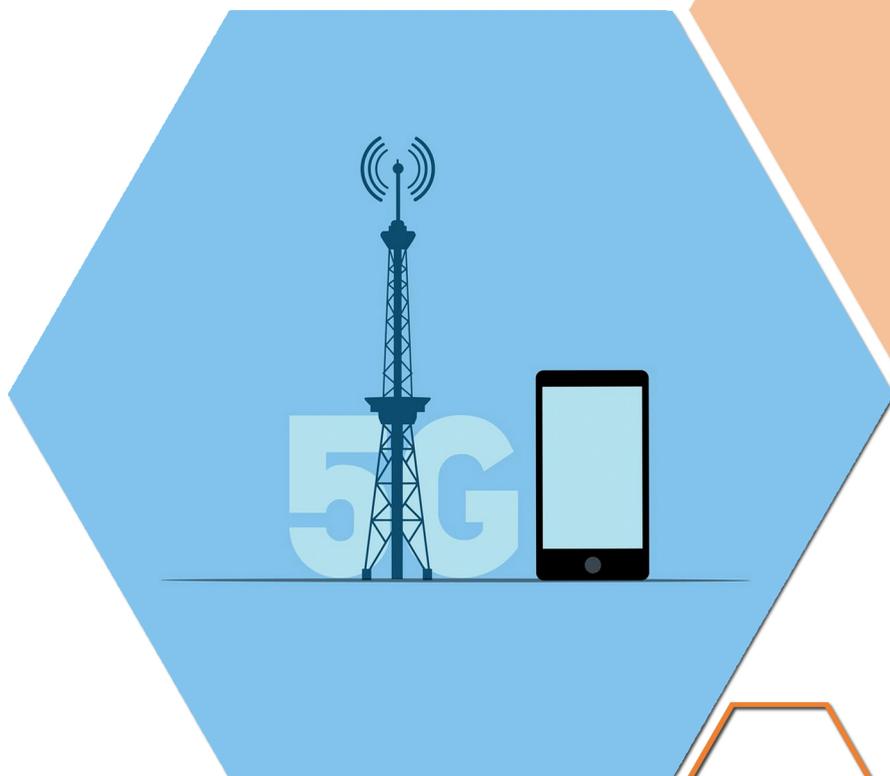


LINEE GUIDA PER LA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI GENERATI DA SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE IN TECNOLOGIA 5G

Delibera del Consiglio SNPA n. 262/24 del 26.11.2024



LINEE GUIDA PER LA MISURA DEI CAMPI ELETTROMAGNETICI GENERATI DA SISTEMI DI TELECOMUNICAZIONE IN TECNOLOGIA 5G

Delibera del Consiglio SNPA n. 262/24 del 26.11.2024

Il Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) è operativo dal 14 gennaio 2017, data di entrata in vigore della legge 28 giugno 2016, n. 132 di "Istituzione del Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente e disciplina dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale" (ISPRA).

Il SNPA è composto dall'ISPRA, ente pubblico nazionale di ricerca che ne coordina le attività, e dalle agenzie per la protezione dell'ambiente delle Regioni e delle Province autonome di Trento e Bolzano.

Attraverso la cooperazione a rete, il Sistema lavora per raggiungere prestazioni tecniche ambientali uniformi sull'intero territorio nazionale, a vantaggio della tutela dell'ambiente e a beneficio della popolazione, dell'attività delle imprese e del sistema pubblico in generale. Le prestazioni tecniche riguardano le attività ispettive e di controllo ambientale, il monitoraggio dello stato dell'ambiente, il controllo delle fonti e dei fattori di inquinamento, il supporto alle attività in campo ambientale dello Stato, delle Regioni e degli enti locali, la ricerca finalizzata a tali scopi nonché la raccolta, l'organizzazione e diffusione dei dati e delle informazioni ambientali che sono riferimenti ufficiali dell'attività di tutta la pubblica amministrazione.

Il Sistema produce documenti tecnici quali Report ambientali SNPA, Linee guida SNPA, Pubblicazioni tecniche SNPA e pareri vincolanti in base alla legge. Organo deliberativo del Sistema è, ai sensi dell'art. 13 della legge n. 132/2016, il Consiglio del Sistema Nazionale, presieduto dal Presidente dell'ISPRA e composto dai rappresentanti legali delle agenzie e dal Direttore generale dell'Istituto.

Le persone che agiscono per conto delle componenti del Sistema non sono responsabili

per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in queste pubblicazioni.

Citare questo documento come segue:

SNPA, Linee guida per la misura dei campi elettromagnetici generati da sistemi di telecomunicazione in tecnologia 5G, Linee guida SNPA, Linee guida SNPA, 54/2025

ISBN 978-448-1249-21

© Linee guida SNPA 2025

La collana Linee guida SNPA raccoglie documenti tecnici diretti ad uniformare il comportamento e le prassi delle componenti del Sistema nell'esercizio dell'attività tecnico scientifica e costituiscono norme interne delle amministrazioni pubbliche che ne fanno parte.

Riproduzione autorizzata citando la fonte.

Coordinamento della pubblicazione online:

Daria Mazzella – ISPRA

Copertina:

Alessia Marinelli – Ufficio Grafica ISPRA

Marzo 2025

Abstract

La finalità del presente documento è di definire i principi ai quali SNPA si riferisce nella misura dei campi elettromagnetici generati da sistemi di telecomunicazione in tecnologia 5G e da antenne massive-MIMO.

The purpose of this document is to define the principles to SNPA refer in the measurement of electromagnetic fields generated by 5G technology telecommunication systems and massive-MIMO antennas.

Parole chiave:

Campi elettromagnetici

5G

Antenne massive-MIMO

Analizzatore di spettro

Keywords:

Electromagnetic fields

5G

Massive-MIMO antennas

Spectrum analyzer

Redattori/Autori

Sara Adda (ARPA Piemonte)
Tiziana Cassano (ARPA Puglia)
Daniele Franci (ISPRA)
Giuseppe Lorenzetto (ARPA Veneto)
Giuseppe Marsico (ISPRA)
Barbara Notari (ARPAE Emilia-Romagna)
Settimio Pavoncello (ARPA Lazio)
Alberto Maria Silvi (ARPAT Toscana)
Matteo Tiberti (ARPAE Emilia-Romagna)
Mattia Vaccarone (ARPA Piemonte)

Percorso istruttorio

Documento elaborato nell'ambito dell'articolazione istruttoria del Consiglio SNPA, rete tematica RRTEM22 "Campi Elettromagnetici"
Coordinamento tecnico-operativo (CTO)
Documento adottato dal Consiglio SNPA, con Delibera del Consiglio SNPA n. 262/24 del 26/11/2024

SOMMARIO

PREMESSA.....	7
SINTESI.....	8
1. CONCETTI INTRODUTTIVI.....	9
1.1 CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEI SISTEMI 5G NR.....	9
1.1.1 Bande di frequenza.....	9
1.1.2 Trama del Segnale.....	10
1.1.3 Numerologia.....	12
1.1.4 Struttura temporale del segnale.....	15
1.1.5 Tecniche di duplexing.....	16
1.1.6 Struttura e modalità di trasmissione dei canali di controllo.....	18
1.1.7 Antenne massive-MIMO e gestione dei beam.....	23
1.1.8 Trasmissione SSB attraverso il beam sweeping.....	25
1.1.9 Trasmissione canale dati attraverso beamforming.....	25
1.1.10 Modalità di trasmissione Stand-Alone e Non Stand-Alone.....	28
1.2 TECNOLOGIA 5G DSS.....	28
1.3 TECNOLOGIA 4G TDD MMIMO.....	32
1.4 TECNOLOGIA 5G FIXED WIRELESS ACCESS.....	33
2. METODOLOGIE DI FORZATURA DEL TRAFFICO.....	34
2.1 LE MOTIVAZIONI DELLA FORZATURA DI RETE.....	34
2.2 TERMINALI PER LA FORZATURA DEL TRAFFICO.....	34
2.3 TECNICHE DI FORZATURA DI RETE.....	35
2.3.1 Forzatura del traffico tramite speedtest.....	36
2.3.2 Forzatura del traffico tramite protocollo UDP.....	37
2.3.3 Forzatura del traffico tramite protocollo HTTP file transfer.....	38
2.3.4 Misura in condizioni di forzatura del traffico.....	39
3. METODOLOGIE DI MISURA IN BANDA LARGA.....	40

3.1 NOTE SULLA MISURA IN BANDA LARGA DI SEGNALI OFDM CON MODULAZIONI DIGITALI COMPLESSE.....	40
3.2 INDICAZIONI SU REQUISITI DELLA STRUMENTAZIONE E PROCEDURE DI UTILIZZO	40
3.3 USO DELLE MISURE IN BANDA LARGA PER IL CONFRONTO CON I LIVELLI NORMATIVI	42
4. METODOLOGIE DI MISURA IN BANDA STRETTA	44
4.1 INTRODUZIONE ALLE TECNICHE DI MISURA E DI ESTRAPOLAZIONE IN BANDA STRETTA	44
4.1.1 Misura in modalità Channel Power	44
4.1.2 Misura di picco.....	46
4.1.3 Misura in modalità zero span.....	47
4.1.4 Misura in modalità real-time	48
4.1.5 Demodulazione	49
4.1.6 Tecniche di estrapolazione.....	50
4.2 METODOLOGIE DI MISURA CON ANALIZZATORE SCALARE	53
4.2.1 Misura in modalità Channel Power	53
4.2.2 Misura in zero span.....	56
4.2.2.1 Valutazione del fattore F_{TDC} in segnali di tipo TDD	56
4.2.2.2 Verifica di parametri caratteristici del segnale	58
4.2.2.3 Stima del fattore $F_{extBeam}$	64
4.2.2.4 Misura dei livelli dei canali di controllo o di traffico	67
4.2.3 Monitoraggio selettivo	70
4.3 MISURE CON L'ANALIZZATORE VETTORIALE	73
4.3.1 Utilizzo di scanner di rete per la determinazione dei parametri di analisi	76
4.3.1.1 Scanner di rete portatili	81
4.3.2 Misure vettoriali con decodifica dei soli canali di controllo.....	86
4.3.3 Misure vettoriali con decodifica dell'intera trama del segnale.....	89
4.3.3.1 Analisi della distribuzione della potenza per RE del PDSCH	93
4.3.3.2 Misura del Channel Power vettoriale	95
4.3.4 Misure vettoriali con hardware SDR e software non commerciale	96
5. CONCLUSIONI	99

6. BIBLIOGRAFIA 101

PREMESSA

La legge 22 febbraio 2001, n. 36 “*Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici*” attribuisce alle Agenzie per l’ambiente la competenza in materia di controllo delle emissioni di campo elettromagnetico emesso dagli impianti di telefonia mobile. In questo settore, il recente avvento della tecnologia 5G, la quinta generazione di telefonia mobile, e delle antenne attive massive-MIMO ha migliorato le prestazioni delle reti di telecomunicazione in termini di velocità di connessione, favorendo l’efficienza dello scambio di dati e di informazioni tra un numero elevato di utenti e le *smart things* e consentendo l’implementazione di servizi a bassa latenza, quali ad esempio la guida autonoma e la telemedicina. L’utilizzo sempre più diffuso dei nuovi servizi porterà, nel futuro prossimo, a una rivoluzione tecnologica in molteplici settori.

Questa evoluzione della tecnologia delle telecomunicazioni, che prevede un utilizzo più esteso dello spettro elettromagnetico rispetto al passato, richiede alle Agenzie un aggiornamento della strumentazione, delle metodologie di misura e delle modalità di valutazione dell’esposizione umana ai campi elettromagnetici generati dai nuovi sistemi. Pertanto, è sorta nel sistema l’esigenza di elaborare apposite Linee Guida, allo scopo di integrare il quadro della normativa tecnica di settore con elementi specifici e utili allo svolgimento dei compiti istituzionali svolti dalle Agenzie.

Le presenti Linee Guida, rivolte al personale delle Agenzie che effettuano i controlli sulle emissioni elettromagnetiche degli impianti in tecnologia 5G, riportano lo stato dell’arte sulle metodologie e tecniche di misura da utilizzare per una corretta valutazione del campo elettromagnetico generato da questa tipologia di sorgenti. Le modalità di misura descritte, relative ai più recenti sistemi di telecomunicazione mobile, forniscono gli strumenti necessari per valutare l’esposizione ai campi elettromagnetici e la conformità ai limiti previsti dalla normativa italiana.

SINTESI

Le presenti Linee Guida affrontano in modo organico gli aspetti connessi alle attività di valutazione in campo dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici generati dai sistemi 5G e dalle antenne di tipo massive-MIMO.

Nella prima parte del documento vengono introdotte le caratteristiche tecniche degli impianti 5G e delle antenne massive-MIMO, evidenziando le novità della nuova generazione tecnologica rispetto ai sistemi tradizionali. La trattazione si focalizza in particolare sugli aspetti tecnici che hanno una diretta influenza sui metodi di valutazione dell'esposizione ai campi elettromagnetici. Infatti, un intero capitolo è dedicato alle metodologie di forzatura del traffico, requisito necessario per una corretta valutazione delle condizioni di massima esposizione alle emissioni generate dai sistemi che fanno uso della tecnologia massive-MIMO. Questo aspetto colma una criticità all'interno degli standard tecnici nazionali e internazionali che, pur citando tali metodologie, non le affrontano nel dettaglio.

Le Linee Guida illustrano varie tecniche di misura, partendo dalle modalità di utilizzo della strumentazione in banda larga e proseguendo con le misure di tipo selettivo, riferendosi per queste ultime sia all'impiego dei tradizionali analizzatori di tipo scalare sia dei più recenti e complessi analizzatori vettoriali. Nella trattazione vengono forniti al lettore esempi operativi finalizzati alla corretta impostazione dei parametri di misura per le diverse tipologie di strumentazione, anche sulla base delle finalità dell'attività di misura.

Inoltre, per la prima volta in un documento di natura tecnica, sono trattate le modalità di utilizzo dello scanner vettoriale di rete: tale tipologia di strumentazione fornisce informazioni sui principali parametri di rete che permettono alle Agenzie di svincolare le attività di controllo dal confronto con i gestori degli impianti.

A conclusione del documento, è riportato uno schema riepilogativo di tutte le casistiche di misura, organizzate per le diverse tipologie di strumentazione utilizzate e per le finalità di indagine. Questo schema rappresenta una sintesi operativa completa, in grado di guidare i tecnici delle Agenzie nello svolgimento delle attività di misura in campo.

1. CONCETTI INTRODUTTIVI

1.1 CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEI SISTEMI 5G NR

Una trattazione esaustiva delle caratteristiche della tecnologia 5G esula dalle finalità del presente documento. Per questo motivo verranno illustrate nel dettaglio le principali novità rispetto alle precedenti generazioni radiomobili, con una particolare attenzione alle caratteristiche che hanno un diretto impatto sulla esposizione della popolazione e, di conseguenza, anche sulle modalità operative di valutazione e misura.

1.1.1 Bande di frequenza

Analogamente alle tecnologie precedenti, anche il 5G viene implementato su differenti bande dello spettro elettromagnetico. La grande discontinuità rispetto al passato è tuttavia costituita dall'utilizzo di porzioni di spettro elettromagnetico totalmente inedite per i servizi di telefonia mobile. L'estrema congestione della regione al di sotto dei 6 GHz, attualmente condivisa da tutte le tecnologie in virtù delle eccellenti caratteristiche di propagazione dell'onda elettromagnetica in quello specifico intervallo di frequenze, ha reso necessario l'utilizzo di porzioni di spettro libere, caratterizzate da valori di frequenza molto più elevati. Pertanto, l'implementazione del sistema 5G può essere catalogata in due macrocategorie (Fig. 1.1):

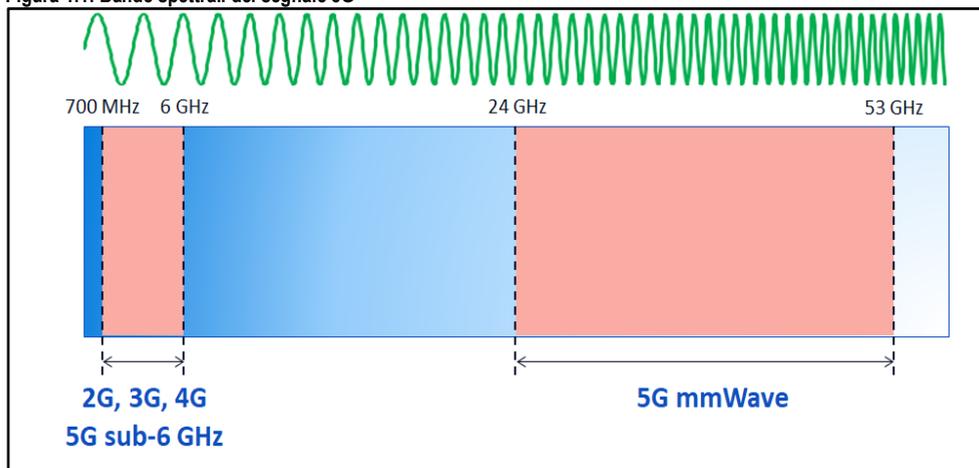
- **5G sub-6 GHz**, per riferirsi al segnale 5G implementato nella regione di spettro 'classica', al di sotto dei 6 GHz;
- **5G mmWave**, per riferirsi al segnale 5G implementato in una regione a valori di frequenza molto superiori (orientativamente da 24 a 53 GHz).

Al momento della stesura del presente documento, le bande di frequenza utilizzate per il servizio 5G in Italia sono:

- **Banda a 700 MHz**, dove il servizio 5G viene tipicamente erogato tramite antenne passive;
- **Banda a 3700 MHz**, attualmente utilizzata dagli operatori per il servizio 5G commerciale 'standard';
- **Banda a 27 GHz**, in fase di sviluppo.

Resta inteso il fatto che, a prescindere dalle tre bande assegnate in Italia per la trasmissione 5G, tale segnale può essere implementato anche in altre porzioni di spettro attraverso la modalità ibrida Dynamic Spectrum Sharing (DSS), che verrà illustrata in seguito.

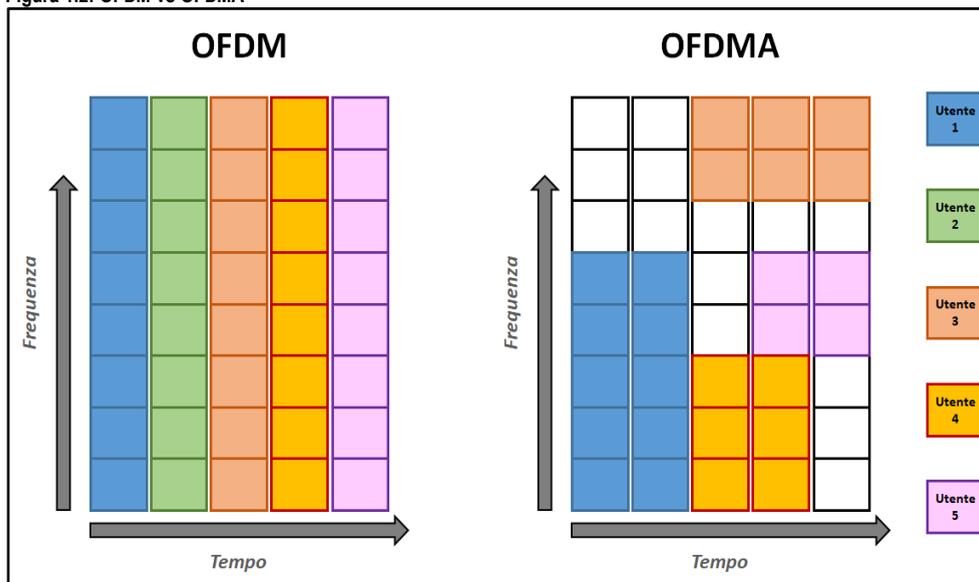
Figura 1.1: Bande spettrali del segnale 5G



1.1.2 Trama del Segnale

La struttura della trama di un segnale 5G è del tutto analoga a quella di un segnale 4G. Entrambi i sistemi, infatti, condividono la medesima tecnica di accesso alla risorsa radio: l'Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA). L'OFDMA è una tecnica di accesso distribuito applicata a segnali trasmessi in modalità Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). Nei segnali OFDM la porzione utile di segnale wideband viene suddivisa in numerose sottoportanti *narrowband* equispaziate in frequenza e ortogonali l'una all'altra. Questa tecnica di trasmissione radio assicura un'elevata efficienza spettrale e una bassa interferenza tra le sottoportanti. La caratteristica principale dei sistemi OFDM è quella di consentire la trasmissione esclusivamente ad un singolo utente per ciascun intervallo di tempo, assegnando a tale utente l'intera risorsa radio disponibile nell'intervallo di tempo a lui dedicato. In questa configurazione, quindi, l'utilizzo del servizio da parte di più utenti è assicurato attraverso un rigido algoritmo di pianificazione temporale, che alloca le risorse ad utenti differenti allo scorrere del tempo (Fig. 1.2 a sinistra). Tale approccio risulta tuttavia abbastanza inefficiente, specialmente in situazioni complesse in cui il numero di utenti da servire in contemporanea è molto elevato, come accade nei sistemi di telefonia mobile. Per ovviare a questi inconvenienti, la gestione della banda disponibile si è evoluta verso un approccio OFDMA (Fig. 1.2 a destra), nel quale la risorsa radio viene allocata in modo tale che sia possibile assegnare un sottoinsieme dell'intera risorsa radio a ciascun utente, in modo da poter servire più utenti nel medesimo intervallo di tempo.

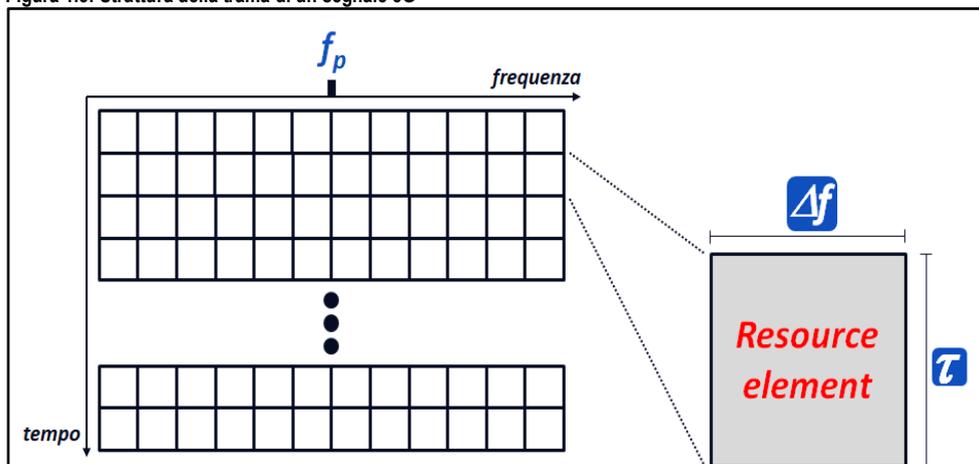
Figura 1.2: OFDM vs OFDMA



La tecnica di assegnazione della risorsa radio utilizzata per i segnali 5G regola quindi la struttura della trama che caratterizza tali segnali. Semplificando la questione, un segnale 5G è costituito da una frequenza portante f_p simmetricamente alla quale si dispongono le sottoportanti, ortogonali ed equispaziate. L'unione di tutte le sottoportanti determina quindi la larghezza di banda complessiva del segnale, che si estenderà da una frequenza minima ad una massima, centrata su f_p . Le sottoportanti “evolvono” nel tempo in modo che ciascuna di esse trasporterà informazioni di tipo differente ad istanti temporali successivi. La trama può quindi essere visualizzata come una griglia nel piano tempo vs frequenza il cui elemento fondamentale è il quadrato elementare, tipicamente chiamato Resource Element (RE). L'illustrazione grafica della trama del segnale 5G è riportata in Fig. 1.3. I due lati del RE individuano due caratteristiche fondamentali del segnale 5G:

- l'occupazione spettrale della singola sottoportante Δf ;
- il tempo di simbolo τ , ovvero il lasso temporale più piccolo entro il quale qualsiasi sottoportante deve rimanere assegnata ad una specifica trasmissione prima di poter essere assegnata ad una trasmissione differente.

Figura 1.3: Struttura della trama di un segnale 5G



Le due grandezze sono legate da un vincolo di proporzionalità inversa $\tau = \Delta f^{-1}$.

All'interno della trama, il sistema alloca dinamicamente le risorse radio necessarie per trasmettere tutti i canali che costituiscono il segnale 5G. Tali canali possono essere suddivisi in due macrocategorie:

- **Canali di controllo**, utilizzati dal sistema per segnalare la presenza dell'impianto e sovrintendere a tutte le procedure iniziali di identificazione, stima del canale, riconoscimento e sincronizzazione che il terminale mobile deve effettuare per potersi agganciare alla rete;
- **Canale di traffico dati**, ovvero il canale attraverso il quale viaggiano le informazioni effettivamente richieste e fruite dai singoli utenti.

1.1.3 Numerologia

La tecnologia 5G introduce l'importante concetto di numerologia per indicare la larghezza di banda occupata da una singola sottoportante (Δf in Fig. 1.3). Viene generalmente indicata con la lettera μ e assume, al momento della stesura del presente documento, valori interi compresi tra 0 e 6 [1].

La relazione che lega Δf e μ è la seguente:

$$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 \text{ [kHz]}$$

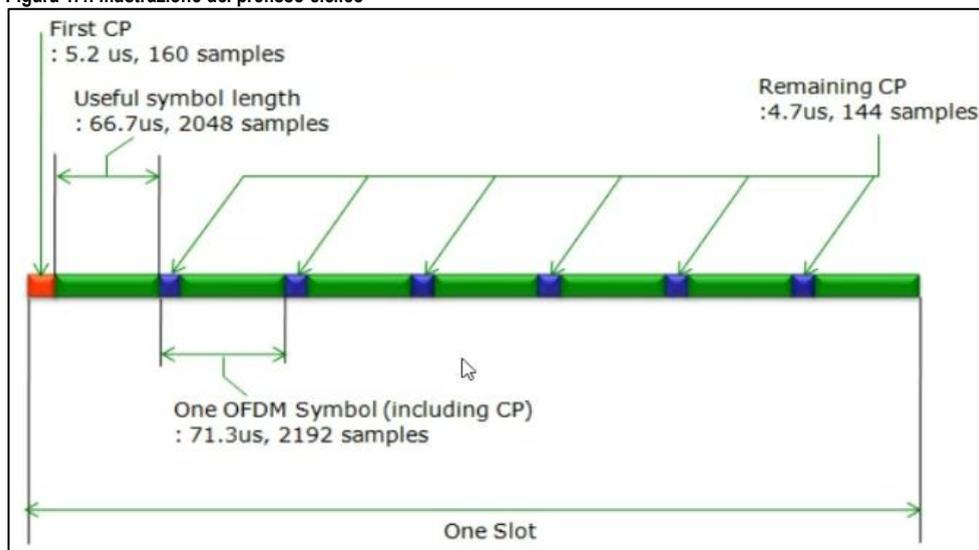
La numerologia determina pertanto l'occupazione spettrale della singola sottoportante, la quale raddoppia per ogni incremento del parametro μ . Allo stesso tempo, in virtù della relazione di proporzionalità inversa tra Δf e τ , la durata di un simbolo si dimezza per ogni incremento di μ .

Tabella 1.1: Valori di Δf e τ in funzione della numerologia

μ	$\Delta f = 2\mu * 15$ [kHz]	$\tau = 1 / \Delta f$ [μ s]	$\tau + CP$ [μ s]
0	15	66.67	71.43
1	30	33.33	35.71
2	60	16.67	17.86
3	120	8.33	8.92
4	240	4.17	4.46
5	480	2.08	2.23
6	960	1.04	1.11

Come specificato meglio nel seguito, la struttura del segnale è periodica con periodo pari a 10 msec. Se si moltiplica la durata del singolo simbolo per il numero totale di simboli che compongono tale struttura, si otterrà una durata complessiva sensibilmente inferiore a 10 msec. Questa discrepanza emerge poiché ciascun simbolo è preceduto da un prefisso ciclico (ridondante dal punto di vista dell'informazione effettivamente trasmessa) che incrementa di fatto la durata complessiva del simbolo (Fig. 1.4).

Figura 1.4: Illustrazione del prefisso ciclico



Il prefisso ciclico è essenzialmente un intervallo di guardia aggiunto a ciascun simbolo OFDM prima della trasmissione il cui compito è di evitare interferenze che possono derivare dalla sovrapposizione di segnali originati da riflessioni che hanno seguito percorsi differenti e che quindi possono giungere al ricevitore con differenti ritardi. Tenendo conto della durata di ogni simbolo con il proprio prefisso ciclico viene quindi ripristinata la periodicità di 10 msec prevista dallo standard. La Tab. 1.1 riporta la durata del simbolo con e senza l'aggiunta del prefisso ciclico.

Volendo tracciare un paragone tra la tecnologia 5G e la generazione precedente, è evidente come il sistema LTE fosse molto meno flessibile rispetto al suo successore. La larghezza di banda relativa ad una singola sottoportante LTE è infatti fissata inderogabilmente dallo standard ed è pari a 15 kHz. Ciò significa che la larghezza di una sottoportante 4G coincide con quella di una sottoportante 5G esclusivamente nel caso particolare in cui $\mu = 0$. Questa circostanza giocherà un ruolo fondamentale nel determinare le caratteristiche del meccanismo DSS, che verrà descritto più avanti.

Le numerologie tipiche con cui viene ad oggi implementato il segnale 5G sul territorio nazionale sono le seguenti:

- 5G in banda 700 MHz: $\mu = 0$;
- 5G sub-6 GHz in banda 3700 MHz: $\mu = 1$;
- 5G mmWave: $\mu = 3, 4$.

Per il 5G mmWave è piuttosto comune l'utilizzo contemporaneo di diverse numerologie per il medesimo segnale. Ciò avviene attraverso la definizione di porzioni di banda distinte (*bandwidth parts*), ciascuna

costituita da un set di RE contigui che condividono la stessa numerologia. Un esempio classico è quello della definizione di due *bandwidth parts*, una per i canali di controllo e l'altra per il traffico dati.

1.1.4 Struttura temporale del segnale

Il segnale 5G è periodico: la trama discussa nel paragrafo precedente si ripete infatti, strutturalmente identica a sé stessa, con periodo pari a 10 msec. Concettualmente si può schematizzare il segnale 5G nel dominio del tempo come un treno di intervalli temporali, denominati *frames*, che si susseguono ogni 10 msec, come illustrato in Fig. 1.5. Nello specifico, ciascun frame può essere scomposto in strutture più elementari, dette *subframes*, come riportato di seguito in Tab. 1.2. È interessante notare come la numerologia influisca anche sulla struttura temporale del segnale 5G: ogni subframe è infatti costituito da un numero di unità temporali più brevi, dette slot, pari a 2^μ . Ciò accade per accomodare la durata fissa di frame e subframe – rispettivamente 10 e 1 msec – con il tempo di simbolo τ che, come visto in precedenza, dipende dalla numerologia. All'aumentare di μ si hanno infatti simboli caratterizzati da durate progressivamente inferiori: il numero di simboli contenuti all'interno di un subframe, quindi, dovrà aumentare di conseguenza. Un'ultima considerazione riguarda il numero di simboli contenuti in uno slot: nel prosieguo si assumerà che tale numero sia sempre uguale a 14. Tale assunzione è rigorosamente vera nel caso in cui il segnale in esame implementi un prefisso ciclico normale. Non verrà trattata l'alternativa, ovvero l'utilizzo del prefisso ciclico esteso (che riduce a 12 il numero di simboli per slot), in quanto tale configurazione non è ancora mai stata utilizzata da alcun operatore sul territorio nazionale.

Figura 1.5: Struttura temporale di un segnale 5G

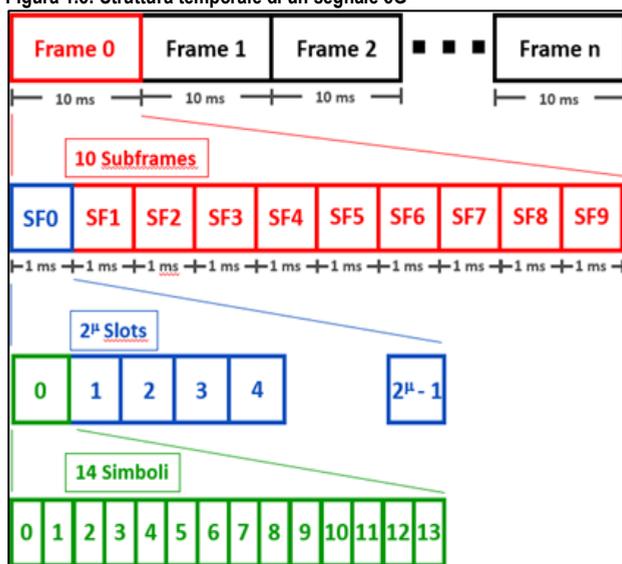


Tabella 1.2: Composizione di un frame al variare della numerologia. Per comodità si sono considerate esclusivamente le configurazioni fino a $\mu = 4$.

μ	$N_{\text{subframe_per_frame}}$	$N_{\text{slot_per_subframe}}$	$N_{\text{sym_per_subframe}}$
0	10	1	14
1	10	2	28
2	10	4	56
3	10	8	112
4	10	16	224

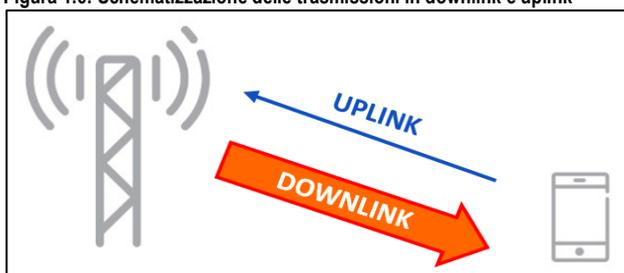
1.1.5 Tecniche di duplexing

Una generica connessione tra un impianto e un terminale mobile è caratterizzata da due distinte tipologie di trasmissione dati:

- la trasmissione in *downlink*, che va dall'impianto al terminale;
- la trasmissione in *uplink*, che segue il percorso inverso.

Una schematizzazione delle due trasmissioni è riportata in Fig. 1.6. La normativa ambientale assegna agli enti deputati al controllo il compito della verifica del rispetto dei limiti esclusivamente rispetto alla trasmissione prodotta dall'impianto radiomobile. Per questo motivo diventa fondamentale riuscire ad identificare con efficacia le due trasmissioni in modo da potersi concentrare esclusivamente sulla tratta di downlink.

Figura 1.6: Schematizzazione delle trasmissioni in downlink e uplink

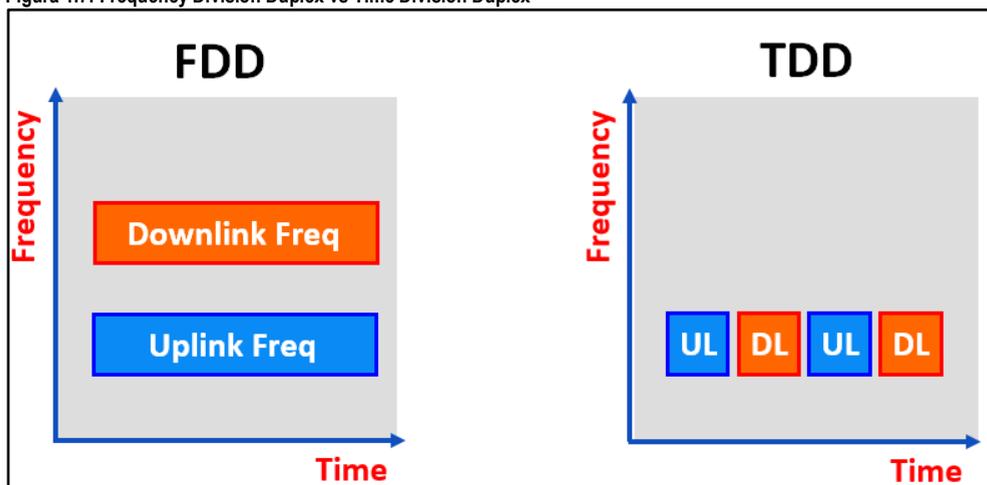


Il primo passo per identificare la trasmissione di interesse è quello di conoscere le modalità attraverso le quali un sistema radiomobile è in grado di assicurare una efficace separazione downlink/uplink che garantisca la totale assenza di interferenze reciproche. Le tecniche di separazione utilizzate dai sistemi di telefonia mobile in generale (e dal sistema 5G in particolare), cui ci si riferisce con il termine duplex, sono sostanzialmente due:

- **Frequency Division Duplex (FDD)**: le due trasmissioni occupano bande di frequenza distinte;
- **Time Division Duplex (TDD)**: le due trasmissioni condividono la medesima banda di frequenza e la separazione avviene attraverso un rigido schema di alternanza temporale.

Le due modalità di duplex sono riportate in Fig. 1.7.

Figura 1.7: Frequency Division Duplex vs Time Division Duplex



Poiché le due modalità operano in modi estremamente differenti tra loro è necessario sviluppare delle procedure operative specifiche che consentano di valutare correttamente l'esposizione prodotta in entrambi i casi.

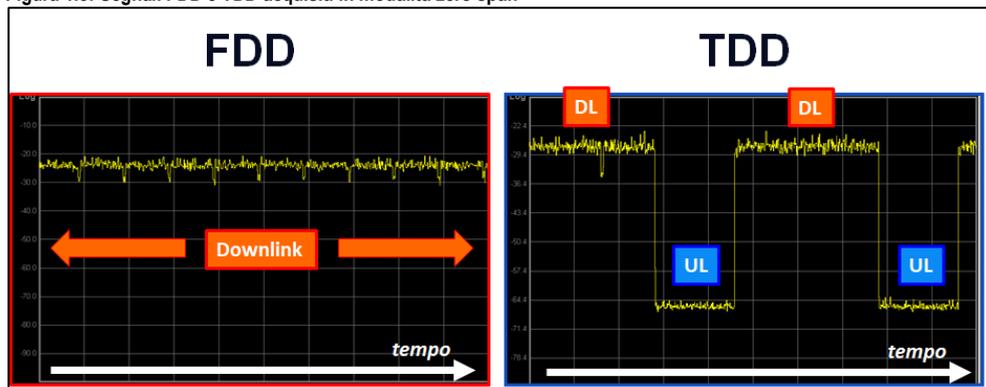
Il sistema 5G attualmente implementato sul territorio nazionale utilizza le due modalità di duplex in funzione della banda di frequenza utilizzata dal servizio. Nello specifico:

- il sistema 5G a 700 MHz è esercito in modalità FDD;
- i sistemi a 3700 MHz e mmWave sono eserciti in modalità TDD.

La modalità di duplex utilizzata dall'impianto influisce in maniera diretta anche sull'impatto elettromagnetico prodotto dallo stesso. A dimostrazione di quanto detto, si riportano nella figura

successiva due immagini rispettivamente relative ad un segnale 5G FDD e TDD (Fig. 1.8) in cui si riporta l'andamento temporale del segnale una volta fissata la frequenza di analisi. Tale modalità di acquisizione è nota come misura a zero span e verrà descritta nei capitoli successivi.

Figura 1.8: Segnali FDD e TDD acquisiti in modalità zero span



Come verrà approfondito dettagliatamente nei capitoli successivi dedicati alle tecniche di misura, la misura in zero span rappresenta l'andamento temporale dell'integrale della potenza ricevuta, in corrispondenza del valore di frequenza centrale impostata sull'analizzatore di spettro e con una finestra di integrazione pari all'ampiezza della *Resolution Bandwidth* (RBW). Dai grafici in Fig. 1.8 si evince dunque che un sistema FDD è caratterizzato da un'emissione continua nel tempo, mentre uno TDD presenta degli intervalli in cui la sorgente si "spegne" in modo da rendere disponibile la frequenza per la trasmissione uplink. A livello di esposizione, questo differente comportamento si traduce nell'applicazione di uno specifico fattore F_{TDC} [2] alla potenza autorizzata, che assume i seguenti valori:

- $F_{TDC} = 1$ per i sistemi FDD;
- $F_{TDC} < 1$ per i sistemi TDD.

In altre parole, l'adozione di una specifica configurazione TDD conduce alla definizione di una potenza efficace definita come il prodotto della massima potenza per il fattore F_{TDC} , da utilizzare per tutte le valutazioni inerenti all'impatto elettromagnetico prodotto dall'impianto.

1.1.6 Struttura e modalità di trasmissione dei canali di controllo

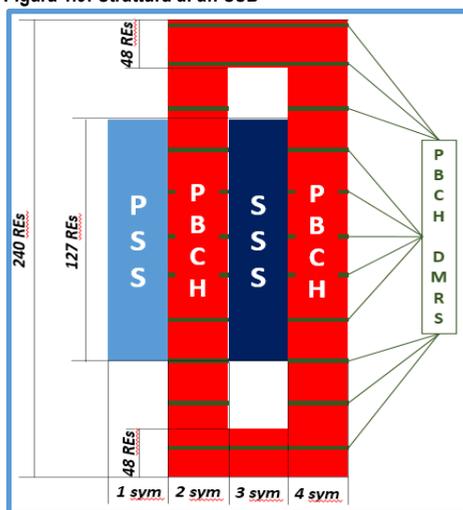
Il termine "canali di controllo" è stato storicamente associato a quei canali fisici di una specifica tecnologia radiomobile che assolvono ai fondamentali processi di segnalazione della cella, procedure di aggancio ed equalizzazione del segnale. Nei sistemi 5G rivestono particolare interesse i seguenti canali fisici:

- **Primary e Secondary Synchronization Signal (PSS, SSS):** sono i canali fisici utilizzati dai terminali mobili per le procedure iniziali di sincronizzazione temporale con la stazione radio base. Questi canali trasportano delle sequenze precodificate che, una volta demodulate correttamente dal terminale mobile, consentono di ricavare il *Cell ID* specifico della cella interessata alla comunicazione con il terminale;
- **Physical Broadcast Channel (PBCH):** è il canale fisico che trasporta informazioni cruciali per i successivi step di accesso al sistema. In particolare, il PBCH ospita il Master Information Block (MIB), un flusso di bit che il terminale decodifica per ottenere informazioni sulla configurazione della cella cui sta tentando di agganciarsi;
- **Physical Broadcast Channel Demodulation Reference Signal (PBCH-DMRS):** è il segnale di riferimento che il terminale utilizza per effettuare la decodifica del PBCH. La posizione dei RE occupati dal PBCH-DMRS, insieme alla specifica sequenza implementata, dipendono dal Cell ID. Per questo la procedura di decodifica del PBCH avviene in uno step che è temporalmente successivo alla decodifica del PSS e SSS.

Si noti che i canali di controllo della tecnologia 5G sono del tutto analoghi a quelli del 4G. L'unico segnale che non ha una specifica controparte nel 4G è il PBCH-DMRS. Il segnale 4G non ha infatti bisogno di un *Reference Signal* (RS) dedicato per il PBCH in quanto può sfruttare il *Cell Specific Reference Signal* (CRS) anche per la decodifica del PBCH. Il 5G invece non ha un equivalente del CRS e quindi ha bisogno di DMRS dedicati per ciascuno dei diversi canali che devono essere demodulati dal terminale mobile.

Nella tecnologia 5G i canali di controllo sono trasmessi in blocco attraverso una struttura compatta chiamata *Synchronization Signal Block* (SSB). La struttura di un SSB è rappresentata in Fig. 1.9.

Figura 1.9: Struttura di un SSB



Un SSB occupa 240 sottoportanti per una durata temporale pari a 4 simboli, che sono strutturati come segue:

- il primo simbolo ospita il PSS nelle 127 sottoportanti centrali. Le restanti sottoportanti rimangono inutilizzate;
- il secondo simbolo ospita il PBCH e il PBCH-DMRS;
- il terzo simbolo ospita il SSS nelle 127 sottoportanti centrali e il PBCH più il PBCH-DMRS nelle prime e ultime 48 sottoportanti. Le restanti sottoportanti rimangono inutilizzate;
- il quarto simbolo è strutturalmente identico al secondo e ospita il PBCH e il PBCH-DMRS.

Come già anticipato, le specifiche sottoportanti che trasportano il PBCH-DMRS in ciascuno dei quattro simboli sono definite a partire dal Cell ID.

Esistono diverse configurazioni che, da standard, possono essere implementate per la trasmissione degli SSB nel dominio del tempo. Gli SSB vengono infatti raggruppati in *bursts* – ovvero raggruppamenti di più SSB – che vengono trasmessi con una specifica periodicità. La periodicità tipica dei bursts per i segnali 5G attualmente implementati in Italia è 20 msec, ma lo standard 3GPP prevede anche altre possibilità. I bursts sono composti da un numero massimo di SSB determinato dal parametro L_{max} che è intimamente legato alla specifica banda di frequenza nella quale è implementato il segnale 5G. Come regola generale si può assumere che:

- $L_{max} = 4$ se $f_c < 3$ GHz;
- $L_{max} = 8$ se 3 GHz $< f_c < 6$ GHz;
- $L_{max} = 64$ se $f_c > 6$ GHz.

In un burst non devono per forza essere presenti tutti gli SSB previsti dallo specifico L_{max} : alcuni SSB possono di fatto essere “spenti” e quindi non trasmessi.

Il posizionamento dei bursts di SSB all’interno della trama del segnale 5G segue delle regole rigorose. Tale rigore è necessario in quanto gli SSB rappresentano i segnali che gestiscono le primissime fasi della procedura di aggancio del terminale mobile e, pertanto, sono i primi segnali che il terminale mobile “cerca” per tentativi, non avendo alcuna informazione preliminare sulle caratteristiche del segnale. Per far sì che questa procedura di aggancio funzioni, la posizione degli SSB in trama deve essere codificata da standard, in modo da fornire ai terminali una lista – vasta ma enumerabile – di locazioni di trama in cui è possibile trovare un SSB. Poiché la ricerca degli SSB rappresenta un passaggio cruciale anche nell’ambito delle misure sul segnale 5G, nel seguito verranno discusse le opzioni di allocazione degli SSB in trama, in frequenza e nel tempo:

- **Allocazione in frequenza:** a differenza della tecnologia 4G in cui i canali di sincronizzazione sono da standard collocati sempre alla frequenza centrale dell’intero segnale 4G, nella tecnologia 5G gli SSB possono essere caratterizzati da una frequenza centrale differente rispetto al valore della portante. Le possibili posizioni in frequenza, limitate ed enumerabili, sono determinate dal *Global Synchronization Channel Number* (GSCN). Tale numero

determina le possibili frequenze centrali degli SSB di uno specifico segnale 5G attraverso le formule riportate nella tabella 5.4.3.1-1 del documento [3], riproposta in Tab. 1.3.

Tabella 1.3: Global Synchronization Channel Number, ovvero l'insieme dei valori di frequenza centrale consentiti per gli SSB in funzione della banda di frequenza del segnale 5G considerato

Frequency range	SS Block frequency position SSREF	GSCN	Range of GSCN
0 – 3000 MHz	$N * 1200 \text{ kHz} + M * 50 \text{ kHz}$, $N=1:2499$, $M \in \{1,3,5\}$	$3N + (M-3)/2$	2 – 7498
3000 – 24250 MHz	$3000 \text{ MHz} + N * 1.44 \text{ MHz}$, $N = 0:14756$	$7499 + N$	7499 – 22255
24250 – 100000 MHz	$24250.08 \text{ MHz} + N * 17.28 \text{ MHz}$, $N = 0:4383$	$22256 + N$	22256 – 26639

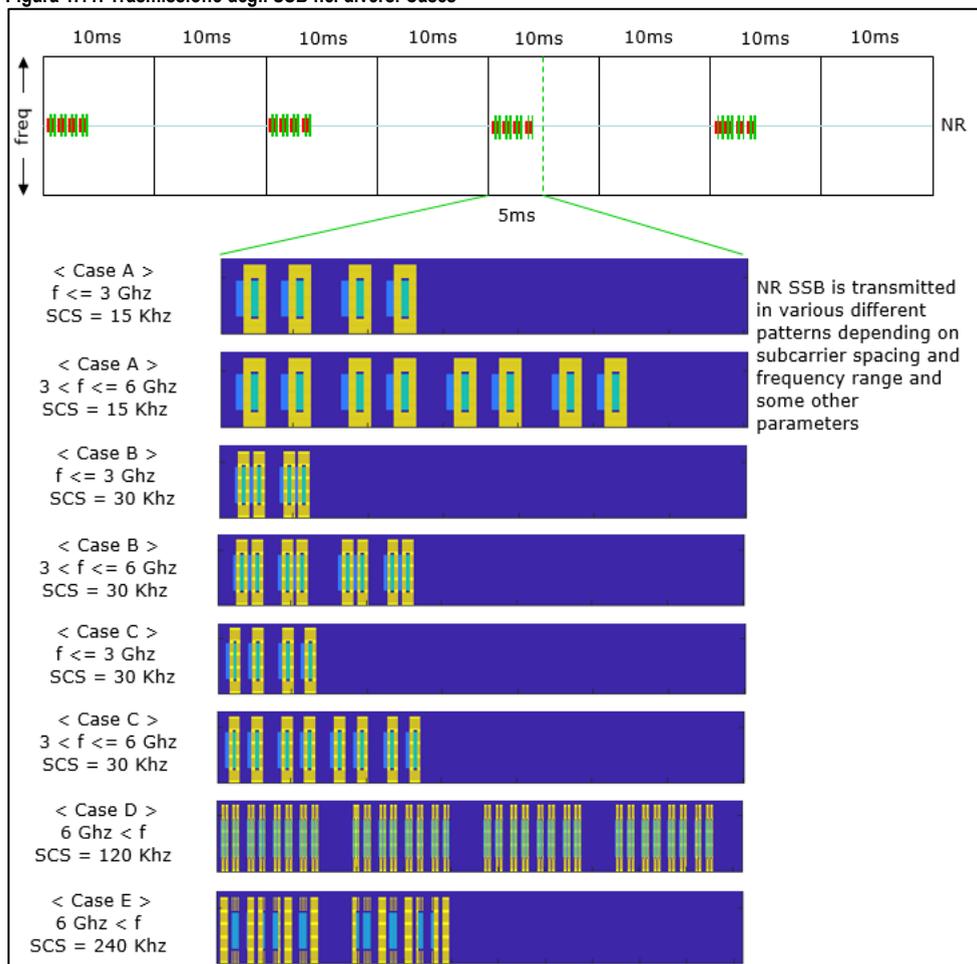
La lista ottenuta da tali formule, che cambia in funzione della banda di frequenza del segnale 5G trasmesso, è il punto di partenza per la procedura di aggancio adottata dal terminale mobile e, di conseguenza, anche per le misure con analizzatori di spettro. Nello specifico, dunque, conoscendo la frequenza centrale del segnale 5G, la sua larghezza di banda e la larghezza di banda degli SSB (che essendo composti da 240 sottoportanti può essere facilmente ricavata dalla formula $240 * 2^\mu * 15 \text{ kHz}$) si può applicare la formula GSCN relativa allo specifico range di frequenza del segnale 5G per ottenere una lista delle potenziali frequenze centrali degli SSB. Il valore corretto all'interno della lista potrà essere successivamente verificato a posteriori attraverso opportune misure sperimentali;

- **Allocazione in tempo:** la trasmissione di un burst di SSB è confinata all'interno di una finestra temporale di 5 msec che si ripete, come già sottolineato, con periodo tipicamente pari a 20 msec. Tuttavia, la posizione del simbolo di partenza di ciascun SSB non è definita univocamente. Lo standard prevede diversi pattern (chiamati Cases), dipendenti dalla numerologia e dalla banda di frequenza in cui il segnale 5G è implementato, per ciascuno dei quali è definito l'indice del simbolo di partenza di ciascun SSB contenuto all'interno di un burst. Le specifiche dei diversi Cases sono descritte in [4] e riportate in Fig. 1.10, dove i valori assunti dall'indice s rappresentano gli indici relativi ai simboli di partenza di ciascun SSB per lo specifico Case. La Fig. 1.11 aiuta a decifrare la Fig. 1.10 e visualizzarla in maniera più intuitiva, mostrando la posizione nel dominio del tempo degli SSB al variare del Case di riferimento.

Figura 1.10: Indici dei simboli di partenza di ciascun SSB nei diversi Case previsti dallo standard

Subcarrier Spacing	OFDM Symbol (s)	f <= 3 Ghz	3 Ghz < f <= 6 Ghz	6 Ghz < f
Case A : 15 KHz	{2,8} + 14 n	n = 0,1 s = 2,8,16,22 (Lmax = 4)	n = 0,1,2,3 s = 2,8,16,22,30,36,44,50 (Lmax = 8)	
Case B : 30 KHz	{4,8,16,20}+28n	n = 0 s = 4,8,16,20 (Lmax = 4)	n = 0,1 s = 4,8,16,20,32,36,44,48 (Lmax = 8)	
Case C : 30 KHz	{2,8} + 14 n	n = 0,1 s = 2,8,16,22 (Lmax = 4)	n = 0,1,2,3 s = 2,8,16,22,30,36,44,50 (Lmax = 8)	
Case D : 120 KHz	{4,8,16,20} + 28n			n=0, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18 s = 4,8,16,20, 32,36,44,48, 60,64,72,76, 88,92,100,104, 144,148,156,160, 172,176,184,188, 200,204,212,216, 228,232,240,244, 284,288,296,300, 312,316,324,328, 340,344,352,356, 368,372,380,384, 424,428,436,440, 452,456,464,468, 480,484,492,496, 508,512,520,524 (Lmax = 64)
Case E : 240 KHz	{8, 12, 16, 20, 32, 36, 40, 44} + 56n			n=0, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 s = 8,12,16,20, 32,36,40,44, 64,68,72,76, 88,92,96,100, 120,124,128,132, 144,148,152,156, 176,180,184,188, 200,204,208,212, 288,292,296,300, 312,316,320,324, 344,348,352,356, 368,372,376,380, 400,404,408,412, 424,428,432,436, 456,460,464,468, 480,484,488,492 (Lmax = 64)

Figura 1.11: Trasmissione degli SSB nei diversi Cases

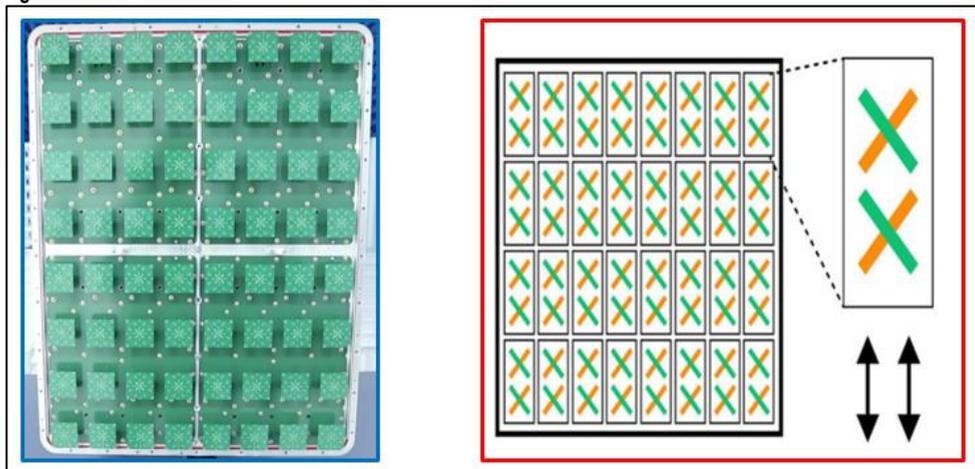


1.1.7 Antenne massive-MIMO e gestione dei beam

Le antenne *massive Multiple Input Multiple Output* (mMIMO) tipicamente utilizzate per l'implementazione della rete 5G sono sistemi trasmissivi con caratteristiche profondamente differenti rispetto al passato. Tali sistemi trasmissivi sono infatti caratterizzati dalla presenza di un numero elevato di elementi di antenna che concorrono ad aumentare l'efficienza energetica e spettrale del

sistema. Per le finalità di questo documento, un'antenna mMIMO può essere schematizzata come una matrice planare di sistemi radianti indipendenti, integrati in un unico pannello compatto (Fig. 1.12).

Figura 1.12: Antenna mMIMO



La discontinuità più marcata che l'utilizzo di questa tipologia di antenne introduce rispetto alle precedenti generazioni tecnologiche è la capacità di sintetizzare fasci di radiazione con direzioni di massimo puntamento che variano in maniera dinamica in funzione dell'area da servire e della richiesta dell'utenza. Grazie a questa peculiarità, il sistema 5G assicura prestazioni ottimizzate rispetto alle generazioni precedenti garantendo:

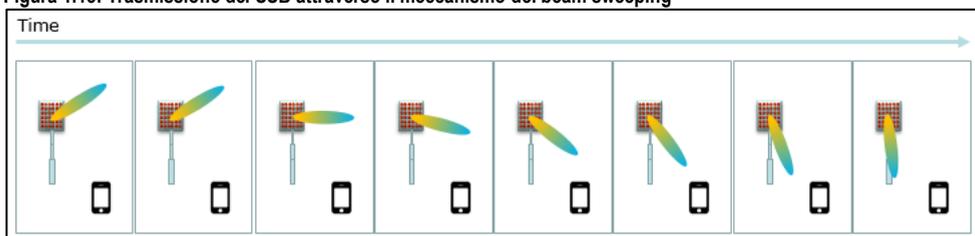
- copertura ottimale a bordo cella;
- aumento della velocità alla quale i dati viaggiano nel sistema (*throughput*);
- abilitazione per l'utilizzo in banda millimetrica.

Dal punto di vista della modalità di trasmissione del segnale, una grande novità introdotta dalle antenne mMIMO è rappresentata dalla peculiare gestione dei canali di controllo del sistema. In passato i sistemi di telefonia mobile hanno trasmesso questi canali attraverso l'unico fascio statico di radiazione sintetizzabile dall'antenna, condiviso con il traffico dati. Questa limitazione determina inevitabilmente una perdita di efficienza e calo delle prestazioni poiché tipologie di segnali profondamente differenti tra loro (controllo e traffico dati) sono comunque costrette a condividere le medesime modalità di trasmissione. Il 5G, grazie all'utilizzo di antenne mMIMO, sovverte questo consolidato paradigma dedicando fasci di radiazione separati per traffico e controllo. Il grande vantaggio sta nel fatto che il sistema può ottimizzare le modalità di trasmissione separatamente per i due diversi fasci, sfruttando al massimo l'ampia flessibilità garantita dall'utilizzo delle antenne mMIMO. Nel seguito verranno descritte qualitativamente le caratteristiche della trasmissione dei canali di controllo e del traffico dati.

1.1.8 Trasmissione SSB attraverso il beam sweeping

Gli SSB che costituiscono il burst vengono trasmessi mediante la tecnica del beam sweeping: diversi SSB vengono trasmessi su fasci che si attivano in maniera sequenziale e che puntano in direzioni diverse dello spazio (Fig. 1.13).

Figura 1.13: Trasmissione dei SSB attraverso il meccanismo del beam sweeping

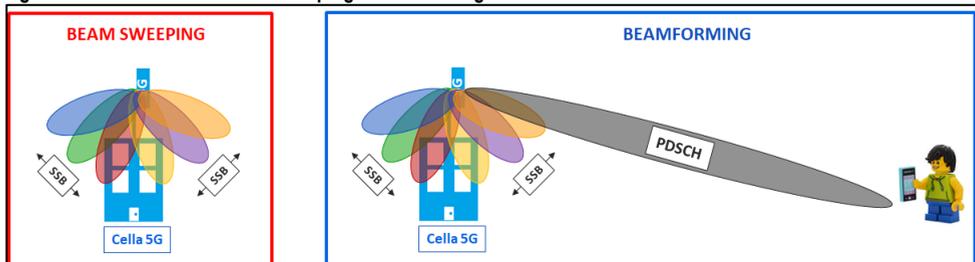


In questo modo l'antenna 5G riesce a coprire una zona molto estesa consentendo un considerevole risparmio energetico rispetto al medesimo scenario in tecnologia 4G e precedenti. Inoltre, poiché gli SSB sono intrinsecamente indicizzati dal sistema e a ciascun indice corrisponde una specifica direzione di puntamento del fascio, il terminale mobile può stimare in tempo reale la sua posizione relativa rispetto all'impianto, trasmettendo tale informazione alla stazione radio base che la userà per la corretta trasmissione del traffico dati.

1.1.9 Trasmissione canale dati attraverso beamforming

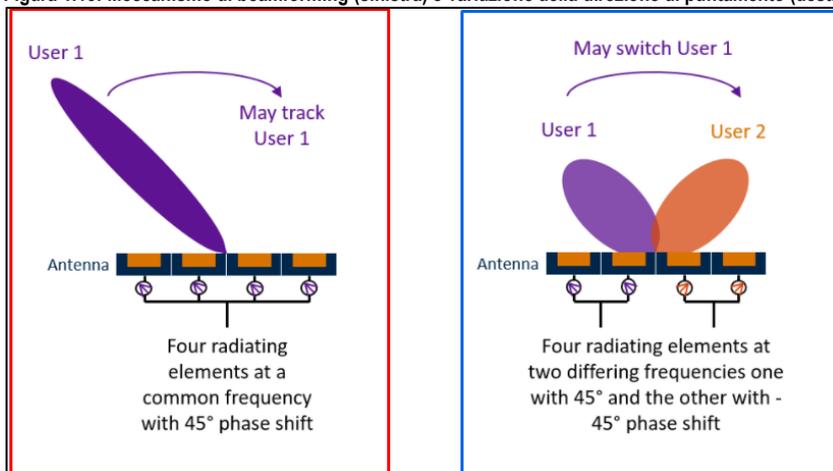
Nel momento in cui il terminale di un utente riceve il messaggio di segnalazione trasportato dal SSB e risponde con una richiesta di accesso alla rete per usufruire del servizio, la stazione radio base instaura una connessione dati, dedicando all'utente uno specifico fascio di traffico *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH). Per i fasci di traffico, l'antenna attiva implementa un meccanismo ancora più raffinato di quello descritto in precedenza per gli SSB, chiamato *beamforming*. Il termine indica la capacità dell'antenna attiva di 'modellare' un fascio di radiazione ad alto guadagno, stretto e fortemente direzionale verso uno specifico utente. La differenza tra beam sweeping e beamforming è schematizzata in Fig. 1.14.

Figura 1.14: Differenza tra beam sweeping e beamforming



Il meccanismo di beamforming può essere utilizzato dalle antenne attive 5G in virtù delle loro caratteristiche ingegneristiche e costruttive. Schematizzando l'antenna come un array planare di elementi radianti, il beamforming può essere ottenuto aumentando il numero di tali elementi che trasmettono contemporaneamente lo stesso segnale con la medesima frequenza e con fase ed ampiezza tali che l'interferenza complessiva determini la formazione di un unico fascio stretto e orientato nella direzione desiderata. All'aumentare del numero degli elementi che costituiscono l'antenna, il fascio sintetizzato diventa sempre più stretto e focalizzato (Fig. 1.15 a sinistra). Un'altra caratteristica fondamentale del beamforming è la dinamicità del fascio, che può cambiare direzione per seguire l'utente durante il proprio movimento. Queste modifiche della direzione di puntamento possono essere ottenute in tempo reale andando a variare la fase degli elementi radianti. In maniera analoga, l'antenna può organizzarsi in modo da definire diversi gruppi di elementi radianti che condividano, durante lo stesso intervallo temporale, la medesima fase: in questo modo il sistema sarà in grado di servire contemporaneamente più utenti attraverso fasci di radiazione che puntano in direzioni diverse (Fig. 1.15 a destra).

Figura 1.15: Meccanismo di beamforming (sinistra) e variazione della direzione di puntamento (destra)

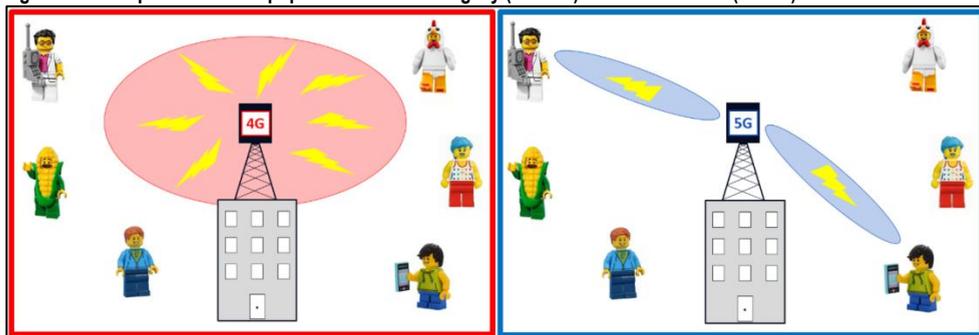


Le modalità attraverso le quali è possibile implementare il beamforming sono due:

- **Continuous beamforming:** in questa modalità i pesi associati ai diversi elementi radianti dell'antenna mMIMO vengono variati con continuità, sulla base delle informazioni trasmesse dal terminale mobile all'impianto attraverso il canale di uplink. Questa tipologia di beamforming beneficia in maniera particolare della modalità di duplexing TDD, in cui downlink e uplink condividono la medesima frequenza. Attraverso il continuous beamforming un sistema 5G è in grado di variare con continuità la direzione del fascio PDSCH, seguendo l'utente con un'eccellente risoluzione spaziale;
- **Grid of Beams:** in questa modalità, il sistema 5G copre lo spazio attraverso una matrice di fasci precodificati, attivando di volta in volta esclusivamente quello più vicino all'utente attivo. Di fatto, la copertura avviene attraverso un processo di 'discretizzazione' dell'angolo solido visto dall'impianto, un approccio concettualmente antitetico rispetto alla filosofia del continuous beamforming.

Un'ultima considerazione va fatta su come varia qualitativamente l'esposizione della popolazione con il passaggio da tecnologie *legacy*, che utilizzano antenne tradizionali, a quelle di ultima generazione caratterizzate da sistemi trasmissivi mMIMO. Un esempio è schematizzato in Fig. 1.16.

Figura 1.16 – Esposizione della popolazione: sistemi legacy (sinistra) e sistemi mMIMO (destra)



Si passa infatti da uno scenario in cui la forma dei fasci di irraggiamento può essere immaginata come sostanzialmente stazionaria e immutabile nel tempo (Fig. 1.16 a sinistra) ad un altro in cui i fasci variano dinamicamente in quanto strettamente dipendenti dal numero degli utenti attivi e dalla loro distribuzione nello spazio (Fig. 1.16 a destra). Questo tratto di forte discontinuità rispetto al passato rappresenta la motivazione principale per la profonda revisione delle procedure operative di valutazione dell'esposizione umana ai campi elettromagnetici generati da impianti di telefonia mobile, intrapresa dagli organismi deputati al controllo all'avvento della tecnologia 5G.

1.1.10 Modalità di trasmissione Stand-Alone e Non Stand-Alone

Un'ultima considerazione va fatta sulla distinzione dei sistemi 5G tra *Stand-Alone* (SA) e *Non Stand-Alone* (NSA). Nel primo caso, il sistema 5G è autosufficiente poiché tutte le informazioni di rete veicolate dai *System Information Blocks* (SIB) viaggiano direttamente sul frame 5G. Nel secondo caso, invece, tali informazioni di rete viaggiano sulla sottostante rete 4G, la cui presenza diventa quindi una prerogativa imprescindibile per il funzionamento di tali segnali.

1.2 TECNOLOGIA 5G DSS

La tecnologia DSS si riferisce ad una particolare modalità di funzionamento della rete 4G che consente la condivisione di una porzione di banda utile con la nuova tecnologia 5G. Nello specifico, l'esercizio contemporaneo di segnale 4G e 5G avviene attraverso la condivisione dinamica della medesima banda di frequenza e l'utilizzo della stessa infrastruttura di rete. Al momento della stesura del presente documento, gli operatori di rete italiani all'interno della banda a 700 MHz (la porzione di spettro elettromagnetico recentemente liberata dalla TV digitale) utilizzano quasi esclusivamente la tecnologia DSS attraverso segnali caratterizzati da una canalizzazione pari a 10 MHz. Questa banda ha rivestito una particolare importanza nello sviluppo della rete 5G in virtù delle eccellenti caratteristiche propagative che tale intervallo di frequenze garantisce, consentendo agli operatori di rete di rispettare le esigenze di macro-copertura specialmente in contesti urbanizzati. In virtù della condivisione di spettro operata dalle tecnologie, il segnale 5G operante in modalità DSS utilizza le stesse antenne già in uso per il 4G nonché il medesimo standard di trasmissione. Ne consegue che:

- la frequenza centrale di trasmissione è la stessa del segnale 4G ospitante;
- il duplexing utilizzato è lo stesso per le due tipologie di segnali (nello specifico, FDD per queste bande di frequenza);
- poiché le antenne utilizzate per la trasmissione dei segnali sono di tipo tradizionale, non sussistono fasci di radiazione tempo-varianti (no beam sweeping - no beamforming);
- i due segnali devono condividere la medesima numerologia, perciò il segnale 5G sarà caratterizzato da sottoportanti spaziate tra loro di 15 kHz ($\mu = 0$).

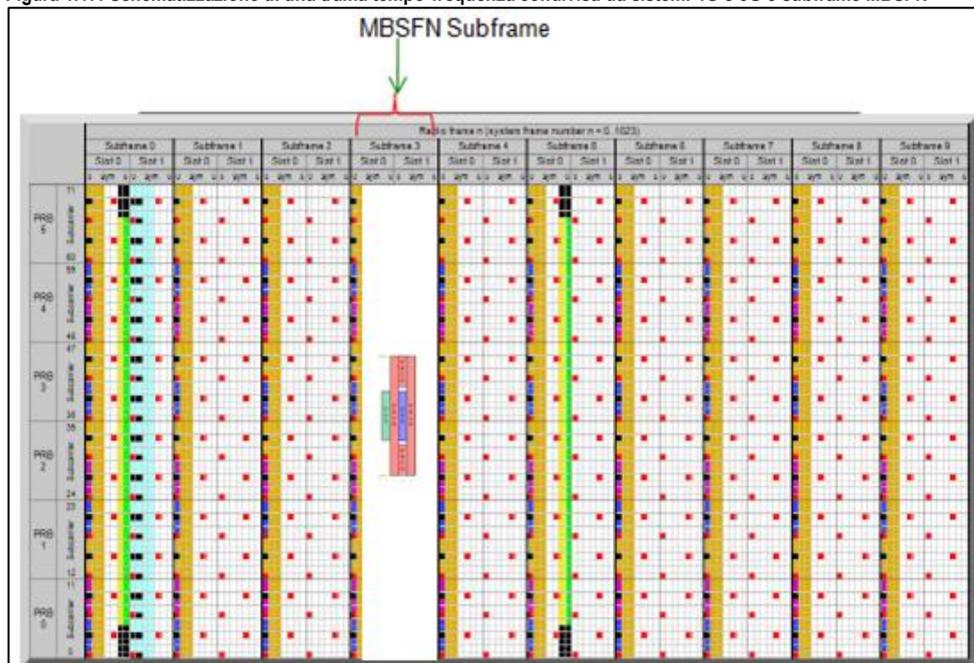
Condizione necessaria affinché la condivisione dinamica dello spettro consenta ai due sistemi di coesistere senza interferire è che i rispettivi canali di controllo non confliggano. In altre parole, gli SSB della tecnologia 5G devono essere posizionati in locazioni di trama non occupate dai canali di controllo del 4G. Lo standard prevede diverse alternative efficaci per assicurare la coesistenza dei due sistemi ma quella attualmente implementata in Italia si basa sull'utilizzo di una specifica configurazione della rete 4G chiamata *Multicast-Broadcast Single Frequency Network* (MBSFN). Tale configurazione, originariamente pensata per consentire la diffusione di contenuti multimediali attraverso trasmissioni broadcast e multicast veicolate dalla rete 4G, prevede la designazione di specifici subframes della trama del segnale 4G da destinare alla trasmissione dei suddetti contenuti. Sebbene questa applicazione non abbia riscosso un particolare successo nel nostro Paese, l'utilizzo di subframes

MBSFN è tornato prepotentemente alla ribalta come soluzione tecnica per l'implementazione del DSS. Nello specifico, eventuali conflitti tra SSB e i canali di controllo del 4G vengono evitati riservando uno (o più) subframe MBSFN esclusivamente alla trasmissione del SSB e, più in generale, del segnale 5G. Per fare in modo che tutto funzioni correttamente, è necessario seguire delle regole molto rigide:

- i subframes MBSFN non possono coincidere con quelli che da standard ospitano i canali di sincronizzazione e il PBCH del 4G (subframes #0 e #5);
- la trasmissione del RS del 4G nei subframes MBSFN viene modificata (quando non del tutto evitata) in modo da escludere collisioni con il SSB 5G;
- per esigenze di implementazione, nei sistemi DSS è attivo un unico SSB.

Una schematizzazione dell'utilizzo del subframe MBSFN per la trasmissione del SSB 5G all'interno della trama 4G è riportata in Fig. 1.17.

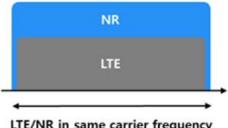
Figura 1.17: Schematizzazione di una trama tempo-frequenza condivisa da sistemi 4G e 5G e subframe MBSFN



Un altro importante aspetto da tenere in considerazione in un sistema DSS è la diversa occupazione di banda tra segnali 4G e 5G. A parità di canalizzazione, infatti, il sistema 5G garantisce una maggiore ottimizzazione dell'occupazione di banda disponibile, aumentando pertanto il numero di sottoportanti

che caratterizzano il segnale. La Fig. 1.18 rappresenta graficamente lo “scarto” tra 4G e 5G, con l’indicazione quantitativa in base alla larghezza di banda.

Figura 1.18: Occupazione spettrale a parità di canalizzazione per segnali 4G e 5G

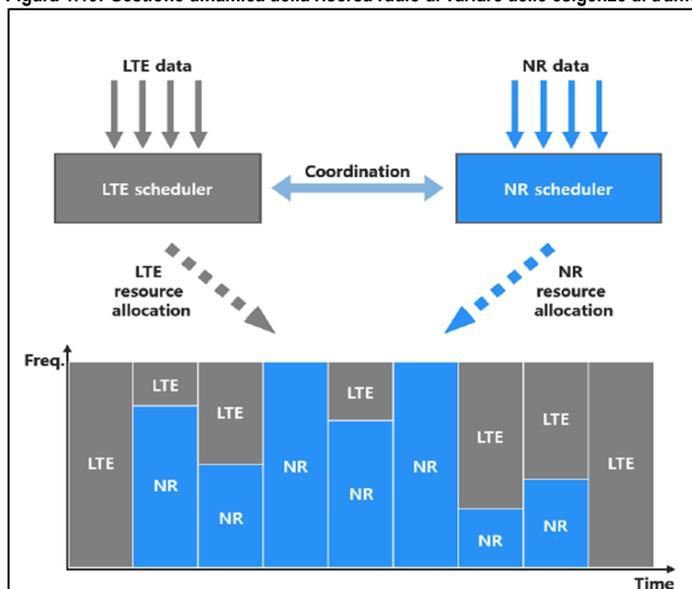


Larghezza di banda [MHz]	Segnale 4G		Segnale 5G	
	Numero di Physical Resource Blocks	Numero di sottoportanti	Numero di Physical Resource Blocks	Numero di sottoportanti
1.4	6	72	-	-
3	15	180	-	-
5	25	300	25	300
10	50	600	52	624
15	75	900	79	948
20	100	1200	106	1272

Limitandosi alla larghezza di banda dei segnali DSS attualmente implementati in banda 700 MHz (10 MHz), si può notare che il segnale 5G occupa due *Physical Resource Block* (PRB) aggiuntivi rispetto alla controparte 4G (52 contro 50). Ciò si traduce in 24 sottoportanti - equamente distribuite ai due estremi del ‘panettone’ - che sono da standard precluse al segnale 4G e che, di fatto, possono essere utilizzate esclusivamente da trasmissioni 5G.

Un’ultima considerazione va fatta relativamente al canale dati PDSCH dei due sistemi. In questo caso il DSS garantisce una gestione della trama molto flessibile - dinamica, per l’appunto - che privilegia di volta in volta il sistema che ha la maggiore necessità di risorsa radio. Un’esemplificazione grafica della condivisione della risorsa radio è rappresentata in Fig. 1.19.

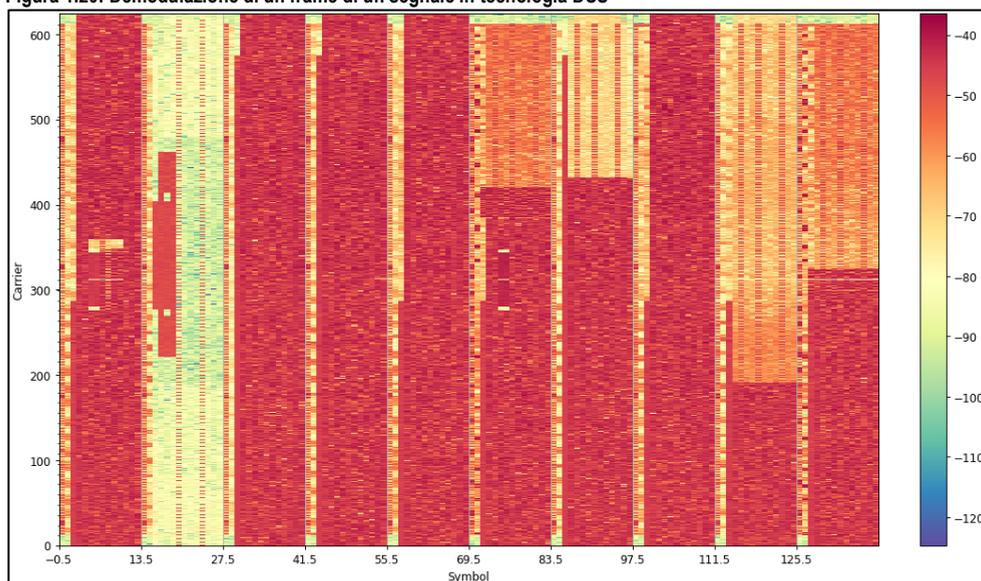
Figura 1.19: Gestione dinamica della risorsa radio al variare delle esigenze di traffico dei due sistemi



Tutte le caratteristiche del sistema DSS possono essere riconosciute in un frame tempo-frequenza-potenza ricostruito mediante un analizzatore vettoriale (Fig. 1.20). Nello specifico è possibile riconoscere:

- l'utilizzo del duplexing FDD;
- il subframe MBSFN (#1) che ospita l'unico SSB;
- le 24 sottoportanti aggiuntive alle estremità della canalizzazione, utilizzate esclusivamente da canali 5G;
- i canali di controllo del 4G (canali di sincronizzazione, PBCH e RS) presenti nelle locazioni previste dallo standard (subframes #0 e #5 per PSS, SSS e PBCH, tutti i subframes tranne quello MBSFN per il RS).

Figura 1.20: Demodulazione di un frame di un segnale in tecnologia DSS

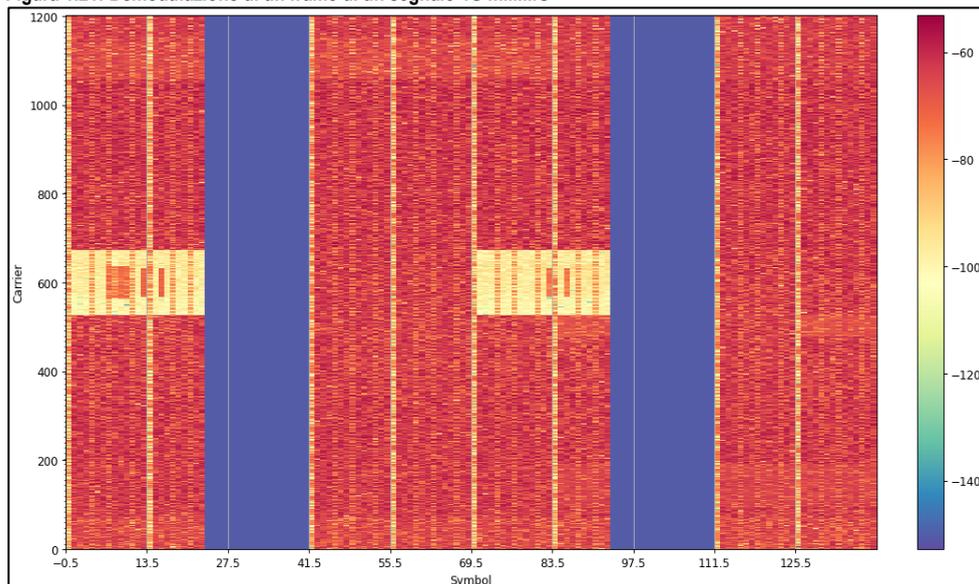


Un'ultima riflessione va fatta sulle possibili tecniche di estrapolazione, di cui si parlerà approfonditamente nel Par. 4.1, da adottare nel caso di misure su sistemi DSS. La contemporanea presenza di canali di controllo appartenenti alla tecnologia 4G e 5G permette, in linea di principio, di applicare indistintamente le metodologie sviluppate per l'una o per l'altra tecnologia. L'unica accortezza da tenere a mente riguarda il numero di sottoportanti da considerare all'interno della formula di estrapolazione che deve essere quello appartenente ad un segnale 5G relativo alla specifica canalizzazione del segnale preso in considerazione.

1.3 TECNOLOGIA 4G TDD MMIMO

Il fatto che la diffusione di antenne attive mMIMO nel nostro Paese sia, di fatto, coincisa con l'avvento dei sistemi 5G ha portato erroneamente ad associare univocamente le due tecnologie. In verità il meccanismo del mMIMO e del beamforming è abilitato anche per sistemi 4G, come dimostrato anche dagli *use-cases* riportati nel documento IEC TR 62669 [5] che prendono a riferimento analisi effettuate su impianti in tecnologia 4G a supporto della definizione dei fattori statistici da applicare per la corretta valutazione dell'impatto generato da sistemi mMIMO. Il tema del 4G mMIMO è tornato alla ribalta a seguito dell'implementazione su tutto il territorio italiano nella banda di frequenza a 2600 MHz. Questa tipologia di segnale è del tutto conforme allo standard 4G e abilita il meccanismo di beamforming esclusivamente per il traffico dati PDSCH. Si ritiene opportuno includere questa tecnologia all'interno delle presenti Linee Guida in quanto le tradizionali tecniche di misura ed estrapolazione utilizzate per gli impianti 4G presentano profonde criticità se applicate a questi nuovi segnali. Tali procedure, infatti, si basano sull'assunto che i canali di controllo della tecnologia 4G siano sempre trasmessi (e quindi ricevuti) alla massima potenza. Tale assunzione ovviamente decade davanti a sistemi che implementano il beamforming del PDSCH, per le stesse motivazioni già descritte nei precedenti paragrafi. Trattandosi di sistemi 4G ormai ben consolidati, una trattazione approfondita esula dalle finalità del presente documento [6]. Ci si limiterà pertanto ad elencare le caratteristiche salienti di questa tipologia di segnali, attraverso l'ausilio di un frame tempo-frequenza-potenza ricostruito mediante un analizzatore vettoriale (Fig. 1.21).

Figura 1.21: Demodulazione di un frame di un segnale 4G mMIMO



Nello specifico è possibile notare che:

- il sistema adotta uno schema di duplexing TDD, con gli slot di uplink caratterizzati da valori molto bassi di potenza ricevuta (slot in blu in Fig. 1.21);
- a differenza del segnale 4G 'canonico', sono presenti delle regioni di guardia in cui non viene allocato il PDSCH attorno ai canali di sincronizzazione e PBCH;
- sempre in merito ai canali di sincronizzazione si può notare che, come previsto dallo standard, gli stessi sono posizionati in simboli differenti rispetto a quelli previsti dallo schema FDD;
- il confronto tra le tonalità di rosso che caratterizzano i canali di controllo e il PDSCH lascia chiaramente intendere che il traffico dati viene ricevuto con una potenza estremamente superiore rispetto al controllo. Questa caratteristica è peculiare dei sistemi mMIMO, indipendentemente dalla tecnologia implementata.

In sintesi, l'utilizzo di antenne mMIMO per sistemi 4G fa sì che i contenuti tecnici di questa Linea Guida possano essere applicati anche per tecnologie precedenti al 5G.

1.4 TECNOLOGIA 5G FIXED WIRELESS ACCESS

Un'ultima tecnologia che vale la pena di essere discussa è il 5G *Fixed Wireless Access* (FWA). La caratteristica principale di tali impianti non risiede tanto nella tecnologia utilizzata (5G analogo a quello discusso nei paragrafi precedenti), quanto nel particolare utilizzo. Il servizio FWA consente infatti di offrire ad un'utenza tipicamente residenziale connessioni wireless ad elevate prestazioni in aree caratterizzate da uno sviluppo insufficiente della cablatura in fibra ottica. Ad oggi, il servizio 5G FWA è implementato in banda 3.7 GHz e, in via di sviluppo, anche in banda millimetrica. I dispositivi attraverso cui, generalmente, gli utenti si connettono alla rete sono i *Customer Premise Equipment* (CPE), schematizzabili a tutti gli effetti come dei router attraverso i quali viene fornita connessione a banda larga in ambiente residenziale. Il grande tratto di discontinuità rispetto ai servizi 5G classici risiede pertanto nella stazionarietà del dispositivo di accesso alla rete. A differenza dei terminali mobili degli utenti che si muovono nello spazio solidali con il proprio possessore, i CPE rimangono fissi nella medesima posizione durante tutto il periodo di utilizzo. Tale caratteristica ha evidentemente dei risvolti interessanti dal punto di vista dell'esposizione umana in quanto i fasci di traffico sintetizzati dal sistema 5G FWA mediante il meccanismo di beamforming punteranno sempre nelle medesime direzioni, in quanto la posizione dei terminali non varia nel tempo. Questa caratteristica specifica dei sistemi 5G FWA si traduce in fattori statistici di riduzione (F_{PR} , α_{24day}) sostanzialmente diversi da quelli tipicamente riscontrabili in servizi 5G classici. Un'ulteriore caratteristica di questi sistemi è il fatto che, al momento della stesura del presente documento, sono tra i pochissimi segnali 5G erogati in modalità SA, ovvero che non necessitano della sottostante rete 4G per funzionare.

2. METODOLOGIE DI FORZATURA DEL TRAFFICO

2.1 LE MOTIVAZIONI DELLA FORZATURA DI RETE

Il 5G e il 4G TDD rappresentano i primi sistemi di telefonia mobile nei quali si è compiuto il passaggio dalle antenne passive a quelle mMIMO. L'utilizzo delle antenne attive mMIMO consentirà il miglioramento della qualità di servizio offerta all'utenza attivando fasci di radiazione sagomati nella direzione dell'utente che richiede servizio, con conseguente miglioramento del rapporto segnale/rumore e diminuzione della probabilità di errore.

L'effetto "secondario" per chi effettua misure di campo elettromagnetico è la misura di canali fisici associati al traffico di intensità maggiore rispetto a quelli associati al controllo proprio perché associati a fasci di irradiazione più direttivi come già evidenziato nel Par. 1.1.7. Per la prima volta dalla attivazione dei servizi di telefonia mobile, dunque, chi effettua misure di campo elettromagnetico finalizzate alla verifica del rispetto dei limiti imposti per la salvaguardia della salute delle persone ed alla determinazione del campo elettrico determinato in condizioni di massima potenza trasmessa, non può riferire il calcolo ai canali di controllo. Tali canali, ricevuti ad una potenza minore perché associati ad un fascio a minor guadagno, condurrebbero infatti ad una sottostima del campo elettrico associato ad una condizione di massimo utilizzo della rete.

Da quanto esposto appare chiara l'esigenza di riferirsi ai canali di traffico nella determinazione del contributo estrapolato alla massima potenza (descritto nel successivo par. 4.1) e appare altrettanto chiaro come ciò debba essere fatto in una condizione di forzatura di rete con uno o più fasci di traffico attivati nella direzione dell'antenna ricevente, in una condizione tale da garantire che la potenza associata ai canali di traffico sia la massima attivabile.

Nel presente capitolo verrà discusso lo stato dell'arte legato alle possibilità attualmente offerte dal mercato per realizzare una misura di campo elettromagnetico in condizioni di forzatura di rete effettuata su una determinata cella. Nello specifico verranno descritti qualitativamente gli *User Equipment* (UE) utili allo scopo (terminali mobili e CPE) ed i protocolli di rete (UDP, HTTP, *Speedtest*) che assicurano le migliori prestazioni in termini di riempimento alla massima potenza della trama del segnale 5G.

2.2 TERMINALI PER LA FORZATURA DEL TRAFFICO

Lo scarico dati massivo su rete 5G può essere effettuato sia tramite terminali, ovvero smartphone, commerciali, sia tramite dispositivi ad hoc.

Nel primo caso, il terminale interagisce autonomamente con la rete mobile ed effettua lo scarico dati sulla tecnologia e sulla portante che la rete individua come ottimale. Solamente acquisendo i permessi di amministratore del terminale (*rooting*) è possibile selezionare la banda su cui far operare il terminale, ma non la cella su cui effettuare la forzatura del traffico.

Alla seconda categoria, invece, appartengono gli scanner di rete. Lo scanner di rete portatile è sostanzialmente uno smartphone con firmware modificato al fine di intercettare le informazioni trasmesse all'interno del sistema dal modem. La modifica del firmware permette inoltre di adattare le prestazioni del dispositivo, "ingannando" di fatto la rete mobile, per poter effettuare la sincronizzazione su specifiche frequenze o Cell ID. Le potenzialità dello scanner di rete portatile dipendono fortemente dal chipset del dispositivo, permettendo ad esempio di operare anche nella banda FR2 (27 GHz). Una caratteristica fondamentale degli scanner portatili è legata alla natura del terminale: esso è in grado di eseguire applicazioni o effettuare test, quali ad esempio speedtest, e monitorare la rete mobile, in particolare registrando le risorse allocate al terminale durante il test.

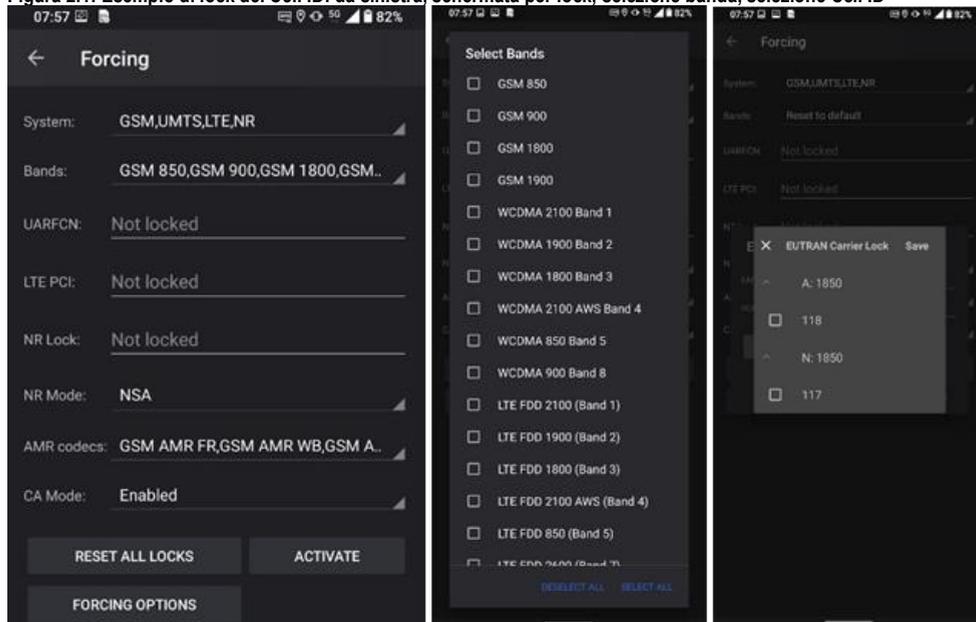
Nell'utilizzo degli scanner, inoltre, la scelta del numero di SIM (ovvero di gestori) e di un adeguato piano tariffario è fondamentale per poter effettuare un dato numero di controlli nel periodo di fruibilità del pacchetto di dati mobili acquistati.

2.3 TECNICHE DI FORZATURA DI RETE

Come descritto in precedenza lo scanner di rete permette di selezionare una specifica banda di frequenza su cui operare (nel seguito definito come lock). Tale funzionalità è attualmente abilitata per segnali LTE e verrà estesa nel prossimo futuro ai segnali 5G SA. Pertanto, in un contesto operativo complesso di un sito con segnali DSS nella banda 700 e 1800 MHz ed un segnale 5G FR1 (sub-6 GHz), la sola indicazione della tipologia di rete 5G data da un normale smartphone non è sufficiente a comprendere su quale segnale il terminale effettuerà lo scarico dati. Di norma, le stazioni radio base implementano infatti una gerarchia delle bande di frequenza per uno scarico massivo: dal 5G FR2 (elevata priorità, se terminale è abilitato) a quello FR1 fino al DSS a 700 MHz e, a seguire i segnali LTE.

In Fig. 2.1 è riportato un esempio delle schermate per la selezione della banda e della cella su cui operare in uno scanner portatile. Nel caso, ad esempio, di forzatura del traffico su segnale 5G FR1 NSA, con terminale abilitato sia su FR1 che FR2, è necessario attivare il lock su una banda LTE ospitata dal medesimo sito, e sul segnale 5G FR1. In questo modo il terminale comunica alla rete mobile di non potersi agganciare sul segnale prioritario 5G FR2 e permette di effettuare lo scarico dati sulla banda FR1.

Figura 2.1: Esempio di lock del Cell ID: da sinistra, schermata per lock, selezione banda, selezione Cell ID



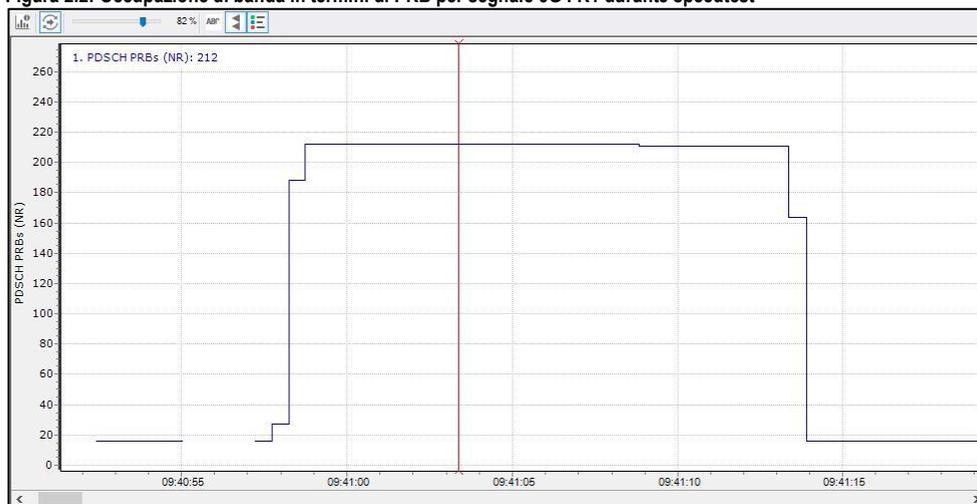
Effettuato il lock sulla banda di frequenza sulla quale si vuole effettuare lo scarico dati, si può procedere secondo tre procedure differenti di seguito illustrate: speedtest, *User Datagram Protocol* (UDP) o *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) file transfer. Non si riporta nella trattazione la procedura mediante lo streaming di video 4K, poiché dalle verifiche in campo condotte da ARPA Piemonte è emerso che il buffering dello streaming video non permette una occupazione sufficientemente costante della trama 5G.

2.3.1 Forzatura del traffico tramite speedtest

L'attivazione di un fascio di traffico di un'antenna attiva e lo scarico dati possono essere effettuati tramite applicazioni commerciali disponibili gratuitamente negli *app store*. Queste applicazioni scelgono in autonomia il server su cui effettuare lo scarico dati e non permettono di impostare alcun parametro. Inoltre, effettuano anche l'invio di dati per la stima dell'uplink, e pertanto la misura di campo elettrico su sistemi TDD deve essere eseguita avendo l'accortezza di selezionare esclusivamente la porzione di traffico dedicata al downlink.

In Fig. 2.2 si riporta l'occupazione di banda in termini di PRB ottenuta durante uno speedtest su segnale 5G FR1 di ampiezza 80 MHz. Si nota una occupazione costante di 212 PRB durante tutto l'arco del download, a dimostrazione dell'efficacia della metodologia di forzatura descritta.

Figura 2.2: Occupazione di banda in termini di PRB per segnale 5G FR1 durante speedtest



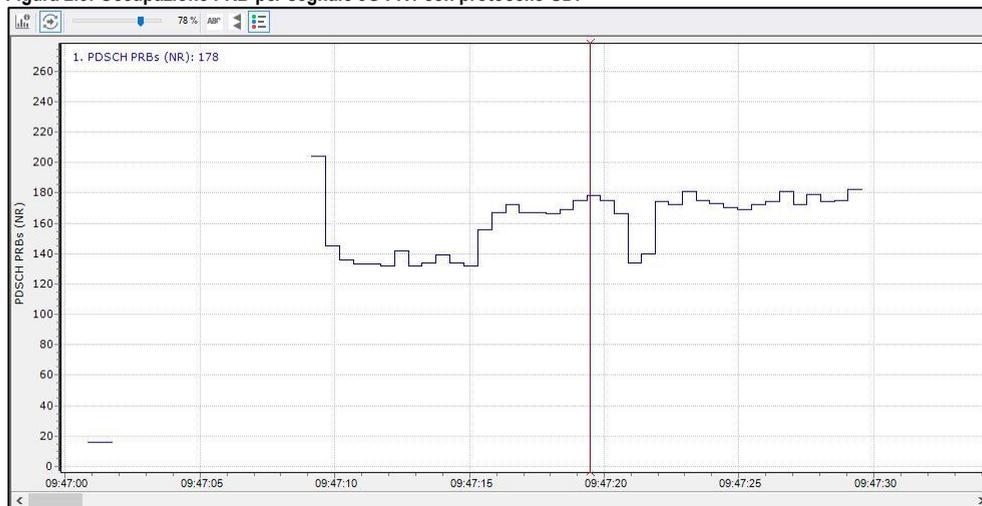
2.3.2 Forzatura del traffico tramite protocollo UDP

Per l'utilizzo del protocollo UDP come metodo di forzatura del traffico, è necessario un server dedicato. In questo paragrafo si farà riferimento all'esperienza di ARPA Piemonte che ha implementato all'interno della propria rete aziendale un server che effettua un trasferimento dati forzato UDP. Questo tipo di protocollo non richiede interazioni tra server e client (come, ad esempio, la verifica della corretta ricezione dei dati da parte del terminale o la corretta sequenza temporale di invio). Di conseguenza, l'UDP rappresenterebbe la soluzione che più si addice al trasferimento massivo di dati su un segnale 5G, garantendo throughput oltre il gigabit al secondo, al netto di alcune problematiche che verranno approfondite nel prosieguo.

Il flusso massivo di dati è generato tramite il programma *iPerf* che produce uno stream di byte dal server dedicato verso uno specifico client. Nel dettaglio, il client è un cellulare 5G di tipo commerciale che, tramite le schede SIM di diversi gestori, permette di collegarsi alla cella 5G prossima al punto di misura. Dal punto di vista informatico, la procedura implementata richiede un server raggiungibile dalla rete mobile ed un terminale 5G su cui installare una delle applicazioni (gratuite e disponibili nei vari store) che si interfacciano con il programma *iPerf*. Per quanto riguarda il terminale, è possibile utilizzare un comune dispositivo commerciale a basso costo. Il cellulare, dotato di sistema operativo di tipo Android, dovrà eseguire il programma *iPerf* tramite applicazioni ad hoc, avendo cura di impostare i parametri necessari al fine di massimizzare il flusso dati. Come già visto in precedenza, la stessa operazione può essere eseguita anche con uno scanner di rete, che ha l'ulteriore vantaggio di verificare l'efficacia della forzatura del traffico.

Il protocollo UDP è stato considerato a lungo come la metodologia di riferimento per la forzatura del traffico. Tuttavia, le recenti verifiche sperimentali hanno mostrato una scarsa capacità di riempimento della trama, come riportato in Fig. 2.3.

Figura 2.3: Occupazione PRB per segnale 5G FR1 con protocollo UDP

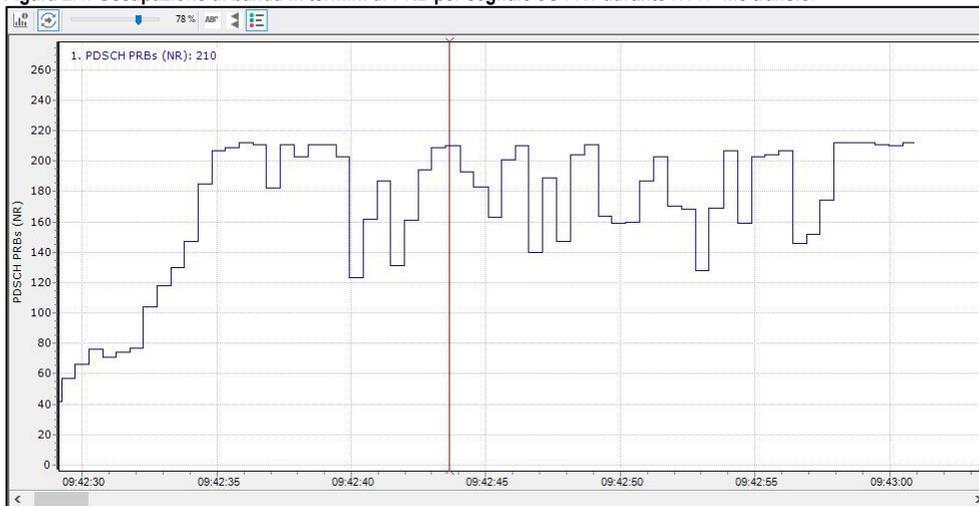


Tali evidenze sottolineano una criticità nell'utilizzo del protocollo UDP come metodo di forzatura, nonostante lo stesso sia citato come metodo elettivo all'interno delle norme tecniche internazionali.

2.3.3 Forzatura del traffico tramite protocollo HTTP file transfer

Lo scarico dati verso il terminale può essere effettuato anche mediante l'invio di file di grandi dimensioni attraverso il protocollo HTTP. Si è sperimentato quindi l'invio di un file di 10 GB generato tramite URL disponibile gratuitamente. La trasmissione dei dati su un segnale 5G FR1 è risultata tuttavia instabile, come mostra l'allocazione dei PRB riportata in Fig. 2.4.

Figura 2.4: Occupazione di banda in termini di PRB per segnale 5G FR1 durante HTTP file transfer



2.3.4 Misura in condizioni di forzatura del traffico

Dalla trattazione precedente relativa alle tecniche per la forzatura del traffico emerge che l'utilizzo di app commerciali per lo speedtest permette una occupazione di banda ottimale al fine di verificare il massimo impatto elettromagnetico di un segnale 5G. La misura del campo elettrico associato al segnale 5G, effettuata in banda larga o selettiva secondo le modalità descritte rispettivamente nei Cap. 3 e 4, deve essere eseguita nella finestra temporale in cui il terminale sta forzando il traffico dati, prestando particolare attenzione a non acquisire durante la trasmissione da parte del terminale (in modo da minimizzare l'impatto dell'uplink sulla misura). In caso di forzatura mediante speedtest, come osservato in Figura 22, è necessario attendere circa 2 secondi dall'inizio dello scarico affinché venga massimizzata l'occupazione di banda e la misura deve essere interrotta dopo circa 15 secondi. Oltre tale tempo, l'acquisizione avviene infatti su trame non forzate e pertanto la misura di campo elettrico, effettuata come media su un dato numero di trame, risulta sottostimata.

3. METODOLOGIE DI MISURA IN BANDA LARGA

3.1 NOTE SULLA MISURA IN BANDA LARGA DI SEGNALI OFDM CON MODULAZIONI DIGITALI COMPLESSE

Precisione ed affidabilità del campo elettromagnetico nei risultati delle misurazioni sono garantiti dall'adozione di procedure di misurazione adeguate e dalla taratura periodica degli strumenti. La taratura di sonde di campo elettrico a banda larga prevede che in ingresso vi sia un segnale ad onda continua (CW) di data ampiezza e frequenza.

La taratura con segnali CW può restituire risultati non applicabili tout-court quando le sonde vengono utilizzate per misurare segnali con elevati rapporti tra il valore di picco e la media della potenza, come quelli con modulazione digitale nei sistemi mobili di nuova generazione.

Questo tipo di problematica si riscontra tipicamente con le sonde a diodo. Infatti, con questa tipologia di rivelatore, è possibile misurare correttamente il valore RMS del segnale solo se il punto di lavoro si trova nella regione quadratica del diodo.

L'elevato fattore di cresta dei segnali a modulazione digitale può causare un'oscillazione tra la zona di risposta quadratica e quella di risposta in picco. Inoltre, i segnali con modulazioni complesse possono avere variazioni di ampiezza più rapide della costante di tempo della sonda, causando anche in questo caso una possibile risposta non corretta.

La risposta a segnali non sinusoidali è stata testata in alcuni lavori [7-12], da cui emerge un errore nella risposta in funzione dell'intensità del segnale, della sua variabilità nel tempo e della banda occupata. In effetti, già nell'appendice C alla Guida CEI 211-7 [13] era stato introdotto il *Modulation Additional Error (MAE)*, come parametro importante per valutare opportunamente misure di segnali da sistemi per la realizzazione di accesso e collegamento radio a banda larga.

Uno studio specifico sulla misura di segnali 5G [14] ha verificato che, a causa dell'elevato fattore di cresta del 5G, le sonde tendono a sovrastimare l'ampiezza quando esposte a campi di prova elevati, perché il diodo si trova a funzionare fuori dalla zona di risposta quadratica e risponde al valore di picco piuttosto che a quello efficace del campo incidente.

L'analisi mostra che la sovrastima può arrivare a diverse decine di punti percentuali in talune condizioni e con certe sonde. Pertanto, le sonde basate su diodi devono essere utilizzate con cautela quando si devono rilevare campi elettromagnetici di intensità prevista prossima al valore di attenzione in presenza di segnali 5G.

3.2 INDICAZIONI SU REQUISITI DELLA STRUMENTAZIONE E PROCEDURE DI UTILIZZO

Siccome l'errore introdotto nella misura in banda larga di segnali 5G può potenzialmente essere elevato, il costruttore dello strumento deve rendere disponibile l'informazione sul comportamento

dell'apparato di misura in risposta ai segnali modulati (per esempio Radar, AM, FM, GSM, UMTS, LTE, 5G NR). In particolare, è opportuna la fornitura di dati su test di laboratorio relativi alla caratterizzazione della risposta delle sonde a tali segnali.

Questo approccio demanda al costruttore l'esecuzione di test sulla risposta delle sonde, garantendo agli utilizzatori un'opportuna conoscenza di eventuali limiti e criticità nella rilevazione di segnali a larga banda e con modulazioni complesse.

In particolare, le informazioni fornite devono permettere una stima dell'incertezza legata alla risposta dello strumento a segnali modulati. Se non si dispone di informazioni dal costruttore, è possibile fare riferimento a dati in letteratura o test specifici di laboratorio per la stima del MAE.

Una caratteristica degli strumenti che va valutata è la possibilità di limitare la dinamica del segnale in ingresso ai diodi: sonde con queste caratteristiche, infatti, forniscono una risposta analoga a quella ottenuta per segnali CW anche in presenza di segnali 5G di intensità elevata.

E' inoltre opportuno, per questo tipo di misure ed in presenza di bassi livelli di campo elettrico (1-2 V/m), verificare la sensibilità e l'incertezza di linearità. In condizioni, infatti, di bassa sensibilità ed elevata incertezza di linearità, i sensori possono dare risposte anche sottostimate, ed in generale che si discostano significativamente dalla lettura di un segnale CW.

Attenzione va anche posta alle possibili risposte fuori banda, in particolare nell'utilizzo delle sonde di campo elettrico con risposta in frequenza fino a 3 GHz in presenza di segnali di telefonia 4G e 5G o segnali a larga banda fino a 6 GHz. Infatti, oltre a non caratterizzare adeguatamente i contributi all'esposizione, la risposta fuori banda a segnali con caratteristiche di forte variabilità temporale come quelli succitati può portare ad una sovrastima del livello di campo letto.

Per quanto riguarda le verifiche in fase di taratura e caratterizzazione da parte dei costruttori, è buona pratica utilizzare un segnale 5G di larghezza di banda almeno 80 MHz e trama piena. In questo modo, si garantisce di sollecitare il sensore con le condizioni che possono provocare la risposta con il maggiore scostamento rispetto al segnale CW.

Ricapitolando, sono riportate di seguito alcune indicazioni sull'uso in campo di misuratori in banda larga, in presenza di segnali 4G e 5G di intensità significativa:

- la risposta dei misuratori in banda larga ai segnali 5G è in genere superiore rispetto alla risposta a segnali ad onda continua di pari potenza (i casi di sottostima sono limitati entro il 4%, valore non significativo rispetto all'incertezza strumentale). Nella Tab. 3.1 sono indicati i valori entro cui è contenuta la sovrastima, in funzione dell'ampiezza di campo misurata (per tutte le sonde testate e per tutte le tipologie di segnale). Vista la possibile sovrastima, per validare misure di livelli di campo elettrico superiori a 6 V/m è consigliabile disporre di una stima del possibile errore commesso dalla specifica sonda in presenza di segnali a larga banda con modulazioni digitali complesse;

Tabella 3.1: Sovrastima della risposta dei misuratori in funzione dell'ampiezza di campo misurata

Intervallo di valori di campo elettrico	Massimo aumento rispetto alla risposta a segnale CW
[1;6] V/m	23%
(6;20] V/m	59%
(20;30] V/m	54%

- nel caso di misura di bassi livelli di campo (1-2 V/m), la sensibilità e l'incertezza di linearità sono parametri critici: è importante tenere presente che sensori con bassa sensibilità ed elevata incertezza di linearità possono dare risposte anche sottostimate e che, in generale, si discostano significativamente dalla lettura di un segnale CW;
- le sonde che permettono di limitare la dinamica del segnale in ingresso ai diodi, hanno una sensibilità meno marcata a questo tipo di fenomeni, indipendentemente dal livello misurato, dando quindi una risposta analoga a quella ottenuta per segnali CW anche in presenza di segnali 5G di intensità elevata. In caso di misure di livelli sopra i 6 V/m, è pertanto da privilegiare l'utilizzo di sonde con queste caratteristiche.

3.3 USO DELLE MISURE IN BANDA LARGA PER IL CONFRONTO CON I LIVELLI NORMATIVI

Le misure a banda larga di segnali 4G e 5G possono essere utilizzate per la verifica del rispetto delle soglie stabilite dalla legge, tenendo conto delle indicazioni riportate nella Guida CEI 211-7 [13] e relative appendici. Di seguito vengono fornite alcune indicazioni operative specifiche per questa tipologia di segnali.

Dato che le sonde in banda larga tendono ad una sovrastima dei livelli di campo elettrico nella misura di segnali con modulazioni digitali a larga banda, l'accertamento del rispetto del limite può essere garantito da questa tipologia di misura se il valore misurato rimane entro il valore limite e l'incertezza complessiva è inferiore a quanto fissato dalla Guida CEI 211-7 [13]. Si segnala però che, in assenza di una valutazione adeguata della risposta dello strumento ai segnali 4G e 5G e di una conseguente corretta stima dell'incertezza, può in primis non essere possibile garantire che l'incertezza sia contenuta entro quanto previsto dalla guida, ed inoltre il valore misurato, pur garantendo il rispetto del limite, può non essere indicativo dell'effettivo livello di esposizione.

Inoltre, il confronto con le soglie di interesse è possibile a condizione che le misure siano mediate su un intervallo temporale pari a quello definito dalla normativa: 6 minuti per i limiti di esposizione, 24 ore per il valore di attenzione e l'obiettivo di qualità. In quest'ultimo caso si dovrà utilizzare strumentazione per il monitoraggio in continuo sull'arco temporale indicato.

In presenza di sorgenti esclusivamente riconducibili a stazioni radio base, la misura in banda larga in orario diurno, ad esempio su un intervallo di 6 minuti, è generalmente conservativa rispetto alla media sulle 24 ore. Tale assunto è supportato da numerosi lavori in letteratura che hanno descritto l'andamento tipico dell'esposizione da stazioni radio base nel corso della giornata.

In particolare, lo studio riportato in [15] ha permesso di individuare una soglia della misura del valore del campo elettrico puntuale sui 6 minuti, al di sotto della quale il prolungamento della durata della misura non fornisce alcuna informazione utile aggiuntiva in merito alla valutazione del rispetto del valore di attenzione. Il citato lavoro indica un valore soglia pari a 4.7 V/m considerando il valore di attenzione di 6 V/m (in vigore fino al 29 aprile 2024).

Pertanto, anche ai fini dell'accertamento del rispetto del valore di attenzione come media su 24 ore, la misura spot in banda larga fornisce informazioni sufficientemente rappresentative fino a livelli di campo misurato dell'ordine dell'80% del valore di attenzione, purché ad essa sia affiancata un'identificazione in banda stretta per verificare l'effettiva irradiazione di tutti i segnali attesi.

4. METODOLOGIE DI MISURA IN BANDA STRETTA

4.1 INTRODUZIONE ALLE TECNICHE DI MISURA E DI ESTRAPOLAZIONE IN BANDA STRETTA

Le misure in banda stretta, o misure selettive, vengono eseguite quando è necessario acquisire i valori di campo elettrico dovuti alle singole sorgenti presenti. Il valore del campo elettrico complessivo si otterrà sommando quadraticamente il campo elettrico relativo a ciascuna sorgente.

La misura inizia eseguendo una scansione in frequenza nel punto di misura, coprendo tutta la gamma di frequenze della catena (o delle catene) di misura a disposizione. I risultati di detta scansione, o una valutazione teorica basata sulle conoscenze pregresse del sito, sono utilizzati per identificare, per ciascuna tecnologia, le frequenze significative per le quali è opportuno eseguire la misura in banda stretta. Per i dettagli e le modalità per l'esecuzione di detta analisi si fa riferimento a quanto previsto dalla Guida CEI 211/7 [13] e dalla Guida CEI 211/7-E [6].

Dopo aver individuato i segnali di interesse è necessario aumentare la risoluzione in frequenza centrando la visualizzazione dell'analizzatore sul segnale in esame in modo da poter impostare opportunamente i parametri di misura. È quindi necessario procedere con l'analisi qualitativa del singolo segnale per stabilire le opportune impostazioni dell'analizzatore di spettro. Tale strumento ha infatti la possibilità di essere sintonizzato su una frequenza specifica o su una porzione sufficientemente piccola della banda totale. La larghezza del filtro RBW utilizzato e la banda di frequenza devono essere idonee a consentire la misura accurata delle singole componenti spettrali alle diverse frequenze.

È possibile riferirsi fondamentalmente a cinque differenti metodologie di misura in banda stretta:

- Channel Power;
- Misura di picco;
- Zero span;
- Misura real time;
- Demodulazione.

4.1.1 Misura in modalità Channel Power

Il Channel Power è una modalità di misura basata sulla determinazione della potenza totale associata ad uno specifico canale ed in termini matematici può essere inteso come l'integrale dello spettro acquisito in un intervallo di frequenza (comunemente chiamato banda di integrazione).

Il valore del Channel Power (CP) si calcola, a partire dalle tracce spettrali acquisite, applicando la seguente formula:

$$CP = 10 \log_{10} \left[\frac{IBW}{NBW} \right] \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{P_i - \alpha_i}{10}} \right] [dBm]$$

dove (vedi Fig. 4.1):

- IBW rappresenta la banda di integrazione;
- P_i rappresenta il valore di potenza associato all' i -esimo degli N pixel contenuti in IBW ;
- NBW , a volte anche indicato come *Equivalent Noise BandWidth* (ENBW), esprime il valore della *noise bandwidth* del filtro RBW utilizzato, ovvero la larghezza di un ipotetico filtro rettangolare che sottende la stessa area del filtro RBW (vedi Fig. 4.2). NBW è proporzionale al valore della RBW tramite una costante, che è un parametro tipico dell'analizzatore utilizzato (e va pertanto fornita dal costruttore). Si consideri ad ogni modo che nei moderni analizzatori di spettro il rapporto tra la larghezza di banda del rumore equivalente e la larghezza di banda di -3 dB è tipicamente prossimo all'unità;
- α_i è un parametro di correzione che differisce pixel per pixel e tiene conto della pesatura effettuata da eventuali filtri digitali implementati dallo strumento ed utilizzati durante la misura.

Figura 4.1: Traccia corrispondente allo spettro di un segnale 5G con indicazione della banda di integrazione per la funzione Channel Power

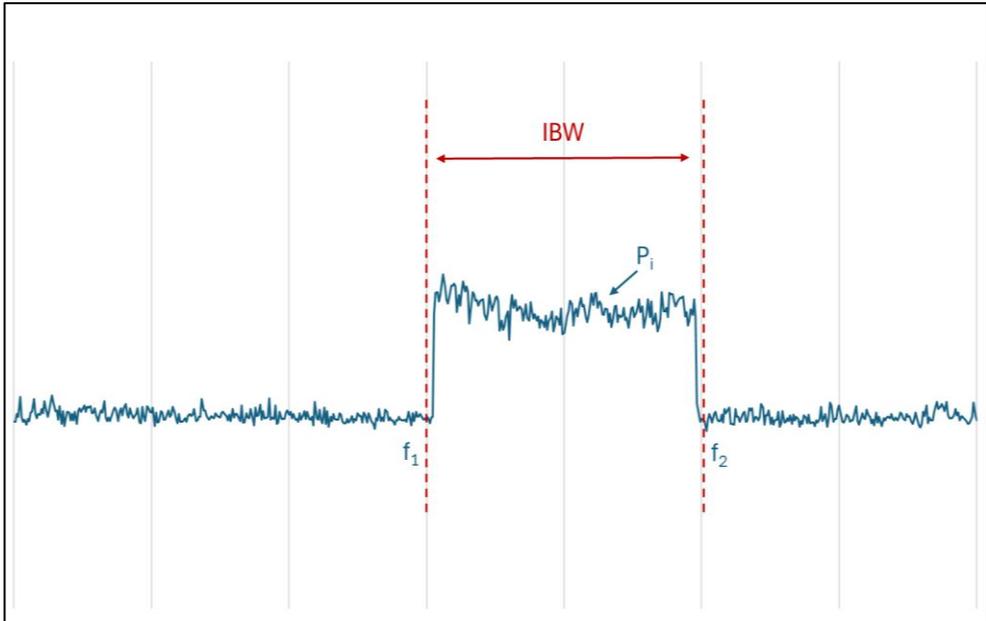
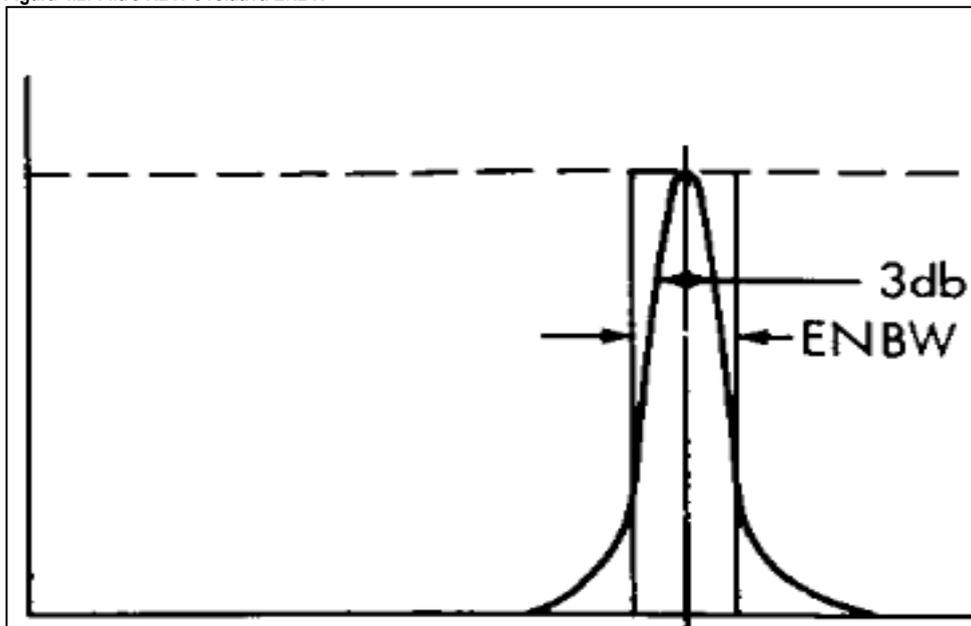


Figura 4.2: Filtro RBW e relativa ENBW

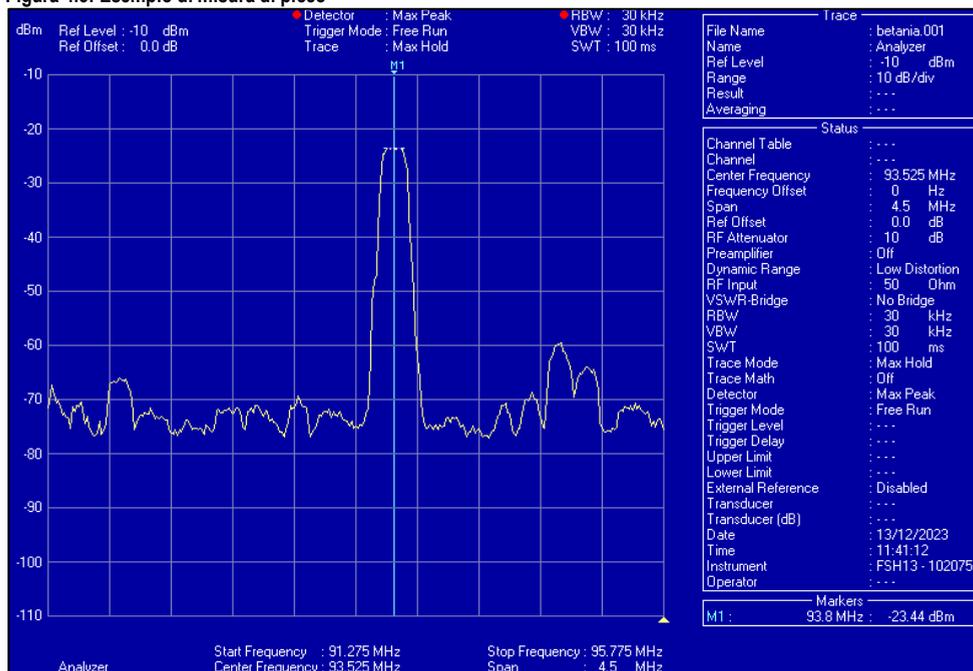


4.1.2 Misura di picco

La misura di picco consiste nella determinazione della potenza associata ad uno specifico punto in frequenza della traccia acquisita. Operativamente, la misura viene effettuata acquisendo una traccia spettrale per il tempo necessario alla stabilizzazione a video della stessa e, successivamente, al posizionamento di un marker in corrispondenza del pixel relativo al valore di frequenza per cui si desidera misurare la potenza ricevuta.

Negli analizzatori di spettro moderni, lo strumento rappresenta direttamente a schermo la posizione del marker, insieme al riquadro riassuntivo dei valori di frequenza e potenza associati a tale marker. La misura di picco risulta particolarmente indicata per quelle tipologie di segnali costituiti da portanti caratterizzate da una occupazione spettrale limitata (ad es. segnali FM come in Fig. 4.3).

Figura 4.3: Esempio di misura di picco

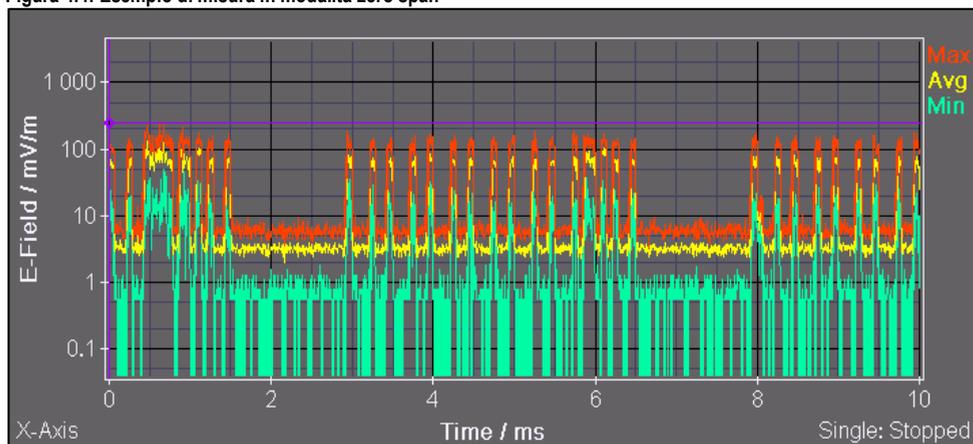


4.1.3 Misura in modalità zero span

La modalità zero span è una particolare impostazione dell'analizzatore di spettro in cui lo strumento viene utilizzato come se fosse a tutti gli effetti un oscilloscopio. In questa modalità, infatti, lo strumento fornisce l'andamento della potenza ricevuta in funzione del tempo ad una specifica frequenza fissata, integrata sulla larghezza di banda individuata dal valore di RBW impostato (Fig. 4.4).

Le misure in zero span sono particolarmente indicate in presenza di segnali con spiccate peculiarità dal punto di vista dell'andamento della potenza ricevuta nel tempo (ad es. i segnali di telefonia mobile operanti in modalità TDD) e per i quali risulta necessaria la determinazione sperimentale di intervalli temporali caratteristici come periodi di ripetizione/rotazione, *duty-cycles*, durata degli slot di traffico, ecc. Un altro ambito in cui la misura in modalità zero span è molto utilizzata è quello della definizione dei metodi di estrapolazione per segnali di telefonia mobile 4G e 5G, complementari a quelli basati su misure vettoriali, e utilizzabili per escludere il superamento delle soglie normative.

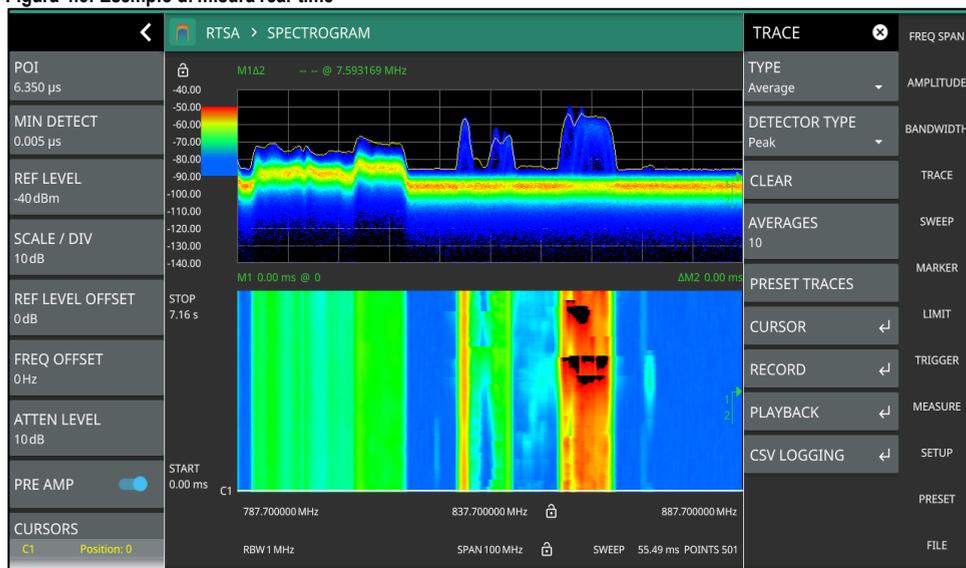
Figura 4.4: Esempio di misura in modalità zero span



4.1.4 Misura in modalità real-time

La modalità di misura real-time consente l'acquisizione e la visualizzazione senza interruzioni di segnali in rapida evoluzione e altamente intermittenti, in quanto consente l'acquisizione simultanea di tutto lo span impostato, a differenza della classica analisi spettrale in cui la ricostruzione dello spettro avviene in maniera sequenziale. La natura digitale della misura real-time rende inoltre possibile una varietà di tecniche di analisi e visualizzazione che tradizionalmente richiedevano più piattaforme hardware. Un esempio di misura real-time è riportato in Fig. 4.5.

Figura 4.5: Esempio di misura real-time



4.1.5 Demodulazione

La demodulazione si esegue con un analizzatore di spettro vettoriale che consente la decodifica dei diversi canali che compongono il segnale. Tale tipologia di misure riveste particolare importanza in relazione all'analisi di segnali complessi come quelli generati da impianti di telefonia mobile in tecnologia UMTS, LTE e 5G NR, per i quali si rende necessaria una demodulazione dell'intero contenuto spettrale al fine di isolare il contributo energetico associato a specifici canali di riferimento.

Figura 4.6: Esempio di demodulazione

Battery: 29.09.23	11:15:41	GPS: 41°7'36.8" N Ant: 18°51'19.0" E Cable:	3AX 0,4-8G SrvTol: SRM 5 m Std:	IT All ICNIRP GP		
Table View						
Index	Cell ID	No. Ant	Act (RS Avg)	Act (RS 0)	Act (RS 1)	Act (RS 2)
1	57	2	42,56 mV/m	34,65 mV/m	36,01 mV/m	0,000 V/m
2	58	2	14,44 mV/m	5,651 mV/m	19,63 mV/m	0,000 V/m
Total			44,94 mV/m	35,10 mV/m	41,01 mV/m	0,000 V/m
Analog			0,753 V/m			
Isotropic						
LTE FDD						
Fcent:	816 MHz	CBW:	10 MHz	Sweep Time:	3,938 s	Progress:
MR:	6,3 V/m	Extr. Fact.:		Off Noise Suppr.:		Off No. of Runs: 75
		Cell Sync.:		Sync. CP Length:		Normal AVG: 4

4.1.6 Tecniche di estrapolazione

La principale finalità per la quale si eseguono misure in banda stretta è costituita dalla verifica della conformità delle emissioni elettromagnetiche degli impianti rispetto ai limiti imposti dalla normativa vigente. Considerando che tali limiti possono essere espressi in termini di medie spaziali e/o temporali del campo elettromagnetico, la distribuzione delle misure deve quindi essere tale da descrivere adeguatamente il livello di campo in entrambi i domini considerati. Tali medie sono ottenute o come media aritmetica delle densità di potenza o, in modo equivalente, come media quadratica dei valori dei campi.

Con riferimento alle verifiche di conformità in ambito nazionale per l'esposizione in ambiente di vita – e dunque della popolazione – la normativa prevede di utilizzare la misura dei livelli di esposizione eseguita ad una quota pari a 1,5 m dal piano di calpestio ai fini della verifica di conformità.

Per quanto riguarda la durata della media temporale, anch'essa è opportunamente definita nelle norme applicabili. I tempi di media dei livelli efficaci di esposizione sono definiti all'interno dei provvedimenti normativi e sono pari a 6 minuti per il confronto con il limite di esposizione e a 24 ore per il confronto con il valore di attenzione e l'obiettivo di qualità.

Come previsto dalla Guida CEI 211-7/E [6], oltre alla misura per un tempo pari a quello di riferimento previsto dalla normativa è possibile utilizzare tecniche di estrapolazione che consentono di stimare

valori di campo utili per accertare o escludere il superamento dei limiti attraverso misure di durata molto più contenuta.

In particolare, le tecniche di estrapolazione si fondano sull'individuazione di un segnale sempre on-air ed emesso a potenza massima e costante a partire dal quale, tramite una opportuna formula matematica, sarà possibile determinare il valore massimo e medio sulle 24 ore di campo elettrico. La generica formula di estrapolazione può essere definita da un'espressione del tipo:

$$E_{ext} = K \cdot E_{ref}$$

dove E_{ext} è il valore di campo elettrico estrapolato, E_{ref} è il valore di campo elettrico misurato attribuibile ad un canale di riferimento e K è un parametro che dipende dalla tecnologia in esame e dalla variabilità temporale del segnale.

Per le tecnologie pre-5G ci si riferisce sempre ad un canale di riferimento che viene trasmesso in maniera broadcast. Tale caratteristica è soddisfatta da canali di controllo, specifici per ciascuna tecnologia (BCCH per il 2G, CPICH per il 3G, RS per il 4G). Per i dettagli relativi all'utilizzo delle formule di estrapolazione per le tecnologie pre-5G si rimanda alle Guide CEI 211-7 [13] e 211-7/E [6].

L'avvento dei segnali di quinta generazione ha imposto una revisione del paradigma fino ad ora utilizzato per la procedura di estrapolazione. Meccanismi come il beamforming, infatti, introducono una variabilità del segnale su una scala temporale molto più ridotta rispetto a quella tipicamente utilizzata nelle medie imposte dalla normativa vigente. Inoltre, come già discusso nel Cap. 1, i canali di controllo e quelli di traffico possono essere trasmessi attraverso fasci di radiazione caratterizzati da diagrammi e guadagni anche estremamente differenti tra loro. Le primissime proposte di tecniche di estrapolazione per i segnali 5G hanno esplorato la possibilità di utilizzare i canali di controllo dei segnali di broadcast.

Di conseguenza, tale approccio è stato inizialmente adottato anche all'interno della norma EN IEC 62232:2022-11, recepita in Italia dalla norma CEI EN IEC 62232 [2].

Per tener conto del cambio di paradigma sopra illustrato, la formula di estrapolazione suggerita introduce una serie di parametri utili a descrivere l'effetto dell'elevata variabilità spazio-temporale dell'emissione delle sorgenti 5G:

$$E_{5Gmax} = E_{SSB} \cdot \sqrt{F_{extBeam} \cdot F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC} \cdot F_B^{-1}}$$

dove:

- E_{SSB} è il valore del campo elettrico per RE associato al più intenso fra i fasci di broadcast SSB;
- F_{BW} è definito come il numero totale di sottoportanti che costituiscono il segnale in esame;
- F_{TDC} è il fattore che tiene in considerazione il duty-cycle dello specifico schema TDD implementato dal segnale;
- F_B è un fattore che tiene conto dell'eventuale incremento statico di potenza assegnato nel momento della generazione ai canali di broadcast. Esso corrisponde a tutti gli effetti al Boosting Factor utilizzato nella formula di estrapolazione per la tecnologia 4G [6].

I parametri finora discussi sono del tutto analoghi a quelli che vengono tipicamente utilizzati per l'estrapolazione applicata ai segnali pre-5G. I parametri discussi nel prosieguo sono, invece, caratteristici dei segnali mMIMO e, in particolare, 5G:

- F_{PR} è un fattore di riduzione della potenza sui 6 minuti che tiene conto sia della fluttuazione temporale della stessa (determinabile dai classici contatori implementati dai gestori sugli impianti), sia della variazione spaziale dell'irraggiamento che si ottiene da un'analisi di tipo statistico del meccanismo di beamforming;
- $F_{extBeam}$ è un fattore di estrapolazione che tiene conto dell'effetto complessivo che il meccanismo di beamforming ha sui valori di potenza ricevuti per i canali di broadcast e di traffico. In linea teorica, tale parametro è determinato come il rapporto tra gli involucri dei diagrammi di traffico e quelli di broadcast, nella direzione del punto di misura.

Nel caso in cui l'estrapolazione sia mirata alla verifica del rispetto del valore di attenzione/obiettivo di qualità, la formula viene modificata attraverso l'introduzione del fattore α_{24h} che ricomprende tutti i termini di variabilità spazio-temporale precedentemente discussi:

$$E_{5G_{24h}} = E_{SSB} \cdot \sqrt{F_{BW} \cdot F_{extBeam} \cdot \alpha_{24h}}$$

Tale approccio ha dimostrato di essere più complesso e meno efficace di quanto potesse sembrare in principio, poiché risente di numerose fonti di errore che dipendono per esempio da una non completa conoscenza dell'ambiente in cui vengono eseguite le misure (posizione e geometria degli oggetti riflettenti), oltre a necessitare di conoscere a priori il rapporto tra i guadagni dei fasci di traffico e di broadcast per una precisa determinazione di $F_{extBeam}$.

Di conseguenza sono stati investigati approcci alternativi, basati sull'utilizzo del canale di traffico come riferimento per l'estrapolazione. Tale approccio si basa sull'acquisizione della potenza associata al canale PDSCH in condizioni di forzatura del traffico mediante le procedure descritte nel Cap. 2. Il vantaggio principale di questa tecnica risiede nella misurazione diretta della grandezza di interesse nel punto di misura, evitando l'introduzione del fattore $F_{extBeam}$, di difficile stima sperimentale. In questo caso la formula di estrapolazione diventa perciò:

$$E_{5G_{max}} = E_{RE,PDSCH} \cdot \sqrt{F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC}}$$

con $E_{RE,PDSCH}$ pari al valore del campo elettrico per RE associato al PDSCH acquisito in condizioni di traffico forzato. In maniera analoga si modifica anche la formula di estrapolazione per la verifica del rispetto del valore di attenzione/obiettivo di qualità:

$$E_{5G_{24h}} = E_{RE,PDSCH} \cdot \sqrt{F_{BW} \cdot \alpha_{24h}}$$

Nel seguito verranno discusse le metodologie di misura applicabili ai segnali 5G attraverso l'utilizzo di analizzatori di spettro scalari e vettoriali.

4.2 METODOLOGIE DI MISURA CON ANALIZZATORE SCALARE

Un analizzatore scalare permette di effettuare misure di potenza ricevuta del segnale misurato e non è in grado di svolgere funzioni di demodulazione/decodifica delle informazioni trasportate. È però utilizzabile nell'effettuazione di misure di segnali 4G e 5G con diversi obiettivi:

- rilevazione della potenza di canale, ai fini della stima del livello di esposizione nei diversi intervalli di frequenza. Tale rilevazione può essere istantanea, mediata sul breve periodo o acquisita continuativamente nel tempo per la valutazione della media su 24 ore;
- estrapolazione alla massima potenza e alla potenza media su 24 ore a livello di singola portante (senza informazione circa il contributo di diverse celle isofrequenza);
- stima e verifica di parametri del segnale.

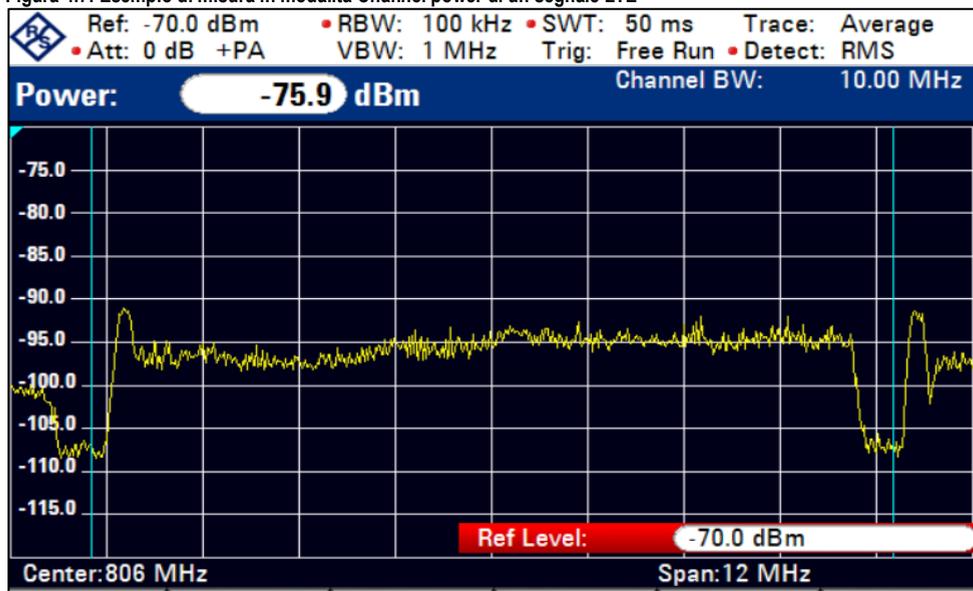
A tale scopo si distinguono due diverse modalità di acquisizione: misura in Channel Power e misure in zero span. Tali modalità verranno di seguito analizzate nel dettaglio per le finalità di interesse sia nel caso di misure eseguite per periodi limitati di tempo sia per misure eseguite con centraline di monitoraggio selettive.

4.2.1 Misura in modalità Channel Power

La misura in Channel Power di un segnale 5G è definibile come l'integrale della potenza ricevuta sulle singole sottoportanti. Tale misura si usa pertanto per quantificare la potenza di canale istantaneamente ricevuta.

La Fig. 4.7 mostra uno spettro relativo ad un segnale OFDM (con la tipica forma a "panettone"), in cui sono riportati i parametri caratteristici di una misura in Channel Power. La potenza di canale è rappresentata dall'area sottesa alla traccia nell'intervallo IBW (vedi Par. 4.1.1).

Figura 4.7: Esempio di misura in modalità Channel power di un segnale LTE



La funzione di Channel Power può essere nativamente implementata nell'analizzatore di spettro, ma può anche essere applicata dall'operatore direttamente sulle tracce acquisite.

Data la complessità dei segnali 5G, la funzione Channel Power, pur essendo concettualmente semplice, deve essere utilizzata seguendo alcuni accorgimenti, come di seguito illustrato.

Nello specifico, la misura in Channel Power necessita del rispetto dei seguenti criteri:

- impostazione del parametro RBW in modo che la larghezza del filtro a frequenza intermedia sia piccola rispetto alla banda del segnale (al fine di campionare adeguatamente il segnale per una migliore determinazione della densità spettrale);
- impostazione del parametro *Video Bandwidth* (VBW) pari ad almeno 3 volte l'ampiezza della RBW (al fine di garantire l'efficace rivelazione di un segnale intrinsecamente di tipo rumore);
- sweep time sufficientemente rapido da seguire le variazioni di livello del segnale a breve termine. Sono adeguati valori di sweep time confrontabili con la durata di qualche trama del segnale;
- tracce average (con media lineare sulla potenza, non logaritmica). L'utilizzo di una traccia Max Hold per misure in Channel Power conduce ad una sovrastima del risultato, legata al fattore di cresta particolarmente pronunciato in questa tipologia di segnali;
- detector RMS.

Il valore ottenuto dalla misura in Channel Power è risultato, in più lavori [16-17], sempre ben correlato con il livello di potenza irradiata dalla stazione radio base: si tratta quindi di una misura in grado di seguire molto bene le variazioni nei livelli di esposizione dovute all'esercizio della rete di telefonia.

Anche per questo motivo, si tratta di una tipologia di misura adeguata alle rilevazioni di segnali 5G tramite forzatura di fasci di traffico con l'uso di un terminale nei pressi del punto di acquisizione. Questa misura fornisce una buona stima della massima esposizione, tanto migliore quanto più la forzatura riesce a garantire il riempimento di tutta la banda e tutta la trama per un tempo compatibile con i tempi di acquisizione dello spettro ed elaborazione del Channel Power. Essa costituisce pertanto un'alternativa percorribile alle tecniche di estrapolazione a massima potenza, basate sulla rilevazione di canali specifici del segnale.

In ogni caso, la misura in Channel Power permette di dare una buona indicazione di possibile superamento dei limiti, in quanto, se le condizioni sopra descritte sono solo in parte rispettate, essa dà una lettura sottostimata del livello di esposizione. Infatti, se l'efficienza della forzatura del traffico non è ottimale, il risultato della misura in Channel Power risulterà inferiore alla massima potenza effettivamente associata alla sorgente. Pertanto, se una misura di questo tipo evidenzia un superamento dei valori fissati dalla normativa, si può assumere con un elevato grado di confidenza che tale superamento sia effettivo.

A riepilogo di quanto sinora discusso, si riportano in Tab. 4.1 di seguito i parametri ottimali per la misura (Tab. 4.1) e l'analisi di vantaggi e svantaggi associati al Channel Power.

Tabella 4.1: Valori ottimali per l'impostazione dei parametri dell'analizzatore di spettro ai fini della misura in Channel Power.

Parametro	Detector	Traccia	Sweep time	RBW	VBW
Requisito	NO detector peak	NO Max Hold	Sufficientemente rapido da seguire le variazioni a breve termine del segnale	Piccola rispetto alla banda di integrazione	≥ 3 RBW
Valori consigliati	RMS	Average lineare	Valori possibilmente inferiori alla durata di qualche trama del segnale	Compreso tra 100 kHz e 300 kHz	Compresa tra 300 kHz e 1 MHz a seconda della RBW

Di seguito sono elencati i vantaggi attribuibili alla misura in modalità Channel Power:

- misura effettuabile anche con strumentazione meno recente (sia sull'analizzatore che eventualmente in post-analisi su tracce acquisite);
- è in grado di dare un'informazione immediata sul livello di esposizione in una determinata banda di frequenza;

- se implementata su un sistema che permette l'acquisizione per un tempo prolungato delle informazioni, il risultato può essere direttamente confrontato con il valore di attenzione/l'obiettivo di qualità (medie su 24 ore);
- in caso di misure su sistemi mMIMO, l'associazione ad un sistema per la forzatura di un fascio di traffico permette di stimare in modo immediato e semplice la massima esposizione (già corretta per eventuale F_{TDC});
- consente di attribuire i diversi valori di campo elettrico misurati ai rispettivi gestori.

Gli svantaggi, invece, sono i seguenti:

- non è possibile, in caso di più sorgenti isofrequenza, identificare da quale/i sorgente/i proviene il livello di segnale misurato, e pertanto non è possibile procedere con quanto previsto in caso di accertamento di superamento;
- la forzatura dei fasci di traffico richiede la presenza di un terminale adeguato, e l'implementazione di un metodo per garantire un buon riempimento della trama (Cap. 2).

4.2.2 Misura in zero span

La modalità zero span permette, fissata una determinata frequenza, di seguire l'andamento del segnale nel dominio del tempo. La potenza associata a ciascun pixel della traccia così ricostruita corrisponde all'integrale della potenza ricevuta all'interno della banda di estensione della RBW impostata.

A tutti gli effetti, quindi, durante una misura in zero span l'analizzatore si comporta come un oscilloscopio.

La misura in modalità zero span di segnali 5G può essere utilizzata con diverse finalità:

- valutazione del fattore F_{TDC} in segnali di tipo TDD;
- verifica di parametri caratteristici del segnale (es. numero e sequenza degli SSB, durata del simbolo, riempimento degli slot di traffico, ecc.);
- stima del fattore $F_{extBeam}$;
- misura dei livelli dei canali di controllo o di traffico, ai fini dell'estrapolazione alla massima potenza o alla media su 24 ore.

Di seguito le indicazioni sull'impostazione dei parametri di misura in funzione degli obiettivi sopra elencati.

4.2.2.1 Valutazione del fattore F_{TDC} in segnali di tipo TDD

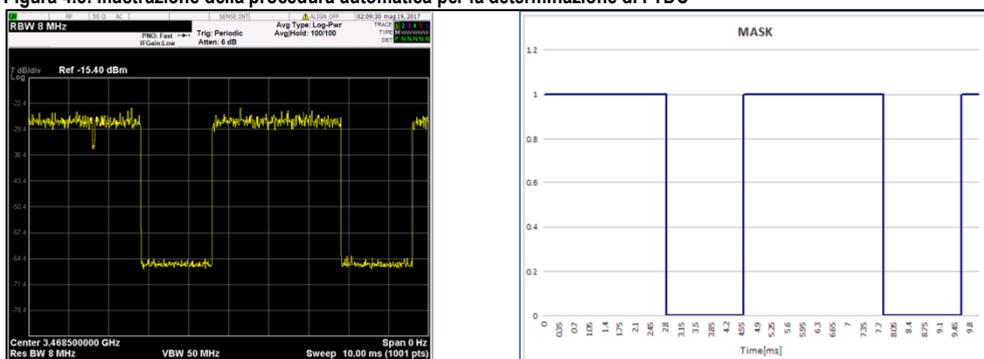
L'acquisizione in modalità zero span ai fini della determinazione del fattore F_{TDC} deve rispettare i seguenti requisiti/criteri:

- frequenza di analisi in qualsiasi punto della banda del segnale (centro banda è adeguato);
- RBW di ampiezza sufficiente per includere un adeguato numero di sottoportanti. Si consiglia di scegliere un valore uguale o inferiore alla larghezza di banda del segnale, o comunque il più grande possibile compatibilmente con quelli disponibili sullo strumento;
- utilizzo di un trigger periodico da impostare con un periodo uguale o multiplo della durata della trama;
- sweep time pari alla durata della trama;
- acquisizione con trace Max Hold;
- in presenza di terminali, accertarsi che siano sufficientemente lontani da generare un contributo del livello di uplink che sia ordini di grandezza inferiore rispetto a quello del downlink (verificare che a video gli slot di uplink siano dell'ordine delle decine di dB più bassi del downlink).

Non sono fornite indicazioni circa la scelta del detector, in quanto questa tipologia di valutazione può essere effettuata con qualsiasi tipo di rivelatore.

Date queste condizioni, è possibile registrare una traccia per un tempo adeguato alla stabilizzazione della stessa, e quindi procedere ad una misura, manuale o automatica, della durata dei periodi di uplink e di downlink. La misura manuale prevede l'uso di marker, mentre la misura automatica [19] si basa sulla generazione di una maschera a partire dallo spettro in zero span acquisito (Fig. 4.8).

Figura 4.8: Illustrazione della procedura automatica per la determinazione di FTDC



La creazione della maschera segue le seguenti regole:

- definizione di un valore soglia di potenza, scelto a seguito di un'analisi qualitativa dello spettro acquisito, in modo da essere compreso tra il livello di potenza caratteristico dei periodi di uplink e quello dei periodi di downlink;
- definizione della funzione $V_{pix}(t)$ che assume valore pari a 1 per tutti i pixel sopra la soglia e 0 per quelli sotto la soglia;

- stima del fattore F_{TDC} come rapporto tra la sommatoria di $V_{pix}(i)$ e il numero totale di pixel dello spettro.

Esprimendo tale rapporto attraverso un adeguato formalismo matematico si ottiene la seguente equazione:

$$F_{TDC} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pixel}} V_{pix}(i)}{N_{pixel}}$$

dove l'indice i corre sui diversi pixel dello spettro e N_{pixel} rappresenta il numero totale di pixel.

Per poter determinare correttamente il fattore F_{TDC} è necessario che vi sia traffico. In caso di segnali irradiati da antenne mMIMO può essere opportuno dotarsi di un terminale per la forzatura del traffico (è sufficiente effettuare una forzatura tramite speed test).

Nel caso in cui l'analizzatore non sia provvisto di un trigger periodico, è possibile effettuare una stima del fattore F_{TDC} , acquisendo tracce in modalità single sweep, selezionandone una ottenuta in condizioni di buon riempimento della trama.

La Tab. 4.2 riassume i valori ottimali per l'impostazione dei parametri dell'analizzatore di spettro ai fini della valutazione in zero span del fattore F_{TDC} .

Tabella 4.2: Parametri ottimali ai fini della valutazione in zero span del fattore F_{TDC} .

Parametro	Detector	Traccia	Sweep time	Trigger	RBW	VBW
Requisito	Nessuna dipendenza	In grado di catturare la presenza di traffico	Pari o multiplo della periodicità dello schema TDD implementato	Tale da garantire la possibilità di agganciare la trama del segnale	Più grande possibile, ma non superiore la larghezza della banda	Nessun requisito
Valori consigliati	Automatico	Max Hold	Pari alla durata della trama	Periodico (di periodo pari alla durata di una trama)	> 1 MHz	Automatico

4.2.2.2 Verifica di parametri caratteristici del segnale

L'acquisizione in modalità zero span ai fini della verifica di parametri caratteristici del segnale deve rispettare i seguenti requisiti/criteri:

- frequenza di analisi corrispondente alla frequenza in cui si trovano sia i canali di controllo, sia quelli di traffico (nel caso del 5G, prestare attenzione alla posizione dell'SSB);

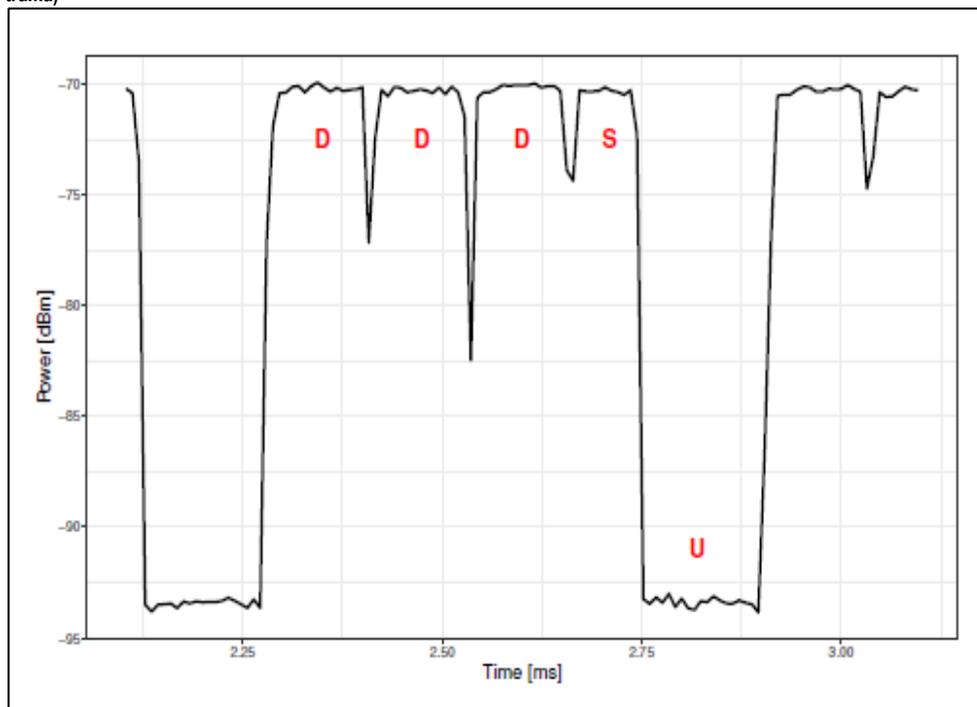
- RBW di ampiezza sufficiente per caratterizzare con un'adeguata statistica di sottoportanti, ma inferiore alla larghezza di banda occupata dall'SSB (tipicamente compresa tra 1 MHz e $240 \cdot \Delta f$);
- utilizzo di un trigger periodico da impostare con un periodo pari alla periodicità dell'SSB. Se non si dispone di trigger periodico, è comunque possibile fare qualche osservazione catturando singole scansioni del segnale;
- sweep time maggiore o uguale alla periodicità dell'SSB per garantire la visualizzazione dello stesso sullo schermo;
- fatto salvo il requisito precedente, per poter effettuare analisi di maggior dettaglio sui simboli che costituiscono il segnale, è opportuno che lo sweep time sia adeguato, in funzione del numero di punti a schermo, a garantire che il tempo di simbolo $\tau + CP$ (stimato in base alla numerologia) sia prossimo alla durata di scansione di un pixel;
- acquisizione con trace Max Hold / Min Hold a seconda delle finalità dell'analisi;
- nessuna dipendenza dalla scelta del detector.

Con questo tipo di impostazioni, è possibile verificare un vasto numero di caratteristiche del segnale:

- la durata del simbolo (e quindi la numerologia). Ad esempio, per il 5G è possibile verificare la numerologia dell'SSB dividendo la durata totale per 4 (il numero di simboli che lo compongono). Analogamente, si può determinare la numerologia del PDSCH dividendo la durata totale dello slot per i 14 simboli che lo compongono. Si specifica che la durata totale va acquisita tramite l'utilizzo di markers;
- il numero di SSB trasmessi (o comunque di quelli rilevabili nel punto di misura);
- l'indice dell'SSB che viene ricevuto con la potenza massima;
- la sequenza downlink-uplink nei segnali TDD;
- la differenza di livello di potenza ricevuto dai canali di traffico o di controllo;
- la frequenza centrale degli SSB (oggetto di una specifica procedura descritta più avanti).

Un esempio, rappresentato nell'immagine in Fig. 4.9 (relativa alla misura di un segnale 5G nella banda 27 GHz), è quello dell'identificazione della sequenza uplink-downlink e della presenza di uno special slot nella transizione da uplink a downlink. Nello special slot, è possibile verificare che soltanto 10 dei 14 simboli sono dedicati al downlink.

Figura 4.9: Traccia zero span di un segnale 5G nella banda mm-Wave (analisi di un periodo temporale pari a mezza trama)

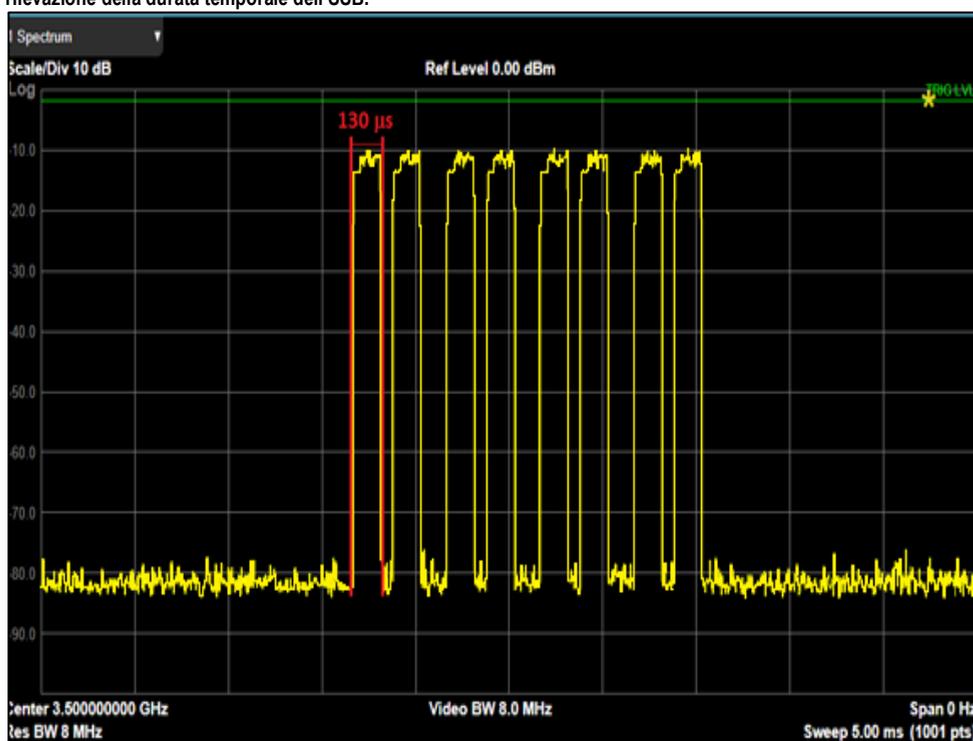


Un altro esempio, riportato in Fig. 4.10, è relativo alla determinazione della numerologia dell'SSB attraverso una misura in zero span. L'esempio si riferisce ad un segnale 5G privo di traffico dati, creato in laboratorio attraverso un generatore di segnali e condotto via cavo all'analizzatore di spettro. L'assenza di una antenna mMIMO giustifica, dunque, il fatto che gli otto SSB vengano ricevuti tutti alla medesima potenza, come la figura dimostra. Attraverso una misura in zero span è possibile identificare gli SSB associati al segnale e, posizionando opportunamente dei markers sulla traccia, si riesce a ricavare una stima attendibile della durata complessiva del singolo SSB. Sapendo che un SSB è costituito da quattro simboli, il tempo di simbolo τ è ottenuto semplicemente dividendo la durata del SSB per quattro. Nel caso specifico, a fronte di una durata stimata dell'SSB di circa 130 μs , si ottiene un valore $\tau = 32.5 \mu\text{s}$. Ricordando che la larghezza spettrale di una sottoportante è pari all'inverso del tempo di simbolo, la numerologia dell'SSB in esame risulta pari a:

$$\mu = \frac{\Delta f}{15 \text{ kHz}} - 1 = \frac{1}{\tau \cdot 15 \text{ kHz}} - 1 \sim 1$$

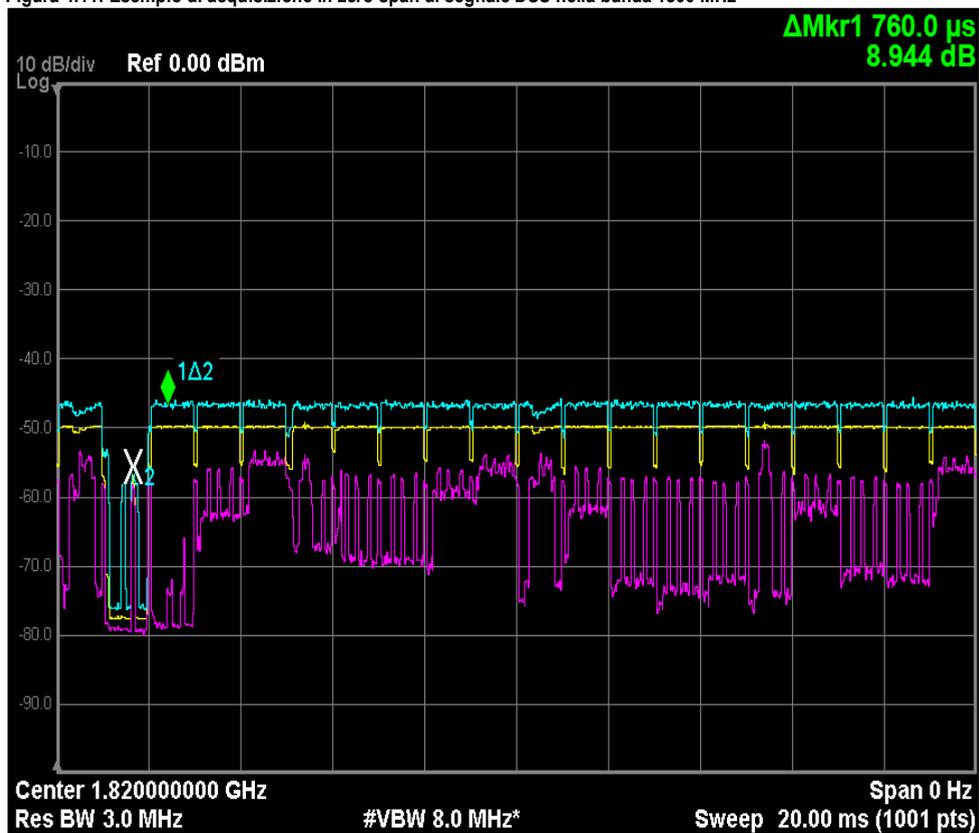
La stima ottenuta sperimentalmente coincide con la numerologia impostata sul generatore in fase di creazione del segnale, confermando l'efficacia della procedura proposta. Un approccio totalmente analogo può essere seguito nel caso in cui si voglia stimare la numerologia associata al PDSCH. Come già accennato, in questo caso si dovrà stimare attraverso l'apposizione di markers sulla traccia la durata totale di uno slot di traffico e dividere tale valore per 14 (il numero di simboli che compongono uno slot).

Figura 4.10: Traccia zero span con zoom sugli SSB (misura effettuata in collegamento diretto con un generatore), con rilevazione della durata temporale dell'SSB.



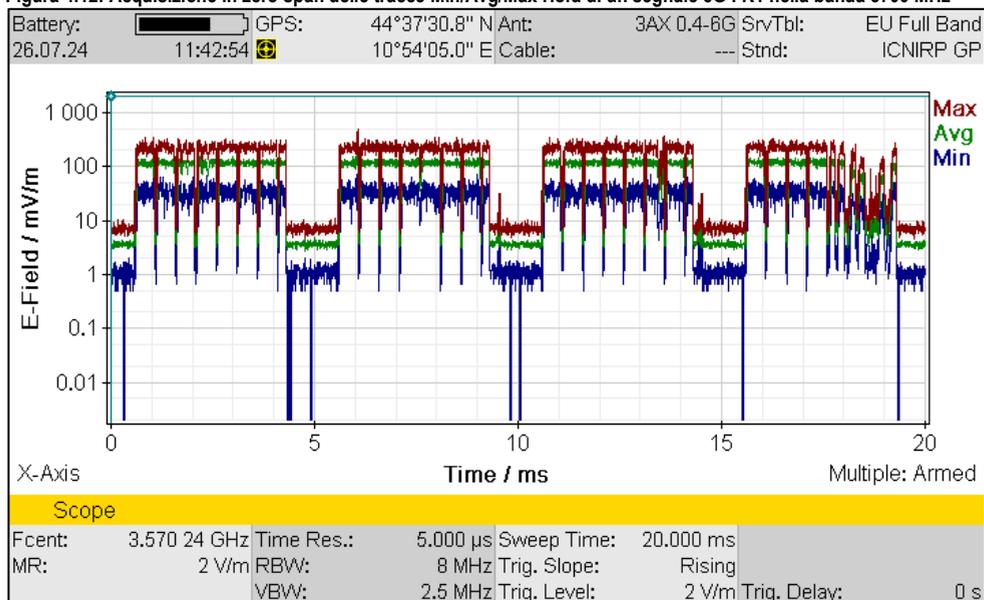
Nella Fig. 4.11 è possibile vedere come la scelta di diverse tipologie di tracce permetta di analizzare diversi parametri del segnale. Infatti, se l'uso di una traccia Max Hold permette una migliore analisi degli slot di traffico (in quanto rende la rilevazione indipendente dalla continuità di attivazione degli stessi), una traccia Min Hold è invece uno strumento ottimale per individuare e caratterizzare i canali di controllo (in quanto sono i soli a restare sempre attivi). Dalla traccia Max Hold (azzurra) è possibile, ad esempio, trarre un'indicazione della differenza di potenza ricevuta dall'SSB e dagli slot di traffico. Dalla traccia Min Hold (magenta) è possibile visualizzare i soli canali di controllo (SSB e RS).

Figura 4.11: Esempio di acquisizione in zero span di segnale DSS nella banda 1800 MHz



La Fig. 4.12 riporta un esempio di misura in zero span di un segnale 5G FR1 nella banda 3700 MHz, con struttura TDD corrispondente al Case C (F_{TDC} pari a 0.743) nel momento di forzatura del traffico: si possono chiaramente distinguere a destra i 6 SSB implementati e la differente intensità con cui vengono ricevuti nel punto di misura. Si può inoltre verificare la struttura TDD, che risulta costituita da 7.43 slot dedicati alla trasmissione in downlink e i rimanenti a quella in uplink.

Figura 4.12: Acquisizione in zero span delle tracce Min/Avg/Max Hold di un segnale 5G FR1 nella banda 3700 MHz



Un'ulteriore applicazione della misura in zero span, meritevole di un approfondimento più specifico, è la determinazione della frequenza centrale associata agli SSB. Come ampiamente descritto in precedenza, il valore della frequenza centrale degli SSB non è infatti fissato in maniera univoca. All'interno della bandwidth del segnale, gli SSB possono infatti occupare esclusivamente posizioni specifiche ottenute dal GSCN, ovvero le formule riportate in Tab. 1.3. Un generico segnale 5G sarà pertanto caratterizzato da una lista di frequenze ammissibili per il ruolo di frequenza centrale degli SSB. In assenza di strumentazione più idonea (ad esempio, analizzatori di spettro real time o scanner di rete), è possibile tentare di inferire l'effettiva frequenza centrale degli SSB attraverso semplici misure in zero span. I passaggi della procedura sono i seguenti:

- determinazione della lista di frequenze candidate al ruolo di frequenza centrale degli SSB. Tale lista può essere generata a partire dalle formule in Tab. 1.3, escludendo tutti quei valori che condurrebbero a SSB posizionati al di fuori - totalmente o parzialmente - della bandwidth del segnale 5G;
- per ogni valore della lista, effettuazione di una misura in zero span;
- analisi visiva della traccia acquisita, mirata alla identificazione degli SSB;
- in caso di presenza di SSB sulla traccia, acquisizione della potenza relativa al SSB più intenso mediante l'utilizzo di un marker da correlare direttamente alla frequenza candidata attualmente in analisi;

- selezione della frequenza candidata caratterizzata dal massimo valore di potenza dell'SSB più intenso.

A riepilogo di quanto sinora discusso, in Tab. 4.3 si riportano i parametri ottimali per la verifica dei parametri caratteristici del segnale.

Tabella 4.3: Valori ottimali per l'impostazione dei parametri dell'analizzatore di spettro ai fini della verifica dei parametri caratteristici del segnale.

Parametro	Detector	Traccia	Sweep time	Trigger	RBW	VBW
Requisito	Nessuna dipendenza	In grado di catturare la presenza di traffico oppure di garantire la visualizzazione dei segnali di controllo	Ottimale affinché il tempo di simbolo sia prossimo alla durata di scansione di un pixel. Per poter visualizzare l'SSB, lo sweep time deve essere almeno pari alla periodicità dello stesso	Tale da garantire la possibilità di agganciare la trama del segnale	Più grande possibile, ma entro la larghezza della banda occupata dall'SSB	Nessun requisito
Valori consigliati	Automatico	Max Hold e/o Min hold	Sweep time/n° punti a schermo ~ durata simbolo + sweep time >20ms	Periodico con periodicità pari alla periodicità di trasmissione degli SSB (tipicamente 20 ms)	>1 MHz e <240*Δf	Automatico

4.2.2.3 Stima del fattore $F_{extBeam}$

Il fattore $F_{extBeam}$ è il parametro che quantifica l'eventuale effetto del beamforming sui fasci di radiazione dedicati al traffico. Come discusso nel Cap. 1, le antenne attive mMIMO hanno la capacità di sintetizzare in tempo reale fasci di traffico ad alto guadagno e molto collimati, che puntano nella direzione degli utenti che richiedono il servizio. Questo meccanismo fa sì che la potenza ricevuta per il canale PDSCH possa essere superiore rispetto a quella relativa agli SSB. Operativamente, una stima attendibile del fattore $F_{extBeam}$ è ottenuta dal rapporto tra la potenza associata al canale PDSCH acquisita in condizioni di massima esposizione (traffico preferibilmente forzato e fascio diretto verso l'antenna ricevente) e la potenza associata all'SSB più intenso. La misura in zero span può pertanto

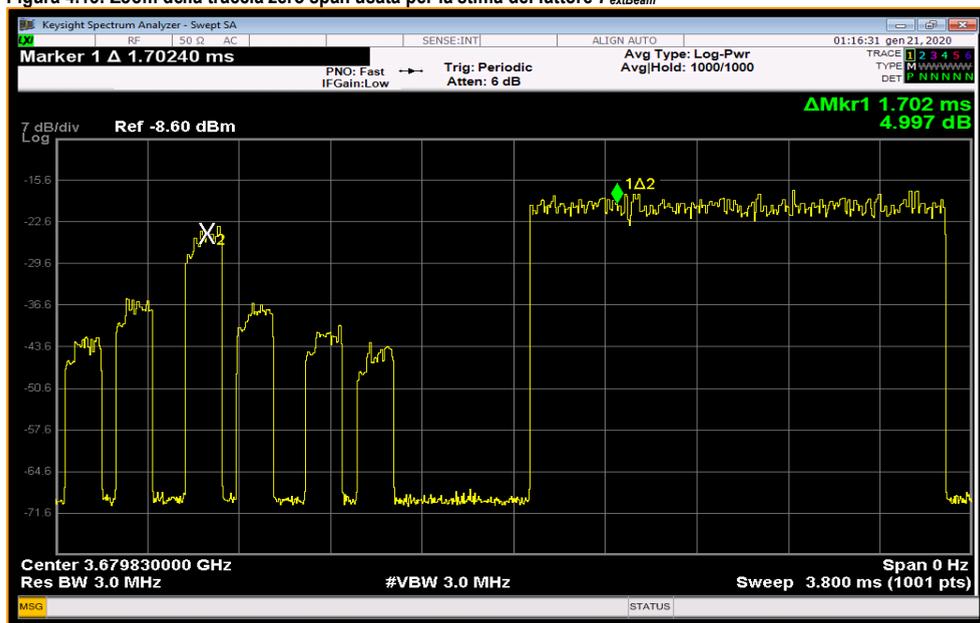
essere utile ai fini della stima di questo parametro, utilizzando le medesime impostazioni discusse nel paragrafo precedente a patto di garantire le seguenti condizioni di misura:

- utilizzo della trace Max Hold;
- tempo di acquisizione sufficientemente elevato per garantire la completa “salita” degli slot dedicati al PDSCH sullo spettro (soprattutto se non si dispone di un sistema di forzatura del traffico; in questo caso si possono trovare risultati attendibili soprattutto in contesti urbani ad elevato numero di utenti, che garantiscono la corretta “salita” degli slot dedicati al PDSCH);
- forzatura del traffico (attraverso le modalità descritte nel Cap. 2) con terminale posto nelle dirette vicinanze dell’antenna ricevente.

Da notare che l’impostazione del detector continua a non essere determinante anche per questa tipologia di misura. Il fattore $F_{extBeam}$ è infatti ottenuto come rapporto tra due potenze e, pertanto, un eventuale effetto del detector sul valore misurato agisce nella stessa maniera sul numeratore e denominatore della divisione. Per la stessa motivazione, a differenza di quanto accade per le impostazioni descritte nel paragrafo precedente, i requisiti per RBW divengono meno stringenti limitandosi ad assicurare un valore di RBW inferiore o uguale alla larghezza di banda del segnale in esame.

Un esempio di stima di $F_{extBeam}$ attraverso misure in zero span è presentato in Fig. 4.13.

Figura 4.13: Zoom della traccia zero span usata per la stima del fattore $F_{extBeam}$



Operativamente la stima avviene posizionando due markers sulla traccia, rispettivamente in corrispondenza:

- dell'SSB ricevuto a potenza più elevata;
- dello slot associato al PDSCH forzato.

La differenza in dB tra i due markers rappresenta la stima del fattore $F_{extBeam}$ per il punto di misura sotto indagine (circa 5 dB nell'esempio considerato).

Come si può notare nell'esempio in figura questo tipo di valutazione assume un carattere qualitativo, poiché l'acquisizione in zero span con trace Max Hold fornisce sia per gli SSB che per il PDSCH un andamento particolarmente oscillante del valore misurato. La posizione dei due markers è quindi stata scelta in maniera qualitativa, valutando per entrambi i segnali il livello medio tra i massimi misurati. Questo approccio può essere implementato in maniera più rigorosa in post elaborazione, stimando FextBeam come rapporto tra la media dei massimi associati al PDSCH e la media dei massimi associata al più intenso degli SSB. I metodi per determinare in maniera più precisa i livelli di PDSCH e SSB verranno discussi nel prossimo paragrafo. La Tab. 4.4 riassume i valori ottimali per l'impostazione dei parametri dell'analizzatore di spettro ai fini della valutazione in zero span del fattore $F_{extBeam}$.

Tabella 4.4: Valori ottimali per l'impostazione dei parametri dell'analizzatore di spettro ai fini della stima del parametro $F_{extBeam}$

Parametro	Detector	Traccia	Sweep time	Trigger	RBW	VBW	Forzatura
Requisito	Nessuna dipendenza	In grado di catturare la presenza di traffico oppure di garantire la visualizzazione dei segnali di controllo	Ottimale affinché il tempo di simbolo sia prossimo alla durata di scansione di un pixel. Per poter visualizzare l'SSB, lo ST deve essere almeno pari alla periodicità dello stesso	Tale da garantire la possibilità di agganciare la trama del segnale	Entro la larghezza della banda del segnale	Nessun requisito	Finalizzata alla ricezione dei livelli di potenza del PDSCH massimi per il punto di misura
Valori consigliati	Automatico	Max Hold	Sweep time/n° punti a schermo ~ durata simbolo + sweep time >20ms	Periodico con periodicità pari alla periodicità di trasmissione degli SSB (tipicamente 20 ms)	Automatico	Automatico	Forzatura mediante terminale posto nelle vicinanze dell'antenna ricevente

4.2.2.4 Misura dei livelli dei canali di controllo o di traffico

L'acquisizione in modalità zero span ai fini della misura della potenza ricevuta dai canali di controllo o di traffico deve rispettare i seguenti requisiti/criteri:

- frequenza di analisi corrispondente alla frequenza in cui si trovano sia i canali di controllo, sia quelli di traffico (frequenza centrale dell'SSB);
- RBW di ampiezza sufficiente per caratterizzare con un'adeguata statistica di sottoportanti, ma inferiore alla larghezza di banda occupata dall'SSB ($> 1 \text{ MHz}$ e $< 240 \cdot \Delta f$);
- VBW superiore all'RBW, per garantire di non trascurare contributi con caratteristiche di tipo rumore (ad es. segnali di traffico con modulazioni QAM);
- utilizzo di un trigger periodico da impostare con un periodo pari alla periodicità dell'SSB;
- sweep time adeguato, in funzione del numero di punti a schermo, a garantire che il tempo di simbolo (stimato in base alla numerologia) sia prossimo alla durata di scansione di un pixel. Deve essere almeno pari alla periodicità dell'SSB per essere certi di visualizzarlo a schermo, ma può essere anche inferiore adottando opportuni offset temporali per garantire la visualizzazione;
- detector RMS;
- acquisizione in average (lineare) delle tracce (> 10 tracce).

Con questo metodo, è possibile rilevare il livello di potenza dell'SSB e/o del traffico. Per una misura precisa e ripetibile di quest'ultimo, è però necessario garantire la forzatura del traffico almeno per un tempo pari alla durata dell'average sulle tracce.

Per essere certi delle condizioni di riempimento degli slot di traffico, è opportuno attivare anche la traccia Clear Write e la traccia Min Hold: se queste e la traccia in average si mantengono vicine tra loro, è garantita la stabilità del riempimento degli slot di traffico durante la misura.

Per la misura della potenza associata all'SSB, è necessario leggere la potenza del picco dell'SSB più elevato tra quelli ricevuti, e quindi procedere al calcolo di seguito indicato:

$$P_{SSB} = \frac{N_{SC-SSB} \cdot \Delta f}{NBW} \cdot P_{trace}$$

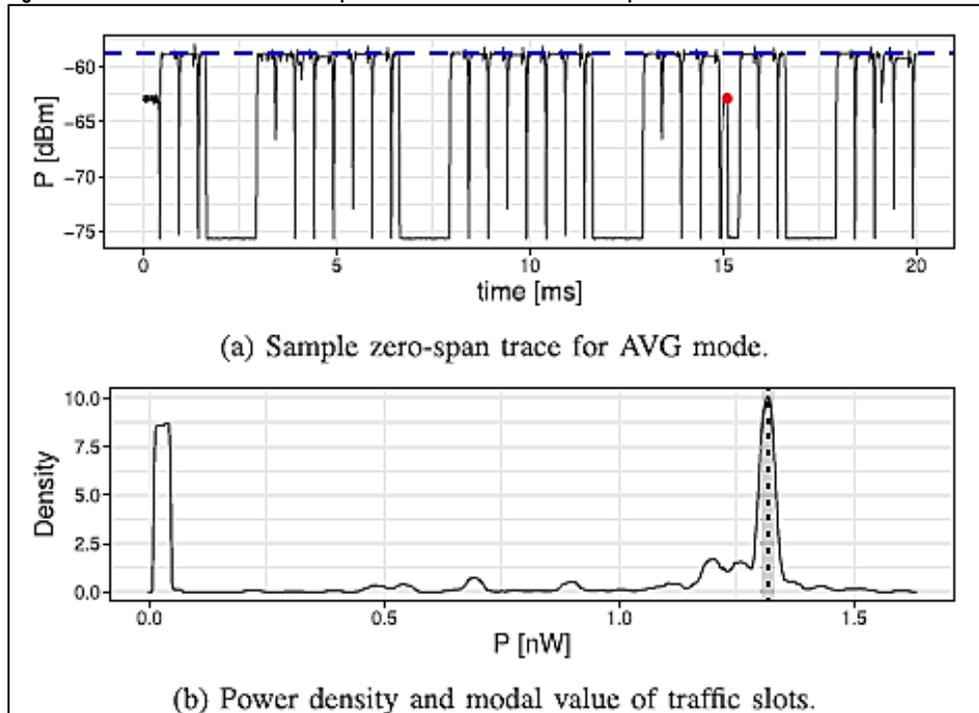
dove:

- N_{SC-SSB} è il numero di sottoportanti nell'SSB (240);
- Δf è la spaziatura delle sottoportanti (definita dalla numerologia);
- NBW è la noise bandwidth dell'analizzatore;
- P_{trace} è la potenza dell'SSB più elevato, letta dalla traccia sull'analizzatore.

Per la misura della potenza associata agli slot di traffico, è necessario acquisire la traccia in average durante la forzatura (secondo i principi descritti poco sopra), e quindi determinare il livello di potenza associato al traffico.

Un metodo automatico per farlo è descritto in [18] e prevede l'analisi numerica delle tracce per la determinazione della moda dei valori di potenza associati ai pixel a schermo (come visibile in Fig. 4.14).

Figura 4.14: Analisi di una traccia zero span con distribuzione dei valori di potenza e individuazione del valore modale



Tale elaborazione numerica prevede di effettuare l'analisi della densità di probabilità dei livelli di potenza associati ai pixel a schermo, individuandone la moda (valore più probabile). È stato verificato [18] che questo metodo permette una buona misura dell'effettivo livello del traffico, indipendente dalle piccole fluttuazioni (legate ad esempio alla propagazione) e dal fatto che la trama sia continuamente piena.

Una volta identificato il livello di potenza del traffico $P_{traffico}$ associato alla specifica RBW impostata, è possibile ricavare la potenza massima associata al segnale con la formula seguente:

$$P_{Max} = \frac{N_{SC} \cdot \Delta f}{NBW} \cdot P_{traffico}$$

dove:

- N_{SC} è il numero di sottoportanti complessivo (funzione della larghezza di banda e della numerologia);
- Δf è la spaziatura delle sottoportanti (definita dalla numerologia);
- NBW è la noise bandwidth dell'analizzatore;
- $P_{traffico}$ è la potenza degli slot di traffico, ricavata dalla traccia sull'analizzatore.

A riepilogo di quanto sinora discusso, si riportano in Tab. 4.5 i parametri ottimali per la misura del livello di traffico e l'analisi di vantaggi e svantaggi associati al metodo definito.

Tabella 4.5: Valori ottimali per l'impostazione dei parametri dell'analizzatore di spettro ai fini della misura della potenza associata ai canali di controllo e di traffico

Parametro	Detector	Traccia	Sweep time	Trigger	RBW	VBW
Requisito	No sovrastima segnali noise-like	In grado di rappresentare il valore più probabile dei RE di traffico (senza sovrastima legata a singoli RE cui sia stato eventualmente applicato un Boosting Factor)	Ottimale affinché il tempo di simbolo sia prossimo alla durata di scansione di un pixel	Indispensabile poter agganciare e sincronizzarsi con la trama del segnale	Più grande possibile, ma entro la larghezza della banda dell'SSB per la misura della sua ampiezza, ed entro la banda del segnale per la misura del traffico	Non trascurare contributi al valore di potenza con caratteristiche di tipo rumore
Valori consigliati	RMS	Average (almeno 10 tracce)	Sweep time/n° punti a schermo ~ durata simbolo	Periodico	>1 MHz (e $240 \cdot \Delta f$ per misura SSB)	>RBW

Di seguito sono elencati i vantaggi attribuibili a questo metodo:

- uso di analizzatori classici, senza requisiti troppo stringenti sulle performance;
- risultati ripetibili e confrontabili con quanto ottenuto dalle misure vettoriali;
- funziona con tutti i segnali (4G e 5G), anche con sistemi di forzatura che non garantiscono il riempimento continuativo della trama, purché vi sia una preponderanza di slot di traffico pieni rispetto a quelli vuoti;
- nel caso in cui sia possibile la forzatura del traffico con lock della cella (possibile solo per sistemi SA), è possibile accertare il superamento del limite normativo.

Tra gli svantaggi, invece, si possono elencare i seguenti:

- l'analizzatore classico deve disporre di un trigger periodico (o a finestra temporale);
- il metodo non permette l'accertamento del superamento in caso in cui siano presenti più celle contemporaneamente che insistono sul punto di misura;
- l'acquisizione in una condizione di buona stabilità temporale del riempimento della porzione di trama analizzata dipende dal tecnico;
- il metodo prevede una post-analisi che necessita di qualche passaggio (richiede anche la conoscenza della NBW dell'analizzatore).

4.2.3 Monitoraggio selettivo

Nel corso degli ultimi anni il mercato degli strumenti di misura di campo elettromagnetico si è arricchito di tante soluzioni per il monitoraggio selettivo a lungo termine. A differenza delle comuni centraline di misura in banda larga che consentono di determinare l'andamento temporale del campo elettrico complessivo, tale strumentazione ha il pregio di analizzare selettivamente tutti i contributi a frequenze differenti che concorrono al valore complessivo di campo. Il monitoraggio selettivo può essere utilizzato per perseguire obiettivi differenti, a seconda dell'intervallo temporale di misura selezionato:

- analisi sulle 24 ore giornaliere, nel caso in cui l'attività sia riferita alla verifica del rispetto del valore di attenzione/obiettivo di qualità;
- intervallo liberamente scelto dal tecnico, nel caso in cui l'attività sia finalizzata alla caratterizzazione a lungo termine di uno o più segnali oggetto di indagine.

Indipendentemente dalla finalità di utilizzo di un sistema di monitoraggio selettivo, è evidente che una soluzione di questo tipo risulti particolarmente efficace nel caso di misure su segnali caratterizzati da una elevata variabilità spazio-temporale come quelli 5G. In particolare, la possibilità di effettuare monitoraggi selettivi specifici per ciascuna frequenza di interesse permette in linea di principio di valutare la conformità con il valore di attenzione/obiettivo di qualità affrancandosi dalla necessità di forzare il traffico dati verso la direzione del punto di misura. Il monitoraggio in continuo, infatti, presenta il grande vantaggio di fornire direttamente il valore medio di campo sulle 24 ore associato a ciascun contributo, senza il bisogno di dover passare attraverso procedure di estrapolazione. La Fig. 4.15 mostra alcune delle soluzioni attualmente presenti sul mercato finalizzate al monitoraggio selettivo.

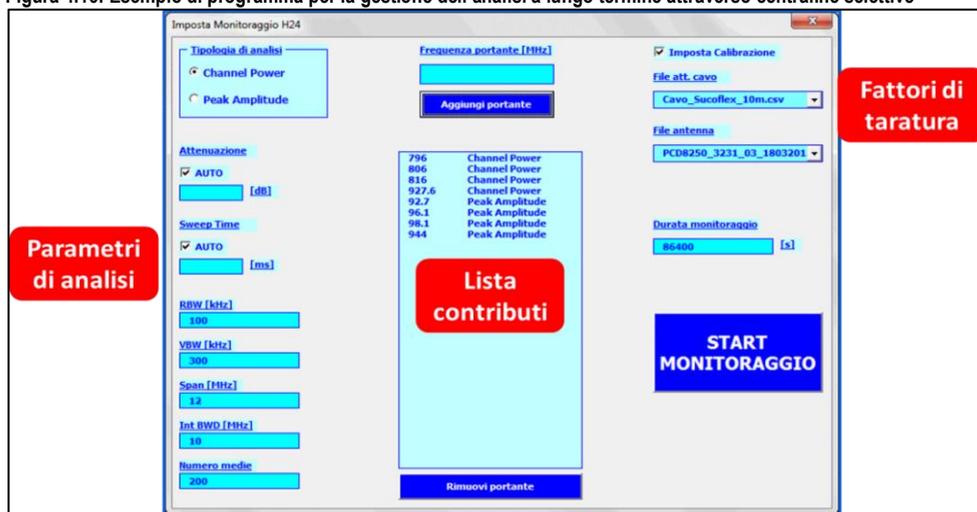
Figura 4.15: Alcune delle soluzioni presenti sul mercato per il monitoraggio selettivo a lungo termine



Gli apparecchi per il monitoraggio selettivo consentono di effettuare analisi spettrale con le stesse funzionalità di un analizzatore di spettro e sono caratterizzati da un design più compatto e funzionale alla possibile installazione in ambienti outdoor. È tipicamente possibile impostare l'analisi della singola traccia spettrale utilizzando i medesimi parametri normalmente utilizzati con un analizzatore di spettro: RBW, VBW, frequenza centrale, span, sweep time, trace e detector. È inoltre possibile integrare la potenza nella banda di analisi con la funzione Channel Power. Tutti i comandi possono essere impartiti da remoto attraverso istruzioni SCPI, il che rende questi strumenti particolarmente adatti all'implementazione di procedure di misura automatizzate attraverso opportune routine di analisi. Nello specifico, è spesso possibile realizzare programmi che consentano di effettuare l'analisi consecutiva e ciclica di una serie di bande di frequenza.

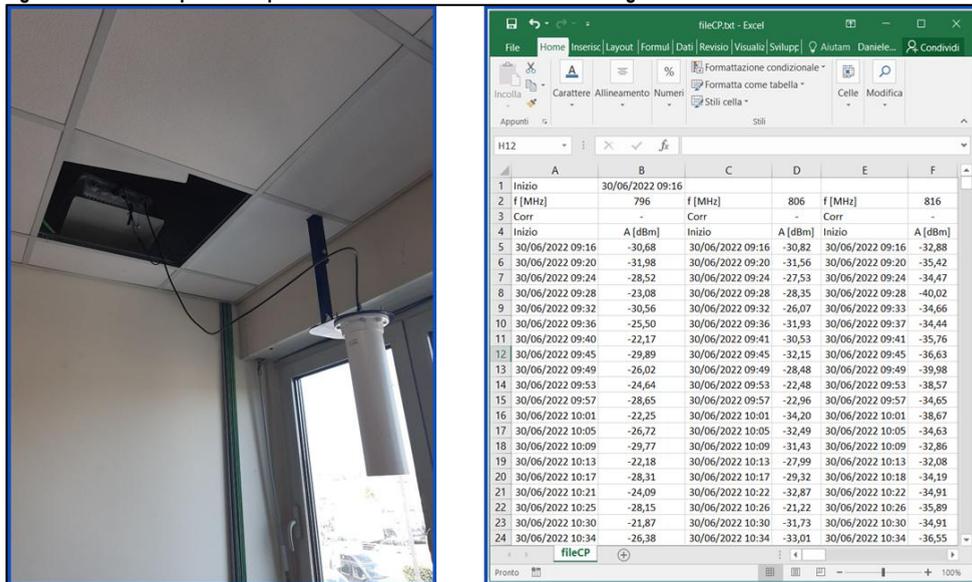
Nel seguito verrà presentato, a titolo di esempio, il setup sperimentale della stazione di monitoraggio selettiva progettata e installata da ARPA Lazio in un punto di misura sensibile. La Fig. 4.16 mostra il software di analisi realizzato da ARPA Lazio per la gestione dell'attività di monitoraggio attraverso centraline selettive.

Figura 4.16: Esempio di programma per la gestione dell'analisi a lungo termine attraverso centraline selettive



Il dettaglio dell'installazione - celata in questo caso da un controsoffitto - insieme alla struttura del report di misura è riportato in Fig. 4.17.

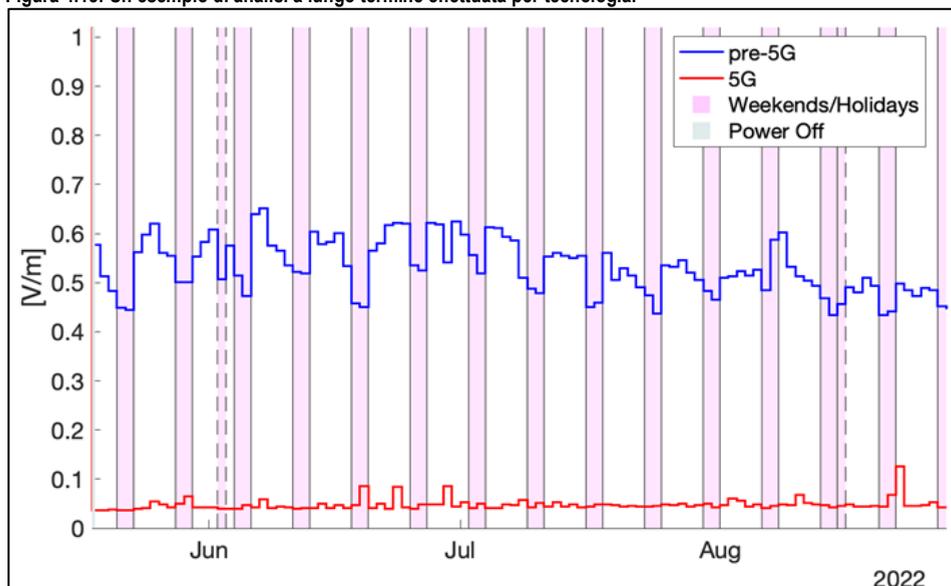
Figura 4.17: Un esempio di setup strumentale e di risultati dell'analisi a lungo termine



A seguito dell'impostazione delle bande di frequenza di interesse, il software gestisce l'acquisizione del valore di campo associato a ciascuna di esse ripetendo ciclicamente l'operazione per tutto il periodo di misura. Sommando quadraticamente i contributi di ciascuna banda analizzata sarà possibile verificare la rispondenza ai limiti normativi nelle giornate di monitoraggio.

Sarà inoltre possibile, aggregando le bande per tecnologia, analizzare l'evoluzione nel tempo della potenza associata a ciascuna tecnologia radio. In Fig. 4.18 un esempio di analisi a lungo termine effettuata per tecnologia.

Figura 4.18: Un esempio di analisi a lungo termine effettuata per tecnologia.



4.3 MISURE CON L'ANALIZZATORE VETTORIALE

Un'altra tipologia di misura in banda stretta è quella vettoriale, ovvero la misura che permette la decodifica dei diversi canali che compongono il segnale. Lo strumento che permette di effettuare tale sofisticata e complessa analisi è l'analizzatore di spettro vettoriale che, oltre a consentire tutte le analisi accessibili ai comuni analizzatori a supereterodina, implementa specifici moduli hardware e software che abilitano la demodulazione del segnale 5G. In parole semplici, gli analizzatori di spettro vettoriale campionano la forma d'onda del segnale da analizzare e applicano le medesime procedure di 'aggancio' alla trama 5G utilizzate dai comuni terminali mobili per effettuare la sincronizzazione iniziale. Questo permette di risolvere la trama, garantendo l'ottenimento di importanti informazioni anche riguardo alla potenza associata ai singoli canali che compongono il segnale 5G. Gli analizzatori di spettro vettoriale sono strumenti estremamente complessi e spesso non è un compito semplice orientarsi tra le diverse soluzioni proposte dalle ditte costruttrici alla ricerca di quella ottimale per le proprie esigenze. Sebbene la definizione delle specifiche tecniche ideali sia un tema estremamente complesso che esula dalle finalità del presente documento, è possibile fornire indicazioni generali su alcuni punti fondamentali da considerare in fase di programmazione di acquisto. Nello specifico, si consiglia sempre di effettuare una valutazione attenta almeno dei seguenti requisiti:

- **Intervallo di frequenza di utilizzo:** come precedentemente descritto, il segnale 5G è tipicamente implementato in due distinte bande di frequenza. A seconda delle esigenze di

misura, la scelta dell'intervallo di frequenza caratteristico dello strumento dovrà essere effettuata in base alla previsione dell'utilizzo che se ne vuole fare. Nel caso in cui si preveda di effettuare misure esclusivamente nella banda sub-6 GHz, un analizzatore vettoriale con taglio in frequenza pari a 7 GHz sarà la scelta che ottimizza il rapporto costi-benefici. Alternativamente, se si desidera dotarsi di uno strumento in grado di analizzare tutte le tipologie di segnali 5G potenzialmente implementabili, la scelta dovrà necessariamente ricadere su un analizzatore con taglio in frequenza molto più elevato (ad esempio 32 GHz). Una identificazione corretta della soluzione più adatta alle esigenze contingenti è una attività delicata e fondamentale in quanto il taglio in frequenza è un parametro che influenza in maniera critica il prezzo finale dello strumento;

- **Ampiezza della banda di demodulazione:** per effettuare l'analisi vettoriale di un segnale 5G è necessario campionare la forma d'onda in ingresso con una frequenza di campionamento sufficientemente elevata per la corretta identificazione di tutte le componenti spettrali del segnale. In altre parole, la banda di demodulazione dell'analizzatore rappresenta la massima frequenza di campionamento utilizzabile dallo strumento e coincide, a tutti gli effetti, con la massima estensione di banda che lo strumento è in grado di demodulare correttamente. La scelta ottimale di questo parametro è, ancora una volta, frutto di un compromesso tra esigenze e costi. Infatti, per demodulare correttamente la trama di un segnale 5G è necessario utilizzare un analizzatore dotato di ampiezza di banda almeno pari alla larghezza del segnale stesso. Ciò significa che una corretta demodulazione di tutti i segnali sub-6GHz necessita di almeno 100 MHz di banda di demodulazione mentre per segnali mmWave il requisito sale fino a 400 MHz. Si specifica che nei datasheet degli strumenti la banda di demodulazione è anche indicata come banda d'analisi;
- **Caratteristiche del software di analisi:** i campioni acquisiti dallo strumento vengono infine processati da opportuni software che applicano algoritmi di decodifica analoghi a quelli utilizzati dai terminali mobili durante le fasi di riconoscimento e sincronizzazione del segnale. Il dettaglio delle analisi che possono essere effettuate dall'utente dipende criticamente dalla qualità e complessità del programma utilizzato. Esistono infatti software che forniscono informazioni sulla potenza ricevuta relativa ai soli canali di controllo e soluzioni più avanzate che permettono di lavorare sulla distribuzione della potenza ricevuta per ciascun RE che compone la trama del segnale 5G. Tipicamente la prima opzione è molto frequente negli analizzatori di spettro portatili mentre la seconda è peculiare degli strumenti da banco. È evidente che in questo caso la scelta vada effettuata in base alle finalità dell'analisi anche se, in generale, la possibilità di avere informazioni sulla potenza ricevuta per ciascun RE della trama è da preferirsi. Tuttavia, ci sono due elementi da tenere in debita considerazione:
 - a) spesso le ditte commercializzano un'unica versione del software di analisi rendendo di fatto impossibile effettuare una scelta in base alle proprie esigenze;
 - b) la possibilità di demodulare l'intera trama non dipende esclusivamente dalla tipologia di software acquistato ma anche dall'ampiezza della banda di demodulazione dello strumento (ad esempio, un analizzatore con banda di demodulazione pari a 40 MHz non sarà in grado di risolvere completamente la

trama di un segnale 5G largo 80 MHz, nemmeno se dotato di un software potenzialmente in grado di effettuare tale analisi).

Indipendentemente dalla soluzione hardware e software a disposizione, la misura vettoriale è un'operazione tecnicamente complessa. Il primo passaggio da effettuare consiste nella corretta impostazione di numerosi parametri propedeutici all'ottenimento di risultati attendibili. Alcuni software implementano procedure automatizzate per la corretta identificazione della maggior parte dei parametri: in tal caso è tipicamente sufficiente impostare la frequenza centrale del segnale 5G e la sua larghezza di banda e lasciare che gli altri parametri siano impostati automaticamente dal software di analisi. Tuttavia, spesso le routine automatizzate non garantiscono un'affidabilità del 100%, obbligando il tecnico all'impostazione manuale di alcuni parametri. Per questo motivo si ritiene utile fornire una lista dei principali parametri da impostare per effettuare una corretta misura vettoriale di un segnale 5G:

- frequenza centrale e larghezza di banda del segnale;
- banda di frequenza del segnale (FR1 o FR2);
- Cell ID delle celle ricevute;
- numerologia associata ai canali di traffico e agli SSB;
- frequenza centrale degli SSB (tra quelle previste dalla Tab. 1.3);
- mappatura temporale degli SSB nella trama (Case);
- numero massimo di SSB supportati dal segnale (L_{max}) e lista degli indici degli SSB effettivamente attivi;
- periodicità degli SSB;
- duplexing del segnale (FDD o TDD).

Un esempio di un modulo software che determina automaticamente il valore di alcuni parametri caratteristici è rappresentato in Fig.4.19.

Figura 4.19: Software che determina in automatico alcuni parametri propedeutici alla misura vettoriale

5G NR					
Atten 10 dB					
Scan Results					
Lmax	8	-	-	-	-
SSB Periodicity (ms)	20	-	-	-	-
SSB RB Offset	248	-	-	-	-
SSB SC Offset	31	-	-	-	-
SSB Delta Center (kHz)	-435.000	-	-	-	-
Sync Corr (%)	97.610	-	-	-	-
Channel Power (dBm)	-52.330	-	-	-	-
Freq Error (Hz)	100361.200	-	-	-	-
Time Offset (us)	18042.590	-	-	-	-
PSS EVM (%rms)	41.400	-	-	-	-
SSS EVM (%rms)	43.990	-	-	-	-
PBCH EVM (%rms)	107.990	-	-	-	-
PBCH DMRS EVM (%rms)	57.750	-	-	-	-
Composite EVM (%rms)	84.880	-	-	-	-
SS-RSRP (dBm)	-66.210	-	-	-	-
SS-RSRO (dB)	-9.980	-	-	-	-
RSRP (dBm)	-43.220	-	-	-	-
PSS Power (dBm)	-66.200	-	-	-	-
SSS Power (dBm)	-66.210	-	-	-	-
PBCH Power (dBm)	-66.450	-	-	-	-
PBCH DMRS Power (dBm)	-66.550	-	-	-	-

Measuring .

Come abbiamo visto nei paragrafi precedenti, esistono tecniche di misura piuttosto semplici che permettono, in determinate condizioni, di inferire il corretto valore di alcuni di questi parametri. Un'altra possibilità consiste nell'utilizzare degli scanner di rete per effettuare una valutazione dei parametri propedeutici alla misura vettoriale.

Il prossimo paragrafo fornirà una veloce panoramica sull'utilizzo degli scanner di rete a supporto delle misure effettuate mediante analizzatori di spettro vettoriali. Successivamente verranno discusse, in paragrafi distinti, le due diverse possibilità di misura vettoriale in base alla tipologia di strumento e di software di analisi a disposizione (analisi dei soli SSB e demodulazione completa della trama del segnale). Infine, verrà dedicato un ultimo paragrafo alla possibilità di effettuare misure vettoriali sfruttando sistemi *Software Defined Radio* (SDR) affiancati a software sviluppato direttamente dall'utilizzatore.

4.3.1 Utilizzo di scanner di rete per la determinazione dei parametri di analisi

Come già anticipato nel paragrafo precedente, al fine di effettuare correttamente una misura vettoriale, è necessario impostare diversi parametri sull'analizzatore. Sebbene i moderni analizzatori vettoriali di segnale siano generalmente dotati di software che rilevano in automatico le caratteristiche del segnale

ricevuto, in alcuni casi può essere utile, se non necessario, impostare manualmente alcuni parametri di analisi.

Proprio in ragione di tale esigenza negli ultimi anni, accanto agli strumenti deputati all'effettuazione di misure di campo elettromagnetico, si sono imposti sul mercato strumenti nati per l'analisi della qualità del segnale e capaci di decodificare le informazioni di rete che viaggiano sull'interfaccia radio: gli scanner vettoriali di rete.

Gli scanner vettoriali di rete presenti oggi in commercio si compongono tipicamente di due elementi principali:

- lo scanner da banco, collegato ad un'antenna ricevente che ha la capacità di decodificare le informazioni di rete che viaggiano nella tratta di downlink;
- lo scanner portatile, collegabile allo scanner da banco, che consente anche la decodifica delle informazioni che viaggiano sulla tratta di uplink.

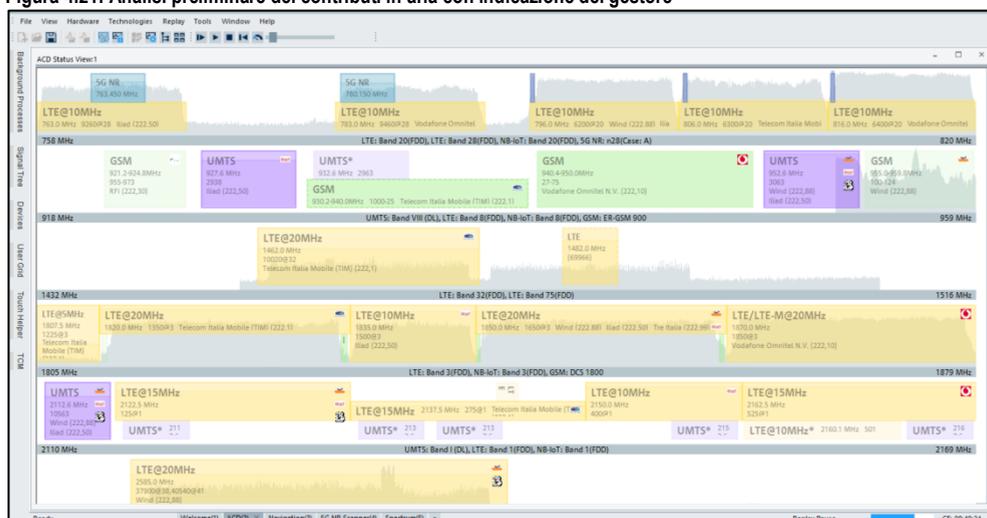
Risulta importante sottolineare che entrambi i componenti possono lavorare autonomamente consentendo di decodificare un numero di informazioni più limitato rispetto a quello ottenuto tramite l'utilizzo congiunto ma che, nella stragrande maggioranza dei casi pratici, risulta comunque sufficiente a soddisfare le esigenze di chi effettua misure di campo elettromagnetico. Un esempio delle due tipologie di scanner è riportato in Fig. 4.20.

Figura 4.20: Configurazione tipica di uno scanner vettoriale, con componente da banco e portatile



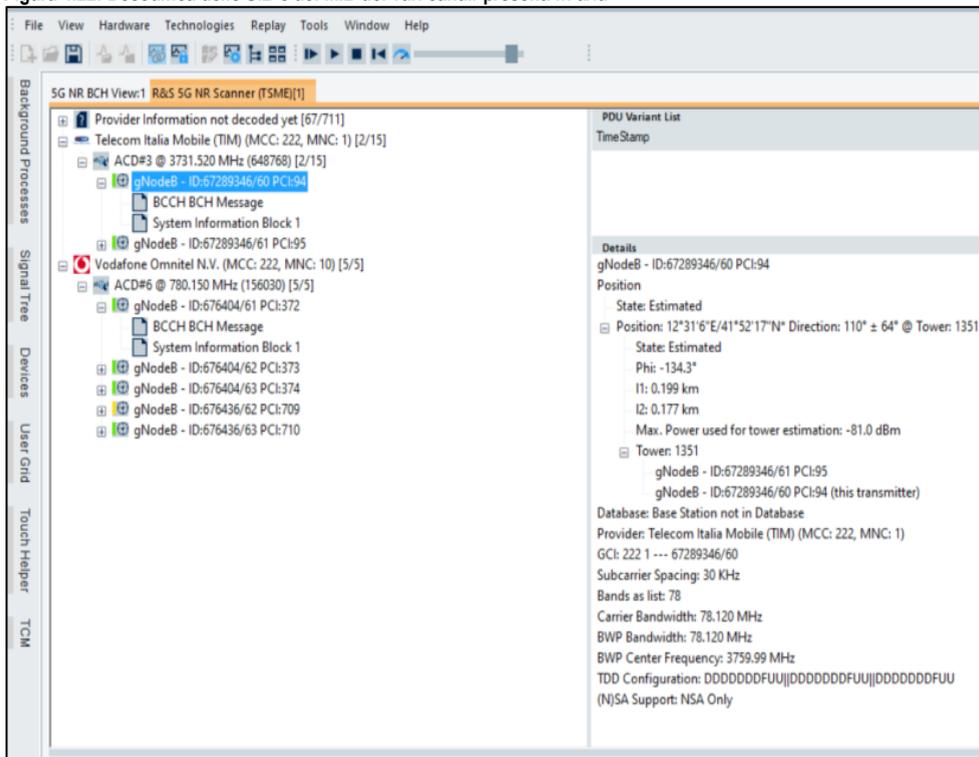
Gli scanner vettoriali di rete rappresentano, per chi effettua misure di campo elettromagnetico, degli strumenti complementari a quelli utilizzati per le misure selettive. La loro utilità si manifesta in varie fasi dell'analisi di misura. La fase preliminare all'effettuazione delle misure di campo è tipicamente dedicata all'identificazione dei contributi di campo più significativi in termini di intensità. L'utilizzo di scanner vettoriali di rete consente di velocizzare tale attività preliminare fornendo in modo immediato e facilmente intellegibile i contributi più impattanti e l'indicazione del gestore che esercisce tale contributo (vedi Fig. 4.21).

Figura 4.21: Analisi preliminare dei contributi in aria con indicazione del gestore



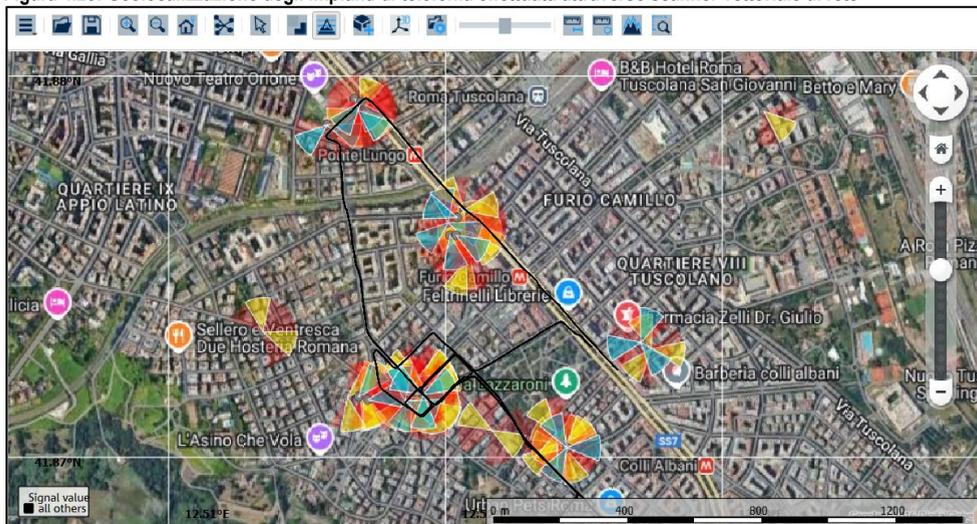
Identificati i contributi maggiormente impattanti è poi necessario operare una misura vettoriale su ciascuno di essi impostando i parametri di analisi in modo che il contributo demodolato sia effettivamente acquisito in condizioni di perfetta sincronizzazione. La fase di corretta impostazione delle configurazioni di misura è quella nella quale il valore aggiunto offerto dall'utilizzo degli scanner è maggiormente significativo. In questa fase, infatti, è possibile richiamare i SIB e il MIB di ciascun segnale e desumere da tali blocchi tutte le informazioni utili alla corretta misura vettoriale, elencate nel Par. 4.3 (vedi Fig. 4.22).

Figura 4.22: Decodifica delle SIB e del MIB dei vari canali presenti in aria



Un'altra funzionalità interessante legata all'utilizzo degli scanner vettoriali, pur se non direttamente riferibile all'attività di misura selettiva, è la possibilità di triangolare le informazioni di rete ricevute fornendo indicazioni circa la localizzazione spaziale degli impianti dai quali il segnale decodificato è effettivamente irradiato (vedi Fig. 4.23).

Figura 4.23: Geolocalizzazione degli impianti di telefonia effettuata attraverso scanner vettoriale di rete



È importante sottolineare che la possibilità di decodifica e acquisizione dei parametri di rete relativi ai segnali 5G è generalmente possibile solo nel caso in cui il segnale sia irradiato in modalità SA. È stato tuttavia verificato sperimentalmente che, allo stato attuale di implementazione della rete 5G, molti gestori trasmettono informazioni di controllo decodificabili anche nel caso di segnali NSA, allargando di fatto la casistica in cui gli scanner possono fornire un utile supporto alla misura vettoriale.

La Fig. 4.24 mostra la capacità di analisi offerta dallo scanner da banco nel caso di segnali 5G; nella Fig. 4.25 è invece riportato uno zoom di alcune delle informazioni decodificate che evidenzia la capacità dello scanner di indicare il pattern TDD di un segnale 5G irradiato in modalità NSA alla frequenza di 3759.99 MHz.

Figura 4.24: Potenzialità di analisi offerte dallo scanner vettoriale sui segnali 5G

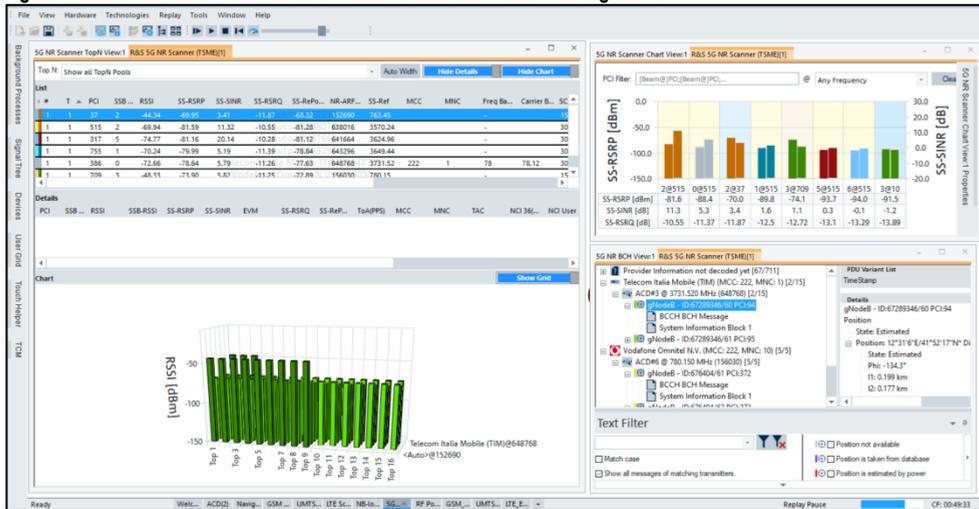


Figura 4.25: Configurazione TDD decodificata dallo scanner vettoriale di rete

SS-Ref	MCC	MNC	Freq Band	Carrier Bandwidth	SCS	BWP Bandwidth	BWP Center Frequency	5G NR Mode	TDD Pattern
3570.24	-	-	Auton@152490	30	30	-	-	fr. B.	-
3624.96	-	-	Auton@152490	30	30	-	-	fr. B.	-
3649.44	-	-	Auton@152490	30	30	-	-	fr. B.	-
3731.52	222	1	78 Telecom Italia Mobile (TM)@848768	30	78.12	3759.99	-	NSA	DDDDDDDFUU DDDDDDDFUU DDDDDDDFUU
780.15	-	-	Telecom Italia Mobile (TM)@848768	15	15	-	-	fr. B.	-

4.3.1.1 Scanner di rete portatili

Oltre agli scanner vettoriali illustrati nel precedente paragrafo, una possibile soluzione per l'individuazione di parametri di rete ai fini della misura dei segnali di telefonia mobile è costituita dalle applicazioni di diagnostica dell'interfaccia radio installate su terminali mobili adattati (analoghi a quelli descritti nel Cap. 2). Questa tipologia di scanner accede alle informazioni tramite il chipset del terminale, permettendo di ricavare una varietà di parametri relativi all'interfaccia radio e alla qualità del segnale.

All'atto pratico delle misure su segnali di nuova generazione, lo scanner può essere usato per ottenere, ad esempio, la posizione in frequenza dell'SSB del segnale 5G o del segnale DSS in esame. Tale informazione deve essere infatti conosciuta con una precisione di pochi kHz per garantire una corretta decodifica del segnale. La Fig. 4.26 mostra la schermata relativa alla rete mobile con disponibilità di connettività 5G (individuata dal parametro *Packet technology* con valore EN-DC, che sta per *Enhanced - Dual Connectivity*).

Figura 4.26: Scanner di rete – connettività 5G

LTE	
System	LTE FDD 800 band 20
Packet Technology	EN-DC
WiFi Connection	UNKNOWN
SSID	N.A.
Cell name	N.A.
Distance to BTS	N.A.
Cell Id	4865036
eNodeB / CID	19004 / 12
RNC / CID	74 / 15372
TAC	12065
MCC	222
MNC	10
Operator	vodafone IT
MME	184
EARFCN	6400
Serving Carrier RSSI	-55.60 dBm
Serving SNR	13.00 dB
Serving RSRQ	-6.80 dB
Serving RSRP	-80.20 dBm
Serving PCI	54
Detected RSRQ	-21.00 dB
Detected RSRP	-90.60 dBm
Detected PCI	74

Figura 4.27: Scanner di rete: identificazione SSB

NR Summary				
Serving cell information				
Set	SSB NR-ARFCN	PCI	BWP ID	Numerology
SCGPSC	645312	3	0	30 kHz
SCGPSC	645312	3	1	30 kHz
SCGPSC	645312	3	0	30 kHz
SCGPSC	645312	3	1	30 kHz

Nel caso di 5G NSA, il terminale indica la portante LTE primaria del sito. Ciò accade poichè la portante 5G viene considerata in aggregazione alle portanti LTE. Tale indicazione risulta importante per comprendere il lock su 5G NSA e la forzatura di traffico (Par. 2.2). Per quanto riguarda la tecnologia LTE, lo scanner di rete permette in particolare di identificare i Cell ID (PCI in figura) della cella primaria e delle bande aggregate insieme alla potenza di segnale ricevuto (RSRP), come mostrato in Fig. 4.28.

Figura 4.28: Scanner di rete - sistemi LTE

Set	Band	Channel	PCI	SNR	RSRP
PC	FDD 1800 band 3	1850	118	19.10	-84.30
SC1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SC2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SC3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SC4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SC5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SC6	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
SC7	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
DC	FDD 700 band 28	9460	54	N.A.	-76.50
DC	FDD 700 band 28	9460	453	N.A.	-80.90
DC	FDD 800 band 20	6400	54	N.A.	-83.60
DC	FDD 800 band 20	6400	74	N.A.	-90.40
DC	FDD 800 band 20	6400	55	N.A.	-92.40
DC	FDD 1800 band 3	1850	117	N.A.	-96.10
DC	FDD 2600 band 7	3025	72	N.A.	-101.10
DC	FDD 2100 band 1	525	240	N.A.	-105.10
DC	FDD 2100 band 1	525	306	N.A.	-105.20

In aggiunta è possibile decodificare i MIB e SIB trasmessi dalla rete mobile. Le informazioni contenute all'interno possono riguardare, ad esempio, il Δf e la frequenza del SSB per i sistemi 5G.

Seppur non strettamente connesso con l'argomento principale del presente documento, si ritiene utile mostrare l'utilizzo degli scanner per l'identificazione del parametro Boosting Factor relativo alla tecnologia 4G. Nello specifico, lo scanner è in grado di fornire i valori dei parametri P_a e P_b , necessari per calcolare il Boosting Factor del segnale LTE. In Fig. 4.28 è mostrato il report della segnalazione ricevuta dal terminale. Come già evidenziato nel Cap. 2, uno scanner di rete portatile è in grado di alterare le capacità di connessione alla rete mobile del terminale. Ciò avviene modificando le informazioni inviate alla rete mobile nel *UEInformationResponse*, riportato in basso nella Fig. 4.29.

Figura 4.29: Scanner di rete: esempio di scambio di informazioni tra terminale e rete mobile

Message	Time	Technology / Layer
SERVICE_REQUEST	08:06:18.873	LTE / L3
RRCConnectionRequest	08:06:18.873	LTE / RRC
RRCConnectionSetup	08:06:18.874	LTE / RRC
RRCConnectionSetupComplete	08:06:18.874	LTE / RRC
SecurityModeCommand	08:06:18.875	LTE / RRC
SecurityModeComplete	08:06:18.875	LTE / RRC
RRCConnectionReconfiguration	08:06:18.875	LTE / RRC
RadioBearerConfig IE	08:06:18.875	NR / RRC
RRCConnectionReconfigurationComplete	08:06:18.885	LTE / RRC
MeasurementReport	08:06:18.885	LTE / RRC
UEInformationRequest	08:06:18.985	LTE / RRC
UEInformationResponse	08:06:18.985	LTE / RRC

Nella Fig. 4.30 e nella Fig. 4.31 sono mostrate le informazioni relative ai parametri P_a e P_b per un dato sistema LTE [20] ottenute decodificando i messaggi *RRCConnectionSetup* e *SIB2*.

Figura 4.30: Scanner di rete - Pa segnale LTE

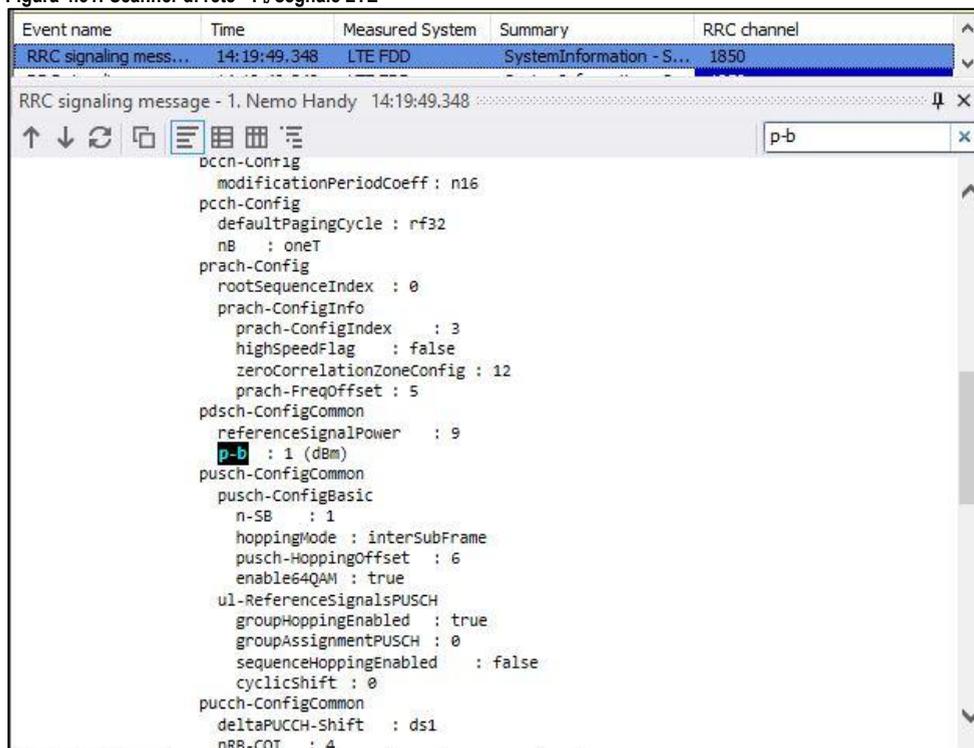
Event name	Time	Measured System	Summary	RRC channel
RRC signaling mess...	14:19:49.348	LTE FDD	RRCConnectionSetup	1850

RRC signaling message - 1. Nemo Handy 14:19:49.348

```

explicitvalue
  ul-SCH-Config
    maxHARQ-Tx      : n7
    periodicBSR-Timer : infinity
    retxBSR-Timer  : sf320
    ttibundling     : false
    timeAlignmentTimerDedicated : sf10240
  phr-Config
    setup
      periodicPHR-Timer : sf10
      prohibitPHR-Timer : sf0
      dl-PathlossChange : dB3
  physicalConfigDedicated
  pdsch-ConfigDedicated
    p-a : dB0
  pusch-ConfigDedicated
    betaOffset-ACK-Index : 10
    betaOffset-RI-Index  : 10
    betaOffset-CQI-Index : 8
  uplinkPowerControlDedicated
  p0-UE-PUSCH : 0
  deltaMCS-Enabled : en0
  accumulationEnabled : true
  p0-UE-PUCCH : 0
  psrs-Offset : 7
  cqi-ReportConfig
    cqi-ReportModeAperiodic : rm31
    nomPDSCH-RS-EPRE-Offset : 0
    cqi-ReportPeriodic

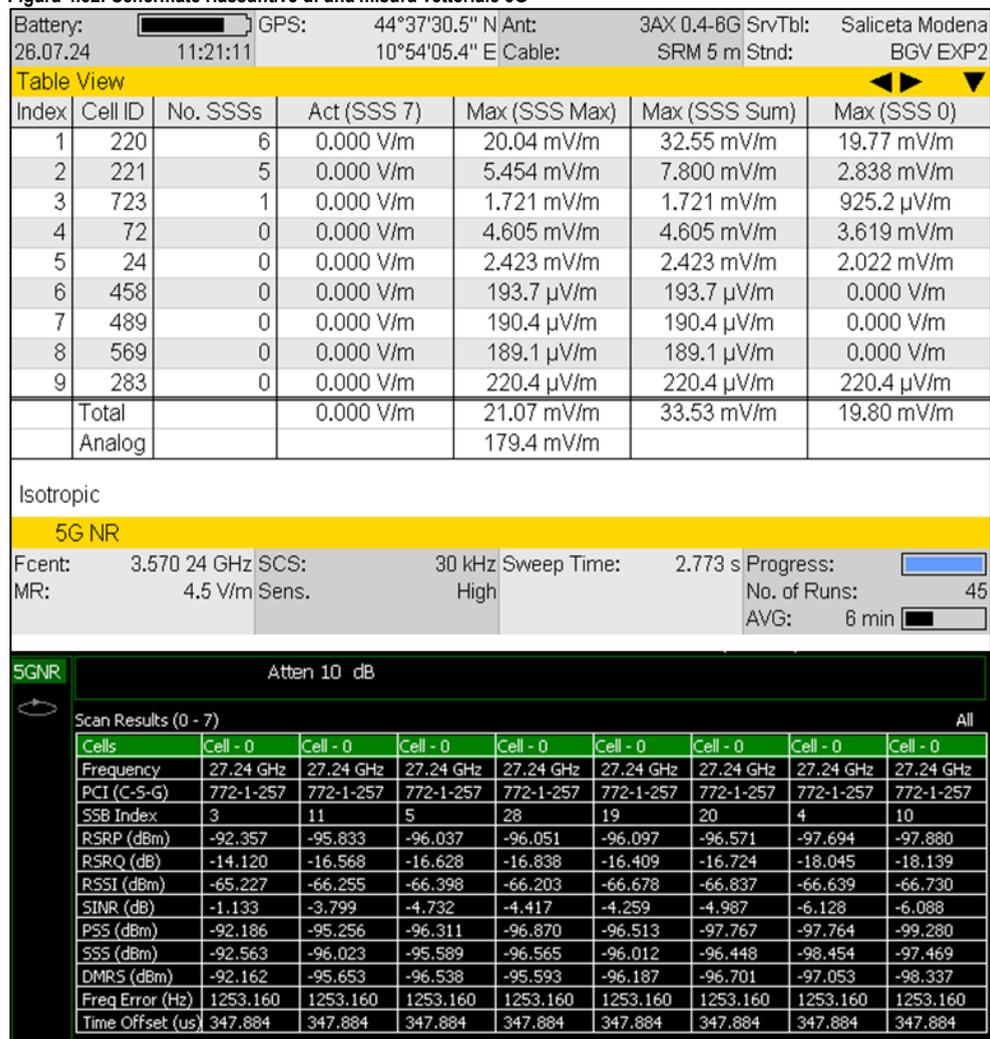
```

Figura 4.31: Scanner di rete - P_b segnale LTE

4.3.2 Misure vettoriali con decodifica dei soli canali di controllo

Nel caso in cui si disponga di un analizzatore vettoriale che consente la determinazione della potenza associata esclusivamente ai canali di controllo, il risultato tipico di una misura vettoriale di un segnale 5G corrisponde ad una lista delle potenze per RE ricevute per ciascuno degli SSB associati ad uno specifico Cell ID e rilevati dallo strumento. La Fig. 4.32 mostra le tipiche schermate riassuntive di una misura vettoriale 5G, ottenute con due analizzatori portatili prodotti da ditte differenti, sui quali sono stati preventivamente configurati tutti i parametri necessari a garantire una corretta sincronizzazione con il segnale.

Figura 4.32: Schermate riassuntive di una misura vettoriale 5G



La misura cui si riferisce la prima schermata della Fig. 4.32 riguarda un segnale 5G FR1 in banda 3700 MHz, caratterizzato da ampiezza di banda pari a 60 MHz, numerologia pari a 1 e configurazione temporale degli SSB secondo il Case C. I risultati che si visualizzano sullo schermo dello strumento si scorrono verso destra mostrando, per le diverse tracce disponibili (Act, Min, Max, Avg), i livelli di campo elettrico associati al singolo RE degli SSB, implementati per i diversi Cell ID decodificati. Nell'esempio specifico, la cella dominante risulta essere quella identificata dal Cell ID 220 ed è caratterizzata dalla

presenza di 6 degli 8 SSB previsti per il Case C. Lo strumento fornisce il valore di campo elettrico per RE associato a ciascuno di essi ma, in virtù di quanto discusso nel Par. 4.1.6, il valore di interesse ai fini dell'extrapolazione è esclusivamente quello relativo all'SSB più intenso (SSB #0), che nel caso specifico è pari a 0.020 V/m. Si può notare che questo strumento desume il campo elettrico per RE associato ai diversi SSB attraverso una misura di potenza del solo canale SSS: tale approccio è giustificato dal fatto che i canali contenuti all'interno degli SSB sono generalmente trasmessi tutti alla stessa potenza.

La seconda schermata riportata in Fig. 4.32 si riferisce ad un segnale 5G FR2 a frequenza pari a 27.24 GHz. La schermata riporta i risultati relativi alla misura degli 8 SSB più intensi rilevati dallo strumento, presentati in ordine decrescente di potenza e ciascuno identificato dal proprio indice univoco (da 0 a 63 nel caso specifico, in cui $L_{max} = 64$). L'utente può scorrere la schermata per visualizzare eventuali ulteriori SSB.

Facendo riferimento a quanto discusso nel Par. 4.1, misure come quelle descritte consentono di applicare la formula di extrapolazione 5G basata sul valore di campo elettrico associato al canale di controllo, che si riporta di seguito per comodità del lettore:

$$E_{5G} = E_{SSB} \cdot \sqrt{F_{extBeam} \cdot F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC} \cdot F_B^{-1}}$$

A titolo di esempio, verranno di seguito riportati i passaggi previsti per l'applicazione della formula:

- identificazione del campo elettrico – o potenza, a seconda dello strumento - per RE associata all'SSB più intenso (l'SSB #0 con $E_{SSB} = 0.020$ V/m nel primo caso, l'SSB #3 con potenza per RE pari a -92.357 dBm nel secondo);
- conversione potenza-campo elettrico per ottenere E_{SSB} , attraverso la nota formula (valida per sistemi adattati a 50 Ω): $E = 10^{(P+AF+Ac-13.01)/20}$ dove AF e Ac sono rispettivamente il fattore di antenna e l'attenuazione del cavo alla specifica frequenza del segnale misurato. Nel primo esempio considerato la conversione è gestita direttamente dallo strumento e pertanto questo passaggio deve essere saltato;
- determinazione del fattore F_{BW} che rappresenta il numero totale di sottoportanti che costituiscono il segnale 5G; tale valore può essere facilmente desunto a partire dalla larghezza di banda e dalla numerologia implementata dal segnale;
- determinazione del fattore F_{TDC} attraverso misure dirette (vedi metodologia in zero span o attraverso scanner di rete) o mediante conoscenza preliminare del duplexing del segnale;
- determinazione del fattore F_{PR} attraverso l'analisi statistica dei valori di potenza registrati dai contatori installati dai gestori di telefonia mobile;
- determinazione del fattore $F_{extBeam}$ che quantifica l'effetto dell'eventuale beamforming che agisce sui canali di traffico rispetto a quelli di controllo;
- applicazione di un eventuale boosting factor F_B , parametro generalmente richiesto al gestore in una fase successiva a quella di misura e che può essere inglobato all'interno di $F_{extBeam}$.

L'estrapolazione basata sulla misura della potenza associata agli SSB presenta vantaggi e svantaggi. Il vantaggio principale risiede nel fatto che la misura degli SSB è una procedura piuttosto semplice e standardizzata. Tali segnali sono infatti sempre attivi e consentono di mantenere la stessa filosofia di misura consolidata negli anni con le tecnologie precedenti al 5G. A tutti gli effetti, la misura della potenza associata all'SSB più intenso può essere concettualmente assimilata a quella per la determinazione della potenza del RS del segnale 4G, riconducendo l'estrapolazione 5G ad una metodologia ben nota e facilmente riproducibile. Inoltre, il fatto di misurare canali di controllo sempre presenti in aria, svincola il tecnico dalla necessità di forzare il traffico verso la direzione dell'antenna ricevente.

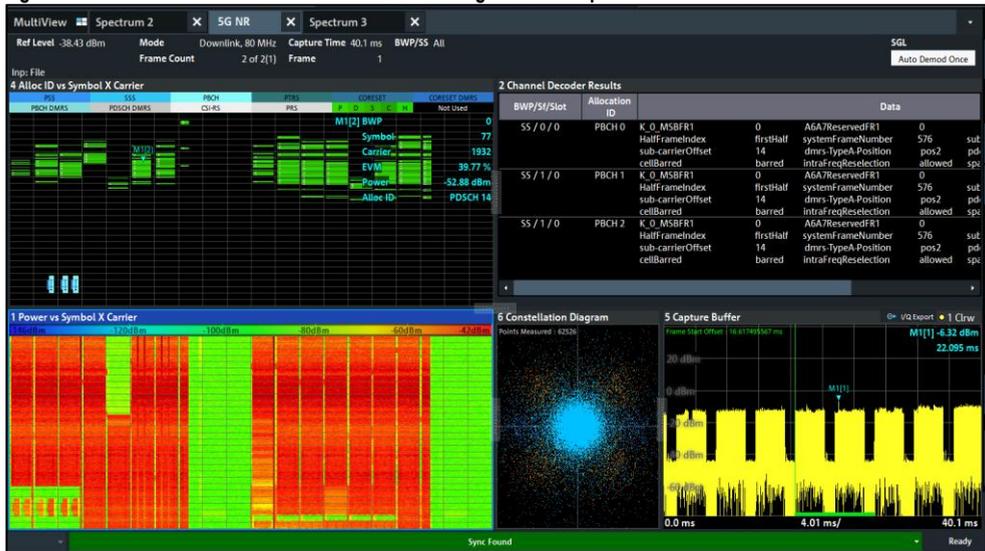
Di contro, l'attendibilità di una estrapolazione eseguita attraverso la metodologia descritta dipende criticamente dalla precisione con cui si conosca a priori o venga valutato sul campo il fattore $F_{extBeam}$. La stima preliminare di tale fattore, infatti, è affetta da incertezze ineliminabili che incidono sulla precisione dell'estrapolazione. Assumendo di avere a disposizione i diagrammi di radiazione del traffico e degli SSB, il calcolo di $F_{extBeam}$ prevede di conoscere con grande precisione la posizione relativa del punto di misura rispetto alla posizione del centro antenna della sorgente 5G, nonché di valutare adeguatamente l'effetto dell'ambiente di propagazione. Nel caso invece si propenda per una valutazione in campo del fattore $F_{extBeam}$, si annullerà, di fatto, il vantaggio di dover misurare un canale di controllo sempre in aria. La procedura sperimentale di determinazione di $F_{extBeam}$, comunque affetta da un'incertezza non trascurabile, non può infatti prescindere da una forzatura del traffico, obbligando quindi chi effettua la misura a dotarsi di dispositivi attivi idonei allo scopo.

Esiste tuttavia un caso in cui questa procedura risulta estremamente efficace e semplice da usare: le misure su segnali 5G trasmessi attraverso antenne passive: DSS, alcune tipologie di segnali FWA e 5G in FR2 e in banda 700 MHz. In questo caso, infatti, i diagrammi di traffico e di controllo coincidono e il fattore $F_{extBeam}$ assume valore pari a 1.

4.3.3 Misure vettoriali con decodifica dell'intera trama del segnale

Nel caso in cui l'analizzatore in dotazione sia caratterizzato da una banda di demodulazione di estensione almeno pari a quella dell'intero segnale da analizzare e, allo stesso tempo, il software di analisi sia abilitato per una completa demodulazione della trama 5G, sarà possibile effettuare analisi molto più approfondite. Ciò, tuttavia, va a scapito dell'immediatezza e della fruibilità dei risultati, come dimostrato dalla Fig. 4.33 che rappresenta lo screenshot di una tipica misura vettoriale di un segnale 5G completamente demodulato.

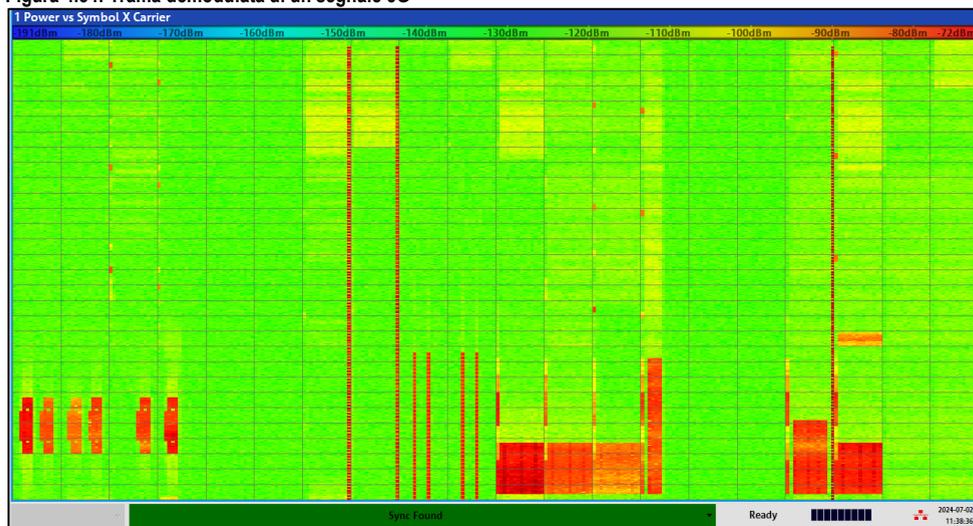
Figura 4.33: Screenshot di una misura vettoriale di un segnale 5G completamente demodolato



I software che consentono di effettuare queste misure altamente specialistiche sono infatti molto complessi e realizzati per una molteplicità di applicazioni che non riguardano le attività di controllo ambientale. Per questo motivo, tali software richiedono una spiccata competenza da parte dell'utilizzatore in fase di misura ed elaborazione dei risultati.

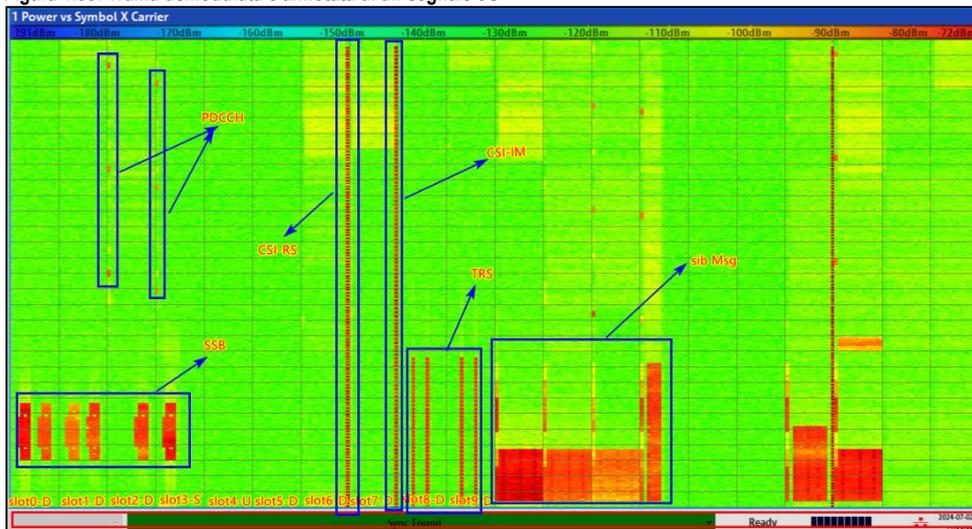
È quindi di fondamentale importanza per il tecnico sapere dove e in che modo ricavare le informazioni di interesse per l'attività di controllo ambientale. Il risultato più rilevante per le finalità della presente linea guida è senz'altro la griglia *Power vs Symbol per Carrier*, ovvero la rappresentazione grafica della potenza ricevuta (e demodulata) associata a ciascun RE che costituisce la trama del segnale 5G. Un esempio del risultato di questa tipologia di misura è riportato in Fig. 4.34 che mostra lo screenshot di un analizzatore di spettro vettoriale che demodula un segnale 5G.

Figura 4.34: Trama demodolata di un segnale 5G



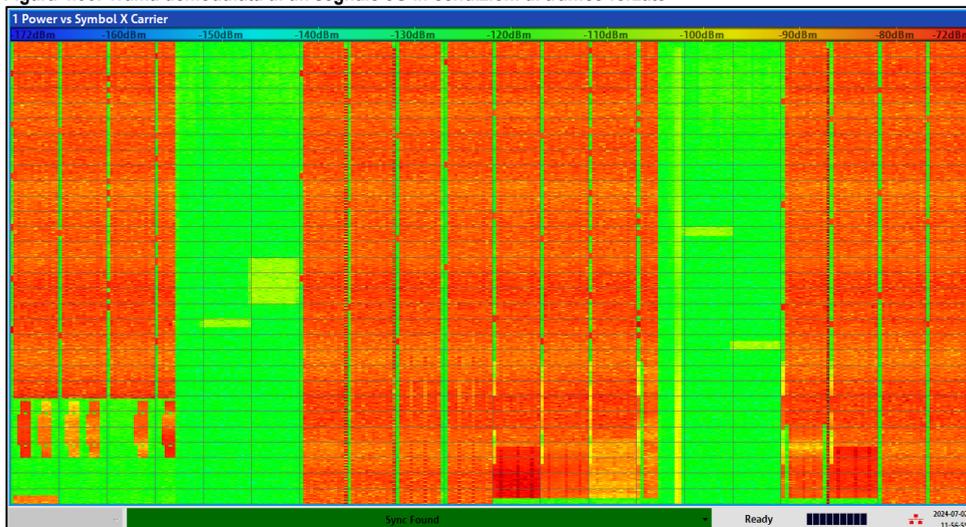
Si noti come una misura di questo tipo sia in grado di fornire una mole enorme di informazioni riguardo alla struttura del segnale indagato. Nello specifico, l'acquisizione si riferisce ad un segnale 5G quasi completamente scarico di traffico dati e in cui sono chiaramente identificabili 6 SSB, trasmessi ad una frequenza molto inferiore rispetto alla portante centrale. L'analisi dell'immagine mette in evidenza l'effetto del meccanismo del beam sweeping attraverso il quale sono trasmessi gli SSB. Si può infatti apprezzare come i diversi SSB vengano ricevuti con valori di potenza marcatamente differenti (evidenziati dalle diverse tonalità di rosso) a dimostrazione del fatto che ciascuno di essi viene trasmesso in una specifica direzione. L'immagine mostra anche un'ampia serie di segnali che, al pari degli SSB, vengono trasmessi anche in assenza di traffico dati (CSI-RS, TRS, SIB, PDCCH). Senza scendere troppo in un dettaglio che esula dalle finalità del presente documento, la Fig. 4.35 mostra una versione della Fig. 4.34, in cui tutti i principali canali sono stati identificati e indicati. Risulta quindi chiaro come questa tipologia di strumenti consenta un'analisi con un elevato livello di dettaglio.

Figura 4.35: Trama demodulata e annotata di un segnale 5G



Nel caso di estrapolazione alla massima potenza, analogamente a quanto accade per le misure in zero span, anche in caso di utilizzo di un analizzatore di spettro vettoriale si ha l'esigenza di forzare il traffico dati secondo le tecniche descritte nel Cap. 2. Questo consente di poter valutare la potenza associata al fascio di traffico che trasporta il canale PDSCH, in condizioni di massima esposizione (ovvero con il terminale mobile posto nelle immediate vicinanze dell'antenna ricevente). La Fig. 4.36 mostra la trama demodulata dello stesso segnale visto in precedenza, acquisita in condizioni di traffico forzato e riempimento completo della trama stessa.

Figura 4.36: Trama demodolata di un segnale 5G in condizioni di traffico forzato



La trama ricostruita può essere infine esportata in formato tabellare, in modo da avere a disposizione i valori di potenza ricostruiti associati a ciascun RE. Questa importante informazione consente di applicare una serie di procedure che permettono di ottenere stime molto attendibili della massima potenza estrapolata.

Facendo riferimento a quanto discusso nel Par. 4.1, una misura di questo tipo consente di applicare la formula di estrapolazione 5G basata sul valore di campo elettrico associato al traffico dati PDSCH, che si riporta di seguito per comodità del lettore:

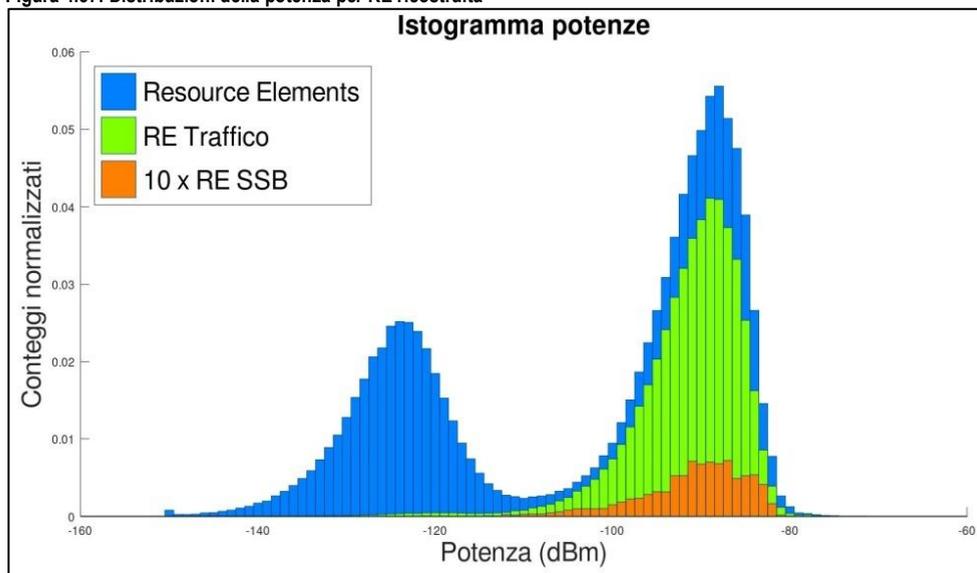
$$E_{5G_{max}} = E_{RE,PDSCH} \cdot \sqrt{F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC}}$$

La determinazione del valore di campo $E_{RE,PDSCH}$ può seguire due percorsi, simili ma distinti, che vale la pena discutere più dettagliatamente nei paragrafi successivi.

4.3.3.1 Analisi della distribuzione della potenza per RE del PDSCH

A partire dalla tabella con i valori di potenza per ciascun RE che compongono la trama, il tecnico deve individuare quelli dedicati al PDSCH, imponendo le condizioni, definite dallo standard, sugli slot e sui simboli da selezionare. I valori di potenza del PDSCH così ottenuti possono essere utilizzati per creare delle distribuzioni come quelle illustrate in Fig. 4.37.

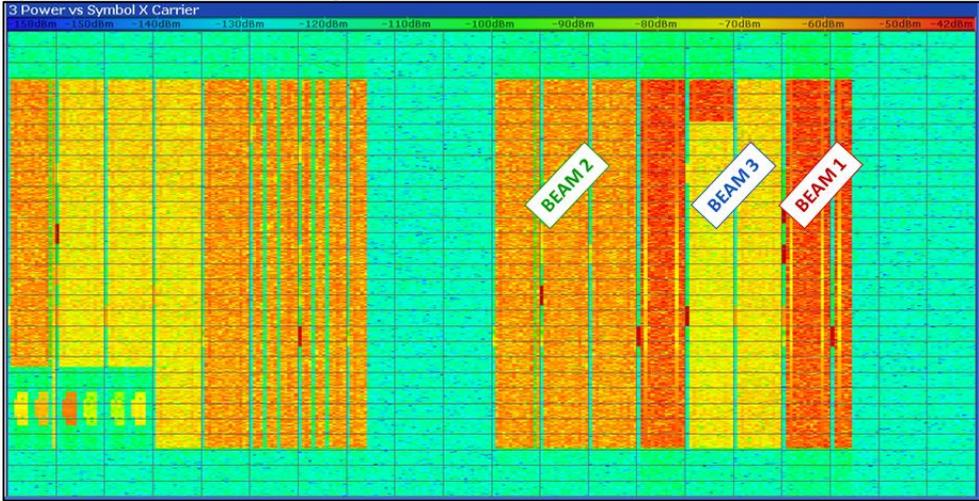
Figura 4.37: Distribuzioni della potenza per RE ricostruita



In questo esempio, è riportata la distribuzione dei valori di potenza misurati dall'analizzatore vettoriale e associati a tutti i RE della trama (in blu), a cui è stata sovrapposta la distribuzione dei valori di potenza misurati e associati ai RE attribuibili al solo PDSCH (in verde). Per completezza, è stata inclusa anche la distribuzione dei livelli di potenza per RE in cui risultano allocati i soli SSB, moltiplicata di un fattore 10 in modo da essere rappresentabile graficamente. Operativamente, la distribuzione di interesse per l'estrapolazione a massima potenza è quella in verde e il valore di ERE,PDSCH è solitamente ottenuto partendo dal valore modale della distribuzione. La procedura risulta essere estremamente precisa e riproducibile, a patto che il tecnico che la effettua conosca nel dettaglio l'allocazione degli elementi della trama acquisita. La bontà dei risultati è infatti strettamente legata alla capacità di isolare il contributo del solo PDSCH trasportato dal fascio che punta nella direzione dell'antenna ricevente.

L'importanza della valutazione del tecnico risulta ancora più evidente se si considera l'esempio riportato in Fig. 4.37 che mostra la trama di un segnale 5G con tre distinti fasci di traffico che servono utenti posizionati in punti dello spazio molto distanti tra loro. Dei tre terminali mobili, infatti, solo uno è posizionato nelle vicinanze dell'antenna ricevente. In una situazione di questo tipo, il tecnico è tenuto ad effettuare l'analisi statistica delle potenze per RE associate al PDSCH del solo fascio più vicino all'antenna ricevente, e quindi ricevuto a potenza più elevata (il *Beam 1* in Fig. 4.38);

Figura 4.38: Trama demodulata di un segnale 5G in condizioni di traffico forzato da tre terminali diversi



4.3.3.2 Misura del Channel Power vettoriale

Con il termine Channel Power vettoriale (VCP) si intende la somma delle potenze per RE ricevute nella durata temporale di un simbolo. Intuitivamente può essere immaginato come l'integrale della potenza ricevuta in τ . È facile comprendere che a partire dalla trama completamente demodulata si può ottenere il valore VCP per ciascun simbolo. Selezionando quei simboli in cui il PDSCH risulta essere totalmente allocato, operando sempre in condizioni di traffico forzato, si può ottenere una stima attendibile della massima potenza ricevuta nel punto di misura. Il campo elettrico associato al VCP (E_{VCP}) è legato a $E_{RE,PDSCH}$ attraverso la seguente espressione:

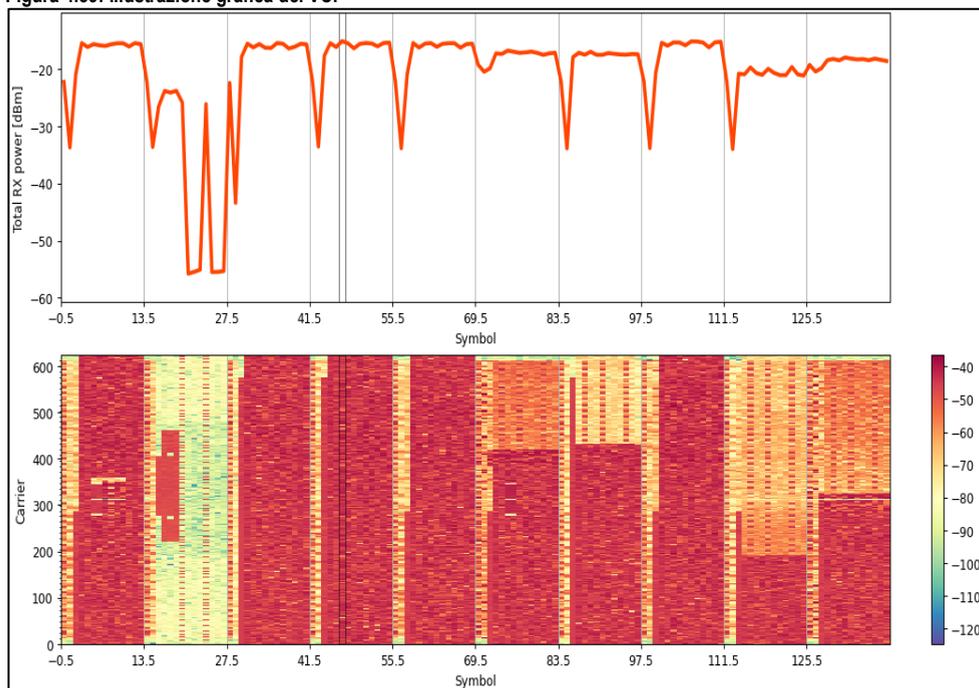
$$E_{VCP} = E_{RE,PDSCH} \cdot \sqrt{F_{BW}}$$

da cui è possibile ottenere la relativa formula di estrapolazione:

$$E_{5G} = E_{VCP} \cdot \sqrt{F_{PR} \cdot F_{TDC}}$$

Un'illustrazione grafica del procedimento di calcolo del VCP è rappresentato in Fig. 4.39, applicato ad un segnale DSS. La parte inferiore della figura mostra la trama ricostruita mentre in alto è riportato l'andamento del VCP in funzione del simbolo considerato. Un sottile riquadro evidenzia il simbolo in cui è stato ottenuto il massimo valore di VCP per la misura in oggetto. In alternativa al valore massimo, analogamente all'analisi descritta al punto precedente, può essere preso in considerazione un idoneo indicatore statistico della distribuzione del VCP.

Figura 4.39: Illustrazione grafica del VCP



La tecnica di estrapolazione basata sul VCP è semplice ed efficace. Tuttavia, anche in questo caso l'operatore deve applicare alcune accortezze fondamentali. È infatti chiaro che il metodo descritto funziona correttamente solo nel caso in cui l'allocazione del PDSCH sia uniformemente distribuita su tutto il simbolo. L'operatore dovrà quindi essere in grado di valutare lo stato di riempimento della trama, escludendo dall'analisi i simboli in cui non è garantita la completa occupazione. Nel caso della Fig. 4.39, ad esempio, i simboli appartenenti agli slot #1, #5, #6, #8 e #9 devono essere esclusi da un'eventuale valutazione statistica del valore di VCP da usare per la procedura di estrapolazione.

4.3.4 Misure vettoriali con hardware SDR e software non commerciale

Abbiamo visto che i prerequisiti per la decodifica della trama e l'analisi statistica delle potenze per RE sono sostanzialmente due:

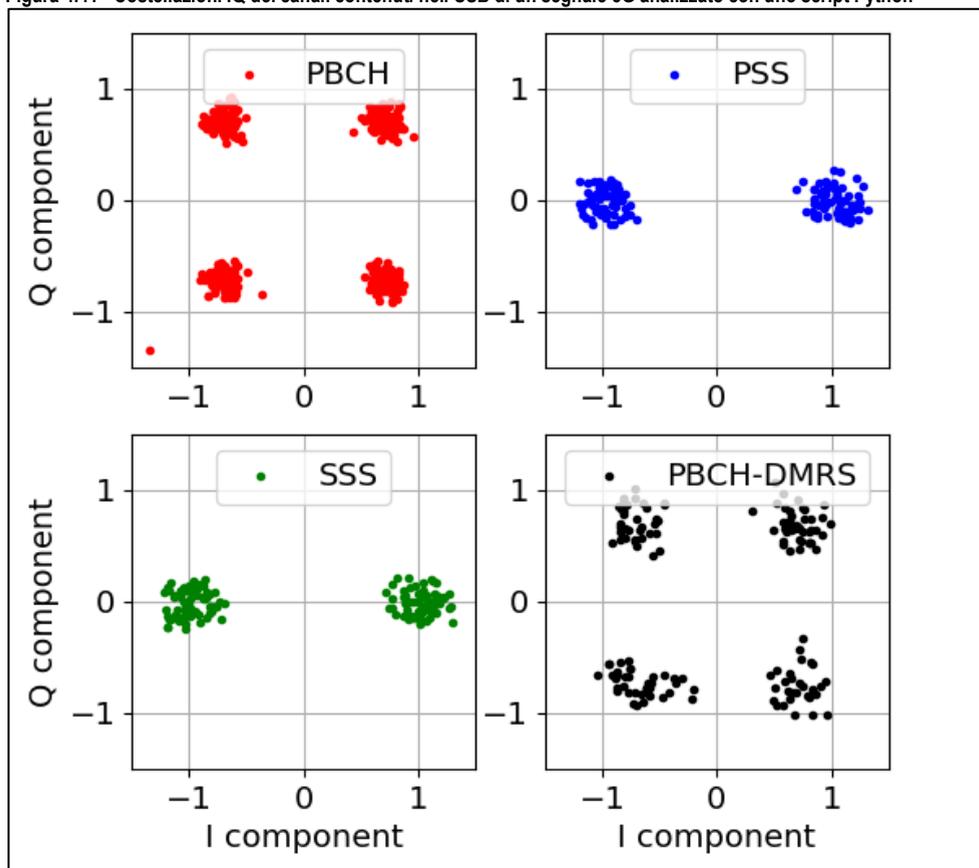
- un campionatore con banda di demodulazione almeno pari alla larghezza del segnale;
- un software di analisi adeguato.

Nel paragrafo precedente abbiamo preso in considerazione le misure effettuate mediante l'analizzatore di spettro vettoriale che può essere considerato come uno strumento complesso che comprende al suo interno entrambi gli elementi necessari per la demodulazione del segnale 5G. Sono attualmente allo studio soluzioni alternative ad hoc, mirate all'obiettivo di effettuare misure vettoriali contenendo anche i costi. Il presupposto di partenza è che un'analisi simile a quella discussa nel paragrafo precedente può essere effettuata anche attraverso l'utilizzo di un software autoprodotta a basso costo. Partendo da un generico file contenente le componenti IQ del segnale da analizzare, campionate con una frequenza adeguata, è possibile applicare le procedure iniziali di sincronizzazione (analoghe a quelle utilizzate dai terminali mobili) implementate in un programma non proprietario. Una soluzione di questo tipo, che presuppone la conoscenza dello standard 5G e della programmazione in generale, consente di ridurre sensibilmente i costi della dotazione necessaria per effettuare questo tipo di misure. Il requisito per lo svolgimento di misure vettoriali, infatti, si limiterebbe alla disponibilità di un hardware SDR adeguato alle caratteristiche del segnale 5G da misurare, che presenta costi inferiori rispetto a quelli di un analizzatore vettoriale. A titolo di esempio, la Fig. 4.40 e la Fig. 4.41 riportano i risultati di un'analisi del file IQ di un segnale 5G analizzato attraverso uno script Python. Le figure si riferiscono rispettivamente alla griglia *Power vs Symbol per Carrier* completamente demodolata e ai grafici delle costellazioni IQ relative alla modulazione dei canali di controllo contenuti nell'SSB più intenso.

Figura 4.40: Griglia Power vs Symbol per Carrier relativa ad un segnale 5G analizzato con uno script Python



Figura 4.41 - Costellazioni IQ dei canali contenuti nell'SSB di un segnale 5G analizzato con uno script Python



I risultati dimostrano che la modalità di analisi è estremamente promettente, incoraggiando pertanto ulteriori approfondimenti futuri.

5. CONCLUSIONI

Come considerazioni conclusive degli argomenti trattati nei capitoli precedenti, si riporta nella Fig. 5.1 uno schema riepilogativo di tutte le casistiche di misura, organizzate secondo le diverse tipologie di strumentazione disponibili e le finalità delle indagini strumentali.

In particolare, nella sezione “Metodi di misura” viene ripercorsa l’organizzazione e la logica delle metodiche illustrate nelle presenti Linee Guida, mentre le indicazioni fornite nella sezione “Obiettivi” sono state definite sulla base delle finalità delle attività in campo comunemente svolte dai tecnici delle Agenzie. All’interno dello schema è indicato se l’obiettivo previsto sia o meno raggiungibile con il metodo specifico e con quali eventuali condizioni o limitazioni.

Figura 5.1: Schema riepilogativo delle modalità di misura trattate nelle presenti Linee Guida

METODO DI MISURA			OBIETTIVO				
Tipo di misura	Modalità di misura	Forzatura traffico	Verifica caratteristiche del segnale	Stima $F_{ExtBeam}$	Valutazione esposizione media (6 minuti o 24 ore)	Accertamento rispetto valori normativi	Accertamento superamento valori normativi
Banda larga	- (Cap. 3)	NO	No	No	Si	Non in condizioni di massima esposizione	No
		SI	No	No	Si	Si (misure per 24 ore per confronto con valore di attenzione)	No
Selettiva scalare	Channel power (Par. 4.2.1)	NO	No	No	Si	Non in condizioni di massima esposizione	No
		SI	No	No	Si	Si	Si (se la forzatura è effettuata con lock della cella)
	Zero span (Par. 4.2.2)	NO	Si (caratterizzazione SSB)	No	No (a meno che non sia noto a priori il fattore $F_{ExtBeam}$)	Si (tramite estrapolazione, ma solo se si dispone di una stima di $F_{ExtBeam}$)	No
		SI	Si (caratterizzazione SSB)	Si	Si (tramite estrapolazione)	Si (tramite estrapolazione)	Si (tramite estrapolazione, se la forzatura è effettuata con lock della cella)
Selettiva vettoriale	Decodifica canali controllo (Par. 4.3.2)	NO	Si (caratterizzazione SSB)	No	No (a meno che non sia noto a priori il fattore $F_{ExtBeam}$)	No (a meno che non sia noto a priori il fattore $F_{ExtBeam}$)	No (a meno che non sia noto a priori il fattore $F_{ExtBeam}$)
		SI	Si (caratterizzazione SSB)	Si	Si (tramite estrapolazione)	Si (tramite estrapolazione, ma è necessario stimare $F_{ExtBeam}$)	Si (tramite estrapolazione, ma è necessario stimare $F_{ExtBeam}$)
	Decodifica intera trama (Par. 4.3.3)	NO	Si (caratterizzazione SSB e informazioni associate)	No	No (a meno che non sia noto a priori il fattore $F_{ExtBeam}$)	Si (tramite estrapolazione, ma è necessario stimare $F_{ExtBeam}$)	Si (tramite estrapolazione, ma è necessario stimare $F_{ExtBeam}$)
		SI	Si (caratterizzazione completa del segnale)	Si	Si (tramite VCP, o estrapolazione dal PDSCH)	Si (tramite VCP, o estrapolazione dal PDSCH)	Si (tramite VCP, o estrapolazione dal PDSCH)

6. BIBLIOGRAFIA

- 1) 3GPP Portal – Specification #38.211. “NR; Physical Channels and Modulation”
- 2) CEI EN IEC 62232 “Determinazione della intensità di campo elettromagnetico a radiofrequenza (RF), della densità di potenza e del tasso di assorbimento specifico (SAR) per valutare l'esposizione umana in prossimità di stazioni radio base”, CEI-CT 106, 03 2023 recepita da “International Electrotechnical Commission. Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure” IEC 62232:2022
- 3) 3GPP Portal – Specification #38.104. “NR; Base Station (BS) radio transmission and reception”
- 4) 3GPP Portal – Specification #38.213. “NR; Physical layer procedures for control”.
- 5) CEI IEC TR 62669 “Casi di studio a supporto della Norma IEC 62232 - Determinazione dell'intensità di campo RF, della densità di potenza e del SAR in prossimità delle stazioni radio di base per la valutazione dell'esposizione umana”, CEI-CT 106, 07 2020.
- 6) CEI 211-7/E “Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana Appendice E: Misura del campo elettromagnetico da stazioni radio base per sistemi di comunicazione mobile”, CEI-CT106, 11 2019.
- 7) Wu, I. et al. “Effect of nonlinear detection response characteristics of electric field probe on LTE signal measurement and statistical evaluation of its detection response.” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 59, 2011, pp. 987-997.
- 8) Gomes, H. et al. “Diode power probe measurements of wireless signals.” IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 63, no. 6, 2021, pp. 1769-1780.
- 9) Nadakuduti, J. et al. “The effect of diode response of electromagnetic field probes for the measurements of complex signals.” IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 54, no. 6, 2012, pp. 1195-1204.
- 10) Trincherò, D. et al. “Field probes performance for the measurement of spread-spectrum radio signals.” IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 8, 2009, pp. 494-497.
- 11) Trincherò, S. et al. “Exposure measuring techniques for wide band mobile radiocommunications.” Radiat. Protection Dosimetry, vol. 111, no. 4, 2004, pp. 429-433.
- 12) Letertre, T. et al. “Electromagnetic field measurements of WiMAX systems using isotropic broadband probes.” IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., vol. June, 2011, pp. 1-4
- 13) CEI 211-7. “Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz - 300 GHz, con riferimento all'esposizione umana”, CEI-CT106, 01 2001.
- 14) Adda, S. et al. “How 5G NR Signals Impact on the Response of Broadband Electric Field Probes.” IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement, vol. 72, 2023.
- 15) Pedrolì, C. et al. “Caratterizzazione statistica delle misure in continuo di campo elettrico emesso da sorgenti a radiofrequenza in Piemonte.” Atti Convegno Nazionale Airp, 2023.
- 16) Bottura, V. et al. “International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE.” Measurements of electromagnetic field strength in urban environment from UMTS radio base stations and analysis of the relation with the radiated power, 2012.

- 17) Adda, S. et al. "A Methodology to Characterize Power Control Systems for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields Generated by Massive MIMO Antennas." IEEE Access, vol. 8, 2020.
- 18) 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, 2022.
- 19) Franci, D. et al "Sorgenti di telefonia mobile operanti in tecnologia LTE TDD: proposta di una nuova metodologia di misura e riflessioni in merito alla Norma CEI 211-7E" - Atti del Convegno Nazionale Airp, Salerno 8-10 novembre 2017
- 20) Franci, D. et al. "Procedura operativa per la misura del Boosting Factor per impianti di telecomunicazione in tecnologia LTE." Atti del Convegno AIRP, 2018.

