

Scintillazioni troposferiche in aria chiara nel collegamento Alphasat in banda Ka e Q di Roma (i): aggiornamenti e casi studio

Clear air tropospheric scintillations of the Ka and Q band Alphasat link in Rome (i): updates and case studies

Stefano Barbieri[□], Fernando Consalvi[◆], Marianna Biscarini[□], Gianmarco Fusco[●], Stefano Luvini[●], Nazzareno Pierdicca[□]

- ◆ Fondazione Ugo Bordoni
- DIET, Università di Roma La Sapienza
- Ministero delle Imprese e del Made in Italy

Sommario

L'esperimento Alphasat TDP#5, dedicato al Prof. Aldo Paraboni, è un esperimento scientifico dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) per lo studio del canale di propagazione radio nelle bande Ka e Q. La Sapienza Università di Roma, in collaborazione con l'Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione (ISCTI) e la Fondazione Ugo Bordoni (FUB), ha aderito all'esperimento con due ricevitori, uno per ciascuna frequenza, installati presso il Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT) a Roma. In questo lavoro presentiamo una metodologia per l'identificazione di eventi di precipitazione basata sulla derivata prima temporale e sull'aggiornamento delle frequenze di taglio, diverse per le due bande, del filtro passa-alto utilizzato per rilevare la scintillazione troposferica dal segnale di beacon del satellite Alphasat, nelle bande Ka e Q. I dati di scintillazione sono stati ottenuti dalla stazione ricevente di Roma (I) per un periodo di tre mesi in condizioni di aria chiara e confrontati con il modello ITU-R. Vengono inoltre presentate le caratteristiche dell'esperimento e i dettagli dell'elaborazione dei dati.

Abstract

The Alphasat TDP#5 experiment, dedicated to Prof. Aldo Paraboni, is a scientific experiment of the Italian Space Agency (ASI) to study the radio propagation channel in the Ka and Q bands. Sapienza University of Rome, in collaboration with the Higher Institute of Communications

and Information Technology (ISCTI) and the Ugo Bordoni Foundation (FUB), has joined the experiment with two receivers, one for each frequency, installed at the Ministry of Enterprises and Made in Italy (MIMIT) in Rome. In this paper we present a methodology for identifying precipitation events based on the first derivative in time and the updating of the cut-off frequencies, which are different for the two bands, of the high-pass filter used to detect tropospheric scintillation from the Alphasat satellite radio beacon signal, in Ka and Q bands. The scintillation data were obtained at the receiving station in Rome (I) over a period of three months in free air conditions and compared with the ITU-R model. The characteristics of the experiment and details of the data processing are also presented.

Keyword

Satellite communication system, tropospheric scintillation, Ka-band, Q-band

1 – Introduzione

Poiché le bande di frequenza tipicamente utilizzate dalle comunicazioni satellitari (SatCom), cioè quelle da C a Ku, sono fortemente congestionate [1], tali sistemi si stanno spostando verso bande più alte [2] (ad esempio, Ka e Q/V) che consentono una maggiore larghezza di banda (e una maggiore capacità) oltre ad avere antenne più piccole e leggere. A frequenze così elevate, il segnale elettromagnetico è fortemente influenzato dagli effetti atmosferici: non solo pioggia intensa, ma anche pioggia leggera, nuvole, gas e turbolenza. In questo contesto, è importante studiare tali effetti per ricavare modelli di propagazione accurati in grado di descrivere la degradazione del segnale causata dall'interazione con le particelle atmosferiche (ad esempio, effetti di assorbimento, diffusione, depolarizzazione e scintillazione). Ciò è importante sia per una corretta ottimizzazione del link-budget del satellite, sia per l'implementazione di tecniche di mitigazione dei disturbi di propagazione (PIMT) necessarie per attenuare tali effetti atmosferici degradanti. In questo contesto, il programma Alphasat dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), avviato nel 2006, ha offerto l'interessante opportunità di ospitare diversi carichi dimostrativi tecnologici (TDP) a bordo del satellite Alphasat (gestito da Inmarsat).

In particolare, il payload Aldo Paraboni (TDP#5) ospita un esperimento di comunicazione satellitare (COMEX) e un esperimento scientifico di propagazione (SCIEX); questi esperimenti sono supportati dall'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) come contributo al progetto Alphasat, eseguito dall'ESA nell'ambito del programma Advanced Research in Telecommunications Systems (ARTES) 8 Telecom. SCIEX mira a caratterizzare il canale atmosferico in banda Ka (19,701 GHz) e Q (39,402 GHz). Il satellite Alphasat, lanciato il 25 luglio 2013 da Kourou (Guyana francese), ha un'orbita geosincrona (con una longitudine di 25° E) con un'inclinazione dell'orbita, rispetto al piano equatoriale, che va da 0° a un massimo di 3°. La campagna sperimentale è iniziata nel febbraio 2014. Le stazioni riceventi sono state installate in diverse località europee, gestite da diversi gruppi di ricerca per garantire la massima partecipazione scientifica e raccogliere osservazioni sperimentali in diverse regioni climatiche. Attualmente in Italia sono tre le stazioni di terra che raccolgono i segnali dei beacon Alphasat: le due principali stazioni ASI (a Tito Scalo e Spino d'Adda) e quella di Roma, gestita nell'ambito della collaborazione tra Sapienza Università di Roma e la Direzione generale DGTEL-ISCTI di Roma. La scintillazione è quel fenomeno che si manifesta nei collegamenti satellitari a causa delle rapide variazioni dell'indice di rifrazione dovute alle turbolenze in atmosfera, che provocano fluttuazioni casuali nell'ampiezza del segnale. Questo fenomeno è rilevante per le comunicazioni satellitari perché porta a una significativa degradazione della qualità del segnale stesso. La scintillazione si verifica generalmente sia nei periodi di cielo sereno che in quelli di pioggia. Tuttavia, durante gli eventi di pioggia la descrizione del processo responsabile della scintillazione diventa più complessa, per l'aumentata turbolenza dell'atmosfera. Per questo motivo la maggior parte delle analisi scientifiche si concentra sulla scintillazione che si verifica in condizioni di cielo sereno o di aria secca [3].

In questo lavoro presentiamo una metodologia per l'identificazione degli eventi di precipitazione basata sulla derivata prima temporale e sull'aggiornamento delle frequenze di taglio, diverse per le due bande, del filtro passa-alto utilizzato per rilevare la scintillazione troposferica dal segnale di beacon Alphasat nelle bande Ka e Q. Vengono inoltre presentate le caratteristiche dell'esperimento e i dettagli dell'elaborazione dei dati. I risultati dell'ampiezza della scintillazione in condizioni di cielo sereno, acquisiti nell'arco di tre mesi,

sono confrontati con il modello ITU-R. L'articolo è organizzato come segue. Il paragrafo 2 descrive la stazione ricevente e il set di dati disponibili. Il paragrafo 3 fornisce dettagli sull'elaborazione dei dati. Nel paragrafo 4 è descritto il modello ITU-R della scintillazione. I primi risultati sono descritti nel paragrafo 5. Infine, il paragrafo 6 illustra le conclusioni e i lavori futuri.

2 – Stazione di ricezione e data set

La stazione ricevente di Roma (lat. 41,83°N, lon. 12,47°E) acquisisce il segnale trasmesso dal payload "Aldo Paraboni" [4] con due sistemi dedicati puntati verso il satellite geostazionario con un angolo di elevazione medio di 41°. Due antenne paraboliche a singolo riflettore con diametro di 1,5 metri e di 40 centimetri sono utilizzate rispettivamente per il ricevitore in banda Ka a 19,701 GHz e per quello in banda Q a 39,402 GHz (figura 1).



Figura 1 – Stazione ricevente Alphasat in banda Ka e Q, dislocata presso la sede Roma EUR del MIMIT. Sul lato sinistro si nota il ricevitore in banda Q, a destra quello in banda Ka

La posizione apparente del satellite non è fissa nel cielo, ma è soggetta a movimenti spaziali ondulatori e l'antenna del ricevitore deve essere puntata con grande precisione per garantire una potenza massima stabile del segnale [5]. Entrambi i sistemi in banda Ka e Q sono dotati di un sistema di localizzazione satellitare ad anello aperto che utilizza le informazioni sull'orbita

del satellite. Queste informazioni sono fornite sotto forma di file Orbital Ephemeris Message (OEM), che contengono coordinate aggiornate ogni 5 minuti sia in elevazione che in azimut. Il sistema può ruotare con continuità di 200° in azimut e 180° in elevazione; la sua velocità massima è di 20° al minuto con un'accuratezza di posizione del motore a passo di $\pm 0,1^\circ$ e una precisione degli encoder di 0,01° [6]. L'intera stazione ricevente è stata progettata e realizzata "ad hoc" dal DIET&DGTEL-ISCTI&FUB [7].

L'insieme di dati analizzato comprende le acquisizioni del segnale Alphasat, nelle bande Ka e Q, dal 1° luglio al 30 settembre 2021. Si tratta di misure in aria chiara, caratterizzate da assenza di fenomeni precipitativi. I dati vengono acquisiti a una velocità di oltre 60 campioni al secondo, visualizzati in tempo reale e archiviati su base giornaliera, consentendo un'analisi completa della potenza del segnale ricevuta dalla stazione a terra. L'acquisizione è ancora in corso insieme all'elaborazione dei dati disponibili.

3 – Elaborazione dati

In primo luogo, i dati misurati giornalmente sono sottoposti alla seguente procedura di pre-elaborazione: i) controllo di qualità per identificare e rimuovere i dati non validi (dovuti al disallineamento satellite-ricevitore o al superamento del margine del ricevitore) e le mancate misurazioni (cioè tutti i casi di fuori servizio o di servizio parziale dovuti allo spegnimento della stazione per manutenzione e alla ripetuta attivazione per i test); ii) identificazione degli eventi di pioggia e separazione dalle condizioni di aria chiara. Quest'ultima operazione viene effettuata sia attraverso una procedura automatica (descritta nel seguito), sia incrociando il segnale del beacon misurato col registro di stazione (logbook) aggiornato quotidianamente.

L'algoritmo di rilevamento della pioggia sincronizza inizialmente i dati ottenuti dal ricevitore con una base temporale normalizzata costituita, per ogni giorno, da 1 campione al secondo ottenuto dalla media di 60 campioni. Quindi i dati vengono filtrati con un filtro passa-basso FIR (risposta impulsiva finita) a media mobile con una finestra di 5 minuti per estrarre le variazioni lente. L'identificazione degli eventi di precipitazione si basa sulla derivata prima

temporale definita su un intervallo di tempo Δ del segnale filtrato e calcolata utilizzando la seguente espressione

$$Y(n) = [X(n + \Delta/2) - X(n - \Delta/2)]/\Delta \quad (2)$$

dove X è la potenza del segnale ricevuto (mW), con una risoluzione temporale di 1 secondo, n indica l'ennesimo campione temporale, Δ è la finestra temporale utilizzata (300 s) ed Y è la derivata di X . La media $\langle Y(n) \rangle$ e la deviazione standard σ_Y , calcolate nella stessa finestra mobile Δ sono usate per definire la soglia Y_{th} utilizzata per rilevare gli eventi di precipitazione.

$$Y_{th} = \langle Y(n) \rangle \pm 5\sigma_Y \quad (3)$$

I valori della derivata prima che superano questa soglia sono identificati come eventi di precipitazione, contrassegnati ed eliminati dai dati prima del rilevamento della scintillazione. L'intensità della scintillazione è tipicamente descritta dalla varianza σ_χ^2 delle fluttuazioni di log-ampiezza χ [dB] del segnale ricevuto dovute alla turbolenza [8].

$$\sigma_\chi^2 = 42,48 \frac{k^{7/6}}{(\sin \theta)^{11/6}} \int_0^L C_n^2(z) z^{5/6} dz \quad [dB^2] \quad (4)$$

dove $k = 2\pi/\lambda$ è il numero d'onda, θ è l'angolo di elevazione, C_n^2 l'indice di rifrazione, z è la distanza verticale lungo il percorso ed L è l'estensione verticale dello strato turbolento. Si noti che l'equazione (4) ipotizza un'atmosfera stratificata orizzontalmente.

Analizzando la densità spettrale di potenza (PSD) del segnale si mira a separare gli effetti di degradazione dovuti all'assorbimento del gas dagli effetti di scintillazione. La funzione PSD (figura 2) presenta tre regioni distinte: una prima regione, che si estende da zero a una frequenza di 0,02-0,03 Hz, in cui la funzione mostra una forte diminuzione e una pendenza di -20 (dB/dec). Una seconda regione, che va da 0,03 Hz a 0.1-0.2 Hz, all'interno della quale la funzione è approssimativamente piatta, e una terza regione ad alta frequenza, al di sopra di 0,2 Hz, in cui la funzione PSD cade a picco con una pendenza di -80/3 (dB/dec).

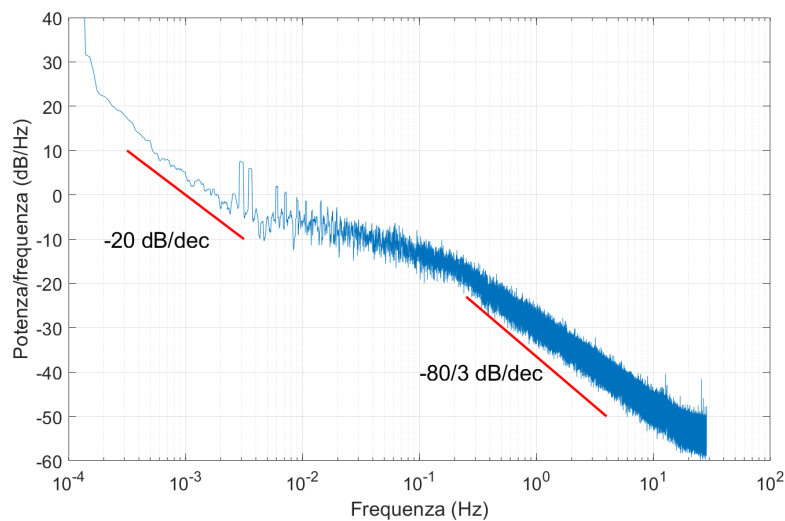


Figura 2 – Esempio della densità spettrale di potenza (PSD) del segnale ricevuto in banda Q, osservata dalla stazione sperimentale di Roma.

Al di sopra di circa 0,02 Hz, le componenti spettrali sono dovute alla scintillazione: queste fluttuazioni casuali sono più veloci dei fenomeni di attenuazione (dovuti alla presenza di idrometeore, gas e vapore acqueo nell'atmosfera) e possono essere separate dalle altre componenti attraverso un filtro passa-alto.

Un insieme di serie temporali contenenti solo la scintillazione è stata estratta dai dati applicando un filtro passa-alto "Butterworth" del 6° ordine, con una frequenza di taglio f_c pari a 6 mHz per la banda Ka e a 10 mHz per la banda Q. Non esiste un valore standard della frequenza di taglio per l'estrazione della sola scintillazione dai dati acquisiti.

La frequenza di taglio del filtro passa-alto f_c è determinata dalle caratteristiche dinamiche dell'attenuazione da pioggia e dall'intensità della scintillazione, pertanto varia da un evento all'altro. Inoltre, la f_c aumenta con l'aumentare della frequenza della portante perché la dipendenza dalla frequenza dovuta alla presenza di idrometeore, gas e vapore acqueo nell'atmosfera è molto più forte della dipendenza dalla frequenza dell'intensità della scintillazione.

L'approccio utilizzato in questo contributo consiste nello scegliere un punto in cui lo spettro del segnale inizia a deviare dalla pendenza di -20 dB/decade teoricamente associata all'attenuazione per idrometeore [9].

Il segnale in uscita dal filtro passa alto è ancora influenzato forte variabilità. Per ridurre quest'effetto, prima di rappresentare i dati, l'intensità della scintillazione è mediata su un intervallo di osservazione di un secondo. In questo modo, si costruisce una sequenza temporale di valori medi delle osservazioni acquisite.

Figura 3 mostra un esempio di intensità della scintillazione in condizioni di aria chiara per entrambe le frequenze.

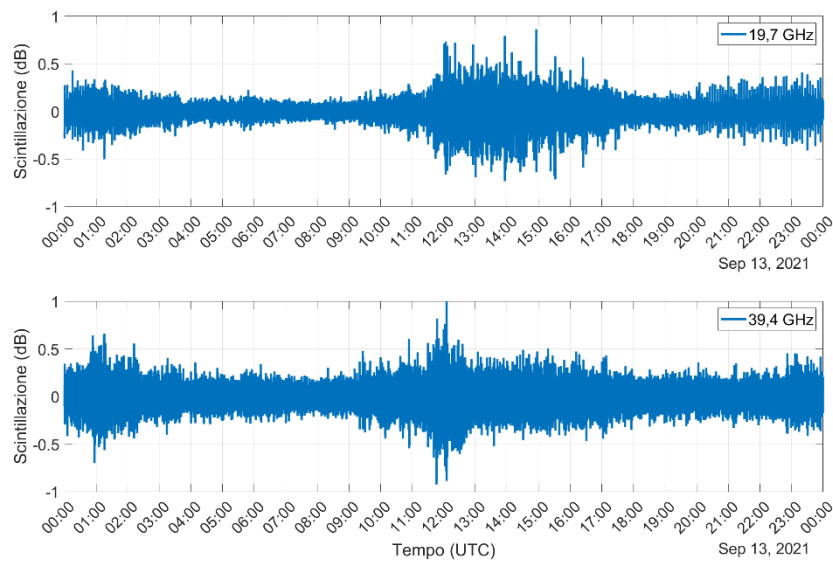


Figura 3 – Serie temporali dell'intensità di scintillazione estratte il 13 settembre 2021 (giorno di cielo sereno) in banda Ka e Q presso la stazione sperimentale di Roma

I dati di scintillazione tipicamente presentano fluttuazioni sia positive che negative associate ad incrementi e decrementi d'intensità del segnale [2,10]. Generalmente le fluttuazioni positive e negative del segnale di scintillazione hanno lo stesso ordine di grandezza durante condizioni meno severe, ma le fluttuazioni possono differire notevolmente in presenza di fenomeni più estremi [11].

4 – Modello di scintillazione troposferica ITU-R

I dati di scintillazione misurati sono confrontati con il modello di previsione della scintillazione troposferica presentato da ITU-R [12]. Il modello si basa su medie mensili (o più lunghe) di

temperatura e umidità relativa e riflette le condizioni climatiche specifiche del sito. Nel modello la deviazione standard della scintillazione è data dalla seguente espressione:

$$\sigma = \sigma_{ref} f^{7/12} \frac{g(x)}{(\sin \theta)^{1,2}} \quad (5)$$

dove f è la frequenza in GHz, θ è l'angolo di elevazione, σ_{ref} è la deviazione standard del segnale di riferimento,

$$\sigma_{ref} = 3,6 \times 10^{-3} + 10^{-4} \times N_{wet} \quad (6)$$

N_{wet} rappresenta la Wet Refractivity che è, a sua volta, una funzione dell'umidità relativa e della temperatura misurata al livello del suolo [13]. In questo caso $N_{wet} = 54,5$ è derivata da una mappa numerica globale fornita dalla raccomandazione ITU-R P.453-14 [14] e riferita alle coordinate della stazione sperimentale di Roma. Il termine $g(x)$ è l'averaging factor dell'antenna.

$$g(x) = \sqrt{3,86 (x^2 + 1)^{11/12} \cdot \sin \left[\frac{11}{6} \arctan \frac{1}{x} \right] - 7,08 x^{5/6}} \quad (7)$$

dove

$$x = 1,22\eta \frac{D^2 f}{L} \quad (8)$$

η si indica l'efficienza dell'antenna, D il suo diametro fisico (m) ed L la lunghezza effettiva del percorso turbolento da un'altezza h_L .

$$L = \frac{2h_L}{\sqrt{\sin^2 \theta + 2,35 \times 10^{-4} + \sin \theta}} \quad (9)$$

Il valore dell'altezza del livello di turbolenza h_L è suggerito da ITU-R in 1000 m.

5 – Analisi dei dati Alphasat

Le serie temporali acquisite, relative al periodo compreso tra il 1° luglio e il 30 settembre 2021, sono state processate per estrarre dati di scintillazione, considerando solo le misure in aria chiara.

Al fine di studiare e modellare la tendenza a lungo termine dell'intensità delle scintillazioni, ne è stata calcolata la deviazione standard (σ_x in dB) in blocchi di 1 minuto ed è stata eseguita un'analisi statistica dei dati attraverso l'istogramma e la relativa distribuzione di densità di probabilità (PDF) per entrambe le bande.

La legge di distribuzione log-normale si è rivelata la più adatta a rappresentare la PDF, come mostrato dalla linea continua in figura 4.

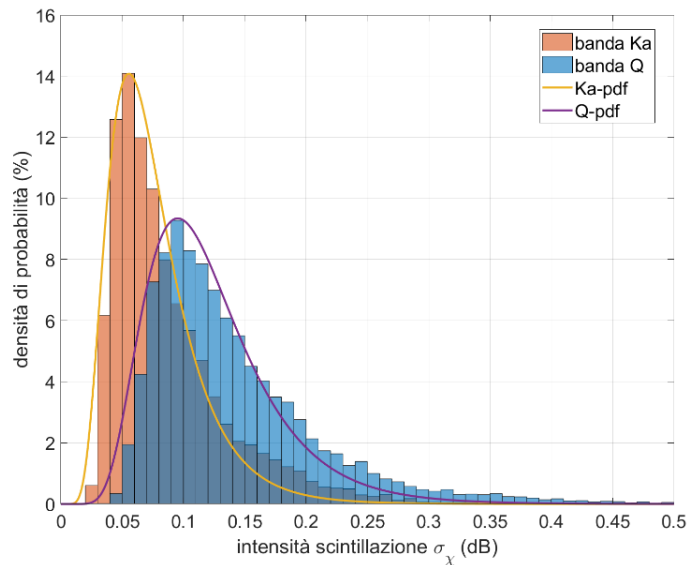


Figura 4 – Distribuzione di probabilità misurata dell'intensità di scintillazione (σ_χ) durante i tre mesi analizzati (luglio, agosto e settembre 2021) e relativo adattamento mediante la legge log-normale

Il picco della PDF, rappresentante l'intensità delle scintillazioni più frequenti, è centrato a circa 0.06 dB per la banda Ka e 0,1 dB per la banda Q. In tabella 1 sono mostrati i principali parametri statistici della PDF.

Tabella 1. Principali parametri statistici della PDF dell'intensità delle scintillazioni osservate in banda Ka e Q

BANDA	MODA	MEDIANA	MEDIA	DEV. STANDARD
Ka	0,0555	0,0685	0,0761	0,0369
Q	0,0953	0,1129	0,1229	0,0528

La maggiore ampiezza delle scintillazioni in banda Q rispetto a quelle in banda Ka è visibile dal rapporto, maggiore di uno, del valore mediano di σ_χ dei dati misurati nelle due bande. Un valore simile si riscontra esaminando il frequency scaling factor (fattore di scala in frequenza) secondo le specifiche del modello ITUR [12], che tiene conto sia delle dimensioni delle antenne sia delle frequenze coinvolte (si veda la tabella 2).

Inoltre, il comportamento della PDF è equivalente all'asimmetria della fluttuazione del livello del segnale a breve termine osservata nella scintillazione in aria libera, come riportato in letteratura [15].

Tabella 2. Frequency scaling factor dell'ampiezza della scintillazione in banda Q e Ka: misurata e ITU-R.

	Misurata	ITU-R
Q/Ka	1,65	1,59

Il frequency scaling factor dell'ampiezza della scintillazione è definito come il rapporto delle deviazioni standard della scintillazione sperimentata da due onde radio con frequenze portanti diverse, che si propagano simultaneamente lungo lo stesso percorso, misurate durante un intervallo di tempo in cui la turbolenza può essere modellata come un processo casuale stazionario. In base all'equazione (5) del modello ITU-R, il frequency scaling factor ha la seguente espressione:

$$\frac{\sigma_x(k_2)}{\sigma_x(k_1)} = \left[\frac{k_2}{k_1} \right]^{7/12} \left[\frac{g(x_2)}{g(x_1)} \right] \quad (10)$$

dove k è il numero d'onda e $g(x)$ è l'averaging factor dell'antenna, equazione (7), che dipende da k , dall'altezza dello strato turbolento h_L , dall'angolo di elevazione rispetto al satellite θ , dal raggio terrestre effettivo R_e , dal diametro D e dall'efficienza η dell'antenna.

In figura 5 è raffigurato un esempio del frequency scaling factor tra la banda Q e la banda Ka misurato durante una giornata di aria chiara e mediato su un intervallo temporale di 300 s. La linea tratteggiata rappresenta il valore di riferimento secondo il modello ITU-R relativo al sito di Roma.

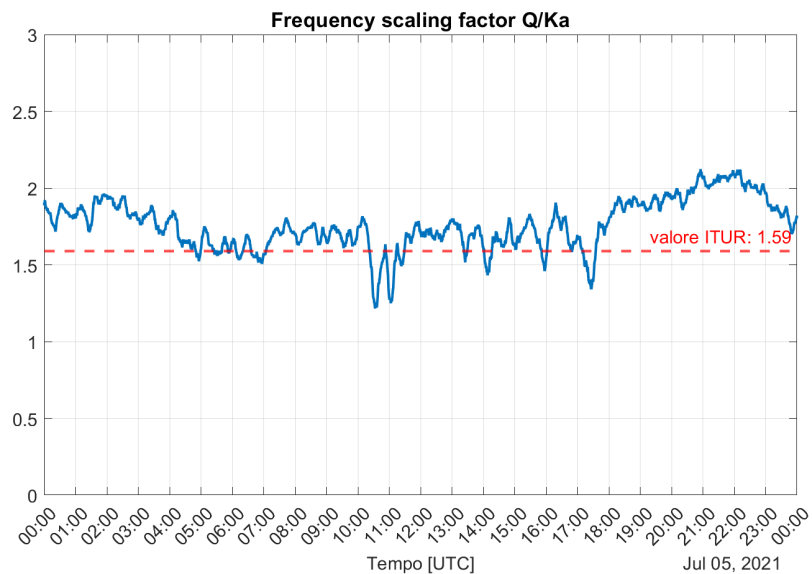


Figura 5 – Andamento giornaliero del frequency scaling factor Q/Ka (blu) misurato il 5 luglio 2021, rispetto al valore ricavato dal modello ITU-R (rosso) relativo al sito di Roma

La distribuzione dell'intensità di scintillazione, χ (dB) nei tre mesi analizzati è rappresentata da una funzione di distribuzione cumulativa complementare (CCDF), riferita alle due frequenze 19,701 GHz (banda Ka) e 39,402 GHz (banda Q), che viene poi confrontata con le previsioni del modello ITU-R [12]. La Figura 6 mostra l'andamento statistico per i mesi esaminati. In particolare, le curve del modello ITU-R sono state ottenute considerando un'altezza del livello di turbolenza di un chilometro e un'efficienza d'antenna del 60% [7].

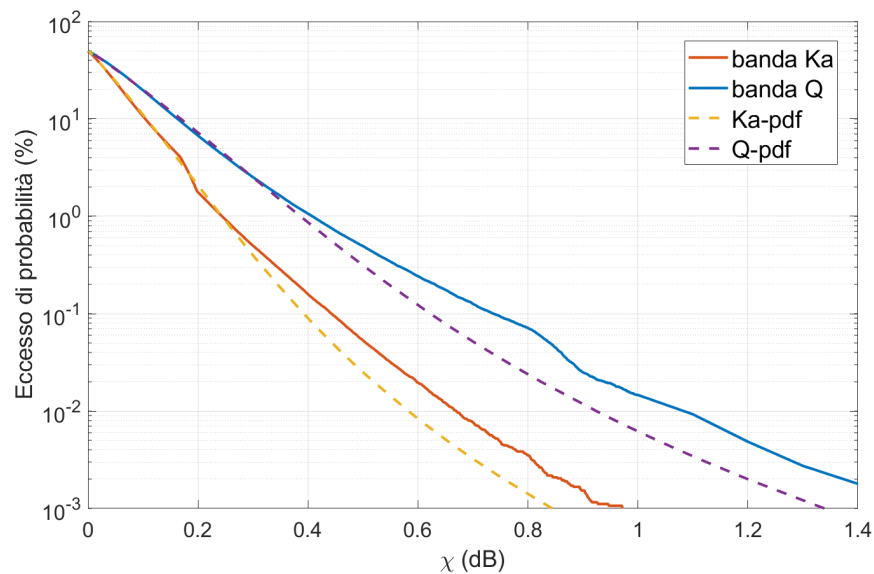


Figura 6 – *Eccesso di probabilità di χ stimata sulle misure sperimentali acquisite relative ai tre mesi analizzati nel 2021 nelle bande Ka e Q*

La CCDF dell’ampiezza di scintillazione segue l’andamento indicato dal modello ITU-R, anche se mostra una leggera sovrastima per entrambe le bande Ka e Q, a partire da 0,2 dB e 0,3 dB rispettivamente. Ciò è probabilmente dovuto alla durata limitata del set di dati e al periodo estivo interessato dall’analisi.

6 – Conclusioni

L’obiettivo di questo studio è quello di caratterizzare la scintillazione in banda Ka e Q nel collegamento spazio-terra a Roma, in Italia. È stata presentata una procedura automatica per identificare e contrassegnare gli eventi di pioggia da quelli di cielo sereno ed è stata eseguita un’analisi preliminare dei dati acquisiti dalla stazione ricevente Alphasat in banda Ka e Q a Roma per il rilevamento della scintillazione in condizioni di cielo sereno. Grazie al sistema di tracciamento satellitare, le fluttuazioni indesiderate sui dati acquisiti sono state notevolmente attenuate e sono state elaborate per garantirne la qualità, con particolare attenzione alla separazione della scintillazione da altri effetti dannosi. Le scintillazioni sono state estratte da 3 mesi di dati utilizzando un filtro passa-alto Butterworth del 6° ordine con una frequenza di

taglio differenziata per le due bande: 0,006 Hz in banda Ka e 0,01 Hz in banda Q. L'analisi statistica ha mostrato come la distribuzione statistica log-normale appaia la più adatta a rappresentare i valori dell'intensità di scintillazione, con picchi rispettivamente di circa 0,06 dB in banda Ka e 0,1 dB in banda Q.

Le statistiche sperimentali dell'ampiezza di scintillazione sono state confrontate con il modello di previsione ITU-R, mostrando un accordo relativamente buono sebbene una leggera sovrastima. Le osservazioni sperimentali sono attualmente in corso con l'obiettivo di eseguire analisi statistiche più accurate, ad esempio considerando, oltre al modello ITU-R, altri metodi di previsione disponibili in letteratura quali: Otung [16], van de Kamp [17] e Karasawa [13].

Ulteriori analisi saranno necessarie per estendere il periodo di analisi e migliorare ulteriormente il modello di scintillazione.

Ringraziamenti

Ringraziamo DGTEL-ISCTI MIMIT e Sapienza Università di Roma che hanno cofinanziato questo lavoro. Siamo grati alla Direttrice ed ai colleghi del DGTEL-ISCTI MIMIT che hanno consentito l'uso del laboratorio di Microonde. Un particolare ed affettuoso ricordo va alla figura del Professor Frank Silvio Marzano (DIET, Università di Roma La Sapienza) scomparso due anni fa, ideatore dell'attività sperimentale e delle metodologie di analisi oggetto del presente articolo. Gli autori desiderano inoltre ringraziare l'ASI, Roma, Italia, in particolare G. Codispoti e G. Parca, per il supporto all'esperimento di propagazione Alphasat Aldo Paraboni.

Riferimenti bibliografici

- [1] A. Perez-Neira, M. Vazquez, S. Maleki, B. S. Mysore, and S. Chatzinotas (2018). "Signal Processing for High Throughput Satellite Systems: Challenges in New Interference-Limited Scenarios." IEEE Signal Processing Magazine. 36. 10.1109/MSP.2019.2894391
- [2] G. Maral and Bousquet M., "Satellite Communications Systems" 5th Ed., Wiley and Sons Ltd (Chichester, UK), 2009.

- [3] J.P.V. Poiares Baptista and P.G. Davies, editors. "OPEX Reference book on Attenuation Measurement and Prediction", volume 1, Noordwijk, The Netherlands, 1994. ESA ESTEC.
- [4] A. Paraboni, "Description of Alphasat TDP5 Propagation Experiment", Proceedings of the ESA Propagation Workshop ESA WPP 298, 2008.
- [5] V. Pek, V. Brazda, O. Fiser. "Description of Alphasat satellite space motion and its consequences for signal reception." Conference Radioelektronika, 2016.
- [6] A. M. Marziani, F. Consalvi, G. Fusco, F. S. Marzano, C. Riva and A. Martellucci, "Alphasat dual-frequency receiving station in Rome, Italy: upgrade of the Ka-band front-end and case study analysis," 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Krakow, Poland, 2019, pp. 1-5.
- [7] A. Marziani, F. Consalvi, S. Chicarella, E. Restuccia, L. Amaduzzi and F. S. Marzano, "AlphaSat Ka-band and Q-band Receiving Station in Rome: Development, status and measurements," 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 2015, pp. 1-5.
- [8] H. Vasseur, "Prediction of tropospheric scintillation on satellite links from radiosonde data," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 47, no. 2, pp. 293-301, 1999.
- [9] E. Matricciani, M. Mauri and C. Riva, "Relationship between scintillation and rain attenuation at 19.77 GHz," Radio Science, vol. 31, no. 2, pp. 273-279, March-April 1996
- [10] A. Pinho, S. Mota, and A. Rocha, "A Quick Overview of a New Scintillation Database", ICT Discoveries, vol. 2, no. 1, Nov. 2019.
- [11] M. Rytir, "Clear-air scintillation and multipath for low-elevation high-latitude satellite communication links," 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Lisbon, Portugal, 2015, pp. 1-5.
- [12] ITU-R recommendation P.618-13. "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," Geneva, Switzerland, 2017.
- [13] Y. Karasawa, M. Yamada, and J. E. Allnutt, "A new prediction method for tropospheric scintillation on Earth-space paths," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 36, no. 11, pp. 1608–1614, 1988.

- [14] ITU-R recommendation P.453-14. "The radio refractive index: its formula and refractivity data," Geneva, Switzerland, 2019.
- [15] M.M.J.L. Van de Kamp, "Experimental verification of asymmetrical short-term scintillation distribution model", *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 7, pp. 663-664, 2000.
- [16] Otung, I. E., "Prediction of tropospheric amplitude scintillation on a satellite link," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 44, no. 12. pp. 1600–1608, 1996.
- [17] M.M.J.L. Van de Kamp, "Asymmetric signal level distribution due to tropospheric scintillation," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 11, pp. 1145, 1998.