



# Campi elettromagnetici e 5G

Sara Adda

Arpa Piemonte – Dipartimento Rischi Fisici e  
Tecnologici

# Lo sviluppo delle reti di telefonia mobile

## Mobile communications: from 1G to 5G

Generation	Device	Specifications
1G		
2G		
3G		
4G		



People & Things

# Applicazioni

Connessione mobile  
in banda larga

2G

3G

4G

Connessioni MtM e  
Internet of Things

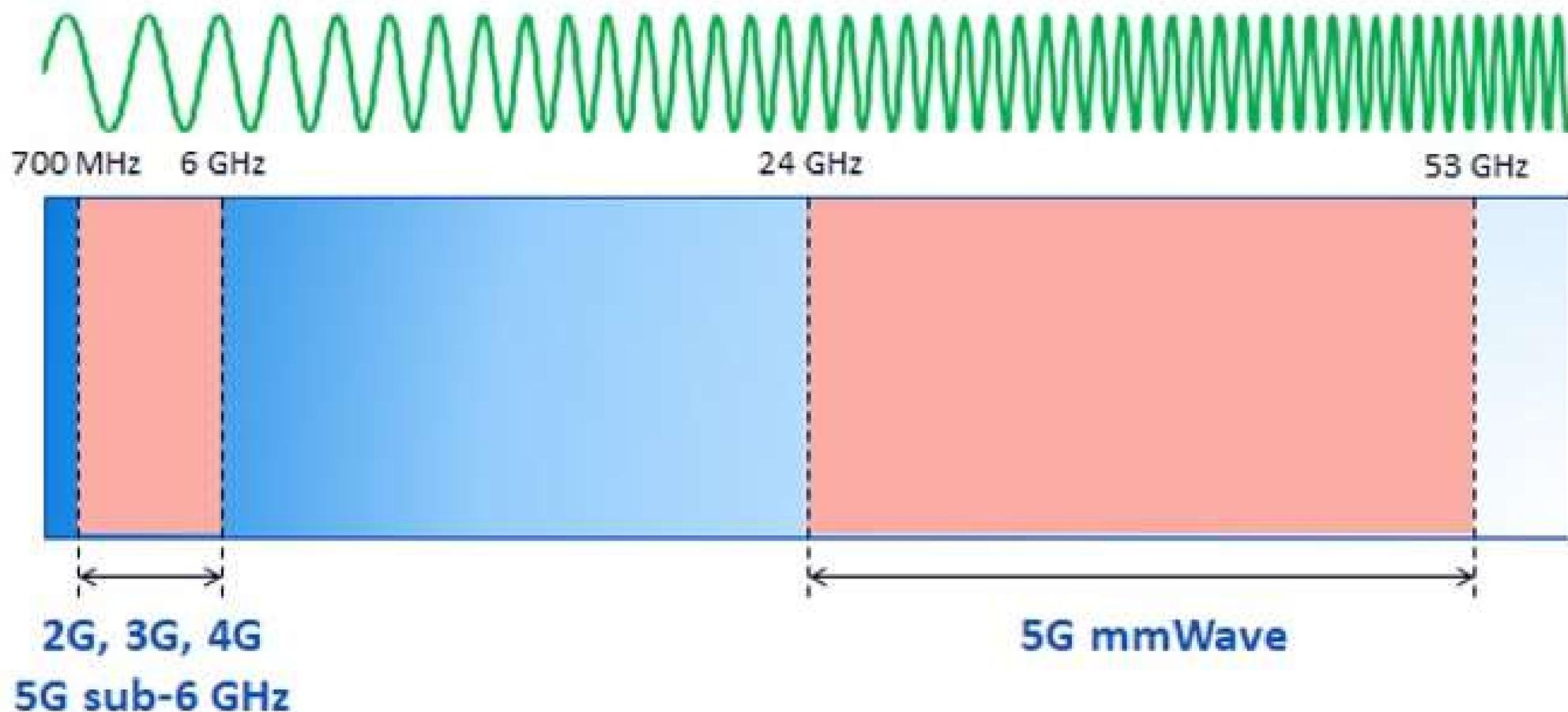


Applicazioni a bassa  
latenza



5G

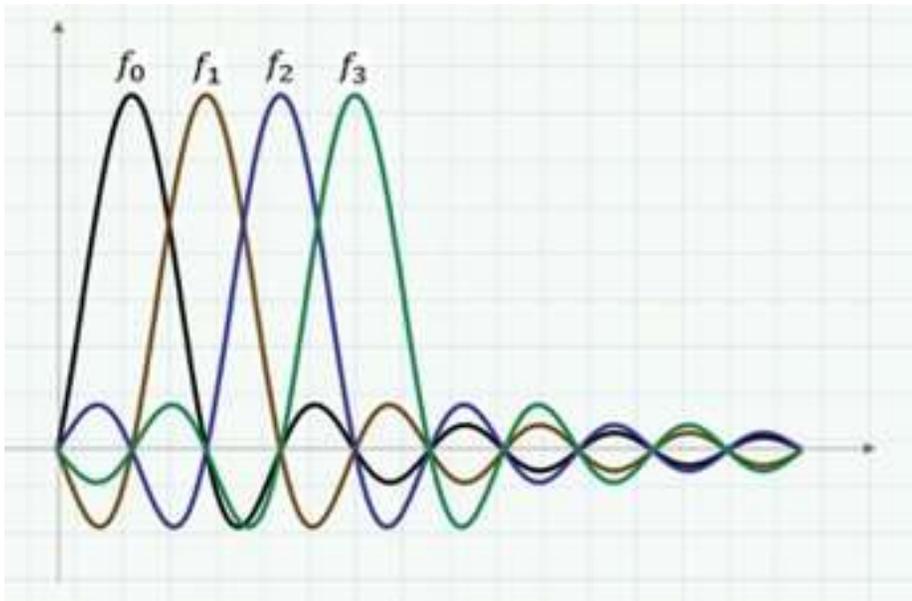
# Spettro elettromagnetico



- Nella porzione di spettro da **700 MHz a 6 GHz** convivono le tecnologie già attive (2G, 3G e 4G) e quelle in via di attivazione (5G).
- Il sistema 5G esplorerà anche **porzioni di spettro** inedite per la telefonia mobile, occupando anche la banda delle onde millimetriche da **24 GHz a 53 GHz**

## Tecnologie e sistemi di accesso alla rete : 4G e 5G

- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)
- Ciascuna sottoportante è modulata con modulazione digitale QPSK, 16 QAM, 64 QAM (nel 5G anche 256 QAM)
- Ampiezza canale variabile: per il 4G da 1.4 a 20 MHz, per il 5G fino a 100MHz sub- 6GHz, fino a 400 MHz nella banda delle onde millimetriche
- Applicabilità flessibile a diverse bande di frequenza



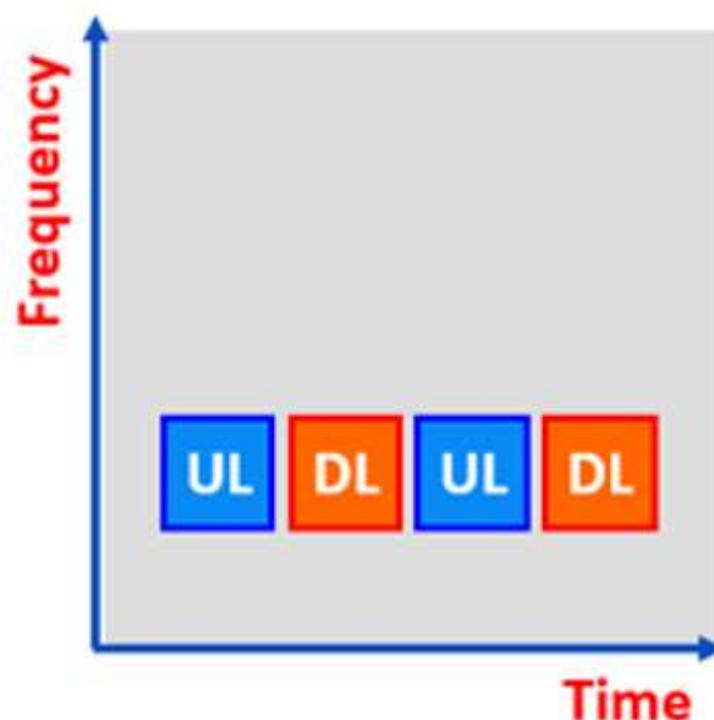
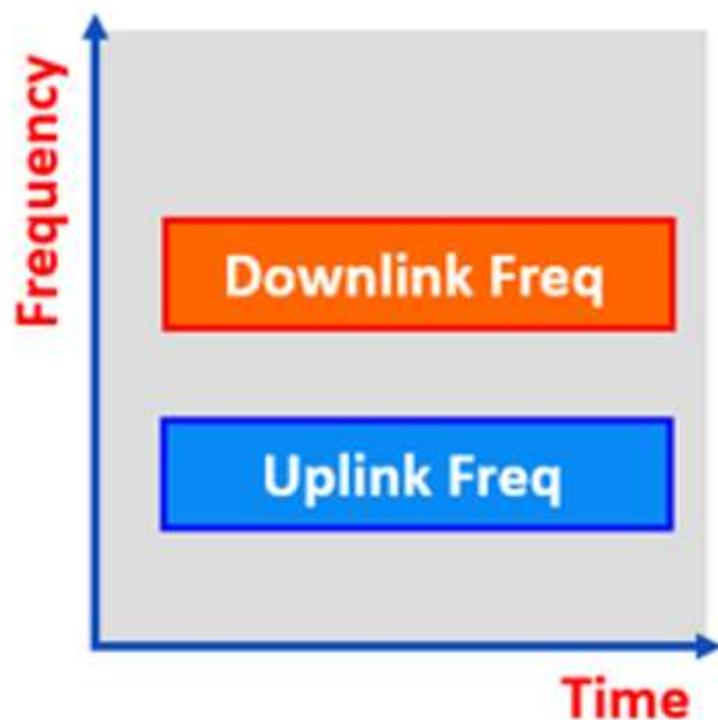
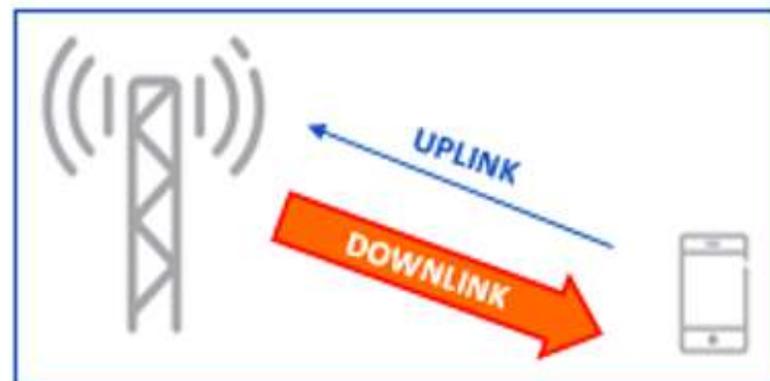
Nel 4G la larghezza spettrale delle sottoportanti è di 15kHz, mentre nel 5G NON E' FISSA (numerologia variabile). In funzione della larghezza delle sottoportanti, varia la durata del simbolo

$\mu$	$\Delta f = 2^\mu \cdot 15$ [kHz]	$\tau = 1 / \Delta f$ [ $\mu$ s]
0	15	70
1	30	35
2	60	17.5
3	120	8.75
4	240	4.38

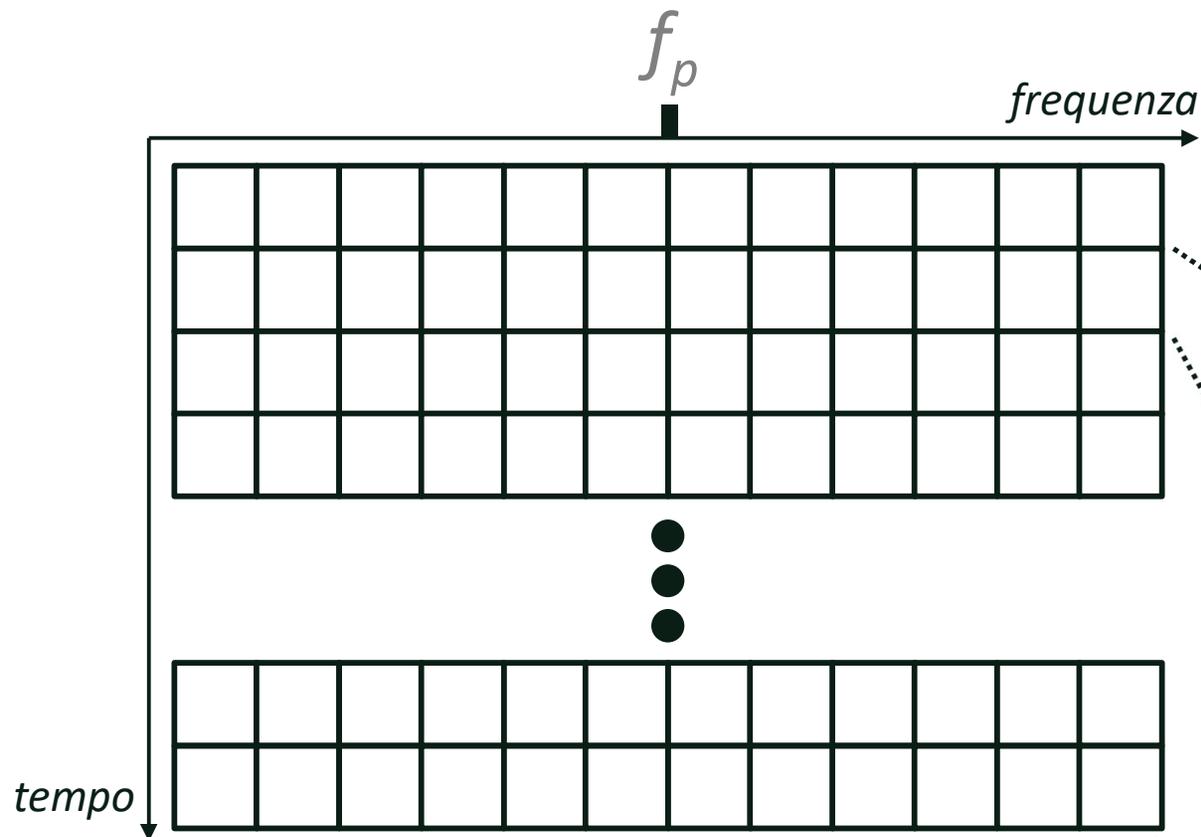
# Duplexing

4G e 5G prevedono 2 modalità di accesso alla risorsa radio: **FDD** e **TDD**

- **Frequency Division Duplex (FDD):**  
DL e UL occupano **frequenze distinte**
- **Time Division Duplex (TDD):**  
**stessa frequenza** con **alternanza temporale**



# Struttura della trama



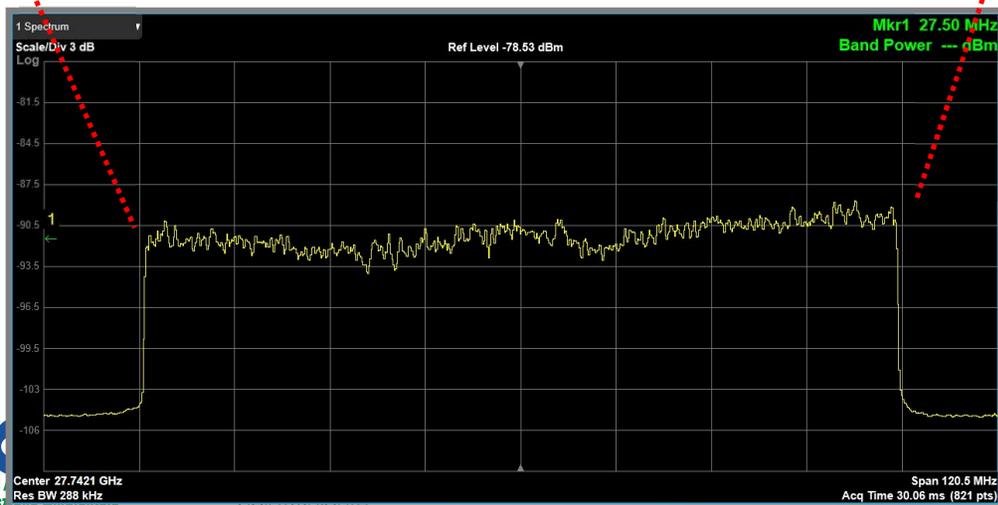
4G e 5G hanno strutture analoghe

$\Delta f$

*Resource element*

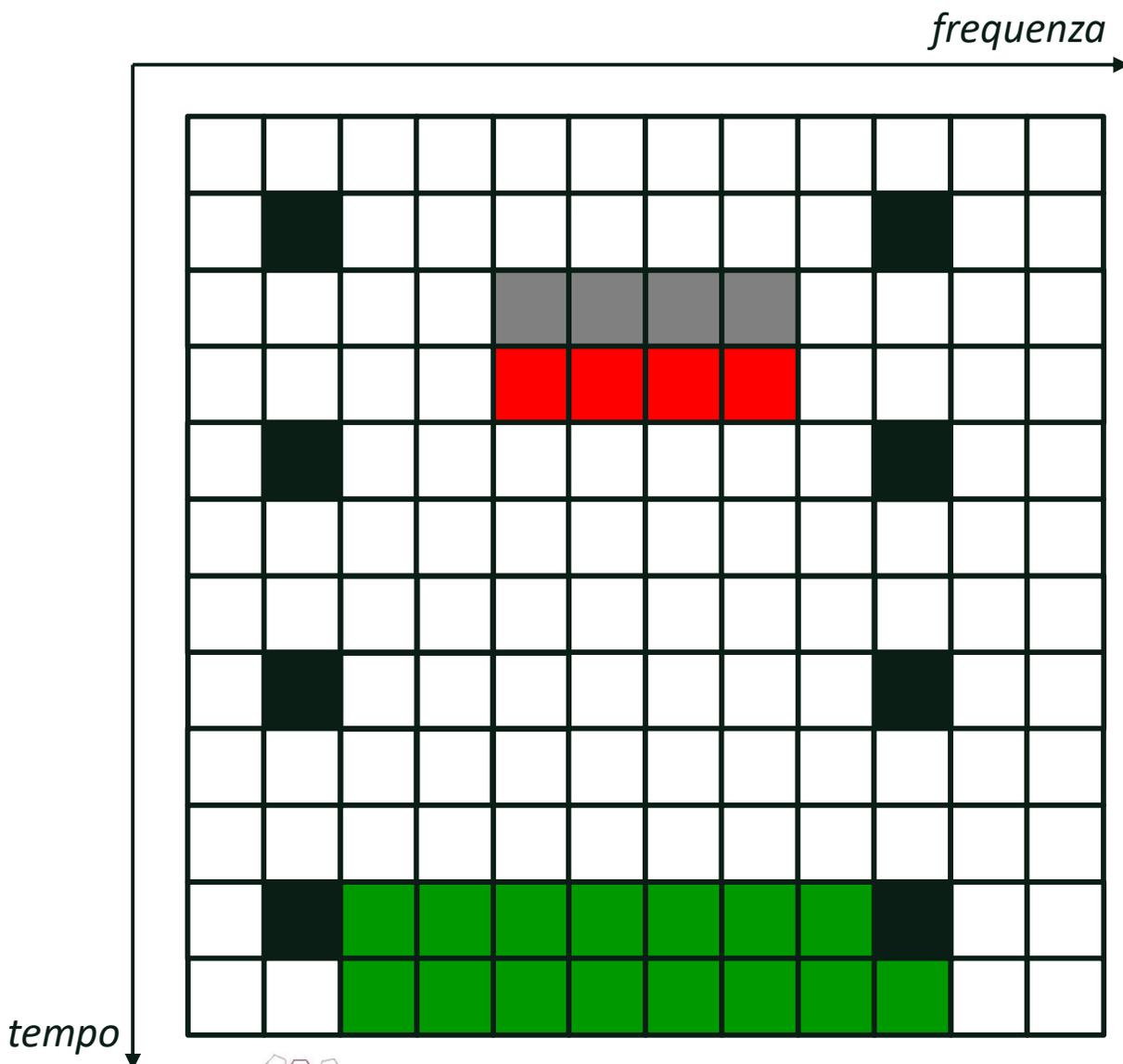
$\tau$

tempo



La potenza istantanea associata al segnale è l'integrale del 'panettone'

# Struttura della trama



Canali di controllo



- Sempre trasmessi

- Segnalano la SRB

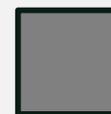
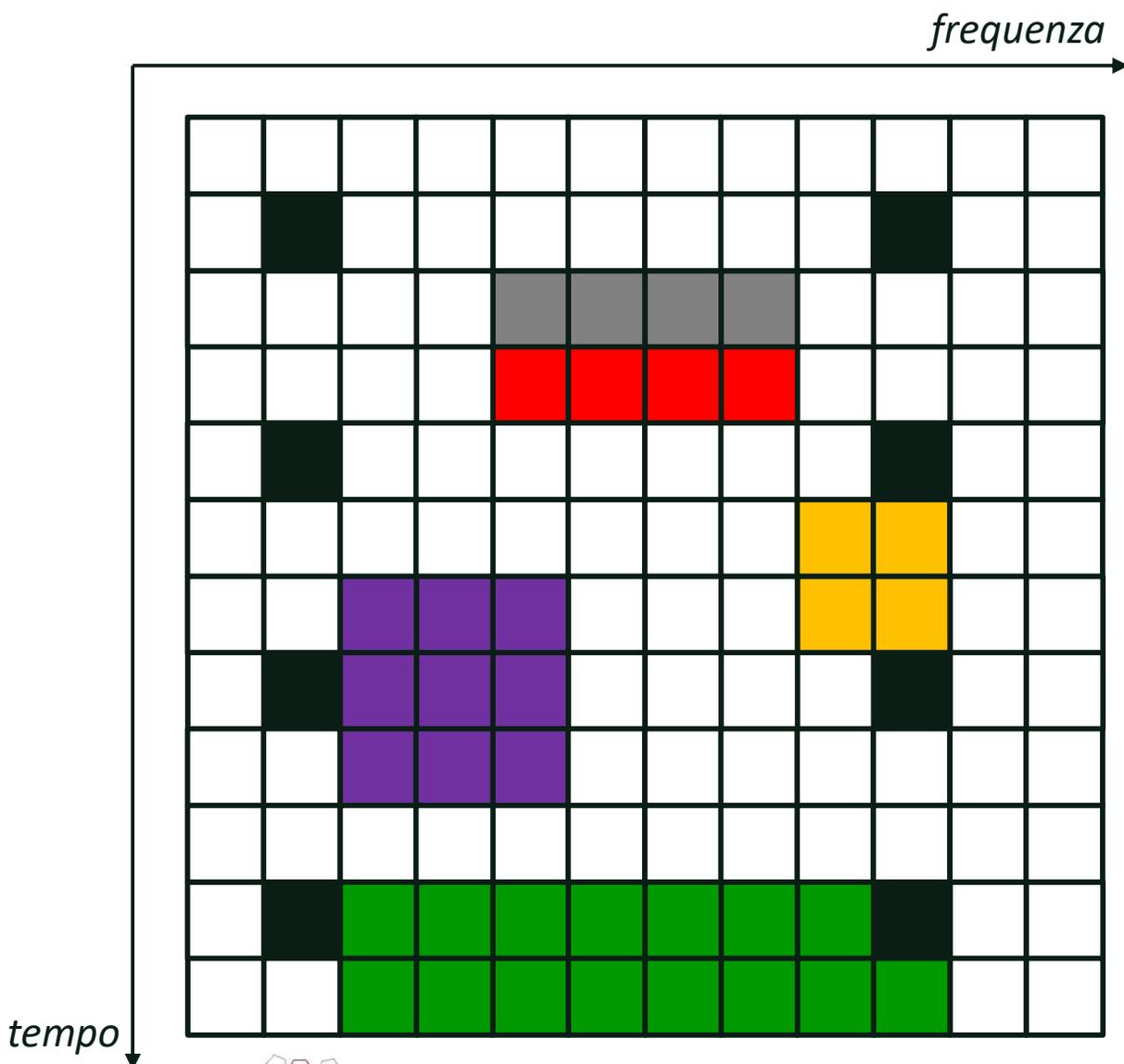


- Trasmettono info  
specifiche



- Stime della qualità  
di ricezione

# Struttura della trama



Canali di controllo

- Sempre trasmessi



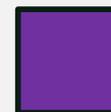
- Segnalano la SRB



- Trasmettono info  
specifiche



- Stime della qualità  
di ricezione



Traffico dati

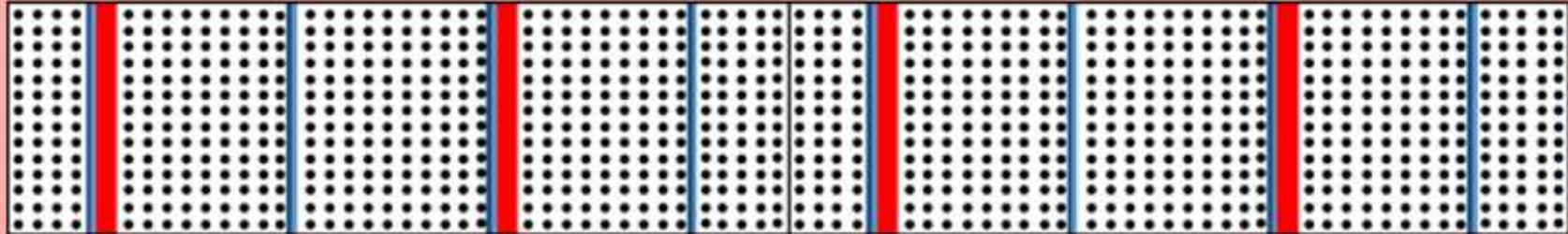
UTENTE 1



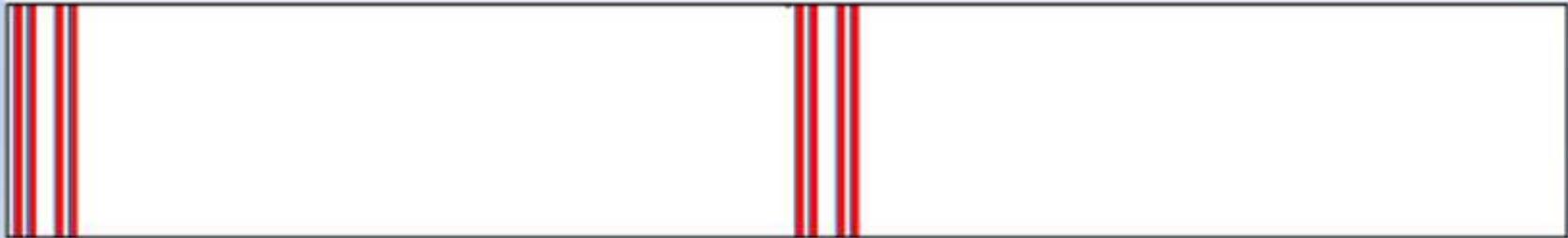
UTENTE 2

# STRUTTURA DELLA TRAMA E CANALI DI CONTROLLO

Nel **4G** i canali di controllo sono trasmessi **uniformemente su tutta la trama**



Nel **5G** gli SS-Block sono trasmessi in **burst in intervalli di tempo limitati**

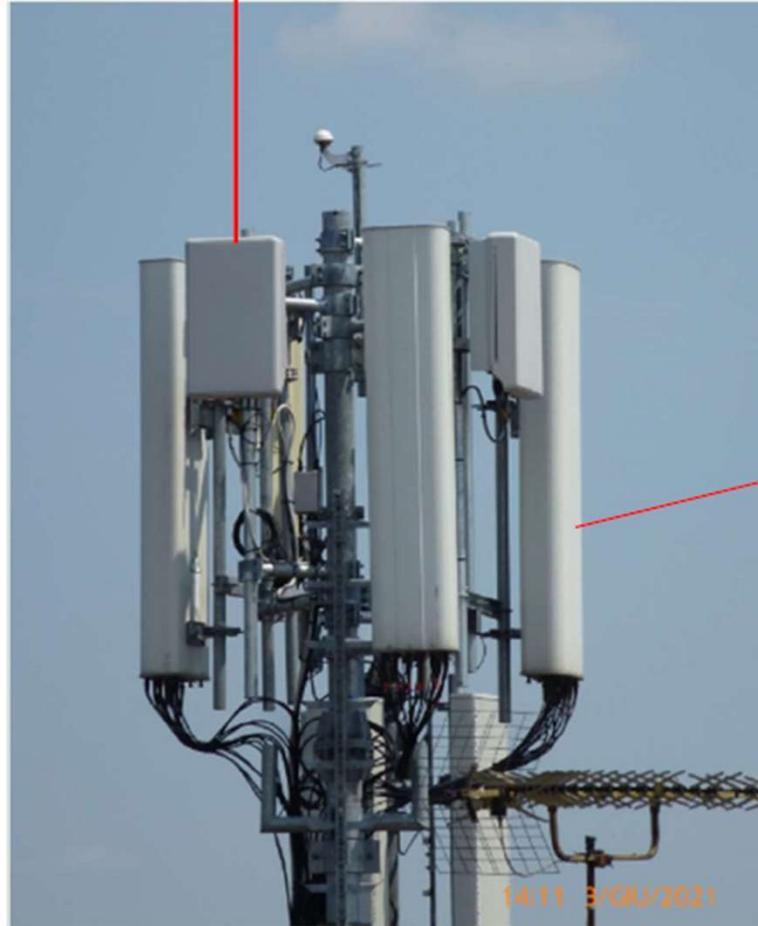


Il SS-Block è costituito da **240 sottoportanti** per una durata di **4 simboli**

La periodicità con cui viene trasmesso può variare da 5ms (2 per trama, tipico della banda a 27GHz) a 20ms (1 ogni 2 trame, come ad oggi implementato sulla banda 3,7 GHz)

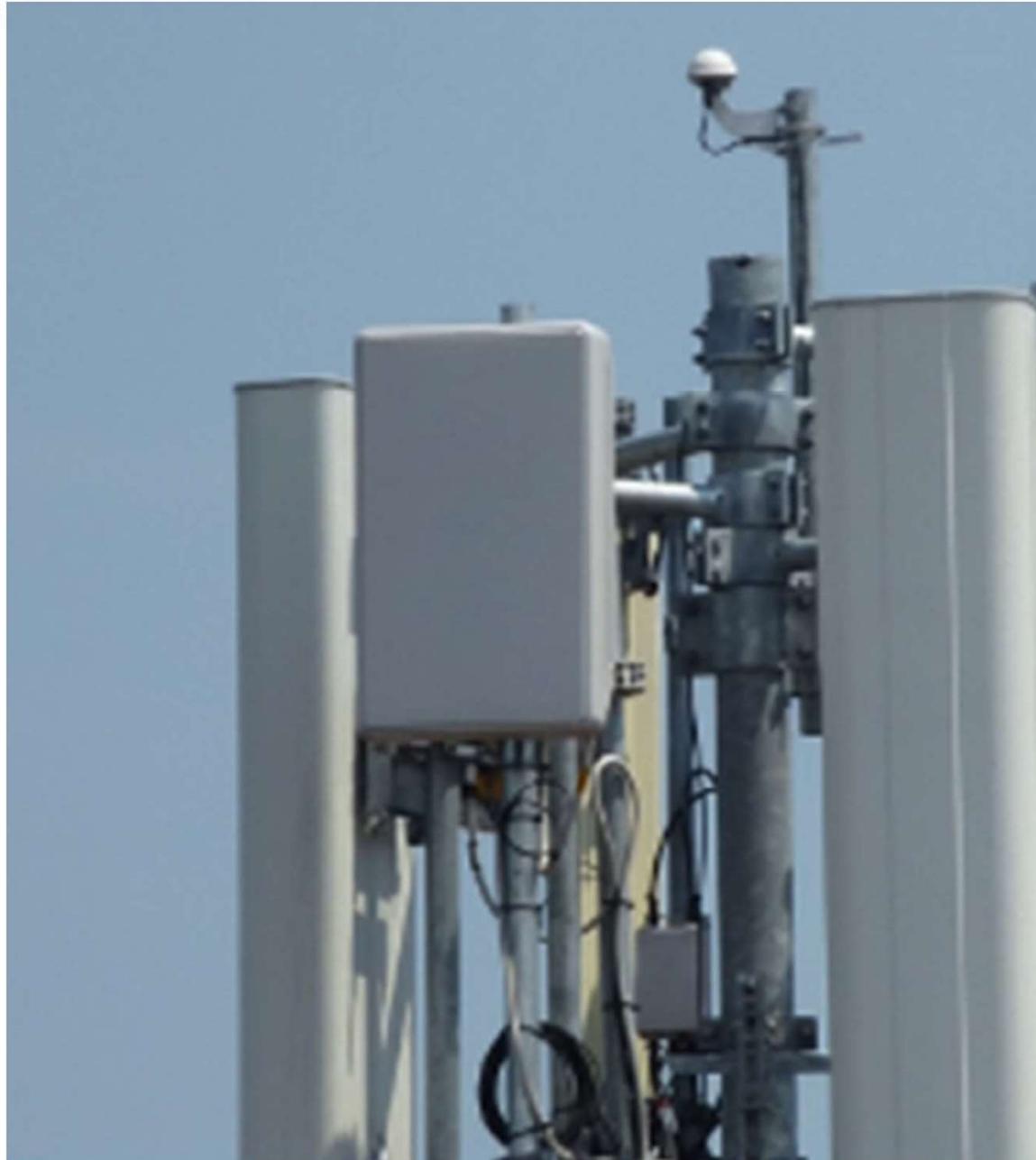
# Caratteristiche dei nuovi sistemi radianti 5G

Antenne 5G



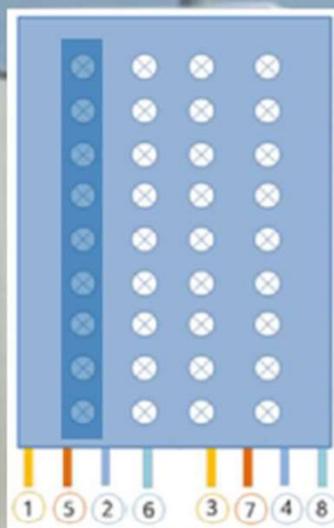
Antenne 2G-3G-4G

# Caratteristiche dei nuovi sistemi radianti 5G



# Caratteristiche dei nuovi sistemi radianti 5G

Antenne attive Massive MIMO



# Caratteristiche dei nuovi sistemi radianti 5G

Il massive MIMO sfrutta i seguenti fenomeni per ottimizzare la trasmissione verso gli utenti:

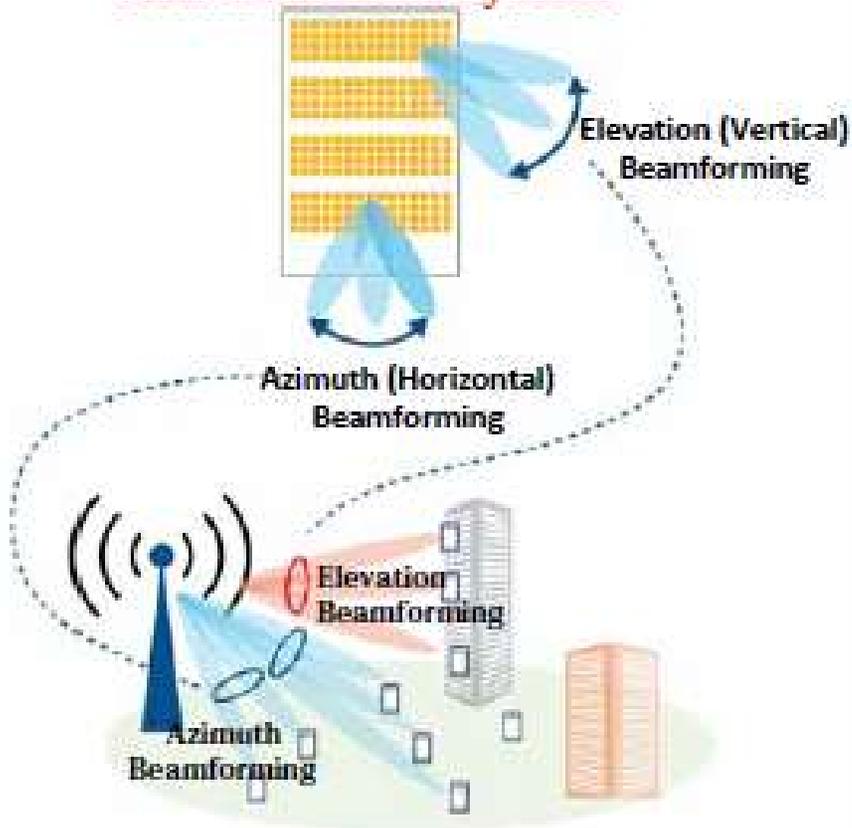
- Inviare gli stessi dati su percorsi di propagazione diversi (Spatial Diversity)
- Inviare diversi pacchetti di dati su percorsi di propagazione diversi (Spatial multiplexing)
- Focalizzare il segnale in direzioni specifiche (Beamforming)

Essi non sono mutuamente esclusivi, ma la scelta di quanto ciascuno di questi fenomeni sia utilizzato dipende da: intervallo di frequenza, ambiente di propagazione, tipologia e numero di terminali da servire....

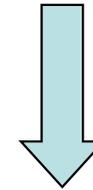
Il tutto è gestito dinamicamente dalla stessa antenna (smart antennas)

# Caratteristiche dei nuovi sistemi radianti 5G

## Active Antenna System

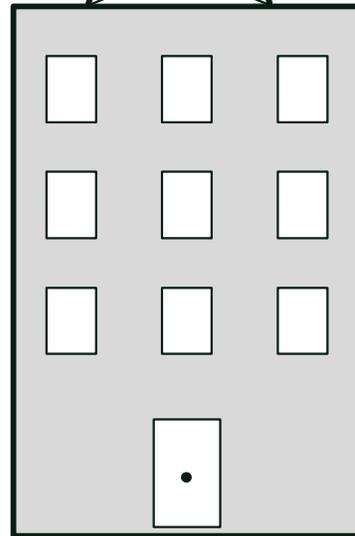
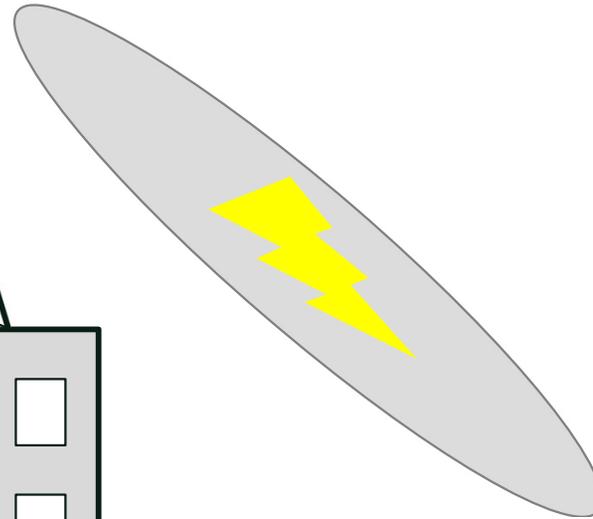
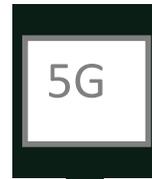
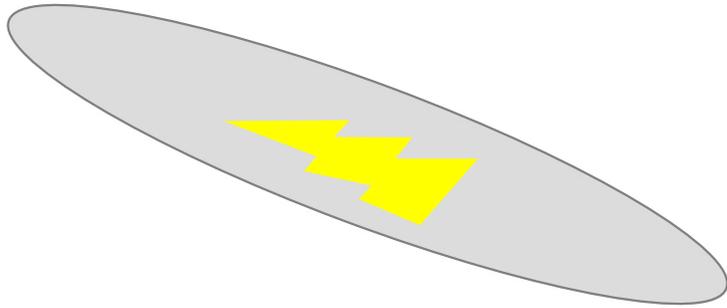


Diagrammi di irraggiamento dinamici che consentono di ottimizzare la copertura della Stazione Radio Base



Trasmissione del segnale solo nella direzione dell'utente

# Beamforming

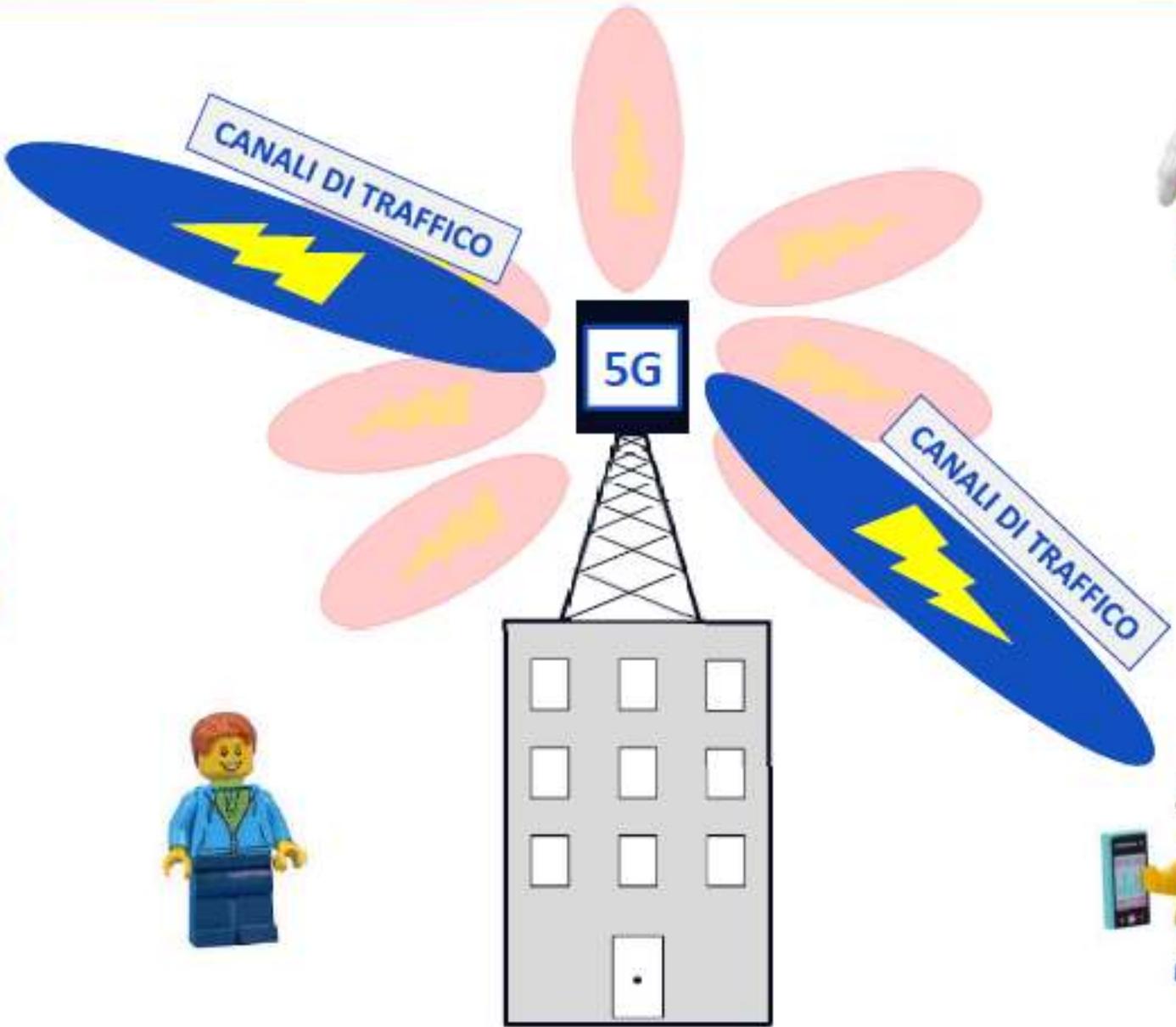




CANALI DI CONTROLLO

CANALI DI CONTROLLO





# LA NORMATIVA NAZIONALE ED INTERNAZIONALE PER LA TUTELA DALL'ESPOSIZIONE AL 5G

VALORI DI RIFERIMENTO	FREQUENZE (MHz)	E (V/m)	H (A/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	MODALITÀ DI CALCOLO E CONDIZIONI DI ESPOSIZIONE
Limiti	$0.1 < f \leq 3$	60	0.2	-	Valori efficaci mediati su 6 minuti e sulla sezione del corpo umano
	$3 < f \leq 3000$	20	0.05	1	
	$3000 < f \leq 300000$	40	0.1	4	
Valori di attenzione	$0.1 < f \leq 3$	6	0.016	-	Media nell'arco delle 24 ore. Luoghi a permanenza prolungata (> 4 ore) e pertinenze esterne
	$3 < f \leq 300000$			0.1	
Obiettivi di qualità	$0.1 < f \leq 3$	6	0.016	-	Media nell'arco delle 24 ore. Aree intensamente frequentate
	$3 < f \leq 300000$			0.1	

Normativa italiana (DPCM 08/07/2003 e L221/2012)

Il valore di attenzione alle frequenze delle onde millimetriche esprime un valore di cautela molto elevato

# LA NORMATIVA NAZIONALE ED INTERNAZIONALE PER LA TUTELA DALL'ESPOSIZIONE AL 5G

VALORI DI RIFERIMENTO	FREQUENZE (MHz)	E (V/m)	H (A/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	MODALITÀ DI CALCOLO E CONDIZIONI DI ESPOSIZIONE
	$0.1 < f \leq 3$	60	0.2	-	
Limiti	$3 < f \leq 3000$	20	0.05	1	Valori efficaci mediati su 6 minuti e sulla sezione del corpo umano

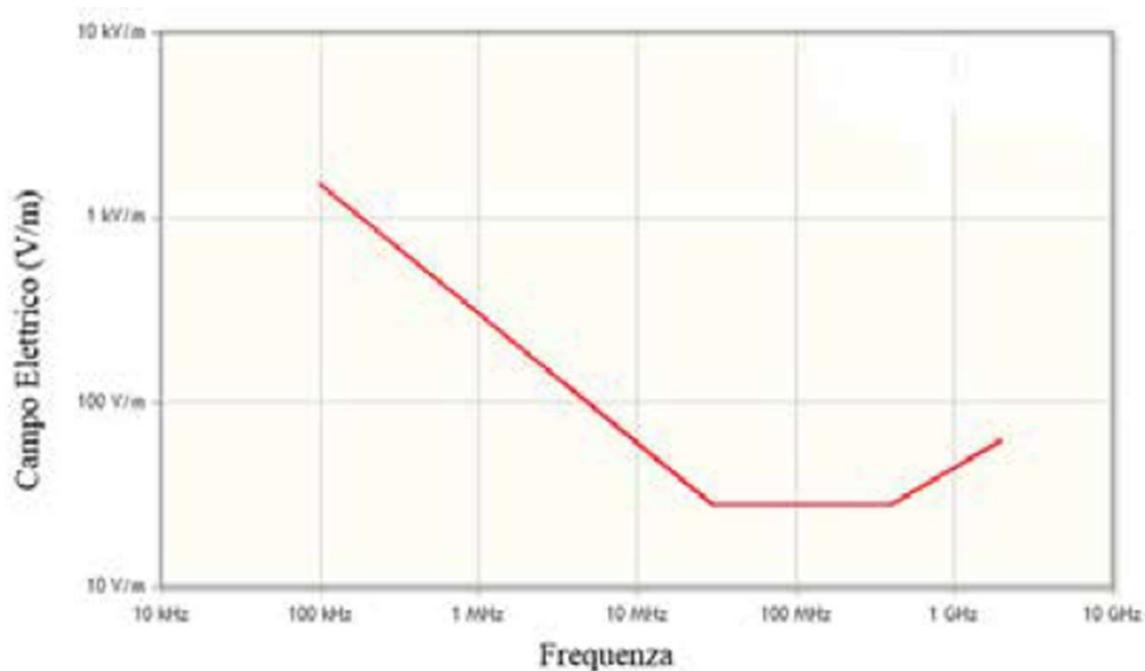
Normativa italiana  
(DPCM 08/07/2003 e L221/2012)

Per le esposizioni prolungate la normativa italiana esprime una tutela efficace anche alle frequenze più elevate grazie all'adozione dell'approccio cautelativo (valore di attenzione valido sull'intero intervallo di frequenze 100 kHz – 300 GHz).

Risulta invece carente nell'individuazione di parametri adeguati per limitare i livelli massimi raggiungibili nei picchi di esposizione al campo elettromagnetico che si possono verificare anche per esposizioni di durata molto breve (inferiore a 6 minuti).



## Linee guida ICNIRP 2020



Andamento del Livello di riferimento per il campo elettrico in funzione della frequenza (esposizione al corpo intero e valori intesi come **media su 30 minuti**)



## Linee guida ICNIRP 2020

LIMITE	GRANDEZZA FISICA	FREQUENZA	VALORE LIMITE (kJ/m <sup>2</sup> )
Restrizione di base	Densità di energia assorbita ( $S_{ab}$ )	6 – 300 GHz	$7.2[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
		> 400 – 2000 MHz	$0.058f_M^{0.86} \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
Livello di riferimento	Densità di energia incidente ( $S_{inc}$ )	> 2 – 6 GHz	$40 \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
		> 6 – 300 GHz	$55/f_G^{0.177} \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$
		300 GHz	$20 \times 0.36[0.05+0.95(t/360)^{0.5}]$

Restrizioni di base e Livelli di riferimento per esposizioni localizzate della popolazione a campi elettromagnetici a radiofrequenze per **brevi periodi di tempo (inferiori a 6 minuti)**

## Qual'è la durata dell'esposizione a segnali 5G?

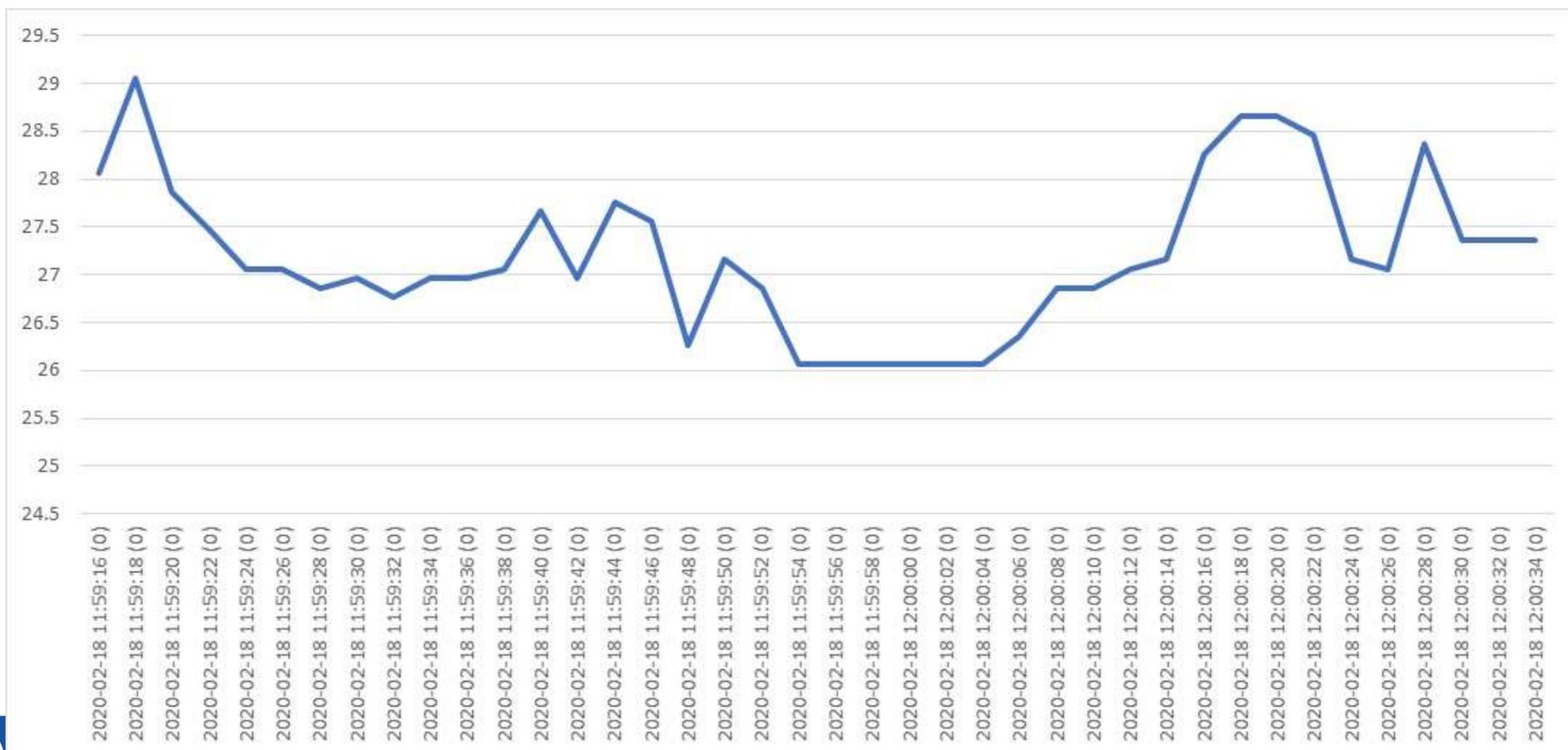
Dipende da:

- Variabilità nel tempo della potenza trasmessa
- Tempi di attivazione/spostamento dei fasci sintetizzati dall'antenna

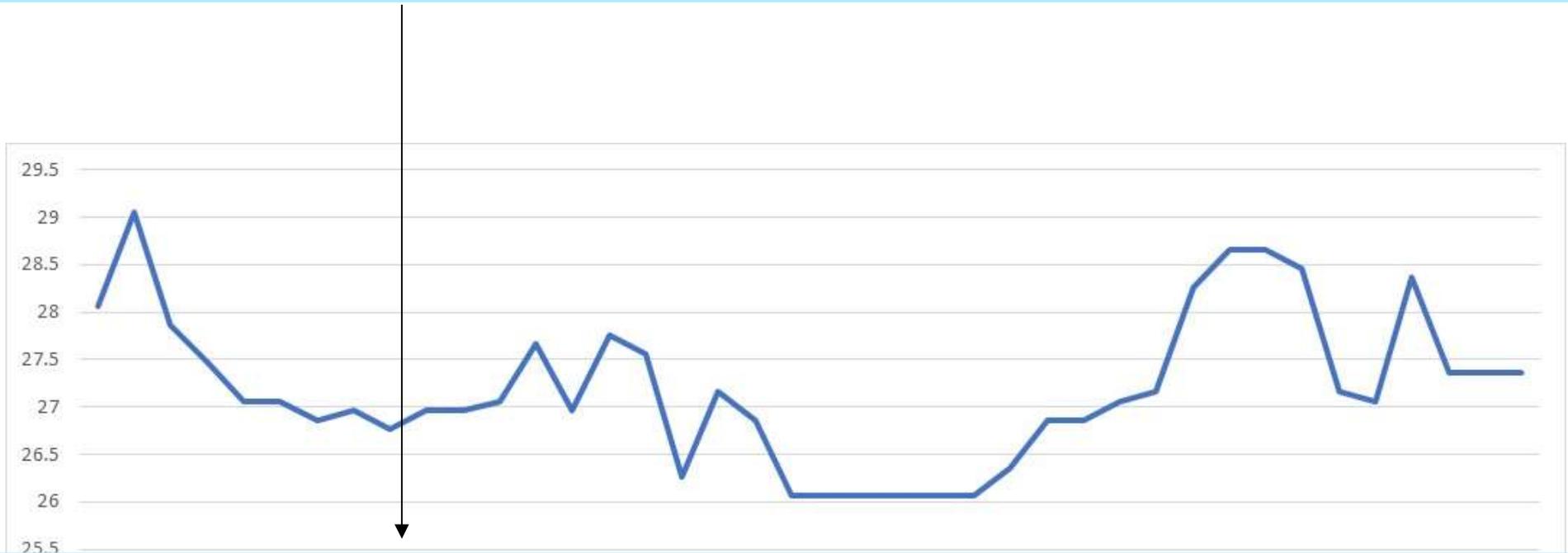
# Qual'è la durata dell'esposizione a segnali 5G?

Dipende da:

- **Variabilità nel tempo della potenza trasmessa**
- **Tempi di attivazione/spostamento dei fasci sintetizzati dall'antenna**



Considerando la frequenza del segnale pari a 3,7 GHz e la durata dell'esposizione di 8 secondi, applicando l'espressione delle linee guida ICNIRP risulta che la massima densità di energia deve essere pari a 2,11 kJ/m<sup>2</sup>. Questo corrisponde ad un valore intensità del campo elettrico, E, pari a **315,4 V/m**



Ipotizzando una condizione limite, anche se poco realistica, in cui la stazione radio base eroghi la massima potenza possibile (circa 39,8 W), il valore limite ICNIRP per esposizioni di durata pari a 8 secondi verrebbe superato a **distanze inferiori a circa 2 metri dalla SRB**

# Risposta dei sensori in banda larga a segnali 5G

## Definizione del contesto:

Segnali 4G e 5G molto diversi da quelli delle generazioni precedenti: banda occupata, modulazioni, variabilità nell'occupazione trama, variabilità temporale TDD, variabilità legata al beamforming

Caratteristiche intrinseche strumenti: risposta in ampiezza e frequenza; risposta temporale del circuito; risposta diodo con segnali multifrequenza fortemente variabili a dinamica ampia;

Taratura: segnali CW

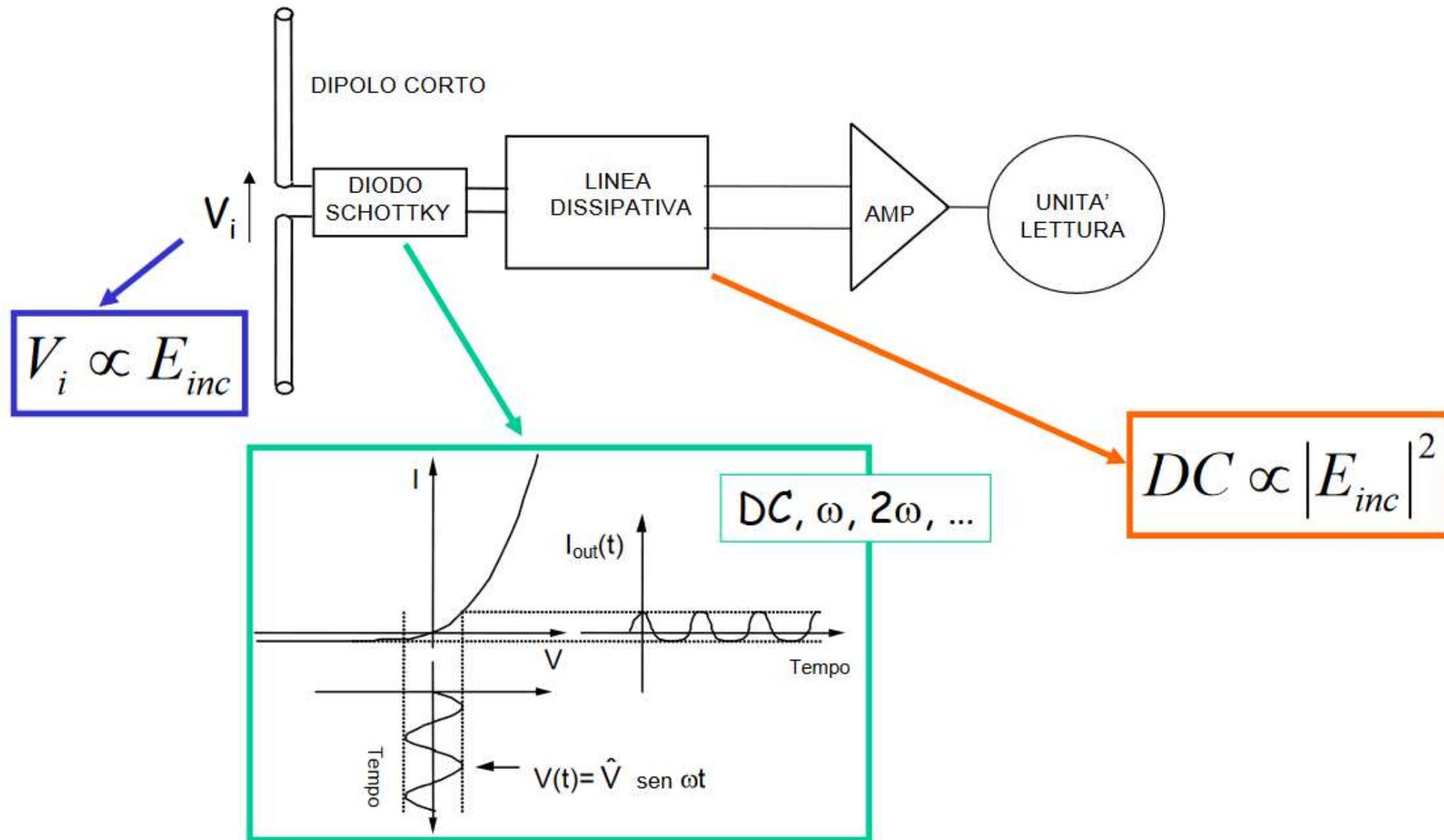
## Quesiti:

Aumento incertezza?

Errori sistematici?

Necessità di implementare metodi taratura con segnali modulati?

# Misuratori BL con sensori a diodo



## Risposta del diodo a segnali di ultima generazione

I segnali OFDM con modulazione QAM (canali di traffico) sono non sinusoidali, con elevato fattore di cresta e possibili caratteristiche impulsive.

Ci possono quindi essere significative deviazioni dal valore vero RMS nella risposta del diodo, in particolare per livelli di potenza più elevati, laddove aumenta il rischio di uscire dalla zona di risposta quadratica del diodo.

Gli errori legati alla misura di segnali non sinusoidali possono aumentare in modo significativo, anche in funzione del rapporto di fase tra componente fondamentale e armoniche nonché, in presenza di comportamento impulsivo, in funzione della frequenza di ripetizione degli impulsi.

# Test sui misuratori banda larga per stimare l'entità dell'errore complessivo introdotto

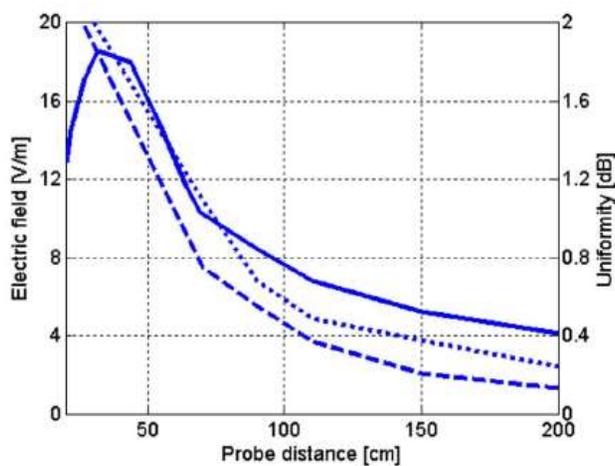
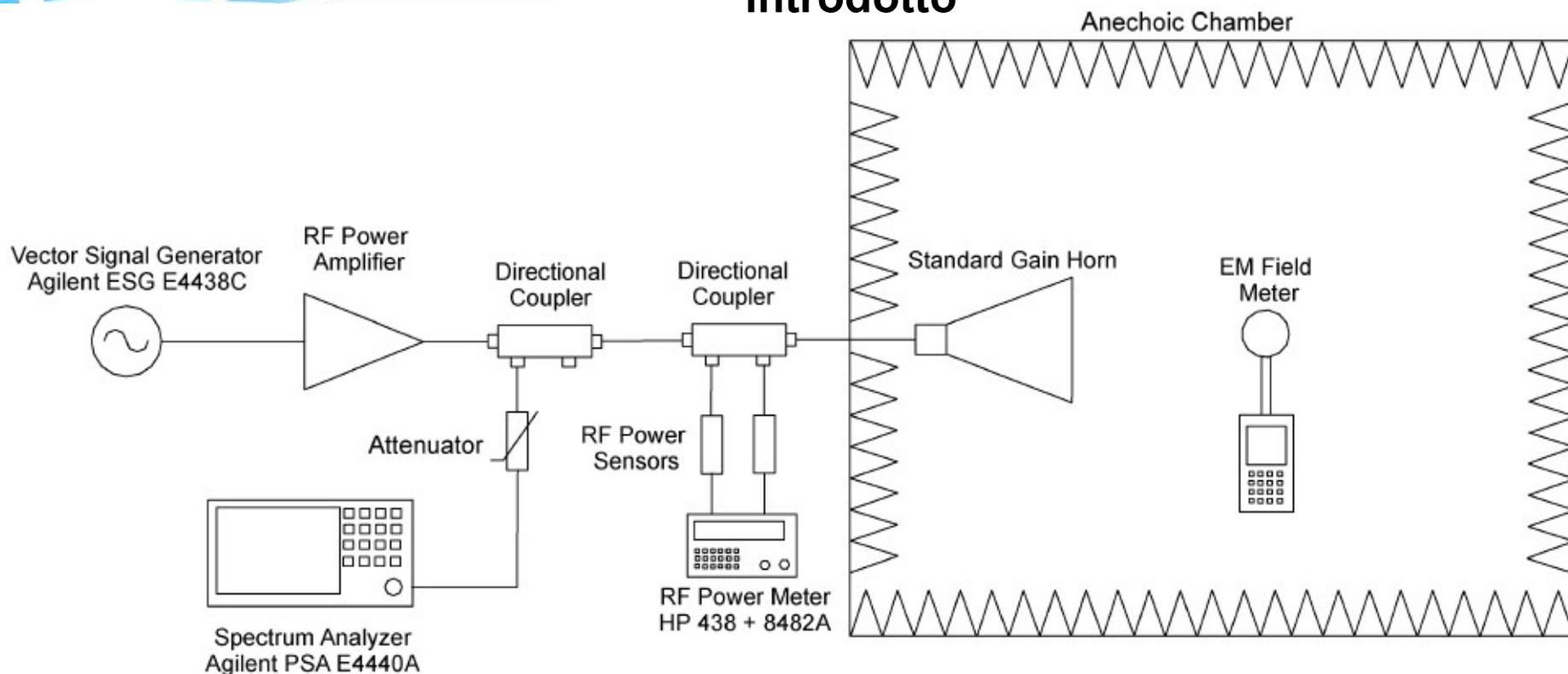


Fig. 2. R-band standard horn: electric field (V/m) as a function of distance from the radiator (continuous line); transversal field uniformity (dB) over a square surface of side 12 cm (dashed line); volume field uniformity (dB) over a cubic volume of side 6 cm (dotted line).

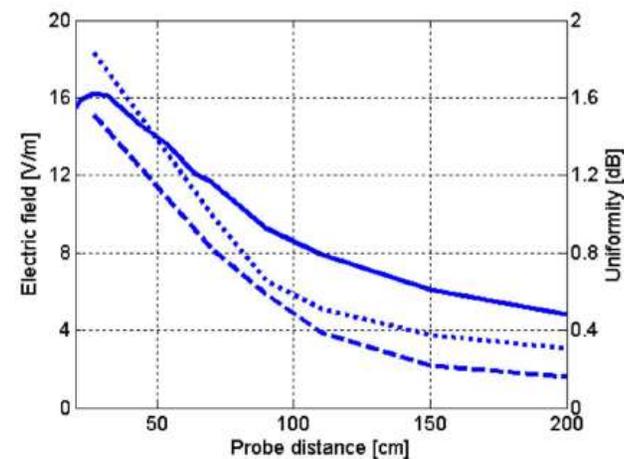


Fig. 3. D-band standard horn: electric field [V/m] as a function of distance from the radiator (continuous line); transversal field uniformity (dB) over a square surface of side 12 cm (dashed line); volume field uniformity (dB) over a cubic volume of side 6 cm (dotted line).

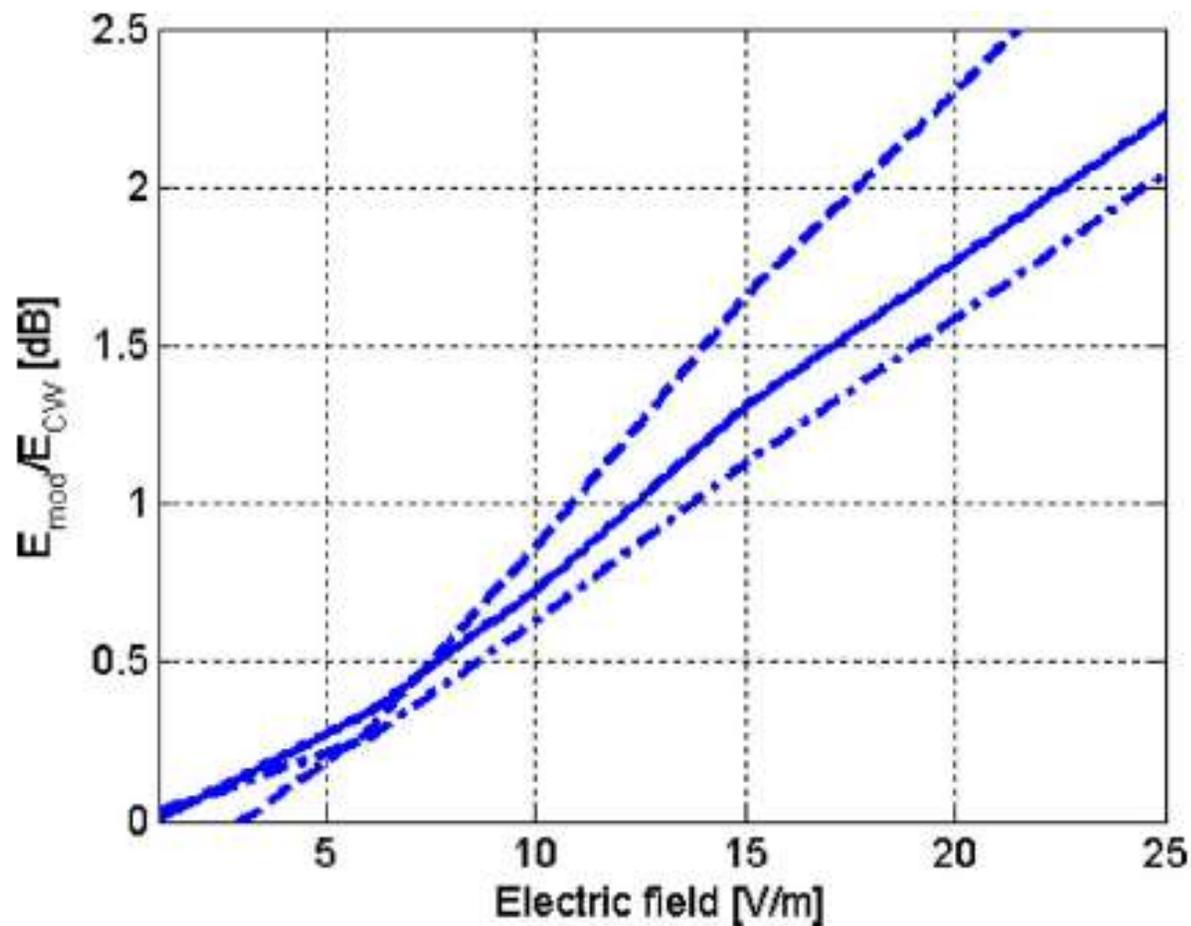


Fig. 5. Experimental results obtained from tests:  $E_{\text{mod}}/E_{\text{CW}}$  (dB) as a function of the electric field; WCDMA modulation, 3.84-MHz bandwidth, 64 channels (continuous line); DSSS modulation, 10-MHz bandwidth, frame duration 5 ms (dash-dotted line); OFDM modulation, 20-MHz bandwidth, frame duration 5 ms (dashed line).

## Test segnali OFDM, trama piena

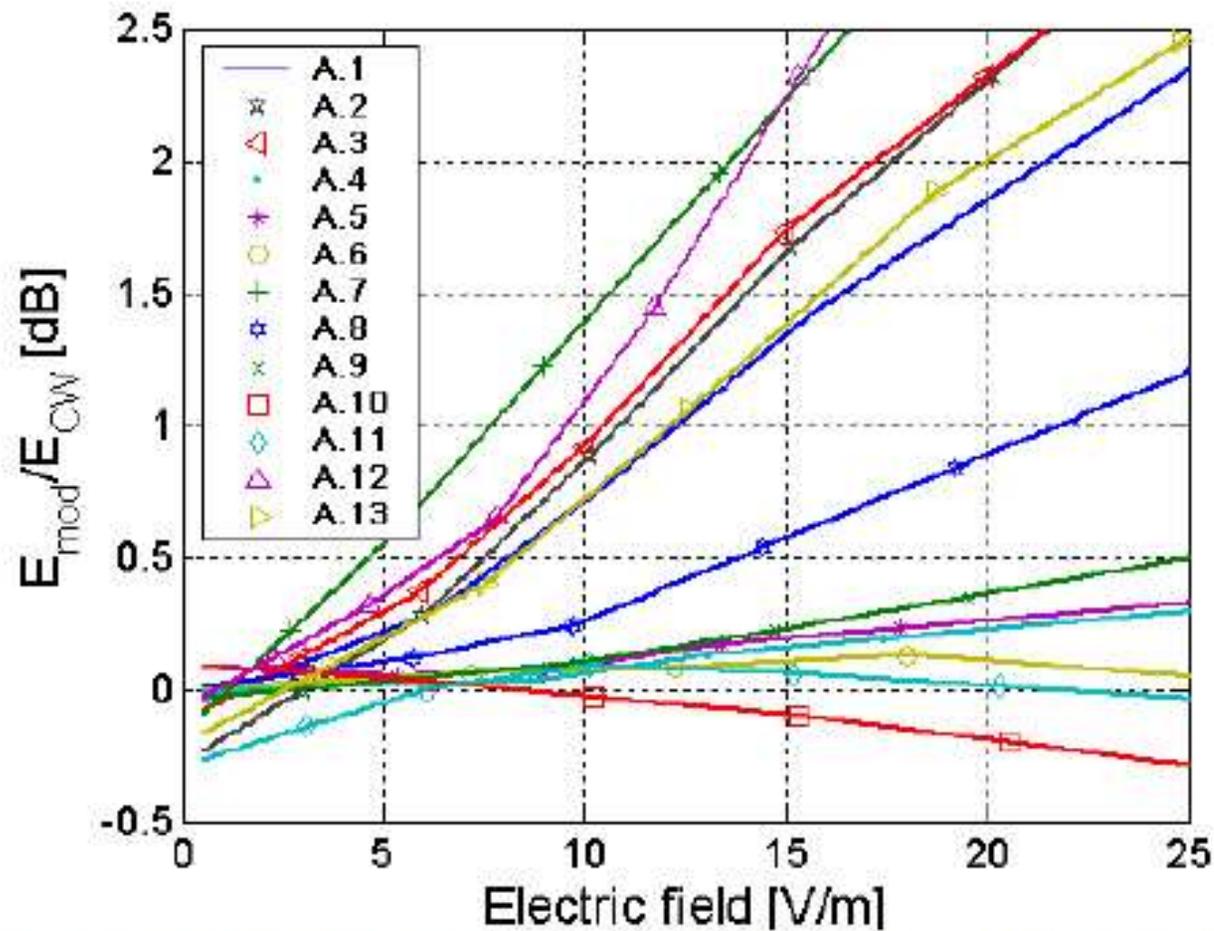


Fig. 4. Experimental results obtained from tests:  $E_{\text{mod}}/E_{\text{CW}}$  [dB] as a function of the electric field; OFDM modulation, 20 MHz bandwidth, filled frames.

# Test segnali OFDM, trama riempita al 6% circa

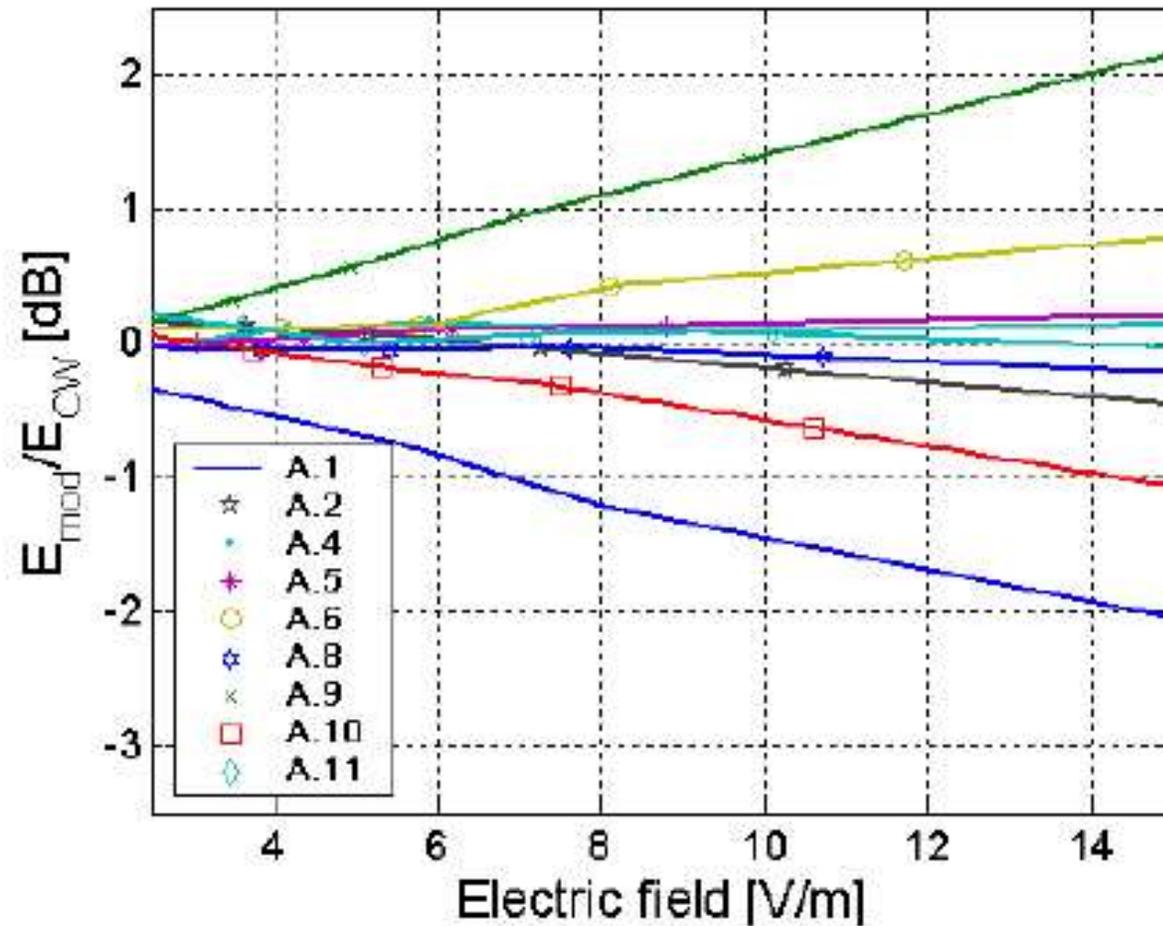


Fig. 5. Experimental results obtained from tests:  $E_{mod}/E_{CW}$  [dB] as a function of the electric field; OFDM modulation, 20 MHz bandwidth, frame filled for one sixteenth.



## Attività gdl CEI 2021-2022

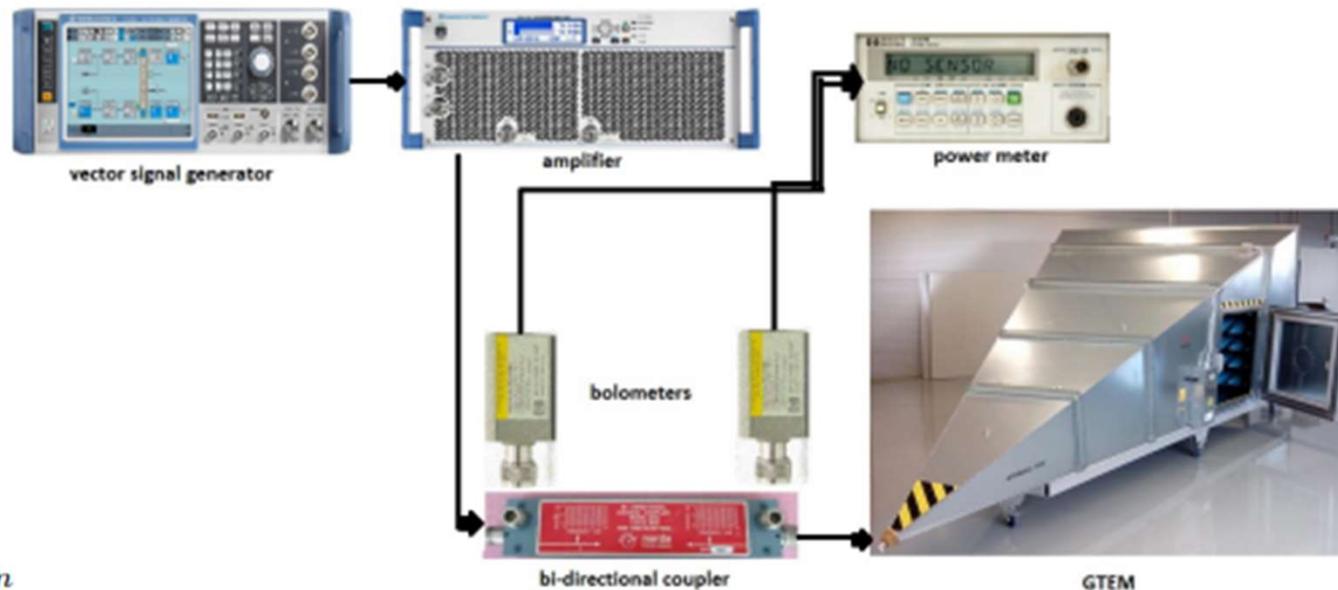
Collaborazione in ambito CEI tra alcune Agenzie, Università ed industria per:

Effettuati test in ambiente controllato sulla risposta di misuratori banda larga a segnali 5G.

Verifica delle variazioni nella risposta in funzione di:

- Configurazione FDD/TDD
- Riempimento della trama
- Larghezza di banda del segnale
- Numerologia

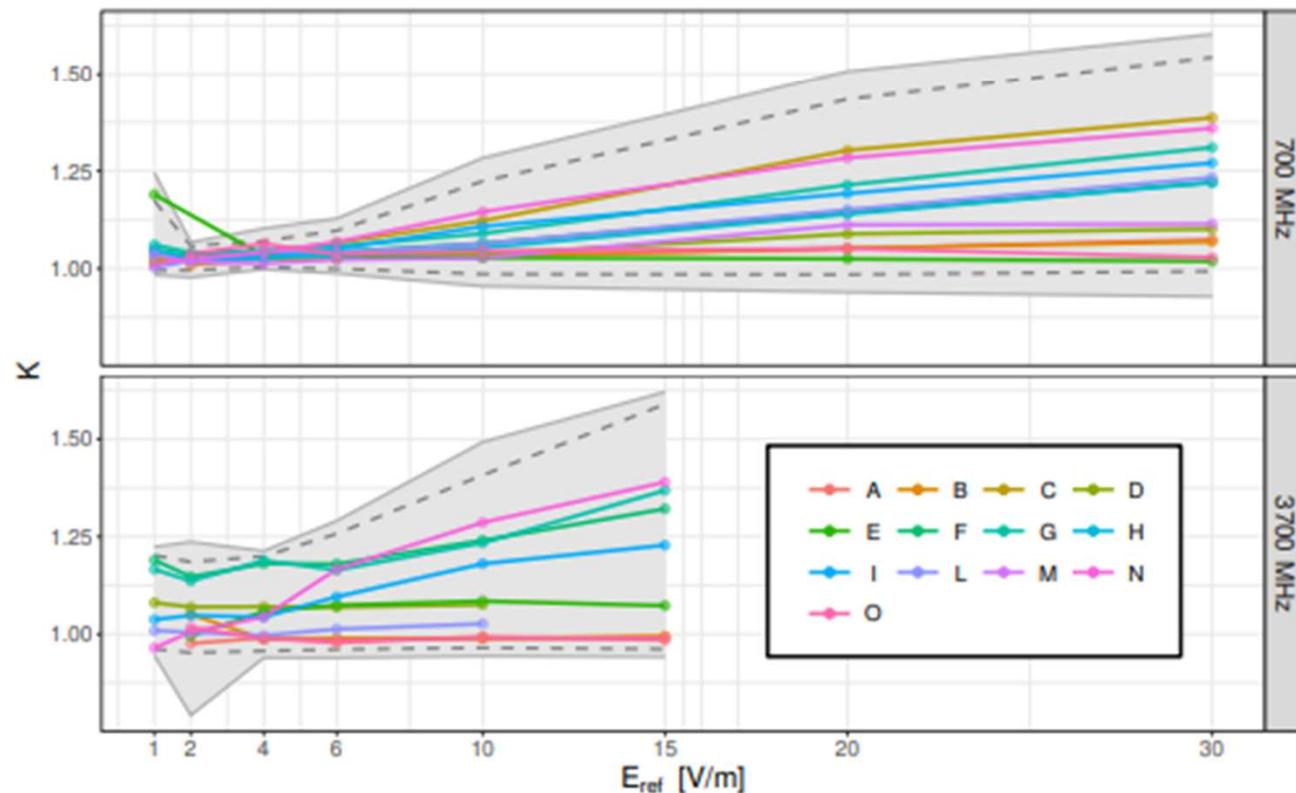
# Primi risultati test risposta misuratori in banda larga a segnali 5G



$$E_n = \frac{E_m}{\sqrt{P_{net}}}$$

$$K = \frac{E_{n,5G}}{E_{n,CW}} = \sqrt{\frac{P_{net,CW}}{P_{net,5G}} \frac{E_{m,5G}}{E_{m,CW}}}$$

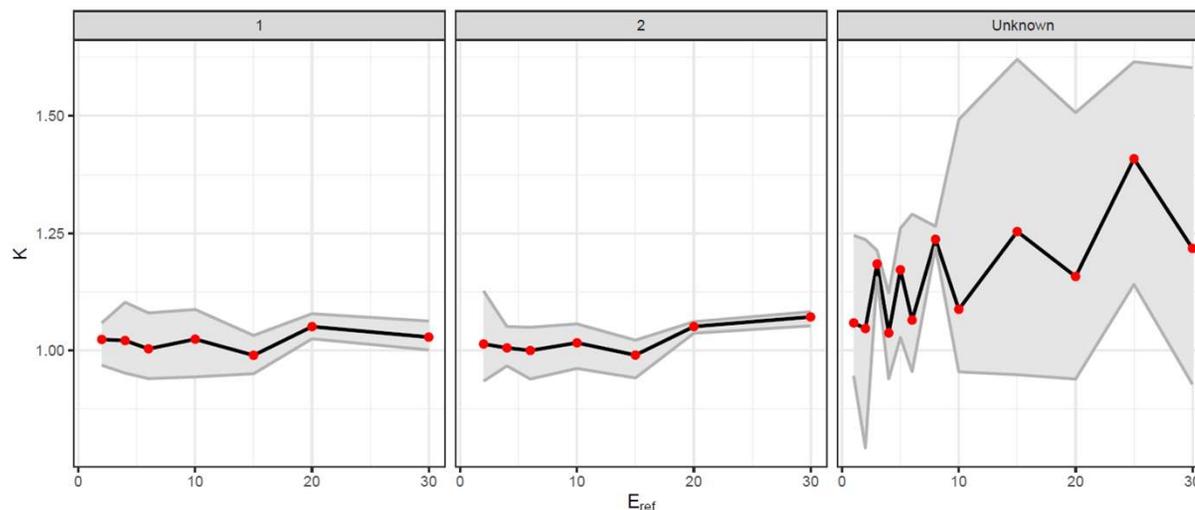
I risultati hanno mostrato che l'indicazione di campo elettrico è generalmente più alta del valore ottenuto per segnali a onda continua di pari potenza incidente ( $K > 1$ ).



Intervallo di campo elettrico	Massimo aumento rispetto alla risposta a segnale CW
[1;6] V/m	25%
(6;20] V/m	59%
(20;30] V/m	54%

Nel caso di misura bassi livelli (1-2 V/m) la sensibilità e l'incertezza di linearità sono parametri che costituiscono un fattore di attenzione: sensori con bassa sensibilità ed elevata incertezza di linearità possono dare risposte anche sottostimate, e che si discostano significativamente dalla lettura di un segnale CW.

Le sonde che permettono di limitare la dinamica del segnale in ingresso al diodo/ai diodi (tramite attenuatori oppure in relazione alla dimensione limitata dei dipoli nel caso di sonde in grado di rilevare campi a frequenze sopra i 10 GHz), hanno una sensibilità meno marcata a questo tipo di segnali, indipendentemente dall'ampiezza del segnale misurato, dando quindi una risposta analoga a quella ottenuta per segnali CW anche in presenza di segnali 5G di intensità elevata.





# Misure selettive ed estrapolazioni

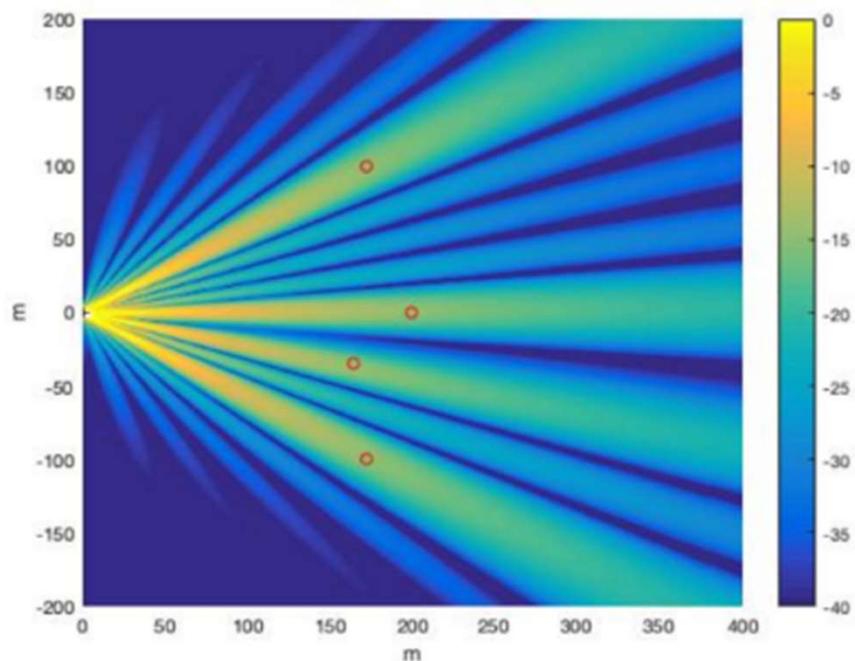
## Misure ed estrapolazioni ai sensi dell'appendice E alla norma CEI 211-7

Per ricavare il valore mediato su 24 ore dei contributi di ciascun segnale rilevato nel punto di misura: misure di breve durata del valore di campo elettrico relativo ad uno specifico canale di ciascun segnale e successiva applicazione delle formule di estrapolazione (specifiche per ciascuna tecnologia).

L'estrapolazione prevede il calcolo del campo corrispondente alla massima potenza trasmessa dall'antenna, e la sua successiva correzione per ricavare il valore medio sulle 24 ore.

La norma non contiene ancora le indicazioni di applicazione ai segnali 5G. Ad oggi, sono stati portati a termine diversi lavori di ricerca su questo tema, in parte confluiti nella bozza finale di standard IEC62232, di recentissima pubblicazione (14/10/2022). Tale standard dovrebbe essere recepito a breve dal CEI.

## MISURE ED ESTRAPOLAZIONI PER IL 5G?



**FIGURE 4.** Example of the field distribution in MU-MIMO communications [ $dB_V/m$ ] (free space propagation condition); the MU-MIMO antenna is on the left; the users are drawn as circles [18].

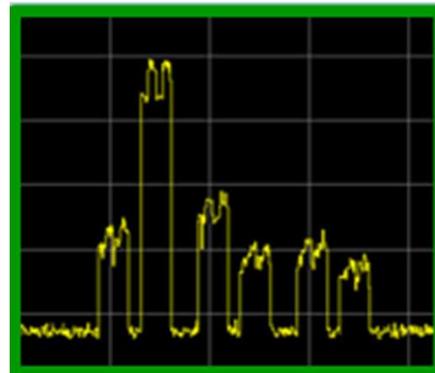
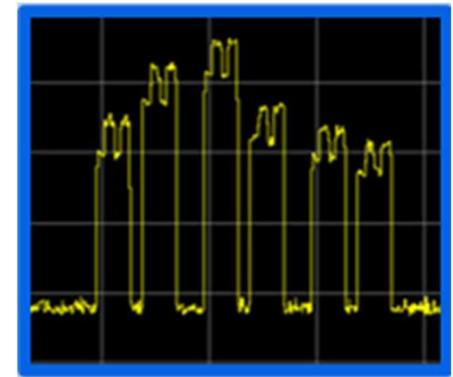
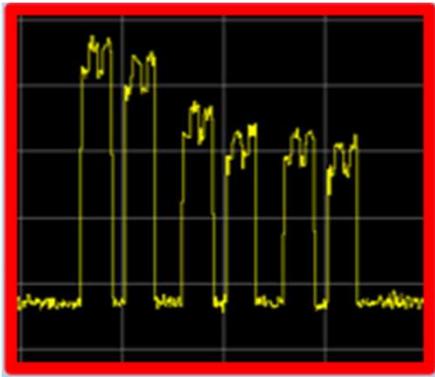
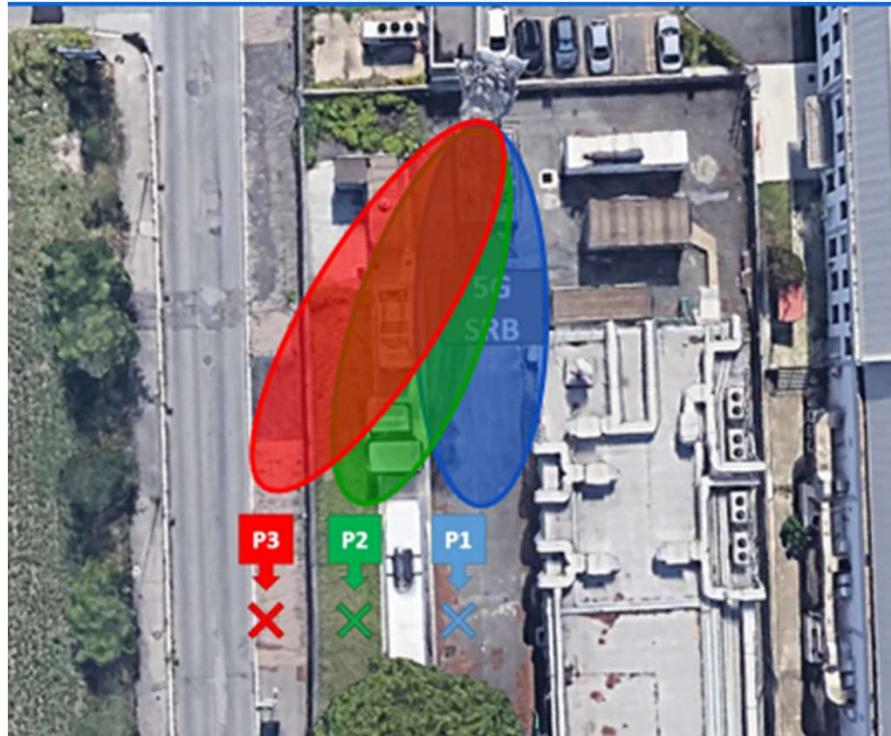
Che cosa misuro ed in che modo per poter stimare la massima esposizione?

Vale ancora l'approccio dell'estrapolazione visto per le precedenti generazioni di segnali (misura del canale di controllo e applicazione di parametri legati alle caratteristiche del segnale per ricavare la massima potenza)?

# Fasci che si attivano/disattivano e si muovono (1)

In assenza di utenti che generino traffico, l'unico segnale rilevabile è quello di controllo (SSB) che:

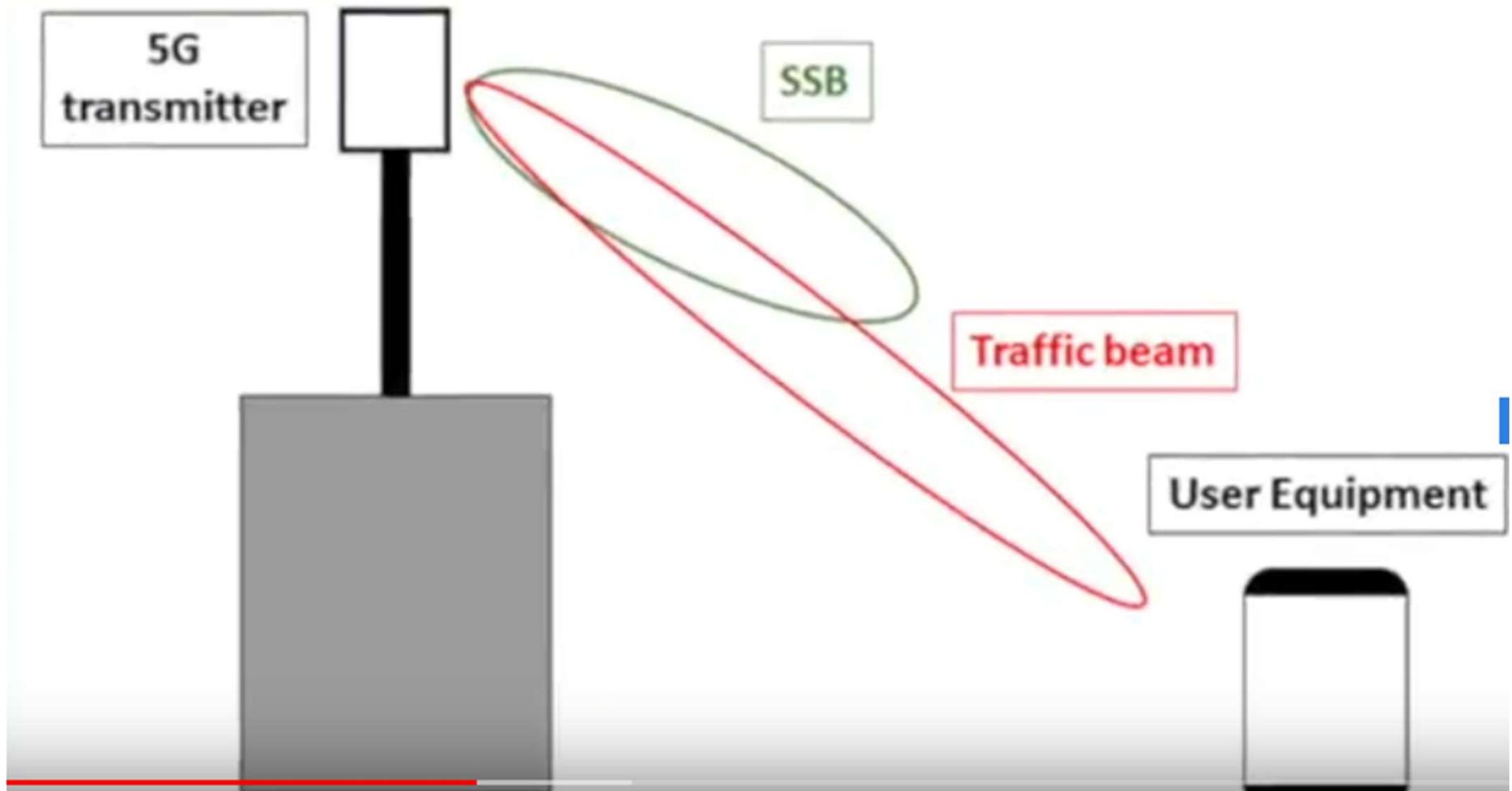
- ✓ Si attiva sequenzialmente nelle diverse direzioni dell'angolo di copertura di una determinata cella



## Fasci che si attivano/disattivano e si muovono

In assenza di utenti che generino traffico, l'unico segnale rilevabile è quello di controllo (SSB) che:

- ✓ E' trasmesso con una potenza diversa da quella assegnata al traffico, e su un diverso diagramma (differente andamento del guadagno nelle varie direzioni)



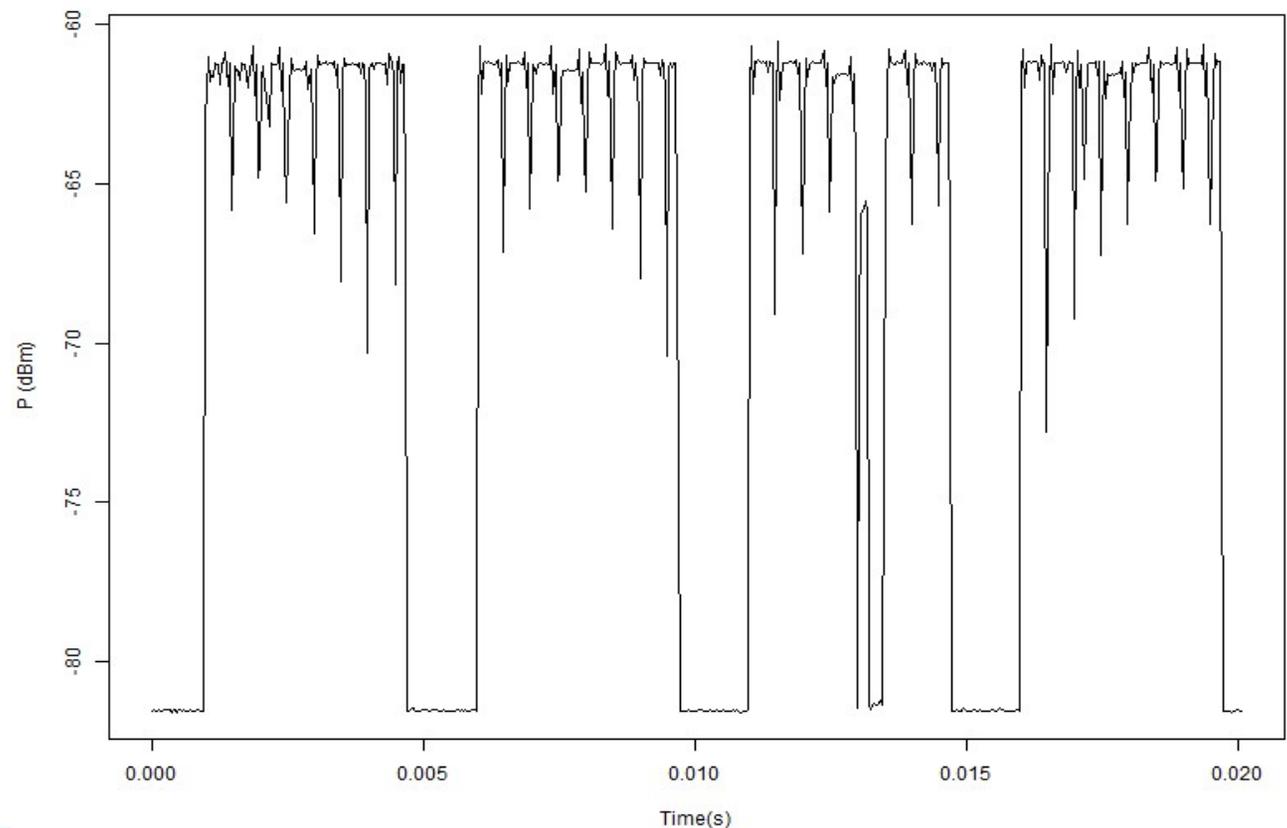
Che cosa misuro ed in che modo per poter stimare la massima esposizione?

Vale ancora l'approccio dell'estrapolazione visto per le precedenti generazioni di segnali (misura del canale di controllo e applicazione di parametri legati alle caratteristiche del segnale per ricavare la massima potenza)?

La misura del canale di controllo per il 5G è possibile, ma

**IL LIVELLO DI POTENZA RICEVUTO DAL FASCIO DI BROADCAST NON E' SUFFICIENTE A PROCEDERE CON L'ESTRAPOLAZIONE.**

Serve infatti conoscere il **rapporto tra la potenza ricevuta dal fascio di broadcast e quella ricevuta dal fascio di traffico**



E' possibile ricavare in qualche modo il rapporto tra la potenza ricevuta dal fascio di broadcast e quella ricevuta dal fascio di traffico?

Dai dati di guadagno dei due diversi diagrammi di radiazione nella specifica direzione del punto di misura?

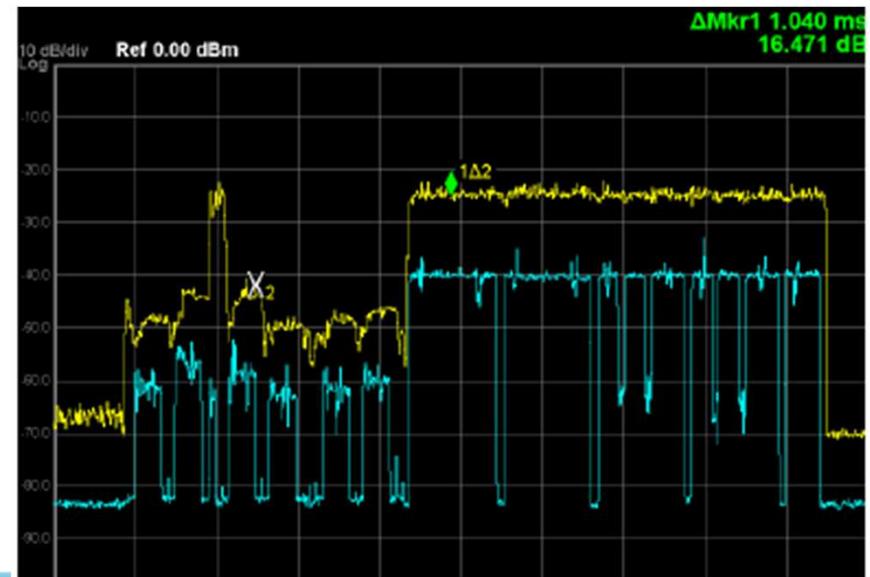
CRITICITA':

- ✓ ambiente di propagazione complesso → il rapporto tra le potenze ricevute varia da punto a punto anche in funzione di riflessioni/diffrazioni
- ✓ Valutazione della direzione angolare esatta del punto di misura rispetto alla sorgente
- ✓ Tipicamente si dispone dei soli diagrammi di involuppo

Da misure?

E' possibile, GENERANDO UN FASCIO DI TRAFFICO alla massima potenza verso il punto di misura →

NECESSITA' DI UN TERMINALE , posto nei pressi del punto di misura, per forzare il traffico



# Valutazione della massima esposizione a segnali NR nella nuova IEC 62232

The evaluation methods described in E.8.2.1 are based on extrapolation to assess the maximum exposure level from an NR base station using SSS, PSS, PBCH or PBCH-DMRS signal (i.e. the SSB). E.8.2.1.2 describes an evaluation method using a dedicated decoder. E.8.2.1.3 describes an evaluation method using a spectrum analyser. Both methods can be used and they differ only in the way the time invariant component of the NR signal is measured (see details in [120] to [122]). While, in general, SSB based extrapolation is possible, only decoding of the SSS allows for extrapolation of maximum exposure for each cell ID separately.

$$E_{\text{asmt}} = E_{\text{SSB}} \cdot \sqrt{F_{\text{extBeam}} \cdot F_{\text{BW}} \cdot F_{\text{PR}} \cdot F_{\text{TDC}}} \quad (\text{E.17})$$

where

- $E_{\text{asmt}}$  is the extrapolation  $E$ -field ( $\text{V m}^{-1}$ );
- $E_{\text{SSB}}$  is the measured  $E$ -field ( $\text{V m}^{-1}$ ) per resource element (RE) of the strongest measured SSB beam (corresponds to  $E_{\text{broadcast}}$  in Equation (B.59));
- $F_{\text{extBeam}}$  is the extrapolation factor corresponding to the ratio of the traffic EIRP envelope to the broadcast EIRP envelope at the direction to the measurement location (see B.8.5);
- $F_{\text{TDC}}$  is the technology duty-cycle;
- $F_{\text{PR}}$  is the power reduction if the actual maximum approach is used, otherwise it is set to 1;
- $F_{\text{BW}}$  is the ratio of the total carrier bandwidth to the subcarrier frequency spacing of the SSB.



Se è possibile forzare un fascio di traffico verso il punto di misura, non è più opportuno misurare direttamente la potenza ricevuta dal fascio di traffico?

Sì. L'esposizione è sostanzialmente determinata dal fascio di traffico, sia per via della potenza ricevuta, sia per via dell'occupazione temporale nella trama.

Possiamo pensare ad un'estrapolazione a partire da misure di questo tipo?

Certo, e si tratterà di un metodo di estrapolazione che parte da una misura di potenza associata al singolo RE, per poi moltiplicarla per il numero totale di RE contenuti nella banda di frequenza utilizzata dal segnale.

Partendo da una misura del traffico, si elimina quindi anche un passaggio nella stima della massima esposizione da estrapolazione (utilizzo del rapporto tra potenze ricevute da broadcast e traffico)

# Conclusioni

A che punto è lo sviluppo del 5G?

Portale CEM - campi elettromagnetici in Piemonte



- HOME
- SORGENTI
- MISURE
- CALCOLO EMISSIONI
- ESPOSIZIONE POPOLAZIONE
- SITI COMPLESSI
- MAPPA COMPLETA
- SINTESI COMUNE
- INDICATORI
- DATI NEGLI ANNI
- INFORMAZIONI

## SORGENTI

Elettrodotti

Sorgenti TLC

Mappa della localizzazione degli impianti per le telecomunicazioni come radio e TV e telefonia mobile.

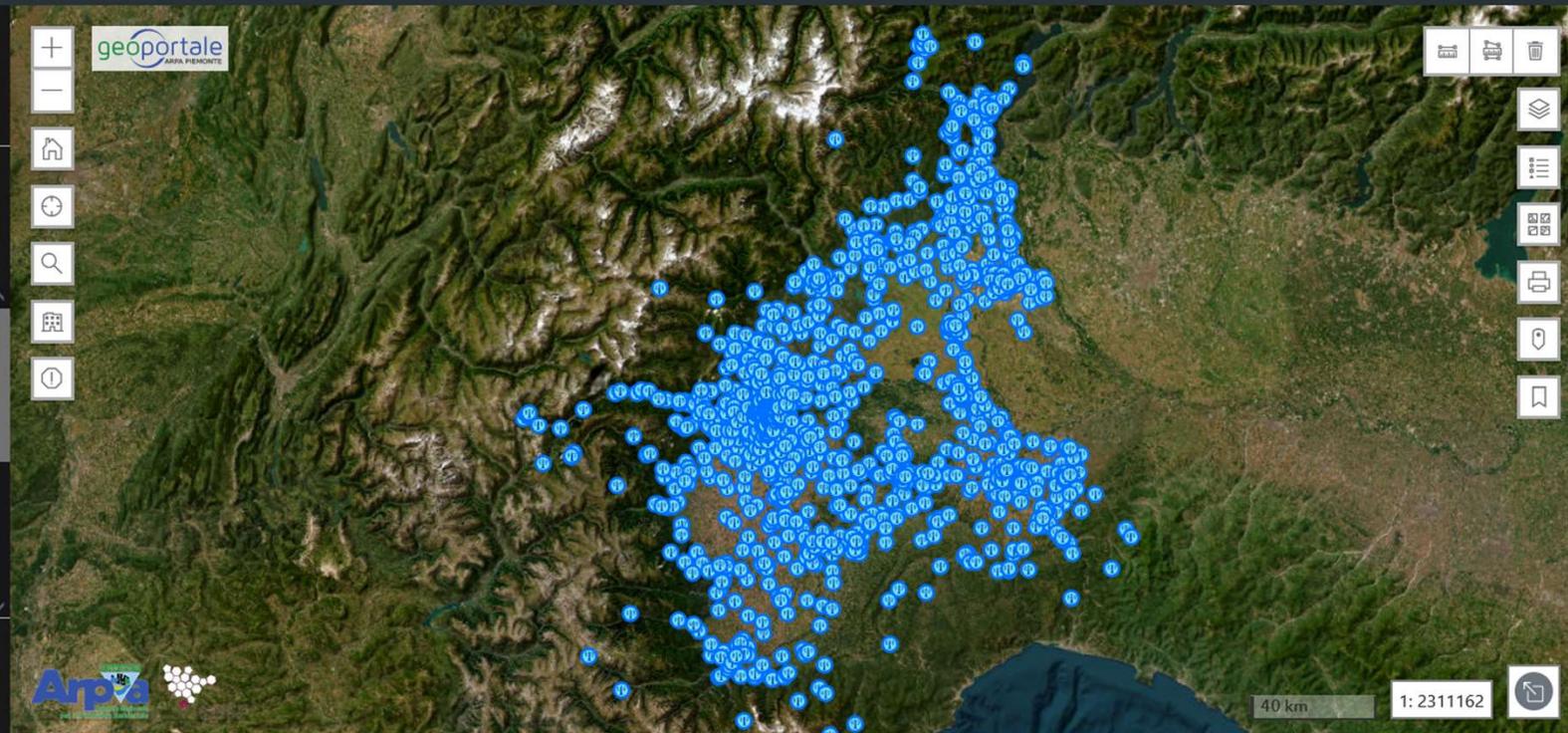
Frequenza aggiornamento dati : giornaliera

Come interpreto la mappa?

Ogni simbolo sulla mappa rappresenta uno o più impianti.

Facendo click su un simbolo compaiono

Saperne di più ...



< 3% sono impianti a 26GHz

# Conclusioni

**L'esposizione al 5G** è fortemente **influenzata dalla presenza di terminali** e dai servizi richiesti. Per quanto riguarda la diffusione dei terminali, nel 2022 la vendita di smartphone 5G ha superato quella dei 4G. Anche per le CPE (servizi FWA nella banda mmWave) si è registrato un incremento, ma la diffusione è ancora limitata (sistemi 5G pari a circa il 16% dei dispositivi venduti)

**In assenza di utenti, l'esposizione** dovuta ai segnali di controllo/copertura è **non significativa**.

La **normativa italiana** per l'esposizione della popolazione garantisce una buona cautela anche per l'esposizione al 5G, pur non gestendo le esposizioni su tempi brevi.

**Metodi e strumenti di misura:** sono reperibili standard di riferimento, ma la materia è ancora in evoluzione.

Per quanto riguarda l'uso di misuratori in banda larga, la rilevazione di valori di campo elettrico  $>6$  V/m in presenza di segnali 5G può essere soggetta a sovrastima del livello.

Di recente pubblicazione lo standard **IEC62232 Ed.3** (Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure)