

Analisi della scintillazione troposferica nel collegamento Alphasat in banda Ka e Q di Roma (i)

Tropospheric scintillation analysis of Ka- and Q-band Alphasat link in Rome (i)

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

◆ Fondazione Ugo Bordoni

□ DIET, Università di Roma La Sapienza

● DGTCSI-ISCTI, Ministero delle Imprese e del Made in Italy, (MIMIT)

Sommario

La scintillazione è generata da una rapida fluttuazione (dell'ordine di frazioni di secondi o del secondo) delle proprietà dei segnali elettromagnetici in termine di fase e intensità generate dalle disomogeneità spazio-temporale, su piccola scala, del mezzo trasmissivo. Nel caso di collegamenti satellitari, la scintillazione si può manifestare in presenza delle varie condizioni meteo dell'atmosfera: in presenza o assenza di nubi, di eventi precipitativi, di nebbie o turbolenze.

In questo articolo sono analizzati eventi di scintillazioni troposferiche osservati dal 2021 al 2022 in banda Ka e Q da una stazione ricevente del satellite Alphasat dislocata a Roma (I). Nel paragrafo 2 viene descritta la stazione ricevente ed i dati acquisiti. Nel paragrafo 3 sono riportati i criteri dell'analisi statistica che hanno permesso di quantificare ed individuare anche i periodi di fuori servizio ma soprattutto i criteri per identificare i fenomeni di scintillazione mediante l'uso di un filtro passa-alto con frequenza identificata dall'analisi spettrale. Nel paragrafo 4 si riportano e commentano i risultati statistici dell'intensità delle scintillazioni alle due bande di frequenza. La variabilità delle intensità è stata calcolata rispetto a diverse scale temporali (da base anno a base ora). Infine, le osservazioni sperimentali sono state confrontate con quanto predetto dal relativo modello ITU-R.

Abstract

Scintillation is generated by a rapid fluctuation (of the order of fractions of seconds or the second) in the phase and intensity properties of electromagnetic signals generated by the small-scale, spatiotemporal inhomogeneities of the transmitting medium. In the case of satellite links, scintillation can occur in the presence of the various weather conditions of the atmosphere: in the presence or absence of clouds, precipitation events, fog or turbulence.

This paper analyzes tropospheric scintillation events observed from 2021 to 2022 in Ka- and Q-band from a receiving station of the Alphasat satellite deployed in Rome (Italy). Section 2 describes the receiving station and the data acquired. Paragraph 3 reports the criteria of the statistical analysis that also allowed quantification and identification of out-of-service periods, but more importantly, the criteria for identifying scintillation phenomena through the use of a high-pass filter with frequency identified by spectral analysis. Section 4 reports and comments on the statistical results of scintillation intensity at the two frequency bands. The variability of the intensities was calculated with respect to different time scales (year base to hour base). Finally, the experimental observations were compared with what was predicted by the relevant ITU-R model.

Keyword

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

1 – Introduzione

Il satellite è l'elemento principale della maggior parte dei sistemi di telecomunicazione in tutto il mondo. I dati vengono scambiati e ricevuti in varie forme dalle stazioni terrestri e trasmessi da una stazione di ripetizione a microonde, nota anche come satellite di comunicazione [1]. I principali servizi e applicazioni offerte da una rete satellitare di comunicazione sono di servizi telefonia, servizi di trasferimento dati, come TV, radio satellitare e navigazione Internet, servizi di radiolocalizzazione e navigazione aerea, navale e terrestre [2].

Il satellite rimane però imbattibile in tutte le applicazioni di tipo broadcast, cioè tutte quelle applicazioni per le quali occorre inviare gli stessi dati a molti ricevitori, molto più rispetto al broadcast dei sistemi terrestri (radiodiffusione e telediffusione terrestre). La sua scalabilità, rispetto alla rete terrestre, è semplicemente non paragonabile. Sia che si tratti di inviare lo stesso flusso audio/video (es. per applicazioni di formazione a distanza in tempo reale) o lo stesso file a un gran numero di stazioni riceventi, il satellite è in grado, a costi praticamente indipendenti dal numero di postazioni, di servire tutti i destinatari con la stessa qualità.

A causa della domanda di maggior banda da parte dei fornitori di servizi, per poter soddisfare le crescenti esigenze di velocità di trasmissione dei dati, sta diventando una realtà l'utilizzo di frequenze nella parte superiore dello spettro [3].

L'uso delle frequenze più elevate come i 20-30 GHz e i 40-50 GHz sicuramente contribuirà ad aumentare l'efficienza del segmento spaziale di un singolo satellite geostazionario permettendo di passare da capacità di qualche Gigabit al secondo a un Terabit al secondo e oltre nel prossimo futuro.

Oggi disponiamo del satellite geostazionario AlphaSat, realizzato da ESA e lanciato nel 2013, il quale porta a bordo un carico utile sperimentale intitolato al Prof. Aldo Paraboni (esperimento "TDP5") per lo studio della propagazione e comunicazioni nelle bande millimetriche a 40/50 GHz [4]. Queste frequenze, pur essendo soggette ad attenuazioni, non trascurabili, a causa di fenomeni atmosferici come nubi e precipitazioni, sono di largo interesse per i sistemi di accesso a banda larga.

Nella progettazione di collegamenti satellitari per comunicazioni a onde millimetriche una delle sfide più onerose è la stima degli effetti delle scintillazioni dovute alle turbolenze troposferiche, che si manifestano sia in termini di variazione di fase che dell'intensità del segnale trasmesso e ricevuto [5]. Effetti che possono portare ad un degrado della qualità del segnale come rapporto segnale/rumore fino a diversi decibel.

Per svolgere studi in quest'ambito, sono state installate stazioni riceventi in diverse località europee gestite da differenti gruppi di ricerca in modo da garantire la massima partecipazione a livello scientifico e raccogliere osservazioni sperimentali in diverse regioni climatiche.

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 al progetto con due ricevitori, uno per ciascuna frequenza, installati presso il Ministero delle Imprese e del Made in Italy (MIMIT) a Roma.

2 – Stazione di ricezione e data set

Il payload "Aldo Paraboni" del satellite AlphaSat genera due segnali di beacon rispettivamente a 19,701 GHz (Ka-band) ed a 39,402 GHz (Q-band) [6]. A Roma (41,83° Lat, 12,47° Lon), tali segnali sono acquisiti da una stazione ricevente con due sistemi dedicati distinti puntati verso il satellite con un angolo di elevazione di 40 gradi. Per la banda Ka il ricevitore utilizza un'antenna parabolica a riflettore singolo di 1,5 metri di diametro, mentre per la banda Q viene utilizza un'antenna di circa 40 centimetri (figura 1).



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

La stazione ricevente è dotata di un sistema di localizzazione satellitare sviluppato “ad hoc”. Questo sistema di tracciamento automatico della posizione del satellite, altamente personalizzato, garantisce elevate prestazioni e risolve i problemi dovuti ad un instabile movimento spaziale ondulatorio proprio del satellite stesso [7] che provoca oscillazioni indesiderate nel segnale ricevuto. Esso si basa su un'architettura ad anello aperto che utilizza le effemeridi per spostare l'antenna verso la direzione del satellite, cambiando le coordinate una volta ogni 5 minuti. L'intera stazione ricevente è stata progettata e realizzata “ad hoc” dal DIET&DGTCSI-ISCTI&FUB [8].

I dati acquisiti con una frequenza di 64 campioni al secondo sono visualizzati in tempo reale ed archiviati a cadenza giornaliera, permettendo un'analisi completa delle potenze ricevute a terra.

In questo articolo verranno analizzati i dati osservati dal 2021 al 2022. Essi sono stati sottoposti ad un primo processo di selezione manuale per essere catalogati in funzione della presenza di fenomeni precipitativi o loro assenza (aria chiara) e di tutti i casi di fuori o parziale servizio: fuori allineamento satellite-ricevitore, spegnimento della stazione per manutenzione ed attivazione ripetuta per test. Per la selezione, sono state utilizzate informazioni meteo provenienti da osservazione quotidiana e archiviate nel registro (logbook) della stazione.

3 – Elaborazione dati e scintillazione

Complessivamente i dati acquisiti nelle due bande, Ka e Q, costituiscono una serie temporale del livello del segnale (in unità dBm) con una frequenza di 64 Hz e una dinamica che supera i 20 dB.

Nel corso del 2021 i giorni di acquisizione, tolti i casi in cui non sono state effettuate misurazioni per problemi tecnici o per misure errate, sono stati 304, ridotti successivamente a 283 dopo aver eliminato i casi di mancato allineamento satellite-ricevitore, mentre per il 2022 sono stati 344 giorni. Queste osservazioni sono state classificate rispetto ai fenomeni perturbativi troposferici (eventi precipitativi, grandine o neve).

S. Barbieri, F. Consalvi, M. Biscarini, G. Fusco, N. Pierdicca

La presenza di questi eventi meteo-climatici troposferici, lungo per percorso del collegamento, hanno indotto riduzioni della potenza del segnale ricevuto a terra, fino allo “sganciamento” del segnale determinandone il fuori servizio. I risultati sono riportati nella tabella 1.

Tabella 1. Percentuale di fuori servizio dei ricevitori in banda Ka e Q nel 2021 e 2022.

Anno	Banda	Percentuale di fuori servizio
2021	Ka	1,2
	Q	1,3
2022	Ka	0,09
	Q	0,1

Le serie temporali preprocessate sono state archiviate in file giornalieri e quindi analizzate per rilevare l'intensità delle scintillazioni troposferiche.

Come è noto, le scintillazioni troposferiche sono originate dalle rapide variazioni dell'indice di rifrazione (n) lungo il percorso causate dallo stato termodinamico dell'atmosfera. Questi processi comportano fluttuazioni rapide, indesiderate, del segnale ricevuto [5].

L'intensità delle scintillazioni aumenta con la riduzione della lunghezza d'onda del segnale, con la lunghezza del percorso e nel caso di antenna ricevente di piccole dimensioni, mentre diminuisce se l'ampiezza del fascio dell'antenna diminuisce (mantenendo la stessa apertura). Per lo studio delle scintillazioni sono stati presi in esame, come scelta di lavoro, solamente i giorni privi di precipitazione. L'elaborazione del segnale comporta riuscire a separare gli effetti di degrado dovuti all'assorbimento dei gas o all'attenuazione per idrometeore dalle scintillazioni. Tali effetti non possono essere distinti nel tempo perché nel nostro segnale in ricezione, sia le variazioni rapide, come le scintillazioni, che quelle più lente, come l'assorbimento dei gas, risultano essere sempre sovrapposte tra loro.

La separazione dei diversi effetti di degrado è possibile attraverso lo studio delle loro caratteristiche spettrali. Lo spettro ottenuto (figura 2) mostra una densità di potenza maggiore in intensità e una pendenza di $-80/3$ [dB/dec] a basse frequenze dovuto all'assorbimento da gas, seguito da una pendenza di $-20/3$ [dB/dec] dovuta a variazioni lente e legata a fenomeni di attenuazione, come per presenza di pioggia.

All'aumentare della frequenza, da un punto noto come frequenza di 'taglio' ('cut-off', f_c) fino a circa 0,1 Hz, invece lo spettro risulta essere piatto. Successivamente lo spettro decresce in intensità con una pendenza di $-80/3$ [dB/dec].

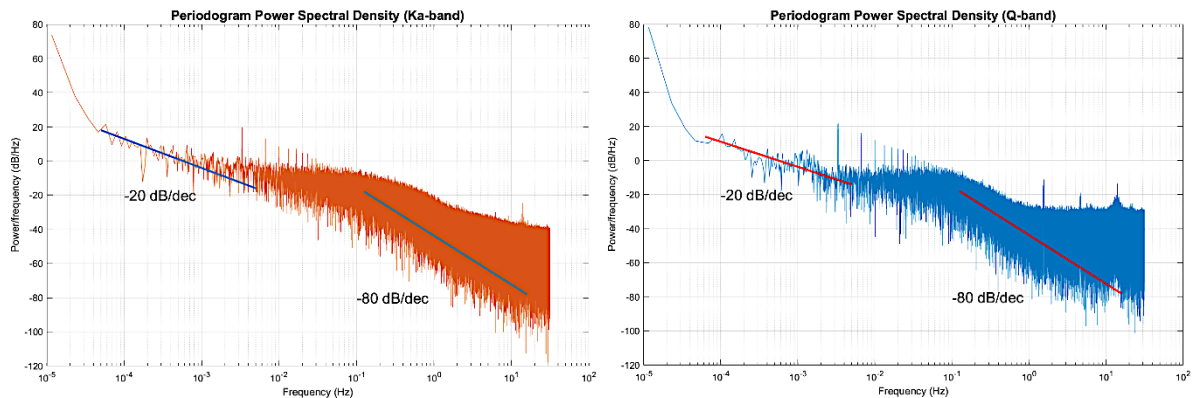


Figura 2 – Esempi della densità spettrale di potenza del segnale ricevuto in banda Ka (sinistra) e banda Q (destra), osservati dalla stazione sperimentale di Roma.

La parte ad alta frequenza, dalla frequenza di taglio in poi, identifica l'effetto sul segnale dovuto alle scintillazioni: queste fluttuazioni aleatorie sono più rapide dei fenomeni di attenuazione dovuti alla presenza di idrometeorie, gas e vapore acqueo nell'atmosfera, e possono essere separate dalle altre componenti tramite un filtro passa alto. Non esiste però un valore standard della frequenza di taglio per l'estrazione della sola scintillazione dai dati acquisiti.

L'approccio utilizzato in questa analisi per identificare la frequenza di taglio consiste nello scegliere un punto in cui lo spettro del segnale inizia a deviare dalla pendenza di -20 dB/decade, teoricamente associata all'attenuazione della pioggia [9], ovvero all'inizio della parte piatta dello spettro, intorno ai 0,025 Hz.

I dati sono processati con un filtro numerico passa alto di "Butterworth" del 6° ordine, per ricavarne la scintillazione (in figura 3 un esempio in banda Ka), la quale tipicamente presenta fluttuazioni sia positive che negative associate ad incrementi e decrementi d'intensità del segnale [10-16].

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 [17].

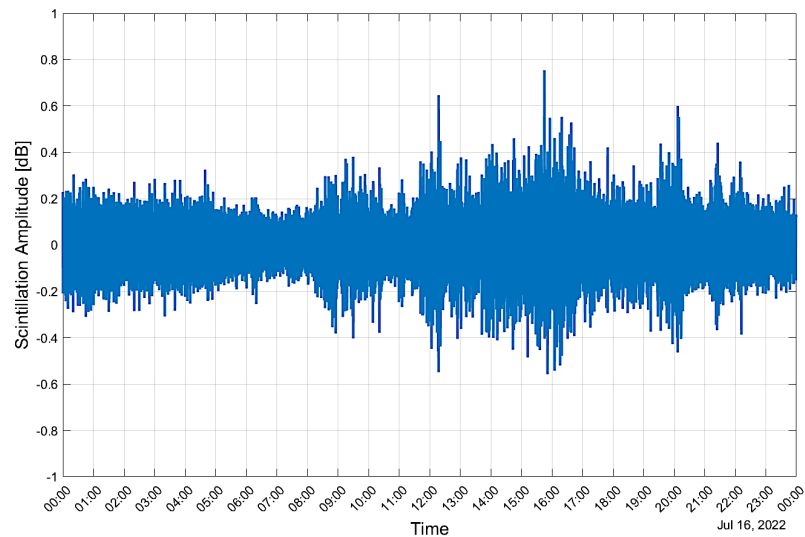


Figura 3 – Esempi d'intensità della scintillazione in banda Ka osservati il 16 Luglio 2022 presso la stazione sperimentale di Roma

Il segnale in uscita dal filtro passa alto è ancora influenzato forte variabilità ed elevato numero di campioni, per cui si è scelto di fare una media dell'intensità di scintillazione su un intervallo di osservazione di un secondo. In questo modo, si costruisce una sequenza temporale di valori medi delle osservazioni acquisite.

4 – Analisi dei dati Alphasat

L'intensità della scintillazione è caratterizzata dalla sua deviazione standard σ_χ (in dB) e su di essa è eseguita la statistica. In particolare, è noto come la varianza dell'intensità della scintillazione per angoli di elevazione sopra i 5 gradi soddisfi la seguente espressione [14]:

$$\sigma_\chi^2 = 42,48 \frac{k^{7/6}}{(\sin \theta)^{11/6}} \int_0^L C_n^2(z) z^{5/6} dz \quad (1)$$

dove $k = 2\pi/\lambda$ è il numero d'onda, θ è l'angolo di elevazione, L è la distanza e C_n^2 l'indice di rifrazione.

Al fine di determinare e modellare l'andamento dell'intensità delle scintillazioni (σ_χ) sul lungo periodo, l'analisi statistica ha permesso di calcolare l'istogramma e la relativa densità di probabilità PDF per le due bande e per ogni anno (figura 4).

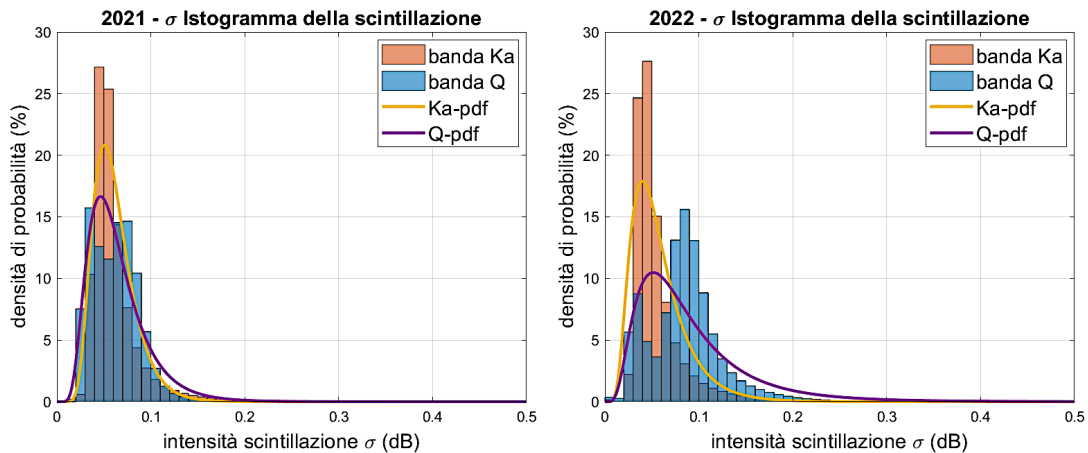


Figura 4 – Distribuzione di probabilità misurata dell'intensità di scintillazione (σ_χ) per l'anno 2021 (sinistra) e 2022 (destra) e relativo adattamento mediante la legge log-normal

La legge di distribuzione log-normal risulta essere la più adatta a rappresentare la distribuzione della densità delle probabilità (PDF), linea continua in figura 4.

S. Barbieri, F. Consalvi, M. Biscarini, G. Fusco, N. Pierdicca

Il picco della PDF, rappresentante l'intensità delle scintillazioni più frequenti, è centrato a circa 0.05 dB nel 2021 per entrambe le bande mentre nel 2022 il picco della banda Ka è posizionato a 0.04 dB. In tabella 2 sono mostrati i principali parametri statistici della PDF.

Tabella 2. Principali parametri statistici della PDF dell'intensità delle scintillazioni osservate in banda Ka e Q nel 2021 e 2022.

Anno	Banda	Moda	Mediana	Media	Dev. Standard
2021	Ka	0,0506	0,0574	0,0612	0,0224
	Q	0,0464	0,0575	0,0641	0,0314
2022	Ka	0,0399	0,0510	0,0576	0,0303
	Q	0,0514	0,0749	0,0904	0,0611

Dai dati raccolti nel 2021 e 2022 è stato possibile svolgere anche uno studio sulla distribuzione mensile delle serie temporali. La variazione diurna della σ_x è stata calcolata su base oraria in finestre temporali di 15 minuti e poi mediata mensilmente (figura 5).

I periodi di scintillazione più elevati si verificano nelle ore centrali della giornata e nei mesi con temperature dell'aria medie più elevate. I periodi di scintillazione più bassi invece si verificano nelle prime ore del mattino e di sera. Le variazioni giornaliere sono piuttosto simili ad entrambe le frequenze come può essere osservato.

Analisi della scintillazione troposferica nel collegamento Alphasat in banda Ka e Q di Roma
Tropospheric scintillation analysis of Ka- and Q-band Alphasat link in Rome (i)

S. Barbieri, F. Consalvi, M. Biscarini, G. Fusco, N. Pierdicca

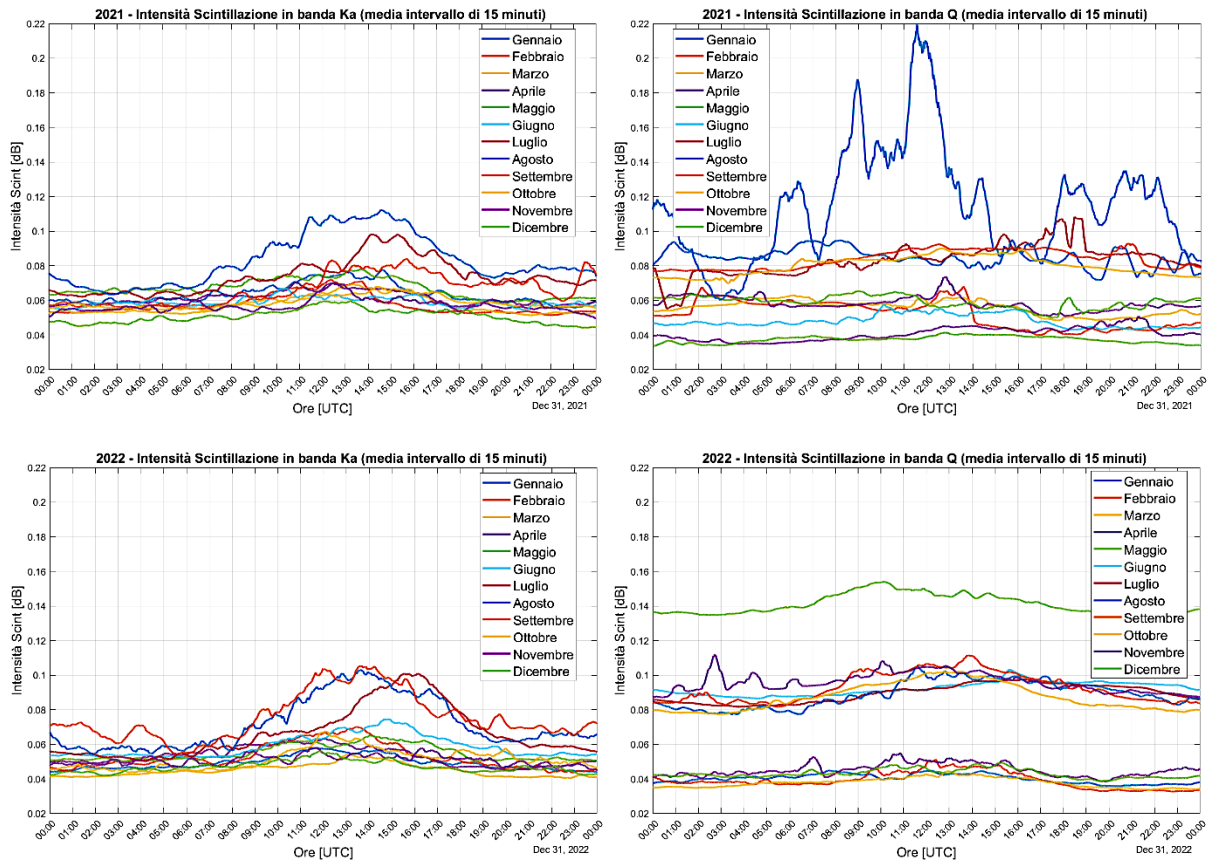


Figura 5 – Andamento dell'intensità di scintillazione mediata nelle 24 ore e mese per mese in banda Ka (sinistra) e banda Q (destra) relativa al 2021 (in alto) e 2022 (in basso).

Differentemente dalla banda Ka che presenta circa lo stesso andamento tra il 2021 e il 2022, la banda Q mostra una maggiore variabilità. Non solo vi è una netta separazione tra i mesi più freddi e quelli più caldi ma vi sono variazioni più marcate in intensità legate ad alcuni mesi in particolare come, ad esempio, il mese di agosto nel 2021 o quello di dicembre nel 2022.

Analizzando l'intensità delle scintillazioni mese per mese relativa all'intero insieme di dati (figura 6) si evidenzia una maggiore stabilità statistica con valori simili a quelli riportati in letteratura.

Analisi della scintillazione troposferica nel collegamento Alphasat in banda Ka e Q di Roma
Tropospheric scintillation analysis of Ka- and Q-band Alphasat link in Rome (i)

S. Barbieri, F. Consalvi, M. Biscarini, G. Fusco, N. Pierdicca

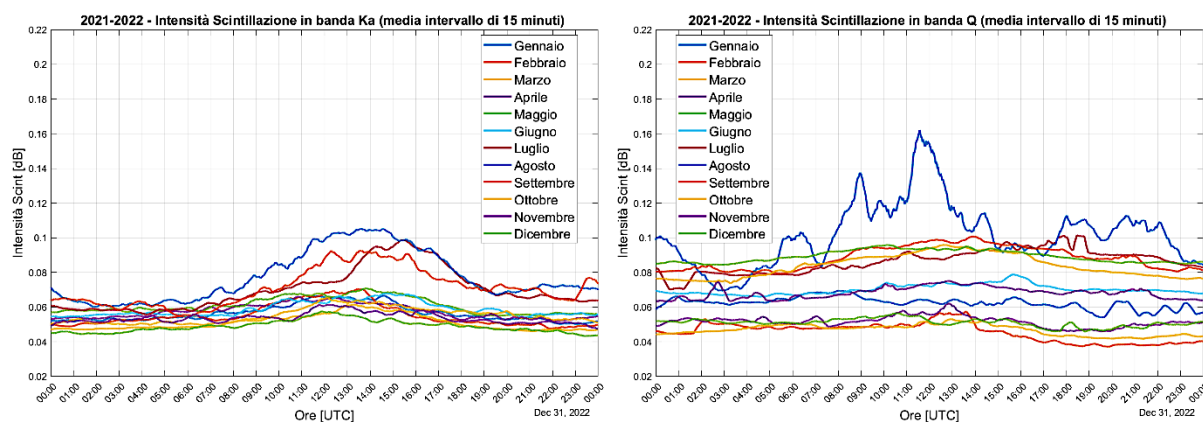


Figura 6 – Andamento dell'intensità di scintillazione mediata nelle 24 ore e mese per mese in banda Ka (sinistra) e banda Q (destra) relativa all'intero insieme di dati acquisiti.

La distribuzione dell'intensità di scintillazione, σ_x (dB) annuale è rappresentata mediante la funzione di distribuzione cumulativa complementare (CCDF), riferita alle due frequenze 19.701 GHz (banda Ka) e 39.402 GHz (banda Q), che poi viene confrontata con i risultati simulati del modello di previsione ITU-R [18]. Nelle figure 7 ed 8 sono mostrati gli andamenti statistici relativi agli anni 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 di antenna del 60% [19]. Inoltre, il termine umido della rifrattività radio utilizzato $N_{wet} = 54,5$ è derivato da una mappa numerica globale fornita dalla raccomandazione ITU-R P.453 [20] e riferito alle coordinate della stazione sperimentale di Roma.

S. Barbieri, F. Consalvi, M. Biscarini, G. Fusco, N. Pierdicca

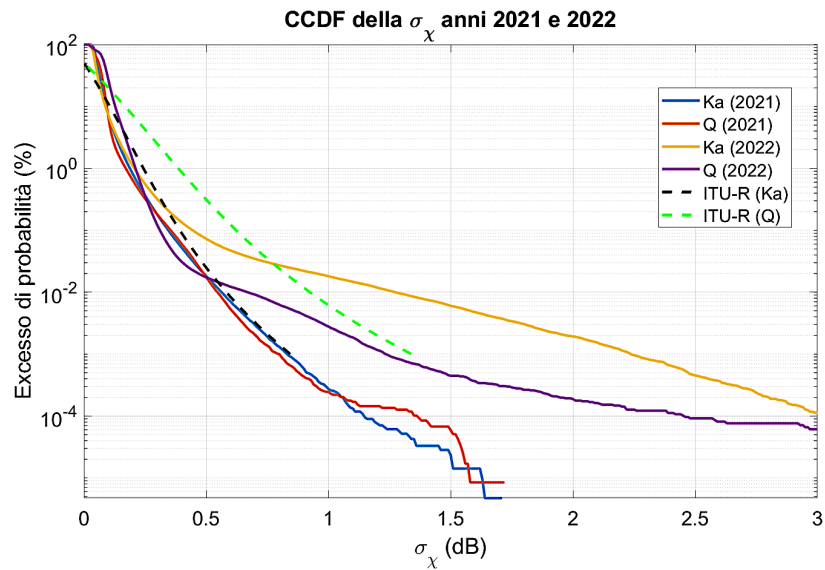


Figura 7 – Eccesso di probabilità della σ_χ stimata sulle misure sperimentali acquisite nel 2021 e 2022 relativa alle due bande esaminate: Ka e Q

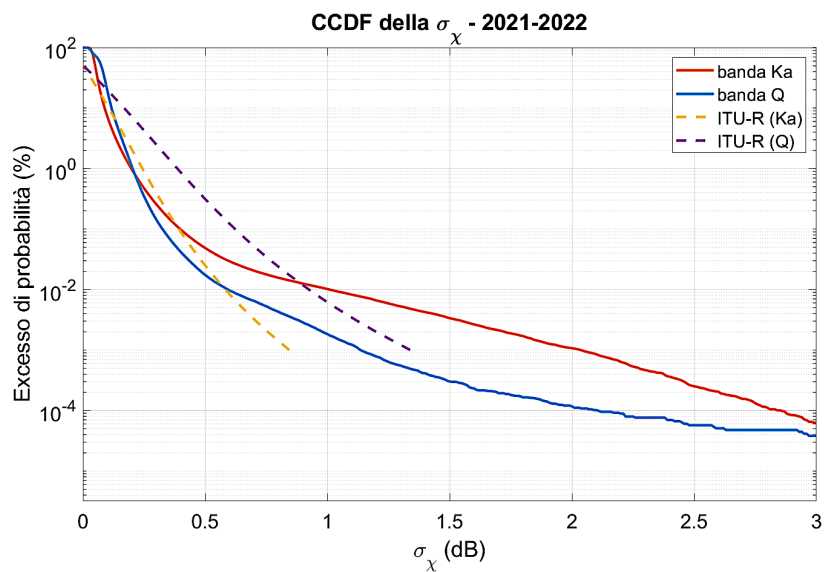


Figura 8 – Eccesso di probabilità della σ_χ stimata sulle misure sperimentali relativa all'intero insieme di dati acquisiti nel 2021 e 2022 relativa alle due bande esaminate: Ka e Q

L'intensità della scintillazione misurata in banda Ka nel 2021 segue da vicino il modello di predizione ITU-R. Nel 2022 la σ_x misurata ha un comportamento simile anche se limitato a bassi valori dell'intensità della scintillazione (fino a 0,35 dB), dopodiché tende a sovrastimare. La banda Q mostra una generale sottostima rispetto al modello ITU-R; tuttavia, si può notare come nel 2022, a partire da valori di intensità di 1,33 dB, la tendenza delle misure converge verso la stima del modello. Comportamento che si può osservare anche analizzando l'eccesso di probabilità della σ_x , in banda Q, relativa all'intero insieme di dati (figura 8).

5 – 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. Sono stati analizzati due anni di misurazioni del segnale emesso dal payload "TDP5" installato sul satellite geostazionario Alphasat. Per merito del sistema di tracciamento satellitare sono state ridotte notevolmente le oscillazioni indesiderate sui dati acquisiti che sono stati poi trattati per garantirne la qualità, con particolare attenzione alla separazione della scintillazione da altri effetti di degradazione. Gli eventi di scintillazione, che hanno interessato i segnali inviati dal satellite, sono stati estratti dai dati mediante un filtro passa-alto di Butterworth del 6° ordine con una frequenza di taglio di 0,025 Hz, identificata mediante analisi spettrale. La distribuzione statistica di tipo log-normale risulta la più idonea per rappresentare i valori della intensità di scintillazione, con un picco a circa 0,05 dB. Le variazioni diurne dell'intensità della scintillazione risultano essere più elevate durante i mesi estivi, con valori numerici simili a quelli riportati in letteratura [16], [21]. Le analisi delle osservazioni sperimentali in banda Q mostrano una generale sottostima rispetto al modello ITU-R mentre in banda Ka mostrano una sovrastima in corrispondenza dei valori più elevati dell'intensità di scintillazione, oltre i 0,5 dB. Attualmente le osservazioni sperimentali proseguono con l'auspicio di essere in grado di effettuare analisi statistiche più accurate. In particolare, nel confronto con le stime da modelli, oltre al modello ITU-R, saranno presi in considerazione le stime di altri modelli presenti in letteratura quali: Otung [22], van de Kamp [23] e Karasawa [24]. Infine, le osservazioni sperimentali già acquisite, e le successive,

si presteranno ad ulteriori studi sull'analisi degli eventi di scintillazione in troposfera in presenza di precipitazioni.

Ringraziamenti

Ringraziamo DGTCISI-ISCTI Ministero delle Imprese e del Made in Italy e Sapienza Università di Roma che hanno cofinanziato questo lavoro. Siamo grati alla Direttrice ed ai colleghi del DGTCISI-ISCTI Ministero delle Imprese e del Made in Italy 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 un anno fa, ideatore dell'attività sperimentale e delle metodologie di analisi oggetto del presente articolo.

Riferimenti bibliografici

- [1] B. Elbert, "Introduction to Satellite Communication," Artech House, 2008.
- [2] P. Timothy, W. C. Bostian, and J. E. Allnutt, "Satellite Communication," John Wiley and Sons, NJ, 2003
- [3] G. Maral and Bousquet M., "Satellite Communications Systems" 5th Ed., Wiley and Sons Ltd (Chichester, UK), 2009.
- [4] C. Riva, L. Luini, M. D'Amico, R. Nebuloni, A. Marziani, F. Consalvi, and F.S. Marzano, "The Alphasat Aldo Paraboni propagation experiment: Measurement campaign at the Italian ground stations", Int. J. of Satellite Communications and Networking, vol. 37 (5), pp. 423-436, 2019
- [5] G. Brussaard and Watson P.A., "Atmospheric modelling and millimetre wave propagation", Chapman and Hall, London (UK), 1995.
- [6] A. Paraboni, "Description of Alphasat TDP5 Propagation Experiment", Proceedings of the ESA Propagation Workshop ESA WPP 298, 2008.
- [7] V. Pek, V. Brazda, O. Fiser. "Description of Alphasat satellite space motion and its consequences for signal reception." Conference Radioelektronika, 2016.

- [8] A. Marziani, F. Consalvi, C. Chicarella, E. Restuccia, L. Amaduzzi, FS Marzano. "AlphaSat Ka-band and Q-band Receiving Station in Rome: Development, status and measurements". Proc. of the 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2015), 1–5, 12–17 2015, Lisbon, Portugal, 2015.
- [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. Schuster, "On the investigation of hidden periodicities with application to a supposed 26 Day period of meteorological phenomena," J. Geophys. Res., vol. 3, no. 1, pp. 13–41, 1898.
- [11] O. P. Banjo and E. Vilar, "Measurement and modeling of amplitude scintillations on low-elevation earth- space paths and impact on communication systems," IEEE Trans. Commun., vol. 34, no. 8, pp. 774–780, 1986.
- [12] 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.
- [13] M.M.J.L. Van De Kamp, J.K. Tervonen, E.T. Salonen, and J.P.V.P. Baptista, "Improved models for long-term prediction of tropospheric scintillation on slant paths," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 47, no. 2, pp. 249–260, 1999.
- [14] 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.
- [15] Herrera, J.T., Priore, M. and Mekonnen, D., Tropospheric Scintillation Signatures: Observations of the Possible Effect Thunderstorms have on GPS Signals, 2019.
- [16] Pinho, A., Mota, S. and Rocha, A., A Quick Overview of a New Scintillation Database, ICT Discoveries, vol. 2, no. 1, Nov. 2019.
- [17] 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.

- [18] ITU-R recommendation P.618-13. "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," Geneva, Switzerland, 2017.
- [19] 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.
- [20] ITU-R recommendation P.453-9. "The radio refractive index: its formula and refractivity data," Geneva, Switzerland, 2003.
- [21] J. K. Tervonen, M. M. J. L. van de Kamp and E. T. Salonen, "Prediction model for the diurnal behavior of the tropospheric scintillation variance," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 46, no. 9, pp. 1372-1378, Sept. 1998, doi: 10.1109/8.719982.
- [22] 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.
- [23] van de Kamp, M. M. J. L., "Asymmetric signal level distribution due to tropospheric scintillation," Electron. Lett., vol. 34, no. 11, pp. 1145, 1998.
- [24] Karasawa, Y., 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.