



Analisi della distribuzione dei livelli di potenza dei Resource Elements 5G-NR in diversi scenari di traffico attraverso misure in campo con analizzatore vettoriale

Matteo Tiberti¹, Martino Cremona¹, Emanuele De Sena¹, Barbara Notari¹, Irene Taddei¹, Massimo Tedeschini¹, Paolo Zanichelli², Fiorella Achilli¹, Tiziana Melfi¹, Maurizio Poli¹

¹Arpae Emilia – Romagna, Servizio Sistemi Ambientali APA Ovest e APA Centro

²Consulente

mtiberti@arpae.it

Riassunto

Diversi lavori sperimentali negli ultimi anni hanno evidenziato come l'approccio di misura utilizzato per i sistemi 3G e 4G, consolidato nella normativa tecnica del CEI (211-7/E), risulti ora inadeguato per il 5G a causa delle sue peculiarità tecnologiche, in primis l'utilizzo del beamforming. L'utilizzo di antenne attive in grado di sintetizzare fasci di radiazione con diverso guadagno e direzione per la trasmissione dei canali di controllo e dei canali di traffico, pone infatti il problema oggettivo di quale parte del segnale sia più corretto utilizzare per l'estrapolazione alla massima potenza. Nel presente lavoro, attraverso misure in campo con analizzatore vettoriale in diverse condizioni di riempimento della trama, si è voluta studiare la distribuzione della potenza associata ai resource elements (RE) di traffico. Sono state dapprima sviluppate alcune metodologie utili per separare i RE di traffico da quelli associati invece ai canali di controllo, quindi è stata analizzata l'influenza della "quantità" di traffico richiamato nel punto di misura sui parametri statistici della distribuzione di potenza dei RE. I risultati sperimentali ottenuti hanno evidenziato che valori più alti della potenza media dei RE vengono generati dalla SRB più probabilmente in condizioni di scarsa occupazione della trama piuttosto che non in condizioni di saturazione, almeno fintanto che il traffico viene richiamato utilizzando un unico terminale utente.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro nasce dall'esigenza pratica di semplificare l'esecuzione delle misure di controllo di competenza dell'Agenzia su Stazioni Radio Base (SRB) che implementano la tecnologia 5G-NR utilizzando antenne massive-MIMO. Se da un lato, considerate le peculiarità della tecnologia 5G-NR, risulta assolutamente necessario l'utilizzo di almeno uno *User Equipment* (UE) al fine di attivare il meccanismo di *beamforming* verso il punto di misura (Adda, 2020 e Adda, 2022) dall'altro diverse modalità di forzatura del traffico sono attualmente oggetto di indagine (Vaccarone, 2024): quale che sia la modalità impiegata, lo scopo della forzatura rimane quello di poter effettuare la misura del segnale 5G in condizioni di saturazione, quando cioè la potenza irradiata dalla SRB verso l'utilizzatore risulti essere la massima possibile. Si è quindi cercato di verificare sperimentalmente se la distribuzione dei livelli di potenza nella parte di downlink di un frame 5G-NR FR1 nella banda a 3700 MHz (quella su cui è attualmente implementato in Italia l'utilizzo di antenne attive dagli operatori di telefonia cellulare) risulti influenzata, e in che misura, dalla quantità di traffico richiamato dall'utente. L'ipotesi di partenza dello studio, da verificare o falsificare, è quindi che il valor medio di potenza dei *Resource Elements* (RE) "di traffico" della trama 5G richiamata nel punto di misura rimanga costante indipendentemente dalla percentuale di trama allocata.

DESCRIZIONE DEL PUNTO DI INDAGINE

Come sito di misura (fig. 1) è stato scelto il balcone di una abitazione privata in linea di vista con le SRB presenti su un traliccio a circa 155 metri e su di una torre piezometrica a circa 335 metri di distanza nella zona di via Gorizia, Reggio Emilia. Sono quindi state verificate le tecnologie presenti, selezionate le SRB con 5G a 3700 MHz e per queste ultime sono state analizzate le direzioni di puntamento. Il punto di misura si trova a circa 105° N rispetto alla torre piezometrica ed a circa 135° N rispetto al traliccio dove è presente un unico operatore. Considerando la minore distanza ed il miglior allineamento tra la congiungente la SRB con il sito di misura ed una delle direzioni di puntamento, si è scelto di concentrare l'attenzione sugli impianti dell'unico operatore presente sul traliccio ed in particolare sulla cella a 120° N. Nel raggio di almeno 750 m non sono presenti altri impianti dello stesso operatore.

Figura 1 – Punto di misura ed SRB circostanti; via Gorizia - Reggio Emilia



CARATTERISTICHE DEL SEGNALE ANALIZZATO

Il segnale 5G 3700 MHz in esame ha le caratteristiche riportate nella seguente (tab. 1). La configurazione TDD implementata corrisponde al Case C definito dallo standard 3GPP, che è caratterizzato dalla possibile implementazione di 8 fasci di controllo SSB, di cui solo 6 risultano attivi nel caso in esame. Nello specifico sono stati rilevati gli SSB identificati con gli indici 0, 1, 2, 3, 5 e 6 con frequenza centrale pari a 3570.24 MHz e ampiezza di banda pari a 7.2 MHz.

Tabella 1 - Caratteristiche del segnale 5G in esame come da scheda radio fornita dall'operatore

DATI 5G 3600 MHz TDD	SETTORE 1	SETTORE 2	SETTORE 3
Azimut [°N]	0	120	250
Frequenza centro banda [MHz]	3590.01	3590.01	3590.01
Larghezza di banda [MHz]	60	60	60
Potenza in trasmissione [W]	100	100	100
Group ID	246	246	78
Cell ID	0	2	1
SISO/MIMO configuration	MIMO 4x4	MIMO 4x4	MIMO 4x4
Numerologia μ	1	1	1
SubCarrier Spacing [kHz]	30	30	30
Frequenza del PDSCH (SSB) [MHz]	3570.24	3570.24	3570.24
Cyclic Prefix	Normal Cyclic Prefix	Normal Cyclic Prefix	Normal Cyclic Prefix
Number of SSB	6	6	6
TDD structure: Frame Type [Cd/u]	2	2	2
TDD structure: Special Sub Frame Type [S – CS]	7	7	7
F_{TDC}	0.743	0.743	0.743
Boosting factor	1	1	1

STRUMENTAZIONE DI MISURA

Le misure sono state effettuate in condizioni di campo lontano, in visibilità ottica e con strumentazione sottoposta a taratura, che risponde alle specifiche delle normative tecniche, in particolare alle norme CEI 211-7 e CEI 211-10, posizionando la sonda a 1.5 m dal piano di calpestio, con un cavalletto di materiale dielettrico. In particolare è stata utilizzata un'antenna direttiva al fine di minimizzare i contributi di campo elettrico provenienti da direzioni diverse da quella di puntamento. La catena di misura utilizzata è riportata nella seguente (tab. 2).

Tabella 2 - Catena di misura

Strumento	Modello	Range di funzionamento
Analizzatore vettoriale	R&S FSVA 3007	10 Hz - 7.5 GHz
Antenna log-periodica	R&S HL050	850 MHz – 26.5 GHz
Cavo coassiale	Utiflex UFB311A	50 MHz - 18 GHz
Smartphone	Motorola Edge 40	2G, 3G, 4G e 5G

In particolare si evidenzia che l'analizzatore vettoriale FSVA 3007 di R&S è dotato di un apposito modulo software per la decodifica del segnale 5G.

Figura 2 - Particolari della catena di misura e della SRB oggetto di indagine



METODOLOGIA DI ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI

RICHIAMO DEL TRAFFICO

Una delle finalità precipue dell'esperienza di misura è stata quella di simulare il più possibile le condizioni di reale esposizione della popolazione: per questo si è scelto un sito in un ambiente urbano seppur in visibilità ottica. Nel punto di misura il traffico è stato richiamato utilizzando un comune smartphone 5G; posizionandosi con lo smartphone a circa 1 m di distanza dal retro dell'antenna direttiva sul balcone mostrato in (fig. 2), uno degli operatori partecipanti all'esperienza di misura ha, di volta in volta, guardato un film sulla piattaforma Netflix, una diretta Instagram, un video su Youtube etc. Le condizioni di saturazione della trama sono state riprodotte utilizzando lo *speedtest* del sito di Ookla.

DATI ACQUISITI DALL'ANALIZZATORE VETTORIALE

Contestualmente ad ognuno dei diversi scenari di richiamo del traffico in downlink simulati, è stato acquisito un *frame* della trama 5G decodificata dall'analizzatore vettoriale corrispondente alla durata di 10 ms. Nel caso in esame, essendo la numerologia μ pari a 1, ad un singolo frame corrispondono 10 *subframe* da 1 ms e ad ogni subframe 2 *slot* ognuno della durata di 500 μ s. All'interno del singolo slot sono presenti 14 simboli, per cui essendoci in totale 20 slot (2 per ognuno dei 10 subframe), ad un singolo frame corrispondono complessivamente 280 simboli. Considerando che la banda sfruttata dall'operatore in esame è di circa 58.3 MHz (a fronte dei 60 MHz assegnati) e che le singole sottoportanti devono essere tra loro spaziate di 30 kHz come requisito dello standard 5G, risultano complessivamente 1944 sottoportanti. Pertanto una singola "trama" acquisita dall'analizzatore corrisponde a

$$280 \text{ Simboli} * 1944 \text{ Sottoportanti} = 544\,320 \text{ Resource Elements (RE)}$$

Ad ogni RE la funzione *Power vs Symbol per Carrier* dell'analizzatore vettoriale associa un livello di potenza¹ (espresso in dBm) che può essere facilmente esportato in un file di testo.

¹ Dal livello di potenza in dBm si può facilmente risalire al valore della componente del campo elettrico incidente in V/m tramite la nota formula di conversione che contiene gli specifici fattori d'antenna e attenuazioni del cavo. Nel seguito sono mostrati dati relativi ad un'unica polarizzazione (quella orizzontale) dell'antenna direttiva utilizzata poiché la finalità del presente studio non è stata quella di ricostruire i valori complessivi di campo elettrico bensì analizzare le distribuzioni di potenza dei RE.

METODOLOGIA PER DISTINGUERE TRAFFICO E CONTROLLO

Al fine di verificare la tesi di partenza di questo lavoro sperimentale, ossia che la potenza media dei RE rimanga costante nei diversi scenari di traffico, si è dovuto innanzitutto elaborare una procedura per poter agevolmente distinguere i RE appartenenti ai canali di controllo, sempre in aria, da quelli appartenenti ai canali di traffico, che si attivano in seguito alle richieste dell'utenza, in modo tale da poter associare una *percentuale di occupazione* alla singola trama acquisita. Nelle immagini seguenti vengono mostrati gli estremi dell'ambito di indagine: in (fig. 3) è mostrata la trama acquisita in assenza di traffico (percentuale di occupazione nulla), in (fig. 4) quella acquisita invece nelle condizioni di saturazione (percentuale di occupazione prossima al 100%).

Figura 3 - Trama vuota (senza richiamo di traffico)

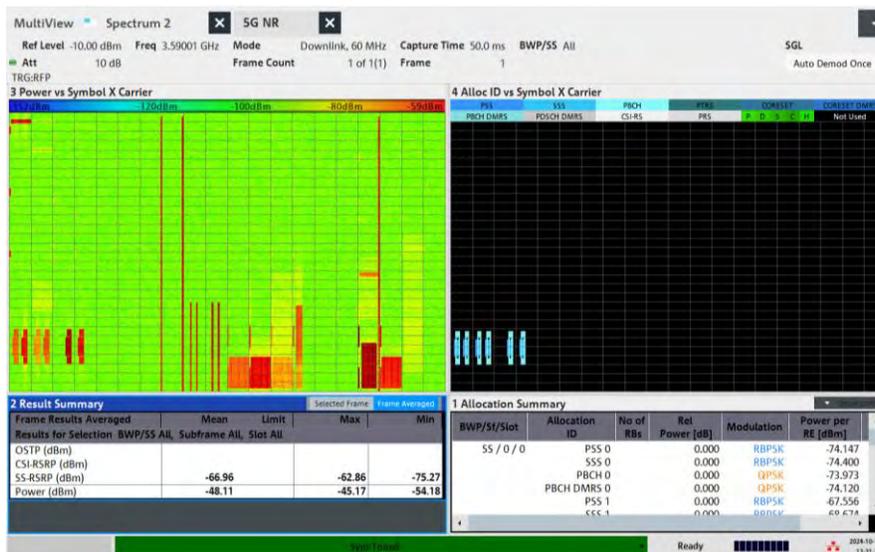
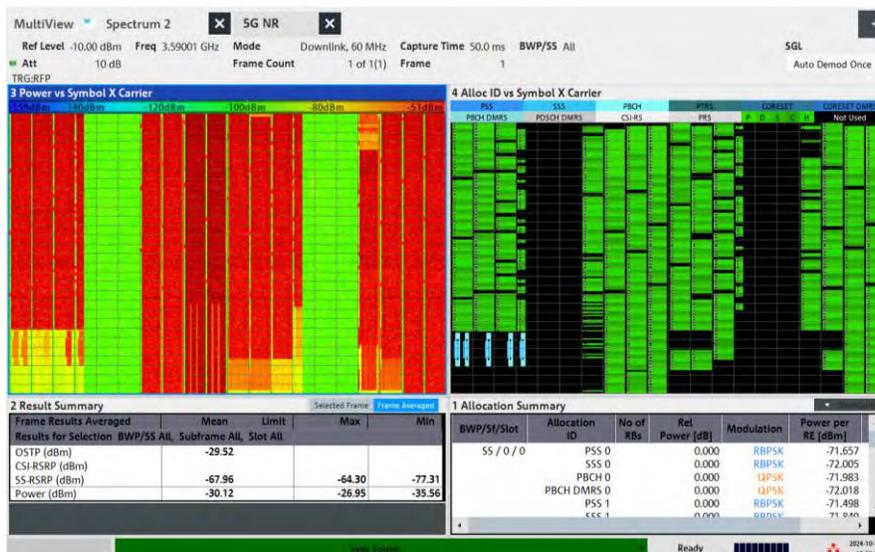


Figura 4 - Trama piena (condizioni di saturazione)



Dal confronto tra le due immagini è possibile sviluppare alcune considerazioni preliminari. Come già evidenziato in una precedente esperienza di misura svolta da Arpa Emilia-Romagna su un segnale 5G dello stesso gestore (Notari, 2024), i cosiddetti “segnali di controllo” non si esauriscono ai soli 6 SSB implementati: sono ben individuabili nella seconda parte del frame, ma non solo, ulteriori strutture che si ripetono con regolarità (alcune si estendono su tutta la banda a disposizione del gestore) e che quindi, pur appartenendo alla porzione di trama in downlink, non possono essere allocate come RE di traffico. Un’ulteriore considerazione, evidente guardando i risultati della funzione *Allocation ID vs Symbol per Carrier* riportata nella parte destra di entrambe le (figg. 3 e 4), è che le strutture di controllo del segnale diverse dagli SSB non vengono riconosciute come tali dall’analizzatore², né vengono riconosciuti tutti gli elementi di traffico (in corrispondenza della trama piena non viene nemmeno identificato l’SSB con indice 2).

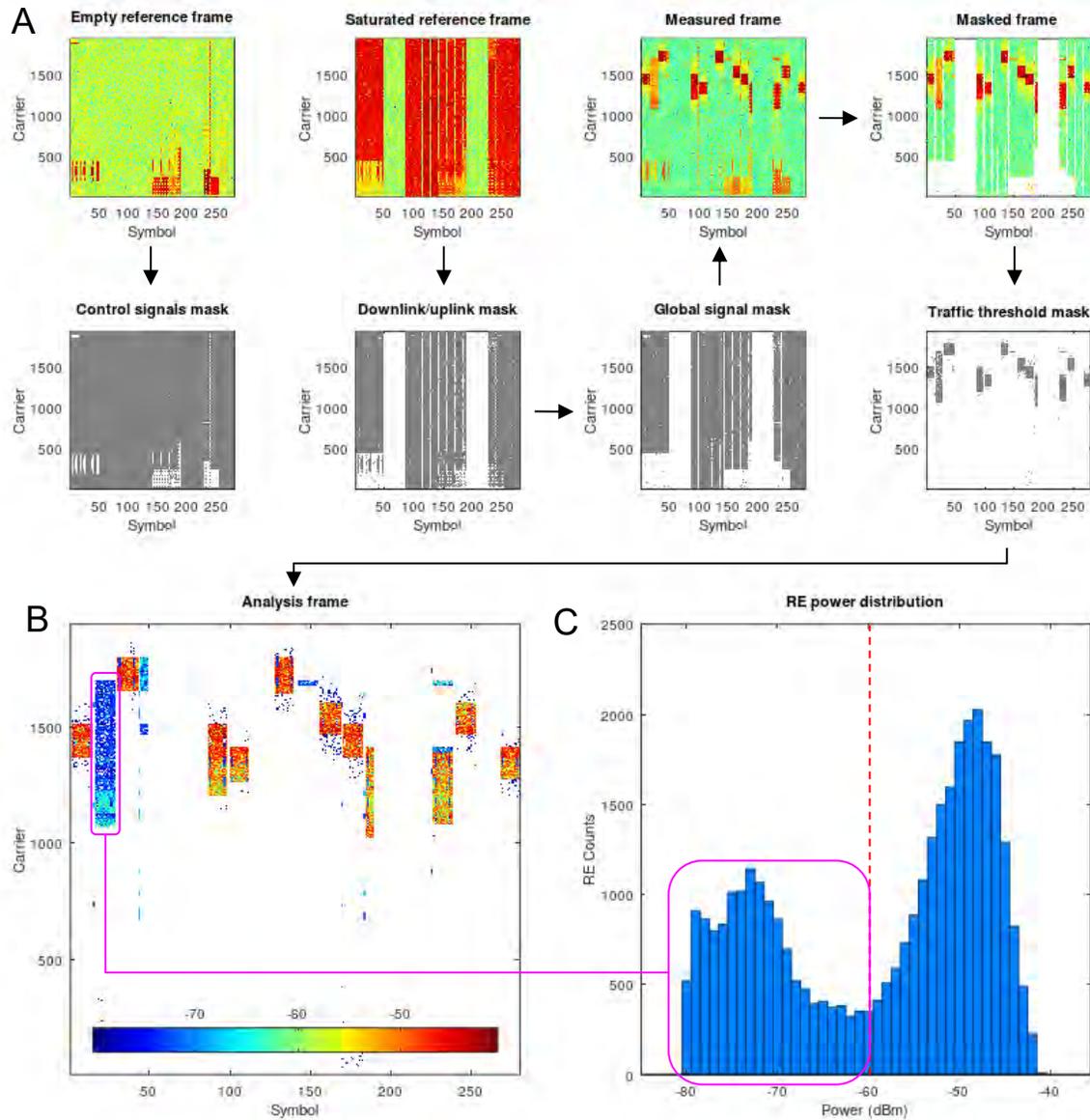
Si è pertanto deciso di distinguere i segnali di controllo da quelli di traffico attraverso una metodologia per filtri successivi elaborata con il software di calcolo numerico open source Gnu Octave (<https://octave.org/>), particolarmente adatto alla manipolazione di dati in forma matriciale³. Il procedimento è illustrato dettagliatamente in (fig. 5-A) relativamente ad uno degli scenari di traffico e può essere schematizzato nei seguenti passaggi:

- 1) la trama vuota, acquisita cioè in assenza di traffico, viene utilizzata come input per creare una maschera che distingue i RE di controllo in aria dal fondo attraverso l’applicazione di un valore soglia in dBm;
- 2) la trama piena, quella in condizioni di saturazione, viene utilizzata per filtrare la parte di downlink da quella di uplink sempre attraverso l’applicazione di un valore soglia in dBm;
- 3) il prodotto dei due filtri precedentemente generati costituisce un filtro in grado di togliere da ognuna delle trame acquisite nei diversi scenari di traffico tutte quelle parti (segnali di controllo e uplink) che non possono venire allocate dai RE di traffico;
- 4) alla trama così ottenuta, depurata dai segnali di controllo e dalla parte di uplink, può essere applicato un ulteriore filtro per riuscire a eliminare eventuali porzioni di trama occupate da altri utenti, non utilizzate dall’antenna o “sporcate” da eventuali effetti di *fading*. Ad esempio in (fig. 5-B) è ben visibile una porzione di trama a bassa potenza riconducibile, con ogni probabilità, ad un altro utente lontano dal punto di misura: guardando l’istogramma riprodotto in (fig. 5-C) è possibile osservarne la distribuzione dei livelli di potenza associati. Applicando un’ulteriore soglia (nel caso specifico attorno ai -60 dBm) è possibile isolare solamente le porzioni di traffico caratterizzate da un livello medio di potenza più elevato e che quindi si ritengono richiamate dal terminale utente posizionato in corrispondenza del punto di misura;
- 5) in (fig. 6) vengono quindi mostrate le porzioni di trama analizzate nelle elaborazioni successive, sovrapposte all’intera trama di partenza (in scala di grigi).

² Nonostante la presenza di una funzione *Autodemod*, ai fini di una corretta demodulazione l’analizzatore deve essere istruito sulla struttura del segnale in aria che si vuole analizzare, ad esempio indicando nei parametri di configurazione quali SSB dello specifico Case il gestore di telefonia ha implementato e quali no.

³ L’operazione può essere effettuata anche con un foglio di calcolo (tipo Excel) attraverso l’utilizzo di tabelle pivot e formattazioni condizionali successive.

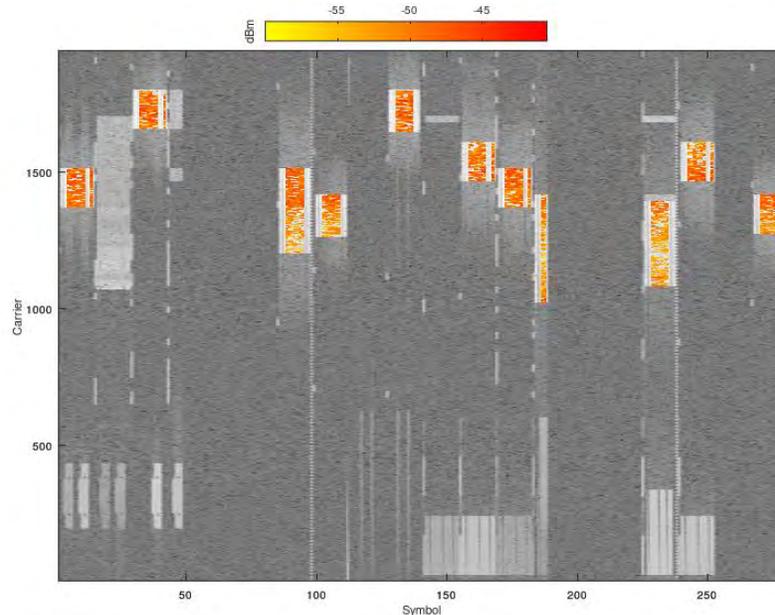
Figura 5 - Procedura di elaborazione della trama



RISULTATI

La metodologia illustrata nel paragrafo precedente è stata sistematicamente applicata a tutti i diversi scenari di traffico che si è riusciti a generare in una singola giornata di misure: in totale sono stati acquisiti 17 diversi set di dati (oltre alla trama vuota), di cui però solo 14 sono stati oggetto di analisi. In 3 casi, infatti, si è osservato che la trama acquisita conteneva soltanto gli SSB e non le ulteriori strutture di controllo facilmente visibili in (fig. 3) e sempre presenti in tutte le altre acquisizioni. Una spiegazione possibile di questa differenza nella struttura della trama è che tali segnali di controllo vengano trasmessi con una periodicità diversa da quella degli SSB (20 ms) e quindi sia possibile, ancorché meno probabile, che lo strumento demoduli frame in cui non sono presenti.

Figura 6 - Porzione della trama oggetto di analisi

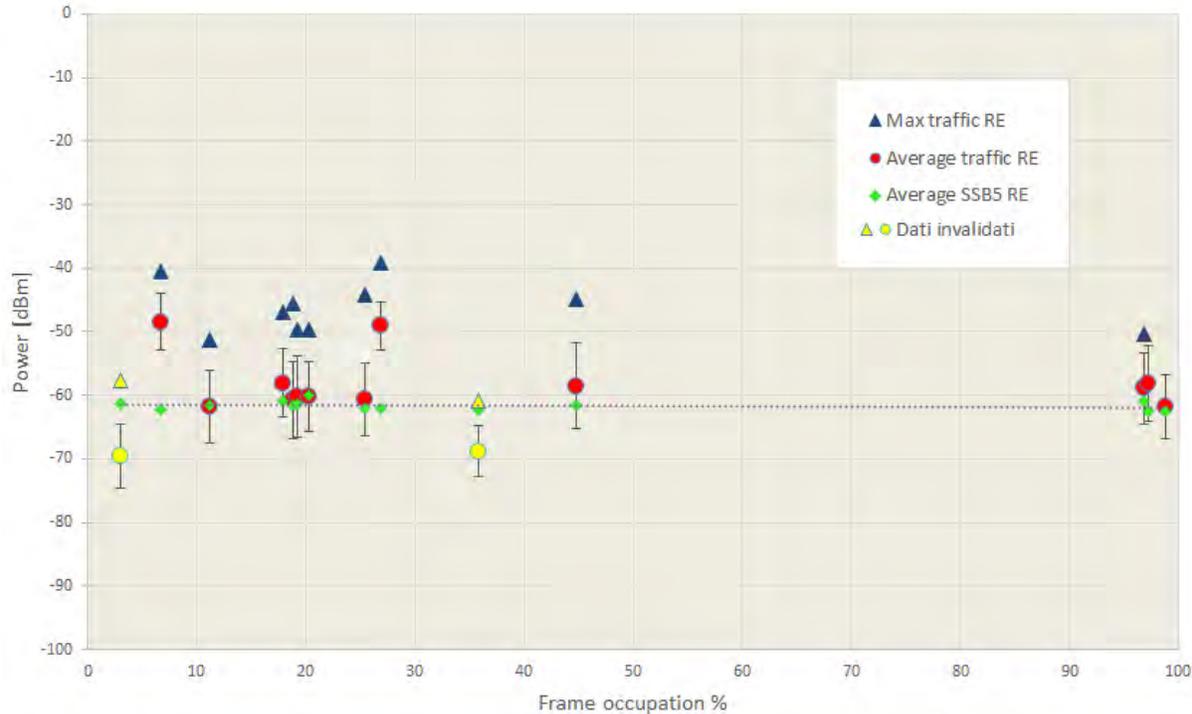


Per ogni trama, una volta definita la percentuale di occupazione, è stato possibile analizzare la distribuzione dei RE calcolando i seguenti parametri: valore medio⁴, valore massimo e deviazione standard (quest'ultima può essere intesa come una misura della dispersione dei valori). I risultati sono mostrati nel grafico di (fig. 7) insieme al corrispondente valore medio (-61.6 dBm) dei RE associati al SSB5 (quello orientato in direzione del punto di misura e perciò caratterizzato da un livello di potenza più elevato).

Per quanto risulta dall'analisi dei dati sperimentali, i valori medi di potenza dei RE di traffico sembrano collocarsi sugli stessi livelli dei RE del SSB diretto verso il punto di misura, fatta eccezione per 2 casi significativi, entrambi a bassi livelli di occupazione della trama, in cui il segnale di traffico è superiore a quello di controllo di circa 10 dB. L'andamento dei valori massimi per ogni trama risulta non essere costante al variare della percentuale di occupazione, mentre lo scarto tra valore medio e valore massimo oscilla tra gli 8 e i 16 dB di ampiezza. La deviazione standard di ogni distribuzione di valori si dimostra più regolare e oscilla tra 4 e 7 dB (valore medio pari a 5.7 dB). In 2 casi (evidenziati dal colore giallo dei marker), la potenza media dei RE di traffico risulta inferiore di circa 8 dB al valor medio dei RE associati al SSB5: con ogni probabilità in queste situazioni è stato acquisito il segnale di traffico di un altro utente lontano dal punto di misura.

⁴ Trattandosi di dati espressi in dBm, è stata fatta una media energetica non aritmetica; detto in altri termini, l'operazione di media è stata fatta sui valori espressi in mW, e quindi si è nuovamente espresso il risultato in dBm.

Figura 7 - Parametri statistici dei valori di potenza dei RE in funzione della percentuale di occupazione della trama.



CONCLUSIONI

I risultati sperimentali raccolti in campo hanno portato a falsificare la tesi di partenza di questo lavoro: **la distribuzione del valore medio della potenza associata ai RE di traffico in funzione della quantità di traffico richiamato non è costante**, né sembra ipotizzabile un andamento lineare. Il comportamento osservato in (fig. 7) evidenzia come per la maggior parte dei casi in esame il valore medio della potenza associata ai RE di traffico si sia mantenuto sugli stessi livelli del SSB orientato verso il punto di misura, eccetto che per 2 occorrenze in cui è stato di circa 10 dB superiore. Sia le ragioni che determinano il comportamento osservato che i meccanismi con cui quest'ultimo si realizza nella pratica non sono evidenti e necessitano di ulteriori approfondimenti, tuttavia è possibile formulare alcune ipotesi a riguardo: l'aumento della potenza delle sottoportanti al trasmettitore⁵ e/o l'incremento di guadagno del fascio che serve l'utente potrebbero costituire una spiegazione delle differenze osservate. L'esigenza di aumentare il segnale al terminale utente potrebbe essere ricondotta alla necessità di trasmettere le informazioni in condizioni di maggiore interferenza del canale di propagazione, eventualmente andando anche a modificare lo schema di modulazione adottato.

⁵Ad oggi però, secondo quanto riferito dagli operatori, non risulta implementato un controllo di potenza sulle sottoportanti 5G.



L'esperienza di misura svolta ha inoltre evidenziato come l'attuale grado di sviluppo della rete 5G sia decisamente superiore a quanto non fosse solo pochi anni fa (Tiberti, 2021), per cui, almeno in ambiente urbano, la probabilità che non vi siano altri utenti collegati alla stessa cella, o alle celle adiacenti, nello stesso istante di esecuzione delle misure risulta non trascurabile. Questo aspetto dovrà essere opportunamente tenuto in considerazione nelle future esperienze di misura, che dovranno approfondire anche l'effetto dell'uso di più terminali per richiamare il traffico sulla distribuzione di potenza dei RE.

Bibliografia

Adda S. 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, Digital Object Identifier: 10.1109/ACCESS.2020.2998448

Adda S. et al., *Methodology Based on Vector and Scalar Measurement of Traffic Channel Power Levels to Assess Maximum Exposure to Electromagnetic Radiation Generated by 5G NR Systems*. IEEE Access, vol. 10, pp. 12125-12136, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3145674.

Notari B. et al., *Studio di un sito SRB complesso con 5G: dalle misure all'estrapolazione alla configurazione autorizzata nell'ottica delle verifiche per il rispetto del 'nuovo' valore di attenzione*. Convegno Nazionale AIRP di Radioprotezione 2024 Lucca, 25-27 settembre 2024

Tiberti M. et al., *Misura in campo del segnale 5G sulla SRB TIM di via Calabria Vecchia a Granarolo (BO)*. Convegno Nazionale AIRP di Radioprotezione 2021 Roma, 29 settembre - 1 ottobre 2021

Vaccarone M. et al., *Strumenti e tecniche di misura per segnali 5G*. Convegno Nazionale AIRP di Radioprotezione 2024 Lucca, 25-27 settembre 2024