

Frank Silvio Marzano,
Augusto Maria Marziani
 “Sapienza” Università di Roma
 - Dipartimento di Ingegneria
 dell’Informazione, Elettronica e
 Telecomunicazioni

Elio Restuccia
 Istituto Superiore delle
 Comunicazioni e delle
 Tecnologie dell’Informazione -
 ISCOM

Fernando Consalvi
 Fondazione Ugo Bordoni

Realizzazione di una stazione terrena ricevente satellitare per studi di propagazione elettromagnetica in atmosfera.

**Realization of a satellite ground station for studies of
 electromagnetic propagation in the atmosphere.**

Sommario: Il satellite per telecomunicazioni Alphasat, il più grande realizzato in Europa e collocato in orbita geostazionaria nel luglio del 2013, ospita a bordo una piattaforma scientifica (TDP-5 “Aldo Paraboni”) destinata allo studio della propagazione elettromagnetica in atmosfera in alcune bande di frequenze a microonde tra cui la banda Ka (20 GHz) e la banda Q (40 GHz). Alle sperimentazioni partecipano numerose Università ed Enti di ricerca di tutta Europa, in Italia su iniziativa dell’ASI (Agenzia Spaziale Italiana) sono coinvolti, tra gli altri, il Politecnico di Milano e le Università di Roma Tor Vergata e Sapienza.

Presso l’ISCTI (Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell’Informazione) è stata realizzata una stazione ricevente con minima spesa, grazie all’utilizzo di componenti appartenenti a ricevitori non più operativi, e dotata di piattaforme open-source per l’implementazione di funzioni aggiuntive.

Abstract: Alphasat satellite, the largest telecommunication satellite built in Europe, was placed in geostationary orbit in July 2013. On board is operative a scientific platform (TDP-5 “Aldo Paraboni”) devoted to the study of atmospheric propagation in some frequency bands including microwave Ka-band (20 GHz) and Q-band (40 GHz). Many universities and research organizations across Europe are involved in experimental trials. In Italy ASI (Italian Space Agency) is involved with the Polytechnic of Milan, the Universities Tor Vergata and Sapienza in Rome and others.

At ISCTI (Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell’Informazione) a receiving station was made with minimal expense recycling components contained in old equipment no longer operative and using open-source platforms for the implementation of additional functions.

1. Introduzione

Il diffondersi a livello globale di tecnologie sempre più avanzate e a basso costo crea da parte degli utenti finali una richiesta di capacità di trasmissione sempre maggiore per consentire in particolare il trasferimento di immagini e video ad alta risoluzione in tempi più brevi. Questo bisogno si trasforma nella necessità di dispositivi con potenze di calcolo sempre più elevate e comunicazioni con flusso di dati a bit-rate sempre più alto e per di più in mobilità. Questo, in aggiunta allo sfruttamento già intensivo dello spettro elettromagnetico, porta alla ricerca di risorse spettrali a frequenze sempre più elevate e spinge alla sperimentazione in bande mai o scarsamente utilizzate fino ad ora [1], [2], [3].

È qui che si inserisce l'esperimento denominato TDP-5 [4] "Aldo Paraboni".

L'Agenzia Spaziale Europea, infatti, ha deciso di installare a bordo del satellite per telecomunicazioni Alphasat dei trasmettitori di segnali ad onda continua per studi di propagazione elettromagnetica in alcune bande di frequenze tra cui la banda Ka (20 GHz) e la banda Q (40 GHz).

L'Università "Sapienza", in collaborazione con l'Istituto Superiore delle Comunicazioni e delle Tecnologie dell'Informazione (ISCTI) e la Fondazione Ugo Bordoni, ha deciso di partecipare a questo esperimento tramite la progettazione e la realizzazione di due ricevitori.

Entrambi i ricevitori sono localizzati a Roma presso la sede dell'ISCTI, quello operante in banda Ka (19701 MHz) risulta attivo da tempo ed ha permesso di ottenere già una discreta quantità di dati [5].

La realizzazione della stazione ricevente è avvenuta in quattro fasi:

- analisi e simulazione matematica della propagazione in atmosfera;
- progettazione, assemblaggio e misurazione in laboratorio delle sezioni di ricezione;
- realizzazione e installazione delle piattaforme di supporto;
- realizzazione del software di acquisizione dati.

L'analisi del modello di propagazione, basato sulle indicazioni riportate nelle Raccomandazioni ITU-R [6], è stata effettuata tramite il software Mat Lab mentre per quanto riguarda le piattaforme di supporto al ricevitore (controllo temperatura e tracking) è stata scelta la piattaforma open source italiana Arduino.

L'acquisizione dati, invece, sfrutta una scheda di acquisizione per PC di tipo PCI dotata di universal library. E' stato quindi possibile scrivere un programma in linguaggio C++ per la lettura, la visualizzazione e il salvataggio dei dati relativi al livello della potenza del segnale ricevuto.

2. Il ricevitore in banda Ka

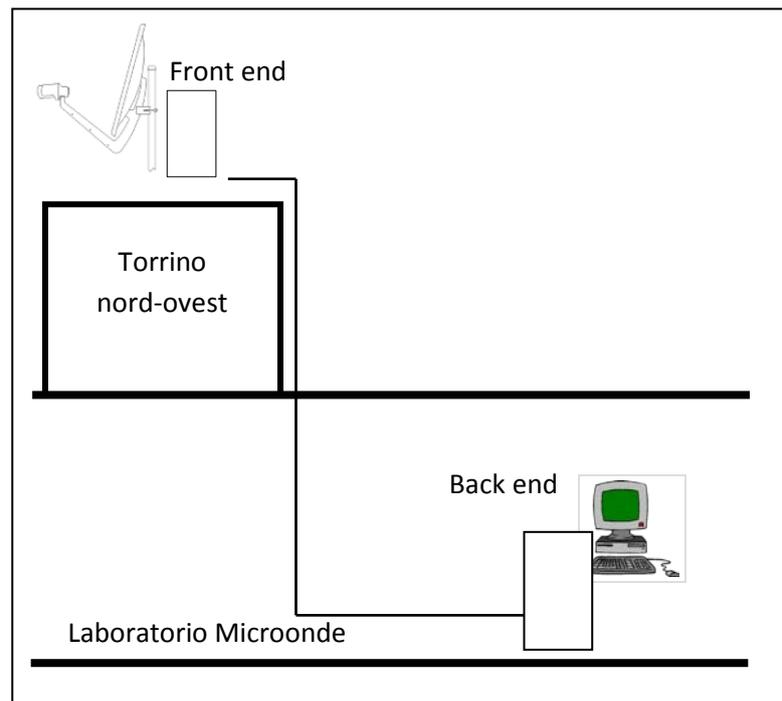
A – Architettura e caratterizzazione del sistema

La stazione ricevente è stata realizzata riutilizzando componenti di un ricevitore, destinato negli scorsi decenni ad analoghe campagne sperimentali ma da tempo dismesso, che operava a frequenza diversa da quella Alphasat.

I singoli dispositivi e componenti recuperati sono stati provati e caratterizzati per verificarne le prestazioni e valutare il loro riutilizzo nel nuovo assemblaggio nel rispetto delle specifiche imposte dall'ESA TDP-5.

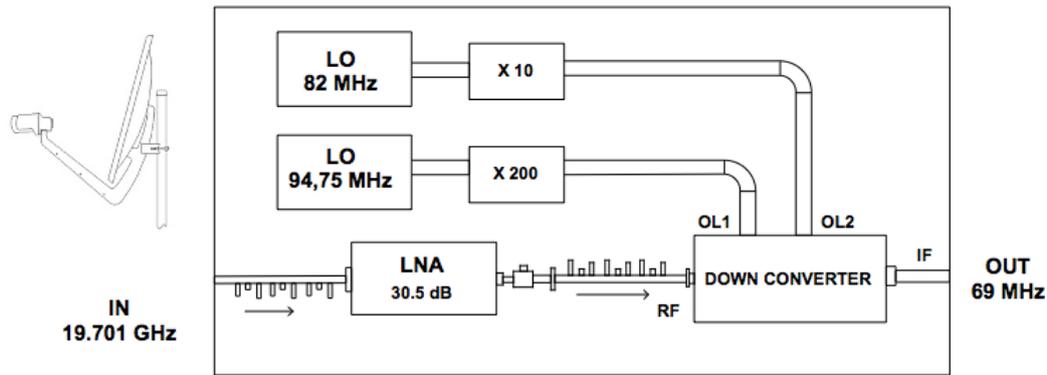
La struttura della stazione ricevente ottenuta risulta, nelle sue parti essenziali, così composta (Figura 1)

- sezione front end situato in esterno sul locale Torrino nord-ovest della sede ISCTI;
- sezione back end situato all'interno del Laboratorio Microonde ISCTI.



La sezione front end, il cui schema funzionale è visibile in Figura 2, risulta costituita dall'antenna, con specchio parabolico da 1.5 m di diametro e con illuminatore primo fuoco, che raccoglie il segnale a 19701 MHz emesso dal satellite, seguito dall'amplificatore a basso rumore (LNA) e dal down converter.

Fig.1 Struttura della stazione ricevente.



Quest'ultimo effettua conversioni di frequenza in due stadi in modo da generare un'uscita a 69 MHz che viene poi inviata, tramite cavo coassiale, alla sezione back end del ricevitore situata all'interno del Laboratorio.

L'antenna presenta un guadagno di 47 dBi, l'amplificatore a basso rumore ha un guadagno di 30.5 dB ed una cifra di rumore di 3.3 dB, valore che comprende l'effetto del filtro a radiofrequenza che lo precede. La risposta normalizzata dell'amplificatore + filtro è mostrata in Figura 3.

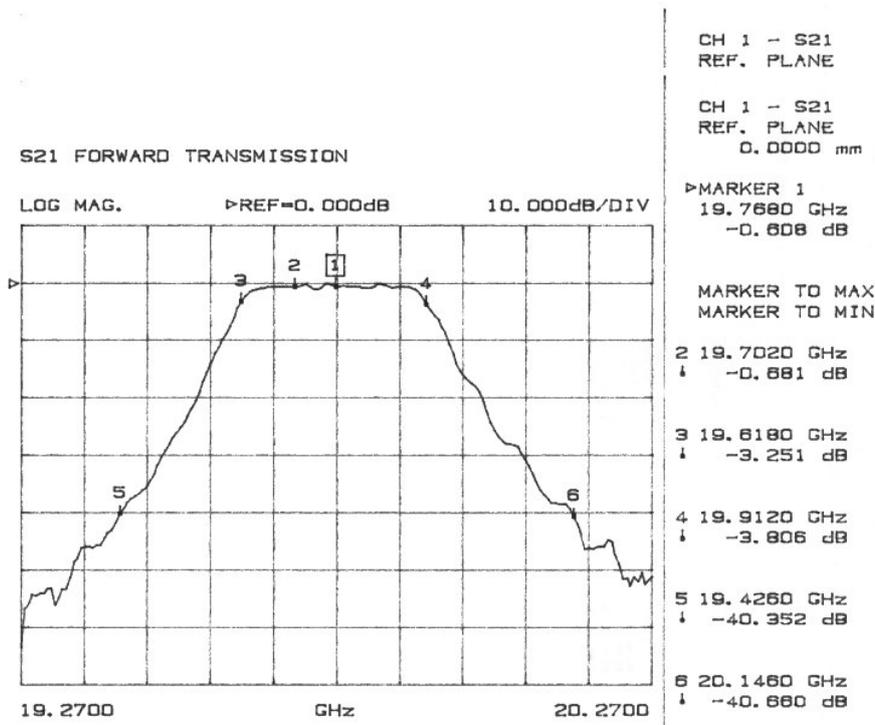


Fig. 2. Architettura del front end del ricevitore in banda Ka.
Fig. 3. Risposta normalizzata dell'amplificatore a basso rumore con filtro in banda Ka.

Nella sezione di front end le conversioni di frequenza sono ottenute con oscillatori di alta precisione e stabilità. Il primo convertitore, con uscita a 751 MHz, è realizzato con tecnologia a microstriscia mentre il secondo, con uscita a 69 MHz è montato su PCB.

I due stadi presentano un'amplificazione complessiva di 55 dB.

Uno studio accurato è stato condotto al fine di accertare che sia evitata la possibilità che segnali alle frequenze immagini di conversione possano raggiungere l'uscita a 69 MHz.

Il gruppo di amplificazione a basso rumore è stato sistemato in una scatola a tenuta stagna montata sul lato posteriore del paraboloide Figure 4 e 5, minimizzando così l'attenuazione della guida dell'illuminatore e rendendo più facili le manovre di aggiustamento dell'elevazione dell'intera antenna.

La scatola è provvista di un elemento riscaldatore gestito da un sistema automatico di regolazione della temperatura al fine di ridurre le instabilità di risposta in ampiezza dell'intero gruppo dovute a variazioni di temperatura ambientale



Fig. 4 Gruppo amplificatore a basso rumore



Le unità AC/DC e gli alimentatori a tensione d'uscita stabilizzata sono montati in un separato contenitore, anch'esso a tenuta stagna, dotato di connettori e cavi idonei all'uso in esterno.

La sezione front end descritta è collegata, tramite apposito cablaggio, alla sezione back end del ricevitore che si trova all'interno del laboratorio Microonde ISCTI, al settimo piano della sede ministeriale, immediatamente al di sotto della zona terrazza e quindi nelle vicinanze del locale Torrino nord-ovest sulla cui sommità è installato il front end.

Nella sezione back end trova posto il cosiddetto ricevitore di beacon (Satellite Beacon Receiver), che effettua ulteriori condizionamenti sul segnale a 69 MHz proveniente dal front end e fornisce in uscita, grazie ad un rivelatore logaritmico, una tensione quasi continua la cui ampiezza può essere rapportata facilmente al valore in decibel del livello del segnale ricevuto.

Il ricevitore di beacon, anch'esso oggetto di recupero, è stato concepito a suo tempo con lo scopo di condurre campagne di misurazioni su segnali ad onda continua ed è fornito di un sistema automatico di scansione/ricerca ed aggancio in frequenza che rende autonoma la funzionalità dell'intero sistema anche in caso di perdita temporanea del segnale.

Un PC ed un software, appositamente sviluppato per l'attuale sperimentazione Alphasat, consentono infine di monitorare costantemente, raccogliere e memorizzare i dati di propagazione anche in assenza di un presidio permanente.

Fig. 5 Sistemazione del gruppo amplificatore a basso rumore

Di seguito vengono riassunte le caratteristiche salienti del ricevitore:

- Frequenza RF: 19701 MHz
- Diametro dell'antenna : 1.5 m
- Efficienza dell'antenna : 60%
- Guadagno dell'antenna : 47 dBi
- Larghezza di banda del Satellite Beacon Receiver : 1 kHz
- Cifra di rumore : 3.3 dB

in Tabella 1 vengono riportati i risultati della simulazione al banco in laboratorio relativi al rapporto segnale/rumore, misurato in uscita al front end a 69 MHz, in corrispondenza dei vari livelli RF ricevuti e delle relative probabilità calcolate in base ai modelli di propagazione in atmosfera raccomandati dall'UIT-R per la tratta satellitare [7].

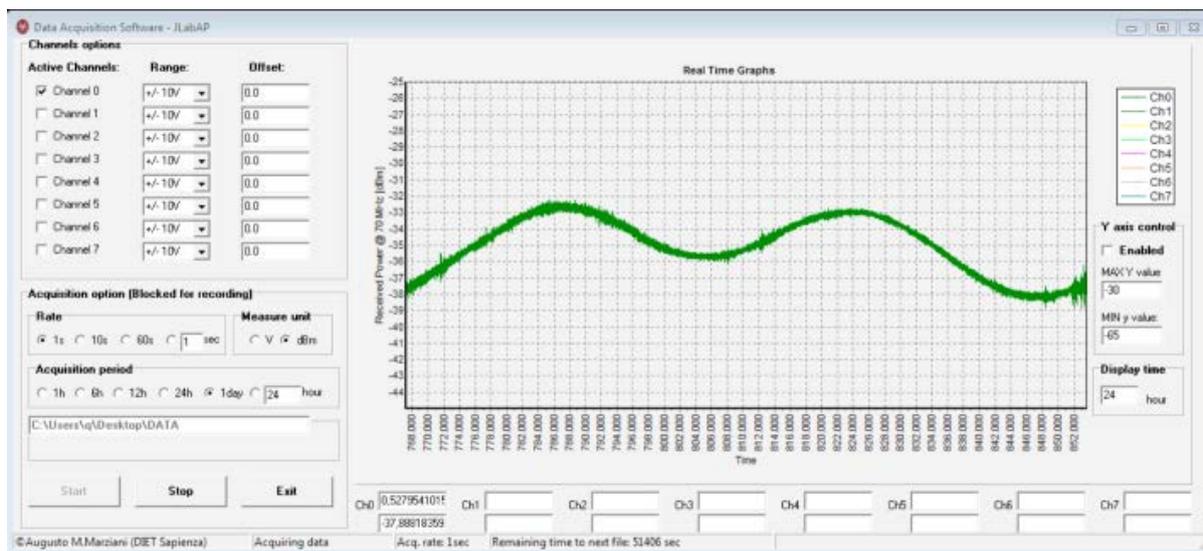
Livello ricevuto (in uscita all'antenna) (dBm)	Probabilità (%)	C/N BW 1 kHz (dB)
-110.0	90	30.1
-110.5	10	29.3
-111.2	3	28.5
-117.8	0.1	22.1

Queste prestazioni soddisfano i requisiti dettati dall'ESA per TDP-5 [6] e, una volta utilizzati in una simulazione al computer, fanno prevedere un tempo di fuori servizio (tempo di perdita dell'aggancio del segnale di beacon) molto inferiore allo 0.1 % [5][7].

B – Acquisizione ed elaborazione dei dati

Il valore del livello di potenza ricevuto viene ottenuto tramite il campionamento della tensione, fornita in uscita dal ricevitore di beacon, effettuato da una scheda di acquisizione PCI, gestita da un software in linguaggio C++ specificatamente sviluppato per questo scopo Figura 6.

Tab.1 Previsioni della statistica del ricevitore in banda Ka



La schermata prodotta dal software mostra in tempo reale i valori del livello in dBm del segnale ricevuto misurato all'ingresso del ricevitore di beacon (riportabile a quello raccolto dall'illuminatore d'antenna) ad intervalli di tempo regolari con possibilità di visualizzare più tracciati, di scegliere la finestra temporale e di impostare l'intervallo dei livelli visualizzati.

Gli stessi dati vengono memorizzati in file di tipo *xxx.dat* lasciando la possibilità, per ciascun file, di impostare i parametri desiderati.

Da default i dati vengono memorizzati con una velocità di uno al secondo mentre un nuovo file viene creato automaticamente ogni 24 ore alla mezzanotte.

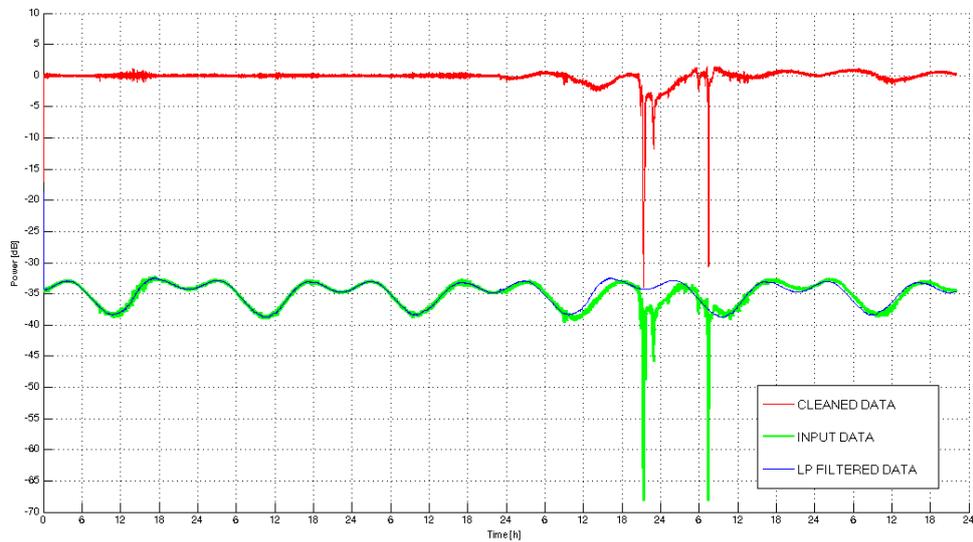
Come è evidente dal tracciato, il livello è soggetto a variazioni periodiche dovute in massima parte al movimento relativo, sia azimutale che zenitale, del satellite rispetto all'antenna ricevente causato dal non perfetto posizionamento dello stesso satellite nell'orbita geostazionaria.

Ciò provoca un disallineamento dall'asse di massimo guadagno dell'antenna ricevente, che non possiede, al momento, un proprio sistema di inseguimento ma che inquina la raccolta dei dati con elementi di natura non propagativa.

Questo effetto è stato comunque ridotto con un filtraggio numerico. Un filtro passa-basso ricostruisce la parte indesiderata che viene successivamente sottratta al segnale originale ottenendo come risultato l'andamento netto del livello dovuto alla propagazione in atmosfera ed agli agenti attenuanti in essa contenuti.

Fig.6 Schermata prodotta dal software di acquisizione

In Figura 7 è mostrato un esempio del risultato dell'elaborazione in presenza di evento di pioggia intensa.



La sequenza ottenuta viene quindi correlata con i dati meteo acquisiti da una stazione meteorologica posizionata sul Torrino nord-est dell'edificio, nelle vicinanze del front end del ricevitore ed in sincronismo temporale con la registrazione dei livelli.

Nella Figura 8 è mostrato un grafico che evidenzia tale correlazione come rilevato durante un evento del 30 agosto del 2014.

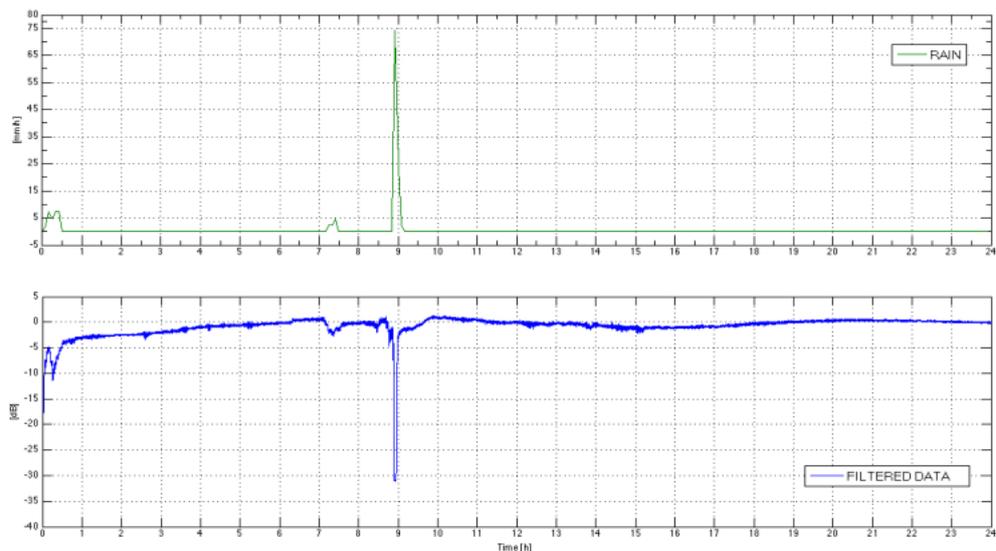
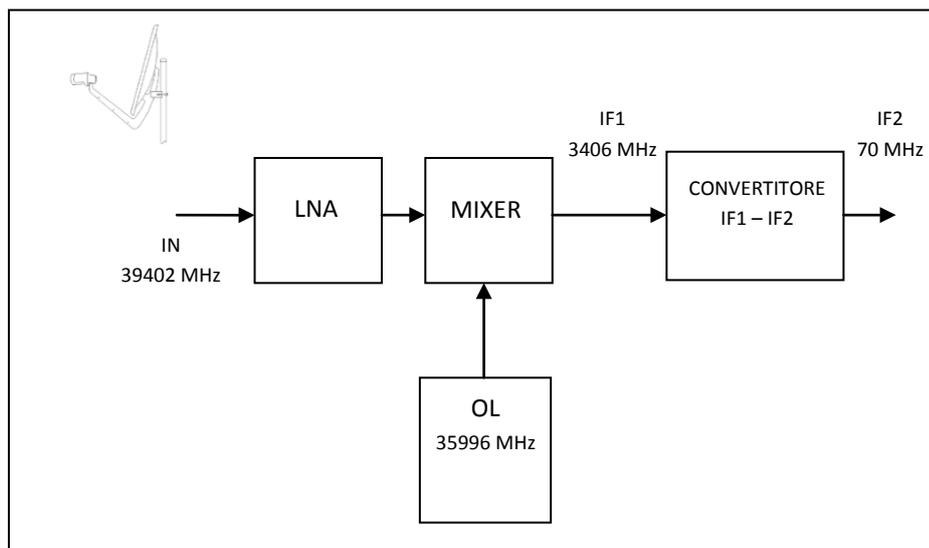


Fig.7 Esempio di filtraggio dei dati
Fig.8 Esempio di correlazione tra l'andamento del livello del segnale e la pioggia.

3. Il ricevitore in banda Q

Il ricevitore in banda Q (40 GHz) è strutturato nello stesso modo del ricevitore in banda Ka e cioè, come schematizzato in Figura 1, è costituito da un front end installato in esterno sul Torrino nord-ovest dell'edificio dell'ISCTI, accanto al front end del ricevitore in banda Ka e da un back end all'interno del Laboratorio Microonde ISCTI.

Nella Figura 9 è illustrata l'architettura di massima del front end.



L'antenna, dotata di specchio parabolico da 46 cm di diametro e di illuminatore primo fuoco, raccoglie il segnale a 39402 MHz emesso dal satellite. È seguito dall'amplificatore a basso rumore (LNA) e dal primo convertitore di frequenza.

L'antenna ha un guadagno di 42.7 dBi mentre l'amplificatore a basso rumore ha un guadagno di 50 dB ed una cifra di rumore di 3.5 dB.

La prima frequenza intermedia è di 3406 MHz che si riduce a 70 MHz dopo la seconda conversione mentre opportuni amplificatori portano il segnale ad un livello idoneo per essere trattati dagli stadi successivi.

Nel back end è ospitato un ricevitore di beacon simile a quello utilizzato per il ricevitore in banda Ka, con la differenza che la larghezza di banda dell'ultimo stadio IF è stata ridotta a 100 Hz. Ciò è stato possibile in quanto l'emissione del TDP-5 di Alphasat è del tipo ad onda continua e quindi con contenuto spettrale minimo.

Si ottiene così un miglioramento di 10 dB sul rapporto segnale/rumore in uscita, compensando in questo modo il basso valore del guadagno dell'antenna disponibile che è inferiore a quello previsto dall'ESA di 53.6 dBi.

Il ricevitore è stato recentemente installato in opera e messo in servizio ed è tuttora monitorato per verificarne le prestazioni.

Fig. 9. Architettura del front end del ricevitore in banda Q

Al sistema di raccolta e registrazione dei dati, che è quello già descritto per il ricevitore in banda Ka, è stato affiancato un sistema di registrazione parallelo, gestito da computer, che fa uso del software "Windaq" in uso presso il Laboratorio Microonde.

Si riassumono di seguito le principali caratteristiche:

- Frequenza RF: 39402 MHz
- Diametro dell'antenna : 46 cm
- Efficienza dell'antenna : 50%
- Guadagno dell'antenna : 42.7 dBi
- Larghezza di banda del Satellite Beacon Receiver : 100 Hz
- Cifra di rumore : 3.5 dB

In Tabella 2, analogamente a quanto fatto per la banda Ka, vengono riportati i risultati della simulazione al banco in Laboratorio relativi al rapporto segnale/rumore, misurato in uscita al front end a 70 MHz, in corrispondenza di alcuni livelli di segnale ricevuto e delle relative probabilità calcolate in base ai modelli di propagazione in atmosfera raccomandati dall'UIT-R per la tratta satellitare in banda Q [7] [8].

I segnali ricevuti sono stati simulati con un generatore RF operante a quella frequenza ed una opportuna catena di attenuatori.

Livello ricevuto (in uscita all'antenna) (dBm)	Probabilità (%)	C/N BW 100 Hz (dB)
-114 dBm	90%	37 dB
-115.4 dBm	10%	34 dB
-117.7 dBm	3%	32 dB
-138.1 dBm	0.1%	10 dB

4. Il radiometro in banda W e la stazione meteorologica

Il radiometro è uno strumento utilizzato per la misurazione della temperatura di brillantezza del cielo e dell'atmosfera in una specifica banda di frequenze e nella direzione in cui viene puntata l'antenna. La realizzazione di un radiometro a 89 GHz (banda W) è attualmente in corso presso il Laboratorio Microonde.

Tab. 2 Previsioni della statistica del ricevitore in banda Q

Affiancato ai due ricevitori per Alphasat permetterà di raccogliere informazioni circa il fondo di rumore generato dalla zona dell'atmosfera interessata dalla propagazione e la correlazione dei vari dati sarà utile per una migliore interpretazione degli stessi.

Il radiometro in fase di sviluppo è del tipo a potenza totale (Tant + Trec) con due riferimenti di temperatura per la calibrazione e la selezione di due diverse polarizzazioni a 90 gradi.

In Figura 10 è mostrata l'architettura di sistema con il carico di riferimento caldo, il carico di riferimento freddo ed il sistema ricevente.

In Figura 11 è presentata una raffigurazione in 3D del radiometro nelle sue parti essenziali.

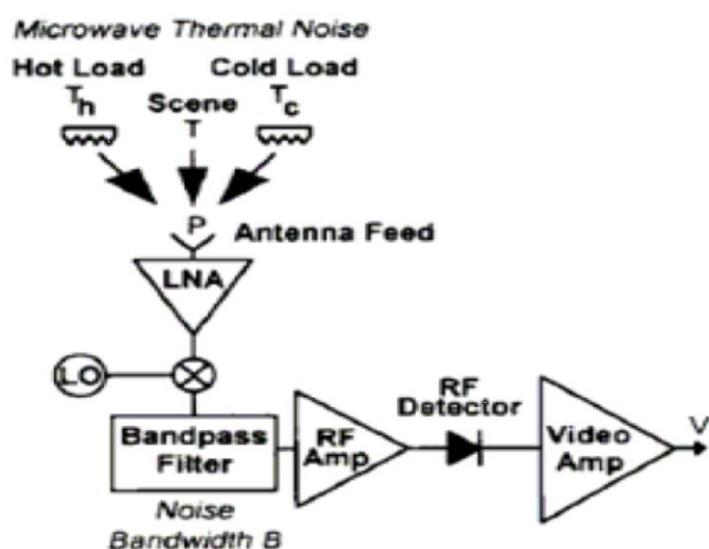
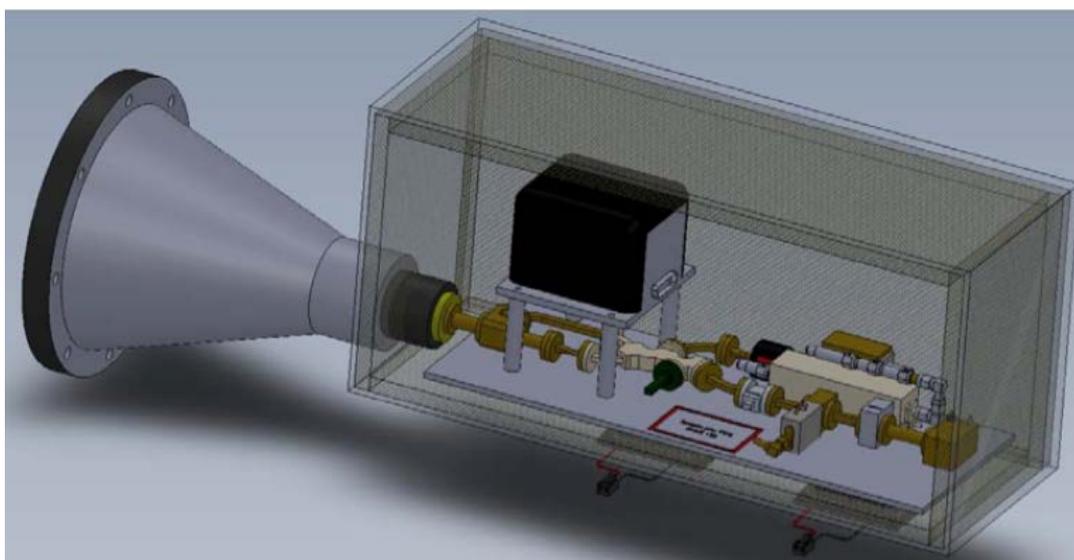


Fig. 10. Architettura del radiometro a 89 GHz

Fig.11 Rappresentazione in 3D del radiometro



Nelle vicinanze delle antenne, sulla sommità dell'edificio come già accennato, è posizionata una stazione meteorologica che consente, tramite appositi sensori, il rilevamento della temperatura dell'aria, della pressione barometrica, della velocità del vento e dell'intensità della pioggia.

I parametri meteo vengono raccolti da un sistema automatico di rilevamento ed immagazzinamento dati che vengono scaricati periodicamente in un data base correlato cronologicamente ai dati Alphasat.

E' in corso di perfezionamento anche l'uso di un disdrometro, strumento in tecnica laser destinato alla misurazione della trasparenza dell'aria, dell'intensità della pioggia, della dimensione e della velocità delle idrometeore.

L'elaborazione di tutti questi dati sarà fondamentale per la sperimentazione in quanto la propagazione ad onde centimetriche e millimetriche è fortemente influenzata dalle condizioni meteo dell'atmosfera che, per la geometria del collegamento satellitare, è coinvolta in tutto il suo spessore.

5. I sistemi automatici di controllo e gestione.

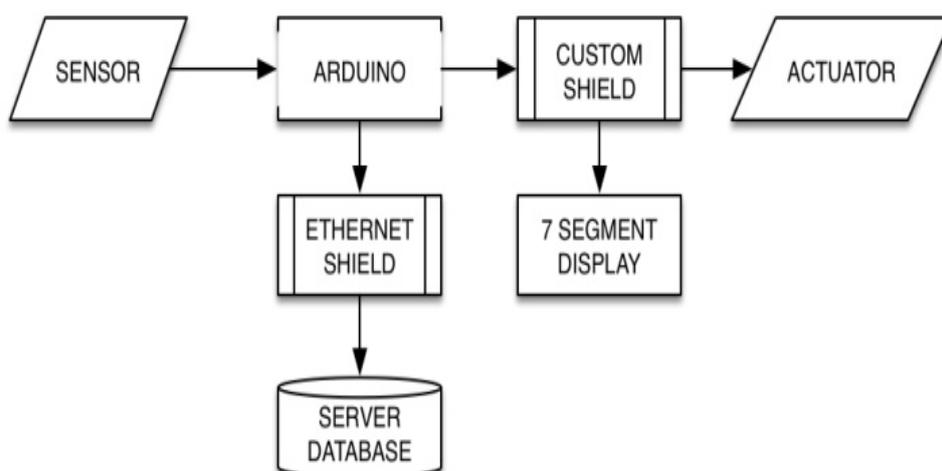
Per ridurre al minimo la necessità di presidiare costantemente i ricevitori e la registrazione dei dati, viene fatto uso di diversi dispositivi automatici di controllo e gestione specificatamente sviluppati per interagire con l'ambiente esterno, prendere decisioni seguendo una logica preordinata e conseguentemente reagire tramite attuatori o sistemi di comunicazione.

Tra le funzioni di questi dispositivi, che sono del tipo "embedded" e non richiedono particolari cure da parte del personale tecnico, vengono citate:

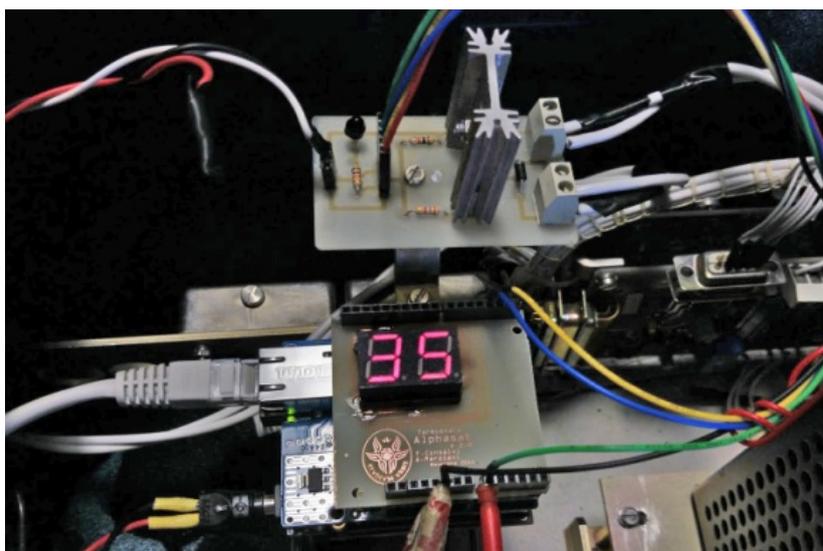
- L'analisi in tempo reale dei dati raccolti;
- Il controllo della temperatura dei moduli sensibili dei front end;
- Il sistema di tracking dell'antenna (allo studio)

Per le ultime due voci è stata scelta la piattaforma di sviluppo che fa uso del microcontrollore "Arduino".

In Figura 12 sono illustrate le funzioni del sistema di controllo della temperatura in cui il valore, rilevato da un sensore, viene mostrato da un display a sette segmenti, inviato al back end per la registrazione e confrontato con un valore di soglia che determina l'accensione e lo spegnimento di un riscaldatore.



Mentre in Figura 13 è visibile l'hardware realizzato allo scopo ed ospitato all'interno del contenitore a tenuta posizionato in esterno in prossimità dell'antenna.



Il sistema di tracking, anch'esso basato sulla piattaforma "Arduino", consiste in un controllo automatico ad anello aperto dell'angolo di elevazione dell'antenna basato sulle effemeridi previste del satellite.

L'angolo di elevazione è infatti quello soggetto alle variazioni più consistenti e maggiormente determinati riguardo il corretto puntamento.

Un inclinometro digitale fornisce l'informazione sull'angolo di elevazione raggiunto dall'antenna mentre l'azionamento avviene grazie ad un attuttore a pistone dotato di motore elettrico ed interfaccia di controllo ad alta corrente. L'informazione di angolo di elevazione è anche inviata al data base per il monitoraggio remoto.

Fig. 12 Sistema di controllo della temperatura

Fig.13 Hardware del sistema di controllo della temperatura

In Figura 14 una vista d'insieme del front end del ricevitore a 20 GHz.



Fig. 14 Front end del ricevitore a 20 GHz

6. Conclusioni.

E' stata descritta la realizzazione di due ricevitori, destinati al monitoraggio dei segnali trasmessi dalla piattaforma scientifica TDP-5 del satellite geostazionario Alphasat, e collocati presso il Laboratorio Microonde dell'ISCTI.

Sono state percorse tutte le fasi dalla progettazione alla scelta dei componenti, recuperati da ricevitori non più in uso ma utilizzati in precedenza per analoghe sperimentazioni, per passare poi alle prove di caratterizzazione in laboratorio, all'assemblaggio, alla costruzione degli elementi mancanti ed alla validazione complessiva dei sistemi.

Grazie ai due ricevitori è possibile la misurazione e la registrazione continua del livello di potenza dei segnali a 20 GHz e 40 GHz ricevuti a terra nella zona geografica di Roma.

Lo scopo è di raccogliere informazioni utili ed approfondire le conoscenze riguardo le statistiche di propagazione in atmosfera, nelle varie condizioni meteorologiche che si presentano durante l'anno in zona, e di affinare la modellistica predittiva. Tale modellistica sarà molto utile per la progettazione di sistemi di comunicazione radio via satellite che su tali frequenze, con l'ausilio di eventuali tecniche adattative per migliorare la disponibilità del collegamento,

disporrebbero di maggiori larghezze di banda e consentirebbero quindi maggiori capacità trasmissive.

L'acquisizione dei dati ed una sua prima elaborazione è effettuata da un software, sviluppato in modo specifico per tale uso, con l'obiettivo di visualizzare immediatamente il risultato, memorizzarlo e renderlo trasferibile per l'elaborazione anche da parte degli altri centri di ricerca. La sperimentazione infatti è collocata nell'ambito di una cooperazione scientifica internazionale, a cui partecipano i maggiori Enti di ricerca europei, e comporterà pertanto lo scambio delle informazioni raccolte. In tal modo potrà essere possibile tenere conto delle varie realtà geografiche e climatiche, dipendenti da fattori quali: la latitudine, la vicinanza al mare, la copertura da parte del sistema d'antenna satellitare etc. per ottenere una estesa e globale visione europea dei fenomeni propagativi.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Dott. Rita Forsi e l'Ing. Giuseppe Pierrì per avere consentito e messo a disposizione la strumentazione del Laboratorio Microonde ISCTI, desiderano inoltre ringraziare Roberto Dal Molin ISCTI per il costante supporto tecnico prestato e Simone Chicarella DIET Sapienza Università di Roma per l'abile realizzazione del supporto meccanico dell'antenna del ricevitore.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Maral and M. Bousquet, "Satellite Communications Systems" 5th Ed., Wiley & Sons Ltd (Chichester, UK), 2009.
- [2] G. Brussaard and P.A. Watson, "Atmospheric modelling and millimetre wave Propagation", Chapman & Hall, London (UK), 1995.
- [3] F. S. Marzano and C. Riva, "Evidence of long-term correlation between clear-air scintillation and attenuation in microwave and millimeter-wave satellite links", IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 47, pp. 1749-1757, 1999.
- [4] ESA, "AlphaSat TDP-5 Scientific Experiment Link Budget Analysis", Project report, 2008.
- [5] A. Marziani, "Caratterizzazione dei componenti e analisi delle misure sul ricevitore satellitare Alphasat", Tesi di Laurea in Ingegneria Elettronica, Sapienza Università di Roma, Dicembre 2011.
- [6] ITU-Radiocommunication, Raccomandazioni P.618-9, P.676-7, P.840-3, Ginevra (CH), 2007.
- [7] F.S. Marzano, "Computing probability of total path attenuation in a given receiving site from ITU-R recommendations", Internal report, Sapienza Università di Roma, 2010
- [8] P. Salemme, "Telecomunicazioni via satellite a microonde: caratterizzazione del sistema ricevente Alphasat ed il radiometro a 90 GHz", Tesi Magistrale in Ingegneria Elettronica, Sapienza Università di Roma, Ottobre 2011.