Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in
Ingegneria dell'Informazione

Valutazione dell'impatto delle reti 5G sulle politiche di radioprotezione

Relatore:
Prof. Marco Santagiustina

Laureando:
Francesco Rossato

Anno Accademico 2021/2022
Data di Laurea 19 luglio 2022

Abstract

Le reti di comunicazione di quinta generazione rappresentano un cambiamento sostanziale rispetto alle precedenti tecnologie 2G, 3G e 4G. Le novità introdotte sono molteplici, dall'occupazione di frequenze fino ad ora non impiegate nell'ambito della telefonia mobile, all'utilizzo di tecnologie che permettono di indirizzare la potenza erogata dalle stazioni radio base verso la posizione degli apparati connessi. Il presente elaborato si pone lo scopo di analizzare le normative correnti in materia di radioprotezione, focalizzando l'attenzione sulle nuove tecnologie utilizzate dalle reti 5G, e discutendo quanto i modelli di esposizione e i limiti attuali rappresentino una corretta metrica per la valutazione dell'impatto dell'installazione delle nuove stazioni radio base.

Alla famiglia ed agli amici
che mi hanno supportato e sopportato

Indice

1 Introduzione ai campi elettromagnetici **1**

1.1 Onde 1

1.1.1 Propagazione 2

1.1.2 Classificazione 2

1.2 Elettromagnetismo 3

1.3 Lo spettro elettromagnetico 5

2 Radioprotezione **9**

2.1 Radiazioni ionizzanti 10

2.2 Parametri di esposizione ai campi elettromagnetici 10

2.2.1 SAR 10

2.2.2 Intensità del campo elettrico 11

2.2.3 Power density 12

2.2.4 Misurazione dei valori 12

2.3 Limiti di esposizione standard 13

3 Rischio percepito **15**

3.1 Densificazione delle stazioni radio 16

3.2 Impiego delle frequenza mmWave 17

3.3 Coesistenza con le reti già presenti 19

3.4 Tecnologie beamforming 19

4 Approcci per minimizzare le esposizioni **22**

4.1 Emissioni dal dispositivo 22

4.2 Modifiche infrastrutturali 23

4.2.1 Superfici attive 24

4.3 Specializzazione 26

4.4 Planning di rete 27

4.4.1 Offloading 28

5 Conclusioni **30**

Bibliografia **32**

Capitolo 1

Introduzione ai campi elettromagnetici

Il rapporto dell'uomo con i campi magnetici ha origini antichissime, basti pensare che le prime osservazioni di questa misteriosa forza in grado di attrarre e repellere alcuni frammenti di roccia e di ferro risalgono circa all'800 a.C. nel periodo dell'antica Grecia. A partire dal tredicesimo secolo si incominciò a studiarne l'andamento in maniera più approfondita, definendo il concetto di linee di campo, polo nord e polo sud del magnete e osservando l'interazione tra i poli di più magneti. [1]

Al fine di poter comprendere gli studi e gli effetti dei campi elettromagnetici sulla salute, è prima necessario introdurre i concetti di onda, di campo elettrico e campo magnetico, e comprendere come questi ultimi siano fortemente legati tra di loro. In questo capitolo si descrivono sinteticamente alcuni importanti risultati derivati dallo studio delle onde.

1.1 Onde

Definizione 1.1 (Onda (fisica))**.** Perturbazione che nasce da una sorgente e si propaga nel tempo e nello spazio, trasportando energia e quantità di moto, senza comportare un associato spostamento di materia. [18]

Alcuni esempi di onde sono le vibrazioni sulle corde in tensione di una chitarra, le increspature che si generano a seguito di un lancio di un sasso in una pozza d'acqua, o, come discusso in questo elaborato, le onde elettromagnetiche.

1.1.1 Propagazione

La propagazione delle onde è descritta dall'equazione differenziale di D'Alembert, detta anche equazione delle onde piane:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{1.1}$$

Si noti che tale relazione è reciproca, ovvero le onde obbediscono a tale equazione, e al contempo quando nella descrizione di un fenomeno si giunge a tale equazione, ciò implica che il sistema descrive la propagazione di un'onda. [2]

Ai fini di questa trattazione, risulta di particolare rilievo la classe di onde dette *armoniche*:

Definizione 1.2 (Onda armonica)**.** Onda descritta da una funzione sinusoidale del tipo

$$y(x,t) = A\cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \tag{1.2}$$

Si possono individuare alcuni parametri utili a descrivere l'onda, nella fattispecie:

- A: ampiezza dell'onda;
- $T\,[s]$: periodo temporale;
- $f = \frac{1}{T}\,[Hz]$: frequenza;
- $\frac{2\pi}{T} = \omega\left[\frac{rad}{s}\right]$: pulsazione;
- $\lambda = \frac{v}{f}\,[m]$: lunghezza d'onda;
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}\,[m^{-1}]$: numero d'onda.

É interessante notare come un'onda siffatta non porti con sé alcuna informazione, infatti, per A e k fissati, il suo comportamento è noto per ogni istante temporale e per ogni valore di x.

1.1.2 Classificazione

Dati i molti parametri, possiamo operare alcune classificazioni delle onde così come viste fin'ora.

Prendendo in considerazione la deformazione del mezzo e la direzione di propagazione, è possibile operarne una classificazione in:

- **Onde trasversali**, nelle quali la deformazione avviene perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda. Fanno parte di questa categoria, ad esempio, le onde ottenute dal lancio di un sasso in acqua e le onde elettromagnetiche.

- **Onde longitudinali**, nelle quali la deformazione avviene parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda. Fanno parte di questa categoria, ad esempio, le onde sonore, onde di pressione all'interno di un gas, o le onde di compressione e rilassamento che si propagano in una molla in direzione del suo asse.

Considerando invece il fronte d'onda, definito come la superficie sulla quale la deformazione assume lo stesso valore, si può operare un'ulteriore classificazione:

- **Onde piane**, nelle quali i fronti d'onda sono infiniti piani perpendicolari alla direzione di propagazione.

- **Onde circolari**, nelle quali i fronti d'onda sono infinite circonferenze concentriche al punto di origine dell'onda.

- **Onde cilindriche**, nelle quali i fronti d'onda sono infiniti cilindri coassiali a una retta in cui è avvenuta la perturbazione generatrice dell'onda.

- **Onde sferiche**, nelle quali i fronti d'onda sono infinite sfere aventi centro nell'origine dell'onda.

1.2 Elettromagnetismo

Definizione 1.3 (Campo elettrico)**.** Campo vettoriale di forza generato dalla presenza di una o più cariche elettriche o di un campo magnetico variabile nel tempo.

Definizione 1.4 (Campo magnetico)**.** Campo vettoriale solenoidale di forze generato dal moto di una carica o da un campo elettrico variabile nel tempo.

Come si può osservare, le due definizioni sono fortemente legate tra di loro; per poter dimostrare il legame che esiste tra campo elettrico e campo magnetico occorre ricorrere alle equazioni di Maxwell, fisico e matematico scozzese vissuto nel periodo 1831-1879, che riassumono i risultati ottenuti nello studio del magnetismo da fisici e matematici quali Gauss, Faraday e Ampere.

	Forma differenziale	Forma integrale
Legge di Gauss per il campo elettrico	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint_A \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$
Legge di Gauss per il campo magnetico	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_\gamma \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$
Legge di Faraday per l'induzione	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_A \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0$
Legge di Ampere-Maxwell	$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\oint_\gamma \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Tabella 1.1: Equazioni di Maxwell

Tramite alcuni passaggi matematici, nella fattispecie mediante il calcolo del rotore del rotore dei campi elettrico e magnetico, si ottengono le cosiddette equazioni di D'Alembert in tre dimensioni:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \end{cases} \tag{1.3}$$

La denominazione delle suddette equazioni deriva dalla possibilità di scomporle in tre equazioni differenziali per il campo elettrico (componenti E_x, E_y, E_z) e tre equazioni differenziali per il campo magnetico (componenti B_x, B_y, B_z). La contemporanea esistenza di tutte e sei le componenti indica che la presenza di un campo elettrico variabile nel tempo implica necessariamente l'esistenza di un campo magnetico, e viceversa, l'esistenza di un campo magnetico variabile nel tempo implica necessariamente l'esistenza di un campo magnetico. Si parla dunque di campo elettromagnetico. [2]

La velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica è funzione del mezzo in cui si propaga

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \tag{1.4}$$

ove ϵ e μ, chiamati rispettivamente permeabilità elettrica e permeabilità magnetica, sono parametri caratteristici del mezzo.

La densità di energia dell'onda può essere vista come somma delle densità di energia del campo elettrico e del campo magnetico associati, come in 1.5, dalla quale, utilizzando che $E = cB = B/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, si ricava la 1.6.

$$u(x,t) = u_E + u_B = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0}B^2. \tag{1.5}$$

$$u(x,t) = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0} \tag{1.6}$$

Alternativamente, sfruttando i principi della meccanica quantistica, è possibile vedere l'onda elettromagnetica come insieme di fotoni, ognuno avente energia proporzionale alla frequenza come descritto dall'equazione di Planck-Einstein:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{1.7}$$

ove c_0 è la velocità della luce nel vuoto, c la velocità della luce nel mezzo, h è la costante di Planck ed $\sqrt{\mu_r \epsilon_r} = n$ è l'indice di rifrazione del mezzo nel quale l'onda si propaga. [1]

1.3 Lo spettro elettromagnetico

Ogni onda è caratterizzata dalla frequenza alla quale oscilla, e l'insieme delle possibili frequenze della radiazione elettromagnetica è detto spettro elettromagnetico. Lo spettro elettromagnetico viene convenzionamente suddiviso in diverse bande di frequenza aventi diverse denominazioni, come in Tab. 1.2.

Un'ulteriore suddivisione, di particolare interesse ai fini dello studio della radioprotezione, viene operata sulla base dell'energia dell'onda elettromagnetica, che porta alla discriminazione tra radiazioni ionizzanti e radiazioni non ionizzanti. Viene definita ionizzante un'onda o una particella che possegga sufficiente energia per ionizzare atomi o molecole, essendo dunque in grado di strappare elettroni dagli orbitali. Rientrano in questa categoria le bande dello spettro elettromagnetico dei raggi gamma, dei raggi x e parte dell'ultravioletto a frequenza più elevata, mentre le frequenze più basse rientrano nella categoria delle radiazioni non ionizzanti. Non esiste un confine preciso e ben definito tra le due regioni, in quanto a elementi diversi corrispondono differenti livelli di energia di ionizzazione.

L'utilizzo dello spettro elettromagnetico è regolato dai governi e dalle autorità preposte alla normazione delle telecomunicazioni mediante allocazione di specifici intervalli di frequenza a determinati scopi, che variano dall'uso per radiocomunicazioni amatoriali all'aviazione, a scopi militari.

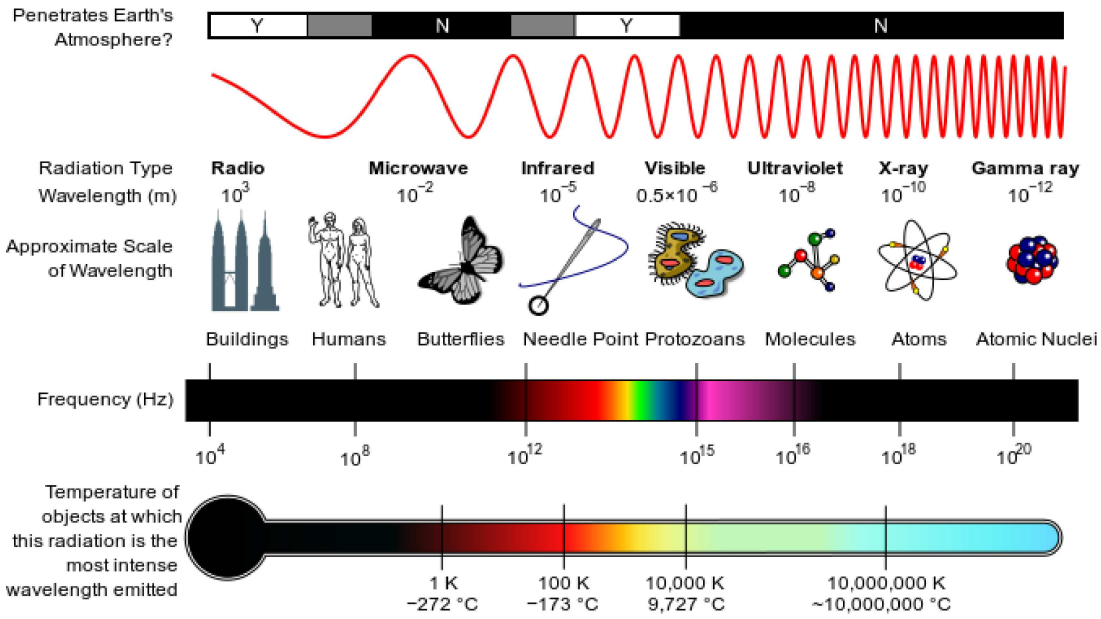


Figura 1.1: Lo spettro elettromagnetico

A titolo di esempio in Fig. 1.2 viene mostrata la suddivisione dello spettro operata negli Stati Uniti. Si può osservare come la quasi totalità delle frequenze utilizzabili sia allocata per un qualche scopo, da cui segue la necessità di farne un utilizzo il più efficiente possibile.

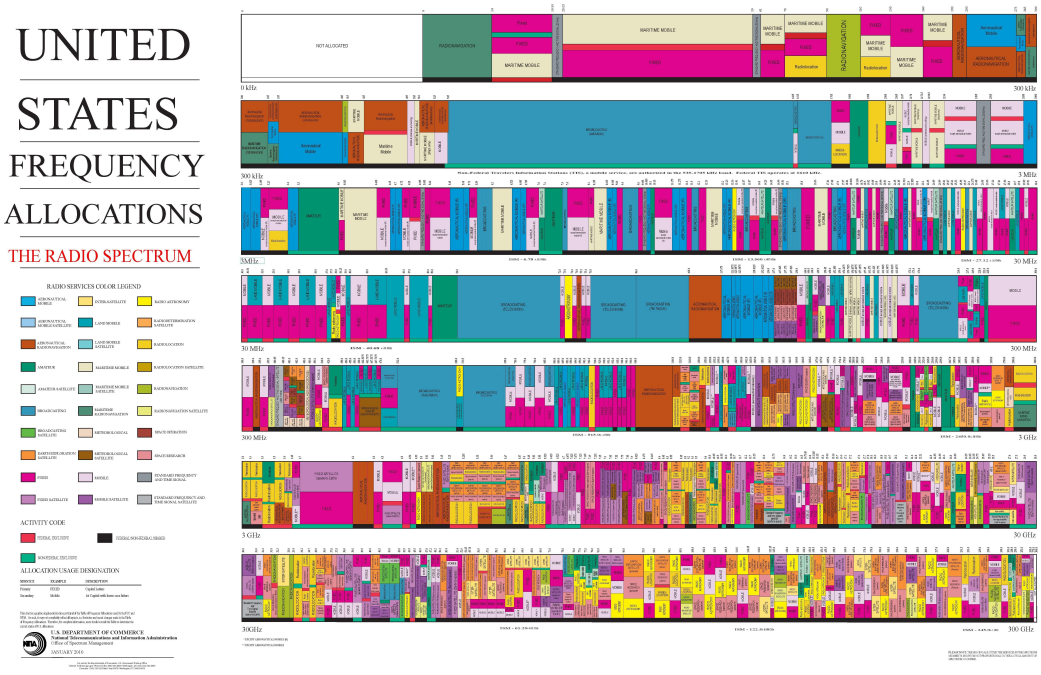


Figura 1.2: Allocazione dello spettro negli Stati Uniti

	Class	λ (inizio banda)	f (inizio banda)
γ	Gamma rays	1 pm	300 EHz
HX	Hard X-rays	10 pm	30 EHz
SX	Soft X-rays	100 pm	3 EHz
		1 nm	300 PHz
EUV	Extreme UV	10 nm	30 PHz
NUV	Near UV, visible	1 μ m	300 THz
NIR	Near infrared	10 μ m	30 THz
MIR	Mid infrared	100 μ m	3 THz
FIR	Far infrared	1 mm	300 GHz
EHF	Extremely HF	1 cm	30 GHz
SHF	Super HF	1 dm	3 GHz
UHF	Ultra HF	1 m	300 MHz
VHF	Very HF	10 m	30 MHz
HF	High Frequency	100 m	3 MHz
MF	Medium Frequency	1 km	300 kHz
LF	Low Frequency	10 km	30 kHz
VLF	Very LF	100 km	3 kHz
ULF	Ultra LF	1 Mm	300 Hz
SLF	Super LF	10 Mm	30 Hz
ELF	Extremely LF	100 Mm	3 Hz

Tabella 1.2: Denominazione delle bande di frequenza

Capitolo 2

Radioprotezione

Nonostante le interazioni dell'uomo con i campi magnetici di origine naturale siano sempre esistite, si pensi come esempio al campo magnetico terrestre, la generazione artificiale di campi elettromagnetici per scopi di telecomunicazione è decisamente più recente. Mentre la pericolosità per la salute delle radiazioni classificate come ionizzanti è ben dimostrata da numerosi studi, gli eventuali effetti a lungo termine che possono avere le radiazioni elettromagnetiche a minor energia, non ionizzanti, sono largamente dibattuti, con un'ampia letteratura scientifica che racchiude conclusioni non concordi tra loro.

Le principali problematiche che affliggono gli studi in materia sono la difficoltà di poter replicare le sperimentazioni mantenendo condizioni simili a causa della grande varietà di fattori in gioco, l'elevato costo e l'impossibilità di misurare precisamente la penetrazione del campo elettromagnetico all'interno degli organismi senza ricorrere all'uso di manichini e modelli artificiali.

In questo capitolo verranno presi in considerazione i parametri fondamentali della radioprotezione e verranno raccolti i principali standard normativi, nonchè i limiti imposti dalle diverse regolamentazioni in vigore. Verrà posta particolare attenzione alle radiazioni non ionizzanti, in quanto le tecnologie di telecomunicazione operano in questo range di frequenze.

La definizione formale del concetto di radioprotezione data dall'IAEA, *International Atomic Energy Association*, è la seguente:

Definizione 2.1 (Radioprotezione)**.** La protezione delle persone dagli effetti dannosi derivanti all'esposizione alle radiazioni, e i mezzi per ottenere tale protezione.

Come si può notare, la definizione è applicabile sia alle radiazioni ionizzanti che non ionizzanti, in quanto non ne viene specificata la natura.

2.1 Radiazioni ionizzanti

L'*International Commission on Radiological Protection*, ICRP, ha redatto una regolamentazione che stabilisce una serie di principi riguardanti l'esposizione dell'uomo alle radiazioni ionizzanti basati su tre presupposti fondamentali [4]:

- **Giustificazione**: Non è permessa l'esposizione senza valido motivo a radiazioni ionizzanti, i vantaggi derivanti dall'esposizione devono essere maggiori dei rischi da questa derivanti.
- **Limitazione**: Gli individui esposti alla radiazione devono essere protetti dai rischi elevati mediante applicazione di limiti alla dose di esposizione.
- **Ottimizzazione**: la probabilità di incorrere in esposizione alle radiazioni, il numero di persone coinvolte e l'entità dell'esposizione derivante devono essere mantenuti ai valori più bassi possibile.

L'elevata energia delle radiazioni ionizzanti le rende in grado di apportare modifiche alla struttura genetica degli organismi, con provati effetti cancerogeni [3].

In questo elaborato l'attenzione verrà posta sui campi elettromagnetici utilizzati prevalentemente per la trasmissione di informazioni, dunque sino alla frequenza di circa 300GHz, nella parte inferiore dello spettro ove risiedono le radiazioni non ionizzanti. Non si considera lo studio delle radiazioni ionizzanti.

2.2 Parametri di esposizione ai campi elettromagnetici

Al fine di poter studiare gli effetti dei campi elettromagnetici sul corpo umano, è necessario definire alcuni parametri utili a quantificare l'esposizione.

2.2.1 SAR

Come si può notare dalla Fig. 1.2, che descrive l'utilizzo dello spettro di frequenze, gli utilizzi delle onde elettromagnetiche sono estremamente vasti, e coprono

svariati ambiti. Con la crescente pervasività di apparecchi in grado di radiocomunicare sia in trasmissione che in ricezione, si rende necessario un modo per quantificare la potenza elettromagnetica che viene assorbita dai tessuti del corpo umano. A questo scopo è stato definito il SAR, acronimo di *Specific Absorption Rate*.

Definizione 2.2 (SAR)**.** Tasso di assorbimento specifico, *specific absorption rate*: grandezza che misura la quantità di radiazione assorbita dal corpo umano quando viene esposto ad un campo elettromagnetico. [5]

Il SAR su di un certo volume V viene definito come potenza assorbita per unità di massa di tessuto e viene misurato in $[W/Kg]$, descritto dall'equazione

$$SAR_V = \frac{\int_V \sigma_{eq}(\vec{r})|E(\vec{r})|^2\, dV}{\int_V \rho_m(\vec{r})\, dV} \left[\frac{W}{Kg}\right] \tag{2.1}$$

ove σ denota la conduttività del tessuto biologico, ρ la densità, mentre E rappresenta l'intensità del campo elettrico misurato.

Per ragioni pratiche solitamente il valore di SAR viene mediato su volumi standard, definendo valori come:

- SAR_{1g}: SAR mediato su un volume di massa $1g$.
- SAR_{10g}: SAR mediato su un volume di massa $10g$.
- SAR_H: SAR valutato su un modello della testa.
- SAR_{WB}: SAR valutato su un modello di tutto il corpo.

2.2.2 Intensità del campo elettrico

Il campo elettromagnetico generato dalle stazioni radio base è composto da una componente di campo elettrico e da una componente di campo magnetico, come in Sez. 1.2, rispettivamente $\vec{E}$ ed $\vec{H}$. In condizioni di campo lontano, ovvero per distanze dall'antenna superiori a $d_f = 2D^2/\lambda$, ove D denota il diametro o la lunghezza dell'antenna, il campo elettromagnetico può essere approssimato mediante lo studio della sola componente $\vec{E}$. La risultante formula per il calcolo del campo elettrico root mean square in un volume V risulta essere

$$E_V = \sqrt{\frac{1}{V}\int_V |\vec{E}|^2 dV} \left[\frac{V}{m}\right] \tag{2.2}$$

Diverse regolamentazioni impongono degli standard e delle limitazioni all'esposizione indicando come parametro proprio l'intensità del campo elettrico.

2.2.3 Power density

Un'altra metrica utilizzata dalle regolamentazioni per definire i limiti di esposizione ai campi elettromagnetici è la densità di potenza, che può essere espressa come densità incidente o densità assorbita. In condizioni di campo lontano, la densità di potenza incidente è data da

$$S_i = \frac{|\vec{E}|^2}{2Z} \left[\frac{W}{m^2}\right] \tag{2.3}$$

ove $Z = 376.7\Omega$ è detta impedenza caratteristica del vuoto.

La densità di potenza assorbita è legata alla densità incidente dal coefficiente di riflessione Γ, che indica la frazione di potenza che viene riflessa dal corpo e dipende dalle caratteristiche del tessuto.

$$S_{ab} = (1- \mid \Gamma \mid^2)S_{inc} \tag{2.4}$$

Risultati più precisi si ottengono integrando volumetricamente le funzioni campo elettrico e campo magnetico all'interno del corpo umano, ma il processo è complicato a causa della molteplicità di differenti tessuti.

2.2.4 Misurazione dei valori

Con l'aumentare della frequenza i valori di SAR divengono più difficili da calcolare in quanto la penetrazione è superficiale ed il calore generato dall'esposizione alle radiofrequenze è rapidamente disperso nell'ambiente e dal naturale sistema di termoregolazione del corpo, come dimostrato nelle linee guida pubblicate dall'ICNIRP [7].

Per le alte frequenze, dunque, si preferisce lavorare con la densità di potenza incidente precedentemente definita.

La maggior parte delle regolamentazioni definisce dunque una frequenza di soglia dopo la quale i limiti di esposizione commutano da valori SAR o espressi in intensità del campo elettrico a valori di densità di potenza, frequenza che tipicamente si aggira intorno a valori di 2-3GHz a seconda della regolamentazione in oggetto.

2.3 Limiti di esposizione standard

Un effetto provato e noto derivante dall'esposizione alle onde elettromagnetiche è il riscaldamento dei tessuti coinvolti.

La composizione dei tessuti biologici è prevalentemente di acqua, che presenta dei dipoli elettrici al suo interno. Ciò fa sì che la presenza di campi elettromagnetici variabili nel tempo con frequenze nell'intervallo di $100KHz \sim 300GHz$ causi uno stato di agitazione dei dipoli, i quali si riscaldano. Questo fenomeno è noto come riscaldamento dielettrico, e si somma al riscaldamento derivato dalle correnti indotte dal campo magnetico variabile [3].

Affinché questi effetti di natura termica risultino dannosi alla salute, è necessario che provochino un innalzamento della temperatura oltre il quale il corpo non è più in grado di dissipare il calore aggiuntivo, provocando reazioni sia temporanee che permanenti e potendo anche causare danni irreversibili.

Al fine di prevenire l'insorgere di problematiche di questo tipo, sono stati fissati in maniera conservativa dei limiti all'intensità dei campi elettromagnetici nelle zone frequentate dalla popolazione. In particolare, tre differenti enti hanno contribuito a definire quelli che ad oggi sono gli standard normativi più diffusi:

- **ICNIRP**: International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, organizzazione indipendente che si occupa di raccogliere i risultati degli studi sulla radioprotezione e formulare delle linee guida in materia di limiti all'esposizione, delle quali nel 2020 è stata pubblicata l'ultima revisione [7].

- **IEEE**: Institute of Electrical and Electronic Engineers, nel 2019 ha pubblicato uno standard per la definizione di limiti all'esposizione ai campi elettromagnetici a radiofrequenza [8].

- **FCC**: Federal Communications Commission, agenzia governativa statunitense che si occupa della regolamentazione dell'utilizzo dello spettro elettromagnetico. Nel 1997 ha pubblicato un insieme di limiti all'esposizione [9].

I tre principali standard descritti sono sinteticamente riassunti in Tab. 2.1 e Tab. 2.2, che indicano rispettivamente i limiti espressi in termini di intensità del campo elettrico e power density.

Vengono infine elencati in Fig. 2.1 a titolo esemplificativo i limiti in vigore in alcuni stati del mondo. Si noti come molti di questi adottino misure più restrittive degli standard precedentemente esposti.

ICNIRP 2020	IEEE 2019	FCC 1997
$27.7[V/m]$ $f \in [30, 400]MHz$	$27.5[V/m]$ $f \in [30, 400]MHz$	$27.5[V/m]$ $f \in [30, 300]MHz$
$1.375f^{0.5}[V/m]$ $f \in [0.4, 2]GHz$ Limite in power density $f \in [2, 300]GHz$	Limite in power density $f > 400MHz$	Limite in power density $f > 300MHz$

Tabella 2.1: Principali limiti di esposizione espressi in termini di campo elettrico

ICNIRP 2020 IEEE 2019	FCC 1997
$2[W/m^2]$ per $f \in [30, 400]MHz$	$2[W/m^2]$ per $f \in [30, 300]MHz$
$f/100[W/m^2]$ per $f \in [0.4, 2]GHz$	$f/150[W/m^2]$ per $f \in [0.3, 1.5]GHz$
$10[W/m^2]$ per $f \in [2, 300]GHz$	$10[W/m^2]$ per $f \in [1.5, 100]GHz$

Tabella 2.2: Principali limiti di esposizione espressi in termini di power density

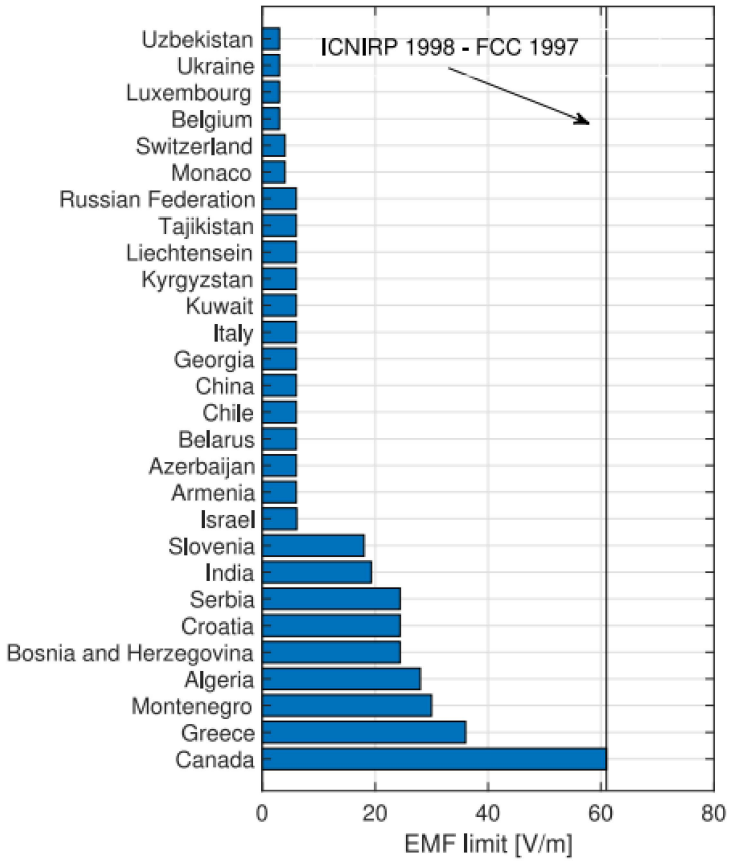


Figura 2.1: Limiti di esposizione nel mondo [17]

Capitolo 3

Rischio percepito

La possibile pericolosità derivante dall'esposizione ad elevati livelli di campi elettromagnetici è riconosciuta dalla comunità scientifica, e la IARC, *International Agency for Research on Cancer*, considera i campi elettromagnetici a radiofrequenza (RF-EMF) come "possibilmente cancerogeni per gli esseri umani". Proprio per questo motivo, negli anni sono state definite diverse regolamentazioni atte a limitare l'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici.

Un grande ostacolo all'adozione diffusa della tecnologia 5G è rappresentato dalla percezione di un rischio da parte della popolazione, in alcuni casi sfociato in veri e propri atti di sabotaggio come, ad esempio, l'incendio doloso di antenne e stazioni radio delle reti di quinta generazione, fino a spingersi a legare il 5G alla diffusione del virus SARS-CoV-2 [19] [20] [21].

In questo capitolo, verranno evidenziate le principali novità delle reti di quinta generazione, concentrando in particolare l'attenzione sulle caratteristiche che sono maggiormente viste come potenzialmente dannose dalla popolazione. In particolare:

- Aumento del numero di stazioni radio base 5G
- Impiego di frequenze *mmWave*
- Coesistenza con reti legacy già presenti nel territorio
- Adozione di tecnologie beamforming

3.1 Densificazione delle stazioni radio

Effetti causati dalle stazioni radio La comparsa nel territorio di stazioni radio base 5G in numero sempre maggiore è sicuramente uno dei fattori che più desta preoccupazione. La proliferazione di apparati radio viene comunemente associata dalla popolazione ad una più elevata esposizione ai campi elettromagnetici e di conseguenza un maggior rischio per la salute.

L'andamento dell'esposizione in funzione del numero di stazioni nel territorio è stato investigato in [10], ove è stato tuttavia dimostrato il fenomeno contrario, ovvero che un maggior numero di stazioni radio permette di garantire un servizio equivalentemente prestante riducendo l'esposizione globale ai campi elettromagnetici. Lo studio ha posto come obiettivo la garanzia di un valore minimo di potenza ricevuta dai terminali nella zona da coprire con la rete, valutando poi diversi scenari nei quali si va aumentando il numero di stazioni radio, configurandole in modo tale da soddisfare il requisito sulla potenza in tutta l'area presa in considerazione.

Da un punto di vista intuitivo, coprire un vasto territorio con una singola antenna implica il dover irradiare una potenza elevata al fine di riuscire a garantire una ricezione accettabile del segnale anche nelle zone periferiche, originando così zone di elevata esposizione in prossimità dell'antenna e zone con esposizione minore ai margini della cella. Impiegando invece un numero maggiore di antenne distribuite sul territorio è possibile diminuire la potenza irradiata dalle singole stazioni, garantendo una copertura e dunque un'esposizione ai campi elettromagnetici più uniforme, senza che vi siano zone di elevata concentrazione.

Le normative in vigore che pongono dei limiti alla densificazione imponendo una distanza minima tra le stazioni radio, se a una prima analisi possono sembrare utili a ridurre l'esposizione a radiofrequenze, di fronte ad uno studio più approfondito risultano avere l'effetto opposto di quello desiderato.

Effetti causati dal dispositivo Finora è stato preso in considerazione il comportamento dei campi originati dalle stazioni radio base, ma la maggior parte delle emissioni di radiofrequenze alle quali l'utente viene sottoposto è in realtà originata dal proprio apparato mobile, in quanto si tratta dell'emittente più prossima al corpo della persona. Le stazioni radio base, sebbene emettano con potenza più elevata rispetto al cellulare, si trovano a distanza molto maggiore, ed il campo elettromagnetico emesso arriva all'utente fortemente attenuato. [5].

Nello scenario con la presenza nel territorio di poche antenne, la distanza media tra l'apparato utente e la stazione radio aumenta, ed aumenta la probabilità che tra i due vi sia l'interposizione di ostacoli come edifici e vegetazione che impediscono la condizione di line of sight. In questo scenario, per poter comunicare con la stazione radio base, l'apparato mobile necessita di trasmettere con più potenza affinchè il suo segnale possa essere ricevuto a maggior distanza, aumentando ulteriormente l'esposizione per l'utente, degradando le prestazioni della connessione e diminuendo l'efficienza energetica.

Nello scenario in cui la disposizione delle antenne nel territorio è più fitta, la distanza media tra un apparato utente e la stazione radio base più vicina diventa minore, e la probabilità di riuscire a stabilire un link in condizione di line of sight aumenta, permettendo l'impiego di una minor potenza in trasmissione ed aumentando l'efficienza energetica. [11].

3.2 Impiego delle frequenza mmWave

Bande del 5G Lo spettro superiore ai 10GHz che il 5G si pone di utilizzare ricoprirà un ruolo chiave al fine di soddisfare i sempre crescenti volumi di traffico richiesti dai continui sviluppi tecnologici. Si pensi ad esempio alle automobili a guida autonoma, alla quantità di dati che già ora generano e alle potenzialità fornite da una connessione ad alta velocità e bassa latenza come il 5G nell'ottica delle comunicazioni vehicle to vehicle. [12]

A differenza delle tecnologie 2-3-4G, ognuna legata ad un preciso set di frequenze, il 5G si estende su diverse possibili bande di frequenze, nella fattispecie:

- **sub-GHz**: 694-790MHz, presenta un bitrate basso ma è in grado di garantire un'ampia copertura, pensata principalmente per il traffico generato da dispositivi IoT e per il traffico voce.

- **sub-6**: 1-6GHz, pensata per il traffico dati con protocolli e tecnologie in grado di garantire velocità superiori all'attuale 4G, sarà maggiormente utilizzata dagli smartphone per la normale connettività di rete.

- **mmWave**: 24GHz, dette onde millimetriche, che garantiscono un'elevata velocità e la possibilità di connettere un gran numero di utenze a scapito di una più scarsa copertura.

Le frequenze nelle bande sub-GHz e sub-6 sono già in uso dalle correnti tecnologie 2-3-4G e coperte da numerosi studi sui possibili effetti sulla salute. La preoc-

cupazione della popolazione è pertanto volta principalmente alla banda mmWave che fa uso di frequenze relativamente "nuove" nell'ambito delle reti cellulari.

Spessore di penetrazione e coefficiente di riflessione Due metriche utili a caratterizzare l'impatto delle frequenze della banda *mmWave* sull'esposizione ai campi elettromagnetici sono lo spessore di penetrazione e il coefficiente di riflessione. In particolare, nelle bande utilizzate dal 5G,

- **GHz range**: Il corpo umano viene penetrato per la maggior parte, e il coefficiente di riflessione è pari a circa il 50%.
- **decine di GHz**: Lo spessore di penetrazione è molto ridotto e il campo elettromagnetico non raggiunge gli organi interni, dissipando la sua energia sulla pelle.

Si può notare come lo spessore di penetrazione diminuisca considerevolmente all'aumentare della frequenza, le onde millimetriche riescono dunque a penetrare nel corpo relativamente poco, venendo bloccate già dagli strati di cute più esterni, evitando così il problema del riscaldamento dei tessuti interni che invece caratterizza le onde a più bassa frequenza [3].

Antenne mmWave La formula di Friis per la trasmissione in spazio libero

$$a_{ch} = \frac{(4\pi d/\lambda)^2}{g_{ant,rx} g_{ant,tx}} \tag{3.1}$$

che descrive l'attenuazione in funzione di distanza d, lunghezza d'onda λ e guadagni delle antenne, mostra come l'attenuazione aumenti quadraticamente all'aumentare della frequenza, e ostacoli che per frequenze nella banda sub-6 erano facilmente attraversabili, come ad esempio la vegetazione, ora rappresentano un impedimento non indifferente. In virtù di ciò, coprire un vasto territorio con un numero limitato di antenne *mmWave* risulta infattibile a causa dell'elevatissima potenza di trasmissione che un approccio del genere richiederebbe. Gli operatori 5G opteranno quindi per l'installazione di microcelle in prossimità dei cosiddetti hot spot, ovvero le zone nelle quali per fattori di diversa natura si concentra un numero di utenti elevato (ad esempio terminal aeroportuali, grandi stazioni, stadi), garantendo così un'esposizione più uniforme senza zone di picco, condizione positiva come già discusso in Sez. 3.1.

3.3 Coesistenza con le reti già presenti

La coesistenza delle reti 5G con le precedenti tecnologie di telecomunicazione 2-3-4G è necessaria, almeno in un primo momento, per il mantenimento delle funzionalità degli apparati che non supportano il nuovo standard e che non possono essere facilmente aggiornati. Si pensi ad esempio agli impianti di allarme più datati connessi alla rete cellulare mediante schede 2G, o ai telefoni cellulari ancora dotati di sola comunicazione 2G.

Situazione nei centri cittadini Il problema della contemporanea presenza di più tecnologie di rete diventa rilevante in alcuni scenari ove l'esposizione ai campi elettromagnetici generati dalle antenne di telefonia è già prossima al limite di legge, come accade nelle zone centrali delle città più densamente popolate, dove vi sono molteplici operatori telefonici ognuno con più antenne per supportare le differenti tecnologie. A causa dell'adozione in Italia di limiti di legge più stringenti rispetto alle direttive ICNIRP e FCC, con l'obiettivo di non superare i 6V/m nelle zone frequentate e nei luoghi ove vi sia un abituale stazionamento di persone [22], l'installazione di nuovi apparati radio viene di fatto resa impossibile in quanto violerebbero il limite posto dalla legge.

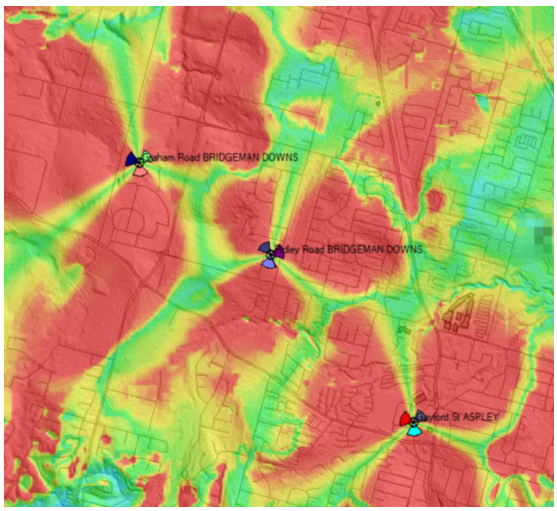
Diversi studi hanno dimostrato come i livelli di esposizione a radiofrequenze siano aumentati negli ultimi anni proprio a causa dell'installazione di stazioni radio base per le nuove reti di comunicazione, senza dismettere le tecnologie precedenti, ponendo una limitazione agli sviluppi tecnologici futuri del settore.

3.4 Tecnologie beamforming

Rispetto alle tecnologie precedenti, le stazioni radio base 5G presentano antenne con un numero maggiore di elementi ed una potenza tendenzialmente maggiore, contribuendo ad aggravare la percezione del rischio da parte del pubblico.

Beamforming Come si può notare in Fig. 3.1a, le stazioni radio base 4G tendono a formare dei lobi di area piuttosto vasta nei quali viene irradiato il segnale. Le stazioni radio base prese in considerazione sono del tipo mostrato in Fig. 3.1b, ognuna con antenne disposte lungo i lati di un triangolo, come si può evincere dalla presenza di tre lobi distinti di colore rosso per ogni stazione.

Questa tipologia di configurazione comporta un'esposizione ai campi elettromagnetici superflua anche in condizioni di pochi utenti collegati al servizio, in



(a) Segnale emesso da una stazione radio base 4G - R-Spectrum

(b) Stazione radio base 4G - Airpluxtech

Figura 3.1: Heatmap di copertura e stazione radio base 4G

quanto le antenne così progettate non hanno capacità di direzionare il segnale verso le zone dove viene effettivamente richiesto, provocando un dispendio inutile di potenza e conseguentemente un'esposizione non necessaria. Le regolamentazioni correntemente in vigore riguardanti l'esposizione sono state stilate considerando antenne di questa tipologia, mentre le nuove reti di quinta generazione adottano la tecnologia del beamforming, che permette, mediante l'impiego di array di antenne e tecnologia massive MIMO, ovvero *multi input multi output*, di dirigere il segnale dove effettivamente viene richiesto, come mostrato in Fig. 3.2, consentendo di irradiare una potenza complessivamente minore in quanto viene indirizzata in maniera più efficace, e limitando l'esposizione non necessaria nelle zone ove non è richiesto il servizio di connettività [12].

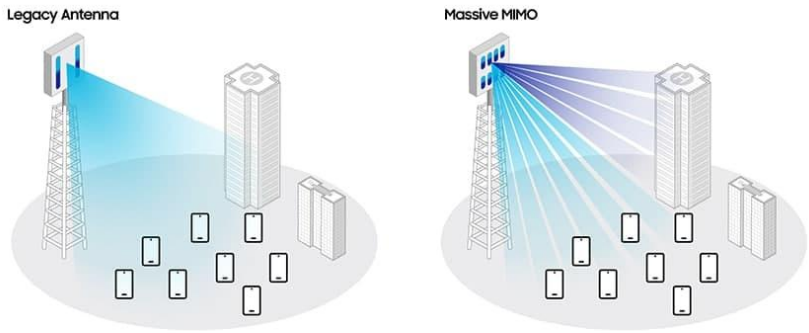


Figura 3.2: Differenza tra beamforming e tecnologia precedente - Samsung

Adeguamento delle modalità di misurazione Facendo uso della tecnologia di beamforming, l'irraggiamento di potenza può essere modificato in maniera dinamica a seconda delle condizioni di traffico richieste nelle diverse zone.

É necessario dunque aggiornare i modelli utilizzati per la valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici generati dalle stazioni radio, in quanto viene meno la condizione di staticità nel tempo, introducendo metriche ingradi di prendere in considerazione anche dei fattori statistici come la quantità di dispositivi elettronici che richiedono la connettività di rete e la loro concentrazione nel territorio servito. È importante porre l'accento sul fatto che la presa in considerazione di questi fattori statistici non è un modo artificioso per abbassare il calcolo dei valori di emissioni al fine di favorire l'adozione delle nuove tecnologie 5G, andando di fatto a violare i limiti, bensì è un metodo che permette una valutaizone dell'esposizione in maniera più fedele alla realtà.

L'utilizzo dei modelli attuali, che prevedono antenne impostate ad un valore di potenza costante, sovrastimano di molto l'effettiva erogazione, che è in realtà pari a circa il 15% di quella calcolata, come analizzato in [15], ponendo di fatto una pesante limitazione all'installazione di impianti.

Capitolo 4

Approcci per minimizzare le esposizioni

Avendo vagliato le peculiarità che contraddistinguono le nuove reti 5G, in questo capitolo vengono presentate e discusse alcune metodologie per minimizzare le esposizioni ai campi elettromagnetici generati dalle reti cellulari di quinta generazione, sfruttando le potenzialità offerte dalla nuova tecnologia. Gli approcci esposti variano dalla progettazione di tecnologie in grado di diminuire le emissioni causate dagli smartphone ad interventi di tipo infrastrutturale, fino all'utilizzo di tecniche per stimare in maniera più accurata le emissioni di campi elettromagnetici dalle stazioni radio base e dai terminali.

4.1 Emissioni dal dispositivo

Le metodologie fino ad ora utilizzate per la riduzione dei valori di SAR nei terminali quali i telefoni cellulari si sono focalizzate sull'impiego di schermature posizionate in maniera strategica in prossimità delle antenne, ad esempio frapposte tra l'antenna e la capsula auricolare, con lo scopo di bloccare le emissioni in direzione della testa dell'utente, in particolare durante le chiamate vocali quando l'apparecchio si trova appoggiato sull'orecchio. Negli smartphone una possibile ulteriore contromisura consiste nella riduzione o, qualora possibile, interruzione del traffico dati quando viene rilevata una chiamata vocale, sempre al fine di limitare le esposizioni nella zona della testa.

Soluzioni come l'introduzione di un elemento che fa da schermo all'antenna, sebbene limitatamente alla zona ove poggia la testa dell'utente, hanno come ov-

vio effetto collaterale una diminuzione delle capacità di trasmissione e ricezione, creando delle zone d'ombra nella copertura e richiedendo, in condizioni di operatività normale, una maggior potenza per riuscire a comunicare con le celle che si trovano nella direzione della schermatura. Inoltre, l'utilizzo di una schermatura fisica ha come svantaggio il fatto di non poterla rimuovere o riconfigurare a seconda degli scenari di utilizzo, bloccando di fatto l'antenna anche quando non necessario, ad esempio quando il telefono non si trova in prossimità della testa. La tecnologia 5G rende l'utilizzo di approcci di questo genere impraticabili in quanto, soprattutto nella banda *mmWave*, l'impatto sulle prestazioni sarebbe ulteriormente amplificato a causa della maggior attenuazione data dall'utilizzo di frequenze più alte, andando a minare i benefici stessi introdotti dalla nuova tecnologia.

Allo scopo di diminuire il tasso di assorbimento di campi elettromagnetici generati dal dispositivo, è possibile sfruttare le proprietà di beamforming intrinseche degli array di antenne MIMO, combinandole con i dati ottenuti dai sensori già presenti nel dispositivo [1] per monitorare la posizione dello smartphone in relazione all'utente. É dunque possibile disegnare dispositivi in grado di dirigere il segnale in modo tale che per quanto possibile eviti di investire l'utente, diminuendo il valore di SAR in particolare durante le chiamate telefoniche quando il dispositivo si trova in prossimità della testa. In Fig. 4.1 si può vedere uno schema di un array di antenne che trasmettono segnali leggermente sfasati tra loro al fine di indirizzare il fascio in una data direzione.

La soluzione proposta è implementabile sia a livello dei dispositivi che a livello di stazione radio base, ed è uno degli elementi chiave della tecnologia 5G. Questa allocazione dinamica intelligente della potenza erogata concorre alla diminuzione dell'esposizione media ai campi elettromagnetici.

4.2 Modifiche infrastrutturali

In questa sezione verranno descritti alcuni approcci ed alcune tecnologie innovative riguardanti le infrastrutture di rete al fine di mitigare l'impatto delle stazioni

[1] Sensori quali accelerometro, giroscopio e sensore di prossimità

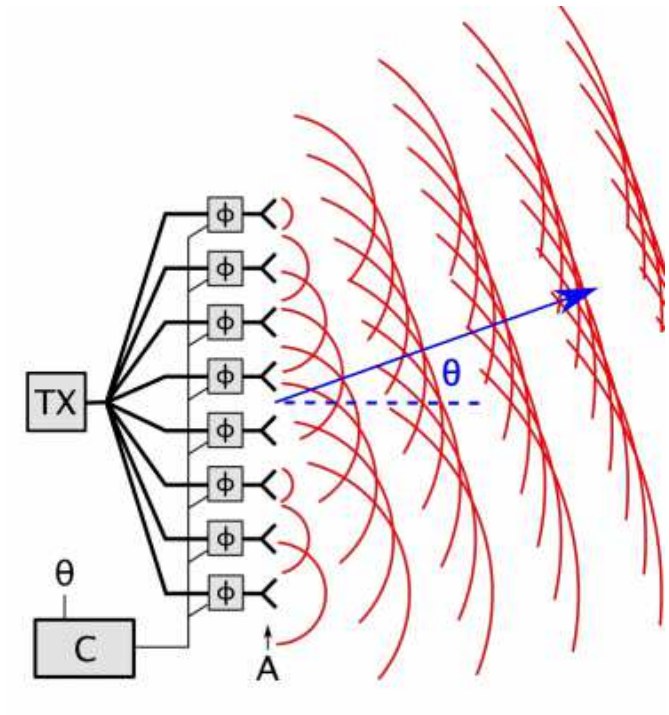


Figura 4.1: Beamforming con array di antenne wikimedia commons

radio 5G sui livelli di esposizione, garantendo al contempo una qualità del servizio e una copertura ottimali.

4.2.1 Superfici attive

Anche nella banda intermedia di frequenze, la *sub-6*, sebbene in minor misura rispetto alla *mmWave*, la caratterizzazione del canale di trasmissione riveste un ruolo cruciale nel determinare le prestazioni della rete e la potenza necessaria per raggiungere tale livello di prestazioni.

L'interposizione di ostacoli e la mancanza della condizione di line of sight tra dispositivo e stazione radio comportano un aumento della potenza necessaria per riuscire ad ottenere una comunicazione sufficientemente prestante, mentre nella banda *mmWave*, a causa delle elevate frequenze utilizzate, la condizione di line of sight diventa condizione fondamentale.

Il problema che ci si pone di risolvere dunque consiste nel riuscire a garantire condizioni di canale il più possibile ottimali anche in scenari difficili, come ad esempio in un'area cittadina ove la presenza di edifici può ostacolare la propagazione del segnale. Ad oggi vengono impiegati ripetitori in grado di segmentare il

link in più parti, aventi per quanto possibile interfacce che soddisfino la condizione di line of sight, come mostrato in Fig. 4.2.

Lo svantaggio di questo approccio consiste nel fatto che l'utilizzo di un repeater comporta un aumento delle emissioni di EMF paragonabili all'installazione di una nuova antenna, con le annesse complicanze burocratiche e le limitazioni di legge.

La soluzione proposta consiste nell'utilizzo di superfici passive attive, *Intelligent Reflective Surfaces*, IRS, composte da una matrice contenente un elevato numero di elementi passivi riflettenti riconfigurabili e orientabili.

Queste superfici sono grado di comportarsi come elementi riflettori che reindirizzano ed effettuano uno scattering controllato dei segnali che vi incidono, andando così a creare una virtual line of sight tra i dispositivi che devono comunicare. Si faccia riferimento come analogia all'utilizzo di uno specchio orientabile posizionato in modo tale da riuscire a vedere ciò che sta al di là di un ostacolo. Lo schema di funzionamento è mostrato in Fig. 4.3.

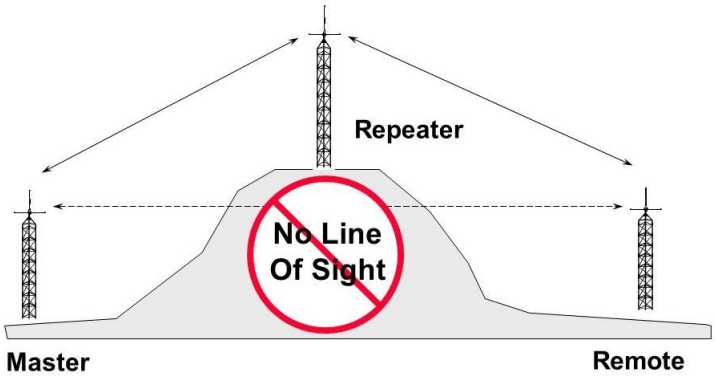


Figura 4.2: Repeater per comunicazione line of sight, Esteem wireless

Superfici di questo tipo si differenziano dalle antenne in quanto non erogano attivamente potenza, si limitano a reindirizzare il segnale incidente, permettendo di garantire una copertura con meno zone in ombra senza la necessità di installare ulteriori stazioni radio.

Implementazione Una possibile implementazione delle superfici riflettive fa uso delle cosiddette metasuperfici, ovvero dei piani costituiti di metamateriali, dei materiali sintetici che presentano caratteristiche elettromagnetiche non esistenti

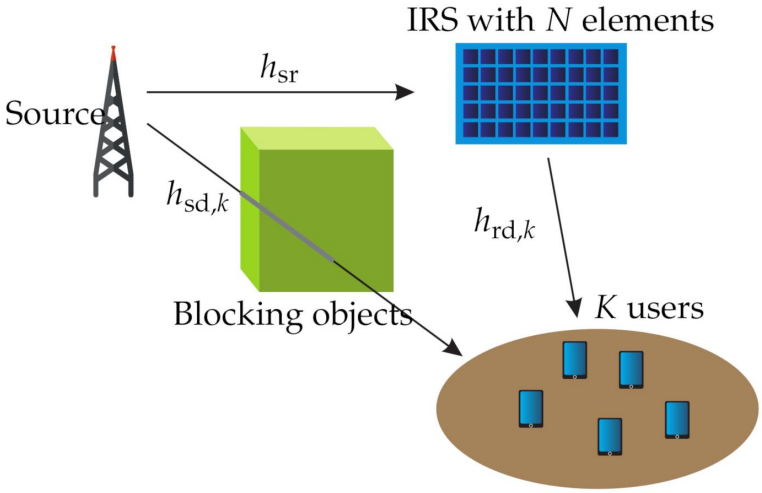


Figura 4.3: Utilizzo di IRS per realizzare una virtual line of sight, [13]

negli elementi naturali. Le metasuperfici sono formate da nanostrutture di dimensioni molto inferiori alla lunghezza d'onda dette meta-atomi, che, a causa della loro presenza in numero elevato, permettono una manipolazione delle onde incidenti estremamente granulare. Le modifiche che una superficie di questo tipo deve operare sui campi incidenti consistono per la maggior parte in uno sfasamento delle onde, al fine di sfruttare il principio alla base del beamforming, come accennato in 3.4.

Le più recenti tecnologie di progettazione delle IRS si basano sull'utilizzo di materiali semiconduttori in grado di alterare la struttura di meta-atomi, permettendo così una riconfigurazione elettronica dinamica del comportamento della superficie. Una descrizione dettagliata delle caratteristiche e delle prestazioni della soluzione è discussa in [16].

4.3 Specializzazione

Come già discusso in 3.1, la densificazione delle stazioni radio sul territorio può inizialmente sembrare deleteria per l'esposizione a EMF, ma si è dimostrato che in realtà questa conclusione non è corretta in quanto con un maggior numero di stazioni radio operanti a potenza minore si è in grado di garantire una copertura più uniforme del territorio, senza che le zone in prossimità delle antenne ricevano elevati valori di campo elettrico.

Volendo ulteriormente migliorare questo aspetto, l'utilizzo di diverse bande di frequenza che caratterizza le reti 5G porta ad una naturale diversificazione delle

zone di copertura, per meglio adattarsi alle diverse esigenze:

mmWave A causa delle alte frequenze e della forte attenuazione, le onde millimetriche necessitano di un'elevata potenza per raggiungere zone remote, ma il loro utilizzo verrà principalmente relegato agli scenari di hotspot, zone ristrette dove si concentra un'elevata densità di dispositivi connessi, come stadi, terminal aeroportuali o grossi centri cittadini, in quanto la copertura di vaste zone con stazioni radio mmWave risulterebbe economicamente impraticabile. Verranno dunque maggiormente impiegate in situazioni ove la distanza tra gli utenti e la stazione radio non è elevata, permettendo così l'utilizzo di potenze ridotte per via della breve lunghezza del collegamento.

sub-GHz In maniera duale, il 5G sub-GHz impiega una frequenza minore che risente meno dell'attenuazione in spazio libero, permettendo di coprire ampie zone impiegando un numero minore di antenne, anche queste operanti ad una potenza ridotta a causa della minor attenuazione. Verrà utilizzato per offrire comunicazioni a velocità limitata ma con una grande copertura, ad esempio per garantire i servizi base di telefonia nelle zone non popolate.

sub-6 Il 5G sub-6 rappresenta infine la soluzione intermedia in grado di offrire connessioni ad elevata velocità garantendo comunque una copertura spaziale maggiore rispetto alla *mmWave*. È dunque ipotizzabile che verrà utilizzato per la copertura delle zone residenziali e dei centri cittadini di medie dimensioni. In questo caso, l'attenuazione più elevata può essere mitigata dalla densificazione di apparati nel territorio, consentendo anche in questo caso la diminuzione delle emissioni.

4.4 Planning di rete

Sempre in ottica di minimizzare l'impatto di una nuova infrastruttura, si propongono alcuni approcci da implementare in fase di progettazione, considerando le reti già eventualmente esistenti e mediante l'uso di software di simulazione evoluti.

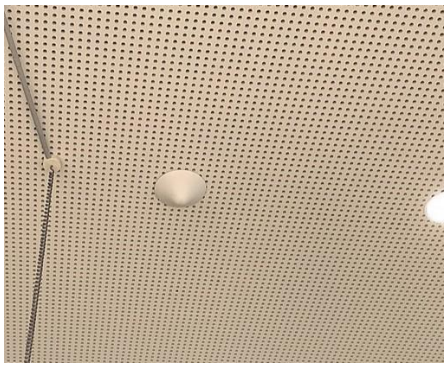
4.4.1 Offloading

Il principio alla base dell'offloading consiste nella rilocazione di parte o della totalità del traffico dati su altre reti già presenti nel territorio.

Offloading verso rete WiFi Il continuo proliferare dei servizi di connettività WiFi presenti in un numero sempre crescente di centri cittadini costituisce un'ulteriore modalità per offrire un collegamento veloce a Internet. Questa tecnologia è spesso sottovalutata dagli utenti in quanto l'esperienza d'uso è poco immediata: è più comodo rimanere connessi alla rete dati 5G piuttosto che registrarsi di volta in volta a servizi che spesso differiscono da città a città. In presenza di soluzioni di questo tipo, l'implementazione di protocolli in grado di far transitare parte del traffico generato dagli utenti attraverso le reti WiFi presenti nel territorio permetterebbe di alleviare il carico sulle stazioni radio base, sfruttando una densificazione degli apparati di fatto già presente, con tutti i vantaggi discussi nelle precedenti sezioni.

Offloading verso celle di prossimità Un'altra tipologia di offloading del traffico consiste nell'impiego di micro celle di prossimità, ovvero stazioni radio a potenza minore disposte in maniera capillare sulla zona da servire, ognuna in grado di coprire un'area limitata nell'ordine di un paio di centinaia di metri. Un approccio di questo tipo consente una diminuzione del carico sulle macro celle ed una migliore qualità del servizio in ambienti difficili da servire, in quanto possono essere installate internamente. In Fig. 4.4a e Fig. 4.4b si vedono rispettivamente una microcella outdoor e una installata sul soffitto di un centro commerciale.

(a) Microcella in ambiente esterno - Flickr - Marcus Wong



(b) Microcella interna - Wikimedia Commons

Figura 4.4: Esempi di microcelle

Capitolo 5

Conclusioni

Come ampiamente discusso, le nuove tecnologie di rete 5G portano molteplici innovazioni tecnologiche, alcune delle quali mai sperimentate prima nell'ambito delle telecomunicazioni su larga scala, come ad esempio l'uso delle frequenze *mmWave* per il traffico dati cellulare.

Adeguamento dei limiti Queste nuove tecnologie rendono di fatto le attuali normative in materia di radioprotezione poco accurate nella valutazione delle emissioni generate dalle reti di quinta generazione, in quanto sono state pensate per la valutazione di antenne di tipo principalmente statico. Si pone dunque il problema di definire nuovi standard per la misurazione della potenza assorbita, facendo uso di modelli statistici e software di simulazione avanzati in grado di tener conto di tutti i parametri che caratterizzano la rete 5G.

Standardizzazione delle normative Come insegna la storia, cambiamenti di vasta portata sono spesso accolti con un'iniziale diffidenza da parte della popolazione, la quale, complice la grande velocità del progresso tecnologico e la poca dimestichezza con i concetti che vi stanno alla base, cade facilmente vittima di misinformazione e fake news.

Le normative che regolamentano i limiti per le esposizioni ai campi elettromagnetici rivestono un ruolo chiave nel definire come viene percepito il rischio da parte degli utenti.

Le notevoli discrepanze ad oggi presenti tra i limiti suggeriti dagli enti di standardizzazione e la reale situazione legislativa, che varia in modo marcato da Stato a Stato, infondono l'idea sbagliata che la comunità scientifica sia ancora incerta dei possibili effetti sulla salute derivanti dalle reti cellulari di uso quotidiano.

É dunque necessaria un'armonizzazione dei limiti di esposizione a livello internazionale, al fine di fornire una risposta compatta e coesa su quello che viene considerato un limite certamente sicuro.

Bibliografia

[1] F. Ulaby, U. Ravaioli, *Fondamenti di Campi Elettromagnetici*, Pearson 2021.

[2] P.Zotto, S. Lo Russo, P. Sartori, *Fisica Generale, Elettromagnetismo - Ottica*, Edizioni La Dotta 2019.

[3] M. Santagiustina, Corso "Antennas and Wireless Propagation", *Electromagnetic field: hazard identification and protection policies*

[4] ICRP Publication 103, *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, `https://icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37(2-4)-Free_extract.pdf`

[5] M. Bugaj, M. Wnuk and L. Blaszkiewicz, *"Simulations of SAR Values for Selected Telecommunications Devices"*, 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 2018, pp. 1780-1783, doi: 10.23919/PIERS.2018.8598061.

[6] *IEEE committee on man and radiation - COMAR technical information statement: health and safety issue concerning exposure of the general public to electromagnetic energy from 5G wireless communications networks*

[7] *ICNIRP Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields*

[8] SASB/SCC39 - SCC39 - International Committee on Electromagnetic Safety *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*

[9] *FCC 97-303*

[10] L. Chiaraviglio, G. Bianchi, N. Blefari-Melazzi and M. Fiore, *"Will the Proliferation of 5G Base Stations Increase the Radio-Frequency "Pollution"?"*, 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring), 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9128888.

[11] L. Chiaraviglio, J. Galán-Jiménez, M. Fiore and N. Blefari-Melazzi, *"Not in My Neighborhood: A User Equipment Perspective of Cellular Planning Under Restrictive EMF Limits"* in IEEE Access, vol. 7, pp. 6161-6185, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2888916.

[12] B. Thors, D. Colombi, Z. Ying, T. Bolin and C. Törnevik, *"Exposure to RF EMF From Array Antennas in 5G Mobile Communication Equipment"* in IEEE Access, vol. 4, pp. 7469-7478, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2601145.

[13] Mustaghfirin, M.; Singh, K.; Biswas, S.; Huang, W.-J. *"Performance Analysis of Intelligent Reflecting Surface-Assisted Multi-Users Communication Networks"*. Electronics 2021, 10, 2084. https://doi.org/10.3390/electronics10172084

[14] G. Zhou, C. Pan, H. Ren, K. Wang, M. D. Renzo and A. Nallanathan, *"Robust Beamforming Design for Intelligent Reflecting Surface Aided MISO Communication Systems"* in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 10, pp. 1658-1662, Oct. 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.3000490.

[15] B. Thors, A. Furuskär, D. Colombi and C. Törnevik, *"Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO"* in IEEE Access, vol. 5, pp. 19711-19719, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2753459.

[16] M. A. ElMossallamy, H. Zhang, L. Song, K. G. Seddik, Z. Han and G. Y. Li, *"Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities"* in IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, vol. 6, no. 3, pp. 990-1002, Sept. 2020, doi: 10.1109/TCCN.2020.2992604.

[17] L. Chiaraviglio, A. Elzanaty and M. -S. Alouini, *"Health Risks Associated With 5G Exposure: A View From the Communications Engineering Perspective"* in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 2, pp. 2131-2179, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3106052.

[18] *Onde*, `https://en.wikipedia.org/wiki/Wave`

[19] Nature, *Pseudoscience and COVID-19 — we've had enough already*, `https://www.nature.com/articles/d41586-020-01266-z`

[20] BBC, *Derby 5G phone mast set on fire*, https://www.bbc.com/news/uk-england-derbyshire-52790399

[21] DW, *5G protesters sabotage Dutch phone towers*, https://www.dw.com/en/5g-protesters-sabotage-dutch-phone-towers/a-53094033

[22] Decreto della Presidenza del Consiglio dei Ministri 08/07/2003