

**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria



**STATISTICHE DI SCINTILLAZIONE IN CIELO CHIARO PER  
L'ESPERIMENTO ITALSAT (1995)**

Relatore: Professore Carlo Giuseppe Riva

Tesi di Laurea di:

Sebastiano Rustico Matr. 805466

ANNO ACCADEMICO 2013-2014

# Indice

<b>Introduzione.....</b>	<b>8</b>
<b>Sommario.....</b>	<b>11</b>
<b>Capitolo 1. Missione ITALSAT.....</b>	<b>12</b>
1.1 Introduzione.....	12
1.2 Il progetto Italsat.....	12
1.3 L'antenna di terra di Spino d'Adda.....	17
<b>Capitolo 2. Fisica della propagazione.....</b>	<b>20</b>
2.1 Atmosfera.....	21
2.2 Fenomeni Atmosferici.....	22
2.2.1 Assorbimento atmosferico.....	22
2.2.2 Attenuazione da nuvole.....	24
2.2.3 Attenuazione da pioggia.....	25
2.2.4 Depolarizzazione da pioggia e da ghiaccio.....	29
2.3 Scintillazioni.....	30
2.3.1 Propagazione attraverso l'atmosfera turbolenta.....	30
2.3.2 Caratterizzazione teorica delle scintillazioni.....	31
2.3.3 Distribuzione statistica di $\chi$ e di $\sigma_\chi$ .....	35

**Capitolo 3. Elaborazione Dati.....36**

3.1 Dati.....36

3.2 Pulizia Dati e ricerca periodo cielo chiaro.....38

3.2.1 Fuori servizio.....38

3.2.2 Pioggia.....39

3.2.3 Spike.....41

3.2.4 Interpolazione.....41

3.2.5 Valori negativi ingiustificati.....42

3.3 Studio spettrale e ricerca della frequenza di taglio.....44

3.4 Filtraggio Passa-alto.....47

**Capitolo 4. Analisi Statistica.....51**

4.1 Deviazione standard mensile e stagionale.....51

4.2 Frequency Scaling.....62

4.3 Effetto dello scattering troposferico sulle scintillazioni.....62

4.4 Frequency scaling a Spino d'Adda con italsat experiment.....63

**Capitolo 5. Confronto con i modelli di predizione delle scintillazioni...65**

5.1 Metodi empirici: modelli ITU-R e Karasawa.....66

5.2 Metodi basati su modelli elettromagnetici: i modelli DPSP e MPSP.....68

5.3 Metodi basati su modelli elettromagnetici: i modelli STH2 e STN2.....69

5.4 Confronto dei risultati con i modelli esistenti.....71

**Conclusioni.....78**

**Bibliografia.....81**

## Indice Figure

<i>Figura 1: Antenna Stazione Spino d'Adda.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2: Suddivisione dell'atmosfera.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3: Attenuazione specifica a diverse frequenze .....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 4: Schema semplificato della propagazione atmosferica: z direzione di propagazione, <math>\vartheta</math> angolo di elevazione, T spessore strato turbolento, H altezza strato turbolento.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 5: Serie temporale con presenza di fuori servizio.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 6: Serie temporale con presenza di pioggia.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 7: Serie temporale con presenza di 'spike'.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8: Serie temporale con presenza di interpolazione .....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 9: Serie temporale filtrata passa-basso alla frequenza di 0.006 Hz con valore negativo.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 10: Densità spettrale singolo giorno alla frequenza portante di 40 GHz.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 11: Densità spettrale di potenza calcolata in Estate alla frequenza portante di 50 GHz.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 12: Serie temporale filtrata passa-basso alla frequenza di 0.02 Hz.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 13: Serie temporale filtrata passa-alto alla frequenza di 0.02 Hz.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 14: Distribuzione cumulativa mensile, da Gennaio a Giugno, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 20 GHz.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 15: Distribuzione cumulativa mensile, da Luglio a Dicembre, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 20 GHz.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 16: Distribuzione cumulativa stagionale delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 20 GHz.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 17: Distribuzione cumulativa mensile, da Gennaio a Giugno, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 40 GHz.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 18: Distribuzione cumulativa mensile, da Luglio a Dicembre, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 40 GHz.....</i>	<i>55</i>

*Figura 19: Distribuzione cumulativa stagionale delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 40 GHz.....56*

*Figura 20: Distribuzione cumulativa mensile, da Gennaio a Giugno, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 50 GHz.....57*

*Figura 21: Distribuzione cumulativa mensile, da Luglio a Dicembre, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 50 GHz.....57*

*Figura 22: Distribuzione cumulativa stagionale delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 50 GHz.....58*

*Figura 23: Distribuzione cumulativa annuale delle deviazioni standard delle scintillazioni per i tre beacon.....59*

# Indice Tabelle

Tabella 1: Standard di designazione IEEE della banda radio.....	9
Tabella 2: Riassunto dell'esperimento di propagazione Italsat.....	16
Tabella 3: Parametri fondamentali dei sistemi di ricezione di Spino d'Adda.....	18
Tabella 4: Valori utili per il calcolo dell'attenuazione da pioggia.....	27
Tabella 5: Frequenze di cut-off scelte per i tre beacon.....	47
Tabella 6: Percentuale dei dati dei primi sei mesi disponibili per l'analisi.....	49
Tabella 7: Medie e percentuale dei dati degli ultimi sei mesi disponibili per l'analisi.....	50
Tabella 8: Medie e percentuale dei dati delle quattro stagioni disponibili per l'analisi.....	50
Tabella 9: Intensità delle scintillazioni della distribuzione cumulativa annuale per i tre beacon.....	60
Tabella 10 : Medie mensili delle scintillazioni per i tre beacon.....	61
Tabella 11 : Medie stagionali delle scintillazioni per i tre beacon.....	61
Tabella 12: Rapporti di frequency scaling stagionali e annuale.....	64
Tabella 13: Coefficienti di regressione dei modelli studiati. Il termine 'coef-i' indica i coefficienti 'ai1, ai2,..., ei1, ei2' delle rispettive equazioni. Il simbolo 'x' indica l'assenza di tale coefficiente.....	71
Tabella 14: Temperatura, umidità e refrattività media dei mesi e dell'anno.....	72
Tabella 15: Deviazioni standard medie dei mesi e dell'anno dei modelli di predizione alla frequenza portante di 20 GHz.....	73
Tabella 16: Errori percentuali relativi al confronto con i modelli alla frequenza di 20 GHz..	73
Tabella 17: Deviazioni standard medie dei mesi e dell'anno dei modelli di predizione alla frequenza portante di 40 GHz.....	74
Tabella 18: Errori percentuali relativi al confronto con i modelli alla frequenza di 40 GHz..	74
Tabella 19: Deviazioni standard medie dei mesi e dell'anno dei modelli di predizione alla frequenza portante di 50 GHz.....	75
Tabella 20: Errori percentuali relativi al confronto con i modelli alla frequenza di 50 GHz..	75
Tabella 21 Esponente del frequency scaling.....	77

# INTRODUZIONE

L'aumento di richiesta di servizi di telecomunicazioni via satellite fissi e mobili in questi ultimi decenni, ha comportato la richiesta di un aumento della capacità di canale.

Per soddisfare la domanda crescente di banda per canale, e di numero di canali, è stato necessario ampliare lo spettro utilizzato per le telecomunicazioni facendo ricorso a frequenze sempre più elevate.

L'aumento delle frequenze ha inoltre il vantaggio di avere un minor ingombro d'antenna, a parità di guadagno, o un elevato guadagno, a parità di diametro.

Sono state scelte opportune configurazioni di sistema e metodi di codifica nella trasmissione del segnale per aumentare l'efficienza e quindi la capacità trasmissiva del canale radio.

La scelta delle frequenze in un sistema satellitare assume un ruolo fondamentale, poiché al di sotto di qualche GHz alcuni effetti propagativi possono essere trascurati. Per esempio, per frequenze inferiori ai 15 GHz, la pioggia è la maggior causa di alterazione di segnale in trasmissione, mentre per frequenze maggiori bisogna considerare anche gli effetti di assorbimento da gas, di attenuazione da nubi e delle scintillazioni.



Un enorme lavoro sperimentale è stato condotto per studiare e caratterizzare il canale trasmissivo in banda Ka e Q/V.

Le bande in uso sono Ku, Ka e Q/V, ovvero radio frequenze dai 10 ai 50 GHz. Per collegamenti terra-satellite le bande utilizzate sono 5.9-6.4 GHz, 12.25-13.25 GHz, 14-14.5 GHz e 27.5-30 GHz; per collegamenti satellite-terra invece sono 3.7-4.2 GHz, 10.7-11.7 GHz e 17.7-20.2 GHz.

**Tabella1: Standard di designazione IEEE della banda radio**

<b>Banda</b>	<b>Frequenze</b>
UHF	235-400 MHz
S-DAB	1.452-1.492 GHz
L	1.518-1.675 GHz
C	3.4-7.025 GHz
S	1.97-2.69 GHz
Ku	10.7-14.5 GHz
Ka	17.3-30 GHz

Questa tesi ha il fine di contribuire allo sviluppo e al miglioramento delle comunicazioni via satellite per quanto riguarda gli effetti della propagazione delle onde elettromagnetiche nell'atmosfera, punto

chiave per la progettazione dei collegamenti satellitari. A tal fine sono state studiate le scintillazioni ai tre diversi beacon dell'esperimento ITALSAT nei periodi di cielo chiaro dell'anno 1995 e successivamente sono stati confrontati i risultati ottenuti con i modelli di predizione delle scintillazioni esistenti in letteratura ottenendo in questo modo caratterizzazioni statistiche.

## Sommario

Nel primo capitolo si descrive la missione sperimentale Italsat che ha fornito i dati utili per l'analisi statistica svolta in questa tesi. Ci si è concentrati nella descrizione delle caratteristiche sia del satellite sia dell'antenna in ricezione, situata a Spino d'Adda.

Nel secondo capitolo vengono descritte le principali cause di attenuazione del segnale presenti in un collegamento radio terra-satellite; esse sono rappresentate da pioggia, attenuazione da gas, attenuazione da nuvole, depolarizzazione da pioggia e ghiaccio e da scintillazioni troposferiche.

Il terzo capitolo descrive la selezione dei dati utili per la nostra analisi finalizzata allo studio delle scintillazioni in cielo chiaro. Vengono quindi esclusi dalla banca dati i dati non validi : fuori servizio, attenuazione da pioggia, spike, interpolazione, valori negativi della serie temporale ricavata dal filtro passa-basso. Viene inoltre calcolata la frequenza di cut-off (per i tre beacon) utile per separare l'attenuazione da assorbimento da gas (filtraggio passa-basso) dalle scintillazioni (filtraggio passa-alto).

Nel quarto capitolo vengono calcolate le distribuzioni cumulative delle deviazioni standard delle scintillazioni su base mensile, stagionale, annuale. Questa analisi ha reso noto per quanto tempo, in percentuale rispetto al tempo di osservazione, le scintillazioni hanno presentato

ampiezze superiori alla soglia indicata. Infine attraverso la tecnica del frequency scaling si sono potuti calcolare i rapporti delle deviazioni standard allo stesso livello di probabilità per i tre beacon provenienti dal satellite Italsat.

Nel quinto capitolo sono stati descritti i principali metodi di predizioni delle deviazioni standard delle scintillazioni presenti in letteratura. Si sono confrontati i risultati, ottenuti con i metodi di predizione, con le deviazioni standard delle scintillazioni ottenute dalla nostra analisi.

# **1 Missione ITALSAT**

## **1.1 Introduzione**

In questo elaborato si analizzano i dati registrati nel 1995 dalla stazione sperimentale di Spino d'Adda nel collegamento con il satellite Italsat.

Nei paragrafi che seguono sono brevemente descritti i principali strumenti utilizzati e le loro caratteristiche tecniche.

## **1.2 Il satellite Italsat**

Il satellite Italsat è stato lanciato nello spazio il 16 gennaio del 1991 e posto in posizione orbitale geostazionaria di longitudine 13.2° est.

Le frequenze di lavoro del satellite erano: 18.7 GHz, 39.6 GHz e 49.5 GHz.

A 18.7 GHz la polarizzazione era verticale, a 39.6 GHz era circolare e modulata a  $\pm 505$  MHz, infine a 49.5 GHz la polarizzazione era verticale ed orizzontale (commutata a 933Hz). L'EIRP era di 20, 28, 25 dBW rispettivamente a 18.7, 39.6 e 49.5 GHz.

Sul territorio italiano vi erano tre stazioni in grado di effettuare tutte le misure ricevendo il segnale attraverso un'antenna parabolica di 3,5 metri di diametro. I tre siti erano Pomezia (Roma), Torino, Spino d'Adda (Milano).

Durante l'esperimento di propagazione con satellite Italsat, la cui durata prevista è di dieci anni, è possibile effettuare le seguenti misure:

- attenuazione del segnale ricevuto alle tre frequenze;
- scintillazioni di segnale;
- depolarizzazione alle tre frequenze;
- completa identificazione del canale a 50 GHz;
- misure di fase interbanda;
- distorsione di ampiezza e fase a 40 GHz su una banda di  $\pm 505$  MHz .

La stazione sperimentale di Spino d'Adda del Politecnico di Milano (latitudine 45.4°N, longitudine 9.5°E) è sita a 21.5 Km ad est di Milano.

L'ente di appartenenza della stazione Italsat è l'ASI, Agenzia Spaziale Italiana, mentre l'ente responsabile della progettazione e gestione è il Centro Studi Telecomunicazioni Spaziali – CNR.

Sul satellite sono presenti, come detto, tre beacon ognuno con una antenna di trasmissione. Il beacon a 18.7 GHz (comunemente chiamato a 20 GHz) consentiva la trasmissione a terra dei segnali di telemetria in banda SHF; la copertura del territorio, di tipo ellittico, si estendeva su tutta l'Italia peninsulare e sulle isole. L'antenna impiegata è quella del carico utile a copertura nazionale globale. Il beacon a 39.6 GHz

(comunemente chiamato a 40 GHz) consentiva di effettuare misure di attenuazione copolare, attenuazione e fase differenziale e purezza di polarizzazione allo scopo di determinare statistiche inerenti il comportamento del mezzo trasmissivo. Il beacon era, inoltre, modulato in fase da una sottoportante sinusoidale coerente di 505 MHz, consentendo il confronto in ampiezza e fase fra la portante e le prime righe laterali per studiare i fenomeni di dispersione del mezzo trasmissivo in una banda di 1 GHz. La portante, irradiata a terra con polarizzazione circolare RCH, ha permesso di studiare l'effetto della propagazione in atmosfera sulle due componenti lineari. La zona di copertura si estende per gran parte dell'Europa ed è stata ottenuta tramite un'antenna trasmittente avente un fascio di semiapertura di 1.5 gradi. Il beacon a 49.5 GHz (comunemente chiamato a 50 GHz) viene irradiato con polarizzazione lineare commutata fra orizzontale e verticale alla frequenza di 933 Hz con un valore intrinseco di polarizzazione incrociata molto basso: in tal modo sono possibili misure di attenuazione assoluta e di purezza di polarizzazione. La copertura del beacon a 50 GHz è la stessa di quella del beacon a 40 GHz.

Di seguito è presente una tabella riassuntiva dell'esperimento di propagazione Italsat:

**Tabella 2: Riassunto dell'esperimento di propagazione Italsat**

Posizione orbitale:	Geostazionaria a 13.2° Est
Frequenze:	18.7, 39.6 e 49.5 GHz
Polarizzazioni:	Verticale per il 20 GHz, circolare per il 40 GHz (modulata a $\pm 505$ MHz), verticale ed orizzontale (commutata a 933 Hz) per il 50 GHz.
EIRP:	20 dBW a 20 GHz 28 dBW a 40 GHz 25 dBW a 50 GHz
Data del lancio:	16 Gennaio 1991
Durata dell'esperimento:	7 anni
Misure effettuate:	Attenuazione segnale ricevuto alle 3 freq. Completa identificazione del canale a 50 GHz. Scintillazione del segnale. Misure di fase interbanda. Distorsione di ampiezza e fase a 40 GHz su una banda di $\pm 505$ MHz.
Misure contestuali:	Temperatura di rumore, radar meteo, intensità piovosa.
Stazioni riceventi in Italia:	Spino d'Adda, Torino, Pomezia.
Ente di appartenenza:	Agenzia Spaziale Italiana (ASI).
Ente responsabile della progettazione e gestione:	Centro Studi Telecomunicazioni Spaziali-CNR
Partecipazione di sperimentatori stranieri:	ESA, ASI, Inghilterra, Olanda, Austria, Germania, Spagna.



### **1.3 L'antenna di terra di Spino d'Adda**

La stazione di terra Italsat di Spino d'Adda (lat.: 45.4° N; 9.5° E; alt.: 84 m s.l.m.) riceve i tre beacon a 20, 40 e 50 GHz ad una elevazione di 37.7°. La geometria scelta per l'antenna di Spino d'Adda è di tipo Cassegrain Offset a tre riflettori, con quello principale del diametro di 3.5 metri (figura 1). L'antenna ha efficienza  $\eta$  pari a 0.64.

I vantaggi offerti da tale configurazione includono:

- un diagramma di radiazione con bassi lobi laterali, grazie alla combinazione di tipo Offset;
- elevata efficienza, ottenuta sagomando opportunamente i due sub-riflettori ed utilizzando un paraboloide di rivoluzione come superficie geometrica per il riflettore principale;
- ottimizzazione della posizione degli apparati di trasmissione e ricezione per ridurre le perdite di trasmissione.

L'antenna è dotata di un sistema di puntamento automatico e di un dispositivo che evita il deposito eccessivo di acqua, l'accumulo di neve e la formazione di ghiaccio. I dati elaborati dei beacon e i segnali dei sensori meteorologici della stazione ricevente vengono trasmessi al sotto-sistema di acquisizione dati che effettua la registrazione, la calibrazione e la correzione degli errori, per rendere i dati disponibili alle successive fasi di analisi.

L'antenna per gli esperimenti di propagazione di nostro interesse opera in doppia polarizzazione lineare nelle bande a 20 e 50 GHz, mentre in doppia polarizzazione circolare nella banda a 40 GHz.

Di seguito si riporta la tabella 3 riassuntiva delle caratteristiche principali della stazione ricevente di Spino d'Adda.

**Tabella 3: Parametri fondamentali dei sistemi di ricezione di Spino d'Adda**

Frequenza dei beacon [GHz]	18.7	39.6	49.5
Polarizzazione	V	Circolare	V/O
Guadagno d'antenna [dB]	54.7	60.9	61.9
Semi apertura fascio antenna (gradi °)	0.30	0.14	0.11
Rapporto G/T del sistema [dB/K] (temperatura di rumore di antenna: 290 K)	25	30.4	28.6
Rapporto C/No nominale disponibile [dB/Hz]	60.2	60.6	58.1
Figura di rumore totale ricevitore [dB]	5.1	5.8	8.5
Frequenza di campionamento:	1 e 50 Hz		



*Figura 1: Antenna Stazione Spino d'Adda*

## 2. FISICA DELLA PROPAGAZIONE

In questo capitolo verranno presentati i principali effetti di disturbo in un collegamento radio via satellite in banda Ka: attenuazione dovuta alla pioggia, attenuazione dovuta a gas e nubi, scintillazioni e depolarizzazione da pioggia e ghiaccio.

Al di sotto dei 15 GHz il disturbo è dovuto principalmente dalla pioggia, invece l'attenuazione da gas, da nuvole, la depolarizzazione e le scintillazioni danno attenuazioni più trascurabili.

Le irregolarità di temperatura, umidità e pressione causano variazioni dell'indice di rifrazione che determinano il fenomeno delle scintillazioni.

Le scintillazioni modificano il segnale sia in ampiezza che in fase, e le variazioni hanno componenti spettrali al massimo dell'ordine di pochi Hz. Questo fenomeno, oltre a dipendere dalle condizioni di turbolenza atmosferica, dipende anche dall'angolo di elevazione dell'antenna in ricezione, dal suo diametro e ovviamente dalla frequenza in uso.

La sperimentazione del fenomeno delle scintillazioni, tramite l'utilizzo dei satelliti Olympus e Italsat, ha evidenziato l'entità dell'influenza dei fenomeni atmosferici sui collegamenti radio terra-satellite.

## 2.1 Atmosfera

L'atmosfera rappresenta l'insieme dei gas che circondano un corpo celeste, le cui molecole sono trattenute dalla forza di gravità del corpo stesso. L'atmosfera terrestre è divisa in diversi strati a seconda della quota (figura 2). La troposfera è la fascia aeriforme dell'atmosfera che inizia a diretto contatto con la superficie terrestre fino ad una quota che dipende dalla latitudine (fino a circa 8 km ai poli e fino a circa 20 km all'equatore). All'interno della troposfera si verificano i principali fenomeni che causano degradazione del segnale ovvero:

- Assorbimento da gas;
- Attenuazione da nuvole;
- Attenuazione da pioggia;
- Depolarizzazioni da pioggia e ghiaccio;
- Scintillazioni troposferiche.

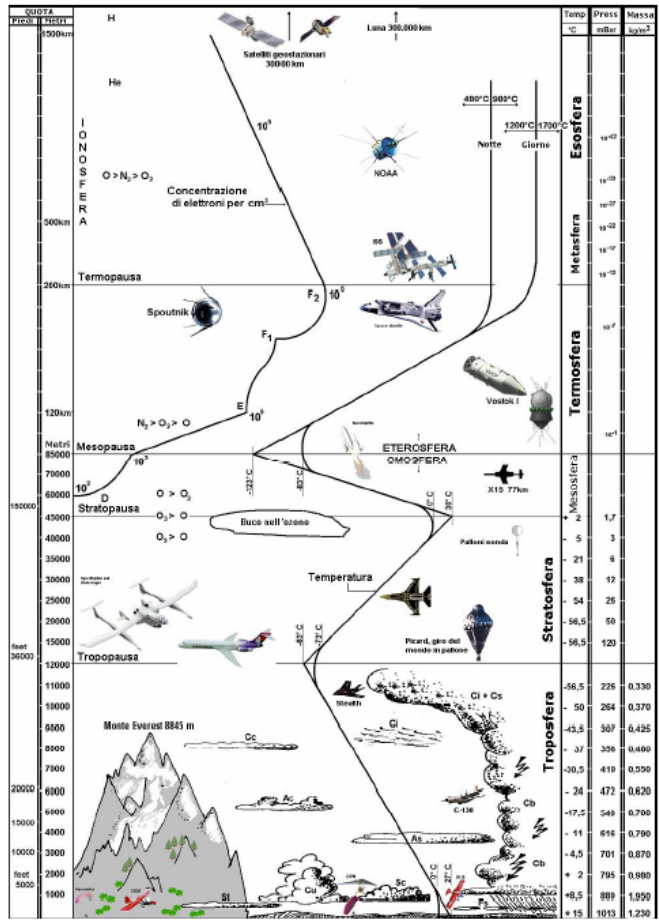


Figura 2: Suddivisione dell'atmosfera

## 2.2 Fenomeni Atmosferici

### 2.2.1 Assorbimento atmosferico

A causa dell'interazione delle onde radio con le molecole dell'atmosfera una parte dell'energia del segnale viene assorbita risultando in una attenuazione del segnale stesso. Le principali molecole che causano

questo effetto (alle frequenze di interesse per le telecomunicazioni satellitari) sono l'ossigeno e il vapore acqueo. Un'onda radio, attraversando l'atmosfera, è soggetta ad una riduzione della sua ampiezza che dipende dalla frequenza di trasmissione, dalla temperatura e dalla pressione, oltre che dalla concentrazione del vapore acqueo. Il momento magnetico permanente della molecola dell'ossigeno interagisce con il campo magnetico dell'onda radio, mentre il dipolo elettrico della molecola del vapore acqueo interagisce con il campo elettrico dell'onda.

Le prime tre bande di assorbimento sono centrate alle frequenze di 22.2 GHz ( $H_2O$ ), 60 GHz ( $O_2$ ), e 118.8 GHz ( $H_2O$ ) (figura 2.2).

La figura seguente mostra i picchi di assorbimento del segnale nel caso di atmosfera standard, ovvero pressione di 1 atm, temperatura di 20°C e densità di vapore acqueo di 7,5 g/m<sup>3</sup>.

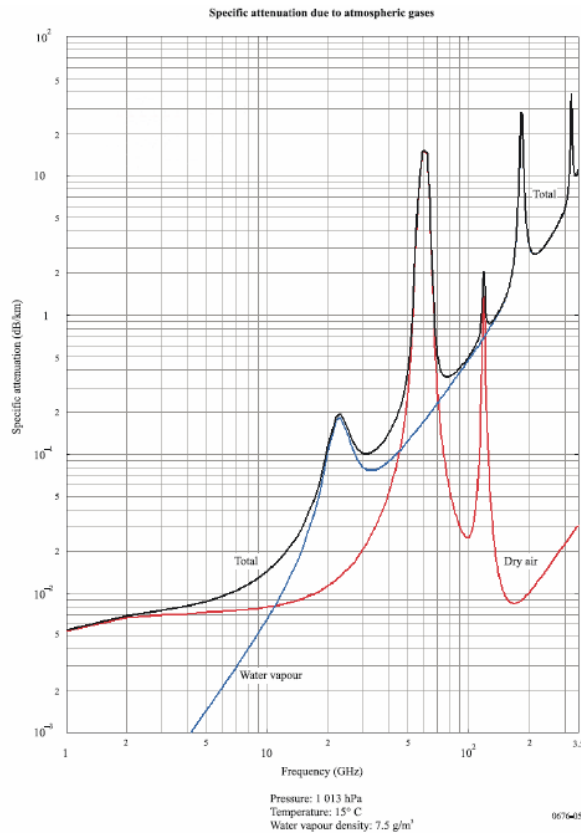


Figura 3: Attenuazione specifica a diverse frequenze

### 2.2.2 Attenuazione da nuvole

Le nuvole sono composte da gocce d'acqua di piccole dimensioni e sono un fattore determinante per l'attenuazione del segnale. Tuttavia essendo le nuvole di tipi diversi, possono essere presenti a diverse quote contemporaneamente e con diversa probabilità di occorrenza risulta essere complicato modellarne l'attenuazione. A tal fine diversi modelli statistici sono stati sviluppati per questo motivo.



### 2.2.3 Attenuazione da pioggia

L'attenuazione da idrometeorite risulta essere il fattore dominante per frequenze superiori a 10 GHz con attenuazioni anche dell'ordine di decine di dB (tra i 20 dB e i 40 dB) per piccoli periodi di tempo. Come per l'attenuazione da nuvole, è molto complicato determinare esattamente queste attenuazioni a causa della casualità delle dimensioni, della distribuzione, della temperatura e del numero delle gocce di pioggia. Per questo motivo si fa uso di modelli statistici per calcolare l'attenuazione prevista a seconda della zona di interesse. Il metodo qui descritto è quello proposto dall'ITU-R (International Telecommunications Union, Appendice A). Attraverso l'utilizzo di mappe, che forniscono l'intensità della pioggia rispetto ad una certa percentuale di tempo e di tabelle prestabilite contenenti costanti a seconda della frequenza e della polarizzazione, è possibile calcolare l'attenuazione lungo la tratta di collegamento Terra-Satellite interessata da pioggia.

L'attenuazione  $A$  risulta quindi essere:

$$A = \gamma_R L$$

$$\gamma_R = kR^\alpha$$

Dove  $\gamma_R$  è il coefficiente di attenuazione specifica,  $R$  è la misura dell'intensità della pioggia in un istante (mm/h),  $k$  e  $\alpha$  sono coefficienti

dipendenti dalla frequenza, in un range da 1 a 1000 GHz, e ricavabili dalle seguenti formule:

$$k = [k_H + k_V + (k_H - k_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2$$

$$\alpha = [k_H \alpha_H + k_V \alpha_V + (k_H \alpha_H - k_V \alpha_V) \cos^2 \theta \cos 2 \tau] / 2k$$

I valori  $k_H$ ,  $k_V$ ,  $\alpha_H$  e  $\alpha_V$  sono estrapolati dalla tabella 4

Il problema maggiore risulta essere il calcolo della lunghezza di tratta  $L$  poiché, non essendo uniforme l'intensità di pioggia lungo  $L$ , il coefficiente di attenuazione varierà lungo essa. Per questo viene introdotto un parametro detto lunghezza efficace  $L_{\text{eff}}$  che tiene in considerazione l'altezza della stazione di Terra, la quota delle nuvole da cui scaturisce la pioggia, l'elevazione del collegamento col satellite e la disomogenità dell'attenuazione lungo la tratta.

**Tabella 4: Valori utili per il calcolo dell'attenuazione da pioggia**

<b>Frequency (GHz)</b>	$k_H$	$\alpha_H$	$k_V$	$\alpha_V$
1	0.0000259	0.9691	0.0000308	0.8592
...	...	...	...	...
17	0.06146	1.0949	0.06797	1.0137
18	0.07078	1.0818	0.07708	1.0025
19	0.08084	1.0691	0.08642	0.9930
20	0.09164	1.0568	0.09611	0.9847
21	0.1032	1.0447	0.1063	0.9771
22	0.1155	1.0329	0.1170	0.9700
23	0.1286	1.0214	0.1284	0.9630
24	0.1425	1.0101	0.1404	0.9561
25	0.1571	0.9991	0.1533	0.9491
26	0.1724	0.9884	0.1669	0.9421
27	0.1884	0.9780	0.1813	0.9349
28	0.2051	0.9679	0.1964	0.9277
29	0.2224	0.9580	0.2124	0.9203
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129
31	0.2588	0.9392	0.2465	0.9055
32	0.2778	0.9302	0.2646	0.8981
33	0.2972	0.9214	0.2833	0.8907
34	0.3171	0.9129	0.3026	0.8834
35	0.3374	0.9047	0.3224	0.8761

Frequency (GHz)	$k_H$	$\alpha_H$	$k_V$	$\alpha_V$
36	0.3580	0.8967	0.3427	0.8690
37	0.3789	0.8890	0.3633	0.8621
38	0.4001	0.8816	0.3844	0.8552
39	0.4215	0.8743	0.4058	0.8486
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421
41	0.4647	0.8605	0.4492	0.8357
42	0.4865	0.8539	0.4712	0.8296
43	0.5084	0.8476	0.4932	0.8236
44	0.5302	0.8414	0.5153	0.8179
45	0.5521	0.8355	0.5375	0.8123
46	0.5738	0.8297	0.5596	0.8069
47	0.5956	0.8241	0.5817	0.8017
48	0.6172	0.8187	0.6037	0.7967
49	0.6386	0.8134	0.6255	0.7918
50	0.6600	0.8084	0.6472	0.7871
...	...	...	...	...
1 000	1.3795	0.6396	1.3822	0.6365

#### 2.2.4 Depolarizzazione da pioggia e da ghiaccio

Ulteriore causa di attenuazione in un collegamento radio terra-satellite è il fenomeno della attenuazione da depolarizzazione da pioggia e da ghiaccio. Tale fenomeno viene causato dalla non sfericità delle idrometeore ( forma di sferoide oblato) dovuto alla caduta libera durante il fenomeno precipitativo. Le gocce d'acqua infatti cadendo vengono schiacciate sull'asse verticale e vengono deformate. Questa deformazione provoca il passaggio di una parte di energia elettromagnetica, associata all'onda incidente con una certa polarizzazione all'onda, con polarizzazione incrociata ( fenomeno di entità modesta nel caso di passaggio con singola polarizzazione). Se l'onda trasporta informazione in entrambe le polarizzazioni, la potenza trasferita da una polarizzazione all'altra risulta a tutti gli effetti un segnale di interferenza.

## 2.3 Le scintillazioni

### 2.3.1 La propagazione attraverso l'atmosfera turbolenta

Le scintillazioni sono un fenomeno atmosferico che causa rapide fluttuazioni dell'ampiezza e della fase dei segnali ricevuti. Il fenomeno è principalmente dovuto a irregolarità su piccola scala dell'indice di rifrazione nell'atmosfera durante il passaggio dell'onda. La troposfera raramente è in stato di quiete, il Sole, infatti, scaldando la superficie terrestre, genera un'attività convettiva che produce un mix turbolento delle masse d'aria a diversa temperatura che ha come effetto le fluttuazioni relativamente rapide del segnale, ovvero le scintillazioni. Le turbolenze sono quindi causate dal vento e dal mescolamento di masse d'arie dotate di diverse temperature o umidità che comporta una rapida variazioni temporale e spaziale dell'indice di rifrazione. Un vortice turbolento può avere dimensioni che variano circa da 1 mm a 100m.

Si può assumere che l'atmosfera sia isotropica e omogenea e trasli senza variare [Tatarskii].

La turbolenza è caratterizzata dal parametro di struttura dell'indice di rifrazione  $C_n^2$  [ $m^{-2/3}$ ] che misura l'intensità delle fluttuazioni dell'indice di rifrazione.

Per quanto riguarda l'andamento di  $C_n^2$  con l'altitudine, Tatarskii ha proposto il seguente profilo in funzione dell'altezza 'h':

$$C_n^2(h) = C_{n,0}^2 \cdot \exp\left(-\frac{h}{h_0}\right)$$

dove  $C_{n,0}^2$  e  $h_0$  sono valori di riferimento prestabiliti.

Le scintillazioni così descritte vengono dette scintillazioni troposferiche perché la turbolenza è contenuta nei primi quattro chilometri dalla crosta terrestre. Le scintillazioni troposferiche sono tanto maggiori quanto maggiore è la frequenza e quanto minore è l'angolo di elevazione del collegamento Terra-Satellite. In generale per angoli di elevazione inferiori a  $10^\circ$  le scintillazioni possono limitare le prestazioni dei collegamenti.

Le scintillazioni ionosferiche invece sono così chiamate perché interessano una regione dell'atmosfera ad una quota più elevata delle precedenti, la ionosfera. Queste fluttuazioni sono generate dal rapido cambiamento del numero totale di elettroni che crea delle irregolarità nella ionosfera. Tuttavia queste scintillazioni hanno effetti trascurabili per frequenze superiori ai 10 GHz come nel caso della banda Ka.

### 2.3.2 Caratterizzazione teorica delle scintillazioni

Le principali grandezze che possono caratterizzare le scintillazioni sono:

- log-ampiezza  $\chi$ , espressa in dB, (rappresenta la frazione tra la grandezza istantanea del segnale misurato rispetto alla sua media espressa in dB);
- la varianza di scintillazione  $\sigma_\chi^2$  (in dB) (la varianza della log-ampiezza  $\chi$ ).

La teoria della propagazione di onde elettromagnetiche in un mezzo turbolento nasce dal metodo delle perturbazioni omogenee e deboli, sviluppato da Tatarskii all'inizio degli anni '60.

E' possibile estendere la teoria di Tatarskii anche alla regione delle microonde ricordando che le scintillazioni osservate su una tratta terra-satellite nella gamma delle onde millimetriche e centimetriche sono dovute a vortici turbolenti e a nuvole. Pertanto è molto più adeguato, come sorgente di scintillazione, considerare uno strato stretto situato ad una data altitudine (similmente alle formazioni nuvolose in assenza di pioggia).

Il modello sarà quindi una successione di strati, di cui uno turbolento.

Dato uno strato "sottile", situato tra le ascisse  $z_1$  e  $z_2$  (misurate lungo la direzione di propagazione, vedi figura 4), si ha che la varianza di

$$\begin{aligned}\sigma_{\chi}^2 &= 42.25 \cdot k^{7/6} \cdot \int_{z_2}^{z_1} C_n^2(\rho) \cdot \rho^{5/6} d\rho = \\ &= 23.0 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot (z_2^{11/6} - z_1^{11/6})\end{aligned}$$

scintillazione è data dalla seguente espressione in  $\text{dB}^2$ :

essendo  $C_n^2$  il valore medio del parametro di struttura dentro lo strato turbolento e  $k$  il numero d'onda ( $2\pi / \lambda$ ).

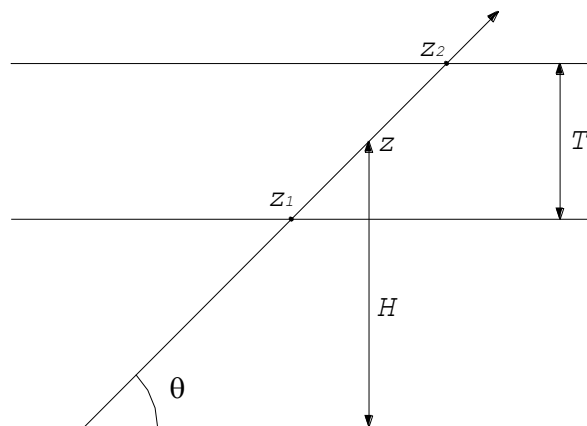


Se lo strato è molto sottile ( $T \ll z_2$  e  $z_1 \approx z_2$ ) è possibile operare la seguente semplificazione ( $z_2^{11/6} - z_1^{11/6}$ )  $\approx 11/6 \cdot z^{5/6} \cdot T$ , dove  $z = (z_1 + z_2) / 2$ ; la formula si riduce quindi a:

$$\sigma_{\chi}^2 = 42.5 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot T \cdot z^{5/6}$$

dove  $z$  è legata all'altezza  $H$  dello strato turbolento da:  $z = H / \sin(\theta)$ .

Da quanto detto precedentemente, è noto che la varianza delle scintillazioni indotte dalla presenza di nuvole, calcolata in  $\text{dB}^2$ , dipende dalla frequenza secondo un fattore esponenziale pari a  $7/6$ .



*Figura 4: Schema semplificato della propagazione atmosferica:  $z$  direzione di propagazione,  $\theta$  angolo di elevazione,  $T$  spessore strato turbolento,  $H$  altezza strato turbolento.*

Come già detto nei paragrafi precedenti, il valore della scintillazione non dipende solo dalla frequenza e dallo spessore dello strato turbolento ma

anche dall'angolo di elevazione dell'antenna e dall'apertura numerica dell'antenna stessa.

Infatti, diminuendo o aumentando l'angolo di elevazione, sia il percorso tra l'antenna ricevente e la zona di turbolenza che lo spessore di quest'ultima dipendono dall'inverso di  $\sin(\theta)$ . Di conseguenza anche il valore della varianza cambia perché dipende da  $\sin(\theta)^{-11/6}$ .

L'antenna, nel caso non sia puntiforme, introduce un effetto integratore che sembra "appiattire" il segnale ("smoothing effect").

Poiché tale effetto è una media spaziale sull'intera apertura dell'antenna, sembra logico che all'aumentare delle dimensioni di questa si riduca l'intensità della scintillazione misurata e sia più marcato l'effetto di tipo passa-basso sullo spettro.

### 2.3.3 Distribuzione statistica di $\chi$ e di $\sigma_\chi$

Esiste una correlazione statistica tra scintillazioni e temperatura / umidità. Infatti, in estate e nelle ore più calde del giorno (h.12-16), si registra una crescente intensità delle scintillazioni. A seconda del periodo si ha:

- per pochi minuti di stazionarietà la distribuzione della log-ampiezza  $\chi$  si può approssimare graficamente come una gaussiana a media nulla con varianza  $\sigma_\chi^2$ .

- per un periodo più lungo la distribuzione si allarga e la funzione di densità di probabilità può essere raffigurata come una gaussiana la cui deviazione standard, o intensità,  $\sigma_\chi$  può essere assimilabile alla funzione Gamma nel caso di lente variazioni di  $C_n^2$  [Karasawa e ITU-R].

Il parametro  $\sigma_\chi$  viene utilizzato per caratterizzare l'intensità delle scintillazioni.

## **3.Elaborazione dati**

In questo capitolo verranno mostrati i passaggi che hanno portato alla selezione dei periodi di cielo chiaro, condizione necessaria per un corretto studio del fenomeno delle scintillazioni. Per fare ciò è stato fondamentale escludere dall'analisi i dati ottenuti in condizioni non di cielo chiaro così da poter separare, attraverso un'analisi spettrale, i dati effettivi delle scintillazioni da quelli dovuti all'assorbimento atmosferico da gas.

### **3.1 Dati**

I dati esaminati in questa tesi, ovvero quelli registrati nel 1995 nella stazione di Spino d'Adda dal satellite Italsat, sono contenuti in 365 file, ognuno con estensione 'dayb' e contenenti i dati relativi all'attenuazione totale (gas, pioggia, nubi e scintillazioni) dei segnali provenienti dai tre radiofari durante un'intera giornata di osservazione. Il formato del nome del file segue la convenzione 'CPaammgg' cioè CP + anno + mese + giorno (es.: CP950112).

L'attenuazione è stata rilevata ad intervalli di tempo pari a un secondo, per cui la frequenza di campionamento risulta uguale a 1 Hz; ne consegue, per il teorema di Nyquist, che i dati a disposizione consentono di eseguire l'analisi spettrale fino alla frequenza di 0.5 Hz.

I dati in ricezione sono stati precedentemente elaborati prima di essere resi disponibili, così da distinguere campioni validi e campioni non validi. I primi rappresentano l'attenuazione atmosferica del segnale da sommare all'attenuazione di spazio libero dovuta alla distanza tra antenna in trasmissione e antenna in ricezione:

$$P_{rx} = EIRP - A_{sl} - A_{atm} + G_{rx}$$

Dove:

- $EIRP$  : somma tra la Potenza in uscita e il Guadagno dell'antenna in trasmissione (dB);
- $A_{sl}$  : attenuazione in spazio libero (dB);
- $A_{atm}$  : attenuazione supplementare che l'onda subisce quando attraversa l'atmosfera (dB);
- $G_{rx}$  : guadagno dell'antenna in ricezione (dB);
- $P_{rx}$  : potenza in ricezione rivelata dall'antenna ricevente (dB).

I campioni non validi sono quei valori ottenuti durante i momenti di malfunzionamento degli apparati in ricezione. Ad ogni singolo dato in ricezione relativo ai campioni non validi, è stato assegnato un valore convenzionale fuori scala (-320) per tutto l'intervallo di tempo in cui l'apparato viene considerato 'fuori servizio'.

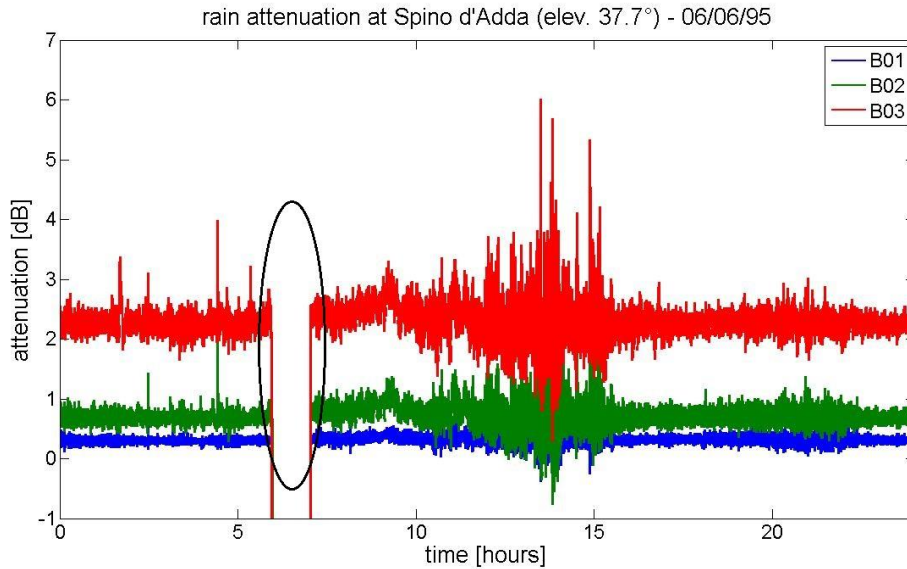
### **3.2 Pulizia dati e ricerca periodi cielo chiaro**

Per avere una banca dati contenente solo valori di cielo chiaro, bisogna identificare ed escludere i valori relativi ai disturbi quali:

1. Campioni non validi causati dal fuori servizio degli apparati in ricezione;
2. Attenuazione da pioggia,
3. Spike;
4. Interpolazione;
5. Valori negativi della serie temporale ricavata dal filtro passa-basso.

#### **3.2.1 Fuori servizio**

Un caso di serie temporale di fuori servizio è illustrato nella figura 5. Come si può notare, la zona cerchiata raffigura la zona di fuori servizio per i tre beacon tra le 6.00 e le 7.00 del giorno 6 Giugno 1995.

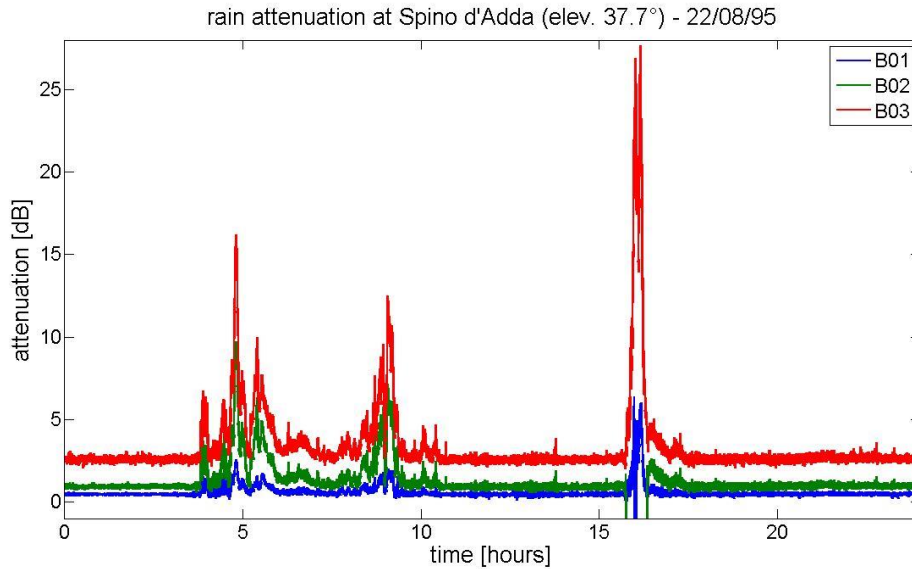


*Figura 5: Serie temporale con presenza di fuori servizio*

### 3.2.2 Pioggia

La presenza di pioggia provoca un aumento notevole dell'attenuazione media, con variazioni lente (al contrario delle oscillazione rapide e minime delle scintillazioni).

Riconosciamo l'attenuazione dovuta alla pioggia nella figura seguente:



*Figura 6: Serie temporale con presenza di pioggia*

Come si può notare troviamo dei picchi di attenuazione alle 5.00, alle 10.00 e alle 16.00, con attenuazione di 15, 13, 25 dB rispettivamente, dato nettamente superiore alla media.

Questo fenomeno è dovuto alla propagazione delle onde elettromagnetiche quando attraversano idrometeore.

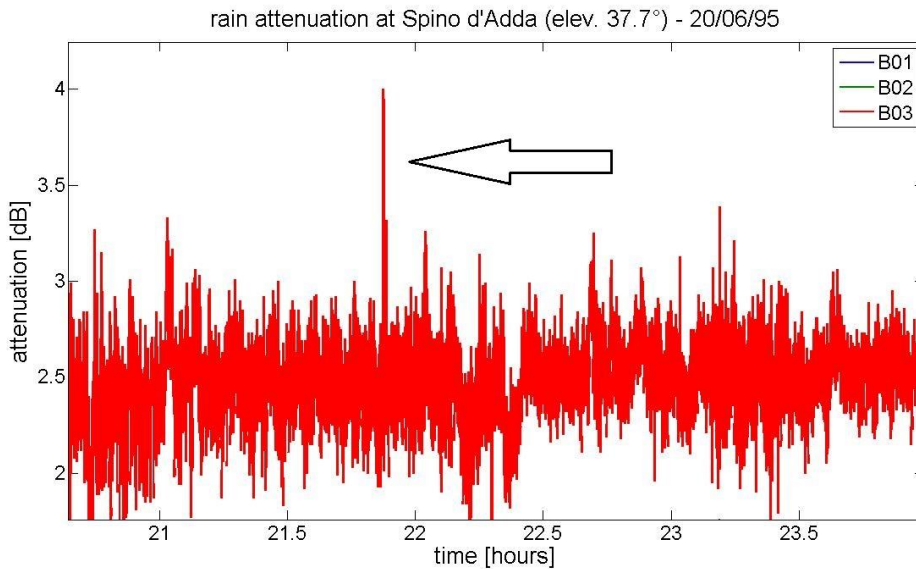
In questo studio, per utilizzare solo condizioni di cielo chiaro, vengono imposti i seguenti limiti massimi sulle intensità delle attenuazioni:

- 1.5 dB alla frequenza di 20 GHz;
- 3.5 dB alla frequenza di 40 GHz;
- 10 dB alla frequenza di 50 GHz.



### 3.2.3 Spike

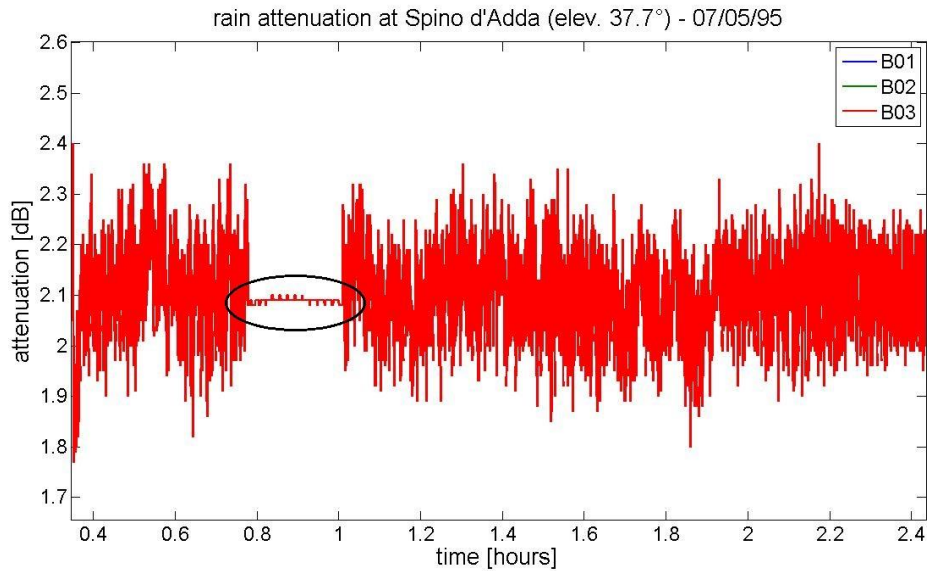
Alcune serie temporali presentano forti discontinuità o 'spike'. È stata condotta un'analisi visiva di tutte le serie temporali al fine di eliminare questi campioni dall'analisi.



*Figura 7: Serie temporale con presenza di 'spike'*

### 3.2.4 Interpolazione

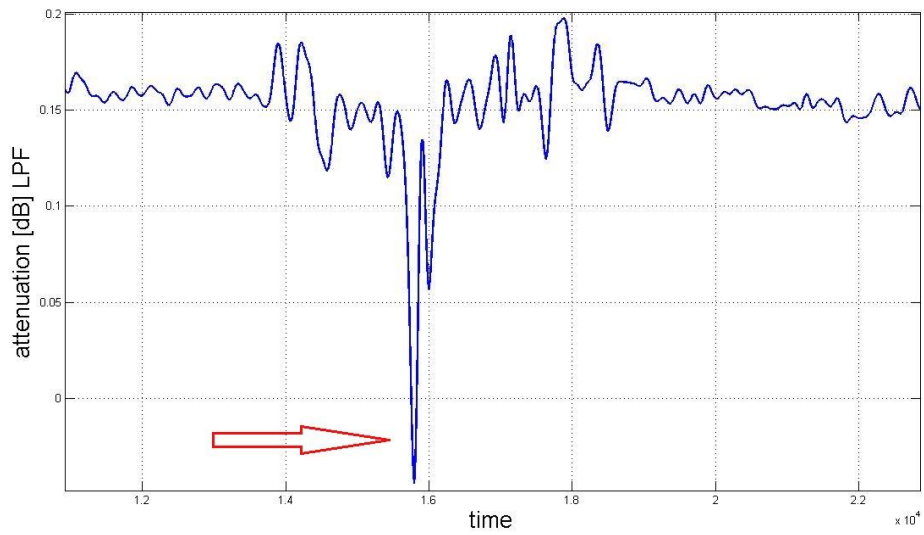
Alcune serie temporali presentavano un'anomalia di continuità, per correggere tale discontinuità ogni singolo gap è stato interpolato linearmente (figura 8). Questi valori non vengono considerati perché non presentano scintillazioni.



*Figura 8: Serie temporale con presenza di interpolazione*

### 3.2.5 Valori negativi ingiustificati

Nelle serie temporali in ricezione si possono trovare valori negativi legati sia alle scintillazioni che ad altri effetti. L'uso di un filtro passa-basso permette di calcolare gli effetti di attenuazione del segnale, l'ulteriore presenza di campioni negativi nel segnale filtrato non è giustificata da un punto di vista fisico (figura 9) ; si sceglie perciò di escluderli dallo studio:



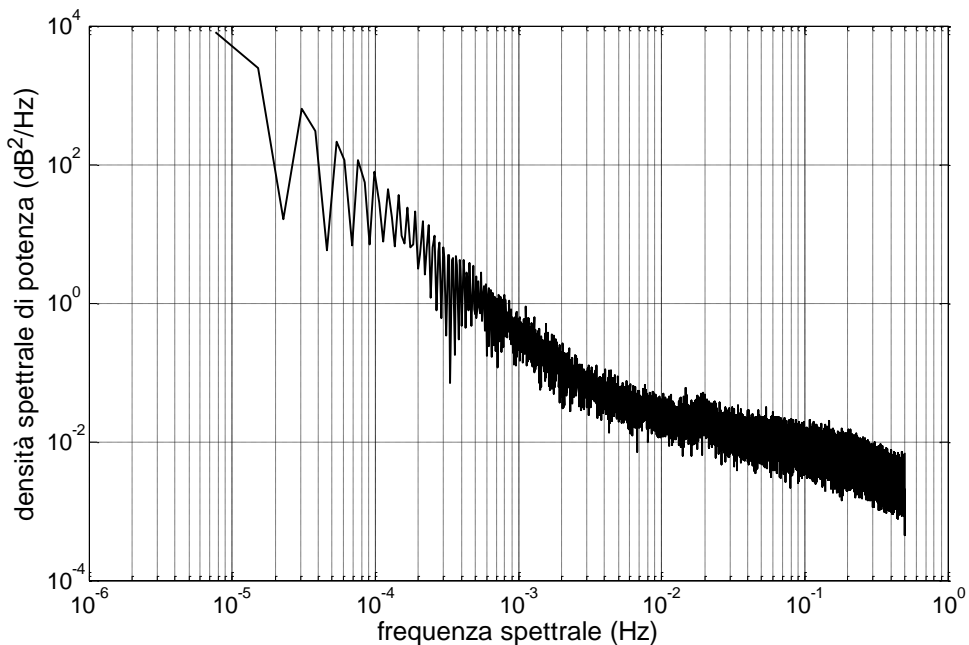
*Figura 9: Serie temporale filtrata passa-basso alla frequenza di 0.006 Hz con valore negativo*

A tutti questi disturbi viene assegnato il valore NaN (not a number), utile per svolgere l'analisi.

### 3.3 Studio spettrale e ricerca della frequenza di taglio.

Per uno studio delle scintillazioni bisogna considerare solo i giorni di cielo chiaro, ovvero giorni in cui non piove, e successivamente riuscire a separare gli effetti dovuti all'assorbimento dei gas dalle scintillazioni. I due effetti non possono essere distinti nel tempo perché nel nostro segnale in ricezione le due attenuazioni risultano essere sempre sovrapposte tra loro.

La separazione dei due effetti è possibile attraverso lo studio delle loro caratteristiche spettrali. Lo spettro ottenuto (figura 10) mostra una densità di potenza maggiore in intensità e una pendenza di  $-80/3$  [dB/dec] a basse frequenze dovuto all'assorbimento da gas, nel caso di presenza di pioggia si ha una pendenza di  $-20/3$  [dB/dec], ad alte frequenze invece lo spettro risulta essere piatto fino ad una frequenza  $f_0$  e successivamente decresce in intensità con una pendenza di  $-80/3$  [dB/dec]. La parte ad alta frequenza identifica l'effetto sul segnale dovuto alle scintillazioni.

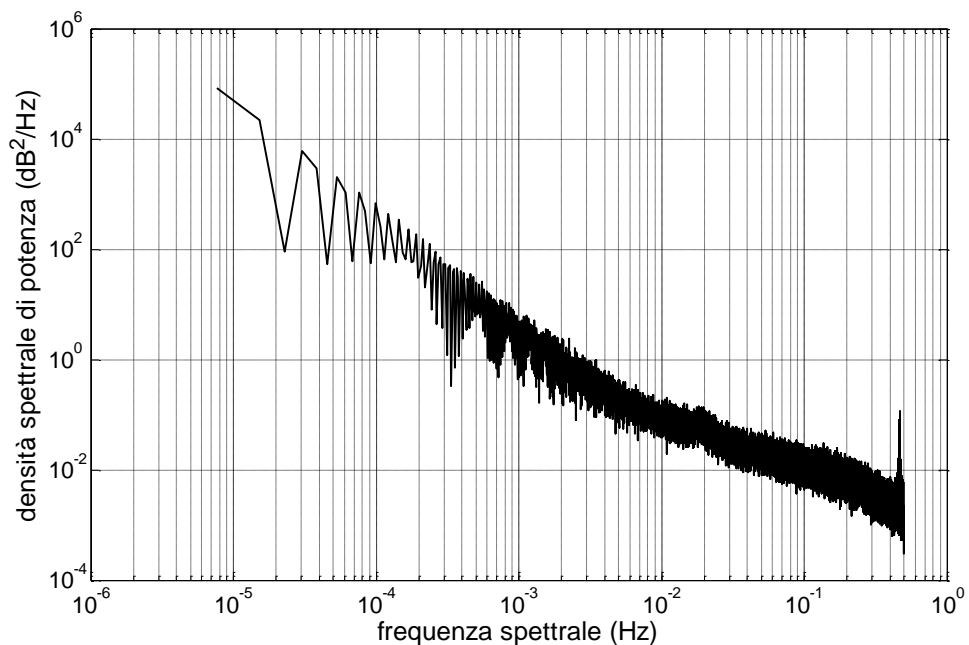


*Figura 10: Densità spettrale singolo giorno alla frequenza portante di 40 GHz*

La frequenza  $f_0$  viene chiamata frequenza di 'taglio' o di 'cut-off' e dipende da: intensità delle scintillazioni, intensità dell'evento di attenuazione e soprattutto dalla frequenza portante in trasmissione: maggiore è la frequenza portante maggiore sarà il valore della frequenza di cut-off poichè lo spettro di assorbimento da gas tende ad aumentare più velocemente di quello delle scintillazioni; ricaviamo quindi tre frequenze di cut-off relative alle tre frequenze portanti in uso dal satellite Italsat.

Per il calcolo della frequenza di cut-off sono stati considerati 4 giorni in cielo chiaro per ogni stagione al fine di raggiungere un'analisi che fosse esente dalla variabilità delle condizioni atmosferiche delle stagioni

stesse. Agli spettri dei singoli giorni considerati viene applicata poi una media così da ottenere uno spettro medio per stagione (figura 11). Applicando quindi una media ai 4 spettri delle 4 stagioni si ottiene uno spettro medio annuale.



*Figura 11: Densità spettrale di potenza calcolata in Estate alla frequenza portante di 50 GHz*

Le frequenze di taglio scelte per separare il fenomeno di assorbimento da quello delle scintillazioni per i tre beacon sono presentati nella seguente tabella:

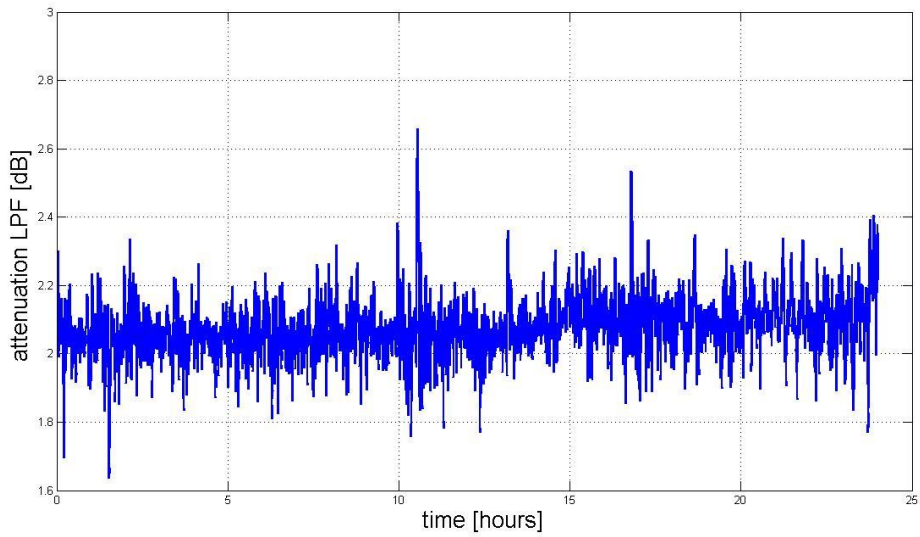
**Tabella 5: Frequenze di cut-off scelte per i tre beacon**

Frequenza beacon:	Frequenze di cut-off:
20 GHz	0.006
40 GHz	0.01
50 GHz	0.02

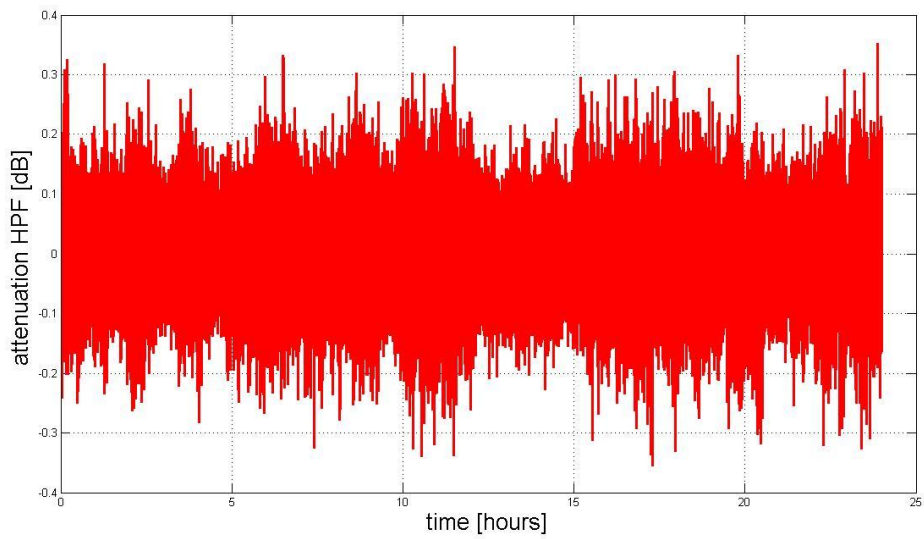
### **3.4 Filtraggio passa alto**

Lo studio spettrale ha consentito di trovare le 3 frequenze di taglio, utili per la separazione dell'effetto da assorbimento da gas dall'effetto delle scintillazioni. Utilizzando il filtro numerico di Butterworth del 5° ordine, le tre frequenze di cut-off permettono il calcolo della serie temporale dovuta all'assorbimento da gas con il filtro passa-basso (figura 12) e quella dovuta alle scintillazioni col filtraggio passa-alto (figura 13).

Le figure sottostanti mostrano due esempi di serie temporale: la prima ottenuta da un filtraggio passa-basso e la seconda ottenuta da un filtraggio passa-alto.



*Figura 12: Serie temporale filtrata passa-basso alla frequenza di 0.02 Hz*



*Figura 13: Serie temporale filtrata passa-alto alla frequenza di 0.02 Hz*



Alla fine del calcolo di tutte le serie temporali, avendo escluso tutti i possibili disturbi discussi nei paragrafi precedenti, si sono ottenuti un totale di:

- 463533 minuti → 88.2 % dell'anno;
- 376956 minuti → 71.7 % dell'anno;
- 450910 minuti → 85,8 % dell'anno.

Da questi è stato possibile svolgere uno studio sulla distribuzione mensile e stagionale delle serie temporali.

Nelle tabelle 4, 5 e 6 si rappresentano le percentuali dei mesi e delle stagioni:

**Tabella 6: Percentuale dei dati dei primi sei mesi disponibili per l'analisi**

Mesi	% 20 GHz	% 40 GHz	% 50 GHz
Gennaio	92.25%	35.26%	90.45%
Febbraio	87.03%	42.77%	82.81%
Marzo	91.30%	69.31%	79.47%
Aprile	88.34%	74.68%	75.74%
Maggio	90.94%	85.98%	87.84%
Giugno	90.05%	86.04%	87.20%

**Tabella 7: Medie e percentuale dei dati degli ultimi sei mesi disponibili per l'analisi**

Mesi	% 20 GHz	% 40 GHz	% 50 GHz
Luglio	99.47%	94.83%	94.69%
Agosto	93.41%	84.11%	88.97%
Settembre	76.06%	28.70%	76.53%
Ottobre	81.62%	76.72%	78.73%
Novembre	78.60%	73.30%	75.57%
Dicembre	89.99%	83.53%	87.71%

Osservando i valori in tabella, si può notare come alla frequenza di 20 GHz e 50 GHz i dati pertinenti allo studio sono distribuiti equamente in tutto l'anno, mentre alla frequenza di 40 GHz notiamo una differenza sostanziale: i dati relativi ai mesi di Gennaio, Febbraio e Settembre sono collegati a numerosi eventi di fuori servizio, totale assenza del segnale alla frequenza di 40 GHz per 20 giorni, e perciò causano una riduzione di dati a disposizione per lo studio.

**Tabella 8: Medie e percentuale dei dati delle quattro stagioni disponibili per l'analisi**

Stagioni	% 20 GHz	% 40 GHz	% 50 GHz
Inverno	90.32%	49.83%	84.90%
Estate	90.50%	74.21%	86.65%
Primavera	88.57%	80.59%	82.16%
Autunno	83.54%	74.47%	81.80%

## **4 Analisi statistica**

In questo capitolo verranno presentate le variazioni delle scintillazioni, basandosi su uno studio mensile, stagionale e annuale. Si può osservare come ci sia corrispondenza tra l'ipotesi dell'andamento delle scintillazioni in relazione alla variazione della temperatura mensile/stagionale, e l'andamento delle scintillazioni riscontrate nell'analisi statistica dei dati del 1995 forniti dal satellite Italsat. Verrà inoltre presentata la tecnica della frequency scaling, la quale permette di collegare due distribuzioni cumulative con due frequenze portanti diverse; nel nostro caso si analizza un rapporto delle deviazioni standard tra i dati a 50 GHz con quelli a 20 GHz e tra i dati a 40 GHz e quelli a 20 GHz.

### **4.1 Deviazione standard mensile e stagionale**

La probabilità che una certa attenuazione atmosferica sia superata nell'intervallo di tempo di un anno si ottiene dalla distribuzione cumulativa di attenuazione.

Essere a conoscenza di tale distribuzione è fondamentale per ottimizzare i servizi di telecomunicazioni.

Nei grafici successivi saranno presentate le distribuzioni cumulative delle deviazioni standard in cielo chiaro per i tre beacon dell'esperimento Italsat divisi per mesi e per stagioni.

Tutti i grafici indicano in ascissa la deviazione standard delle scintillazioni in [dB] e in ordinata la frazione del tempo di osservazione che, nel caso di distribuzione cumulativa mensile è pari a un mese, mentre nel caso di distribuzione cumulativa stagionali è pari a tre mesi:

- Inverno (dal 21 Dicembre al 20 Marzo);
- Primavera (dal 21 Marzo al 20 Giugno);
- Estate (dal 21 Giugno al 20 Settembre);
- Autunno (dal 21 Settembre al 20 Dicembre).

La distribuzione cumulativa rappresentata indica la frazione del tempo totale nel quale la deviazione standard corrispondente è superata.

Nelle figure 14-15-16 vengono raffigurate le distribuzioni cumulative alla frequenza portante di 20 GHz dei primi sei mesi, degli ultimi sei mesi e delle quattro stagioni:

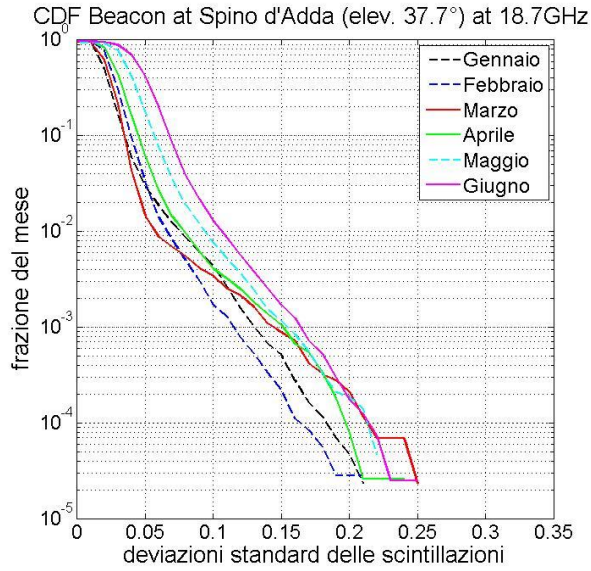


Figura 14: Distribuzione cumulativa mensile, da Gennaio a Giugno, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 20 GHz

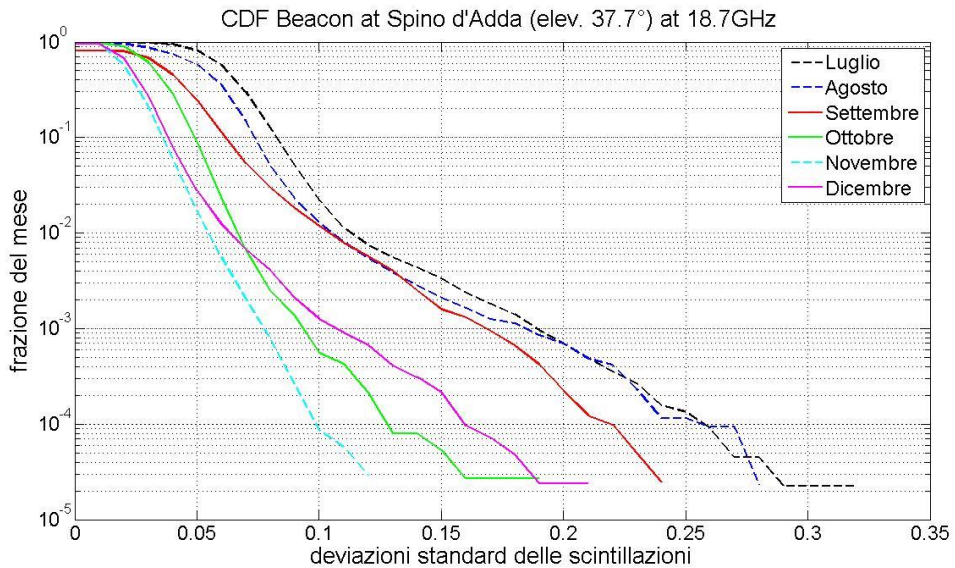
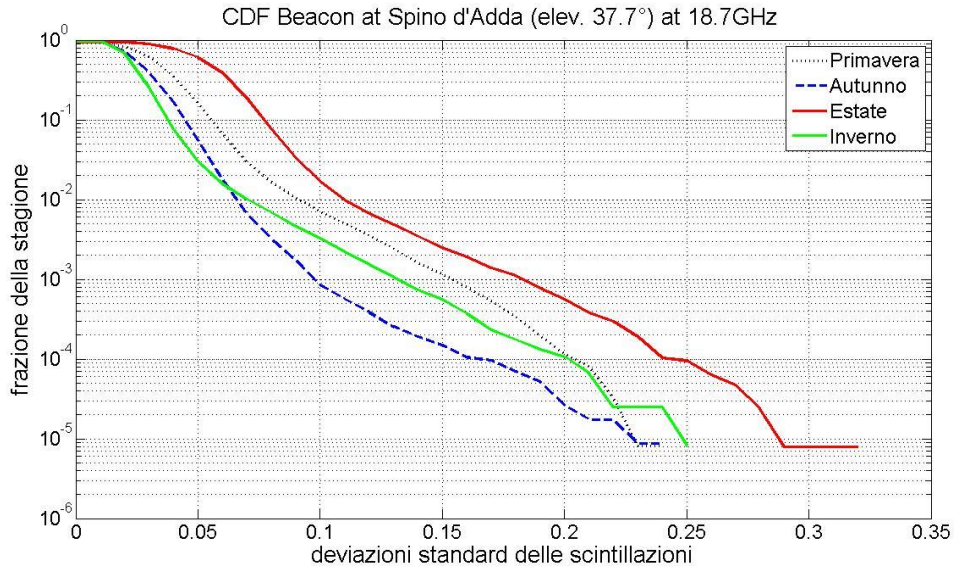


Figura 15: Distribuzione cumulativa mensile, da Luglio a Dicembre, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 20 GHz



*Figura 16: Distribuzione cumulativa stagionale delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 20 GHz*

Dalle figure precedenti si può notare come i mesi più caldi presentano una distribuzione della deviazione standard maggiore rispetto ai mesi con temperature medie minori. Nella figura 15 la distribuzione relativa all'inverno risulta essere maggiore dell'autunno, pur aspettandoci il contrario. Questo caso tuttavia non rappresenta un'anomalia in quanto i valori più bassi dell'autunno rispetto all'inverno non sono significativi poiché rappresentano meno dell'1% del totale delle deviazioni standard delle scintillazioni.

Nelle figure 17-18-19 vengono rappresentate le distribuzioni cumulative delle deviazioni standard alla frequenza portante di 40 GHz dei mesi e delle 4 stagioni:

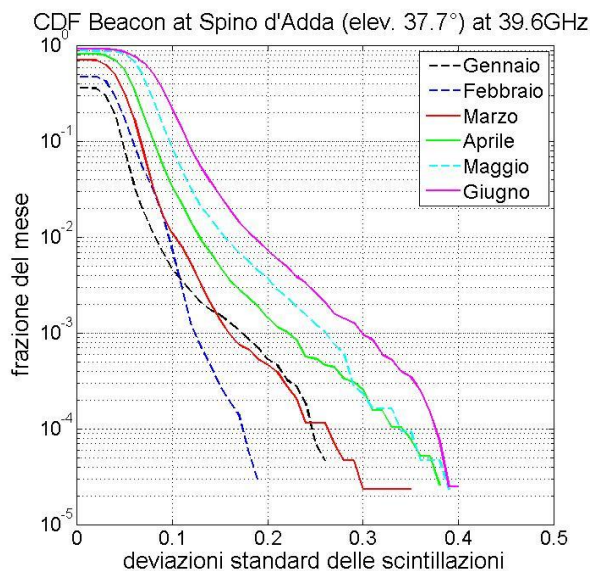


Figura 17: Distribuzione cumulativa mensile, da Gennaio a Giugno, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 40 GHz

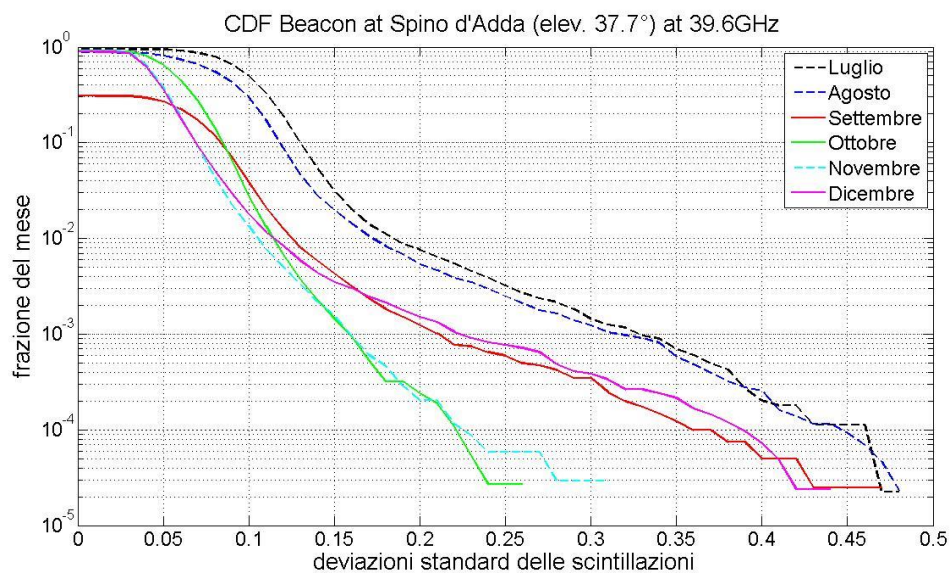
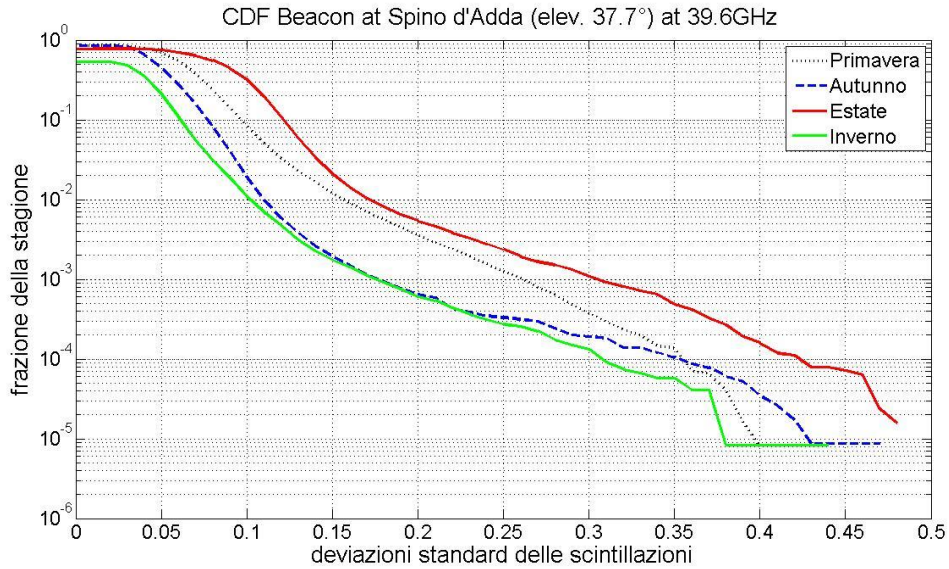


Figura 18: Distribuzione cumulativa mensile, da Luglio a Dicembre, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 40 GHz



*Figura 19: Distribuzione cumulativa stagionale delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 40 GHz*

L'andamento delle distribuzioni cumulative delle deviazioni standard ipotizzato è verificato nelle figure precedenti, dove si può osservare come la media dei valori delle deviazioni standard delle scintillazioni sia più bassa in inverno, più alta in estate e con valori intermedi in autunno e primavera.

Nelle figure 20-21-22 sono presentate le distribuzioni cumulative delle deviazioni standard mensili e stagionali per il beacon a 50 GHz.



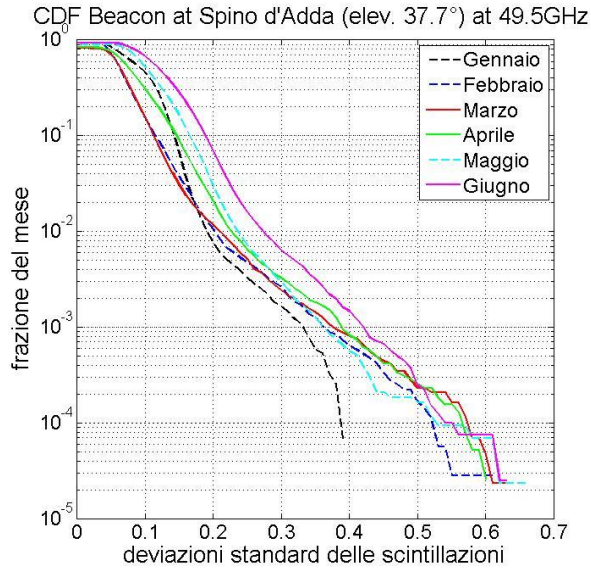


Figura 20: Distribuzione cumulativa mensile, da Gennaio a Giugno, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 50 GHz

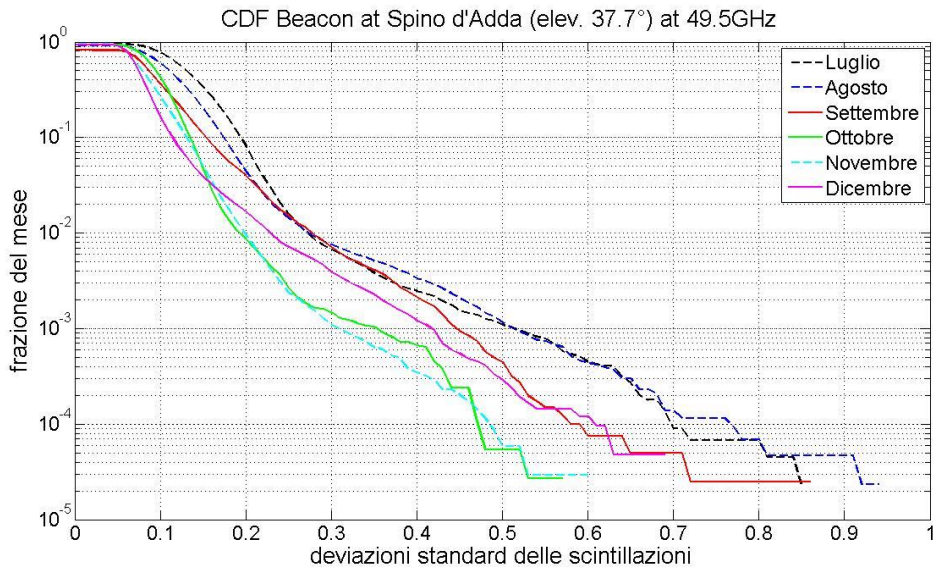
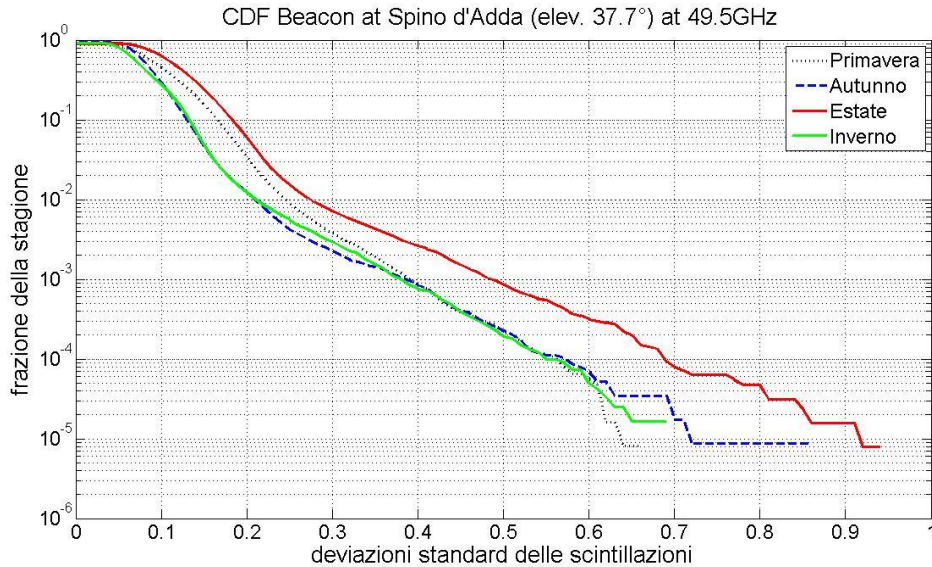


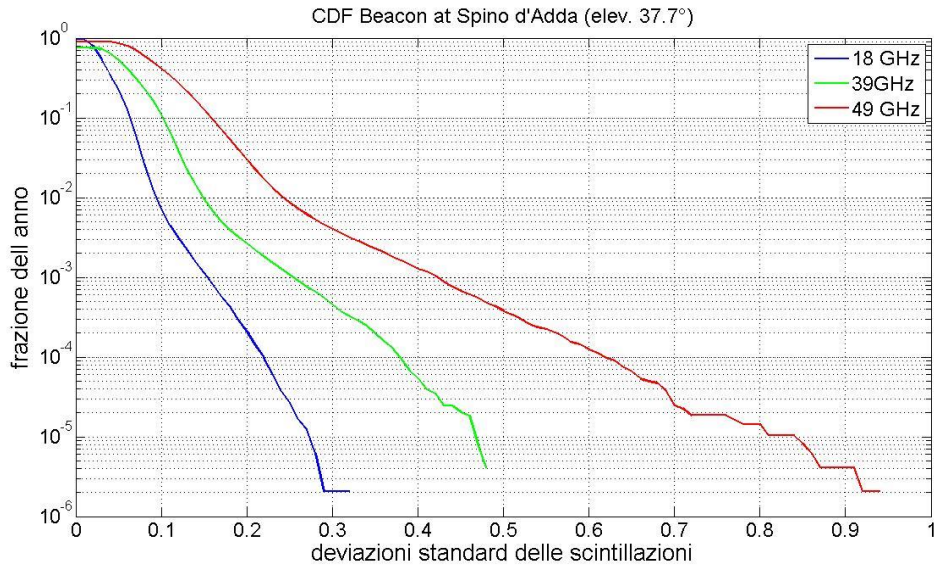
Figura 21: Distribuzione cumulativa mensile, da Luglio a Dicembre, delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 50 GHz



*Figura 22: Distribuzione cumulativa stagionale delle deviazioni standard delle scintillazioni per il beacon a 50 GHz*

Anche nell'analisi con beacon a 50 GHz le scintillazioni risultano più elevate nella stagione estiva, intermedie in primavera, mentre autunno e inverno sono quasi sovrapponibili. Si sottolinea però che la media delle scintillazioni relativa alla stagione invernale è inferiore alla media autunnale.

Infine in figura 23 è rappresentata la distribuzione cumulativa delle scintillazioni ai tre diversi beacon (20 GHz, 40 GHz, 50 GHz) utilizzati dal satellite Italsat.



*Figura 23: Distribuzione cumulativa annuale delle deviazioni standard delle scintillazioni per i tre beacon*

Si nota che all'aumentare della frequenza portante, si ha un aumento corrispondente delle scintillazioni come atteso.

Di seguito nella tabella 9 verranno indicate le intensità delle scintillazioni della distribuzione cumulativa annuale per i tre beacon; nella tabella 10 le medie mensili delle deviazioni standard delle scintillazioni per i tre beacon; nella tabella 11 le medie stagionali delle deviazioni standard delle scintillazioni per i tre beacon.

**Tabella 9: Intensità delle scintillazioni della distribuzione cumulativa annuale per i tre beacon**

Time percentage %	Scintillation amplitude [dB]		
	20 GHz	40 GHz	50 GHz
0.01	0.22	0.38	0.62
0.02	0.20	0.35	0.56
0.03	0.19	0.33	0.52
0.05	0.17	0.30	0.48
0.1	0.15	0.25	0.42
0.2	0.13	0.21	0.36
0.3	0.12	0.19	0.33
0.5	0.11	0.17	0.28
1	0.09	0.15	0.24
2	0.084	0.134	0.21
3	0.079	0.125	0.20
5	0.070	0.117	0.18
10	0.063	0.11	0.157
20	0.050	0.085	0.132
30	0.044	0.072	0.115
50	0.032	0.052	0.090
60	0.029	0.045	0.080
70	0.025	0.034	0.070
80	0.020	0.030	0.060
90	0.015	0.020	0.040

**Tabella 10 : Medie mensili delle scintillazioni per i tre beacon**

Mesi	20 GHz	40 GHz	50 GHz
	Media	Media	Media
Gennaio	0.024	0.043	0.099
Febbraio	0.028	0.048	0.075
Marzo	0.025	0.050	0.079
Aprile	0.031	0.060	0.096
Maggio	0.041	0.075	0.116
Giugno	0.050	0.088	0.132
Luglio	0.064	0.103	0.140
Agosto	0.054	0.090	0.123
Settembre	0.045	0.076	0.108
Ottobre	0.035	0.062	0.101
Novembre	0.024	0.050	0.089
Dicembre	0.026	0.051	0.085

**Tabella 11 : Medie stagionali delle scintillazioni per i tre beacon**

Stagioni	20 GHz	40 GHz	50 GHz
	Media	Media	Media
Inverno	0.026	0.049	0.087
Estate	0.057	0.095	0.128
Primavera	0.037	0.070	0.110
Autunno	0.029	0.055	0.092

## **4.2 Frequency scaling**

Con la frequency scaling si indica la tecnica con cui si possono collegare le distribuzioni cumulative di attenuazione. Essa consente di dimensionare un collegamento ad una certa frequenza, a partire da distribuzioni cumulative ottenute sperimentalmente, con una frequenza diversa, di solito inferiore.

## **4.3 Effetto dello scattering troposferico sulle scintillazioni**

Dalla teoria, dette  $f_1$  ed  $f_2$  le frequenze a cui vengono calcolate le predizioni,  $\sigma_1^2$  e  $\sigma_2^2$  le varianze delle scintillazioni alle rispettive frequenze misurate allo stesso sito e con la stessa elevazione,  $D_a$  il raggio fisico dell'antenna e  $G$  il guadagno d'antenna, si ha :

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = \frac{G(D_a, f_1)}{G(D_a, f_2)} * \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^\alpha$$

da questa otteniamo:

$$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \Big|_n = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} * \frac{G(D_a, f_2)}{G(D_a, f_1)}$$

Con  $\alpha = 7/6$  secondo ITU-R e  $\alpha = 0.9$  secondo Karasawa (Appendice A).

La frequency scaling sembra essere dipendente dal luogo in cui si effettua il test e spesso non conferma il valore proposto dal modello.

Differenti scelte per l'altezza  $h$  dello strato turbolento e per l'efficienza dell'antenna  $\eta$  non cambiano significativamente la dipendenza dalla frequenza.

#### **4.4 Frequency scaling a Spino d'Adda con Italsat experiment**

La stazione sperimentale di Spino d'Adda si trova ad una latitudine di  $45.50^\circ$  e una longitudine di  $9.49^\circ$ . L'antenna ricevente ha un diametro di 7 metri, un'efficienza pari a 0.64, un angolo di elevazione di  $37.7^\circ$  e lavora alle frequenze 18.7, 39.6 e 49.5 GHz.

Per il calcolo della frequency scaling le premesse sono le stesse per il calcolo della deviazione standard. Si prendono in esame tutti i giorni, tranne quelli con pioggia costante per tutto il tempo, e si escludono sotto e sopra soglia. L'unica differenza dal calcolo della deviazione standard stagionale è che si sono considerati solo i dati corretti validi contemporaneamente alle 2 frequenze prese in esame.

Si è calcolato la frequency scaling rapportando i dati alla frequenza portante di 50GHz con i dati alla frequenza portante di 20 GHz, e rapportando i dati alla frequenza di 40 GHz con quella a 20GHz.

Come fatto sia per il calcolo della frequenza di cut-off, sia per il calcolo della deviazione standard, anche in questo caso si calcola la frequency scaling stagionale e annuale.

**Tabella 12: Rapporti delle scintillazioni stagionali e annuale:**

Stagioni	Frequenze considerate:	
	$r = \sigma_{40} / \sigma_{20}$	$r = \sigma_{50} / \sigma_{20}$
Inverno	1.96	3.15
Estate	1.65	2.11
Primavera	1.88	2.72
Autunno	1.94	3.07
Anno	1.86	2.76



## 5. Confronto con i modelli di predizione delle scintillazioni

In questo capitolo verranno presentati diversi modelli statistici di predizione della deviazione standard in cielo chiaro presenti in letteratura con lo scopo di confrontarli con i dati ricavati dalle misurazioni del segnale proveniente dal satellite Italsat per i tre beacon, 20 GHz, 40 GHz e 50 GHz; dati acquisiti nell'anno 1995 nella stazione ricevente di Spino d'Adda.

I modelli esistenti si possono distinguere in due tipologie:

- Metodi empirici, ovvero metodi che utilizzano dati di esperimenti meteorologici e dati di esperimenti per la misurazione dell'intensità di scintillazioni (Olympus e Italsat), e che ne ricavano la correlazione reciproca attraverso metodi di regressione matematica.
- Metodi basati su modelli elettromagnetici: dalla teoria di Tatarskii si parametrizza un modello di atmosfera utilizzando parametri meteorologici derivati dall'osservazione effettuata da radiosonde (RAOBs) ed è così possibile ricavare le varianze di scintillazione.

Per tutti i metodi considerati, la varianza, o deviazione standard, viene solitamente normalizzata rispetto al fattore d'antenna  $G$ , la frequenza  $f$  (GHz) e l'angolo di elevazione  $\theta$ ;

è possibile introdurre la varianza normalizzata  $\sigma_{\chi^n}^2$  come:

$$\sigma_{\chi^n}^2 = \sigma_{\chi}^2 G^{-2} f^{-\alpha} (\sin\theta)^\beta$$

con  $\alpha$  uguale all'esponente del frequency scaling e  $\beta$  uguale all'esponente dell'elevation scaling.

### 5.1 Metodi empirici: modelli ITU-R e Karasawa

I due modelli, il primo pubblicato nel 1988 e il secondo nel 1999, risultano essere simili in quanto entrambi usano come valore predittivo della deviazione standard il parametro in ingresso : refrattività  $N_{\text{wet}}$  (in funzione della media mensile dell'umidità relativa e della temperatura ).

Il modello ITU-R (International Telecommunication Union) è stato studiato per lavorare in un range di frequenze dai 7 GHz ai 20 GHz, in un range di angoli di elevazione che va dai 4° ai 30° e un'altezza di turbolenza fissata a 1000 [m] di quota.

Utilizza come valori di frequency scaling ( $\alpha$ ) e di elevation scaling ( $\beta$ ) i seguenti valori:  $\alpha = 7/6$  e  $\beta = 2.4$ .

Inoltre il fattore d'antenna  $G$  è dato dalla formula:

$$G^2(R_{\text{eff}}) = 3.86(x^2 + 1)^{1/12} \sin\left(\frac{11}{6} \arctan(x^{-1})\right) - 7.08x^{5/6}$$

con:

$$x = 0.0584kD_e^2/L$$

la deviazione standard di riferimento è calcolata come:

$$\sigma_\chi = 3.6 * 10^{-3} + 10^{-4} N_{\text{wet}}$$

il termine di refrattività è dato da:

$$N_{\text{wet}} = 22810U e^{17.5T/(T+240.97)} / (T+273)^2$$

Il modello di Karasawa è stato studiato per un range di frequenze meno ampio che va dai 7 GHz ai 14 GHz, stesso range di angolo di elevazione del modello ITU-R, un'altezza di turbolenza fissata a una quota di 2000 [m] e un raggio equivalente terrestre pari a 8500 [Km].

In questo modello la deviazione standard predetta è data da:

$$\sigma_{\chi n} = \sigma_\chi (f^{0.9} G(D_e) / \sin^{2.6} \theta)^{1/2}$$

con  $\alpha = 0.9$  e  $\beta = 2.6$ ,  $f$  rappresenta la frequenza in GHz ed  $\theta$  rappresenta l'angolo di elevazione;  $\sigma_{\text{ref}}$  è data dalla seguente formula:

$$\sigma_\chi = 3.42 * 10^{-3} + 1.1186 * 10^{-4} N_{\text{wet}}$$

Il termine di refrattività  $N_{\text{wet}}$  a livello del terreno è dato da:

$$N_{\text{wet}} = 22790U e^{19.7T/(T+273)} / (T+273)^2$$

dove U è l'umidità relativa a livello del terreno in [%] e T è la temperatura a livello del terreno in [C°].

## 5.2 Metodi basati su modelli elettromagnetici: i modelli DPSP e MPSP

Il primo dei due modelli è denominato "Direct Physical-Statistical Prediction" (DPSP). I termini "physical" e "statistical" si riferiscono al fatto che questo modello si basa sulla simulazione dell'evento di scintillazione e sulla tecnica di regressione utilizzata per trovare i coefficienti. Per "direct" si intende il tipo di formula di regressione utilizzata.

Il modello si basa sulla correlazione diretta tra la media mensile della log-varianza  $\langle \ln(\sigma_{\chi_n}^2) \rangle$  e la temperatura misurata a terra  $\langle T_S \rangle$  (°C).

La formula di predizione è pertanto:

$$\langle \ln(\sigma_{\chi_n}^2) \rangle = a_{01} + a_{11} \langle T_S \rangle$$

dalla teoria di Tatarskii si è assunto  $\alpha=7/6=1.166$ ,  $\beta=2.40$  e il fattore d'antenna G è quello proposto dall' ITU-R. I coefficienti  $a_{01}$  e  $a_{11}$  sono dati in tabella 13.

La validità del modello DPSP è correlata al tipo di regione climatica per la quale sono disponibili i dati dei radiosondaggi. Le equazioni riportate

possono essere considerate valide per un clima temperato di medie latitudini con temperature medie mensili tra i  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Il secondo modello considerato è detto “Modelled Physical-Statistical Prediction” (MPSP). A differenza del primo la formula di regressione è applicata sul modello fisico. La formula finale dell’MPSP risulta :

$$\langle \ln(\sigma_{\text{mi}}^2) \rangle = a_{02} + a_{12} \langle T_s \rangle + a_{22} \ln(a_{32} + a_{42} \langle T_s \rangle)$$

dove l’espressione nelle parentesi rappresenta una stima dell’altitudine dello strato turbolento. I parametri sono  $\alpha=7/6=1.166$  ,  $\beta=11/6=1.833$  coerentemente con la teoria di Tatarskii, mentre per il fattore d’antenna G si è considerata la formula proposta dall’ITU-R. I coefficienti sono dati in tabella 13

### **5.3 Metodi basati su modelli elettromagnetici: I modelli STH2 e STN2**

Mediante l’utilizzo di metodi di regressione statistica sono stati sviluppati vari modelli relativi la varianza dell’ampiezza di scintillazione. Questi modelli richiedono in ingresso solamente parametri misurati a terra (similmente ai modelli DPSP e MPSP visti sopra). Sono inoltre innovativi poiché si fondano sulla combinazione di due o più predittori, al contrario di altri modelli già esistenti in letteratura che utilizzano la

dipendenza lineare o dalla temperatura o dal termine della rifrattività proporzionale all'umidità ( $N_{WET}$ ).

Il modello STH2 si basa sulla combinazione tra temperatura  $\langle T_S \rangle$  ( $^{\circ}C$ ) e umidità relativa  $\langle RH_S \rangle$  [%] mentre l'STN2 sulla combinazione tra temperatura e indice  $N_{WET}$  [%]. L'indice  $N_{WET}$  può essere così scritto:

$$\langle N_{WET} \rangle = 3730 \langle RH_S \rangle \langle e_s \rangle / (\langle T_S \rangle + 273)^2$$

dove con  $e_s$  si indica la pressione di vapor saturo (mbar). A sua volta  $e_s$  è funzione della temperatura  $T_S$ :

$$e_s = 6.11 \cdot \exp\left(\frac{19.7 \cdot T_S}{T_S + 273}\right)$$

Il modello STH2 è espresso dalla seguente equazione:

$$\langle \ln(\sigma_{zn}^2) \rangle = b_{01} + b_{11} \langle T_S \rangle + b_{21} \langle RH_S \rangle + b_{31} \langle T_S \rangle^2 + b_{41} \langle RH_S \rangle^2$$

Similmente, il modello STN2 è dato dall'espressione:

$$\langle \ln(\sigma_{zn}^2) \rangle = b_{02} + b_{12} \langle T_S \rangle + b_{22} \langle N_{WS} \rangle + b_{32} \langle T_S \rangle^2 + b_{42} \langle N_{WS} \rangle^2$$

Per entrambi i metodi si è assunto  $\alpha=7/6=1.166$  e  $\beta=11/6=1.833$  coerentemente con la teoria di Tatarskii, mentre il fattore d'antenna  $G$  è quello proposto dall'ITU-R.

I coefficienti delle due equazioni precedenti sono dati in tabella 13.

**Tabella 13: Coefficienti di regressione dei modelli studiati. Il termine 'coef-i' indica i coefficienti 'ai1, ai2,..., ei1, ei2' delle rispettive equazioni. Il simbolo 'x' indica l'assenza di tale coefficiente**

Modelli	Coef-0	Coef-1	Coef-2	Coef-3	Coef-4	Coef-5	Coef-6
<b>DPSP</b>	-11,0095	0,1235	x	X	x	x	x
<b>MPSP</b>	-24,9053	0,0684	1,8333	2058	94,5	x	x
<b>STH2</b>	-14,9504	0,1546	0,0747	-0,0011	-0,0005	x	x
<b>STN2</b>	-12,3889	0,1300	0,0151	-0,0016	0,0000	x	x
<b>KARASAWA</b>	0,0034	0,000119	x	X	x	x	x
<b>ITU-R</b>	0,0036	0,000103	x	X	x	x	x

#### **5.4 Confronto dei risultati con i modelli esistenti**

In questo paragrafo si confrontano i risultati ottenuti dalle statistiche effettuate sui dati ricevuti dal satellite Italsat nei periodi di cielo chiaro per i tre beacon considerati con i modelli di predizione descritti precedentemente.

Nella tabella 14 sono presentati i valori dei parametri meteorologici principali: temperatura, umidità e termine di refrattività. Ad ogni mese corrisponde il valore medio relativo di ogni parametro.

**Tabella 14: Temperatura, umidità e refrattività media dei mesi e dell'anno**

	<b>Temp [°C]</b>	<b>Hum [%]</b>	<b>Nwet</b>
<b>Gennaio</b>	0.64	77.80	24.69
<b>Febbraio</b>	4.56	90.99	37.55
<b>Marzo</b>	6.66	67.41	31.42
<b>Aprile</b>	11.87	70.27	45.37
<b>Maggio</b>	16.27	75.32	61.70
<b>Giugno</b>	18.72	76.81	72.68
<b>Luglio</b>	24.32	73.17	94.12
<b>Agosto</b>	21.32	75.82	83.41
<b>Settembre</b>	16.34	80.99	67.19
<b>Ottobre</b>	13.05	90.95	63.22
<b>Novembre</b>	6.12	81.70	37.86
<b>Dicembre</b>	2.82	95.51	35.36
<b>Anno</b>	11.89	79.73	54.55

Nella tabella 15 sono presentate le deviazioni standard medie dei modelli di predizione e le deviazioni standard medie calcolate in questo studio, misurate nei dodici mesi dell'anno, più la media annuale, alla frequenza portante di 20 GHz.



**Tabella 15: Deviazioni standard medie dei mesi e dell'anno dei modelli di predizione alla frequenza portante di 20 GHz**

	STH2	STN2	ITU-R	MPSP	DPSP	Dati dello studio
<b>Gennaio</b>	0.021	0.022	0.047	0.020	0.022	0.024
<b>Febbraio</b>	0.026	0.031	0.058	0.027	0.028	0.028
<b>Marzo</b>	0.032	0.034	0.053	0.032	0.032	0.025
<b>Aprile</b>	0.048	0.049	0.064	0.044	0.045	0.031
<b>Maggio</b>	0.062	0.068	0.077	0.058	0.060	0.041
<b>Giugno</b>	0.072	0.080	0.086	0.067	0.070	0.050
<b>Luglio</b>	0.098	0.114	0.102	0.093	0.100	0.064
<b>Agosto</b>	0.083	0.096	0.094	0.078	0.083	0.054
<b>Settembre</b>	0.062	0.071	0.081	0.059	0.060	0.045
<b>Ottobre</b>	0.048	0.060	0.077	0.048	0.049	0.035
<b>Novembre</b>	0.031	0.034	0.057	0.030	0.031	0.024
<b>Dicembre</b>	0.022	0.027	0.056	0.024	0.025	0.026
<b>Anno</b>	0.050	0.057	0.071	<u>0.048</u>	0.050	0.037

La tabella 16 mostra gli errori percentuali dei singoli modelli predittivi rispetto alle deviazioni standard calcolate in questo studio per il beacon a 20 GHz.

**Tabella 16: Errori percentuali relativi al confronto con i modelli alla frequenza di 20 GHz**

Modello	Errore percentuale [%]
STH2	26
STN2	35.1
MPSP	22.9
DPSP	26
ITU-R	47.9

Nella tabella 17 sono presentate le deviazioni standard medie dei modelli di predizione e le deviazioni standard medie calcolate in questo studio, misurate nei dodici mesi dell'anno, più la media annuale, alla frequenza portante di 40 GHz.

**Tabella 17: Deviazioni standard medie dei mesi e dell'anno dei modelli di predizione alla frequenza portante di 40 GHz**

	<b>STH2</b>	<b>STN2</b>	<b>ITU-R</b>	<b>MPSP</b>	<b>DPSP</b>	<b>Dati dello studio</b>
<b>Gennaio</b>	0.029	0.031	0.064	0.028	0.031	0.043
<b>Febbraio</b>	0.037	0.044	0.077	0.039	0.040	0.048
<b>Marzo</b>	0.046	0.048	0.071	0.045	0.046	0.050
<b>Aprile</b>	0.067	0.071	0.085	0.064	0.065	0.060
<b>Maggio</b>	0.090	0.098	0.103	0.085	0.087	0.075
<b>Giugno</b>	0.105	0.118	0.114	0.098	0.102	0.087
<b>Luglio</b>	0.143	0.166	0.156	0.136	0.146	0.103
<b>Agosto</b>	0.122	0.140	0.125	0.114	0.120	0.090
<b>Settembre</b>	0.090	0.103	0.108	0.085	0.087	0.076
<b>Ottobre</b>	0.069	0.086	0.103	0.069	0.071	0.062
<b>Novembre</b>	0.044	0.049	0.076	0.043	0.045	0.050
<b>Dicembre</b>	0.031	0.039	0.075	0.039	0.036	0.051
<b>Anno</b>	0.073	0.083	0.096	<b><u>0.070</u></b>	0.073	0.066

La tabella 18 mostra gli errori percentuali dei singoli modelli predittivi rispetto alle deviazioni standard calcolate in questo studio per il beacon a 40 GHz.

**Tabella 18: Errori percentuali relativi al confronto con i modelli alla frequenza di 40 GHz**

Modello	Errore percentuale [%]
STH2	9.6
STN2	20.5
MPSP	5.7
DPSP	9.6
ITU-R	31.3

Nella tabella 19 sono presentate le deviazioni standard medie dei modelli di predizione e le deviazioni standard medie calcolate in questo studio, misurate nei dodici mesi dell'anno, più la media annuale, alla frequenza portante di 50 GHz.

**Tabella 19: Deviazioni standard medie dei mesi e dell'anno dei modelli di predizione alla frequenza portante di 50 GHz**

	<b>STH2</b>	<b>STN2</b>	<b>ITU-R</b>	<b>MPSP</b>	<b>DPSP</b>	<b>Dati dello studio</b>
<b>Gennaio</b>	0.032	0.034	0.068	0.031	0.034	0.099
<b>Febbraio</b>	0.041	0.049	0.082	0.043	0.044	0.075
<b>Marzo</b>	0.051	0.053	0.076	0.050	0.051	0.079
<b>Aprile</b>	0.075	0.079	0.091	0.071	0.072	0.096
<b>Maggio</b>	0.100	0.109	0.110	0.094	0.096	0.116
<b>Giugno</b>	0.116	0.131	0.122	0.109	0.113	0.132
<b>Luglio</b>	0.159	0.185	0.146	0.151	0.162	0.140
<b>Agosto</b>	0.135	0.155	0.134	0.127	0.134	0.123
<b>Settembre</b>	0.099	0.114	0.116	0.094	0.097	0.108
<b>Ottobre</b>	0.076	0.095	0.111	0.077	0.078	0.101
<b>Novembre</b>	0.049	0.054	0.082	0.048	0.049	0.089
<b>Dicembre</b>	0.034	0.043	0.080	0.037	0.039	0.085
<b>Anno</b>	0.081	0.092	<u>0.102</u>	0.078	0.081	0.104

La tabella 20 mostra gli errori percentuali dei singoli modelli predittivi rispetto alle deviazioni standard calcolate in questo studio per il beacon a 50 GHz.

**Tabella 20: Errori percentuali relativi al confronto con i modelli alla frequenza di 50 GHz**

Modello	Errore percentuale [%]
STH2	-28.4
STN2	-13
MPSP	-33.3
DPSP	-28.4
ITU-R	-2

Dal confronto tra i valori di temperatura e refrattività presenti in tabella 14 e i valori delle deviazioni standard delle scintillazioni dei modelli predittivi, per i tre beacon, si può notare come all'aumentare o al diminuire di tali valori meteorologici si ha una variazione corrispondente delle deviazioni standard delle scintillazioni.

Nelle tabelle 16, 18, 20 si possono confrontare le deviazioni standard delle scintillazioni con quelle dei modelli predittivi.

Per il beacon a 20 GHz e 40 GHz i modelli più affidabili sono : MPSP, DPSP e STH2; quelli meno affidabili sono STN2 e ITU-R.

Per il beacon a 50 GHz i modelli più affidabili sono STN2 e ITU-R.

Del modello ITU-R si può notare come a frequenze più basse è maggiore l'errore medio a causa di una sovrastima del fenomeno delle scintillazioni; a frequenze più alte l'errore medio viene compensato da una probabile sottostima dell'esponente del frequency scaling. Possiamo concludere che le frequenze più alte sono quelle più attendibili con un errore medio percentuale che si avvicina al 2%.

Al fine di confrontare la dipendenza della deviazione standard media delle scintillazioni misurate con la frequenza di trasmissione si è calcolato l'esponente di frequency scaling  $\alpha$ .

Il rapporto  $r$  tra due deviazioni standard a due diverse frequenze, con lo stesso angolo di deviazione, è dato da:

$$r^2 = \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^\alpha$$

si può calcolare l'esponente del frequency scaling  $\alpha$  come:

$$\alpha = \frac{\log(r^2)}{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}$$

Utilizzando i rapporti  $r$  di frequency scaling calcolati nella tabella 12 si sono potuti calcolare i valori  $\alpha$  relativi al rapporto tra le frequenze.

Nella tabella 21 sono presentati i valori di  $\alpha$  ottenuti:

**Tabella 21 Esponente del frequency scaling**

Frequenze considerate	Rapporti di frequency scaling $r$	Esponente del frequency scaling $\alpha$
49.5 GHz / 18.7 GHz	2.76	2.09
39.6 GHz / 18.7 GHz	1.86	1.65

Dalla tabella precedente si ricava l'esponente del frequency scaling medio tra i due valori uguale a 1.87.

## Conclusioni

Come ogni altra forma di radiocomunicazione una trasmissione satellitare può essere disturbata da eventi atmosferici (quali precipitazioni, assorbimento da gas, attenuazione da nuvole) sul canale radio: tale disturbo aumenta con la frequenza portante e può portare all'aumento del BER (Bit Error Ratio) fino all'indisponibilità di servizio in caso di trasmissione particolarmente critiche (alta frequenza).

Negli anni novanta satelliti come Italsat e Olympus sono stati mandati in orbita per studiare tutti quei fenomeni che influenzano i collegamenti in banda Ka, Q e V. Oltre alle attenuazioni dovute ai fenomeni già noti, a frequenze portanti maggiori di 15 GHz bisogna tenere conto anche delle attenuazioni causate dalle turbolenze della troposfera, perché non più trascurabili.

In questa tesi si è analizzato il fenomeno delle scintillazioni elaborando e interpretando i dati provenienti dal satellite Italsat relativo all'anno 1995 per i tre beacon (20 GHz, 40 GHz e 50 GHz) nei periodi di cielo chiaro.

Al fine di analizzare quantitativamente il fenomeno delle scintillazioni, si sono prodotte delle distribuzioni cumulative della deviazione standard in funzione del tempo di osservazione: l'analisi si è basata sia su periodo mensile che stagionale.

E' stato verificato che la distribuzione cumulativa nella stagione estiva ha un andamento più ampio, l'inverno è la stagione con una media delle deviazioni standard delle scintillazioni più basse, mentre l'autunno e la primavera hanno distribuzioni intermedie.

Si è anche avuto conferma che aumentando la frequenza portante, aumentano le scintillazioni.

Per mezzo della tecnica del frequency scaling si sono potuti calcolare i rapporti delle deviazioni standard allo stesso livello di probabilità per i tre beacon provenienti dal satellite Italsat. Calcolando la media di tali rapporti viene ricavato l'esponente  $\alpha$  del frequency scaling, utile per il paragone con i metodi di predizione delle scintillazioni (Karasawa, ITU-R).

Successivamente sono stati confrontati i risultati ottenuti con i dati ricavati dai modelli di predizione, e si è potuto rilevare che:

- Per i beacon a 20 GHz e 40 GHz i modelli di predizione più affidabili sono: MPSP, STH2 e DPSP.
- Per il beacon a 50 GHz i modelli di predizione più affidabili sono: ITU-R e STN2.

Il modello ITU-R si è rilevato essere sempre più affidabile al crescere della frequenza passando da un errore medio percentuale del 48% al beacon più basso, ad un errore medio percentuale del 2% al beacon più alto, perché a frequenze minori il modello sovrastima il fenomeno delle

scintillazioni, la sovrastima viene compensata dalla probabile sottostima dell'esponente del frequency scaling a frequenze più alte.

Si è infine calcolato l'esponente del frequency scaling, pari a 1.87, utilizzando i rapporti tra le deviazioni standard allo stesso livello di probabilità, al fine di confrontare la dipendenza della deviazione standard al variare della frequenza dei dati veri con la dipendenza della deviazione standard predetta dai modelli al variare delle frequenza.



## Bibliografia

- [1] Riva C., "Seasonal and diurnal variations of total attenuation measured with the ITALSAT satellite at Spino d'Adda at 18.7, 39.6 and 49.5 GHz", International Journal of Satellite Communication and Networking, N°22, Anno 2004, pp 449-476.
- [2] E. Matricciani, M. Mauri e C. Riva, " Relationship between scintillation and rain attenuation at 19.77 GHz", Radio Sci.,31, 273-279 (1996).
- [3] Ott R. H., Thompson M. C., " Atmospheric Amplitude Spectra in an Absorption Region," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. AP-26, N°2, Marzo 1978, pp. 329-332.
- [4] Ippolito L. J., " Radio Propagation for Space Communications System", Proceedings of the IEEE, Vol 69, N°6, Giugno 1981, pp. 697-727.
- [5] Haddon J., Vilar E., " Scattering Induced Microwave Scintillations from Clear Air and Rain on Earth Space Paths and the Influence of Antenna- Aperture", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. AP-3, N°5, May 1986, pp. 646-657.

[6] E. Matricciani, C. Riva, " 18.7 GHz tropospheric scintillation and simultaneous rain attenuation measured at Spino d'Adda and Darmstadt with Italsat", Radio Science, Vol. 43, RS1013, doi:10.1029/2007RS003688, 2008.

[7] P. Galasso, "Statistiche di scintillazione in cielo chiaro per l'esperimento Italsat (1994)", Tesi presso il Politecnico di Milano.

[8] Bertram R. Arbesser-Rastburg, Paraboni A., " European Research on Ka-Band Slant Path Propagation", Proceedings of the IEEE, Vol.85, N°6, June 1997, pp. 843-852.

[9] E. Matricciani, M. Mauri e C. Riva, " Scintillations and simultaneous rain attenuation at 12.5 GHz to satellite Olympus", Radio Science, Vol.32, N°5, pp. 1861-1865, Sept-Oct 1997.

[10] V.I. Tatarskii, 'The effects of the turbolent atmosphere on wave propagation', Israel Program for Scientific Traslations, Jerusalem, 1971.

[11] Y. Karasawa, M. Yamada e J. E. Allnut, " A new prediction method for tropospheric scintillation on earth-space paths", IEEE Transactions on Antennas Propagation, Vol. 36, N°11, Nov 1998, pp. 1608-1614.

[12] ITU-R, “ Specific attenuation model for rain for use in prediction methods”, Recommendation ITU-R P.838-3, 2005.

[13] F.S. Marzano, C. Riva, A. Banich e F. Clivio, “Assessment of model-based scintillation variance prediction on long-term basis using Italsat satellite measurements”, International Journal of Satellite Communications 17, pp. 17-36 (1999).