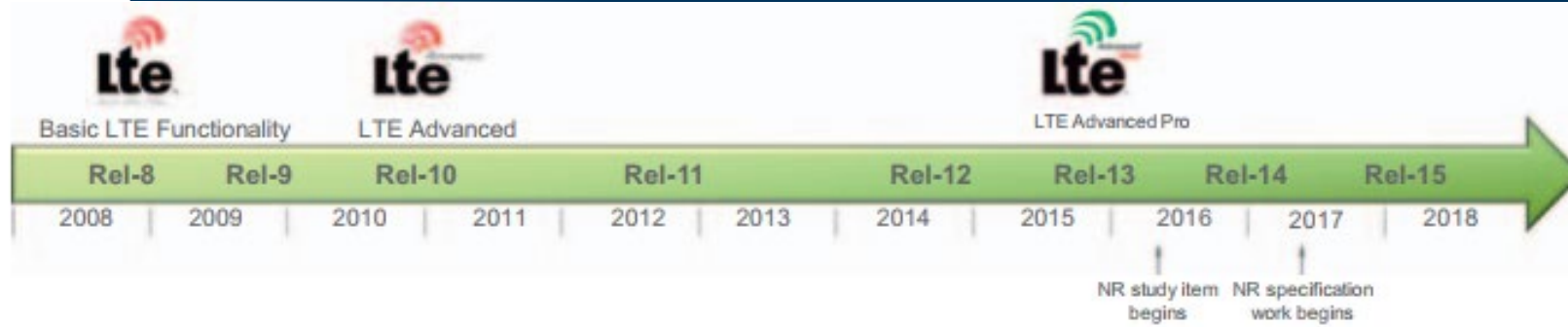
- In Italia le frequenze di riferimento sono 800, 1800, 2100 e 2600 MHz;
- Accesso di tipo OFDMA;
  - L'accesso multiplo è garantito assegnando un subset di sotto-portanti a singoli utenti;
  - L'assegnazione delle sotto-portanti avviene dinamicamente in funzione delle condizioni del canale;
  - Il numero di sotto-portanti assegnabile agli utenti è determinato dalla qualità di servizio (QoS) richiesta;
- La rete è stata concepita per migliorare la capacità, la data-rate e latenza;
- Utilizzo della *multi-antenna technique* in ricezione ed introduzione del downlink MIMO;



- Un **Resource Element** consiste in una sotto-portante di un simbolo OFDM quindi è la più piccola risorsa fisica allocabile;
- Nell’LTE la sequenza di 12 sotto-portanti consecutive, comprese in un’unico slot temporale, è chiamata **Resource Block**:
  - **Subcarrier spacing** (SCS) = 15 kHz;
  - Time slot = 0.5 ms;
- Il numero di RB è funzione della banda;

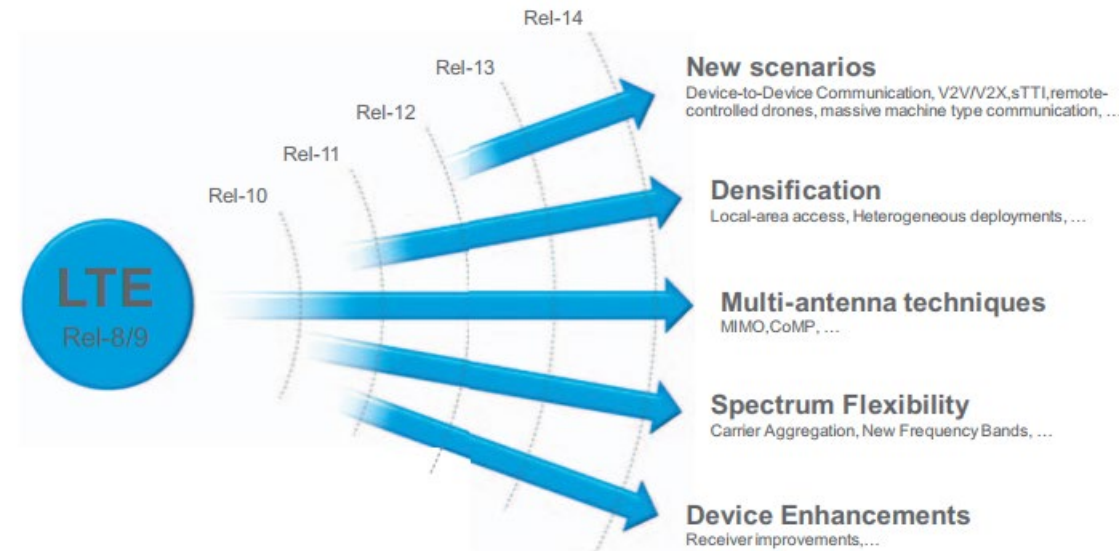
Channel bandwidth $BW_{\text{Channel}}$ [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Transmission bandwidth configuration $N_{\text{RB}}$	6	15	25	50	75	100



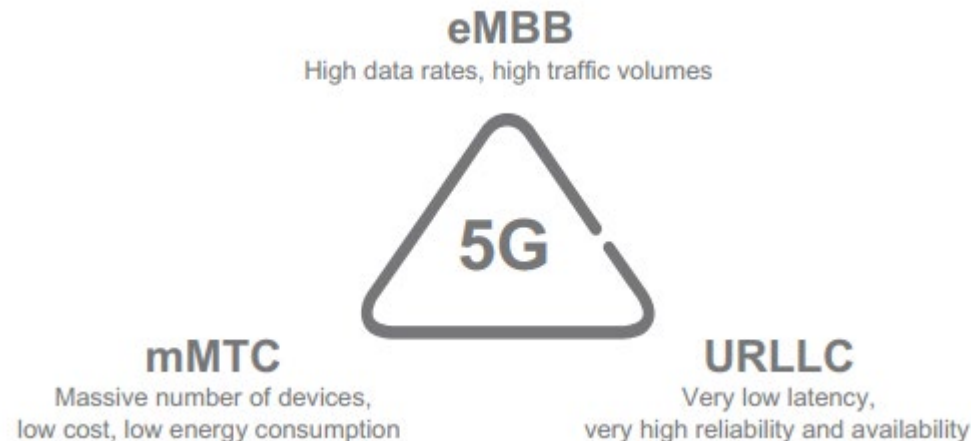


- Release 8 è la prima basata sull'LTE:
  - Introduzione OFDMA;
  - Turbo codici;
  - Prestazioni massime 150 Mbps (downlink) e 75 Mbps (uplink)
- Release 9, 10:
  - Introduzione backwards compatibility;
  - Ulteriore miglioramento delle prestazioni multi-antenna;

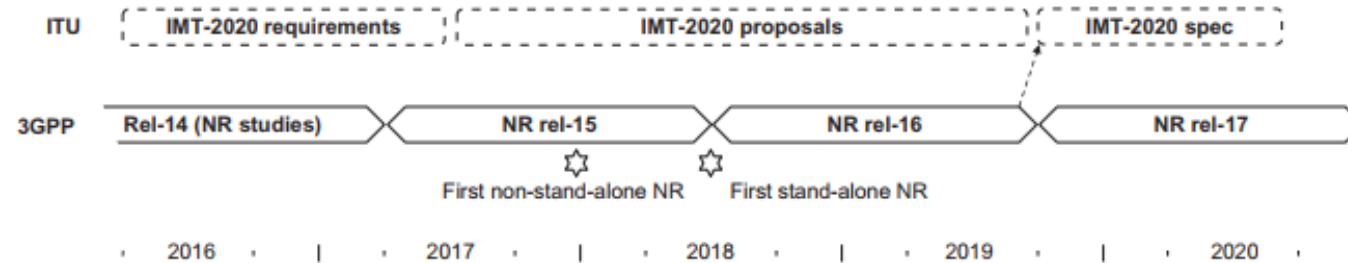
- Release 11:
  - Miglioramento carrier-aggregation;
- Release 12:
  - Sviluppo small cells;
  - Introduzione comunicazione device-to-device;
- Release 13:
  - LTE Advanced Pro;
  - Miglioramento della carrier aggregation, trasmissione multi-antenna e comunicazione device-to-device;
- Release 14:
  - Introduzione vehicle-to-vehicle (V2V) e vehicle-to-everything (V2X);
- Release 15 (Prima release 5G):
  - Riduzione significativa della latenza;



- La quinta generazione (5G) di reti di telecomunicazione si riferisce ad un contesto molto vasto e non solo alla tecnologia di accesso radio;
- Nel contesto 5G si riconoscono 3 classi distinte:
  - **Enhanced mobile broadband** (eMBB): corrisponde all'evoluzione dei servizi a banda larga abilitando volumi di dati maggiori ed ulteriori miglioramenti all'esperienza d'utente (e.g. data rate);
  - **Massive machine-type communication** (mMTC): comprende i servizi erogabili ad un numero massivo di dispositivi. I requisiti chiave sono l'efficienza energetica e costi ridotti;
  - **Ultra-reliable and low-latency communication** (URLLC): servizi che richiedono bassissima latenza ed alta affidabilità.

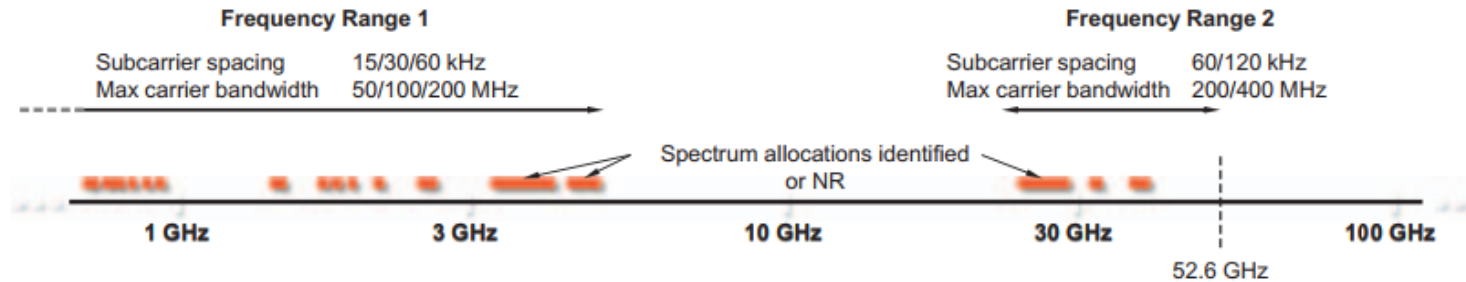


# Reti cellulari – 5G: Miglioramenti

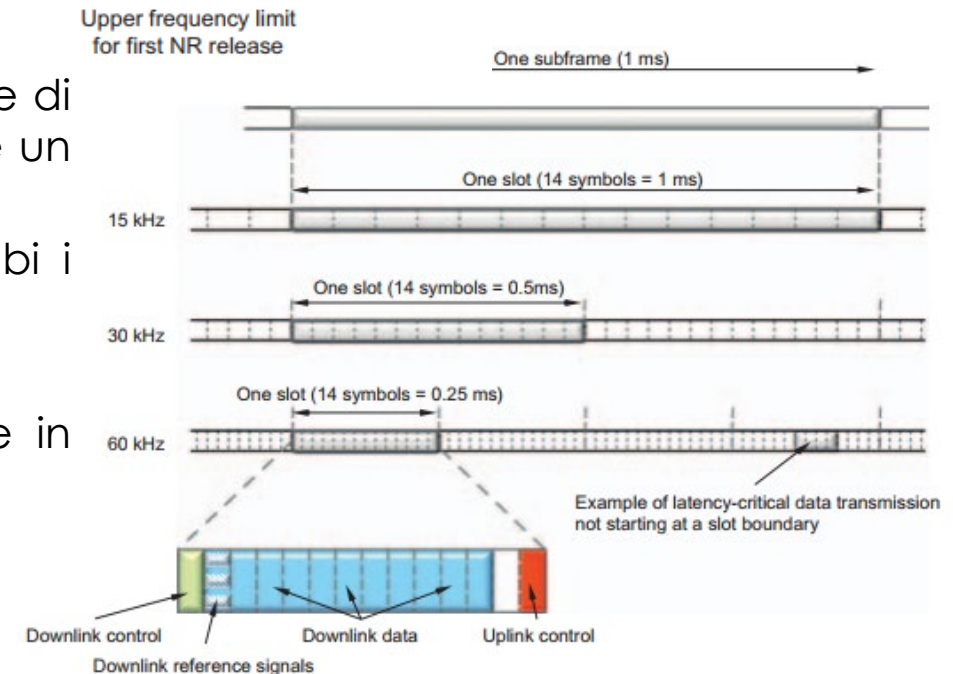


- Il 5G è stato lanciato nel 2019 in diversi mercati mondiali;
- Rispetto alle tecnologie precedenti;
  - Estensione dei range di frequenza in modo da supportare larghezze di banda più grandi a cui si associano data rate più elevate:
    - Le mm-wave offrono una larghezza di banda enorme perciò consentono capacità estreme;
  - Nuovo design che migliora le performance energetiche e riduce le interferenze:
    - L'*ultra-lean* design permette di minimizzare l'*always-on transmission* (e.g. segnali per la base station detection, broadcast di informazioni di sistema);





- Larghezza di banda e struttura del frame:
  - Per supportare un vasto range di scenari, il 5G consente di utilizzare SCS da 15 a 240 kHz (ora 960 kHz) a cui segue un cambio proporzionale della durata del prefisso ciclico;
  - Non tutte le numerologie sono sfruttabili da entrambi i frequency range;
- Riduzione della latenza:
  - I device possono trasmettere immediatamente anche in una frazione dello slot (*mini slot*);



- Beam-centric design che prevede l'utilizzo estensivo del beamforming:
  - Supporto antenne massive MIMO:
    - Implementazione del beamforming;





- 5G Non-Standalone:
  - Prevede l'associazione del 5G Radio Access Network (RAN) con l'LTE Evolved Packet Core (EPC);
  - Il 5G NSA consente di migliorare le prestazioni eMBB del 4G;
  
- 5G Standalone:
  - Non dipende dall'LTE EPC ma sfrutta una core network cloud-native;
  - La core network è progettata come una **Service Based Architecture** (SBA) che virtualizza le funzioni di rete;

- 5G-Advanced è progettato per evolvere il 5G al pieno delle sue potenzialità:
  - Creazione di una base per gestire applicazioni più esigenti ed un set di casi d'uso più grande:
    - Realtà estesa (XR);
    - Introduzione algoritmi di AI e ML applicati direttamente alla rete di accesso per l'ottimizzazione di rete ed efficienza energetica;
  - Retrocompatibilità: coesistenza con le releases e dispositivi attuali;



- Miglioramenti chiave:
  - **XR** (Realtà aumentata (AR), Realtà virtuale (VR)): miglioramento dell'esperienza raggiungibile con il 5G. Le principali attività riguardano lo sviluppo di applicazioni real-time le quali richiedono un elevato throughput e latenza bassissima;
  - **Copertura:** Nel futuro dovranno essere garantiti data rate, almeno, 20% più elevati oltre ad un miglioramento della copertura in uplink;
  - **Sostituzione del GSM-R:** aggiornamento del sistema di comunicazione della rete utilizzata comunemente in ambito ferroviario (*Future Mobile Communication System (FRMCS)*);
  - **Evoluzione oltre gli smartphone:** verranno introdotti nuovi dispositivi studiati appositamente per casi d'uso specifici come, ad esempio, sorveglianza, controllo qualità, monitoraggio e tracking;
  - **Posizionamento:** I sistemi rappresenteranno un complemento all'indoor global navigation satellite system (GNSS) migliorando l'automazione, la logistica e la sicurezza pubblica;
  - **Timing:** supplemento al GNSS/GPS per garantire una sincronizzazione più precisa;
  - **Efficienza di rete:** l'introduzione di algoritmi di AI e ML permette un miglioramento delle prestazioni sulla RAN, rete core e network management;
  - **Miglioramento mobilità:** raggiungimento del zero service interruption durante la fase di handover.

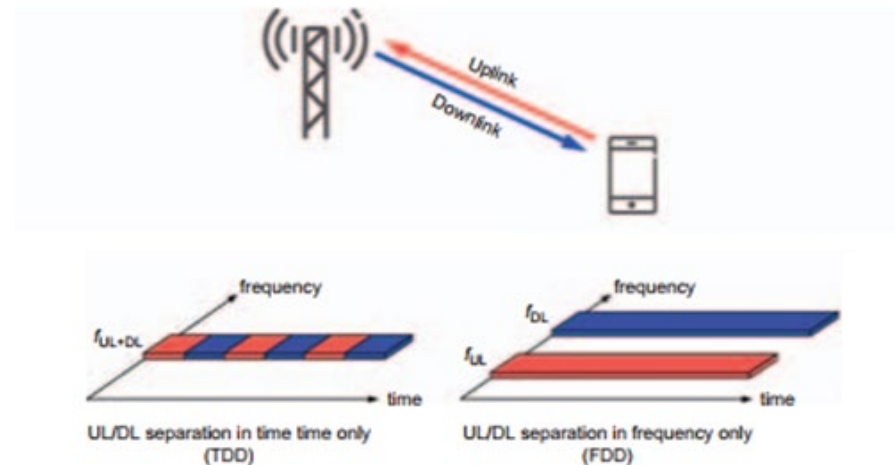
- Secondo l'ITU le reti 6G impatteranno i seguenti campi:
  - High-Fidelity Holographic Society: In ordine di garantire le altissime data rate richieste dagli utenti si rende necessaria l'introduzione di sincronizzazioni aggiuntive in modo da coordinare le trasmissioni provenienti da più sorgenti garantendo un servizio privo di interruzioni;
  - Connettività massiva: L'utilizzo della piattaforma 5G ha consentito di diffondere la connettività in larga scala. L'obiettivo del 6G è quello di creare una rete di accesso a banda larga globale utilizzando sia le reti tradizionali che quelle non tradizionali come le connessioni satellitari (LEO) e unmanned ariel vehicle (UAV);
  - Time Sensitive Applications: A causa delle limitazioni architettoniche attuali non è possibile garantire che le latenze scendano sotto la sensibilità umana in ogni condizione, ciò è un requisito essenziale in quanto, oltre alle comunicazioni audio/video già utilizzate, si svilupperà l'*internet tattile* il quale richiede i controlli aptici e tattili.



- Caratteristiche Innovative della New Radio (NR)
  - Bande di frequenza
  - Flessibilità nella struttura di trasmissione
  - Massive MIMO e Beamforming
  - Numerologia
  - Dual connectivity e interworking; coesistenza fra LTE e 5G, DSS

- Il NR utilizza diverse bande di frequenza a cui corrispondono diversi requisiti;
- Nella release 15 sono stati introdotti due diversi *frequency range*:
  - Frequency Range 1: include tutto lo spettro inferiore ai 6 GHz;
  - Frequency Range 2: include le bande comprese tra 24.25 e 52.6 GHz.
- I range, nell'immediato futuro, potrebbero subire delle integrazioni;
- 3GPP ha definito delle *operative bands* specificandone l'utilizzo:
  - Uplink e/o Downlink;
  - TDD o FDD;
  - SDL o SUL (Supplemental Downlink/Uplink).

- Frequency Division Duplexing (FDD):
  - In questa modalità sia l'uplink che il downlink trasmettono nello stesso istante a diverse frequenze;
- Time Division Duplexing (TDD):
  - In questo caso l'uplink ed il downlink utilizzano lo stesso spettro ma in tempi diversi;

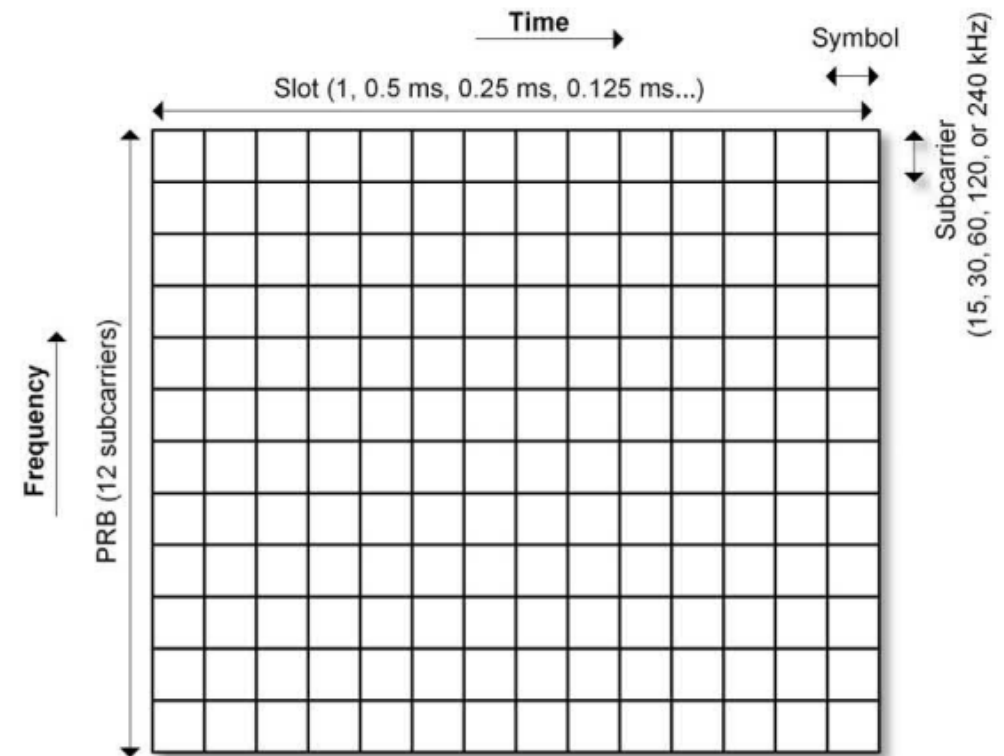
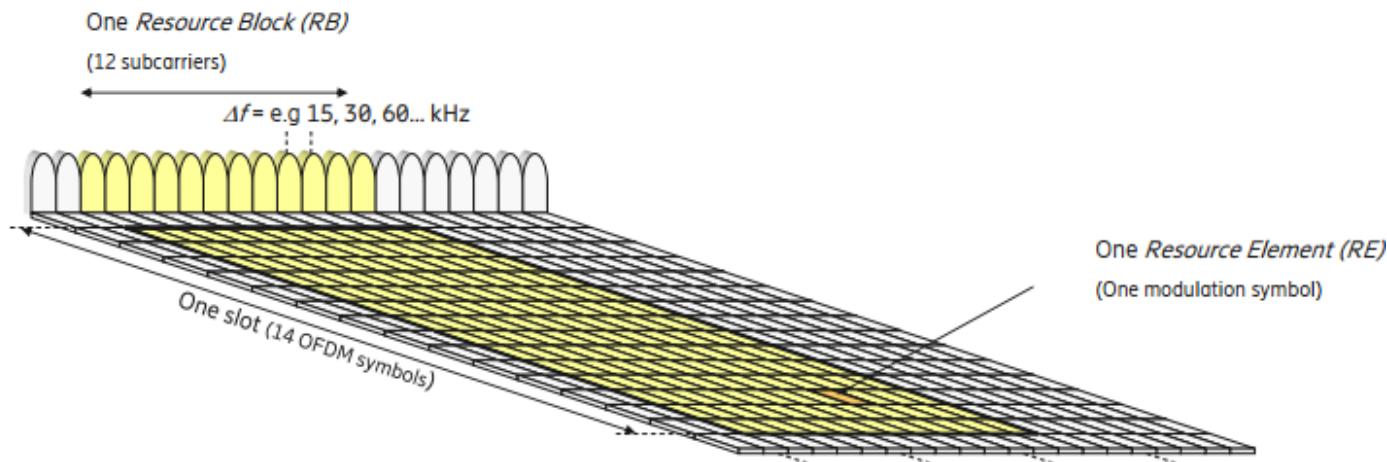


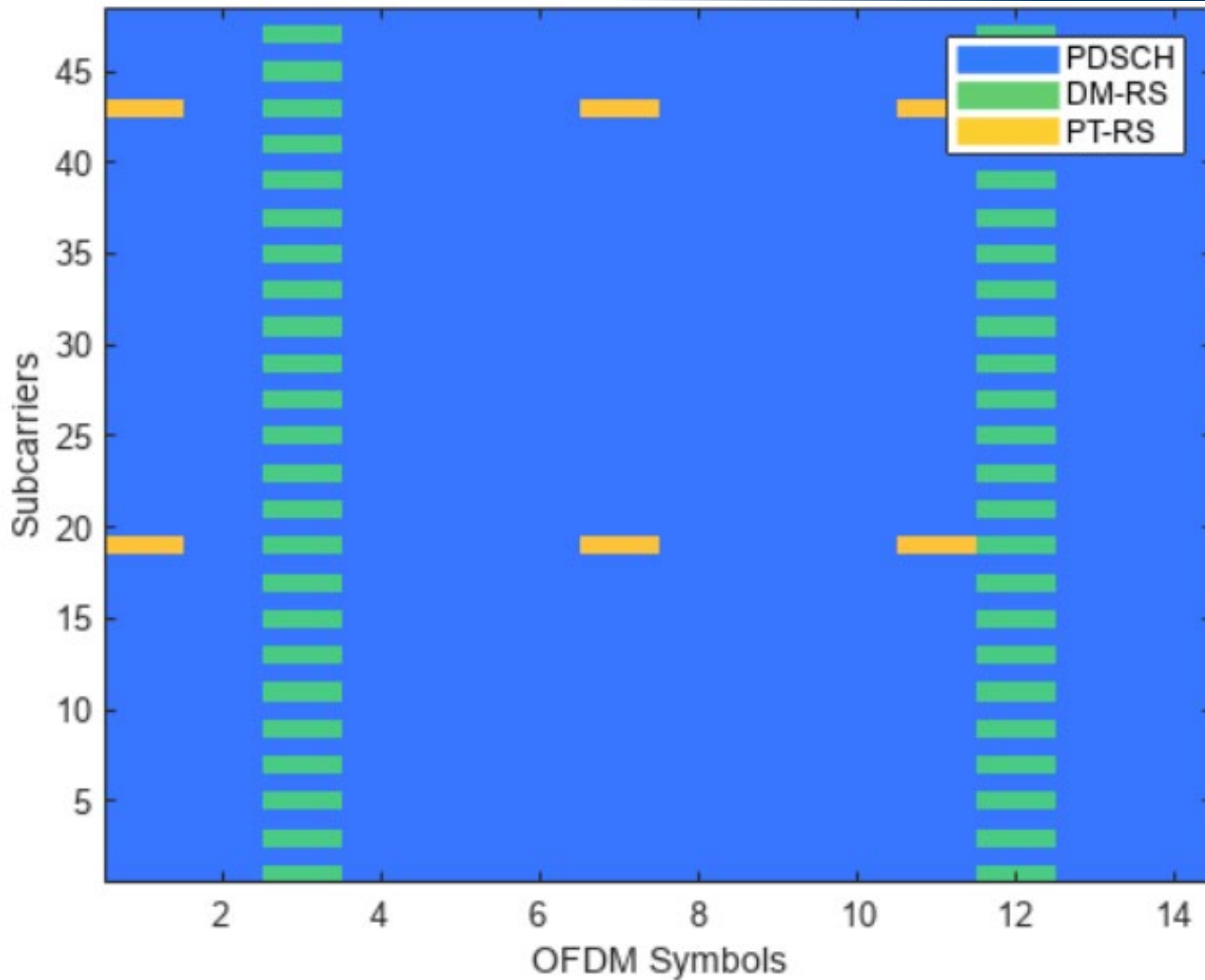
NR Band	Uplink Range (MHz)	Downlink Range (MHz)	Duplex Mode	Main Region(s)	NR Band	Uplink Range (MHz)	Downlink Range (MHz)	Duplex Mode	Main Region(s)
n1	1920–1980	2110–2170	FDD	Europe, Asia	n41	2496–2690	2496–2690	TDD	US, China
n2	1850–1910	1930–1990	FDD	Americas (Asia)	n50	1432–1517	1432–1517	TDD	
n3	1710–1785	1805–1880	FDD	Europe, Asia (Americas)	n51	1427–1432	1427–1432	TDD	
n5	824–849	869–894	FDD	Americas, Asia	n66	1710–1780	2110–2200	FDD	Americas
n7	2500–2570	2620–2690	FDD	Europe, Asia	n70	1695–1710	1995–2020	FDD	
n8	880–915	925–960	FDD	Europe, Asia	n71	663–698	617–652	FDD	Americas
n20	832–862	791–821	FDD	Europe	n74	1427–1470	1475–1518	FDD	Japan
n28	703–748	758–803	FDD	Asia/Pacific	n75	N/A	1432–1517	SDL	Europe
n38	2570–2620	2570–2620	TDD	Europe	n76	N/A	1427–1432	SDL	Europe
					n77	3300–4200	3300–4200	TDD	Europe, Asia
					n78	3300–3800	3300–3800	TDD	Europe, Asia
					n79	4400–5500	4400–5500	TDD	Asia
					n80	1710–1785	N/A	SUL	
					n81	880–915	N/A	SUL	
					n82	832–862	N/A	SUL	
					n83	703–748	N/A	SUL	
					n84	1920–1980	N/A	SUL	



NR Band	Uplink and Downlink Range (MHz)	Duplex Mode	Main Region(s)
n257	26,500–29,500	TDD	Asia, Americas (global)
n258	24,250–27,500	TDD	Europe, Asia (global)
n259	37,000–40,000	TDD	US (global)

- Nel 5G NR un Resource Block è composto da 12 sotto portanti nel solo dominio delle frequenze quindi decade il vincolo sul dominio dei tempi del 4G;
- Uno slot del NR è composto da 14 simboli;
- Sono concesse variazioni della struttura;

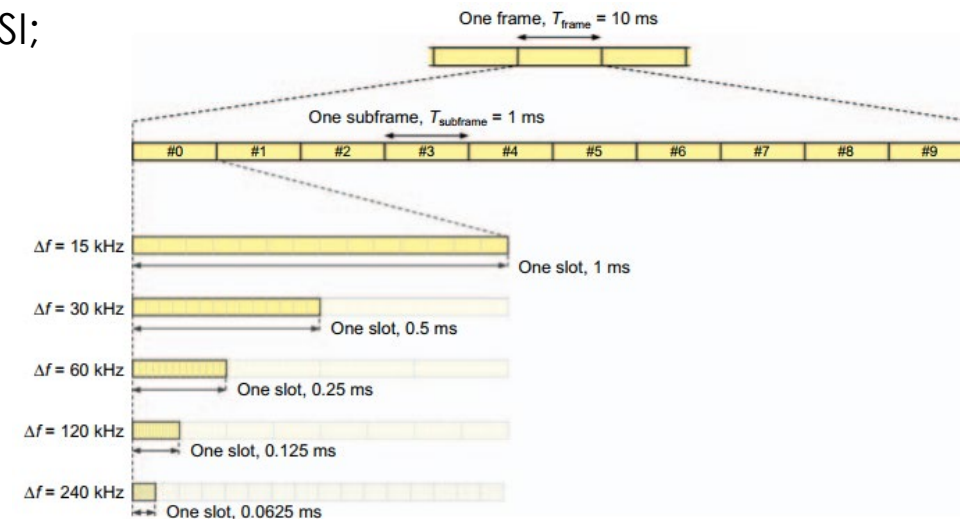




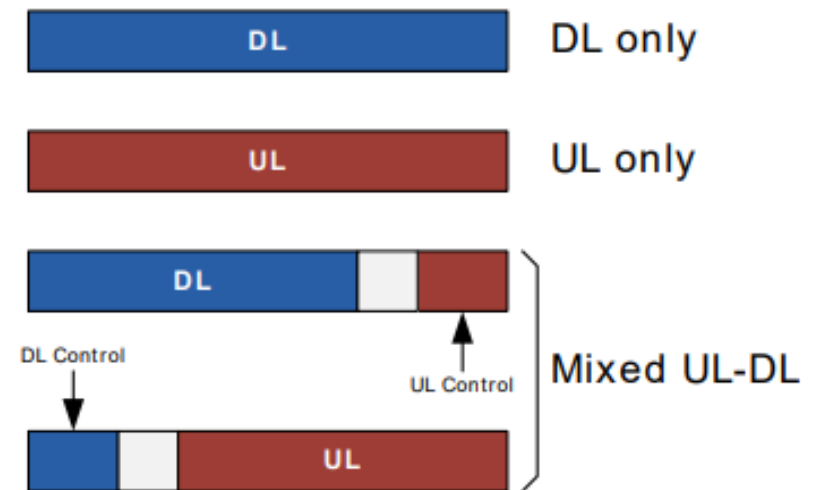
- **Demodulation Reference Signal (DMRS)**: Utilizzato per la stima di canale;
- **Phase Tracking Reference Signal (PTRS)**: Fondamentale per le mm-wave in quanto restituisce una stima della fase del segnale precisa;

- L'utile simbolo  $T_u$  dipende dal subcarrier spacing;
- A differenza del 4G, il NR permette di utilizzare più valori di SCS a cui corrispondono diversi valori di durata del prefisso ciclico ( $T_u/14$ );
- Il prefisso ciclico può essere:
  - Normale;
  - Esteso: può essere utilizzato solo per SCS > 60 kHz. In questo caso vengono utilizzati 12 simboli OFDM piuttosto che 14;
  - L'utilizzo del prefisso ciclico è fondamentale nei sistemi OFDM in quanto garantisce l'assenza dell'**Interferenza Intersimbolo** (ISI):
    - Il Delay Spread del canale deve essere sempre inferiore all'ISI;

Subcarrier Spacing (kHz)	Useful Symbol Time, $T_u$ ( $\mu$ s)	Cyclic Prefix, $T_{CP}$ ( $\mu$ s)
15	66.7	4.7
30	33.3	2.3
60	16.7	1.2
120	8.33	0.59
240	4.17	0.29



- Uno slot può essere:
  - Downlink;
  - Uplink;
  - Misto (Uplink e Downlink);
- È supportata anche la slot aggregation:
  - La trasmissione dei dati può essere organizzata su un unico, o multipli, slot;



# Struttura di trasmissione – Slot structure

Format	Symbol Number in a slot													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
1	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
2	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F
3	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	F
4	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	F	F
5	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	F	F	F	F
6	D	D	D	D	D	D	D	D	D	F	F	F	F	F
7	D	D	D	D	D	D	D	D	F	F	F	F	F	F
8	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	U
9	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	F	U	U
10	F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
11	F	F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
12	F	F	F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
13	F	F	F	F	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
14	F	F	F	F	F	U	U	U	U	U	U	U	U	U
15	F	F	F	F	F	F	U	U	U	U	U	U	U	U

## FR1

SCS (kHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	35 MHz	40 MHz	45 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz
	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$
15	25	52	79	106	133	160	188	216	242	270	$N/A$	$N/A$	$N/A$	$N/A$
30	11	24	38	51	65	78	92	106	119	133	162	189	217	245
60	$N/A$	11	18	24	31	38	44	51	58	65	79	93	107	121

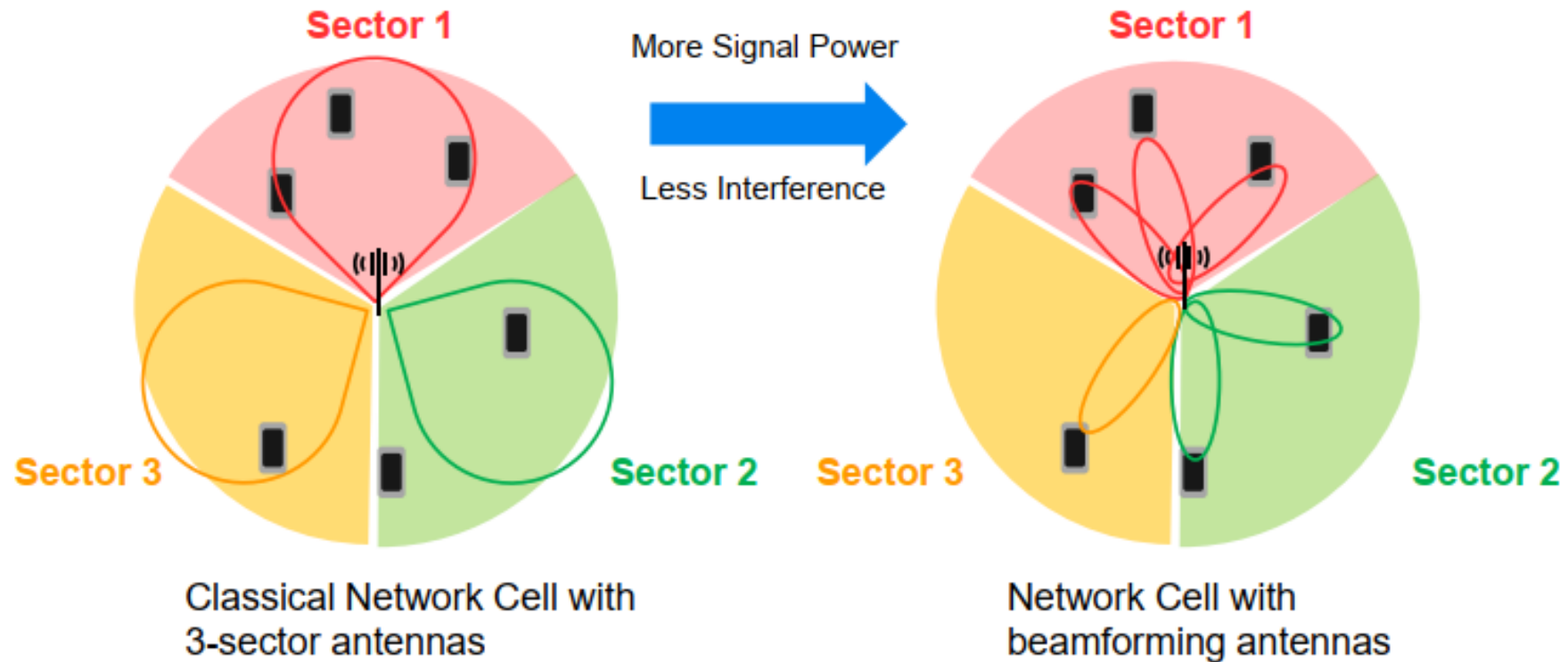
## FR2

SCS (kHz)	50 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$
60	66	132	264	$N/A$
120	32	66	132	264

SCS (kHz)	100 MHz	400 MHz	800 MHz	1600 MHz	2000 MHz
	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$	$N_{RB}$
120	66	264	$N/A$	$N/A$	$N/A$
480	$N/A$	66	124	248	$N/A$
960	$N/A$	33	62	124	148

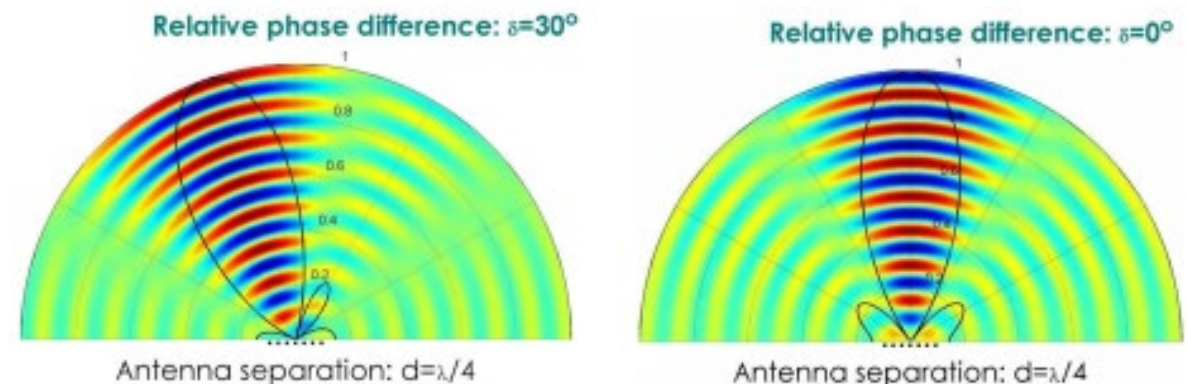
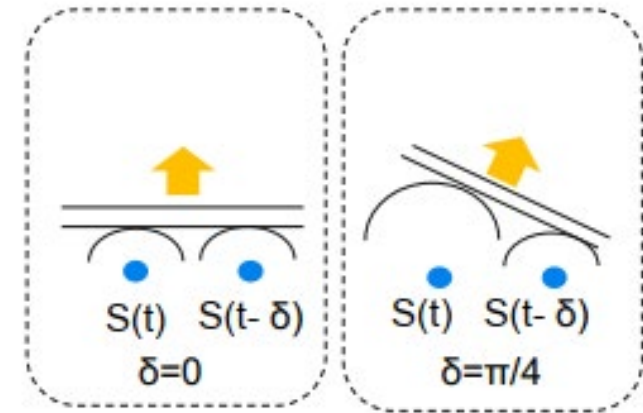
# Beamforming - Benefici

- I principali benefici del beamforming riguardano il miglioramento del segnale (maggiore direttività) a cui si somma la riduzione dell'interferenza in quanto ogni utente interagisce singolarmente con la stazione base;



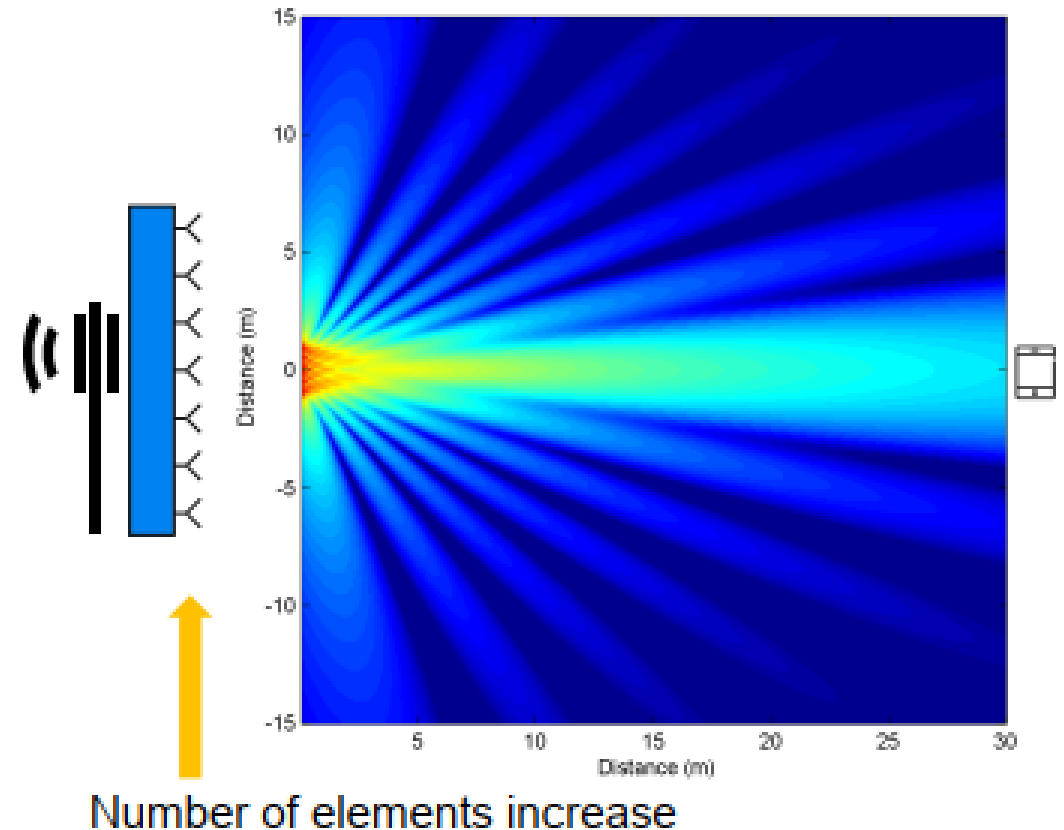


- I beam sono creati come somma dei segnali emessi dalle diverse antenne;
- Il beam è creato lungo la direzione del segnale «costruttivo» ;
- La somma dei segnali avviene attraverso repliche dello stesso segnale con diverse:
  - Fasi;
  - Ampiezze;

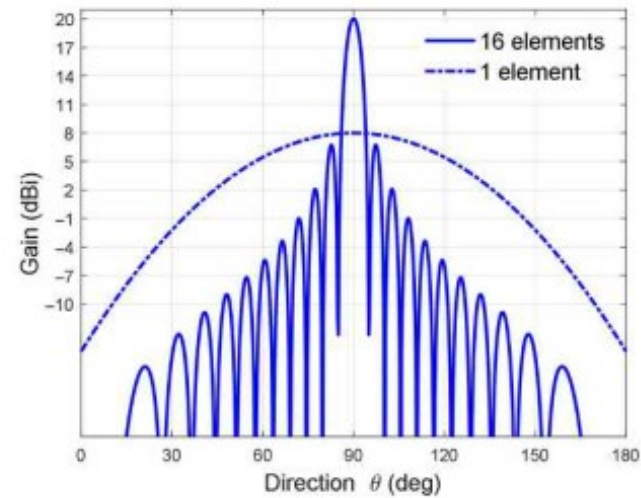
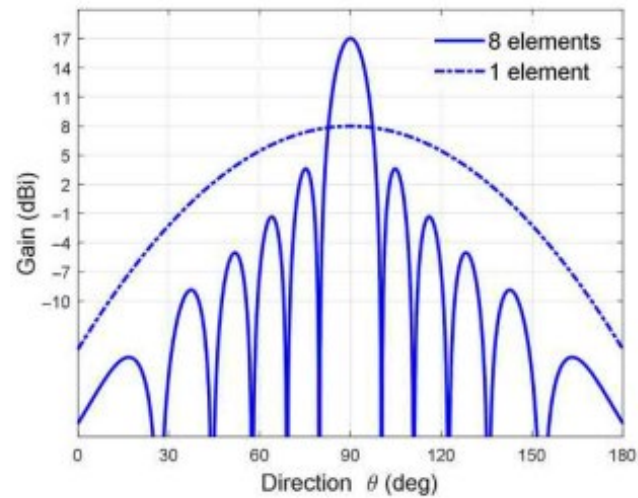
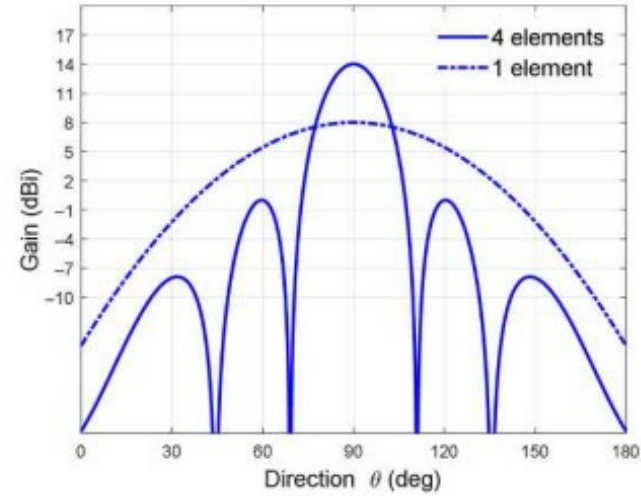
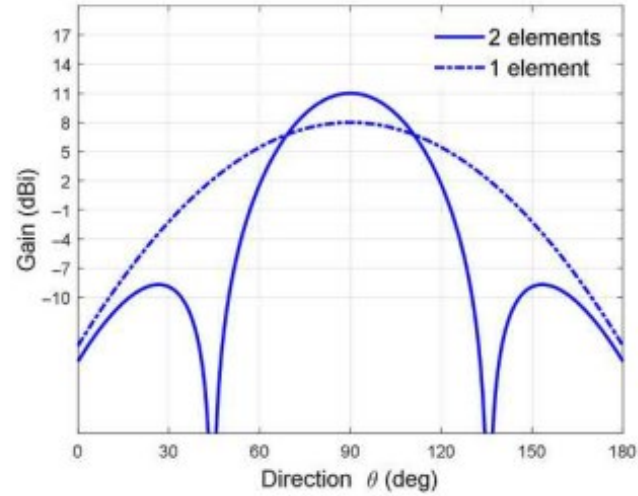


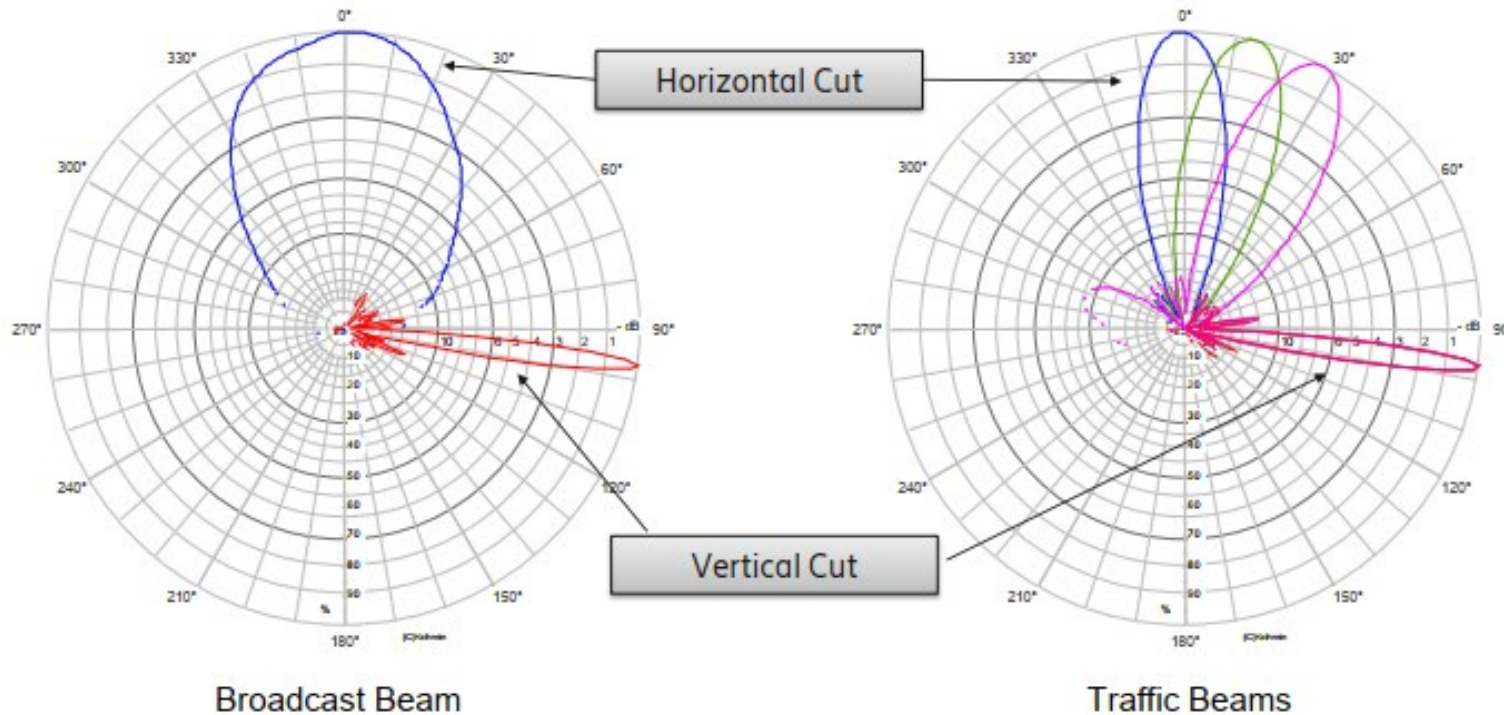
# Beamforming - Creazione del beam

- In downlink, il beamforming rappresenta, perciò, l'abilità di dirigere l'energia radio verso un specifico ricevitore;
- Regolando la fase e l'ampiezza del segnale trasmesso si ottiene l'effetto costruttivo al quale si deve l'incremento dell'energia del segnale ricevuto e quindi del throughput;
- In Uplink, il beamforming rappresenta la capacità di assorbire energia da un specifico trasmettitore
- Il beam formato da una *Active Antenna System (AAS)* è costantemente «aggiornato» in modo da garantire le migliori prestazioni sia in Uplink che in Downlink;
- All'aumentare degli elementi d'antenna si ha una maggiore direttività;



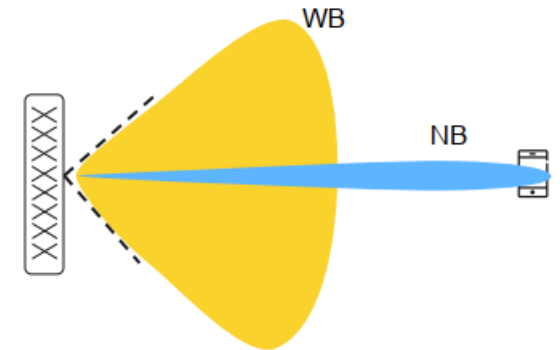
# Beamforming - Direttività



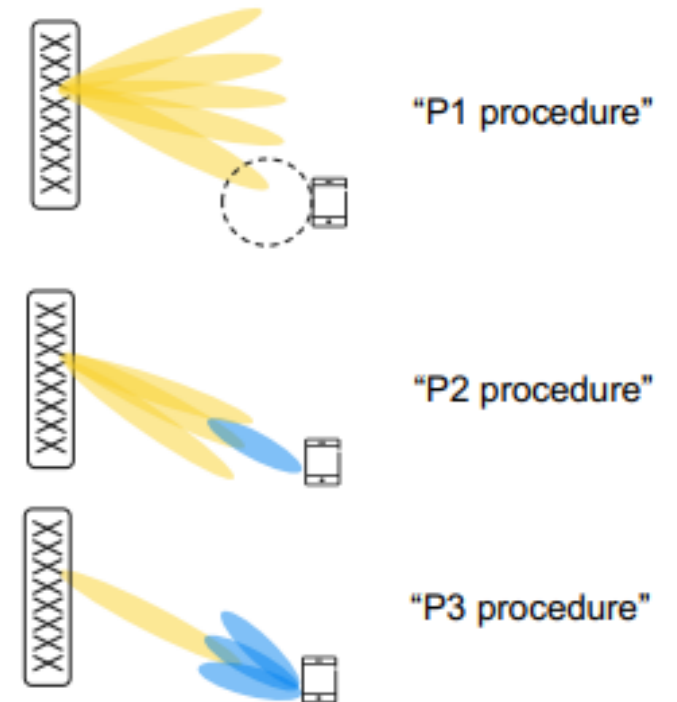


- I broadcast beam vengono utilizzati per coprire l'intera cella mentre i beam di traffico sono trasmessi solo verso le direzioni in cui si è certi di raggiungere un certo utente;
- I broadcast beam distribuiscono le informazioni di controllo mentre i beam ad alto guadagno sono utilizzati per la trasmissione di dati;

- Più il beam è «largo» minore sarà il guadagno perciò si potrà coprire una distanza inferiore;
- Viceversa un beam più «stretto» assicura un guadagno maggiore a fronte di una minore copertura d'area;
- La copertura d'area viene garantita implementando lo sweep del diagramma;

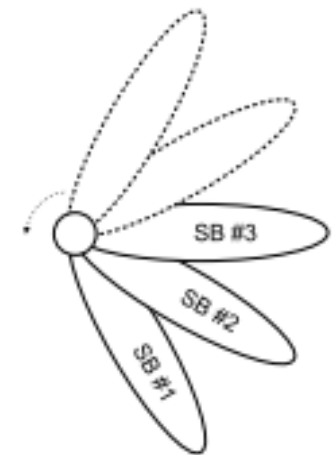
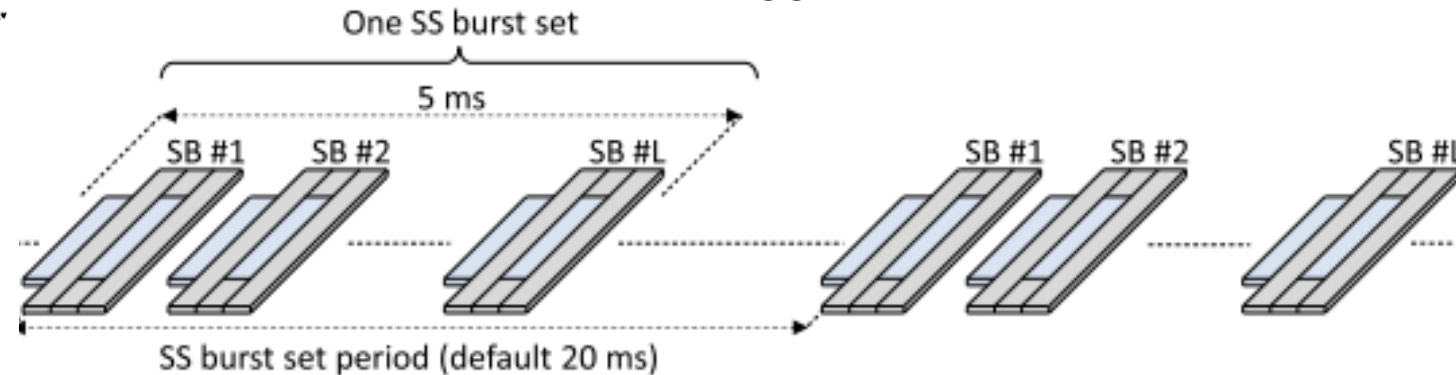
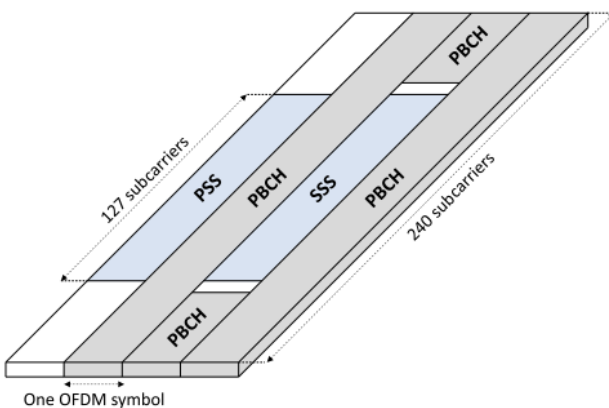


- 3GPP describe la metodologia con cui si devono aggiungere ed aggiornare i beam supportati:
  - Beam Sweeping;
  - Beam Measurement;
  - Beam Reporting;
  - Beam Recovery;
  - Beam Switching;
- Una volta scelta la coppia di beam BS-UE viene avviata la comunicazione;





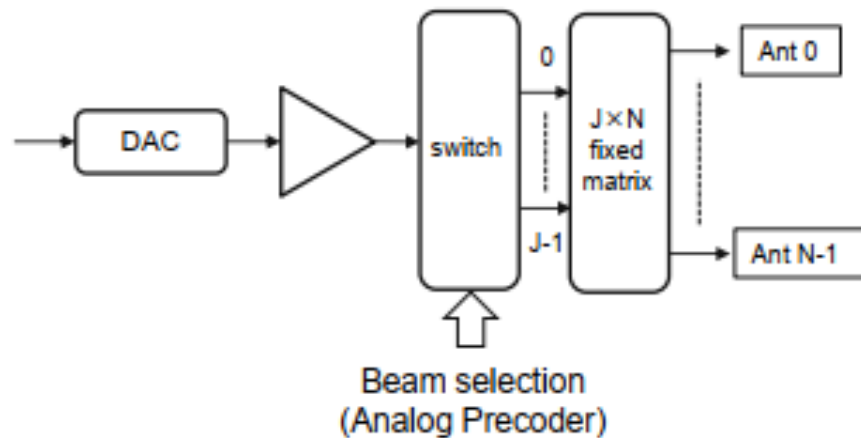
- Il *Beam Sweeping* si basa sull'utilizzo del **Synchronization Signal Block (SSB)**:
  - Composto da **Primary Synchronization Signal (PSS)**, **Secondary Synchronization Signal (SSS)** e **Physical Broadcast Channel (PBCH)**;
  - Ripetuto periodicamente entro la trama (e.g. 5 ms);
  - La sequenza di SSB (burst) è ripetuta, generalmente, ogni 20 ms;
- Ad ogni SB è associata una misura della potenza ricevuta (*Beam Measurement*) e la creazione di un report (*Beam Report*):
- Le fasi successive prevedono il recupero del beam e/o aggiornamento;



## Analog beamforming

Limited degrees of freedom

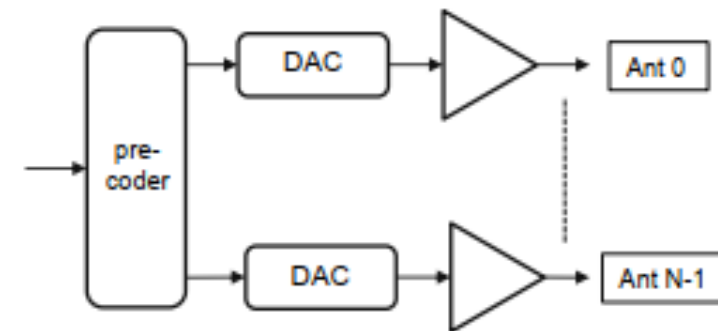
Entire carrier points in one direction at a time



## Digital beamforming

Highest degree of freedom

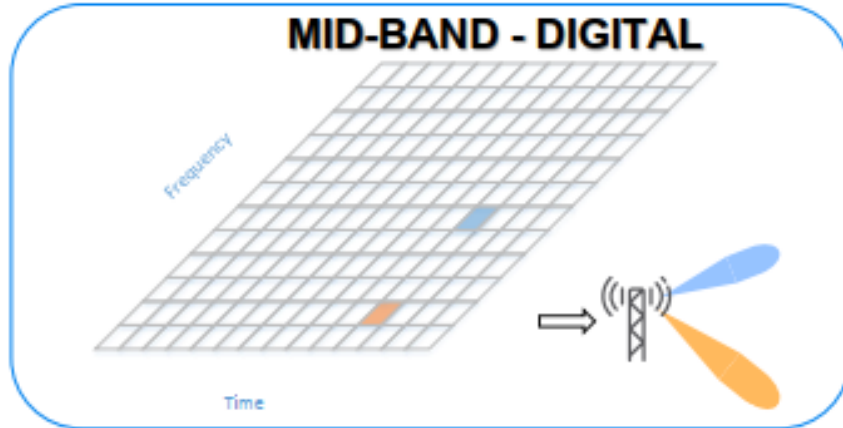
Different signals can be sent in different directions at the same time



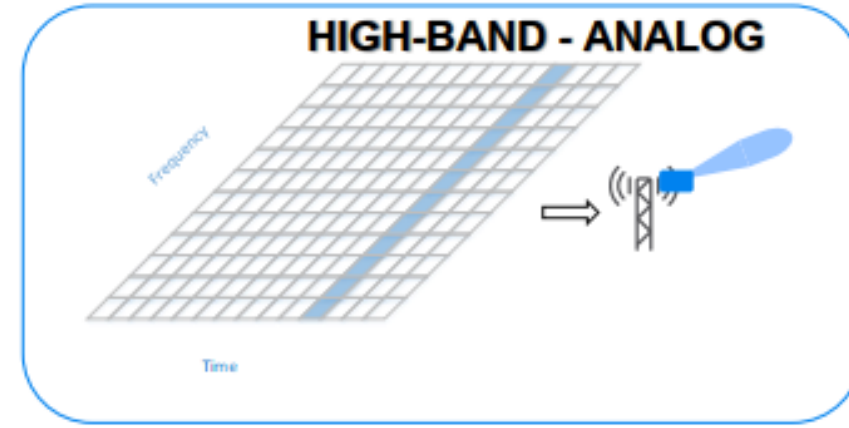
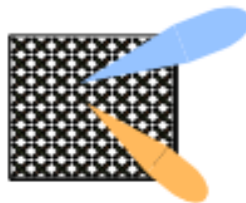
- L'analog beamforming utilizza un singolo beamformer quindi è possibile trasmettere un solo beam alla volta;
- Il digital beamforming, invece, può produrre più beam nello stesso momento;



# Beamforming - Analog vs Digital Beamforming

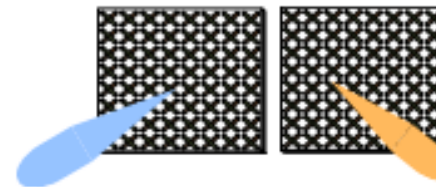


Possible to transmit to several users simultaneously in different beams

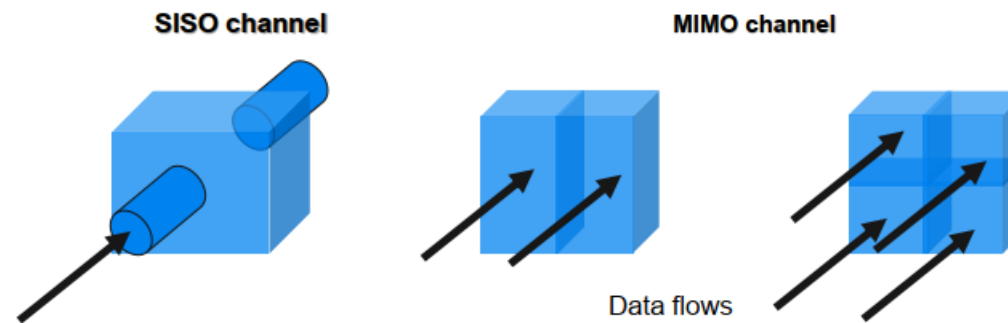


One beam at a time

To transmit to several users simultaneously  
Multipanel is need



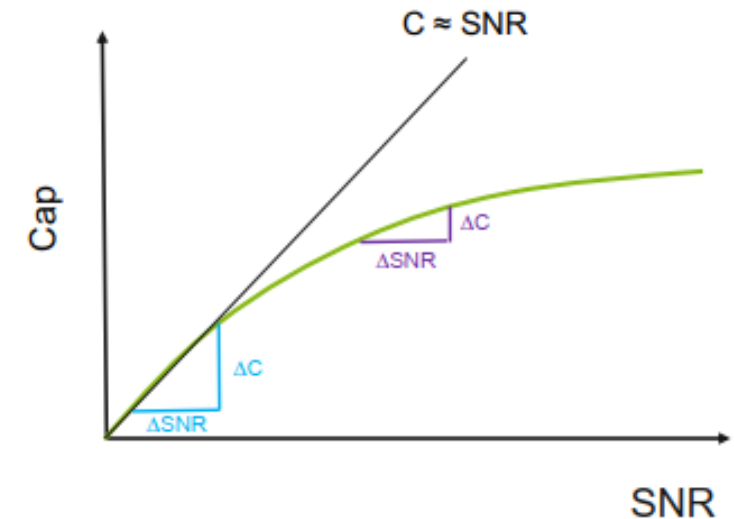
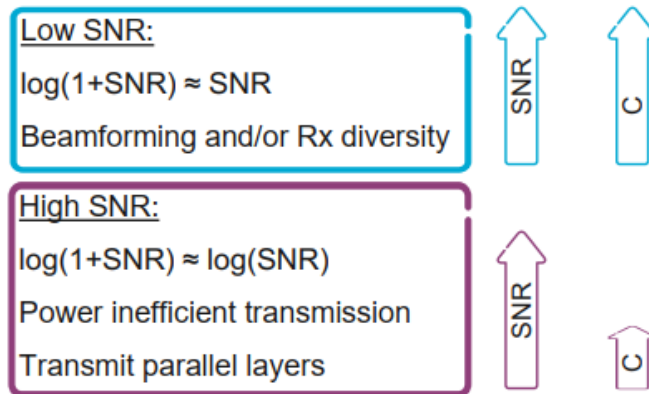
- Le tecniche multi antenna consentono, oltre al beamforming, il MIMO;
- Le tecnologie Multiple Input Multiple Output (MIMO) utilizzate dalle stazioni base sfruttano un numero elevato di elementi di antenna in modo tale da aumentare l'efficienza energetica e spettrale;
- In genere, i sistemi MIMO presentano decine o centinaia di elementi d'antenna organizzati in un unico array d'antenne;
- Il principale vantaggio del MIMO riguarda il miglioramento del throughput: utilizzando il multiplexing spaziale, i sistemi di comunicazione wireless possono comunicare contemporaneamente con più dispositivi utente (UE) usando le medesime risorse tempo-frequenza.



- Il multiplexing spaziale consente di migliorare le prestazioni in particolare la capacità di canale;
- La capacità di canale può essere calcolata attraverso la *Legge di Shannon*:

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

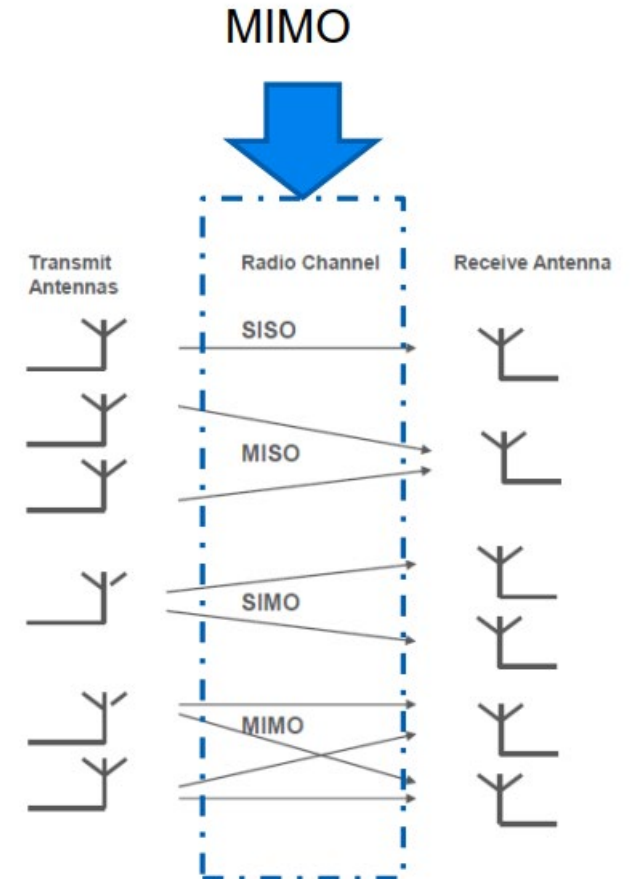
- Per migliorare la capacità di una rete radio si può agire su:
  - Rapporto segnale rumore (miglioramento della qualità del segnale);



**Spatial multiplexing**  
 Transmit in several beams using the same physical resource

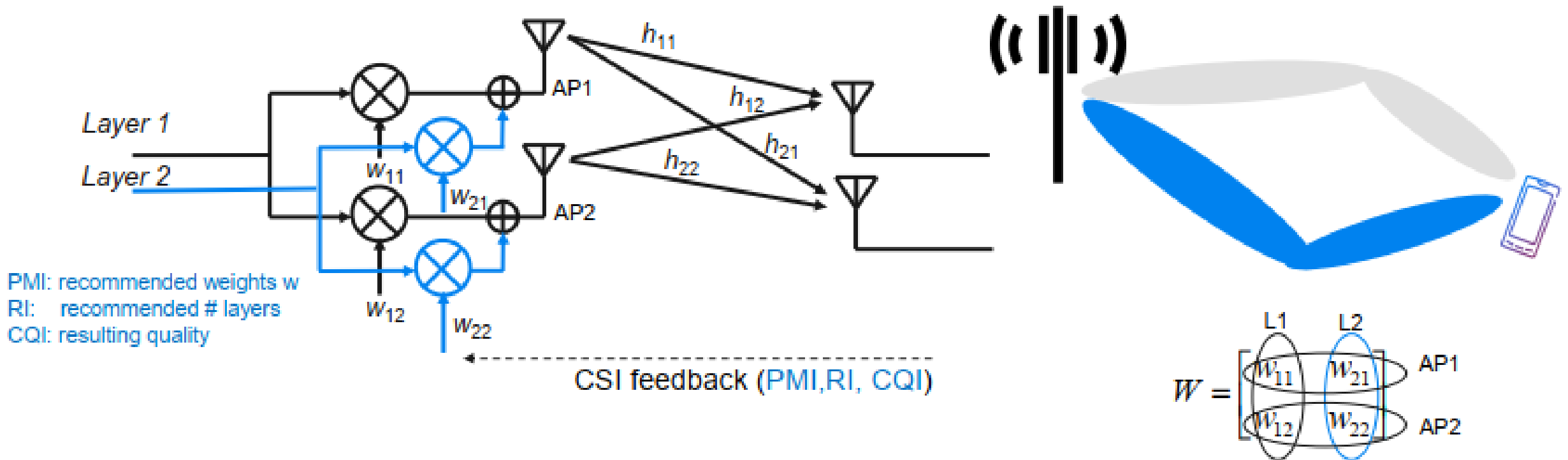
- Per migliorare la capacità di una rete radio si può agire su:
  - Larghezza di banda;
  - Densificare le stazioni base;
  - Aumento del numero dei canali.

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



# Multiplexing spaziale

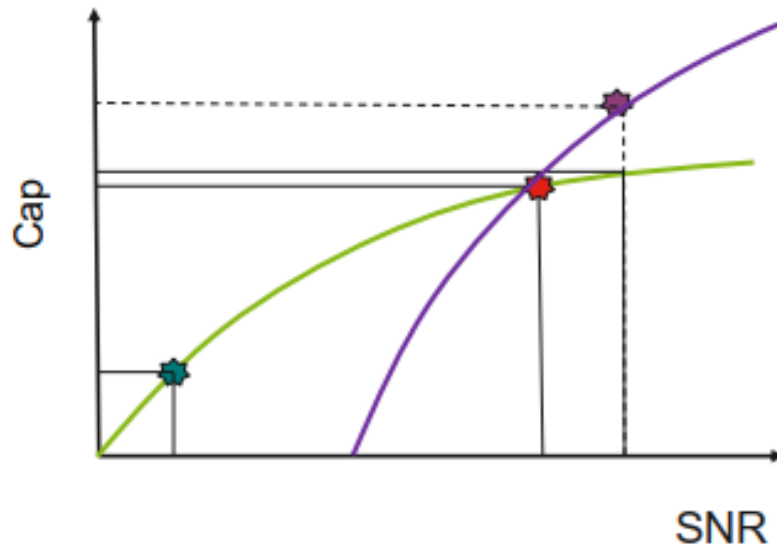
- Il multiplexing spaziale si realizza quando si hanno più paths indipendenti (non correlati);
- L'indipendenza dei percorsi «genera» entropia quindi capacità;



# Multiplexing spaziale

$$C = \log_2(1 + M \text{ SNR})$$

$$C = M \log_2(1 + \text{SNR}_x) = M C_x$$



High SNR:

Create additional layer (stream)

Share available SNR between layers

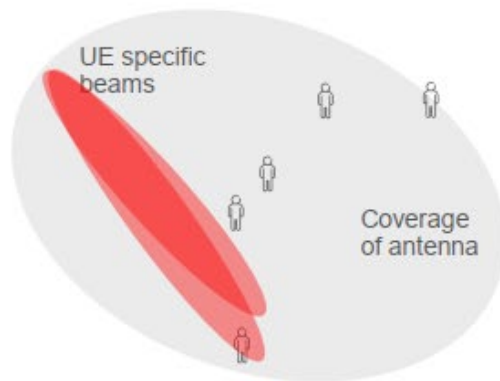
Each (independent) layer provide capacity  $C_x$

$$C = C_1 + C_2$$

- Oltre un certo valore non conviene migliorare l'SNR ma si deve agire sui layer;
- Il MIMO si può classificare in Single User e Multi User MIMO;

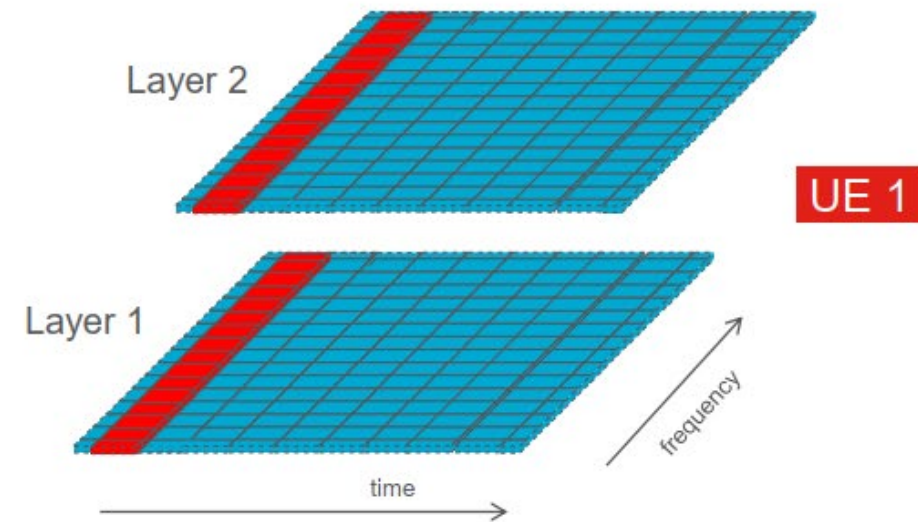
# Single User MIMO

- L'UE-Specific beamforming (SU-MIMO) consente di dirigere il segnale verso la direzione di interesse;
- Con il SU-MIMO le risorse radio (tempo-frequenza) sono riutilizzate in multipli layer verso il medesimo UE incrementando la bit rate di picco e media;



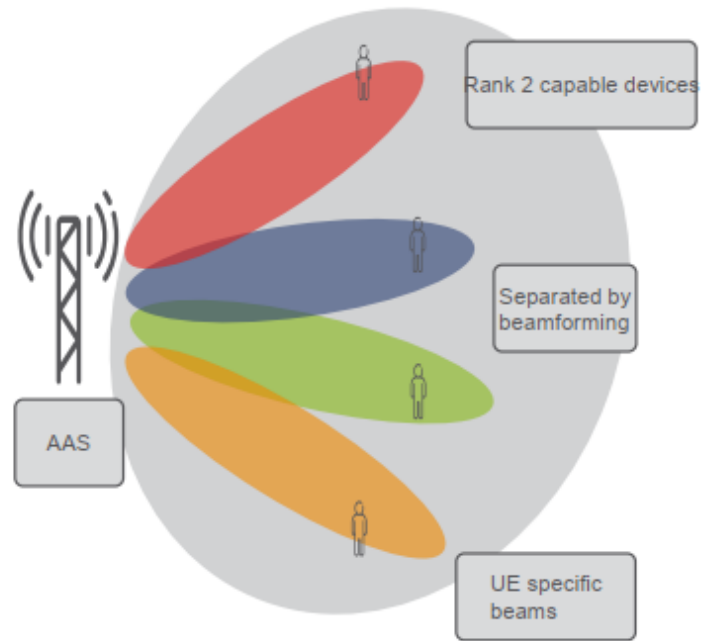
**Spatial Multiplexing**

***SU-MIMO***



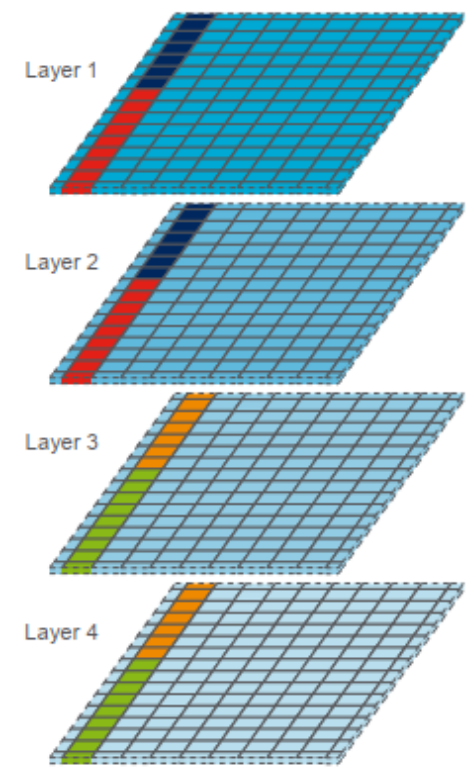
# Multi User MIMO

- Nel Multi-User MIMO (MU-MIMO), le risorse radio sono riutilizzate in multipli layer verso diversi UEs in questo modo si migliora la capacità totale;



**Spatial Multiplexing**

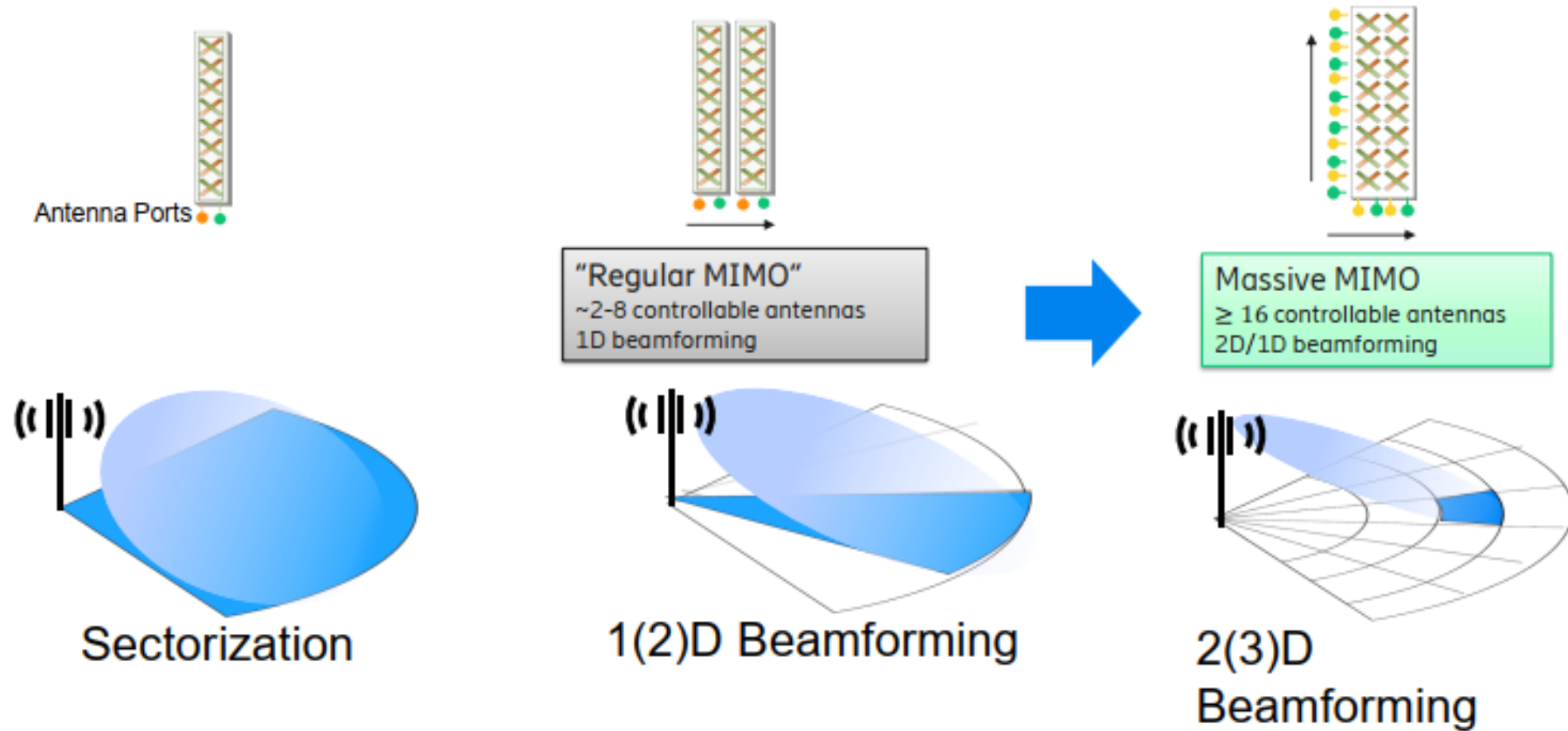
***MU-MIMO***



Layers – Number of data streams transmitted or received  
Beam – A beam consisting of one or two polarizations  
Rank – Number of layers to a single UE (reported by UE)

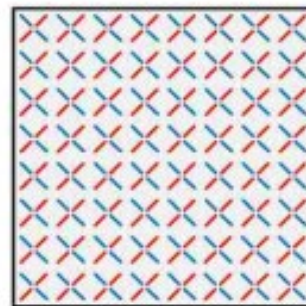


- Il Massive MIMO è una tecnologia che migliora, di ordini di grandezza, il MIMO;
- Le potenzialità del M-MIMO sono:
  - Aumento della capacità fino, ed oltre, 10 volte migliorando simultaneamente l'efficienza energetica fino a 100 volte;
  - Riduzione della latenza dell'interfaccia radio. Il M-MIMO, infatti, grazie all'elevato numero di elementi ed al beamforming permette di superare i limiti imposti dal fading distruttivo il quale è uno dei maggior responsabili del peggioramento della latenza;
  - Aumento della robustezza contro le interferenze ed il jamming intenzionale in quanto, in un sistema OFDM, ciascuna sottoportante del sistema sperimenta il medesimo guadagno di canale;

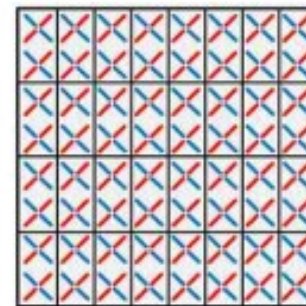


- L'architettura del pannello è un aspetto chiave del Massive MIMO;
- Dato un pannello con  $K_v$  righe e  $K_h$  colonne per un totale di  $K = K_v K_h$  elementi dual polarized, è possibile definire un **Array di Subarray** (AoSA) composto da  $N_v$  righe e  $N_h$  colonne con lo stesso numero d'elementi;
- I subarray sono identificabili come la più piccola entità controllabile dinamicamente;
- Data una certa layout AoSA, gli aspetti chiave della configurazione AAS che influenzano le performance sono:
  - Dimensione dei subarray;
  - Numero di subarray ;
  - AoSA Layout inteso come stacking verticale/orizzontale;

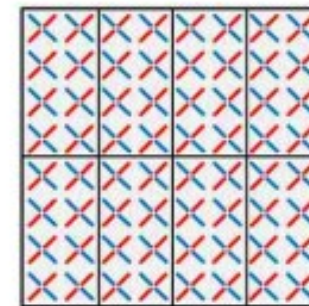
$$(M_v \times M_h)_{SA} (N_v \times N_h)$$



8 × 8

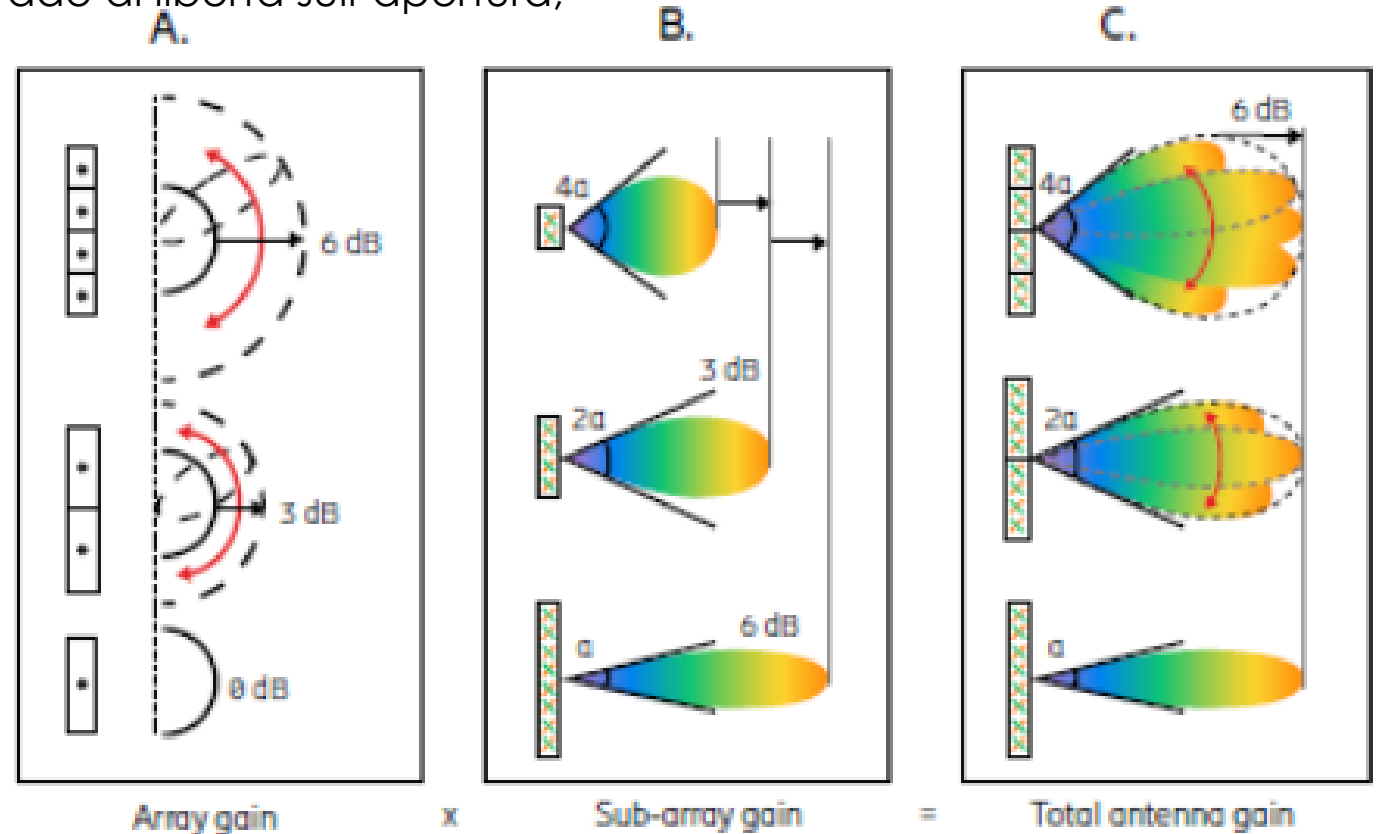
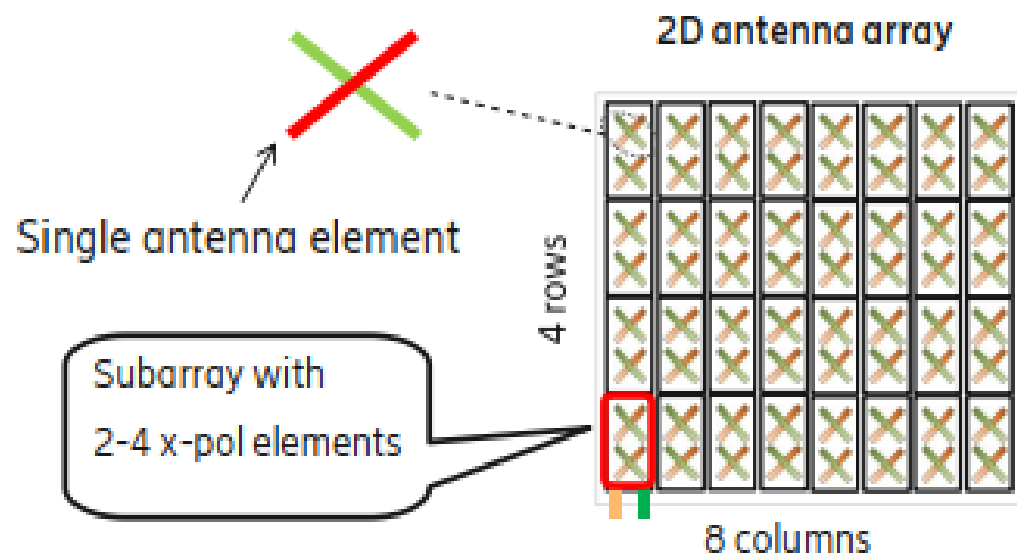


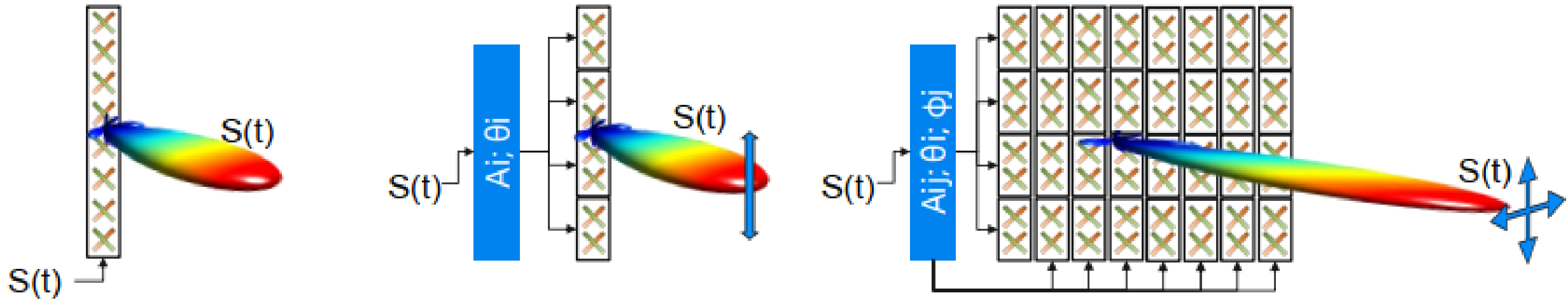
$(2 \times 1)_{SA} (4 \times 8)$



$(4 \times 2)_{SA} (2 \times 4)$

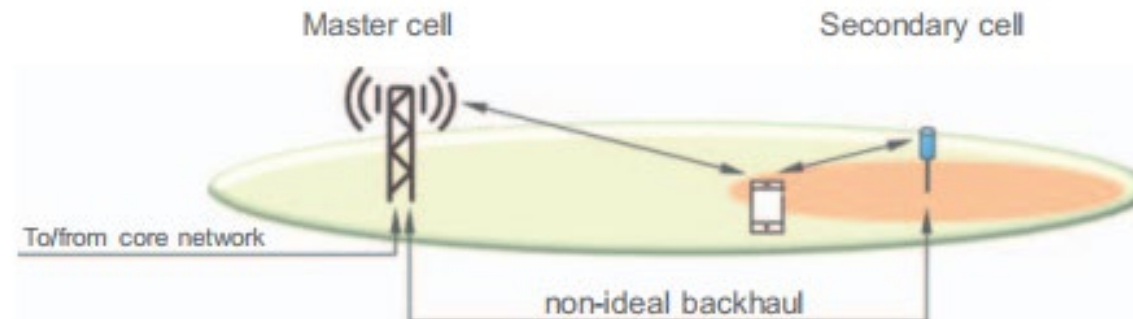
- I subarray determinano la copertura d'angolo;
- Utilizzando appositi algoritmi di controllo delle RF chain è possibile gestire i subarray ed implementare il beam sweeping;
- Il guadagno totale è identico ma si ha un grado di libertà sull'apertura;



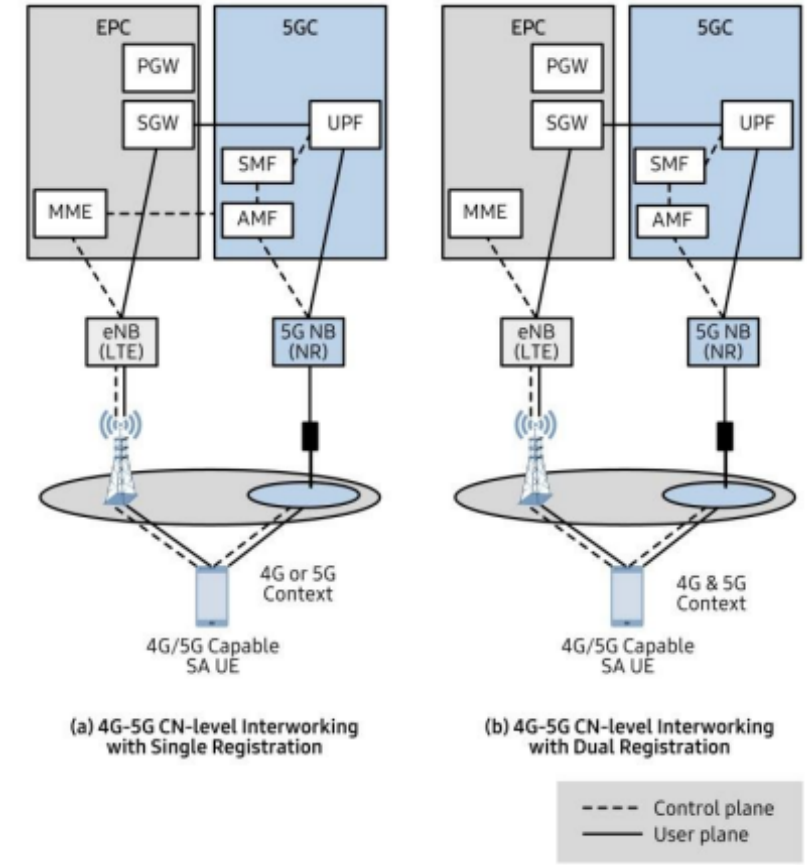


- La direzione del beam viene controllata inviando il medesimo segnale a differenti subarrays;
- Posizionando più subarrays vicini tra loro, il controllore può variare la forma del beam e la direzione nei domini verticali e orizzontali;

- La dual connectivity implica che un device sia connesso a due celle;
- L' user-plane aggregation consente:
  - Ricezione di trasmissioni dati da multipli siti;
  - Separazione del control e user planes;
  - Separazione downlink e uplink;
- Il framework dual connectivity permette l'integrazione di altri schemi di accesso radio, e.g. WLAN, alle reti 3GPP;
- Essenziale per il NR quando quest'ultimo opera in modalità non-standalone in cui l'LTE provvede alla gestione della mobilità ed all'accesso iniziale;



- Garantire la piena copertura alle alte frequenze è complicato perciò è importante introdurre l'interworking con i sistemi operanti alle frequenze inferiori;
- Attraverso l'interworking è possibile complementare un sistema a bassa frequenza con il NR;
- Il 3GPP consente la coesistenza di LTE/NR sia uplink e downlink che nel solo uplink. Le differenze tra uplink e downlink avvengono a causa delle diverse potenze in trasmissione quindi in downlink possono essere utilizzate frequenze più elevate mentre ciò non è accettabile in uplink;

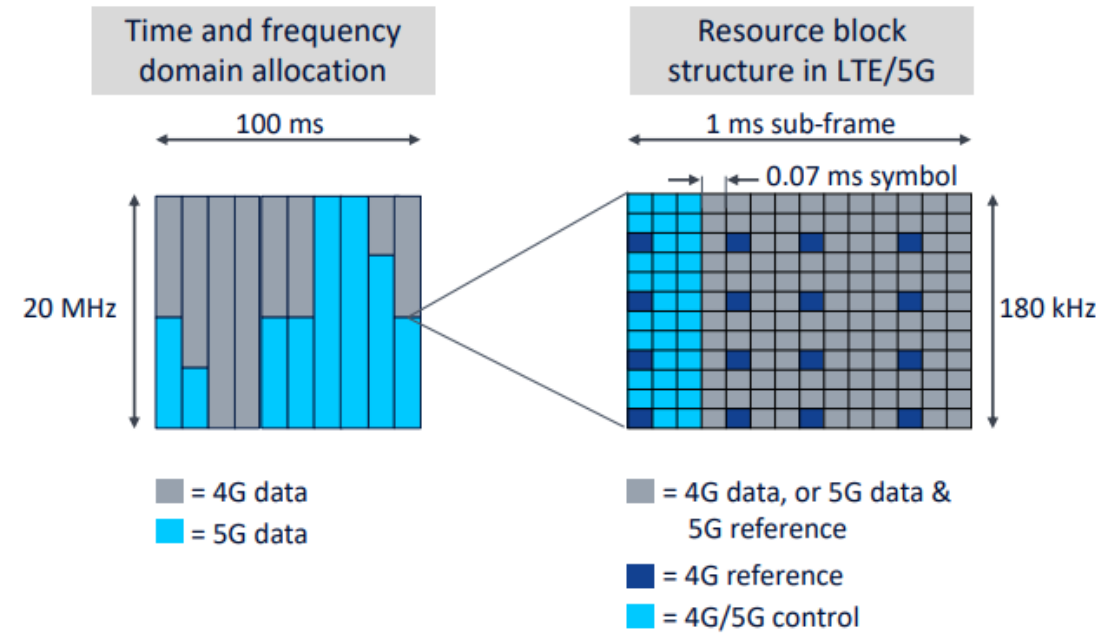




# Coesistenza 4G-5G: Dynamic Spectrum Sharing (DSS)

- Il *Dynamic Spectrum Sharing* (DSS) permette di condividere dinamicamente le risorse Tempo/frequenza tra il 4G ed il 5G;
- Gli operatori che vogliono sviluppare una rete 5G alle frequenze più basse possono eseguire una migrazione graduale utilizzando lo spettro 4G;
- Il beneficio principale riguarda il miglioramento della copertura di rete in quanto questo range di frequenza soffre meno l'attenuazione;

24 – 39 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5G millimeter wave</li> <li>• Hot spot capacity and data rates</li> </ul>	<b>5G deployment without 4G</b>
5 – 6 GHz unlicensed	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 5G local solution</li> <li>• No spectrum license needed</li> </ul>	
3.3 – 5.0 GHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mid-band mainstream 5G spectrum</li> <li>• Urban capacity with massive MIMO</li> </ul>	
600 – 2600 MHz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wide area 5G coverage</li> <li>• Gradual refarming from 4G to 5G</li> </ul>	<b>Dynamic Spectrum Sharing</b>

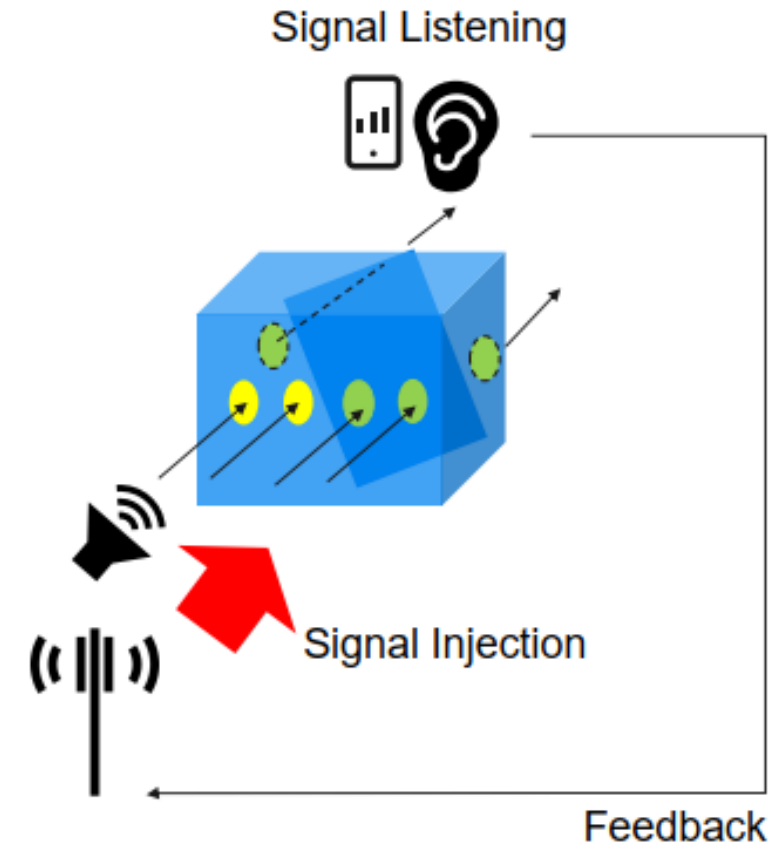




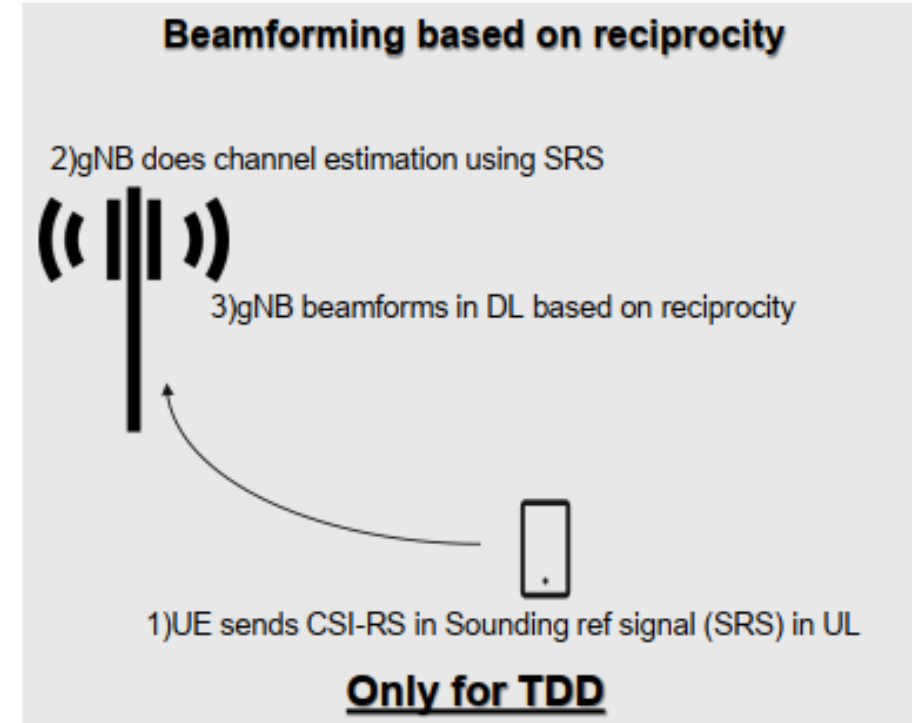
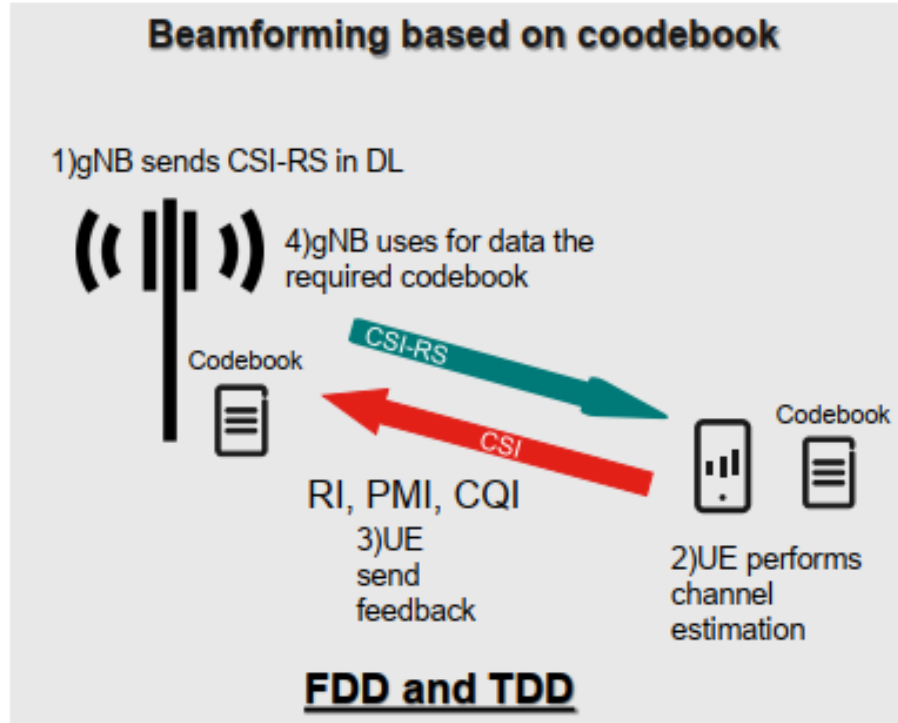


- Analisi di canale e tool simulativi
  - Channel sounding in NR (Downlink, Uplink, Beamforming)
  - Modelli di canale per link simulation (space, time, angle)
  - Tool per la simulazione delle prestazioni di link

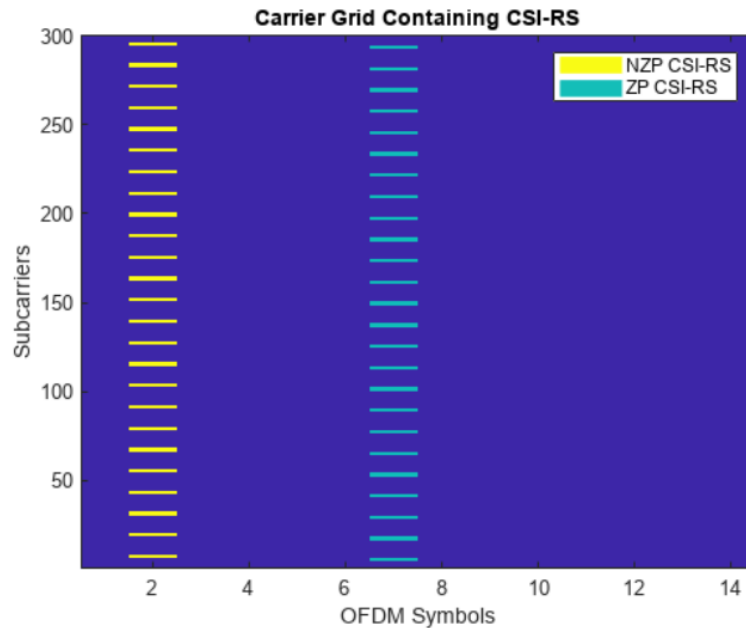
- Il canale può essere schematizzato come una black box di cui non si conoscono le caratteristiche;
- L'approccio con cui si può stimare la black box prevede:
  - Iniezione di un segnale in più punti dello spazio (aree evidenziate in giallo);
  - «Ascolto» del segnale dall'altro capo della black box;
  - Catena di feedback per stimare, se presente, l'interferenza tra i segnali trasmessi;



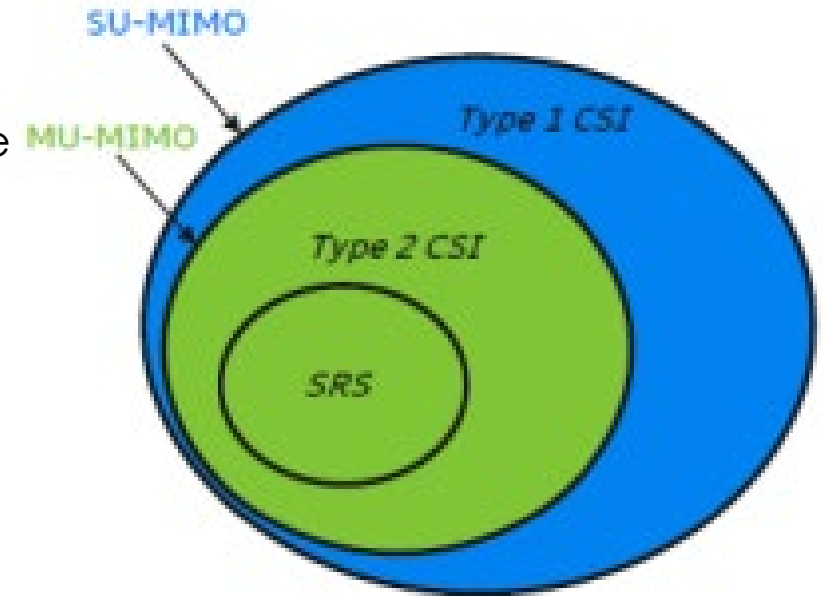
# Channel sounding in NR – Principi base



- Il CSI-RS è un segnale di riferimento utilizzato per la stima di canale e può essere Zero-Power e Non-Zero-Power;
- Sul NZP si basa la misura della potenza ricevuta mentre dal ZP si ottiene una misura dell'interferenza;
- Esecuzione channel sounding in uplink. I Sounding Reference Signals (SRS) misurano l'intensità del campo ricevuto in quanto sono inseriti all'interno della trama OFDMA;

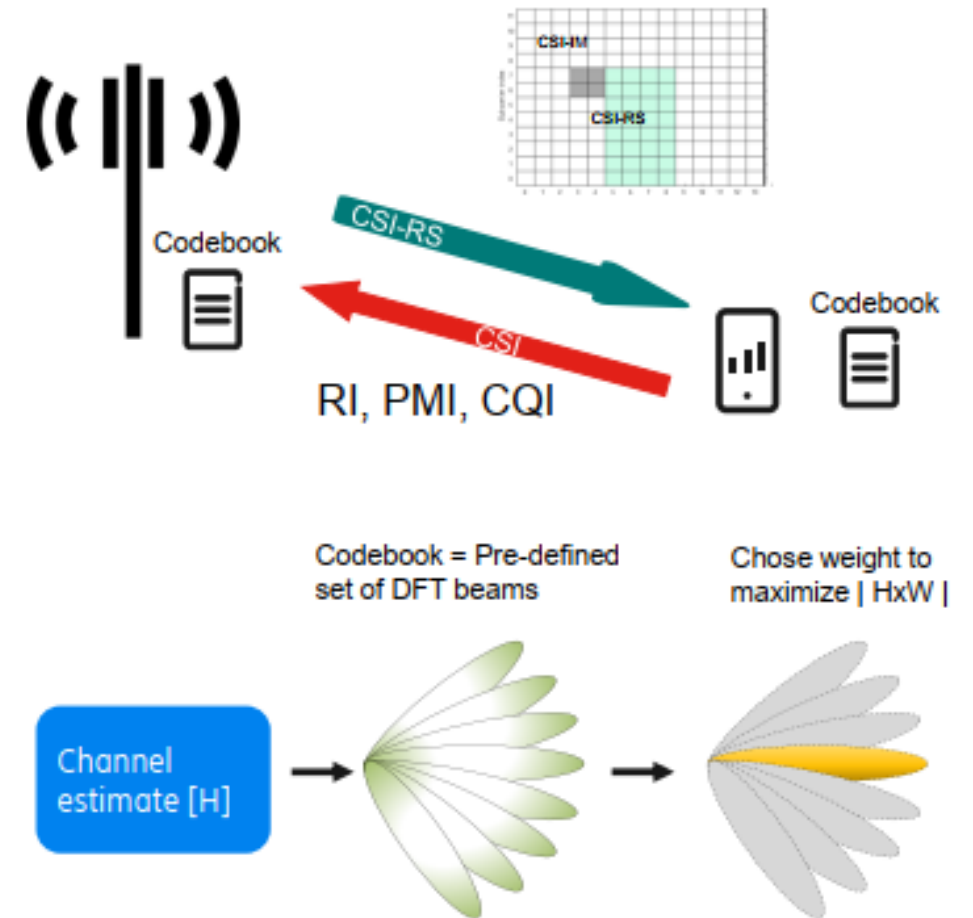


- Downlink common reference signals (CSI-RS);
  - Type 1 CSI codebook:
    - CSI feedback;
    - Utilizzabile nel SU-MIMO;
  - Type 2 CSI codebook:
    - CSI per il caso MU-MIMO;

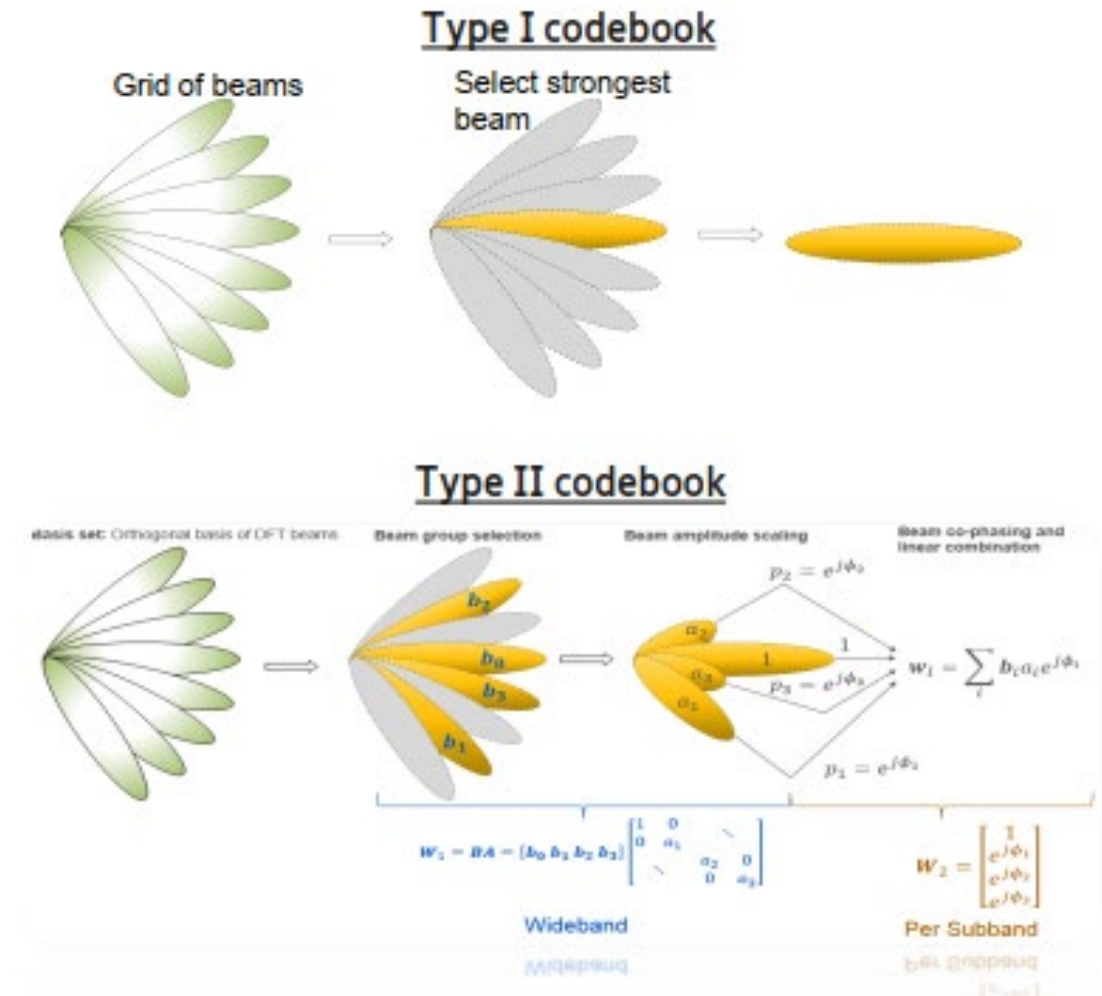


*Coverage Area,  
Mobility, UE Support*

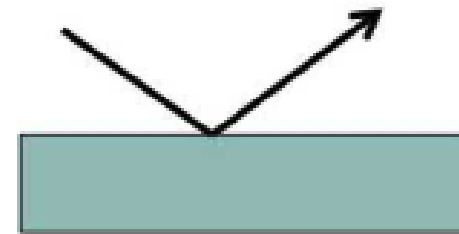
- Come avviene nell'LTE, il **Channel State Information** (CSI) feedback è utilizzato per realizzare la codebook precoding matrix;
- Il ricevitore riporti le CSI al trasmettitore inserendo le seguenti informazioni:
  - **Rank Indicator** (RI): indica il numero di layer, o streams, che può supportare il MIMO;
  - **Precoder-Matrix Indicator** (PMI): dato un certo rank restituisce l'indice del codebook migliore;
  - **Channel-Quality Indicator** (CQI): In base alla qualità del canale viene decisa la coppia Modulazione-Codifica che garantisce le prestazioni migliori;
- il Codebook Type I è utilizzato solo per nel SU-MIMO e massimizza le prestazioni di un solo beam;



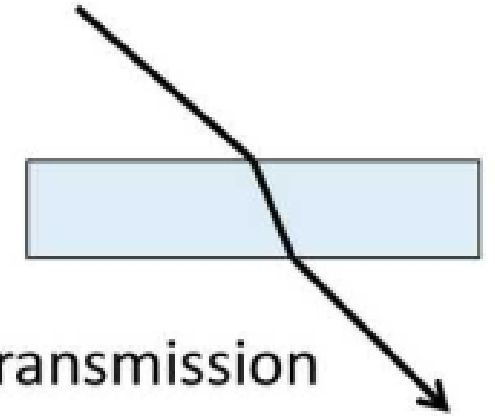
- Type I:
  - Sufficiente per il caso SU-MIMO;
  - Restituisce le informazioni della sola direzione più intensa;
- Type II:
  - Scelta migliore per il MU-MIMO;
  - Restituisce più informazioni sul canale;
  - Rappresentazione di canale più ricca;



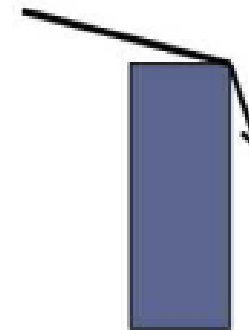
- Nel mondo reale, le comunicazioni radio sperimentano un ampio range di effetti quali:
  - Riflessione;
  - Trasmissione;
  - Diffrazione;
  - Scattering;
- Ad ogni iterazione corrisponde un'attenuazione del segnale diversa rispetto alla propagazione in campo libero;
- La propagazione può essere sia di tipo **LOS** che di tipo **NLOS**:
  - LOS: la linea congiungente Tx-Rx non è geometricamente ostacolata;
  - NLOS: la linea di vista è ostruita dal terreno e/o edifici;



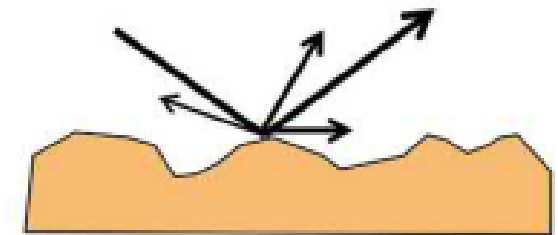
Reflection



Transmission



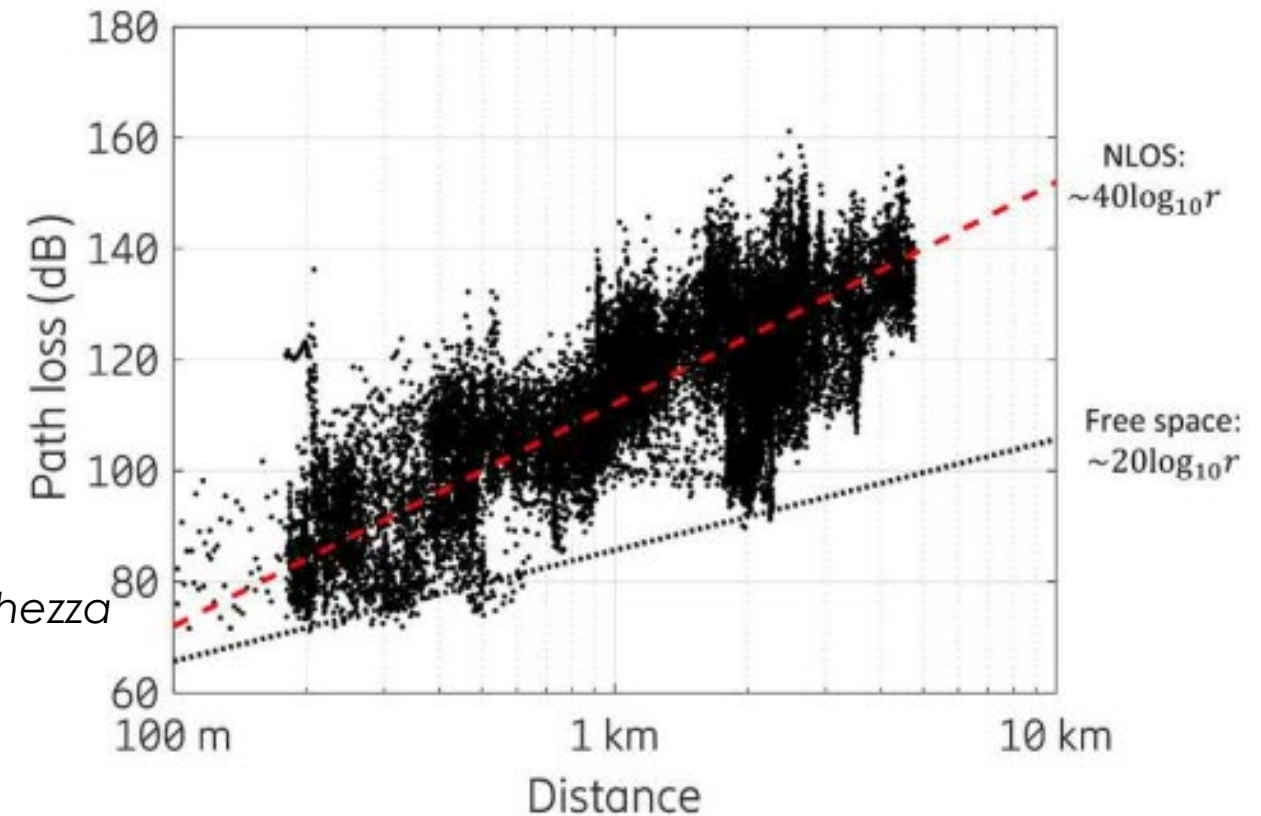
Diffraction



Scattering

- Le variazioni di large-scale comprendono:
  - Path loss;
  - Shadowing;
  - Time e Angular dispersion;
  - *Le variazioni avvengono in chilometri;*
- Le variazioni in small-scale comprendono:
  - Fenomeni costruttivi e distruttivi del segnale;
  - *Le variazioni avvengono nell'ordine della lunghezza d'onda;*

$$PL(dB) = P_{Tx}(dB) - P_{Rx}(dB)$$





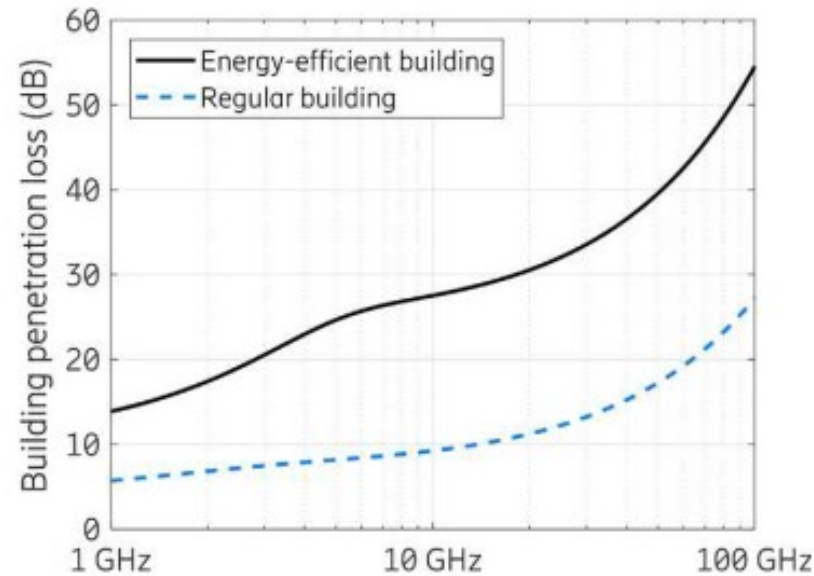
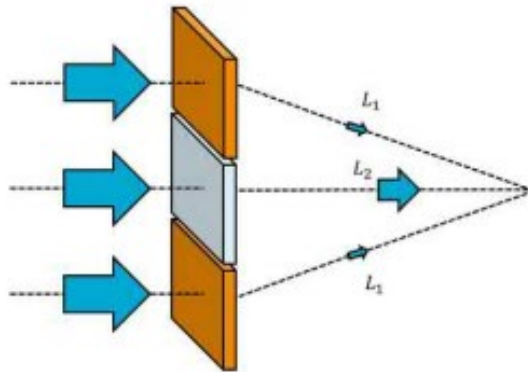
- Uno tra i più semplici modelli sviluppato per il calcolo del path loss è il modello ABG;
- È un modello di tipo one-slope in cui:
  - A rappresenta un offset;
  - B è l'inclinazione della retta;
  - G è il parametro con cui si tiene conto la dipendenza della frequenza;
  - $\sigma$  rappresenta il fading;
- I parametri sono definiti per ogni tipo d'ambiente e scenario;
- Al contributo dello spazio libero si possono sommare le attenuazioni supplementari dovute agli effetti di gas/pioggia e fogliame;

$$PL(\text{dB}) = A + B \log_{10} r + G \log_{10} f + \sigma$$

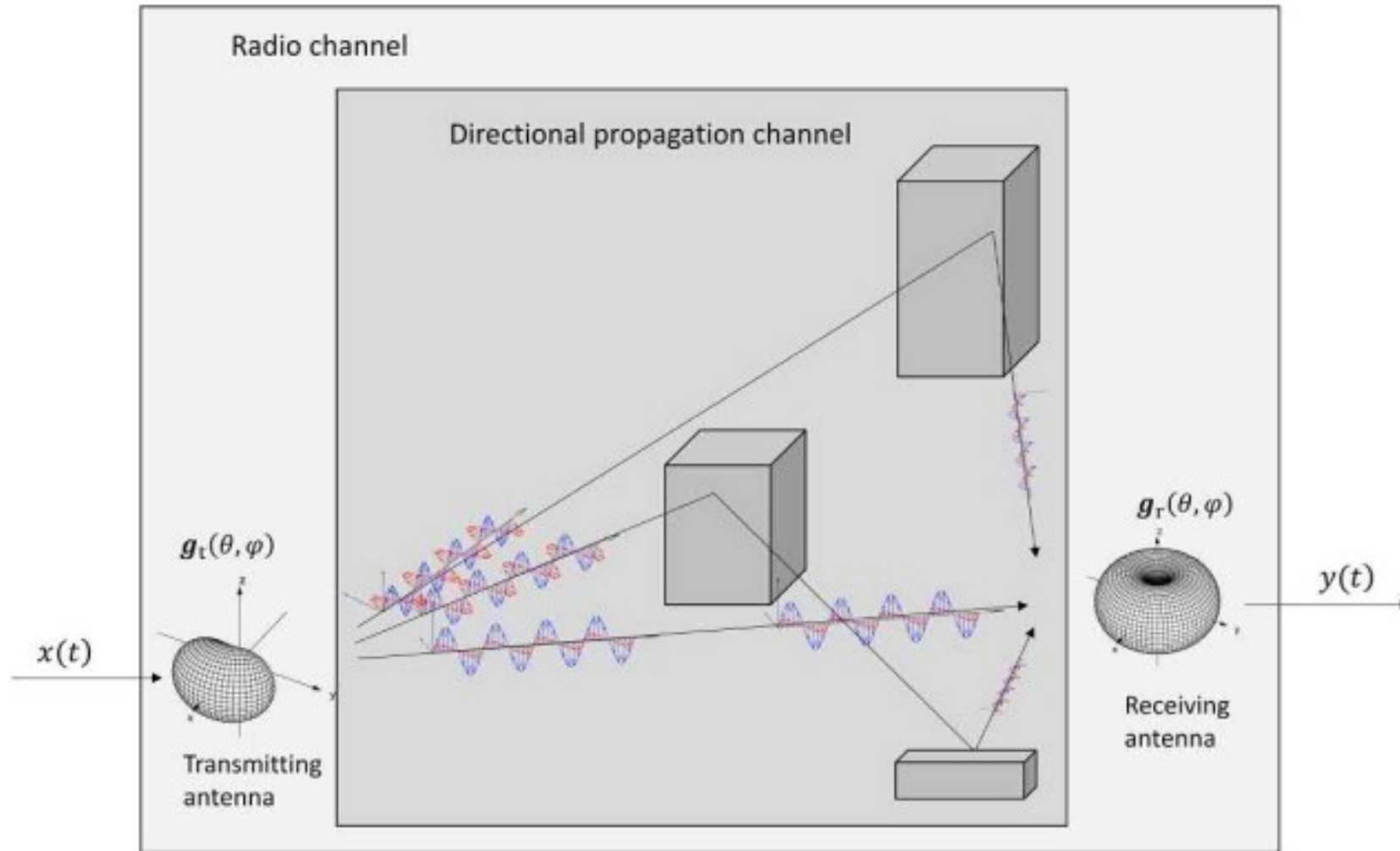
Scenario	Typical Distance Dependence ( <i>B</i> )	Typical Frequency Dependence ( <i>G</i> )
Free space and LOS	20	20
NLOS	Urban macrocell	20–23
	Suburban macrocell	20 at short range, increasing to ~40 at longer range or for lower frequencies
	Rural macrocell	23
	Urban microcell	20–23
	Indoor cell	21–23
	38	23–25

# Stima del path loss – Building Entry Loss

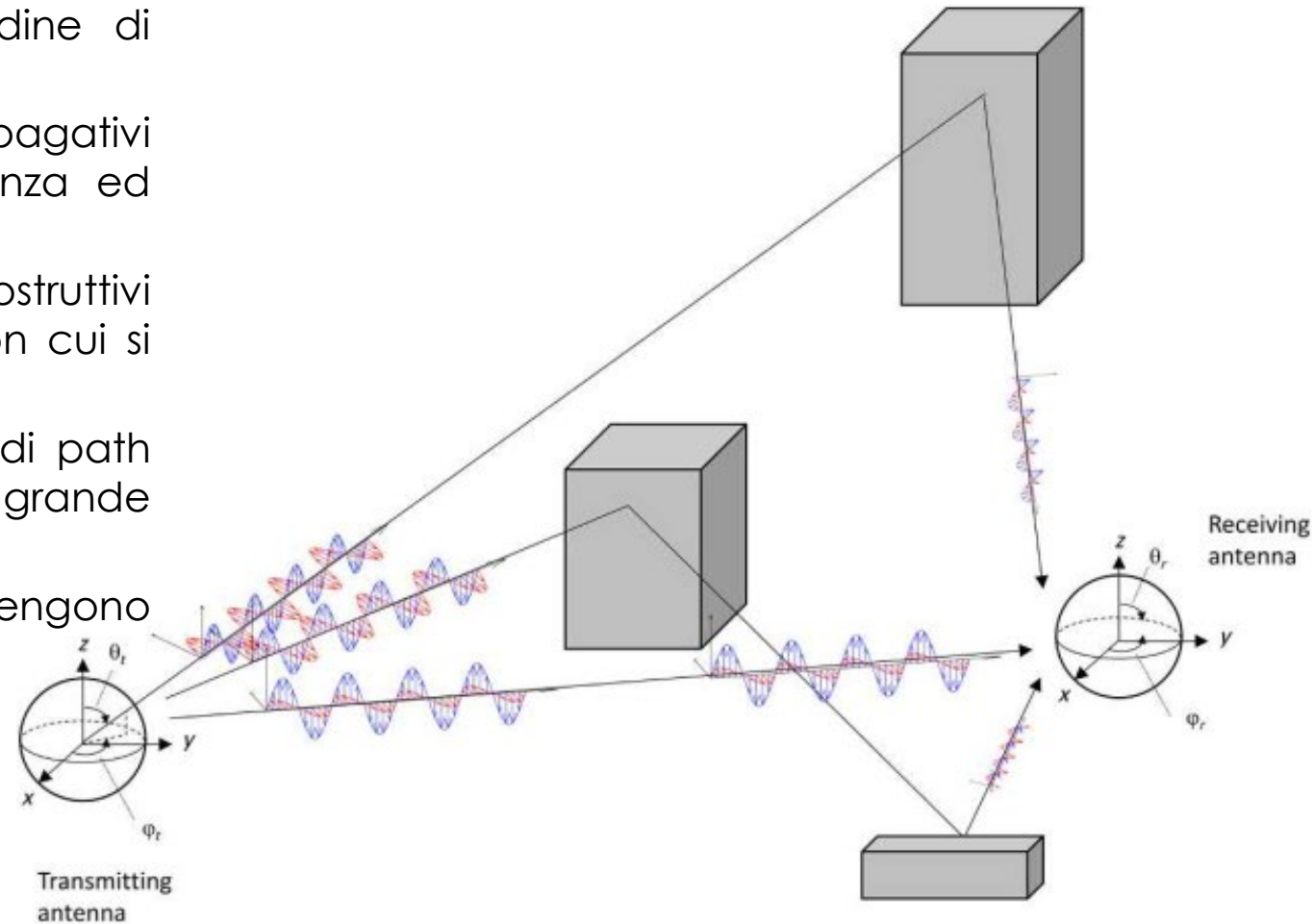
- I modelli semplificati (e.g. ABG model) sono stati sviluppati in un periodo in cui la copertura radio era una priorità del solo ambiente outdoor;
- Per consentire l'analisi degli ambienti indoor sono stati sviluppati dei modelli che stimano la **Building Entry Loss** (BEL) cioè le perdite dovute dalla presenza di muri;
- Si nota come gli edifici termicamente efficienti (vetrate isolanti, cemento, ecc...) producono un effetto attenuativo molto più grande rispetto agli edifici tradizionali;



$$L_{\text{eff}} = \frac{1}{\sum_n P_n \frac{1}{L_n}}$$

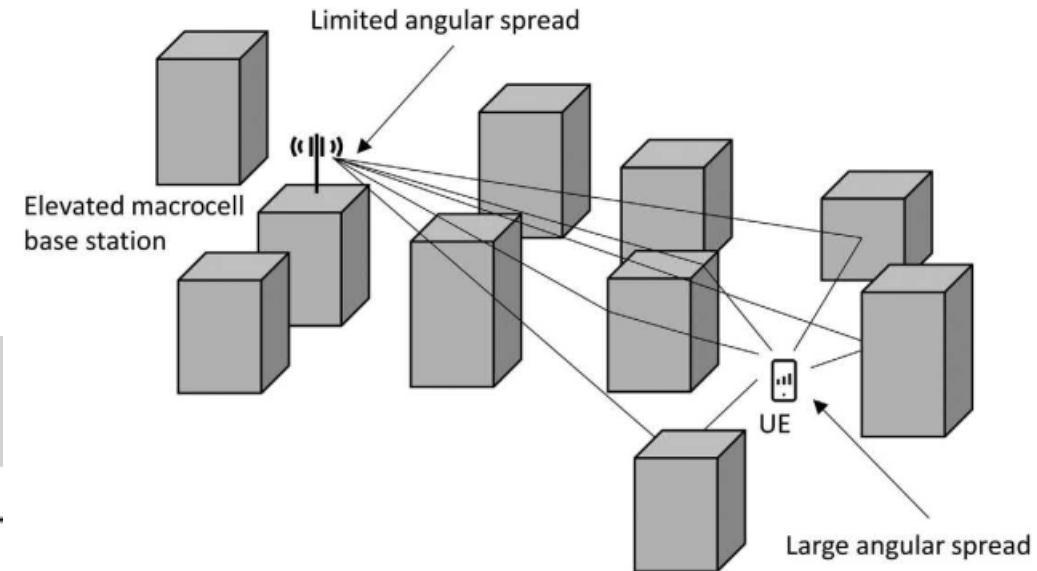


- Un'onda elettromagnetica che interagisce con l'ambiente complesso genera una moltitudine di onde secondarie riflesse e difratte;
- In un'ambiente reale i diversi percorsi propagativi sono caratterizzati dai loro angoli di partenza ed arrivo;
- I vari percorsi possono combinarsi in effetti costruttivi e distruttivi in base alla differenza in fase con cui si incontrano;
- Lo **shadow fading** rappresenta le variazioni di path loss che avvengono in un ordine molto più grande rispetto alla lunghezza d'onda;
- Il **fast fading** rappresenta le perdite che avvengono nell'ordine della lunghezza d'onda;

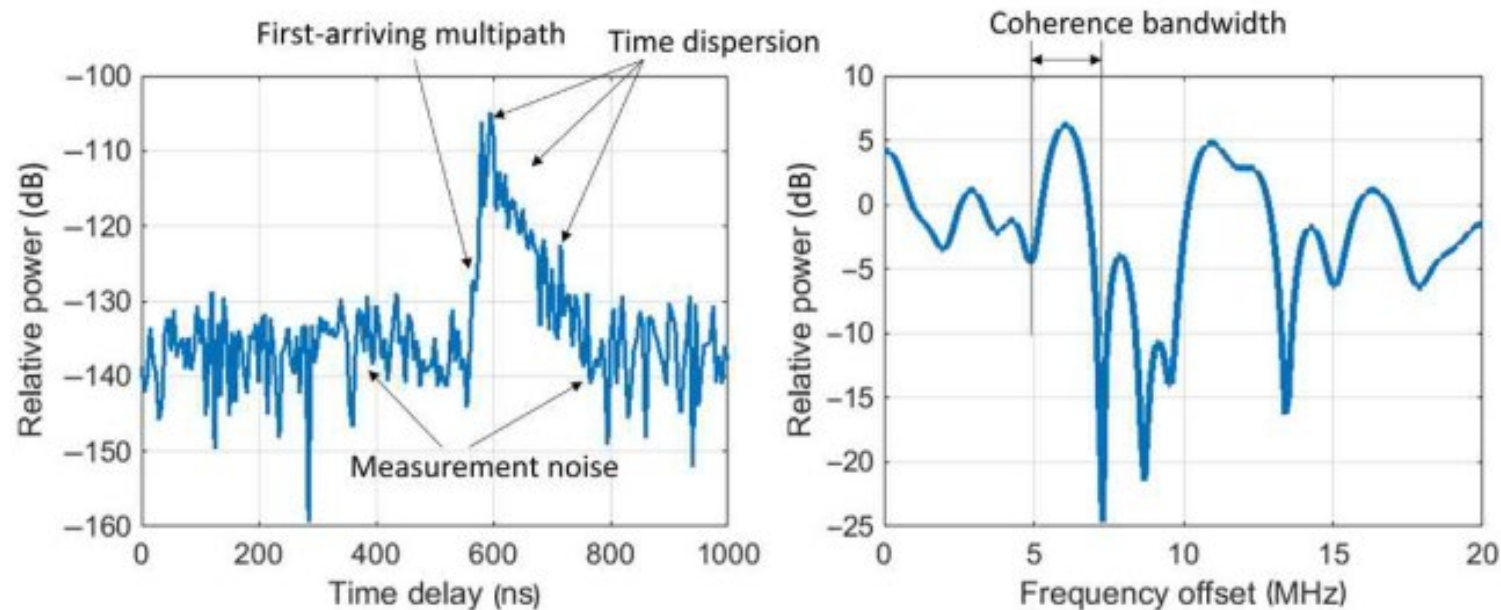


- In uno scenario di telefonia mobile il maggior numero di riflessioni e scattering avvengono nelle vicinanze dell'UE piuttosto che la stazione base;
- Al maggior numero di riflessioni corrisponde uno spread angolare più elevato;
- In tabella sono mostrati i valori **root mean square** (rms) di diversi ambienti;

Scenario	Typical Horizontal (Azimuth) rms Angular Spread at Base Station (degrees)	Typical Horizontal (Azimuth) rms Angular Spread at the UE (degrees)	Typical rms Delay Spread (ns)
LOS	0–5	0–50	0–100
Urban macrocell	5–25	20–90	50–500
Suburban macrocell	3–15		
NLOS			
Rural macrocell	3–10		
Urban microcell	10–30		50–300
Indoor cell	10–40		20–100



- Oltre allo spread angolare si può definire anche lo spread temporale;
- La dispersione temporale può essere osservata attraverso la risposta impulsiva del canale;
- Nel dominio delle frequenze può essere definita la *banda di coerenza*;
- La banda di coerenza è inversamente proporzionale alla dispersione temporale;
- In figura sono mostrate la risposta impulsiva e la funzione di trasferimento del medesimo canale di cui sono acquisiti diversi campioni;

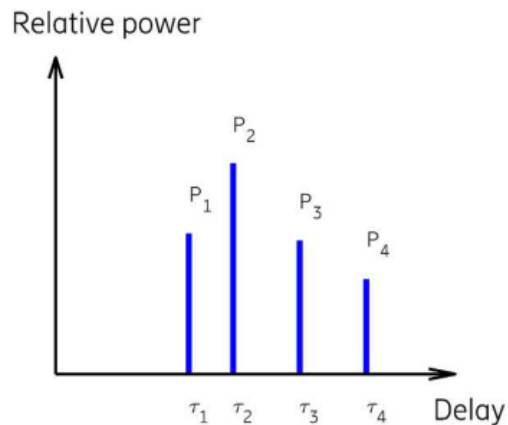


- A seguito dello sviluppo delle reti di comunicazione radio si è reso necessario lo sviluppo di nuovi modelli che fossero in grado di stimare in modo preciso il campo elettromagnetico;
- Un modello deve caratterizzare il path loss e gli effetti legati al multipath;
- I modelli possono essere di tipo stocastico e deterministico:
  - I modelli stocastici sono sviluppati a partire da misure ottenute nell'ambiente reale;
  - I modelli deterministici richiedono la conoscenza esatta dell'ambiente di cui si vuole sviluppare l'analisi;

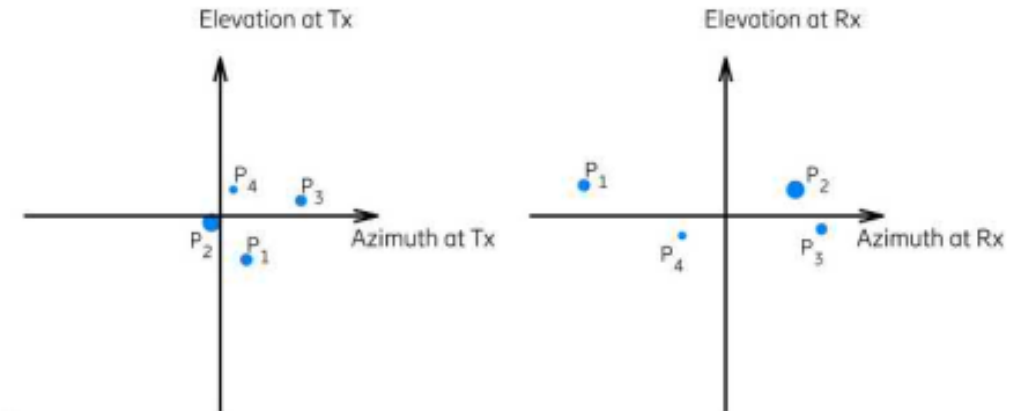
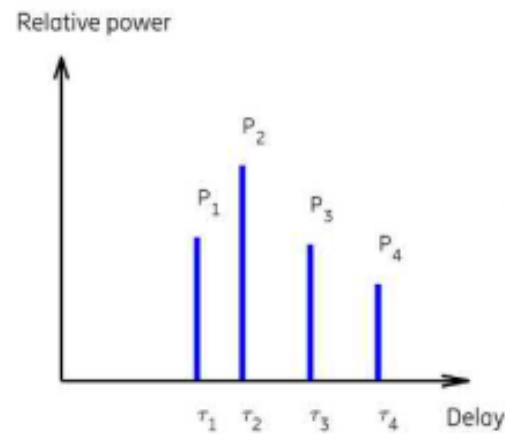
- Un modello stocastico può essere composto da più modelli separati, anche indipendenti tra loro, utilizzati per stimare le seguenti componenti:
  - **Potenza media:** dipende dal path loss, dallo shadow fading ma anche dal guadagno d'antenna;
  - **Variabilità del segnale:** modelli che stimano le statistiche del fading, es. Rayleigh o Rice;
  - **Velocità di cambiamento del segnale ricevuto nel tempo:** Questa è una funzione della mobilità del trasmettitore e/o ricevitore, inoltre anche l'angular spread del multipath influenza questo parametro.
  - **Velocità di cambiamento del segnale ricevuto nel dominio delle frequenze:** definito utilizzando la banda di coerenza ed il rms delay spread. Questo è una funzione del multi-path dispersion dei ritardi, la modalità con cui viene rappresentata più frequentemente è il modello *Tapped Delay Line (TDL)* che rappresenta la risposta impulsiva del canale;



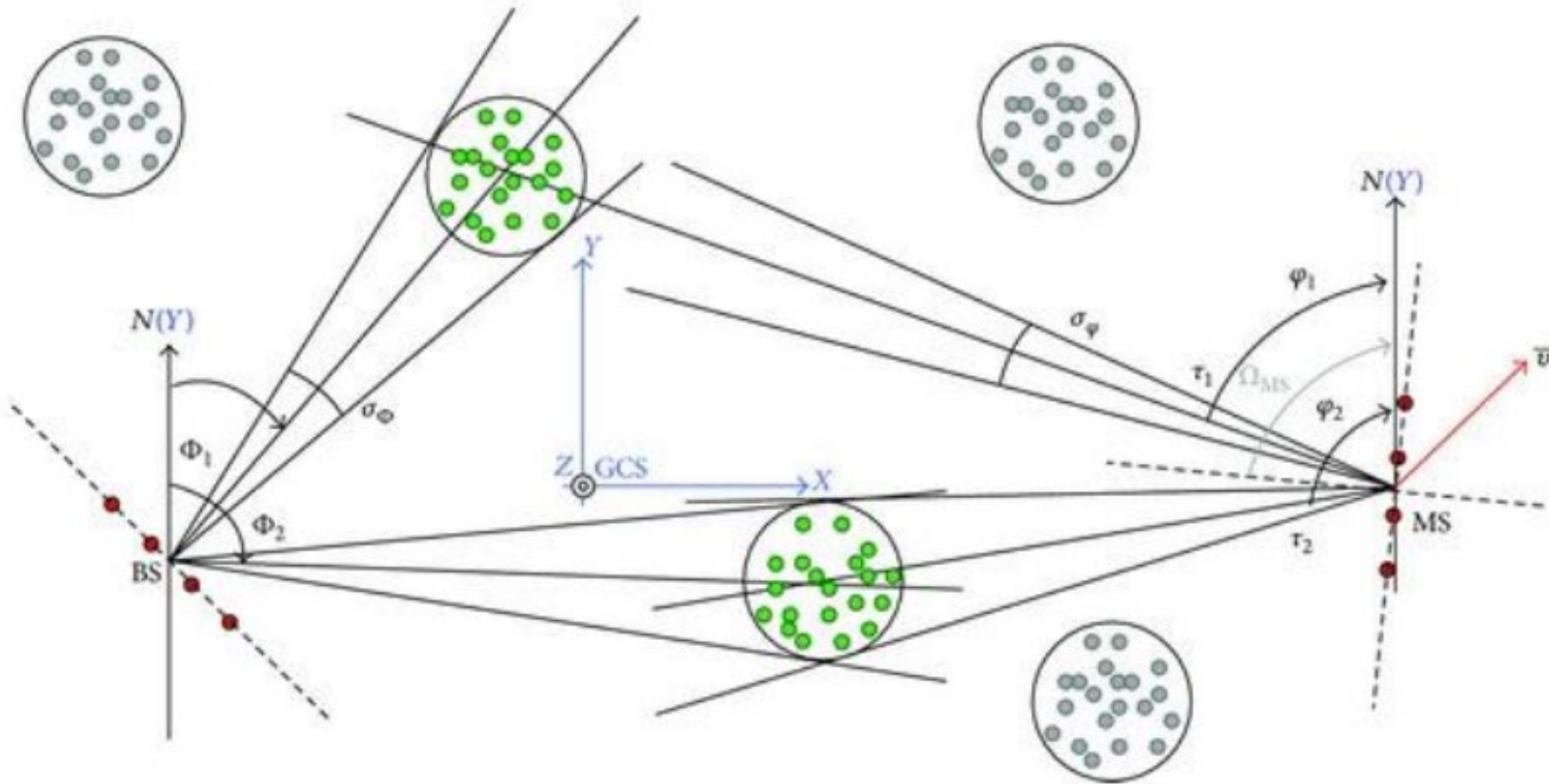
- In basso a sinistra è mostrata la risposta impulsiva rappresentata secondo il modello TDL in cui, ad ogni path, è associata una potenza relativa ed il rispettivo ritardo propagativo;



- In basso a destra è mostrata la risposta impulsiva rappresentata secondo il modello Clustered Delay Line (CDL) in cui la rappresentazione nel dominio del tempo è associata la descrizione degli angoli di arrivo e partenza dei vari cluster;



# Clustered Delay Line (CDL)



- Come si può vedere dall'immagine il modello CDL è una estensione geometrica dei modelli TDL;
- La rappresentazione geometrica è ben descritta dagli angoli di arrivo e partenza dei vari percorsi;
- La descrizione è talmente tanto dettagliata che un modello CDL rappresenta un'unica realizzazione dipendente dal diagramma d'antenna;

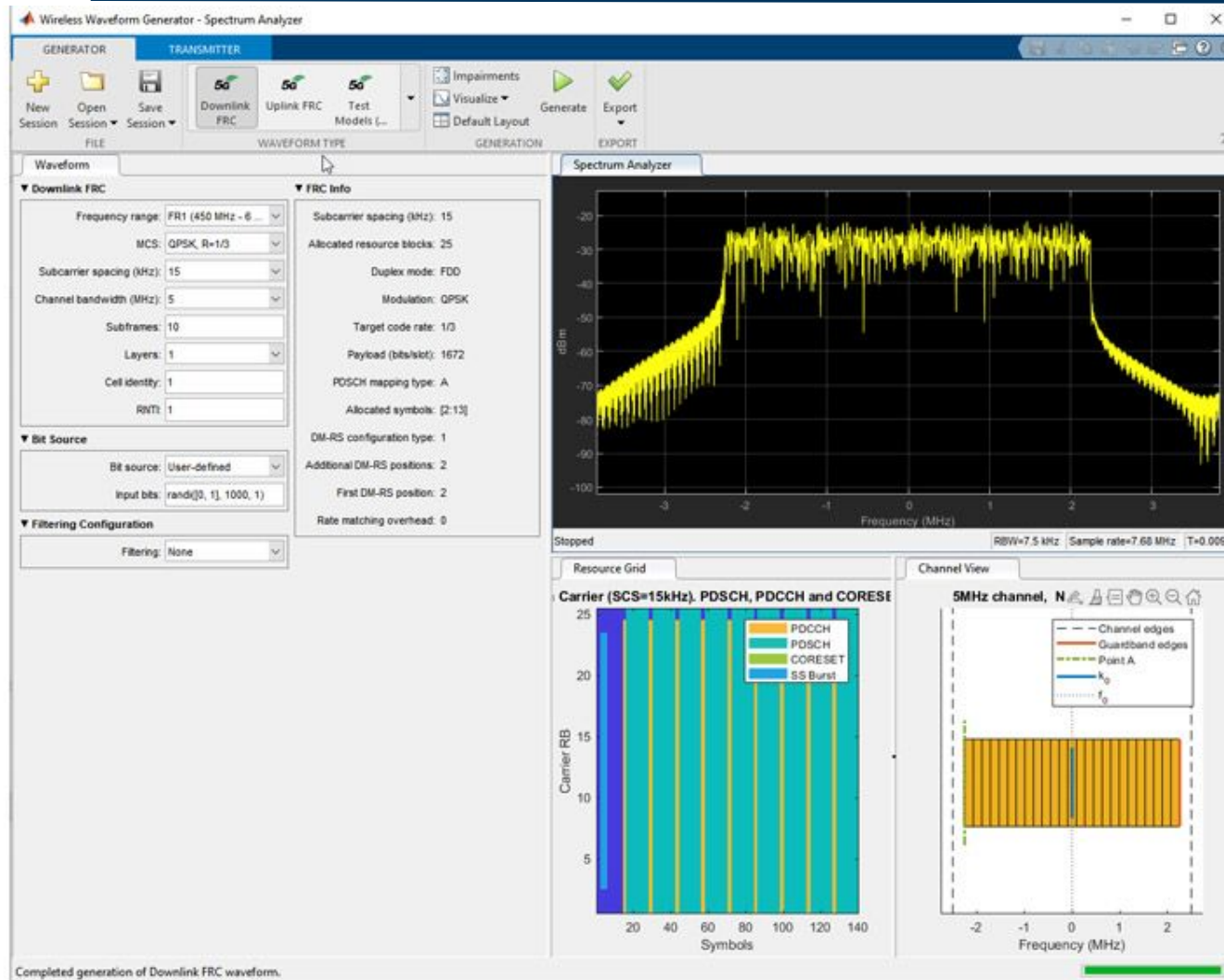
Tap #	Normalized delay	Power in [dB]	Fading distribution
1	0.0000	-13.4	Rayleigh
2	0.3819	0	Rayleigh
3	0.4025	-2.2	Rayleigh
4	0.5868	-4	Rayleigh
5	0.4610	-6	Rayleigh
6	0.5375	-8.2	Rayleigh
7	0.6708	-9.9	Rayleigh
8	0.5750	-10.5	Rayleigh
9	0.7618	-7.5	Rayleigh
10	1.5375	-15.9	Rayleigh
11	1.8978	-6.6	Rayleigh
12	2.2242	-16.7	Rayleigh
13	2.1718	-12.4	Rayleigh
14	2.4942	-15.2	Rayleigh
15	2.5119	-10.8	Rayleigh
16	3.0582	-11.3	Rayleigh
17	4.0810	-12.7	Rayleigh
18	4.4579	-16.2	Rayleigh
19	4.5695	-18.3	Rayleigh
20	4.7966	-18.9	Rayleigh
21	5.0066	-16.6	Rayleigh
22	5.3043	-19.9	Rayleigh
23	9.6586	-29.7	Rayleigh

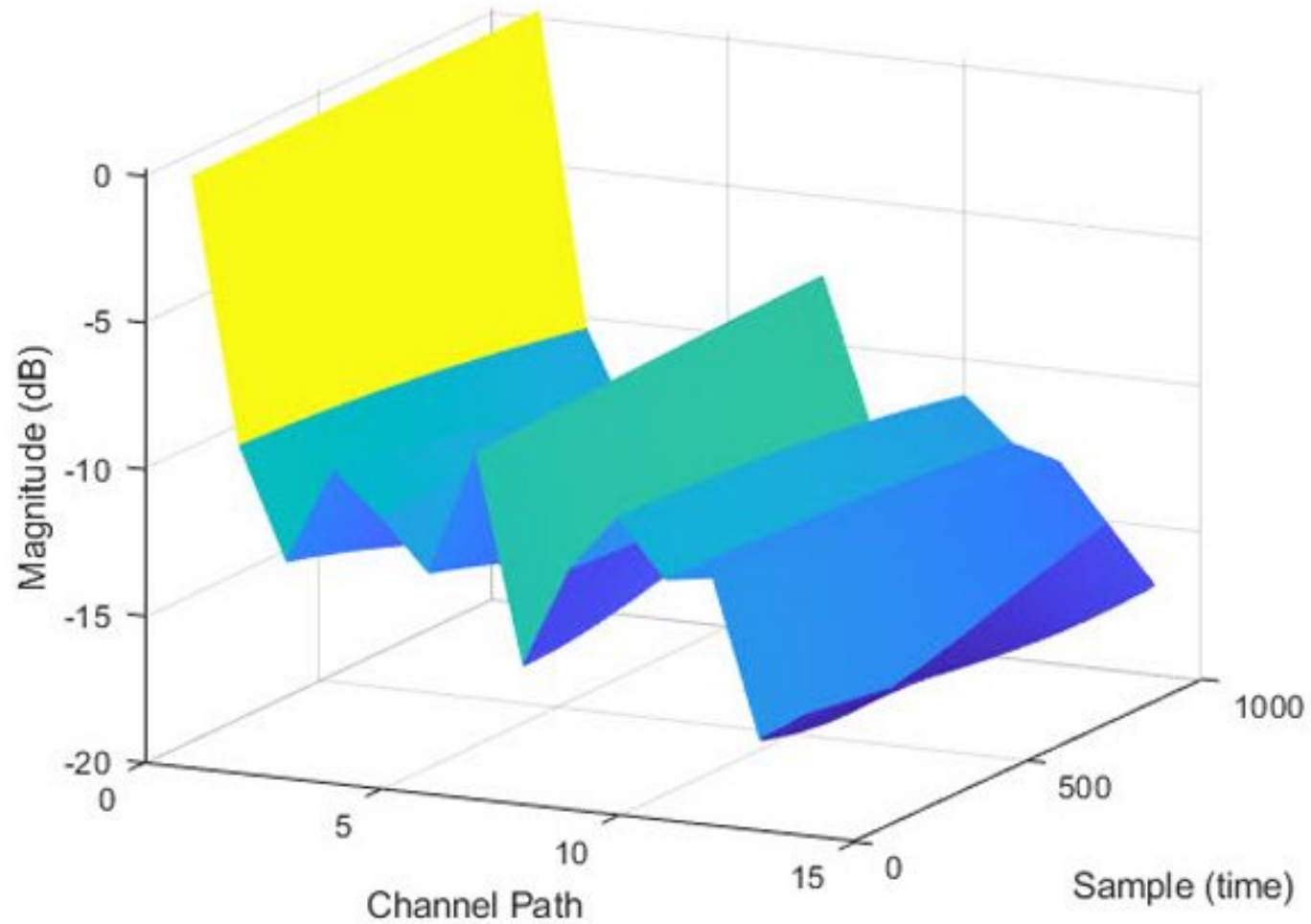
Cluster #	Normalized delay	Power in [dB]	AOD in [°]	AOA in [°]	ZOD in [°]	ZOA in [°]
1	0.0000	-13.4	-178.1	51.3	50.2	125.4
2	0.3819	0	-4.2	-152.7	93.2	91.3
3	0.4025	-2.2	-4.2	-152.7	93.2	91.3
4	0.5868	-4	-4.2	-152.7	93.2	91.3
5	0.4610	-6	90.2	76.6	122	94
6	0.5375	-8.2	90.2	76.6	122	94
7	0.6708	-9.9	90.2	76.6	122	94
8	0.5750	-10.5	121.5	-1.8	150.2	47.1
9	0.7618	-7.5	-81.7	-41.9	55.2	56
10	1.5375	-15.9	158.4	94.2	26.4	30.1
11	1.8978	-6.6	-83	51.9	126.4	58.8
12	2.2242	-16.7	134.8	-115.9	171.6	26
13	2.1718	-12.4	-153	26.6	151.4	49.2
14	2.4942	-15.2	-172	76.6	157.2	143.1
15	2.5119	-10.8	-129.9	-7	47.2	117.4
16	3.0582	-11.3	-136	-23	40.4	122.7
17	4.0810	-12.7	165.4	-47.2	43.3	123.2
18	4.4579	-16.2	148.4	110.4	161.8	32.6
19	4.5695	-18.3	132.7	144.5	10.8	27.2
20	4.7966	-18.9	-118.6	155.3	16.7	15.2
21	5.0066	-16.6	-154.1	102	171.7	146
22	5.3043	-19.9	126.5	-151.8	22.7	150.7
23	9.6586	-29.7	-56.2	55.2	144.9	156.1
Per-Cluster Parameters						
Parameter	CASD in [°]	CASA in [°]	CZSD in [°]	CZSA in [°]	XPR in [dB]	
Value	5	11	3	3	10	

- I modelli deterministici utilizzano modelli di propagazione di tipo *site-specific* e sono *particolarmente utili* quando si vogliono valutare *Key Performance Indicators* (KPI) quali copertura e capacità rispetto a variazioni della posizione della stazione base;
- Il modello richiede la conoscenza dell'altimetria quanto più precisa possibile
- Questi algoritmi hanno un costo computazionale molto elevato;



- In commercio esistono diversi tool di simulazione:
  - 5G Toolbox – Mathworks:
    - Generazione forme d'onda;
    - Simulazioni di link;
    - Test di produttività;
  - Sionna – Nvidia:
    - Simulazioni di link;
- In generale i simulatori permettono di personalizzare i parametri del canale fisico così come il set-up del canale vero e proprio;







# Tool simulazione – Modello di propagazione CDL

