La Comunicazione - Note, Recensioni e Notizie n. 70
Anno 2025

Studio e applicazione del metodo FDP per la protezione dei collegamenti Fissi: analisi dell'interferenza tempo e spazio variante

Study and application of the FDP method for the protection of Fixed Service links: analysis of temporal and spatial interference variation

Marcello Folli ♦, Manuel Faccioli ♦, Claudia Carciofi ♦, Valeria Petrini ♦

♦ Fondazione Ugo Bordoni, Rome (Italy)

Sommario

Nell'ambito delle attività della CEPT, e in particolare del gruppo SE19 relativo ai sistemi fissi, nel settembre 2025 è stato finalizzato il Report ECC CEPT 367 [1] il quale introduce la Fractional Degradation in Performance (FDP) come criterio operativo per quantificare la frazione aggiuntiva di tempo in cui un collegamento Fixed Service (FS) non soddisfa i propri obiettivi di prestazione a causa di interferenze variabili nel tempo.

L'identificazione di appropriati criteri di protezione per i servizi fissi in funzione delle caratteristiche della sorgente interferente è un aspetto rilevante soprattutto nel contesto nazionale dove sono presenti numerosi sistemi fissi in diverse bande di frequenza.

Nel presente articolo viene illustrata e implementata in un simulatore sviluppato dalla Fondazione Ugo Bordoni (FUB) la metodologia FDP che si basa sulla combinazione tra la funzione di densità di probabilità (pdf) dell'interferenza, la distribuzione del fading del segnale voluto al ricevitore ed il margine di fading a disposizione del collegamento definito come Flat Fade Margin (FFM) o, in presenza di controllo automatico di potenza, come Net Fade Margin (NFM).

I risultati ottenuti tramite simulazioni sono stati confrontati con i medesimi test con cui è stato validato il tool CEPT di riferimento, SEAMCAT, affinché possa poi essere utilizzato anche per scenari realistici. Il metodo FDP di protezione dei sistemi FS è stato inoltre confrontato con il metodo tradizionalmente utilizzato per la coesistenza basato sul criterio I/N.

Si evidenzia che il metodo FDP presenta alcune aree di incertezza che richiedono ulteriori approfondimenti scientifici per tener conto degli effetti di interferenze impulsive di tipo burst,

dell'impatto dell'Adaptive Coding and Modulato (ACM) e delle tecniche di diversità nella mitigazione del degrado di prestazioni.

Abstract

Within the framework of CEPT activities, and in particular those of the SE19 group related to fixed systems, the ECC CEPT Report 367 [1] was finalized in September 2025. This report introduces the Fractional Degradation in Performance (FDP) as an operational criterion to quantify the additional fraction of time during which a Fixed Service (FS) link fails to meet its performance objectives due to time-varying interference.

The identification of the appropriate protection criteria for fixed services considering the characteristics of the interference source is a relevant aspect especially at national level where numerous fixed systems are present in different frequency bands.

This article presents and implements, the FDP methodology, which is based on the combination of the probability density function (pdf) of the interference, the fading distribution of the wanted signal at the receiver, and the available fading margin of the link defined as the Flat Fade Margin (FFM) or, in the presence of automatic power control, as the Net Fade Margin (NFM).

The results obtained through simulations have been compared and validated against the same test cases used to validate the CEPT reference tool, SEAMCAT, so that the methodology can later be applied to realistic scenarios. Furthermore, the FDP protection method for FS systems has been compared with the traditionally used coexistence method based on the I/N criterion.

It is noted that the FDP method presents certain areas of uncertainty that require further scientific investigation, particularly to account for the effects of impulsive or burst-type interference, the impact of Adaptive Coding and Modulation (ACM), and the role of diversity techniques in mitigating performance degradation.

Keyword

Sistemi Fissi, Fractional Degradation in Performance, Metodo I/N.

1 - Introduzione

Negli ultimi anni, la coesistenza dei collegamenti FS con un numero crescente e sempre più eterogeneo di sorgenti di interferenza ha richiesto approfondimenti scientifici sulla applicabilità di criteri di protezione basati esclusivamente su misure stazionarie o su soglie di potenza. In un recente report CEPT [2], è stata analizzata la coesistenza tra sistemi fissi e Radio Local Area Networks (RLAN) considerando diverse metodologie di protezione dei sistemi fissi per valutarne gli effetti sia nel caso di sistemi Low-Power Indoor (LPI) che nel caso di sistemi Very Low Power (VLP). L'evoluzione delle reti radio (densificazione delle celle, diffusione di servizi a bassa latenza, uso crescente di bande millimetriche e tecniche di condivisione dinamica) e l'introduzione di tecniche adattive sui link fissi (ATPC, ACM), inoltre, hanno aumentato la complessità del fenomeno interferenziale perciò non è più sufficiente conoscere il livello di interferenza, ma diventa cruciale descriverne la variabilità temporale e spaziale oltre che il suo effetto sul tempo di non disponibilità del servizio.

Per rispondere a questa esigenza, il gruppo CEPT SE19 ha sviluppato il Report ECC 367 ("Generic methodology for the protection of the Fixed Service to complement the criteria in Recommendation ITU-R F.758-8") che propone il concetto operativo di FDP per la protezione dei sistemi FS da sorgenti interferenti variabili nel tempo e nello spazio (es. WLAN, IMT). Questo criterio permette di passare da una valutazione puntuale a una valutazione probabilistica-temporale che integra la statistica di fading del segnale desiderato del link fisso e la distribuzione temporale/spaziale dell'interferenza. Tale approccio è particolarmente utile quando le sorgenti interferenti presentano caratteristiche non stazionarie quali, ad esempio, la mobilità. Poiché il criterio FDP è stato introdotto solo di recente, la letteratura tecnica sull'argomento è ancora limitata e gli studi disponibili sono pochi. Ciò rende particolarmente significativo ogni contributo che affronti il tema con un approccio quantitativo e basato su dati reali. In questo contesto, uno dei pochi riferimenti attualmente disponibili è il contributo presentato dalla Francia in ambito ECC PT1, che offre una delle prime valutazioni site-specific dell'impatto delle reti IMT sui collegamenti FS nella banda 6425–7125 MHz. Lo studio si

distingue per l'impiego di deployment reali FS e IMT, per l'utilizzo di modelli di propagazione consolidati e per un'estesa simulazione Monte Carlo, configurandosi come un contributo tecnico rilevante in un settore di ricerca ancora nelle sue fasi iniziali [3]. Tali considerazioni forniscono il contesto entro cui si inserisce anche il presente lavoro.

Nelle sezioni successive, infatti, saranno descritte la metodologia generale per il calcolo del metodo FDP e le modalità di implementazione simulativa del metodo. Saranno inoltre presentati i risultati ottenuti dal simulatore sviluppato da FUB e la validazione dei risultati con il tool di riferimento CEPT (Seamcat). Infine, saranno illustrati i principali limiti del metodo FDP che richiedono ulteriori approfondimenti scientifici e ulteriori verifiche simulative e sperimentali.

2 – Definizioni Essenziali e Metodologia

Nel valutare la protezione dei collegamenti FS è necessario partire dagli obiettivi che questi link devono garantire per il corretto funzionamento: gli Error Performance Objectives (EPO) e gli Availability Performance Objectives (APO) i quali definiscono rispettivamente i requisiti di progetto e le soglie attese a livello regolatorio, spesso misurate tramite indicatori temporali come gli Errored Seconds (ES) o i Severely Errored Seconds (SES). Queste metriche collegano direttamente il livello di qualità del canale a grandezze osservabili nel tempo in quanto si verificano ogni qual volta il rapporto ΔC/N supera il margine di fading (Figura 1). Per questo motivo la valutazione della degradazione dovuta all'interferenza viene espressa in termini probabilistici-temporali.

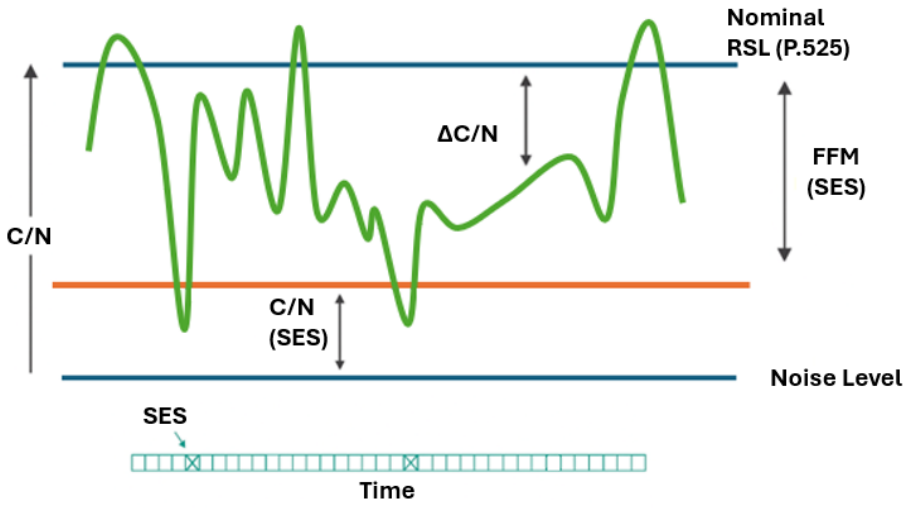

Figura 1 - Definizioni fondamentali metodo FDP

La metodologia FDP delineata in [1] si fonda sul concetto che la degradazione di prestazioni di un collegamento FS in presenza di interferenza debba essere misurata non solo come condizione istantanea, ma come variazione della probabilità di fuori servizio (outage probability) su un orizzonte temporale definito. Per questo motivo, la procedura richiede la conoscenza di tre parametri tecnici fondamentali:

- Margine di Fading;
- distribuzione del fading del segnale voluto al ricevitore del Fixed Service (Raccomandazione ITU-R P.530 [9]);
- funzione di densità di probabilità del segnale di interferenza al ricevitore FS.

In termini formali, la FDP è definita come:

$$FDP = \left(P_{O,i}/P_{O,0}\right) - 1 \quad (1)$$

Dove $P_{O,0}$ è la probabilità di outage in assenza di interferenza mentre $P_{O,i}$ la probabilità di outage in presenza di interferenza.

Come si può facilmente intuire, un punto operativo cruciale nella valutazione del metodo è la costruzione della distribuzione dell'interferenza normalizzata al rumore, cioè la pdf di I/N. Derivarla richiede una modellazione realistica dei fenomeni fisici e deve catturare non solo il livello medio degli interferenti ma anche la loro variabilità spaziale e temporale. Tipicamente,

nell'ambito dei lavori che si stanno svolgendo a livello CEPT si raccomanda di produrre le distribuzioni I/N mediante l'impiego di simulazioni Monte-Carlo, adattando la modalità di simulazione al grado di conoscenza delle posizioni e del comportamento degli interferenti.

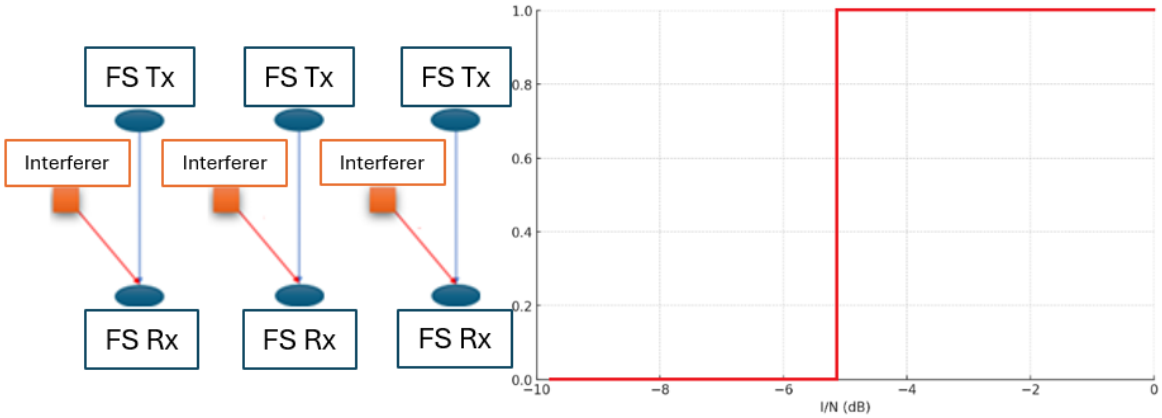

Figura 2 Esempio di distribuzione I/N in cui la posizione dell'interferente è fissa e conosciuta

Se le posizioni degli interferenti fissi sono note, la simulazione si applica direttamente alla topologia reale e produce un singolo valore di FDP per questa configurazione (Figura 2).

Quando, invece, la posizione degli interferenti fissi è casuale, si generano molteplici configurazioni spaziali (space-only Monte-Carlo) in modo da esplorare l'insieme delle topologie possibili e ricavare la distribuzione corrispondente (Figura 3).**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

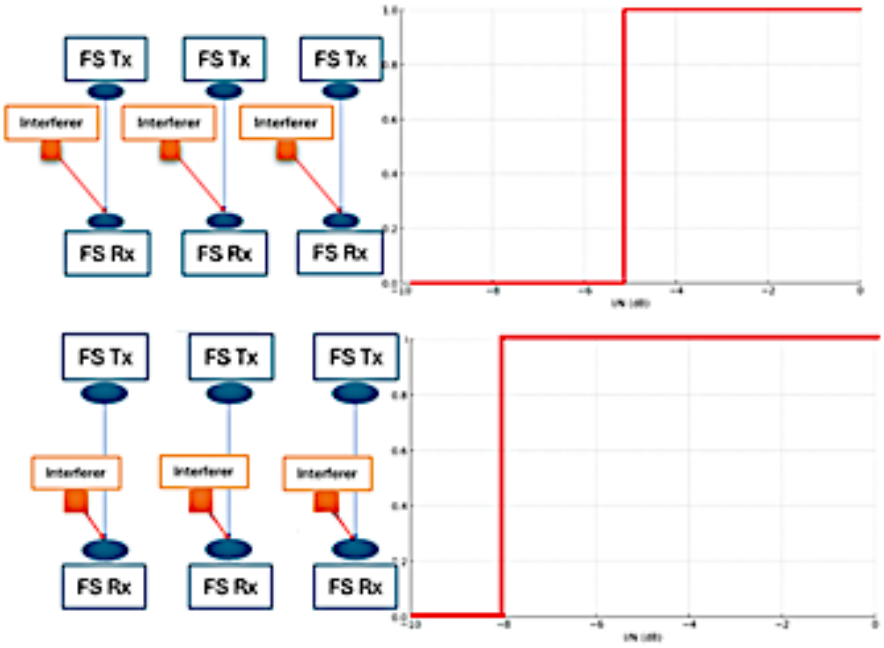

Figura 3 Esempio di distribuzione I/N in cui la posizione dell'interferente è fissa e casuale (con distribuzione statistica conosciuta)

In generale, la scelta dell'approccio utilizzato per la modellazione dipende dalla natura della sorgente interferente: la prevalenza di dispositivi mobili richiede modelli congiunti (space-time Monte-Carlo) mentre sorgenti di interferenti fissi ma non perfettamente localizzati possono essere efficacemente trattate con metodi space-only.

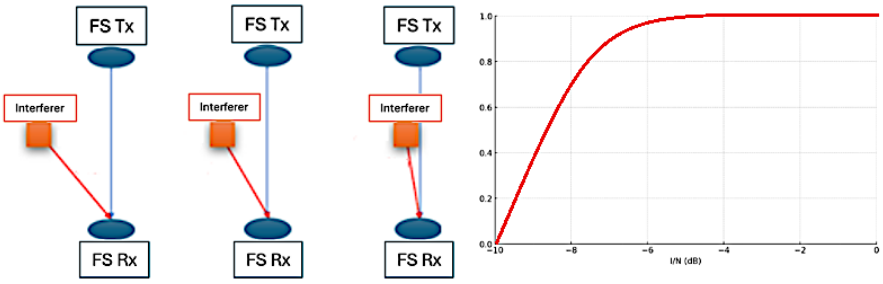

Figura 4 Esempio di distribuzione I/N in cui l'interferente è in movimento e con posizioni conosciute

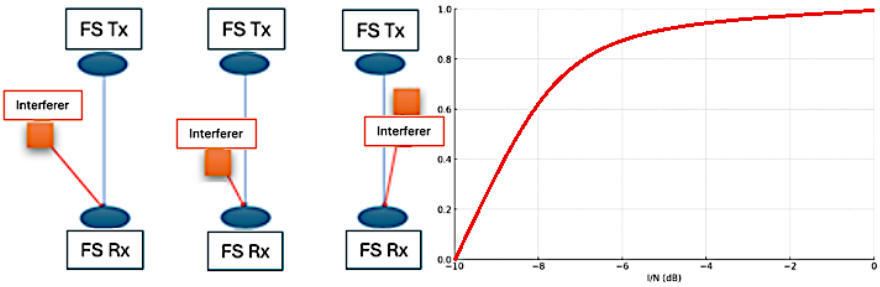

Figura 5 Esempio di distribuzione I/N in cui l'interferente è in movimento e con posizioni casuali (con distribuzione statistica conosciuta)

Su queste basi, la probabilità di outage in presenza di interferenza viene definita dal seguente integrale congiunto:

$$P_{O,i} = \int_{z=0}^{+\infty} pdf_z(z) Prob(f \geq FM - 10\log(1+z))dz \quad (2)$$

Dove:

- z è la variabile casuale che rappresenta il rapporto interferenza/rumore I/N in forma lineare;
- $pdf_z(z)$ è la pdf di I/N;
- $Prob(f \geq FM - 10\log(1+z))$ è la probabilità di superamento del margine di fading per il segnale desiderato, determinata a partire dalla distribuzione di fading (ITU-R P.530);
- Il termine $10\log(1+z)$ rappresenta la penalizzazione, in dB, introdotta dall'interferenza rispetto al rumore termico.

L'FDP, inoltre, può essere ulteriormente scomposto in due contributi distinti: una componente short-term (FDP_{ST}), che rappresenta la degradazione dovuta a picchi di interferenza che superano direttamente il fade margin, ed una componente long-term (FDP_{LT}), che descrive le situazioni in cui la combinazione tra fading del segnale e interferenza determina complessivamente il superamento del margine disponibile. Questa distinzione è cruciale per interpretare i risultati: eventi di brevissima durata ma alta ampiezza (burst, transitori dovuti a interferenti molto vicini) impattano prevalentemente su FDP_{ST}, mentre interferenze

persistenti e di bassa intensità "accumulano" il loro effetto nell'FDP_{LT}. L'equazione (1), perciò, si può riscrivere come:

$$FDP = FDP_{LT} + FDP_{ST} = \frac{P_{O,i}LT - P_{O,0}}{P_{O,0}} + \frac{P_{O,i}ST - P_{O,0}}{P_{O,0}} \quad (3)$$

In cui:

$$FDP_{LT} = \frac{\int_{z=0}^{z<(i/n)_{st}} pdf_z(z) Prob(f \geq FM - 10\log(1+z))dz - (1-\gamma) \times EPO}{EPO} = \frac{\int_{z=0}^{z<(i/n)_{st}} pdf_z(z) Prob(f \geq FM - 10\log(1+z))dz}{EPO} - (1-\gamma)$$

(4)

$$FDP_{ST} = \frac{\int_{z=(i/n)_{st}}^{+\infty} pdf_z(z) Prob(f \geq FM - 10\log(1+z))dz - \gamma \times EPO}{EPO} = \frac{\int_{z=(i/n)_{st}}^{+\infty} pdf_z(z) Prob(f \geq FM - 10\log(1+z))dz}{EPO} - \gamma$$

(5)

Dove:

- $P_{O,0} = Prob(f \geq FM)$ = EPO
- $\gamma = Prob\ (z \geq (i/n)_{st})$

Particolare attenzione va rivolta alle tecnologie adattive che influenzano in modo diretto la disponibilità del fade margin del collegamento. L'ATPC riduce la potenza trasmessa in condizioni favorevoli, diminuendo la riserva disponibile per contrastare eventuali picchi di interferenza. Per questo motivo, nelle valutazioni pratiche, il margine nominale Flat Fade Margin deve essere sostituito con il Net Fade Margin.

$$NFM = FFM - ATPC_{RANGE} \quad (6)$$

Risulta quindi necessario modellare in modo esplicito la soglia e la dinamica di attivazione dell'ATPC modificando opportunamente le equazioni di calcolo contenute nell'eq. 3:

$$P_{O,i\,ATPC}LT = \int_0^{(i/n)_{st}} pdf_z(z)Prob(f > FM - 10\,log(1+z))dz + \gamma \times P_{o,0}$$

(7)

$$P_{O,i\,ATPC}ST = Prob(f \leq ATPC\ Range)\ Prob(10\log(1+z) \geq NFM)$$
$$+ Prob(10\log(1+z) > NFM)\ Prob(f > \text{ATPC range}) + (1-\gamma) \times P_{o,0} =$$
$$= Prob(10\,log(1+z) \geq NFM) + (1-\gamma) \times P_{o,0}$$

(8)

Parallelamente, l'Adaptive Coding and Modulation (ACM) interrompe la relazione lineare tra SNR e qualità del collegamento: le variazioni di schema di modulazione e codifica (MCS) introducono curve non lineari throughput-vs-SNR e BER-vs-SNR, per cui un identico decremento di SNR può generare perdite di capacità molto diverse a seconda del profilo ACM in uso (Figura 6). Di conseguenza, le simulazioni devono includere le curve MCS-specifiche del sistema e definire con chiarezza la modulazione di riferimento o la soglia operativa utilizzata per il calcolo della probabilità di outage, in modo da rappresentare correttamente il comportamento dinamico del collegamento.

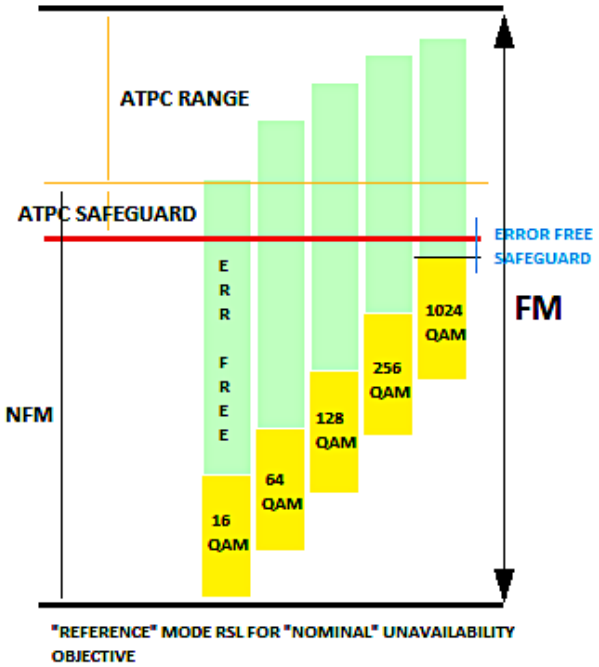

Figura 6 Modalità di funzionamento mista (ACM + ATPC)

In sintesi, ATPC e ACM non sono aspetti tecnici trascurabili ma variabili che influenzano sia la stima di $P_{O,i}$ che il termine dominante tra FDP_{ST} e FDP_{LT}.

3 – Criteri di protezione Raccomandati

I criteri di protezione raccomandati in [1] richiedono che l'FDP dovrebbe rimanere al di sotto di soglie prestabilite indicativamente ≤ 10% per interferenze da servizi co-primari e ≤ 1% per interferenze non co-primarie.

Secondo la raccomandazione ITU-R F.1494 [4], in scenari tipicamente dominati dal multipath la quota long-term tende a prevalere (es. ordine di grandezza 90% FDP_{LT} / 10% FDP_{ST}), mentre in scenari dove l'effetto della pioggia è dominante la raccomandazione ITU-R F.1495 [5] definisce che la componente short-term sia quella dominante (es. 80% FDP_{ST} / 20% FDP_{LT}). Queste percentuali vanno usate esclusivamente come valori semplificativi nelle analisi Monte-Carlo e non come valori assoluti in quanto le variabili di input influenzano i risultati finali.

È importante far notare che alcuni aspetti tecnici richiedono attenzione per l'utilizzo del metodo teorico FDP. In primo luogo, le emissioni a burst possono produrre effetti non lineari difficili da catturare con modelli di interferenza stazionari: la durata dell'impulso, il duty-cycle e la frequenza di ripetizione influenzano fortemente l'effetto sul ricevitore e la valutazione di outage. In secondo luogo, l'uso di diversità spaziale modifica la statistica del fading e la sensibilità ai picchi interferenti, perciò le ipotesi di fading semplice possono non essere valide in presenza di configurazioni complesse di diversità. Il terzo fattore critico è il comportamento reale della catena ricevente: ricevitori differenti reagiscono in modo diverso a impulsi brevi o a interferenze a duty-cycle basso, con impatti concreti su ES/SES che i modelli idealizzati non prevedono.

In aggiunta, la possibile correlazione statistica del fading tra il percorso voluto e il percorso interferente tipicamente rilevante in condizioni meteorologiche avverse può invalidate l'assunzione di indipendenza usata in molte derivazioni analitiche. Per questi motivi in [1] viene suggerito di accompagnare le analisi teoriche con campagne di misura e test di

laboratorio che caratterizzino profili temporali di burst, risposta dinamica dei ricevitori, effetti della diversità e le statistiche congiunte di fading. Questi elementi andrebbero considerati come priorità per temi di ricerca e studi sperimentali futuri, perché solo la combinazione di modellazione avanzata e validazione sperimentale può garantire stime di FDP robuste e applicabili in contesti operativi reali.

4 –Risultati metodo FDP: validazione implementativa e confronto con metodo I/N

Come accennato in precedenza, l'implementazione del metodo FDP all'interno degli strumenti simulativi della Fondazione ha previsto una fase di validazione, durante la quale ogni valore intermedio è stato verificato utilizzando i dati pubblicamente accessibili sui siti web dell'ECC-CEPT.

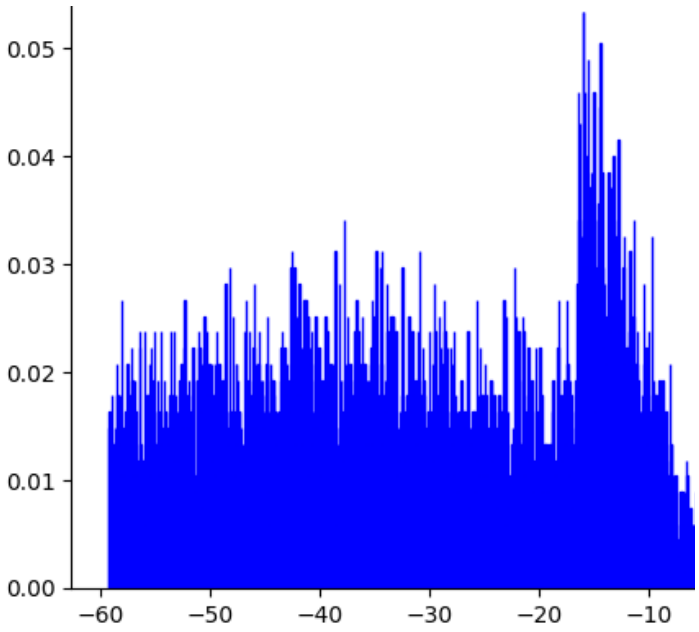

Figura 7 PDF del vettore I/N scelto per eseguire l'analisi

Tali dati consentono infatti un'analisi completa del collegamento FS, descrivendone in modo esaustivo tutte le caratteristiche. Prendendo come riferimento il primo test presentato in [6],

i cui parametri di input sono elencati in Tabella 1 a cui si aggiunge il vettore I/N, è possibile calcolare la probabilità di disservizio sia in assenza che in presenza di interferenza.

Tabella 1 Parametri di input del metodo FDP

Inputs		
Longitudine	15.5	deg
Latitudine	45	deg
he	20	m
hr	20	m
ht	0	m
Frequenza	6	GHz
Distanza	30	km
Margine di Fading	10	dB
Rumore di fondo	-94	dBm

In generale, la metodologia implementata si basa sull'applicazione del modello ITU-R P.530 per la stima della probabilità di fading nei collegamenti radio integrandola con l'analisi statistica del rapporto interferenza/rumore (I/N). L'obiettivo è quantificare la probabilità complessiva di degrado delle prestazioni del collegamento, tenendo conto sia del fading che degli effetti di interferenza. Per ogni valore possibile del rapporto I/N, ricavato dalla distribuzione statistica del rumore interferente (Figura 7), viene stimato il corrispondente livello di peggioramento della qualità del link. Questo permette di valutare come varia la probabilità di degrado al crescere dell'interferenza distinguendo la componente a lungo termine (LT) e la componente a breve termine (ST). La separazione tra le due regioni avviene individuando la soglia di I/N al di sopra della quale l'interferenza provoca un degrado significativo del margine di fading, oppure, in presenza di controllo automatico di potenza, quando l'escursione di potenza disponibile viene esaurita. Una volta definite le due regioni, le probabilità associate vengono calcolate mediante integrazione numerica. I risultati finali forniscono la probabilità totale di degrado (FDP) e le sue componenti a lungo e breve termine, espresse in percentuale rispetto alla probabilità di fading pura (vedi Tabella 2).

Tabella 2 Risultati estesi test di validazione

FDP	18.8733
FDP_LT	18.8733
FDP_ST	0
p0	8.8122
P00 (%)	0.6423
P0I (%)	0.7635
P0I_LT	0.0076
P0I_ST	0.0064
Gamma	0
IN_ST	9.5424

Per verificare la correttezza dell'implementazione sviluppata, è stata condotta una ulteriore, e generale, validazione diretta dei risultati calcolati rispetto a quelli forniti dal SEAMCAT Technical Group (STG) [6], [7] dell'ECC/CEPT. La tabella di confronto (Tabella 3) riporta, per ciascun caso di test, i valori di FDP totale, $\boldsymbol{FDP_{LT}}$ e $\boldsymbol{FDP_{ST}}$ ottenuti con l'algoritmo implementato (FUB) e con il riferimento ufficiale (ECO).

Tabella 3 Validazione implementativa - No ATPC

Test	Metriche	Risultati ECO [%]	Risultati FUB [%]	Differenza assoluta	Test	Metriche	Risultati ECO [%]	Risultati FUB [%]	Differenza assoluta
S1_case1	FDP	12.4963	12.49630921	9.21327E-06	S6_case1	FDP	80.633	80.63343435	0.000434347
S1_case1	FDP_LT	4.6318	4.6318327	3.26995E-05	S6_case1	FDP_LT	62.459	62.45923771	0.000237714
S1_case1	FDP_ST	7.8644	7.864476514	7.65137E-05	S6_case1	FDP_ST	18.174	18.17419663	0.000196633
S1_case2	FDP	12.6165	12.61653071	3.07068E-05	S6_case2	FDP	79.452647	79.45264712	1.1525E-07
S1_case2	FDP_LT	4.479	4.479500747	0.000500747	S6_case2	FDP_LT	79.452647	79.45264712	1.1525E-07
S1_case2	FDP_ST	8.137	8.13702996	2.996E-05	S6_case2	FDP_ST	0	0	0
S2	FDP	16.406	16.199043	-0.206956996	S7	FDP	45.2461	45.24618343	8.34281E-05
S2	FDP_LT	16.406	16.199043	-0.206956996	S7	FDP_LT	31.89332	31.89332458	4.58065E-06
S2	FDP_ST	0	0	0	S7	FDP_ST	13.3528	13.35285885	5.88474E-05
S3	FDP	17.7248	17.72482586	2.58622E-05	S8	FDP	180.01736	180.0173637	3.67285E-06
S3	FDP_LT	17.7248	17.72482586	2.58622E-05	S8	FDP_LT	101.9188	101.9188425	4.25496E-05
S3	FDP_ST	0	0	0	S8	FDP_ST	78.09852	78.09852112	1.12326E-06
S4	FDP	249.58241	249.5534526	-0.028957445	S9	FDP	11.9544	11.95443513	3.51256E-05
S4	FDP_LT	249.58241	249.5534526	-0.028957445	S9	FDP_LT	11.9544	11.95443513	3.51256E-05
S4	FDP_ST	0	0	0	S9	FDP_ST	0	0	0
S5	FDP	18.87333	18.87333874	8.73682E-06	S11	FDP	7.665	7.665006819	6.81901E-06
S5	FDP_LT	18.87333	18.87333874	8.73682E-06	S11	FDP_LT	5.6307	5.630707975	7.9748E-06
S5	FDP_ST	0	0	0	S11	FDP_ST	2.0343	2.034298844	-1.15579E-06

L'analisi copre sia scenari a interferenza prevalentemente long-term (in cui FDP_{ST} risulta nulla o marginale), sia casi a maggiore componente short-term, come nei test S1. In tutti i casi, la concordanza fra FDP totale e le sue componenti mostra che la catena di calcolo è stata riprodotta correttamente e che le differenze numeriche rientrano pienamente nella precisione attesa.

Tabella 4 Validazione implementativa - ATPC

Test	Metriche	Risultati ECO [%]	Risultati FUB [%]	Differenza assoluta
S5	FDP	40.652	40.65226589	0.000265892
S5	FDP_LT	0.7265	0.726537533	3.75332E-05
S5	FDP_ST	39.9257	39.92572836	2.83588E-05
S6	FDP	29.9225	29.92255123	5.12295E-05
S6	FDP_LT	8.874	8.874085059	8.50589E-05
S6	FDP_ST	21.0486	21.04846617	-0.000133829

In Tabella 4, sono mostrati i risultati dell'analisi in cui il collegamento FS impiega l'ATPC, con conseguente sostituzione del Flat Fade Margin con il Net Fade Margin nel calcolo. Anche in questi scenari, i risultati ottenuti con l'implementazione FUB mostrano un'ottima corrispondenza con i valori di riferimento CEPT, con differenze assolute dell'ordine di 10^{-5}.
Dal confronto emerge che l'introduzione dell'ATPC modifica la distribuzione tra le componenti short-term e long-term del livello di degradazione del segnale: la riduzione del margine effettivo disponibile incrementa la sensibilità ai picchi interferenti, comportando una quota FDP_{ST} significativamente superiore rispetto alla FDP_{LT}. Questo comportamento è coerente con quanto previsto in [1], secondo cui l'ATPC, pur migliorando l'efficienza energetica del link in condizioni normali, può ridurre temporaneamente la resilienza ai transitori di interferenza quando la potenza trasmessa è al minimo.
In entrambi i casi analizzati, la perfetta coerenza numerica tra implementazioni conferma che l'algoritmo gestisce correttamente la dinamica dell'ATPC e il passaggio dal margine nominale (FFM) a quello effettivo (NFM). L'accuratezza del modello consente quindi di estendere con

affidabilità la metodologia FDP anche a collegamenti adattivi, mantenendo la compatibilità con i risultati di riferimento CEPT.

In termini operativi, questi risultati dimostrano che l'approccio implementato consente di replicare fedelmente la metodologia FDP definita in [1], garantendo consistenza con i benchmark ufficiali CEPT. Tale validazione costituisce quindi una base affidabile per applicare l'algoritmo a studi di compatibilità nazionali o a campagne di simulazione su scenari reali.

Infine, sono stati prodotti confronti con il metodo tradizionalmente utilizzato per le analisi di coesistenza, in cui un link fisso è considerato protetto se, e solamente se, il valore di I/N corrispondente risulta inferiore a –10 dB. Tale soglia, definita dal criterio di protezione I/N riportato nella Raccomandazione ITU-R F.758-6 [8], garantisce che il degrado del rapporto segnale/rumore complessivo del sistema risulti accettabile per la salvaguardia delle prestazioni di un link fisso. A tal fine è stata sviluppata una procedura che, a partire da un insieme di valori di I/N, calcolati attraverso la procedura Minimum Coupling Loss (MCL), genera, mediante un approccio in stile Monte Carlo, un vettore di lunghezza estesa. Per l'esecuzione dell'analisi è stato scelto casualmente un intervallo di distanze $[d_{random}, d_{random} + 1\ km]$ entro il quale, per ciascuna direzione radiale rispetto al servizio fisso, sono stati simulati gli interferenti orientando, al fine di rappresentare la condizione di interferenza più sfavorevole possibile, le antenne verso il sistema FS.

Una volta calcolati i valori relativi al worst case, il vettore è stato esteso generando, in modo casuale, nuovi puntamenti per ciascun interferente, simulando così il servizio dei dispositivi mobili e la conseguente degradazione dell'interferenza verso il sistema FS. L'analisi complessiva ha considerato diverse configurazioni di link, differenziate in base ai parametri di margine di fading, larghezza di banda e coordinate spaziali dei sistemi ricevente (Rx) e trasmittente (Tx).

A titolo esemplificativo di seguito sono riportati i risultati di quattro casi di test sviluppati utilizzando dati di sistemi FS realmente esistenti.

Tabella 5 Confronto 1 FDP - I/N: Valori FDP

FDP (%)	21.94566
FDP_LT (%)	11.9056
FDP_ST (%)	10.04006
IN_ST (dB)	31.99726
FM (dB)	32
Metodo I/N superamento soglia protezione (%)	5

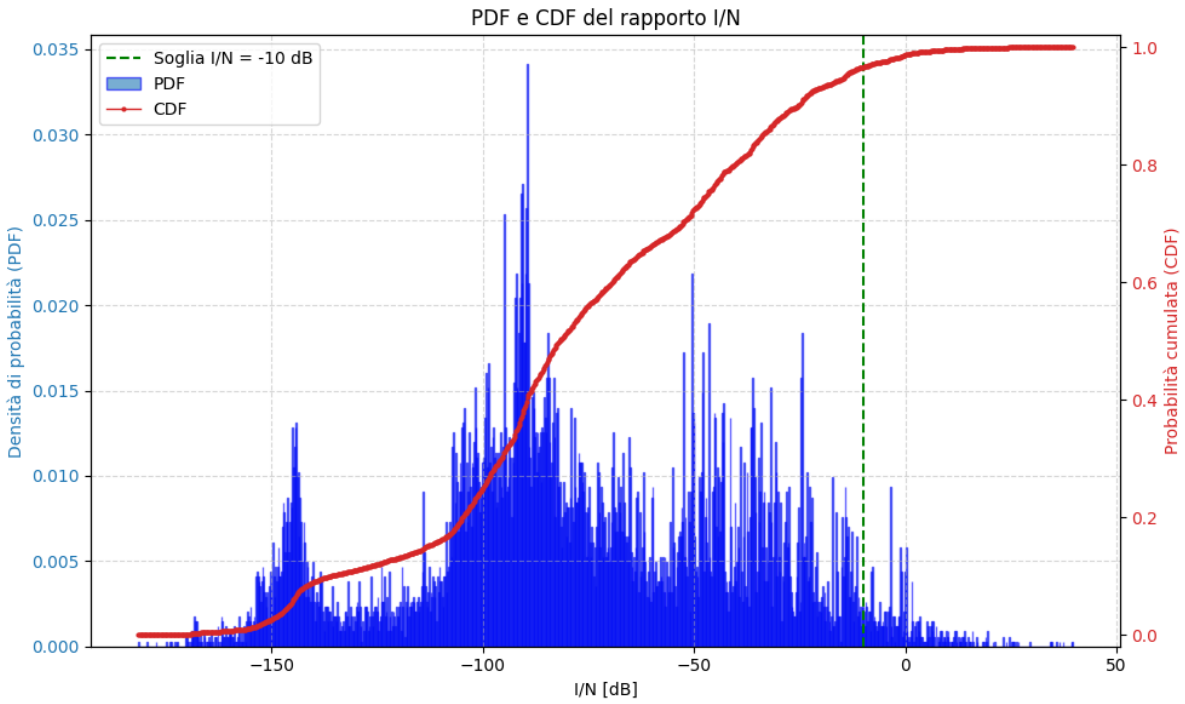

Figura 8 PDF e CDF di I/N - confronto 1

Nel primo scenario analizzato (Tabella 5) , sia il metodo FDP che, nel 5% dei casi, il criterio I/N evidenziano il mancato rispetto della protezione del sistema fisso. Come prevedibile dalla distribuzione (Figura 8), la componete dominante risulta essere quella long-term in quanto il valore di soglia $\left(\frac{I}{N}\right)_{ST}$ è piuttosto elevato e consente la protezione rispetto alle interferenza

short term. Nel caso successivo, invece, si osserva il rispetto di entrambi i criteri; in particolare, ricordando il significato fisico delle equazioni (4) e (5), il valore associato al margine di fading (Tabella 6) consente di mitigare gli effetti dell'interferenza la cui distribuzione è mostrata in Figura 9. Nel terzo scenario, in cui si è simulato un sistema fisso dotato di ATPC (Tabella 7 e Figura 10), risulta soddisfatto il solo criterio I/N.

Tabella 6 Confronto 2 FDP - I/N: Valori FDP

FDP (%)	0.000001
FDP_LT (%)	0.000001
FDP_ST (%)	0
IN_ST (dB)	31.99726
FM (dB)	32
Metodo I/N superamento soglia protezione (%)	0

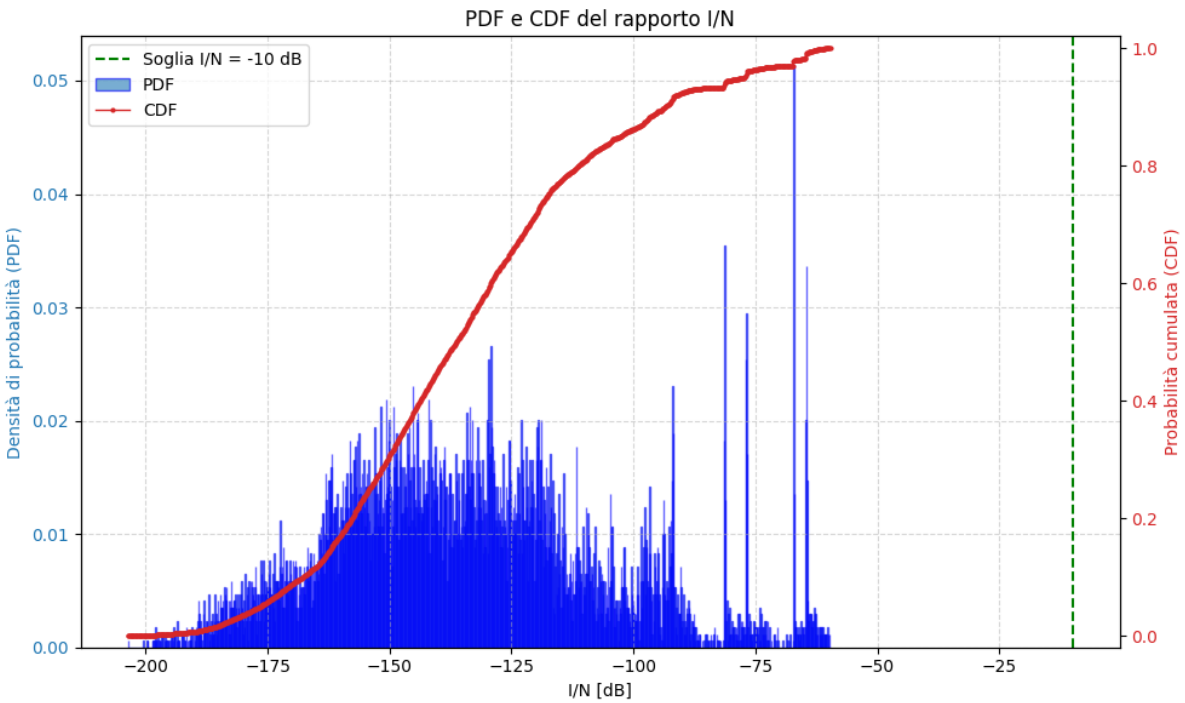

Figura 9 PDF e CDF di I/N - confronto 2

Come evidenziato in precedenza, l'impiego di tale tecnologia comporta una riduzione del margine di fading effettivamente disponibile; di conseguenza, risulta facilmente comprensibile il motivo per cui soltanto il criterio I/N risulti rispettato.

Infine nel quarto, ed ultimo, caso il criterio I/N non è rispettato nell'1% dei casi mentre per l'FDP vale la stessa motivazione dedotta per il secondo caso di test.

Tabella 7 Confronto 3 FDP - I/N: Valori FDP

FDP (%)	1266.43
FDP_LT (%)	0.004396
FDP_ST (%)	1266.426
IN_ST (dB)	-5.86825
ATPC Range (dB)	36
FM (dB)	37
IN_ST (dB)	-5.86825
Metodo I/N superamento soglia protezione (%)	0

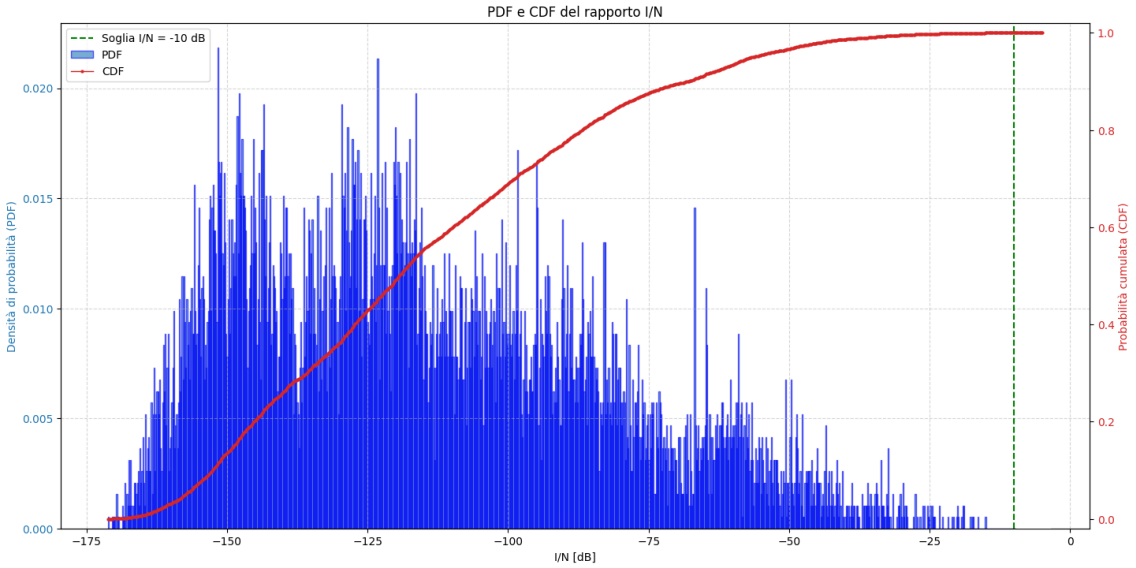

Figura 10 PDF e CDF di I/N - confronto 3

Tabella 8 Confronto 4 FDP - I/N: Valori FDP

FDP (%)	0.224396
FDP_LT (%)	0.224396
FDP_ST (%)	0
IN_ST (dB)	31.99726
FM (dB)	32
Metodo I/N superamento soglia protezione (%)	1

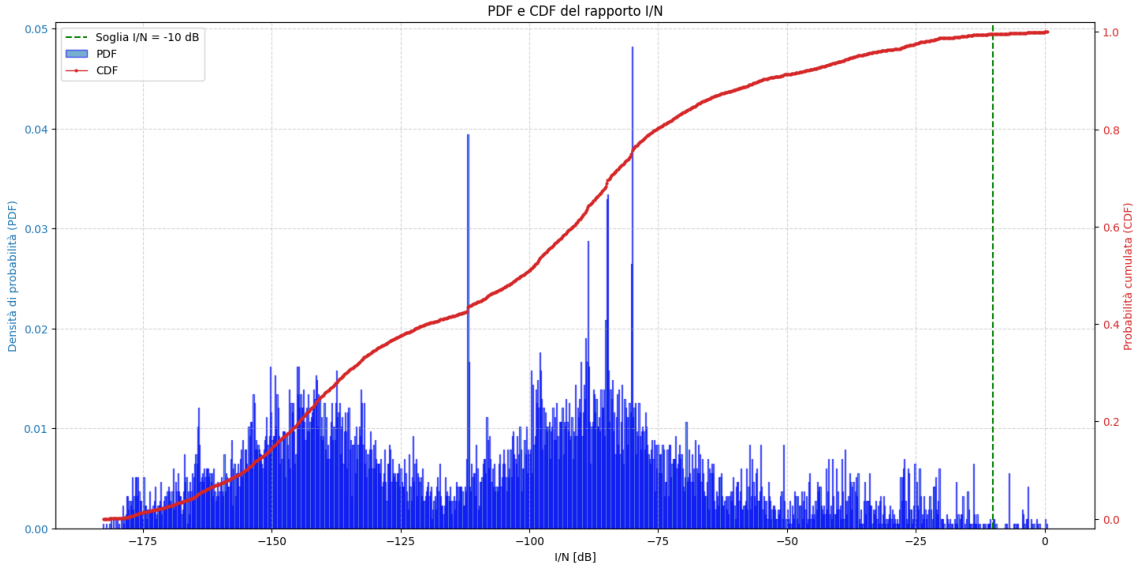

Figura 11 PDF e CDF di I/N - confronto 4

5 – Conclusioni

Il lavoro presentato ha descritto l'implementazione simulativa sviluppata da FUB, la validazione tramite confronto con tool CEPT e l'impatto sulla protezione dei sistemi fissi del nuovo metodo Fractional Degradation in Performance (FDP) recentemente approvato in ambito CEPT come criterio alternativo al tradizionale I/N per la protezione dei collegamenti del Fixed Service (FS) in presenza di interferenze tempo e spazio varianti. In ambitoCEPT, inoltre, diverse amministrazioni hanno recentemente risposto ad un questionario [10] relativo a questa tecnologia, consentendo di ottenere una descrizione statistica più accurata dei sistemi utilizzati nei vari paesi. Queste informazioni, in futuro, potranno essere utilizzate per integrare i risultati di questo studio e confermare che il metodo FDP, grazie alla sua natura probabilistica e temporale, consente di tener conto dell'effetto dell'interferenza sia "long term" che "short term" permettendo una descrizione più realistica del comportamento dei collegamenti fissi in ambienti interferenziali complessi, superando i limiti delle valutazioni statiche del metodo I/N basate esclusivamente su soglie di potenza. Ciò è particolarmente rilevante in scenari caratterizzati da interferenze non stazionarie, come quelle generate da servizi mobili IMT o da sorgenti con duty-cycle variabile RLAN/WLAN. Sono stati considerati

diversi scenari interferenziali realistici mostrando un confronto dei risultati tra il metodo FDP e I/N in termini di rispetto del criterio di protezione per i sistemi FS stabilito in ambito CEPT e ITU per le due metodologie.

Si evidenzia che l'applicazione operativa del metodo FDP presenta alcune criticità che richiedono ulteriori approfondimenti scientifici tra cui sono di particolare rilevanza la modellazione accurata delle interferenze a burst e l'influenza delle tecniche adattative e di diversità.

7 – Bibliografia

[1] ECC CEPT, Draft Report 367 "General methodology for derivation of protection of Fixed Service links to complement the criteria in Recommendation ITU-R F.758-8", 2025

[2] ECC CEPT, Report 364 "Sharing and compatibility studies related to Wireless Access Systems including Radio Local Area Networks (WAS/RLAN) in the frequency band 6425-7125 MHz", 2025

[3] ECC CEPT Project Team 1, Meeting Document PT1(25)147_France: "PT1_58: Site-specific FS Study", 2025

[4] ITU-R, Recommendation ITU-R F.1494 "Interference criteria to protect the fixed service from time varying aggregate interference from other services sharing the 10.7-12.75 GHz band on a co-primary basis", 2000

[5] ITU-R, Recommendation ITU-R F.1495-2 "Interference criteria to protect the fixed service from time varying aggregate interference from other radiocommunication services sharing the 17.7-19.3 GHz band on a co-primary basis", 2012

[6] SEAMCAT Technical Group, Meeting Document STG(25)012A03 "Tests eEPP FDP Without ATPC", 2025

[7] SEAMCAT Technical Group, Meeting Document STG(25)012A04 "Tests eEPP FDP With ATPC", 2025

[8] ITU-R, Recommendation ITU-R 758-6 "System parameters and considerations in the development of criteria for sharing or compatibility between digital fixed wireless systems in the fixed service and systems in other services and other sources of interference", 2015

[9] ITU-R, Recommendation ITU-R 530-19 "Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sights systems", 2005

[10] ECC CEPT, Report 365 "Fixed Links in CEPT; Technical characteristics and statistical review", 2025