**Limiti di esposizione RF nel downlink di una rete 5G nel campo delle mmWave.**

***Premessa***

L'articolo si basa in larga parte, su quanto esposto in bib.1 dove si confronta l'esposizione RF fra un sistema con caratteristiche 5G, nel range delle onde millimetriche (28 GHz) e un sistema UMTS/LTE (release 9).
In successivi articoli si approfondirà la tematica della tecnologia delle reti 5G con particolare riguardo all'impiego delle mmwave (o millimeter wave) , del loro impatto sull'esposizione ai campi elettromagnetici e delle tecniche che possono essere adottate per ridurre l'esposizione ai campi emessi da stazioni operanti in onda millimetrica

***Introduzione***

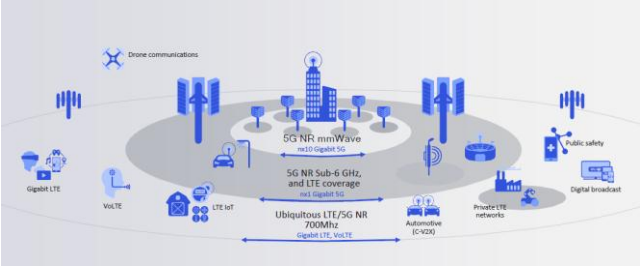


*Fig1 Illustrazione 5G co-site con LTE advanced (Fonte Qualcomm)*

Il 5G rappresenta lo standard mondiale di quinta generazione di telefonia mobile . Esso non soltanto costituisce una evoluzione della precedente generazione 4G (LTE Long time evolution), ma rappresenta una vera rivoluzione in termini di prestazioni e di connettività.
Esso è caratterizzato da:

- Un'alta capacità di rete (potendo supportare un grande numero di utilizzatori e anche dispositivi IoT "Internet of Thing")
- Flussi dati altissimi (fino a 10 GBps)
- Una maggiore efficienza, rispetto all'LTE, rispetto ai costi e al risparmio energetico

Il sistema verrà lanciato commercialmente a partire dal 2020,
mentre sono in corso sperimentazioni in tutto il mondo (compresa l'Italia).
Un'altra caratteristica peculiare del 5G e l'utilizzo di diverse gamme di frequenza che per , la prima volta, prevedono l'uso delle onde millimetriche nelle frequenze 24-27 GHz e successivamente , una estensione nelle bande dei 40 GHz e superiori).

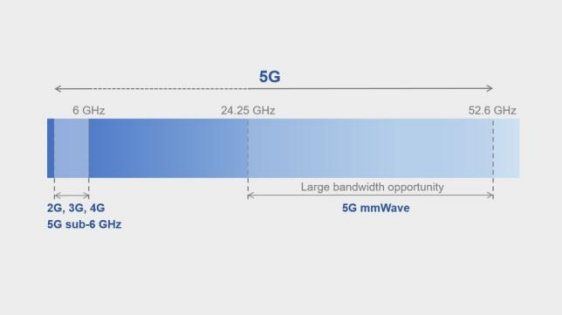


*Fig 2 frequenze utilizzate dal 5G (Fonte Qualcomm)*

***Esposizione RF alle onde millimetriche***

In chiave rischi per la salute pochi studi sono stati fatti sull'uso di onde millimetriche nella tecnologia 5G.
Le onde millimetriche forniscono una elevata capacità alla rete poiché consentono di utilizzare larghezze di banda dell'ordine di 1 GHz e oltre per la trasmissione del segnale. Tuttavia, forniscono una copertura limitata alla rete di telecomunicazioni a causa della forte attenuazione del segnale a frequenze così alte. Pertanto, per estendere le reti di telecomunicazione 5G, si utilizzeranno molti piccoli siti cellulari . La rete che opera su frequenze millimetriche sarà composta da small cell con un raggio operativo non superiore ai 200 m e da femto cell con raggio di azione di un ordine di grandezza inferiore). Si teme che una rete così estesa (la c.d. densificazione della rete),

creerà un livello più alto di radiazioni nell'ambiente circostante. Tuttavia, è ragionevole pensare che le caratteristiche radiative (il campo e.m.), prodotto dalle stazioni di base che operano per la copertura di celle così piccole sarà 20 volte (13 dB), al di sotto delle celle attuali. Pertanto, per un'area unitaria, vedremo più antenne 5G con radiazioni minori, rispetto a un' antenna grande con radiazione molto alta.

Si ritiene una densificazione , per unità di area rispetto all'attuale , che può variare da fra 1 : 4/10 (per unità di superficie), con una riduzione delle dimensioni delle antenne di 1 :10/15 (si ricorda che nel range delle mmWave la lunghezza d'onda e dell'ordine di 1 cm) . Questo impatto sulla salute della società dipenderà anche da molti fattori come la linea di vista, i muri di cemento, ecc.

La maggior parte dei sistemi di comunicazione mobili esistenti al giorno d'oggi sono distribuiti in uno spettro sub-3 GHz che è noto per essere molto affollato. Al fine di fornire la velocità di trasmissione dati necessaria e di evitare la congestione di rete, l'attenzione dei progettisti dei sistemi radio si è spostata verso frequenze più elevate.

Nella banda mmW si ha la disponibilità di una maggiore capacità di banda , con uno spettro approssimativo di 100 GHz per l'uso della comunicazione mobile. Accoppiate con l'uso di tecniche Massive MIMO e femtocell, le bande millimetriche possono essere la soluzione chiave per la futura comunicazione mobile a larga banda 5G (eMBB). Tuttavia,alcune questioni e problemi devono essere affrontati affinché tali sistemi divengano una realtà operativa.

***mmWave e salute umana***

L'utilizzo di reti di TLC mobile operanti in bande mmW, porterà a dei cambiamenti che hanno cominciato ad allarmare l'opinione pubblica perché , tali cambiamenti, hanno il potenziale per aumentare la preoccupazione per l'esposizione degli esseri umani ai campi RF.

Le cause potenziali di tali preoccupazione sono:

- L'aumento del numero dei trasmettitori. Altre stazioni base (BS o AP), verranno dispiegate a causa della proliferazione del numero di celle (small cell) e dei dispositivi mobili. Questo aumenterà la possibilità di esposizione umana ai campi RF.
- Fasci più stretti (quindi con maggiore guadagno di antenna), saranno usati come soluzione alla maggiore attenuazione che si ha alle frequenza più elevate. Lunghezze d'onda molto piccole (dell'ordine di 1 cm e/o decine di mm per i segnali in onda millimetrica), combinate con i progressi realizzativi dei circuiti RF consentono di realizzare "array" composti da un numero molto grande di antenne miniaturizzate.

Questi sistemi di antenne multiple possono essere usati opportunamente da circuiti formatori di fascio per ottenere alti guadagni di antenna. Tale maggiore concentrazione di energia RF aumenterà il potenziale per penetrare più profondamente in un corpo umano. Per es., il calore prodotto da una sorgente RF a frequenza di 42,5 GHz è assorbito per una profondità di 0,41 mm di tessuto.

***Calcolo esposizione in downlink per 5G***

In bib. 1 si mette a confronto il livello di esposizione RF in un sistema 5G con quello di un sistema di comunicazioni cellulare (4G release 9).I parametri di entrambi i sistemi sono riepilogati in Tabella I.

Il modello di rete 5G è illustrato in fig 3 e consiste di 19 AP (access point) aventi ciascuno tre settori. La distanza inter-site (ISD) è di 200 m ed ogni settore ha attivi

30 utilizzatori (user equipments UE). Sono assunti, inoltre, i seguenti tre modelli di attenuazione di tratta: Rural Macro (RMa), Urban Macro (UMa), e Urban Micro (UMi). Vengono inoltre definiti , per ogni AP, dei pattern di antenna (verticali e orizzontali).
In un modello come la Release 9 [3], può essere usata una BS per fornire copertura e servizi, alle unità terminali UE (user equipment), su di una vasta area. Nello scenario 5G, la stessa area è coperta da un numero maggiore di AP distribuiti ,per fornire un risultato migliore e un servizio affidabile.

***Esposizione umana al campo RF***

I criteri di valutazione più usati per determinare gli effetti dell'esposizione umana ai campi e.m. a radio frequenza nello spettro mmW, sono il SAR (specific absorption rate) e il PD ( power density)
A tutt'oggi rimane dubbio quale metodo fra i due, sia più accurato.
Il SAR è una misura quantitativa che rappresenta il potere dissipato per massa corporea ed è misurato in watt (W) per chilogrammo ed è dato da:

$$SAR = \frac{P_d}{m} = \frac{\sigma E^2}{\rho}$$

- $P_d$ rappresenta la potenza dissipata nei tessuti in [W]
- m la massa di tessuto esposto in [Kg]
- $\rho$ densità della massa di tessuto in [Kg/m$^3$] ; $\sigma$ la conduttività in siemens/m [S/m]
- E valore quadratico medio (RMS) dell'intensità di campo elettrico in [V/m]

Il SAR varia a secondo del particolare tessuto del corpo umano interessato all'assorbimento a RF per cui sono necessari ulteriori studi sull'assorbimento alle frequenze millimetriche, da parte del tessuto umano ( si consideri che l'assorbimento a 28 GHz ha una profondità di penetrazione di1 – 2 mm) e nella definizione, fra gli altri, dei parametri $\sigma$ e $\rho$
La densità di potenza (PD) irradiata da un'antenna in condizione di campo lontano è data da:

$$PD = \frac{E_i^2}{\eta} = \frac{\eta}{H_i^2}$$

- Ei [V/m] e Hi [A/m] sono i valori quadratici medi (RMS) delle intensità, rispettivamente, del campo elettrico e del campo magnetico incidenti sulla superficie del tessuto umano
- $\eta[\Omega]$ impedenza dell'onda

PD è misurata in W/m$^2$ ed indica la misura della potenza dissipata per unità di superfice del tessuto umano. PD, in condizioni di campo lontano, può essere espressa da:

$$S_i = \frac{P_T\ G_T}{4\pi d^2}$$

$P_T$ potenza in trasmissione; $G_T$ guadagno del sistema di antenna trasmittente e d è la distanza dal trasmettitore.

***Valutazione dell'esposizione RF***

Nella successiva tabella vengono considerate le caratteristiche tecniche salienti dei due sistemi messi a confronto: 5G e rel- 9

TABELLA I [bib 1]

| Parameter | Value | |
|---|---|---|
| | 5G | Release 9 |
| Carrier frequency | 28 GHz | 1.9 GHz |
| System layout | RMa, UMa, UMi [18] | SMa, UMa, UMi [21] |
| Inter-site distance (ISD) | 200 m | 1,000 m |
| Cell sectorization | 3 sectors/site | 6 sectors/site |
| Bandwidth | 850 MHz | 20 MHz |
| Max antenna gain | 5 dBi per element | 17 dBi |
| Transmit power | 21 dBm per element | 43 dBm |
| AP's number of antennas ($\lambda/2$ array) | 8×8 and 16×16 | 4×4 |
| AP antenna height | 10 m | 32 m |
| Duplexing | Time-division duplexing (TDD) | |
| Transmission scheme | Singler-user (SU)-MIMO | |
| UE noise figure | 7 dB | |
| Temperature | 290 K | |

Per la determinazione dell'attenuazione di tratta (path loss), vengono assunti per il 5G i seguenti modelli : Rural macro cell (RMa), Urban macro cell (UMa) e Urban micro cell (Umi). Mentre per la release 9 i modelli di PL sono: Suburban Macro cell (SMa), UMa e Umi. I modelli di propaga-zione , insieme ai modelli di diagramma di antenna adottati , rispettivamente per il

5G e per la Rel-9,sono reperibili in bib. [2] e [3]. Come si vedrà più chiaramente nel grafico della potenza (fig 4), la propagazione dipende fortemente dal modello di propagazione adottato.

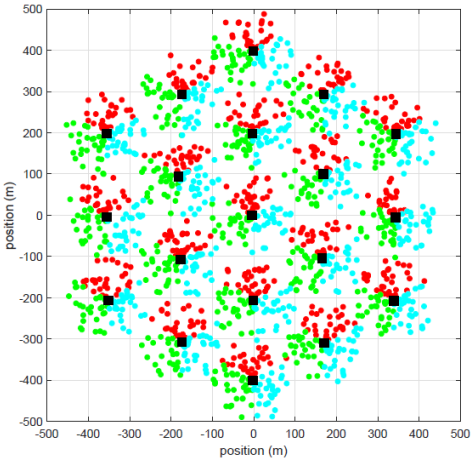


*Fig 3 Topologia 5G - 19 stazioni di base o AP (access point) con 3 settori e 30 UE (user equipment)* [bib 1]

La topologia di rete per la Release 9 consiste in una singola cella con raggio di 500 m con un ISD (inter-site distance) di 1000m.

Nelle successive figure 2 e 3 è illustrata la potenza in downlink ottenuta attraverso i modelli di attenuazione di tratta citati in TAB I.

E' chiaro che per il 5G, fig.4, più alto è il numero di elementi usati per il sistema di antenna (es. array composte da 8x8 o 16x16 elementi), tanto maggiore è la potenza del segnale ricevuto. Nella release 9 (fig.5), una stazione di base (BS), può coprire un'area anche maggiore di 1000 m. Nello scenario 5G la stessa area sarà coperto da un certo numero di small cell (a 28 GHz).

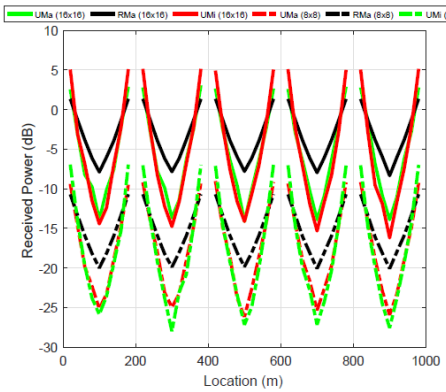


*Fig 4 Potenza ricevuta in ordinata vs distanza dell'utilizzatore dal centro della small cell 5G* [bib 1]

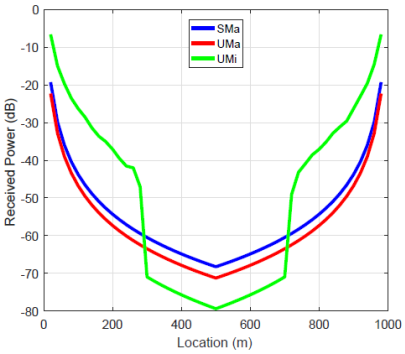


*Fig 5 Potenza del segnale ricevuto vs distanza dell'utilizzatore per il sistema rel- 9* [bib 1]

I fattori che maggiormente determinano il segnale, come detto, sono il modello di propagazione adottato e la conseguenza probabilità di collegamento diretto (Los line of sight probability).

La potenza ricevuta più alta nello scenario 5G, può essere spiegata dal più alto guadagno di antenna che un AP può ottenere adottando più complessi sistemi di antenna del tipo phased array.

Ad una distanza compresa in un intervallo di 100 m dall'AP si registrano valori medi delle emissioni 5G, 12-13 dB superiori ai corrispondenti valori di potenza per la rel-9.

Comparando la densità di potenza, fra 5G e rel- 9, tracciate in fig.6, la situazione risulta leggermente meno sfavorevole per il 5G nel caso in cui le due BS: 5G e rel-9, siano poste nello stesso sito e in un raggio di 100 m da esso .

A 50 m di distanza dalle BS si ha un valore più alto di $PD_{[W/m^2]}$ , per il $5G_{(16x16}$

array), di 10 dB rispetto al PD prodotto da rel-9 e una riduzione di circa 6 dB del PD 5G (8x8 array) rispetto a rel-9. Altro discorso se le BS sono installate in siti diversi.
A causa della maggiore distanza dell'antenna della rel-9, il valore di PD prodotto da quest'ultima è nettamente inferiore al PD della small cell 5G più vicina.

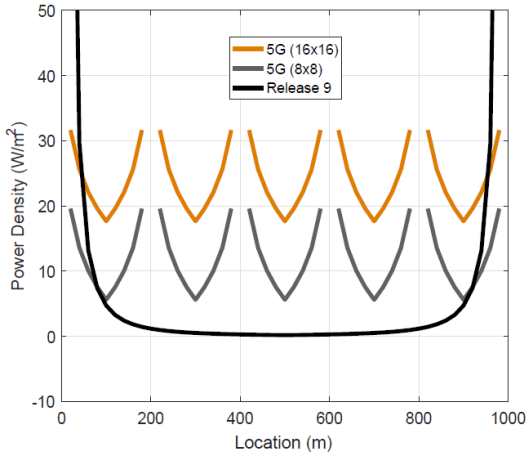


Fig 6 *Densità di potenza PD vs.posizione terminale di utente UE nel 5G e rel-9* [bib 1]

Partendo dalla considerazione che a causa della dimensione ridotta delle celle, nel 5G, l'utilizzatore è esposto per tempi più lunghi a densità di potenze elevate gli autori, in bib.1, fanno una comparazione con i valori di SAR anche in condizioni di far-field, a 28 GHz. Essi osservano che le linee guida ICNIRP [4] non prevedono limiti di esposizione SAR per frequenze superiori ai 10 GHz considerando il SAR, in condizioni far-field, non pericoloso.
La fig.7 mostra un significativo incremento del SAR nella tratta downlink del 5G rispetto alla Rel-9 anche in condizioni di propagazione di campo lontano

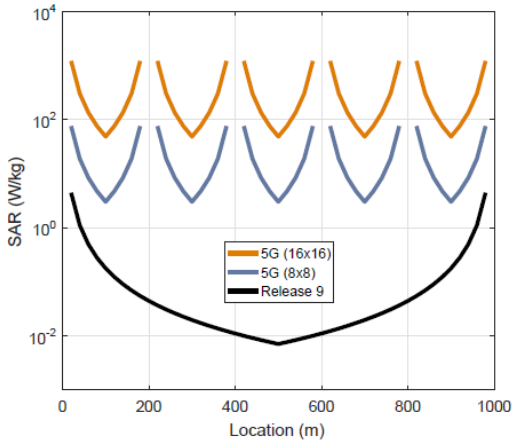


*Fig 7 - SAR vs posizione del terminale di utente* [bib 1]

***Conclusioni***

L'articolo descritto si propone di calcolare i livelli di esposizione in termini di PD e SAR per un sistema 5G mmWave (28 GHz) comparandoli ad un sistema 3GPP rel-9 (LTE/UMTS a 1,9 GHz).
Dai calcoli si riscontra un incremento sia del PD che del SAR a sfavore del 5G dovuto essenzialmente a due motivi

- Un numero maggiore di celle (small cell), nel caso del 5G
- Una più alta concentrazione di energia RF nel fascio di antenna in downlink dovuto all'uso di antenne phased array con molti elementi

Come detto in premessa, in successivi articoli si illustreranno le principali tecniche di mitigazione per l'esposizione RF.
Da notare comunque, che per il calcolo delle prestazioni del sistema si è usata la nota formula di Shannon-Hartley:

$$R = B\log_2(1+S/N)$$

Dove R è il data rate [bitps] e B larghezza di banda del canale [Hz].
Il rapporto segnale rumore S/N [rapporto tra potenze, non in decibel], è usato per determinare il data rate R del sistema.

Utilizzando questa relazione si riesce ad ottenere una capacità di trasmissione R che varia da 22 a 19 GBps (valore medio circa 20 GBps), in un cammino dalla small cell da 10m a 100 m da essa [bib1 fig.4 p.5], per il caso più sfavorevole in termini di esposizione RF che è il 5G, con path loss RMa e phased array 16x16.

Se si considera un data rate del sistema di 14 GBps (una riduzione rispetto al dato medio di calcolo, 20 Gbps, del 33%) si ottiene, applicando la formula inversa di Shannon-Hartley, un abbassamento del rapporto S/N di circa 20 dB (100 u.l.) che a parità di rumore, indicano una potenza ricevuta S inferiore ad un pari valore di 20 dB ancora sufficiente per avere un buon rapporto S/N.

## BIBLIOGRAFIA


[1] Imtiaz Nasim, Seungmo Kim "Human Exposure to RF Fields in 5G Downlink", nov 2017

[2] *3GPP; technical specification group radio access network; channel model for frequency spectrum above 6 GHz* (Release 14), 3GPP TR 38.900 v1.0.0, giu 2016.

[3] *3GPP; technical specification group radio access network; spatial channel model for multiple input multi output(MIMO) simulations (Release 9)*, 3GPP TR 25.996, v9.0.0 Dic. 2009

[4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "ICNIRP guidelines: for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*", vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998


## ACRONIMI e DEFINIZIONI

| | |
|---|---|
| Downlink | Collegamento radio tra stazione radio base (SRB) e terminale di utente (UE) |
| uplink | Collegamento radio da UE a SRB |
| UE | User equipment |
| BTS | Base Transceiver Station o BS ( SRB Stazione radio base in italiano) |
| AP | Access point |
| mmWave | Gamma di frequenze > 24 GHz *fonte qualcomm* |
| UMTS | "Universal Mobile Telecommunications System" standard di telefonia mobile cellulare 3G, evol. Del GSM |
| LTE | Long Term Evolution – quarta generazione (4G) per la trasmissione dei dati sulle reti cellulari, in continua evoluzione siamo attualmente alla release 14 del 3GPP |
| 5G | Quinta generazione della tecnologia cellulare con grandi incrementi nella velocità, mini latenza e banda larga. Attualmernte siamo alla release 15 del 3GPP |
| 3GPP | Il progetto di partnership terza generazione (3GPP) è una collaborazione tra gruppi di associazioni di standardizzazione nelle TLC, per definire degli standard che hanno riguardato il 3G (GSM) e che riguardano lo sviluppo e l'aggiornamento del 4G (LTE advanced) e del 5G. Gli standard 3GPP sono strutturati in Release |
| ITU | International Communication Union-organizzazione che si occupa di definire gli standard nelle telecomunicazioni e nell'uso delle onde radio |
| IMT 2020 | ITU-R (settore radio dell'ITU) ha avviato un programma per sviluppare "IMT per il 2020 e oltre", per la ricerca sul 5G affidandone l'elaborazione dello standard a 3GPP |
| IoT | Internet of Thing riferito all'estensione di Internet al mondo degli oggetti che diventano smart object con capacità di: identificazione, connessione, localizzazione, elaborazione dati e interazione con l'ambiente esterno |
| Phased-Array | Antenna costituita da più elementi radianti singoli (antenne), ciascuno alimentato |

| | |
|---|---|
| | con un segnale RF controllato tramite sfasatori in modo tale che le onde radio provenienti dalle antenne separate vengano sommate per aumentare la radiazione. Questo forma un raggio che punta in una direzione desiderata, mentre allo stesso tempo sopprime la radiazione in direzioni indesiderate. |
| Massive MIMO | Sistema di Antenna equipaggiato con un grandissimo numero di antenne (es.128x128), che servono simultaneamente utenti multipli. Con il MIMO massivo possono essere trasmessi messaggi multipli per vari terminali sulla stessa risorsa tempo-frequenza, massimizzando il guadagno di formazione dei fasci di segnali (beamforming) pur minimizzando l'interferenza |
| Small Cell | Si dividono in femtocell (fino a 20 m, pot.0,1 W) picocell (fino 200 m, pot. 1 W) e microcell (fino a 300 m, pot.5W) a 500 m) a seconda del loro raggio d'azione e di come vengono materialmente impiegate |
| eMBB | ITU-R ha individuato tre scenari d'uso per il 5G (IMT 2020): mMTC (Massive Machine Type Communication), eMBB (Enhanced Mobile Broadband), uRLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication) |
| Far-field | Il campo vicino (near field) e il campo lontano (far-field) sono regioni del campo e.m. attorno ad un'antenna trasmittente. I comportamenti non radiativi del campo vicino dei campi elettromagnetici dominano vicino all'antenna, mentre i comportamenti di "campo lontano" della radiazione elettromagnetica : propagazione per onda piana e i vettori **E** e **B** del campo elettrico e del campo magnetico fra loro perpendicolari, giacciono sul piano dell'onda, dominano a distanze maggiori. |