



FONDATA
NEL 1977

Aggiornamenti di radioprotezione

Organo ufficiale dell'Associazione Italiana di Radioprotezione Medica

VERSIONE RIDOTTA

DIVENTA SOCIO PER AVERE LA TUA COPIA COMPLETA

ASPETTI SCIENTIFICI E PROFESSIONALI

- | L'utilizzo delle antenne attive nella tecnologia 5G D.Franci |
T.Aureli
- | Elettrosensibilità: inquadramento, stato delle conoscenze e implicazioni per i lavoratori "elettrosensibili" esposti ai campi elettromagnetici C.Grandi |
- | Idoneità di operatori sanitari in medicina nucleare: valutazione critica di un caso F.Claudiani |
- | Esposizione a radon e nuove prospettive nella prevenzione del tumore polmonare G.Taino |
- | Nuove prospettive nella sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti al radon S.Bellia |

NOTIZIE DALL'ASSOCIAZIONE

- | Verbale del Consiglio Direttivo del 1 settembre 2021 a Ragusa
- | Verbale del Consiglio Direttivo del 4 settembre 2021 a Ragusa
- | Rendiconto finanziario 2019
- | Rendiconto finanziario 2020

CONGRESSI, CONVEGNI E CORSI

- | Convegno Nazionale AIRM – TORINO - giugno 2022



Personalizzare la radioprotezione



Aggiornamenti di radioprotezione

59
DICEMBRE 2021

Associazione Italiana di Radioprotezione Medica, Via Isidoro del Lungo 7, 00137 Roma (RM) - www.airm.name

PERIODICO SEMESTRALE DESTINATO AI SOCI DELLA ASSOCIAZIONE ITALIANA
DI RADIOPROTEZIONE MEDICA FONDATA DA ERNESTO STRAMBI
ANNO XXIX, N.1 (DICEMBRE 2021)

Direttore:

Roberto Moccaldi

Responsabile:

Franco Claudiani

Redazione:

Alessandro Arru

Salvatore Bellia

Giulia Castellani

Franco Claudiani

Giuseppe De Luca

Fabrizio Gobba

Vittorio Lodi

Roberto Moccaldi

Alberto Modenese

Andrea Stanga

Antonella Spigo

Giuseppe Taino

Realizzazione elettronica: Dario Marino - d.marino@dmxlab.it
Dario Marino - d.marino@dmxlab.it

Il periodico è disponibile sul sito www.airm.name per i Soci AIRM in regola con le quote sociali. I contenuti degli articoli sono di esclusiva responsabilità degli autori e non implicano necessariamente la posizione ufficiale dell'Associazione. Non è consentita la riproduzione, anche parziale, senza il consenso scritto dell'Associazione. Per esigenze editoriali la redazione può apportare modifiche ai testi, informandone gli autori. Manoscritti ed altro materiale, anche se non pubblicati, non si restituiscono.

I manoscritti devono essere inviati a franco.claudiani@gmail.com.

I manoscritti devono indicare i nomi degli autori, la loro affiliazione, un recapito mail, essere in formato word; non ci sono limiti di pagine, le tabelle e le fotografie devono essere numerate e con didascalia, la bibliografia deve essere numerata secondo l'ordine di citazione nel testo.

ASSOCIAZIONE ITALIANA DI RADIOPROTEZIONE MEDICA (AIRM)

Associazione culturale e professionale senza fini di lucro, istituita nel 1977, con Atto
Notaio Nazzareno Dobici, serie 1313, vol.464 - Codice Fiscale 80457430587

Consiglio Direttivo:

Presidente: Roberto Moccaldi
Vice Presidente: Fabriziomaria Gobba
Segretario: Giulia Castellani
Tesoriere: Andrea Stanga

Segreteria:

segreteriaairm@gmail.com
Tel: 3283299877

Consiglieri:

Arru Alessandro - Salvatore Bellia
Franco Claudiani - Giuseppe De Luca
Vittorio Lodi - Alberto Modenese
Antonella Spigo - Giuseppe Taino

Webmaster:

Dario Marino - d.marino@dmxlab.it

Consiglio scientifico:

Franco Bistolfi - Martino Grandolfo
Carlo Grandi - Franco Ottenga
Maurizio Pelliccioni - Mario Pulcinelli

Versamenti: L'AIRM si autogestisce mediante le quote dei propri Soci. Tutti i versamenti in favore dell'AIRM devono essere effettuati esclusivamente mediante bonifico bancario intestato a:

C/C Bancario: BPER Banca
AIRM – IBAN: IT 26 G 05387 74950 0000 430 15488



**A TUTTI I SOCI
LA REDAZIONE AUGURA**

**BUON
NATALE**

E FELICE ANNO NUOVO



ASPETTI SCIENTIFICI E PROFESSIONALI

L'utilizzo delle antenne attive nella tecnologia 5G	D.Franci T.Aureli	5
Elettrosensibilità: inquadramento, stato delle conoscenze e implicazioni per i lavoratori "elettrosensibili" esposti a campi elettromagnetici	C.Grandi	14
Idoneità di operatori sanitari in medicina nucleare: valutazione critica di un caso	F.Claudiani	34
Esposizione a radon e nuove prospettive nella prevenzione del tumore polmonare	G.Taino	44
Nuove prospettive nella sorveglianza sanitaria dei lavoratori esposti al radon	S.Bellia	59

NOTIZIE DELL'ASSOCIAZIONE

Verbale del Consiglio Direttivo del 1 settembre 2021 a Ragusa	69
Verbale del Consiglio Direttivo del- 4 settembre 2021 a Ragusa	72
Rendiconto finanziario 2019	74
Rendiconto finanziario 2020	79

CONGRESSI, CONVEGNI E CORSI

Convegno Nazionale AIRM – TORINO - giugno 2022	84
--	----

L'utilizzo delle antenne attive nella tecnologia 5G

Daniele Franci - Tommaso Aureli
ARPA Lazio - Sezione Provinciale di Roma

INTRODUZIONE

Il sistema 5G promette una rivoluzione tecnologica senza pari nel mondo delle telecomunicazioni mobili. Connettività senza precedenti, implementazione dell'ecosistema dell'Internet of Things (in cui gli oggetti di uso quotidiano diventeranno "smart" e dialogheranno tra loro mediante la rete 5G) e futuristiche applicazioni a bassa latenza come la guida autonoma sono solo alcune delle implementazioni pratiche che la nuova tecnologia renderà a breve di uso comune. Le straordinarie performance del sistema 5G dipendono dall'eccellenza delle soluzioni tecniche adottate da comunità scientifica e operatori tecnologici per lo sviluppo della nuova rete. La novità principale rispetto al passato risiede senza dubbio nell'utilizzo massiccio di antenne attive di nuova generazione. Questi apparati radianti, complessi e sofisticati, adottano pattern di irraggiamento dell'onda elettromagnetica profondamente differenti rispetto a quelli che caratterizzano le antenne delle generazioni precedenti. Se da un lato le caratteristiche innovative delle antenne incidono sulle prestazioni raggiunte dal sistema, dall'altro implicano un radicale ripensamento delle consolidate tecniche di valutazione del campo elettromagnetico generato, sia a livello previsionale che

di misura sperimentale ad impianto attivo. In questo lavoro verranno descritte le caratteristiche principali delle antenne attive di nuova generazione utilizzate dagli impianti 5G, analizzando al contempo il modo in cui si sono aggiornate (e continueranno ad aggiornarsi) le metodologie utilizzate dagli organismi preposti al controllo per valutare l'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da essi prodotti.

LE CARATTERISTICHE DELLE ANTENNE ATTIVE 5G

Le antenne attive utilizzate per l'implementazione della rete 5G sono sistemi trasmissivi con caratteristiche profondamente differenti rispetto al passato. La discontinuità più evidente rispetto alle precedenti generazioni tecnologiche è la capacità di sintetizzare fasci di radiazione con direzioni di massimo puntamento che variano in maniera dinamica in funzione dell'area da servire e della richiesta dell'utenza. Grazie a questa peculiarità, il sistema 5G garantisce, a parità di potenza erogata, una copertura radio e prestazioni complessive estremamente più efficaci rispetto alle tecnologie precedenti. Un esempio pratico di questa efficienza è dato dalla caratteristica gestione dei canali di controllo del sistema 5G, ovvero quei canali trasmessi dall'impianto allo scopo di segnalare la presenza

dell'antenna e la sua disponibilità a servire l'eventuale utenza. Fino ad oggi i sistemi di telefonia mobile hanno trasmesso questi canali attraverso l'unico fascio statico di radiazione sintetizzabile dall'antenna, condiviso con il traffico dati. Questa limitazione determina inevitabilmente una perdita di efficienza e calo delle prestazioni poichè tipologie di segnali profondamente differenti tra loro (controllo e traffico dati) sono comunque costrette a condividere le medesime modalità di trasmissione. Il 5G sovverte questo consolidato paradigma dedicando fasci di radiazione separati per traffico e controllo. Il grande vantaggio sta nel fatto che il sistema può ottimizzare le modalità di trasmissione separatamente per i due diversi fasci, sfruttando al massimo l'ampia flessibilità garantita dall'utilizzo delle antenne attive. I canali di controllo del sistema 5G (chiamati anche SS-Block) vengono trasmessi mediante la tecnica del beam sweeping: i diversi SS-Block vengono trasmessi su fasci che si attivano in maniera sequenziale e che puntano in direzioni diverse

dello spazio. In questo modo l'antenna 5G riesce a coprire una zona molto estesa consentendo un considerevole risparmio energetico rispetto al medesimo scenario in tecnologia 4G e precedenti (2G, 3G). Nel momento in cui il terminale di un utente riceve il messaggio di segnalazione trasportato dall'SS-Block e risponde con una richiesta di accesso alla rete per usufruire del servizio, la stazione radio base instaura una connessione dati, dedicando all'utente uno specifico fascio di traffico PDSCH (Physical Downlink Shared Channel). In altri termini, il video in streaming che l'utente sta visualizzando sul suo smartphone viaggia attraverso il fascio PDSCH. Per i fasci di traffico, l'antenna attiva implementa un meccanismo ancora più raffinato di quello descritto in precedenza per gli SS-Block, chiamato beamforming. Il termine indica la capacità dell'antenna attiva di 'modellare' un fascio di radiazione ad alto guadagno, stretto e fortemente direzionale verso uno specifico utente. I meccanismi di beam sweeping e beamforming sono illustrati in Fig. 1.

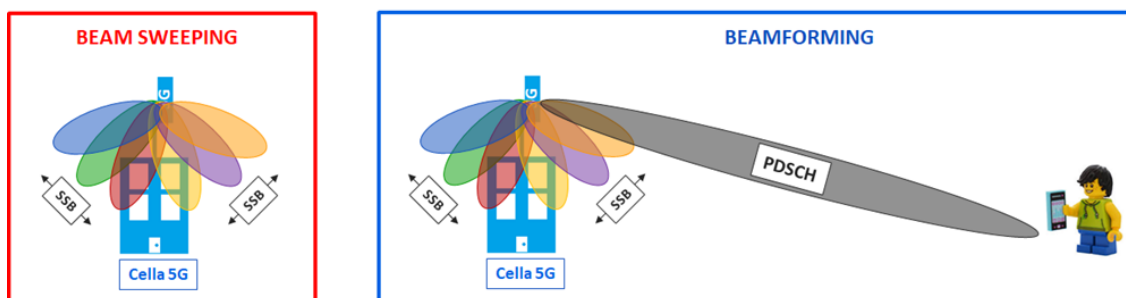


Figura 1 – Beam sweeping degli SS-Block (sx) e beamforming del traffico dati (dx)

Il meccanismo di beamforming può essere utilizzato dalle antenne attive 5G in virtù delle loro caratteristiche ingegneristiche e costruttive davvero uniche. Evitando di scendere in dettagli tecnici al di fuori del focus di questo lavoro, un'antenna 5G può essere schematizzata come array planare di sistemi radianti indipendenti, integrati in un unico pannello compatto (Fig. 2 a sinistra).

Sfruttando questa configurazione, il beamforming può essere ottenuto aumentando il numero di elementi radianti che trasmettono contemporaneamente lo stesso segnale con la medesima frequenza e fase. All'aumentare del numero degli elementi che costituiscono l'antenna, il fascio sintetizzato diventa sempre più stretto e focalizzato (Fig. 2 a destra).

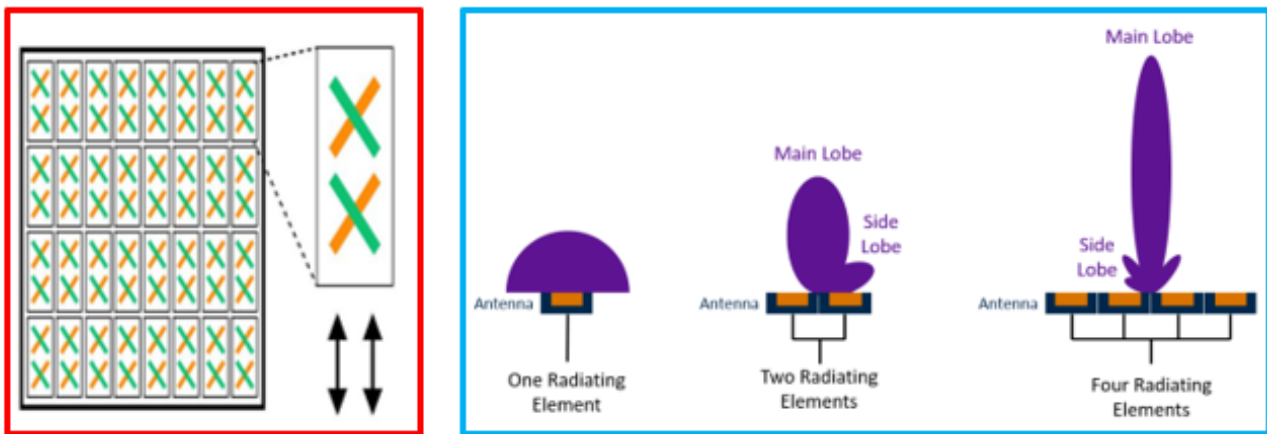


Figura 2 – Schema di un'antenna attiva 5G (sx) e descrizione del meccanismo di beamforming (dx)

Un'altra caratteristica fondamentale del beamforming è la 'dinamicità' del fascio, che può cambiare direzione per seguire l'utente durante il proprio movimento. Queste modifiche della direzione di puntamento possono essere ottenute in tempo reale andando a modificare la fase degli elementi radianti. In maniera analoga, l'antenna può organizzare in modo da definire diversi gruppi di elementi radianti che condividano,

durante lo stesso intervallo temporale, la medesima fase: in questo modo il sistema sarà in grado di servire contemporaneamente più utenti - o anche il medesimo utente, nel caso in cui sussistano condizioni di propagazione non ottimali che richiedano l'utilizzo di più fasci per garantire la qualità del servizio - attraverso fasci di radiazione che puntano in direzioni diverse (Fig.3).

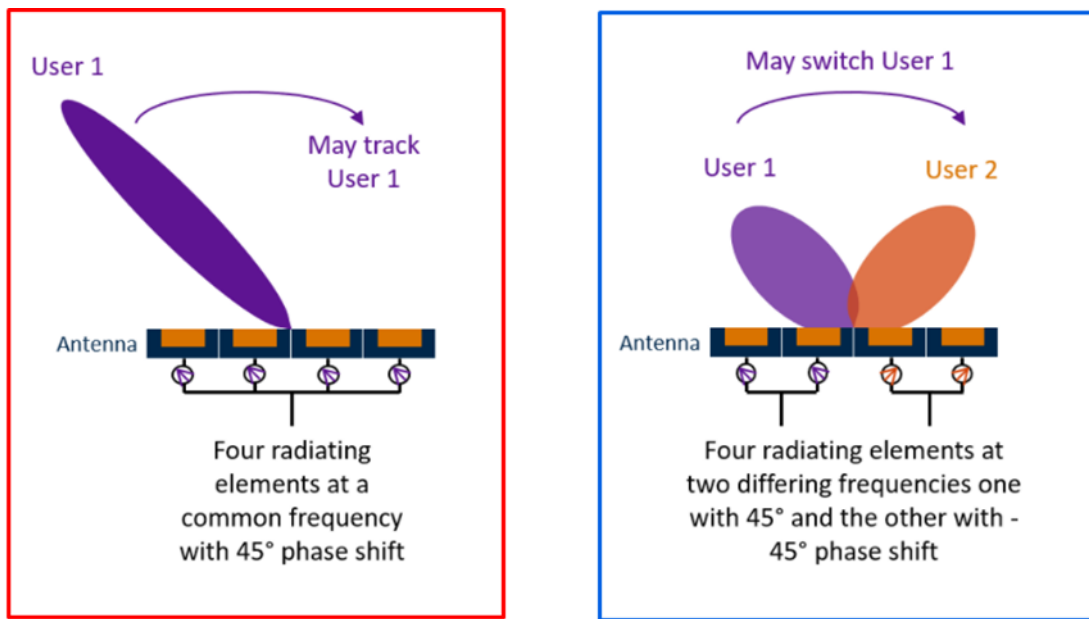


Figura 3 – Modifica della direzione del fascio (sx) e formazione di fasci indipendenti (dx)

LA VALUTAZIONE PREVISIONALE DEL CAMPO PRODOTTO DA UN'ANTENNA

Da quanto discusso nel paragrafo precedente è facile comprendere come la conoscenza dettagliata delle caratteristiche radiative di un'antenna sia imprescindibile quando si vuole effettuare una valutazione del campo elettrico prodotto dalla stessa. La norma tecnica che contiene le indicazioni per effettuare la valutazione del campo elettrico in qualunque punto dello spazio è la Norma CEI 211-10. La norma fornisce la formula di propagazione di spazio libero, da utilizzarsi per effettuare il calcolo del campo elettrico in uno specifico punto caratterizzato dalle coordinate sferiche r, θ, ϕ :

$$E = \sqrt{\frac{377}{4\pi}} \cdot \sqrt{\frac{P_{max} \cdot G(\theta, \phi)}{r^2}} \quad (1)$$

La formula è valida nell'ipotesi in cui sussistano le cosiddette *condizioni di campo lontano*, ovvero nel caso in cui il punto in cui si vuole calcolare il campo elettrico sia posizionato ad una distanza dalla sorgente superiore alla lunghezza d'onda λ della radiazione emessa dalla sorgente. Per i valori di frequenza considerati nell'ambito della telefonia mobile (all'incirca 800-3800 MHz), tale distanza risulta essere al massimo qualche decina di centimetri, rendendo pertanto la condizione facilmente rispettata nella stragrande maggioranza dei punti di valutazione di che rivestono interesse radioprotezionistico.

Si può notare che l'Eq. 1 dipende fortemente dai parametri tecnici che caratterizzano l'antenna trasmittente:

- P_{max} rappresenta la massima potenza erogabile dall'antenna;
- $G(\theta, \phi)$ è la funzione che rappresenta il valore del guadagno di antenna assunto in ciascuna direzione dello spazio.

La funzione G riveste quindi un'importanza cruciale nelle valutazioni previsionali CEM: essa rappresenta infatti il diagramma di radiazione specifico dell'antenna

in questione che va, di fatto, a definire la "forma" tridimensionale dell'irraggiamento prodotto dall'antenna. La funzione G viene calcolata dal costruttore dell'antenna e consegnata a chi acquista l'antenna sotto forma di file di testo in cui viene riportato il valore del guadagno calcolato sui piani di massimo irraggiamento, orizzontale e verticale (Fig. 4).

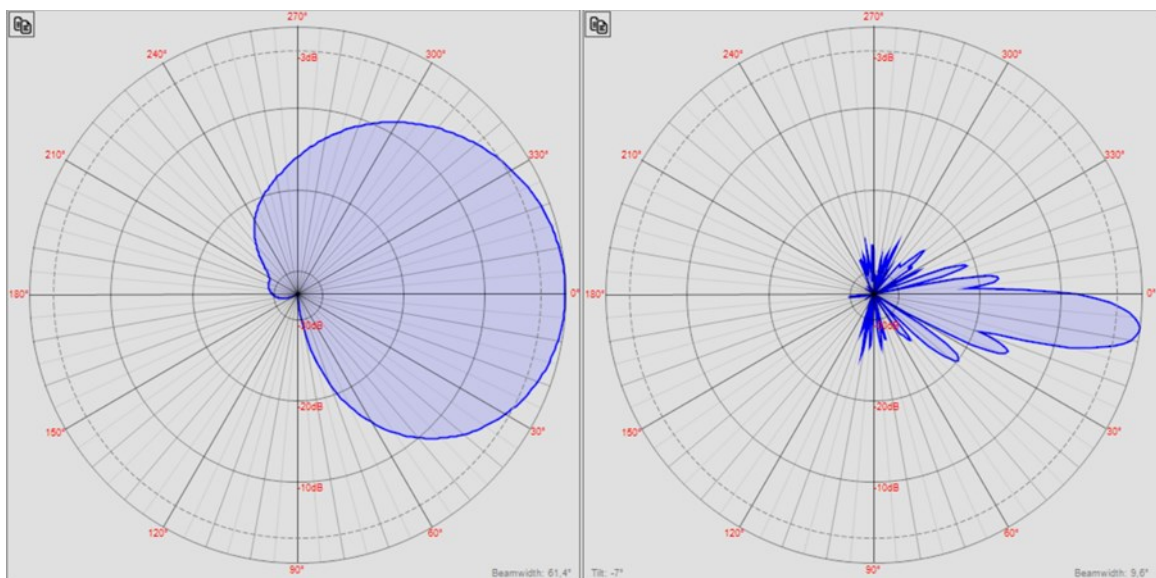


Figura 4 – Proiezione del diagramma di radiazione sul piano orizzontale (sx) e verticale (dx) relativi ad un'antenna di vecchia generazione

Da notare come, nella sua versione originale, la funzione G sia indipendente dal tempo: ciò rispecchia il fatto che le antenne di telefonia mobile della generazione precedente sono caratterizzate da un diagramma 'stazionario', ovvero con una forma immutabile nel tempo. Tale caratteristica ha per anni ridotto l'utilizzo dell'Eq. 1 ad un banalissimo esercizio d'algebra

applicabile in tutti i casi pratici.

Le peculiarità delle antenne attive di nuova generazione, descritte brevemente nel paragrafo precedente ci permettono tuttavia di dedurre che le stesse saranno caratterizzate da una spiccata variabilità temporale della funzione G . Per questo motivo, fin dagli albori dello sviluppo della tecnologia 5G, si è reso necessario un

approfondimento mirato all'aggiornamento dell'Eq. 1 per renderla applicabile anche al caso di sistemi dotati di antenne attive. Il tema è stato affrontato anche dagli organismi tecnici internazionali. In particolare l'International Electrotechnical Commission (IEC) ha recentemente rilasciato il documento IEC 62232 [1], all'interno del quale sono fornite indicazioni per definire una formulazione alternativa a quella dell'Eq. 1 da utilizzarsi nel caso di antenne attive:

$$E = \sqrt{\frac{377}{4\pi}} \cdot \sqrt{\frac{P_{max} \cdot G_{env}(\theta, \varphi)}{r^2}} \cdot \sqrt{F_{PR}} \quad (2)$$

L'Eq. 2 introduce due concetti nuovi:

- il diagramma di radiazione inviluppo G_{env}
- il fattore statistico di riduzione F_{PR}

che andremo a discutere più nel dettaglio.

1) Il diagramma inviluppo

Come abbiamo visto, la forma dell'irraggiamento prodotto da un'antenna 5G varia in modo piuttosto repentino nel tempo in funzione dei fasci istantaneamente sintetizzati dall'antenna. Allo stesso modo anche il valore di campo previsto in uno specifico punto dello spazio sarà una grandezza variabile nel tempo. Tuttavia la valutazione previsionale non può essere legata alle modalità istantanee di irraggiamento dell'antenna in quanto queste sono informazioni imprevedibili a priori. Per questo motivo, la valutazione si basa su un'astrazione basata sulla definizione del

diagramma inviluppo G_{env} . In pratica si considera la situazione (irrealistica) in cui l'antenna stia sintetizzando tutti i possibili fasci contemporaneamente e si va a definire il massimo inviluppo costruito a partire dai singoli fasci elementari. La Fig. 5 mostra un esempio di costruzione della proiezione sul piano orizzontale del diagramma inviluppo: partendo dai fasci stretti elementari (rappresentati da colori diversi) si costruisce l'inviluppo (linea nera) prendendo in tutte le direzioni il valore massimo nell'ipotesi che tutti i diagrammi elementare fossero attivi contemporaneamente.

Il vantaggio dell'utilizzo del diagramma di inviluppo sta nel fatto che la valutazione torna ad essere indipendente dal tempo. Tuttavia è evidente che l'assunzione fatta (fasci tutti attivi contemporaneamente) sia oggettivamente irrealizzabile nella pratica e che una valutazione previsionale basata esclusivamente sull'utilizzo di G_{env} condurrebbe a delle sovrastime inaccettabili del valore di campo. Per questo motivo è necessario introdurre un fattore che tenga conto di questo aspetto.

2) Il fattore statistico di riduzione F_{PR}

Il fattore di riduzione F_{PR} è definito nel documento IEC TR 62669 [2] ed è definito come il massimo valore assunto dal rapporto tra la potenza effettivamente trasmessa dall'antenna attiva mediata su intervalli di tempo pari a 6 minuti e integrata sull'intero angolo

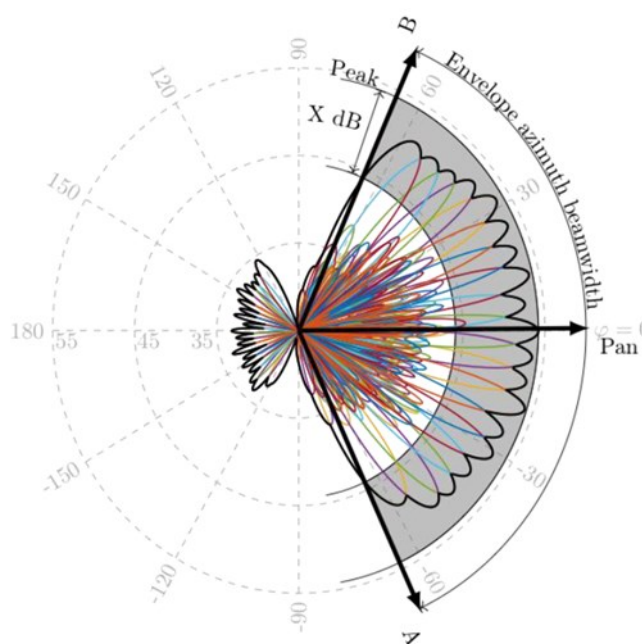


Figura 5 – Costruzione del diagramma di inviluppo per antenne attive

solido $4p$, e il massimo valore di potenza istantaneo che l'antenna è in grado di trasmettere. Il documento [2] illustra un vasto campionario di casi studio in cui è stata effettuata una valutazione statistica del fattore FPR. Da tali studi è emerso che il valore massimo del rapporto tra potenza media e quella massima, considerati tutti i casi studio analizzati è pari a 0.31. Per questo motivo il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) ha emanato la Delibera 88/2020 [3] in cui stabilisce che il valore di FPR da applicare a livello nazionale per le valutazioni previsionali su sorgenti equipaggiate da antenne attive è pari a 0.31. In virtù di questa ultima affermazione, l'Eq. 2 diventa:

$$E = \sqrt{\frac{377}{4\pi}} \cdot \sqrt{\frac{P_{max} \cdot G_{env}(\theta, \varphi)}{r^2}} \cdot \sqrt{0.31} \quad (3)$$

Si noti che il valore di 0.31 costituisce a tutti gli effetti il 100esimo percentile della distribuzione del rapporto tra potenza media e potenza massima registrato in tutti i casi studio riportati nel documento [1]. Ciò significa che l'Eq. 3 fornisce comunque un risultato conservativo e rappresentativo di uno scenario di irraggiamento che si verifica raramente. Nel caso in cui si vogliano ottenere delle valutazioni più realistiche dell'effettivo irraggiamento sulle 24 ore, il fattore 0.31 deve essere sostituito con un opportuno fattore (chiamato α_{24}) che rappresenta il rapporto tra la potenza media effettivamente trasmessa dall'impianto nelle 24 ore e il massimo valore di potenza istantaneo.

CENNI SULLE TECNICHE DI MISURA CEM PER SORGENTI CON ANTENNE ATTIVE

Abbiamo discusso le principali caratteristiche delle antenne attive e le ripercussioni che il loro utilizzo avranno sul modo di effettuare le valutazioni preventive del campo elettrico prodotto. Non è difficile tuttavia immaginare che la nuova tecnologia possa portare alla modifica delle consuete procedure operative utilizzate per effettuare misure sperimentali del campo generato da impianti 5G. Nelle misure sperimentali si è solitamente interessati ad effettuare una preliminare quantificazione del campo prodotto nelle condizioni di carico massimo dell'impianto, ovvero del valore massimo del campo elettromagnetico che l'antenna può produrre nel punto di interesse. Come abbiamo più volte ripetuto, il valore di campo prodotto dalle antenne attive varia a seconda delle direzioni in cui puntano i fasci di traffico istantaneamente sintetizzati attraverso il meccanismo del beamforming. La misura del campo in un punto dipende quindi dalla direzione di puntamento dei fasci istantaneamente sintetizzati dall'antenna, il cui pattern è imprevedibile a priori.

La condizione da soddisfare per garantire l'effettuazione di una misura rappresentativa del massimo carico dell'impianto in esame e che l'antenna sia forzata a sintetizzare un fascio di traffico che punti verso la direzione dell'antenna ricevente utilizzata con la

strumentazione di misura (tipicamente un analizzatore di spettro vettoriale). Per questo motivo, l'approccio sperimentale proposto per le misure su segnali 5G prevede l'utilizzo di un terminale mobile posizionato nelle dirette vicinanze dell'antenna ricevente (Fig. 6). Infatti, se la misura viene effettuata mentre è attiva una connessione dati tra la sorgente ed il terminale mobile si avrà la sicurezza di avere un beam di traffico che punta direttamente verso la nostra antenna ricevente durante la misura del campo.

La definizione di una modalità operativa di misura del segnale 5G è un tema ancora dibattuto nella comunità scientifica. Tuttavia il consenso intorno alla tecnica basata sull'utilizzo di un terminale mobile adibito alla forzatura del traffico sta pian piano crescendo, anche in virtù degli ottimi risultati ottenuti nei recenti studi [4].

CONCLUSIONI

Le antenne attive utilizzate per l'implementazione della rete 5G sono apparecchi complessi e molto sofisticati. Meccanismi come il beam sweeping e i beamforming consentono di raggiungere performance assolutamente inavvicinabili per le tecnologie delle generazioni precedenti. Un progresso di tale portata, tuttavia, una serie di problematiche tecniche che renderanno il processo di valutazione del campo prodotto dagli impianti 5G più complesso e sfidante. L'introduzione di concetti come il diagramma involuppo e il fattore

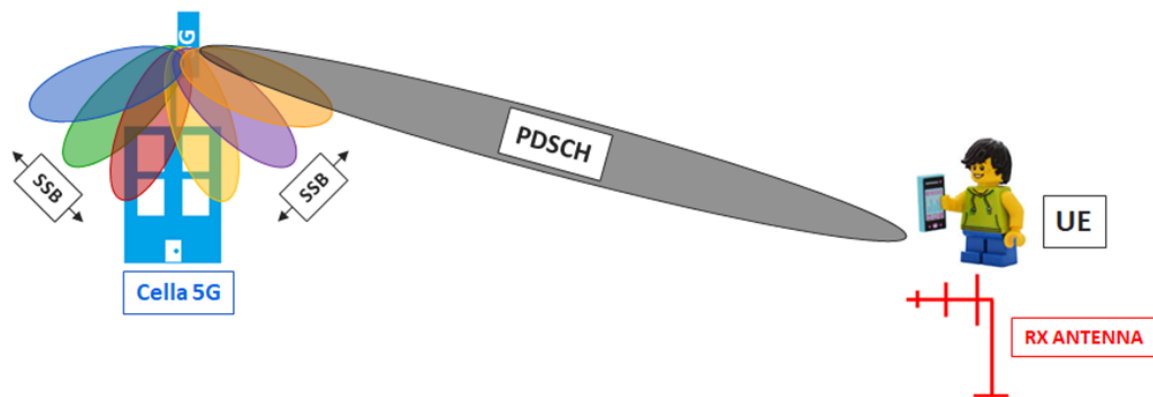


Figura 6 – Misura effettuata durante un periodo di forzatura del traffico dati

statistico di riduzione FPR consentiranno di effettuare valutazioni previsionali precise e affidabili, a fronte di un impegno computazionale leggermente più elevato. Allo stesso modo, anche le procedure operative per le

misure sperimentali del campo generato dagli impianti 5G dovranno evolvere, prevedendo l'utilizzo di terminali mobili allo scopo di forzare il traffico dati in direzione dell'antenna ricevente.

Bibliografia

1. IEC 62232:2017 "Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure"
2. IEC TR 62669:2019 "Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure"
3. Delibera SNPA 88/2020 "Criteri per la valutazione delle domande di autorizzazione all'installazione di impianti di reti di comunicazione elettronica con antenne mMIMO/AASs - novembre 2020"
4. S. Adda et al., "A Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the Electromagnetic Field Level Radiated by 5G Base Stations," in IEEE Access, vol. 8, pp. 101448-101463, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998448.



**FONDATA
NEL 1977**



Personalizzare la radioprotezione