

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Laurea Triennale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Tesi di laurea in Elettronica per le Telecomunicazioni

# STUDIO DELLA STAZIONE A TERRA PER IL SATELLITE ATMOCUBE

Laureanda:

Veronica Baldini

Relatore:

chiar.mo prof. Mario Fragiacomò

Correlatore:

chiar.mo prof. Mauro Messerotti

Anno accademico 2006/2007

# Sommario

L'oggetto di questo elaborato è lo studio di una possibile stazione a terra adeguata al satellite Atmocube, principalmente sulla base di una già esistente a Basovizza utilizzata per altri scopi ormai quindici anni orsono. Analizzando le caratteristiche che il satellite Atmocube prevede si cercherà di evidenziare le possibili scelte, i lavori in corso e i futuri cambiamenti da apportare a terra. Una delle problematiche principali che viene affrontata è la scelta di un opportuno ricetrasmittitore compatibile con quello da inserire sul satellite. Se questo progetto della stazione a terra non risulterà essere quello definitivo, mira comunque ad essere d'aiuto a chi dovrà completare il lavoro a terra in un vicino futuro.

# Indice

---

<b>ELENCO DELLE TABELLE E DELLE FIGURE</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUZIONE</b>	<b>3</b>
<b>CAPITOLO 1</b>	<b>4</b>
<b>Il satellite Atmocube</b>	<b>4</b>
1.1 Caratteristiche del satellite	4
1.2 La strumentazione scientifica	4
1.3 Il sistema di telecomunicazione a bordo.	5
1.3.1 Le frequenze utilizzate e la scelta della modulazione	5
1.3.2 Il ricetrasmittitore CC1100 e il sistema di amplificazione.	7
1.4 Il sistema di potenza	8
1.5 Il controllo del sistema	8
1.6 Data Budget	9
1.7 Link Budget	10
1.7.1 Uplink	11
1.7.2 Downlink	13
<b>CAPITOLO 2</b>	<b>15</b>
<b>La stazione a terra</b>	<b>15</b>
2.1 Introduzione alla stazione a terra	15
2.2 Schema della stazione a terra	16
2.3 Il sistema di antenne	17
2.3.1 Rotori per il puntamento automatico	17
2.3.2 Il commutatore e il cavo per la connessione con l'antenna.	18
2.4 Il ricetrasmittitore	18

2.4.1 Il TNC	19
2.5 Il controllo dei sistemi e la gestione dei dati	20
2.6 La network GENSO	21
<b>CAPITOLO 3</b>	<b>22</b>
<b>Studio sul ricetrasmittitore Kenwood TS790E</b>	<b>22</b>
3.1 Il Ricetrasmittitore Kenwood TS790E.	22
3.1.1 Specifiche del ricetrasmittitore	24
3.2 Misure sul funzionamento	26
3.2.1 Modalità trasmissione	27
3.2.1.1 Misura della massima potenza trasmessa	28
3.2.1.2 Misura della deviazione in frequenza	29
3.2.2 Modalità ricezione	30
3.2.2.1 Misura del S/N, SINAD, distorsione e tensione in uscita.	31
3.2.2.2 Risposta del ricevitore al variare della frequenza modulante	35
3.2.3 Verifica della compatibilità del Kenwood con il ricetrasmittitore CC1100	36
3.2.4 Conclusioni sul ricetrasmittitore TS790	41
<b>CAPITOLO 4</b>	<b>42</b>
<b>La scelta del ricetrasmittitore a terra</b>	<b>42</b>
4.1 Le possibili alternative al Kenwood	42
4.2 La scelta del CC1100 a terra	42
4.2.1 Caratteristiche del CC1100	43
4.2.2 Misure sul ricetrasmittitore CC1100	45
4.2.3 Inserimento del CC1100 nella stazione a terra per Atmocube.	47
<b>CAPITOLO 5</b>	<b>49</b>
<b>Lo schema completo della stazione a terra con la scelta di due CC1100</b>	<b>49</b>

5.1.1 Sistema di ricezione	49
5.1.2 Sistema di trasmissione	52
<b>CAPITOLO 6</b>	<b>54</b>
<b>Conclusioni</b>	<b>54</b>
<b>CC1100 Datasheet</b>	<b>56</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>58</b>

# Elenco delle tabelle e delle figure

---

Tabella 1.1	Frequenze e lunghezza d'onda	6
Figura 2.1	Diagramma a blocchi della stazione a terra	16
Figura 2.2	Diagramma a blocchi della stazione a terra con modem PSK e TNC	19
Figura 2.3	Gestione dati	20
Figura 3.1	Il ricetrasmittitore Kenwood TS790E	23
Tabella 3.1	Specifiche del ricetrasmittitore Kenwood TS790	25
Figura 3.2	Foto delle misure sul Kenwood: alimentatore, Kenwood, scatola delle misure, SMFP2	26
Figura 3.3	Schema delle misure con il Kenwood in modalità trasmissione	28
Tabella 3.1	Deviazione in frequenza e distorsione al variare dell'ampiezza del segnale modulante	29
Figura 3.4	Variazione della deviazione in frequenza al variare dell'ampiezza del segnale modulante	30
Figura 3.5	Schema delle misure con il Kenwood in modalità ricezione	31
Figura 3.6	S/N, SINAD, $V_{out}$ e distorsione, al variare della $P_{in}$	32
Tabella 3.2	Livello di tensione in uscita dal Kenwood, S/N, SINAD e distorsione, al variare della potenza del segnale ricevuto.	33
Tabella 3.3	Variazione della $V_{out}$ al variare della $P_{in}$ per segnali non modulati	34
Figura 3.7	Risposta del ricevitore al variare della frequenza modulante	35
Figura 3.8	Scheda con il CC1100 il TTL e il microprocessore.	36
Figura 3.9	Diagramma a blocchi delle misure: alimentatori, Kenwood, attenuatore, CC1100, SMFP2 e oscilloscopio	37

Figura 3.10 Sequenza: 5 zeri e 5 uni	38
Figura 3.11 Sequenza di 2 zeri e 2 uni	38
Figura 3.12 Sequenza di 1 zero e 1 uno	39
Figura 3.13 Sequenza casuale. In verde: segnale demodulato dal Kenwood, in blu: uni e zeri trasmessi dal CC1100, in rosso: durata pacchetto	40
Figura 4.1 Schema a blocchi del CC1100	43
Figura 4.2 Formato pacchetti del CC1100	44
Figura 4.3 Diagramma a blocchi delle misure sul CC1100	45
Figura 4.4 Analizzatore di spettro: picchi della modulazione 2-FSK	46
Figura 4.5 Oscilloscopio: visualizzazione dei pacchetti trasmessi	46
Figura 5.1 Schema a blocchi della stazione a terra con due CC1100.	50
Figura 5.2 Schema a blocchi del sistema di ricezione	51
Figura 5.3 Foto del circuito realizzato da Moretti, con in filtri ad elica	51
Figura 5.4 Parte del circuito di Moretti, con amplificatore e filtri ad elica	52

# Introduzione

---

La coinvolgente collaborazione tra studenti e professori dei dipartimenti di fisica e ingegneria dell'università di Trieste sta consentendo la realizzazione di un satellite di tipo amatoriale a scopo didattico. Il satellite Atmocube, che fa parte del progetto CubeSat che coinvolge più di 40 tra scuole superiori e università, mira ad essere uno dei nano satelliti italiani mandati in orbita tramite il lanciatore Vega alla fine di quest'anno. Infatti, se il progetto Atmocube a Trieste era solo un'idea, adesso grazie ai finanziamenti concessi, alla costanza e all'impegno dei professori e degli studenti e all'offerta del lancio è un progetto che si sta attivamente realizzando. La messa in orbita di un satellite, se pur di piccole dimensioni, richiede studi approfonditi nell'ambito della fisica e nei diversi dell'ingegneria. Atmocube diventa per questo un progetto didattico, che prosegue tra gli studenti come oggetto di tesi di laurea o per passione.

## Scopi della missione

Lo scopo del progetto Atmocube è quello di effettuare degli studi sulla Space Weather. Il lancio del satellite in alta atmosfera consente di ottenere, tramite opportuni strumenti di misura, dati sul campo magnetico terrestre e sulle radiazioni provenienti dal sole, corrispondenti a diverse posizioni del satellite durante la sua orbita. Questi fenomeni, come il vento solare, possono influenzare le prestazioni e l'affidabilità dei sistemi tecnologici nello spazio e a terra e possono mettere in pericolo la vita e la salute umana, è quindi utile poterne studiare gli effetti.

# Capitolo 1

---

## Il satellite Atmocube

### 1.1 Caratteristiche del satellite

Il satellite Atmocube è un cubo dalle facce di  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ , per un peso che non supera 1kg. L'orbita calcolata per il satellite è ellittica ed è compresa tra i 350 e i 1200 km di altezza dal suolo e  $71^\circ$  di inclinazione. La struttura esterna viene realizzata in alluminio e ricoperta da celle solari che consentono l'alimentazione del satellite. Un'antenna a dipolo è posizionata su una faccia libera, ed è destinata ad aprirsi al momento del rilascio del satellite in orbita. All'interno dello stesso troviamo cinque sezioni contenenti: il rivelatore al silicio e il GPS, le batterie e il magnetometro, il sistema di telecomunicazione a RF, il sistema di potenza, e l'On Board Data Handling. Di seguito si descrivono i diversi sistemi all'interno del satellite e le specifiche richieste da questo collegamento.

### 1.2 La strumentazione scientifica

Gli strumenti che effettueranno le misure di nostro interesse sullo studio dello Space Weather sono il rivelatore al silicio, il magnetometro e il GPS. Con il rivelatore al silicio è possibile misurare l'intensità delle radiazioni presenti nell'atmosfera terrestre. Queste radiazioni fanno parte del vento solare e variano in base all'intensità dell'attività solare. Il magnetometro è uno strumento che consente la misura del campo magnetico terrestre relativo a una data posizione del satellite. La variazione del campo magnetico viene rivelata da delle magnetoresistenze e tramite un ponte di Wheastone, un

convertitore e un microprocessore interno viene convertita in digitale. Lo strumento scelto per queste misure è il Honeywell HMC2003. La presenza di GPS permette di associare le misure effettuate dal magnetometro e dal rivelatore al silicio alla posizione in cui il satellite si trova. Il GPS da inserire nell'Atmocube è il SSTL SGR-05U, che è già stato sperimentato nello spazio e presenta costi contenuti. Questo GPS consente una precisione sulla posizione nell'orbita di 10 m, per un consumo di energia tra 0.5 e 0.8 W.

### 1.3 Il sistema di telecomunicazione a bordo.

Il sistema di telecomunicazione a bordo deve consentire l'invio delle misure effettuate e dei dati relativi allo stato del satellite e ricevere comandi dalla stazione a terra. In generale questo sistema comprende un trasmettitore, un ricevitore e un'antenna trasmittente e ricevente. Per Atmocube si è scelto un unico ricetrasmittitore sia per la trasmissione sia per la ricezione e un'unica antenna, anche perché lo spazio disponibile è molto ridotto. Alcune delle caratteristiche del sistema di telecomunicazione a bordo sono già fissate dagli standard radioamatoriali, come ad esempio la gamma di frequenze gratuite e i protocolli di comunicazione. Per altre caratteristiche si è valutata la scelta più opportuna.

#### 1.3.1 Le frequenze utilizzate e la scelta della modulazione

Il satellite Atmocube trasmette e riceve intorno alla frequenza UHF di 437 MHz, più precisamente è stata richiesta l'autorizzazione per le frequenze di:

- 437.490 MHz per il downlink
- 437.847 MHz per l'uplink

	<b>UPLINK</b>	<b>DOWNLINK</b>
<b>Frequenza</b> (MHz)	437.847	437.490
<b>Lunghezza d'onda</b> (m)	0.69	0.69

Tabella 1.1 Frequenze e lunghezza d'onda

Per le trasmissioni di tipo satellitare si adottano modulazioni di segnali che risentano il meno possibile delle attenuazioni, delle fluttuazioni dell'ampiezza del segnale, causate dal tipo di mezzo trasmissivo. La modulazione che si pensava di utilizzare è la FSK (Frequency Shift Keying), più precisamente la 2-FSK, in cui l'informazione viene associate a due valori diversi di frequenza. Le due forme d'onda trasmesse sono:

$$u_1 = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos 2\pi f_1 t \quad [1.1]$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{2E_s}{T}} \cos 2\pi f_2 t \quad [1.2]$$

Con  $\Delta f = f_1 - f_2$  intervallo tra due frequenze successive,  $E_s$  energia per simbolo, che nel caso di modulazione binaria coincide con energia per bit, e  $T$  intervallo di segnalazione. In questa modulazione ogni simbolo ha la stessa energia e la probabilità di errore per la modulazione 2-FSK risulta essere:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{E_s}{N_0}}\right) \quad [1.3]$$

in cui  $N_0$  rappresenta la densità spettrale di potenza del rumore gaussiano. La larghezza di banda di un segnale FSK con  $M$  forme d'onda è data dalla

relazione:  $W \cong \frac{M}{2T}$ , che nel caso binario diventa:  $W \cong \frac{1}{T}$ . Tale espressione viene ricavata considerando la condizione di ortogonalità, caratteristica dei segnali FSK.

Oltre a questa modulazione, è interessante la possibilità di utilizzare una modulazione GFSK, variante della FSK. Questo tipo di modulazione prevede l'introduzione di un filtro gaussiano che consente di sagomare lo spettro del segnale per limitare la banda, diminuendo in questo modo l'interferenza cocanale.

### 1.3.2 Il ricetrasmittitore CC1100 e il sistema di amplificazione.

Dallo studio effettuato dallo studente Giovanni Gobbesso su questo ricetrasmittitore della Chipcon[6], data la sua flessibilità di programmazione, le sue piccole dimensioni e il costo e consumo contenuti è risultata una buona scelta come ricetrasmittitore da inserire a bordo del satellite. Il CC1100 a bordo viene collegato tramite un commutatore all'antenna a dipolo posizionata su una delle facce del satellite per l'utilizzo della stessa sia in trasmissione che in ricezione. La minima potenza che la trasmissione satellitare richiede affinché il segnale sia ricevuto a terra è 2 Watt (33dBm)[par. 1.7]. L'inserzione di un circuito di amplificazione, per la potenza all'uscita del CC1100, consente l'incremento della potenza trasmessa dalla massima consentita dal CC1100[5], al valore minimo richiesto dalla comunicazione satellitare. Il progetto dell'amplificatore di potenza è stato svolto in precedenza dallo studente Mauro Popesso[8]. Anche in ricezione il sistema richiede il progetto di un amplificatore a basso rumore, studio effettuato da Manuel Tommasini[12], per ricevere in modo migliore il segnale

proveniente da terra. Lo schema del sistema di trasmissione e ricezione a bordo del satellite viene riportato di seguito.

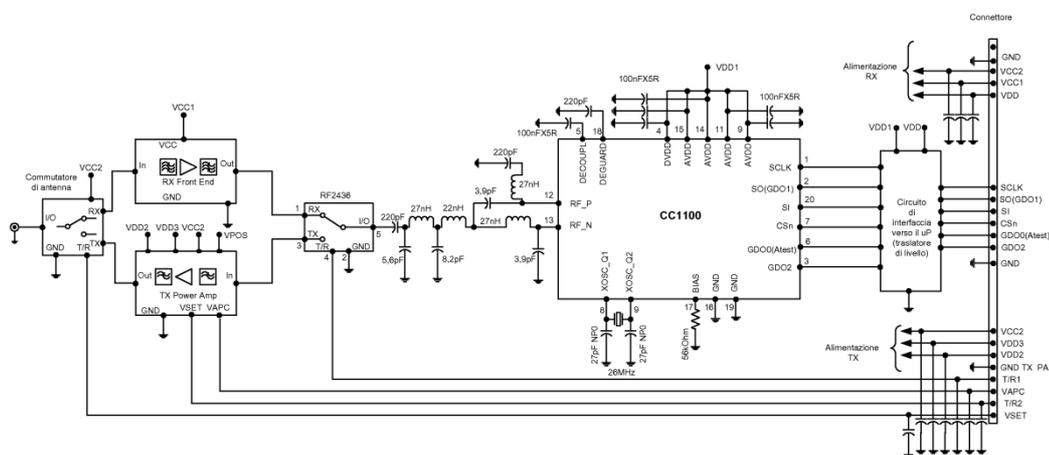


Figura 1.1 Diagramma a blocchi del sistema di telecomunicazione a bordo

## 1.4 Il sistema di potenza

Il satellite Atmocube è alimentato da batterie ricaricate da celle solari connesse in serie tra di loro. Lo studio della quantità e qualità di celle in base alla potenza richiesta dal sistema è ancora in corso di svolgimento. Valutando le varie tipologie di celle solari acquistabili, il consumo di tutte le componenti elettroniche del satellite e il tempo in cui i pannelli sono esposti al sole si cercherà di trovare la soluzione più opportuna per garantire il corretto apporto di energia alle batterie e quindi all'intero sistema.

## 1.5 Il controllo del sistema

Il funzionamento di tutti i sottosistemi del satellite Atmocube è gestito da un microcontrollore. La scelta di tale componente non è ancora definitiva, tra le alternative vi è il microcontrollore PIC 18F452. Questa componente

provvede a gestire i dati provenienti dai vari sensori, salvarlo nella memoria, prepararli alla trasmissione e mandarli al trasmettitore. Il sottosistema che si occupa di questo processo è l'On Board Data Handling. I dati che vengono inviati a terra riguardano le condizioni degli strumenti a bordo e le misure effettuate dal rivelatore al silicio, dal magnetometro, dai fotodiodi e dal GPS. Per quanto riguarda lo stato del satellite, si tiene conto delle seguenti misure:

- la corrente ricavata dalle celle solari
- il livello di alimentazione della batteria
- la temperatura interna del sistema
- il livello della memoria libera per il salvataggio dei dati a bordo
- il valore di potenza di segnale trasmesso in downlink oltre al livello del segnale ricevuto in uplink.

Questi valori ricevuti dall'operatore a terra consentono di monitorare il corretto funzionamento dei vari sottosistemi a bordo del satellite.

## 1.6 Data Budget

I dati raccolti da tutti gli strumenti di misura sono sovrastimati a 1kbyte. Per ogni orbita del satellite vengono fatte 20 misurazioni, una ogni 300 secondi. Considerando 14 il massimo numero di orbite in cui il satellite non è visibile dalla stazione a terra, il data budget totale è 280 kbytes, relativo alla prima trasmissione utile. Il sistema Atmocube utilizza una trasmissione a 9600 baud[par. 1.7], corrispondenti a 1.2 kbyte al secondo. Il tempo necessario al down link dei dati risulta quindi intorno a 250 secondi.

## 1.7 Link Budget

Il calcolo del link budget permette di considerare tutte le parti della comunicazione satellitare nel loro complesso: il satellite, il canale radio e la stazione a terra. Grazie alla stima del link budget si possono valutare a priori i guadagni e le perdite necessari o consentiti dei componenti che ancora non sono resi definitivi nell'intero sistema. Per effettuare il calcolo totale del link budget è necessario tener conto separatamente della tratta in uplink, dalla stazione a terra al satellite, e della tratta in down link dal satellite alla stazione a terra. Per entrambe le tratte si tiene conto in modo particolare dei seguenti fattori:

- Potenza a radiofrequenza, in uscita dal trasmettitore
- Il guadagno degli amplificatori
- Il guadagno e l'efficienza dell'antenna
- L'attenuazione di spazio libero
- Ulteriori perdite del segnale in propagazione
- Perdite della linea di trasmissione
- Temperatura di rumore del ricevitore
- Velocità di trasmissione dei dati
- Effetto Doppler

Per lo studio del link budget ci si è avvalsi di fogli di calcolo in Excel. Per ogni termine del link budget sono riportati i simboli, le unità di misura e la sorgente del valore calcolato. Tali valutazioni sono state effettuate, e sono ancora in corso di perfezionamento, dallo studente Alessandro Cuttin[8].

## 1.7.1 Uplink

NOME	SIMBOLO	UNITA	SORGENTE	VALORE		
				WORST	BEST	MEDIUM
Potenza trasmessa	P	W	parametro	10	10	10
Potenza trasmessa	P	dBW	$10\log(P)$	10	10	10
Attenuazione linea	Ll	dB	parametro	-2,7	-2,7	-2,7
Antenna, guadagno massimo in trasmissione	Gpt	dB	parametro	15	15	15
Antenna, ampiezza cono a 3 dB	zeta		parametro	15	15	15
Antenna, offset di puntamento	e		parametro	1,5	1,5	1,5
Att. Supp. per errore puntamento antenna	Lpt	dB	$-12(e/zeta)^2$	-0,12	-0,12	-0,12
Guadagno effettivo antenna trasmittente	Gt	dB	$Gpt+Lpt$	14,88	14,88	14,88
EIRP	EIRP	dBW	$P+Ll+Gt$	22,18	22,18	22,18
Attenuazione di spazio libero	Ls	dB	parametro	-154,179	-136,501	-150,573
Attenuazione per propagazione e polarizzazione	La	dB	parametro	0	0	0
Antenna, guadagno massimo in ricezione	Gpr	dB	parametro	2	2	2
Antenna, ampiezza cono a 3 dB	zeta		parametro	78	78	78
Antenna, offset di puntamento	e		parametro	15	15	15
Att. Supp. per errore puntamento antenna	Lpr	dB	$-12(e/zeta)^2$	-0,44378	-0,44378	-0,44378
Guadagno effettivo antenna ricevente	Gr	dB	$Gpr+Lpr$	1,556213	1,556213	1,556213
Temperatura di rumore di sistema	Ts	K		356,7637	356,7637	356,7637

Data Rate	R	bps	parametro	9600	9600	9600
Banda del ricevitore	B	Khz	Datashhet CC1100,p.30	58	58	58
Eb/N0 (1)	Eb/N0	dB		32,8116	50,4896	36,4169
Carrier to Noise density ratio	C/N0	dBHz	$C/N0 = Eb/N0 + 10\log R$	72,634	90,312	76,239
Received Isotropic Power	RIP	dBW	EIRP - Ls	-131,999	-114,321	-128,393
Carrier	C	dBW	$C = C/N0 + 10\log(kTsB)$	-112,8085	-95,1305	-109,2032
Carrier	C	W		5,24E-12	3,07E-10	1,20E-11
Carrier	C	dBm		-142,808	-125,130	-139,203
Carrier	C	V	$V = \sqrt{P \cdot R}$	1,62E-05	1,24E-04	2,45E-05
Carrier	C	Micro V		16,1828	123,8681	24,5088
BER richiesta	BER	---	parametro	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$
Eb/N0 richiesto (2)	Req Eb/N0	dB		13,3	13,3	13,3
Implementation loss (3)		dB	stima	-2	-2	-2
Margine di sistema		dB	$(1)-(2)+(3)$	17,5116	35,1896	21,1169
probabilità di errore con Eb/N0 ottenuto				5,08E-09	5,99E-13	7,97E-10

## 1.7.2 Downlink

La tratta in down link risulta essere quella più critica perché la potenza trasmissibile dal satellite è limitata.

NOME	SIMBOLO	UNITA	SORGENTE	VALORE		
				WORST	BEST	MEDIUM
Potenza RF in uscita CC1101	P'	dBm	parametro	10	10	10
Potenza RF in uscita CC1101	P'	dBW	$10\log(P)$	-20	-20	-20
Target potenza TX	P	W	parametro	2	2	2
Target potenza TX	P	dBW	$10\log(P)$	3,01	3,01	3,01
Guadagno PA	Gpa	dB	parametro	23,01	23,01	23,01
Attenuazione linea	Ll	dB	parametro	0	0	0
Antenna, guadagno massimo in trasmissione	Gpt	dB	parametro	2	2	2
Antenna, ampiezza cono a 3 dB	zeta		parametro	78	78	78
Antenna, offset di puntamento	e		parametro	15	15	15
Att. Supp. per errore puntamento antenna	Lpt	dB	$-12(e/zeta)^2$	-0,44	-0,44	-0,44
Guadagno effettivo antenna trasmittente	Gt	dB	Gpt+Lpt	1,56	1,56	1,56
EIRP	EIRP	dBW	$P'+Gpa+Ll+Gt$	4,5665	4,5665	4,5665
EIRP	EIRP	dBW	$P+Ll+Gt$	4,5665	4,5665	4,5665
Attenuazione di spazio libero	Ls	dB	parametro	-154,18	-136,50	-150,57
Attenuazione per propagazione e polarizzazione	La	dB	parametro	0	0	0
Antenna, guadagno massimo in ricezione	Gpr	dB	parametro	15	15	15
Antenna, ampiezza cono a 3 dB	zeta		parametro	15	15	15
Antenna, offset di puntamento	e		parametro	1,5	1,5	1,5
Att. Supp. per errore puntamento antenna	Lpr	dB	$-12(e/zeta)^2$	-0,12	-0,12	-0,12
Guadagno effettivo antenna ricevente	Gr	dB	Gpr+Lpr	14,88	14,88	14,88
Temperatura di rumore di sistema	Ts	K		3592,4	3592,4	3592,4

Data Rate	R	bps	parametro	9600	9600	9600
Banda del ricevitore	B	Khz	Datashhet CC1100,p.30	58	58	58
Eb/N0 (1)	Eb/N0	dB		18,492	36,169	22,097
Carrier to Noise density ratio	C/N0	dBHz	$C/N0 = Eb/N0 + 10\log R$	58,315	75,992	61,919
Received Isotropic Power	RIP	dBW	EIRP - Ls	-149,61	-131,93	-146,00
Carrier	C	dBW	$C = C/N0 + 10\log(kTsB)$	-117,1	-99,4	-113,4
Carrier	C	W		1,95E-12	1,14E-10	4,47E-12
Carrier	C	dBm		-147,1	-129,4	-143,4
Carrier	C	V	$V = \sqrt{P \cdot R}$	9,88E-06	7,56E-05	1,50E-05
Carrier	C	MicroV		9,8758	75,5918	14,9567
BER richiesta	BER	---	parametro	$10^{-5}$	$10^{-5}$	$10^{-5}$
Eb/N0 richiesto (2)	Req Eb/N0	dB		13,3	13,3	13,3
Implementation loss (3)		dB	stima	-2	-2	-2
Margine di sistema		dB	$(1) - (2) + (3)$	3,1919	20,8699	6,7972
probabilità di errore con Eb/N0 ottenuto				8,53E-06	9,04E-10	1,30E-06

## Capitolo 2

---

### La stazione a terra

#### 2.1 Introduzione alla stazione a terra

Il progetto di un satellite è sviluppato di pari passo alla realizzazione della sua stazione a terra. La stazione a terra ha il compito di monitorare il funzionamento della strumentazione di bordo e acquisire i dati delle misurazioni effettuate dal satellite, tramite un adeguato collegamento. È ovviamente necessario che ci sia compatibilità tra le specifiche del satellite [cap. 1], e le caratteristiche della stazione a terra. La stazione che è stata scelta per consentire le comunicazioni con il satellite Atmocube si trova presso l'osservatorio astronomico di Trieste a Basovizza (45°38'N 13°52'E), il cui utilizzo è stato concesso dal responsabile dell'osservatorio, il professor Mauro Messerotti. La strumentazione presente in questo luogo era stata utilizzata da radioamatori alla fine degli anni novanta ed è sembrata idonea per i nostri scopi. In questo luogo infatti aveva sede la stazione a terra della missione ItamSat che ha provveduto nel 1991 al lancio di un satellite amatoriale LEO della tipologia dei Microsat. Quando questa stazione a terra è entrata in disuso, la strumentazione presente è stata conservata presso l'osservatorio astronomico che ne ha quindi reso possibile l'utilizzo per una nuova missione. Essendo comunque passati alcuni anni dal suo utilizzo e avendo a che fare con un nuovo progetto nanosatellitare sono iniziati e sono ancora in corso diversi lavori di manutenzione per consentirne il perfetto funzionamento.

## 2.2 Schema della stazione a terra

Una stazione a terra adeguata a una comunicazione satellitare necessita della presenza di diversi strumenti: un'antenna trasmittente e un trasmettitore, un'antenna ricevente e un ricevitore. Data la comunicazione digitale è indispensabile l'aggiunta di un modem, di uno strumento che implementi un protocollo per la comunicazione dati e di un computer. Per quanto riguarda la stazione di Basovizza lo schema completo di un'ipotetica realizzazione è rappresentato in figura 2.1.

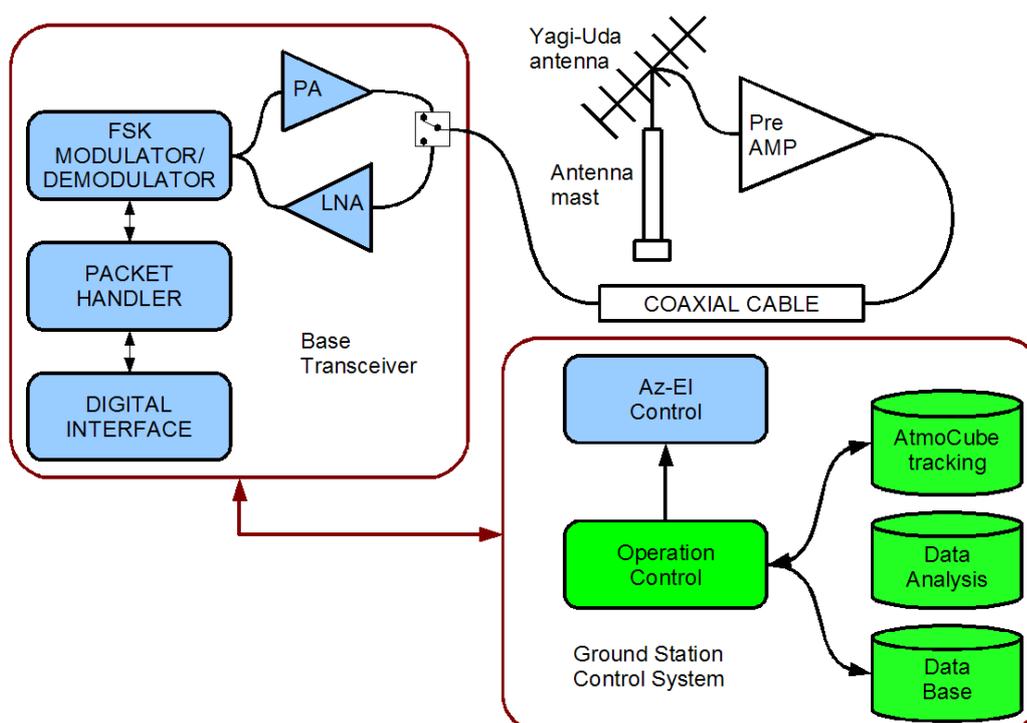


Figura 2.1 Diagramma a blocchi della stazione a terra

Viene utilizzata un'unica antenna UHF sia per la trasmissione che per la ricezione tramite un commutatore d'antenna. Un preamplificatore a basso rumore vicino l'antenna consente un'amplificazione del segnale ricevuto prima del passaggio attraverso il cavo coassiale che collega antenna e

ricevitore. Il ricetrasmittitore adatto a trasmissioni di tipo radioamatoriali è collegato a un microprocessore. Il computer collegato tramite un traslatore di livello, gestisce in fine il controllo dei vari sistemi e dei dati trasmessi e ricevuti. Di seguito si analizzano più nello specifico le caratteristiche dei vari blocchi.

## 2.3 Il sistema di antenne

Le antenne di cui è provvista la stazione a terra sono due antenne Yagi-Uda a 10 e 17 elementi. Questa tipologia di antenne, in alluminio, prevede una serie di elementi che fungono da direttori per irradiare il campo nella direzione desiderata e una serie di riflettori il cui scopo è quello di limitare l'irradiazione nella direzione opposta. Le antenne sono alimentate attraverso una linea di trasmissione, nel nostro caso un cavo coassiale. Ciascun parametro di progetto delle antenne viene di solito espresso in termini di lunghezza d'onda, in modo da poter facilmente calcolare i dati per ciascuna frequenza operativa. Le antenne trasmettono alle frequenze di 430 e 144 MHz e consentono una polarizzazione doppia; l'antenna di nostro interesse è quella a 430 MHz a 10 elementi. Il guadagno delle antenne Yagi aumenta all'aumentare del numero di elementi. Il suo massimo guadagno è stimato attorno ai 15 dB.

### 2.3.1 Rotori per il puntamento automatico

Le antenne Yagi-Uda si muovono attraverso rotor. I rotor consentono manualmente tramite un controllore un movimento in elevazione (da 0° a 180°) e in azimuth (da 0° a 360°). Dal sopralluogo che è stato fatto alcuni mesi fa alla stazione a terra di Basovizza è emerso che sono necessari lavori di manutenzione per ripristinare il movimento down in elevazione che sembra essere bloccato. Per monitorare il costante movimento del satellite

che sarà mandato in orbita è necessario implementare un tracking automatico delle antenne, attraverso un software opportuno sul server della stazione a terra.

### 2.3.2 Il commutatore e il cavo per la connessione con l'antenna.

Un commutatore d'antenna consente l'utilizzo dell'antenna Yagi-Uda a 430 MHz sia per la trasmissione che per la ricezione del segnale. Per la ricezione si pensa di inserire vicino all'antenna un filtro RF che limiti la banda del segnale ricevuto e un LNA (Low Noise Amplificator) che consenta l'amplificazione del segnale prima del passaggio sul cavo. Il cavo che deve collegare antenna e sistema di trasmissione è un cavo coassiale, che deve essere ripristinato.

## 2.4 Il ricetrasmittitore

Sulla base delle caratteristiche del sistema di telecomunicazione utilizzato e sulle specifiche del satellite che si desidera mandare in orbita, è necessario assicurare la corretta comunicazione tra di esso e la stazione a terra. Questo significa che i segnali in up link e down link devono essere correttamente trasmessi e ricevuti tra il ricetrasmittitore a terra e quello sul satellite. Lo strumento adibito a questo scopo per la missione ItamSat precedentemente allestita a Basovizza e di cui siamo entrati a disposizione è il Kenwood TS790E. Nei seguenti capitoli si sviluppa un'analisi di questo ricetrasmittitore e uno studio di un sistema trasmittente e ricevente adatto alle specifiche del satellite Atmocube.

## 2.4.1 Il TNC

Affinché i dati trasmessi dal satellite siano compatibili col sistema a terra è necessario che venga implementato lo stesso protocollo del datalayer della pila ISO OSI della comunicazione. Questo consente di trattare i dati nello stesso formato sul satellite e a terra. Lo strumento adibito a questo scopo è il TNC (*Terminal Node Controller*) Pakratt 232 in grado di implementare il protocollo, tipico di queste comunicazioni radioamatoriale, AX.25. L'utilizzo del TNC è trascurabile se il ricetrasmittitore provvede autonomamente a impacchettare i dati. Di seguito si riporta lo schema della della stazione a terra con gli strumenti precedentemente utilizzati, tra cui il TNC.

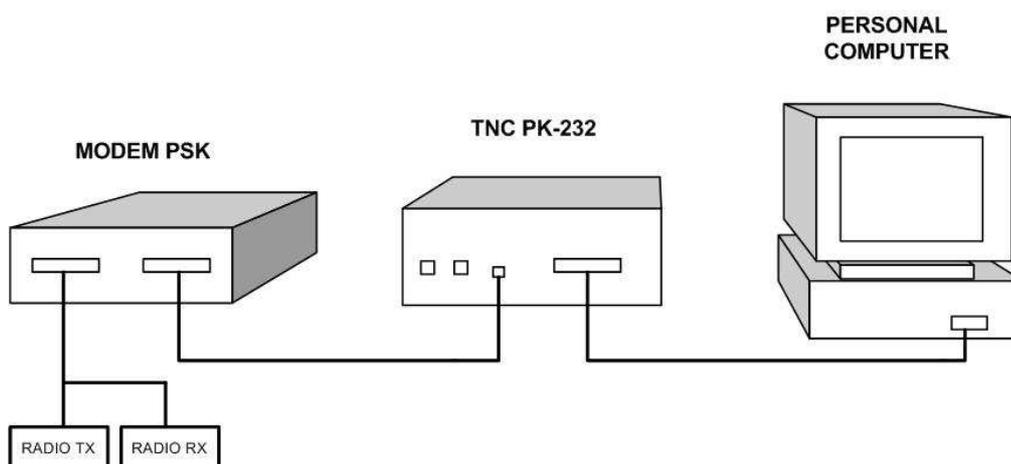


Figura 2.2 Diagramma a blocchi della stazione a terra con modem PSK e TNC

## 2.5 Il controllo dei sistemi e la gestione dei dati

Il ricetrasmittitore comunica tramite un traslatore di livello con un microprocessore in grado di gestirne il funzionamento. Il microprocessore viene a sua volta connesso al computer. Il server computer necessita di numerose interfacce per tutte le operazioni che è necessario svolgere a terra. È necessaria un'interfaccia per monitorare lo stato di salute del satellite: la corrente ricavata dalle celle solari, la temperatura interna del satellite, la quantità di memoria disponibile e usata e i livelli di potenza trasmessi e ricevuti del segnale. Un software adeguato sul computer deve inoltre consentire il monitoraggio dello spostamento del satellite sulla sua orbita e quindi regolare di conseguenza lo spostamento dell'antenna Yagi-Uda. I dati scientifici provenienti dal rivelatore al silicio, dal magnetometro e dal GPS, vengono raccolti nel database in formato testuale o in un sito web dedicato. I software per la decodifica dei dati, il controllo in tempo reale e l'analisi sono sviluppati nei linguaggi di programmazione IDL, C++ e matlab.

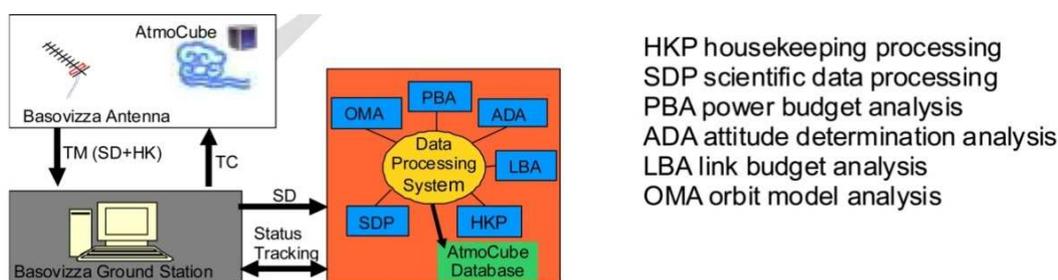


Figura 2.3 Gestione dati

## 2.6 La network GENSO

Il gruppo dedito alla realizzazione del progetto Atmocube, ambisce all'adesione alla network GENSO (Global Educational Network for Satellite Operations). Tipicamente i satelliti realizzati a scopo didattico in bande radioamatoriali possiedono le stesse caratteristiche: sono satelliti in orbita bassa (LEO), che trasmettono a bassa potenza e necessitano di protocolli di comunicazione (come l'AX.25). Solitamente è una singola stazione a terra a monitorare la posizione del satellite, il suo funzionamento e a raccogliere i dati che il satellite invia. Durante la sua orbita il satellite è per la maggior parte del tempo non visibile dall'operatore a terra e per il tempo di non visibilità la stazione a terra è inattiva. Lo standard GENSO, che dovrebbe entrare in vigore da novembre 2008, mira a sviluppare una network globale che consenta alle stazioni a terra di tipo radio amatoriale di essere collegate, di comunicare con tutti gli altri satelliti e di consentire la condivisione dei dati tra gli operatori via Internet. Non appena i requisiti richiesti da GENSO per l'adesione risulteranno definiti, si potranno studiare le modifiche a terra che l'adesione a questo standard comporterebbe.

## Capitolo 3

---

# Studio sul ricetrasmittitore Kenwood TS790E

### 3.1 Il Ricetrasmittitore Kenwood TS790E.

Il ricetrasmittitore Kenwood TS790E era usato alla fine degli anni novanta per la missione ItamSat, la cui stazione a terra era situata all'OAT di Basovizza. Questo ricevitore è analogico a modulazioni FM e AM-SSB. Esso consente di trasmettere e ricevere alle frequenze radioamatoriali intorno a: 144MHz, 430MHz e 1200MHz, corrispondenti a lunghezze d'onda di 2 m, 70 cm e 23 cm. Due display, uno principale uno secondario, consentono la visualizzazione digitale delle frequenze che si stanno utilizzando, che possono essere diverse per la trasmissione e per la ricezione. Tramite una manopola che regola un oscillatore variabile, si può far variare la frequenza fino a un minimo di 5 Hz alla volta e inoltre selezionare i canali di frequenza che possono venir memorizzati sullo strumento. Su fronte del Kenwood sono presenti i jack *phone* e *microphone* per il collegamento con il microfono e con le cuffie; sul retro sono presenti diversi connettori: per la connessione con antenne alle frequenze sopra elencate, per il collegamento con il computer, per il controllo di un preamplificatore o di altre strumentazioni elettroniche esterne, per il collegamento con una TV amatoriale e per la comunicazione dati. Il funzionamento di un ricetrasmittitore prevede che esso soddisfi in trasmissione e in ricezione caratteristiche diverse.

Viene svolto in seguito uno studio sulle modalità di funzionamento di questo strumento e un'analisi sulla possibilità di sfruttarlo come ricetrasmittitore della stazione a terra per il progetto Atmocube.



Figura 3.1 Il ricetrasmittitore Kenwood TS790E

### 3.1.1 Specifiche del ricetrasmittitore

Si riportano in seguito le specifiche del ricetrasmittitore Kenwood, presenti sul suo manuale di utilizzo.

Specifications			Model	TS-790A	TS-790E	
General	Frequency range	2 m band		144 ~ 148 MHz	144 ~ 146 MHz	
		70 cm band		430 ~ 450 MHz*1	430 ~ 440 MHz	
		23 cm band		1240 ~ 1300 MHz (Option)		
	Mode	J3E (LSB, USB), A1A (CW), F3E (FM)				
	Antenna impedance	50 ohms				
	Power requirement	13.8 VDC ± 15%				
	Grounding	Negative				
	Current drain	Receive mode with no input signal		2.5 A		
		Transmit mode	2 m band	12 A		
			70 cm band	15 A		
			23 cm band	8 A		
	Operating temperature	- 10 to + 50°C (+ 14 to + 122°F)				
	Frequency stability (Except FM mode)	Less than ± 3 PPM				
	Dimensions (W×H×D) (Projections included)	342 × 134 × 369 mm (13-15/32" × 5-9/32" × 14-17/32")				
Weight	9.2 kg (20.2 lbs)					
Transmitter	Output power	2 m band	LSB·USB	35 W		
			FM·CW	45 W		
		70 cm band	LSB·USB	30 W		
			FM·CW	40 W		
	23 cm band	LSB, USB, CW, FM		10 W		
	Modulation	LSB, USB		Balanced modulation		
		FM		Reactance modulation		
	Spurious radiation	2 m/70 cm band		Less than - 60 dB		
		23 cm band		Less than - 50 dB		
	Carrier suppression	More than 40 dB (with 1.5 kHz reference)				
	Unwanted sideband suppression	More than 40 dB (with 1.5 kHz reference)				
Maximum frequency deviation (FM)	± 5 kHz					
Frequency response (- 6 dB) (SSB mode only)	400 to 2600 Hz					
Microphone impedance	600 ohms					
Receiver	Circuitry	2 m band	LSB·USB·CW	Single conversion superheterodyne		
			FM	Double conversion superheterodyne		
		70 cm band	LSB·USB·CW	Double conversion superheterodyne		
			FM	Triple conversion superheterodyne		
		23 cm band	LSB·USB·CW	Triple conversion superheterodyne		
			FM	Quadruple conversion superheterodyne		
	Intermediate frequency	MAIN				
			1st IF	2nd IF	3rd IF	4th IF
		2 m band	10.695 MHz	* 455 kHz	—	—
		70 cm band	75.925 MHz	10.695 MHz	* 455 kHz	—
23 cm band		287.175 MHz	41.415 MHz	10.695 MHz	* 455 kHz	
SUB RX						
		1st IF	2nd IF	3rd IF	4th IF	
2 m band		10.595 MHz	* 455 kHz	—	—	
70 cm band	75.925 MHz	10.595 MHz	* 455 kHz	—		
23 cm band	287.075 MHz	41.315 MHz	10.595 MHz	* 455 kHz		

\* : FM only

<b>Receiver</b>	Sensitivity	LSB, USB, CW (at 10 dB S + N/N)	2 m band	Less than 0.16 $\mu$ V
			70 cm band	Less than 0.16 $\mu$ V
			23 cm band	Less than 0.16 $\mu$ V
		FM (at 12 dB SINAD)	2 m band	Less than 0.22 $\mu$ V
			70 cm band	Less than 0.22 $\mu$ V
			23 cm band	Less than 0.22 $\mu$ V
	Selectivity	LSB, USB		- 6 dB: 2.1 kHz, - 60 dB: 4.8 kHz
		FM		- 6 dB: 12 kHz, - 60 dB: 24 kHz
		CW		- 6 dB: 500 Hz, - 50 dB: 2 kHz
	Image ratio	2 m band		More than 65 dB
		70 cm band		More than 60 dB
		23 cm band		More than 55 dB
	IF SHIFT variable range		More than $\pm$ 0.9 kHz	
	RIT variable range	LSB, USB, CW		$\pm$ 1.9 kHz
		FM		$\pm$ 9.9 kHz
Squelch sensitivity	LSB, USB, CW		Less than 0.20 $\mu$ V	
	FM		Less than 0.16 $\mu$ V	
Output			1.5 W across 8 ohms load (10% distortion)	
Output load impedance			8 ohms	

**Notes:**

1. \*1: Frequency range for M2 type is 430~440 MHz.
2. Circuit and ratings are subject to change without notice due to advancements in technology.

**2-2. ACCESSORIES**

Unpack your TS-790A/790E carefully and confirm that it is supplied with the following accessories.

Dynamic microphone .....	T91-0352-15.....	1 ea.
DIN plug (7-pin) .....	E07-0751-05.....	1 ea.
DIN plug (13-pin) .....	E07-1351-05.....	1 ea.
DC power cable assembly .....	E30-2065-05.....	1 ea.
Fuse (15A) .....	F05-1531-05.....	1 ea.
Connector cable for the Tone unit (Except U.K. and Europe version) ...	E31-3453-05.....	1 ea.
Control location sticker .....	B42-3314-04.....	1 ea.
External control Instruction Manual .....	B50-8262-XX.....	1 copy
Instruction Manual .....	B50-8254-XX.....	1 copy
Warranty card (U.S.A. and Europe version only) .....		1 ea.

After unpacking

Shipping container:

Save the boxes and packing in the event your unit needs to be transported for remote operation, maintenance, or service.

Tabella 3.1 Specifiche del ricetrasmittitore Kenwood TS790

## 3.2 Misure sul funzionamento

Tramite l'autorizzazione fornitaci dall'osservatorio astronomico è stato possibile trasferire lo strumento nel dipartimento di elettronica elettrotecnica ed informatica dell'università e studiarne il funzionamento con l'aiuto del professor Fragiacomò.

### **Lo strumento di misura: SMFP2 Rohde&Schwarz.**

Le misure effettuate sul ricetrasmittitore Kenwood sono state svolte principalmente utilizzando il Mobile Tester SMFP2 della Rohde&Schwarz. Tale strumento è in grado di generare segnali di tipo audio e segnali modulati a radiofrequenza da 0.4 a 1000 MHz; può venir utilizzato come analizzatore di modulazione e consente di effettuare misure sull'indice di modulazione, sul S/N, SINAD, della distorsione, della deviazione in frequenza oltre che del livello del segnale che gli si presenta in ingresso. Tramite una tastiera numerica possono venir modificati alcuni parametri o possono venir selezionate le funzioni di misura desiderate. È inoltre presente un piccolo oscilloscopio in grado di visualizzare la forma d'onda del segnale modulante. Per avvantaggiare il collegamento con le uscite e gli ingressi del Kenwood: jack *phone* e *microphone*, e per selezionare la modalità trasmissione/ricezione dello strumento, è stata realizzata una scatola con



Figura 3.2 Foto delle misure sul Kenwood: alimentatore, Kenwood, scatola delle misure, SMFP2

connettori BNC per i cavi coassiali, che funge da tramite tra i connettori dedicati del ricetrasmittitore e lo strumento di misura.

Le frequenza a cui si cerca di mantenere sintonizzati Kenwood e SMFP2 durante la serie di misure è 437 MHz, come sarebbe richiesto dalla comunicazione con Atmocube. Tuttavia c'è sempre una lieve variazione di frequenza tra gli strumenti causata dalla deviazione in frequenza di uno dei due.

### 3.2.1 Modalità trasmissione

Un trasmettitore possiede generalmente le seguenti caratteristiche:

- Frequenza di trasmissione e banda occupata dal segnale trasmesso
- Potenza trasmessa
- Tipologia di modulazione usata
- Emissione di segnali indesiderati (ad esempio vicini alla portante)
- Distorsione del segnale modulato
- Rumore su canale adiacente.

Le misure di nostro interesse hanno riguardato la potenza massima che il Kenwood è in grado di trasmettere, l'indice di modulazione (deviazione in frequenza) e la distorsione del segnale modulante trasmesso. Per effettuare queste misure si collega lo strumento di misura all'uscita a 430 MHz sul retro del ricetrasmittitore con un cavo da 50Ω di impedenza e, attraverso la scatola utilizzata per le misure, all'uscita *microphone* sul fronte del Kenwood [fig 3.3]. In questo modo si generano tramite l'SMFP2 segnali audio variabili, trasmessi poi dal Kenwood e analizzati dallo stesso SMFP2, che funziona in questo caso anche da analizzatore di modulazione.

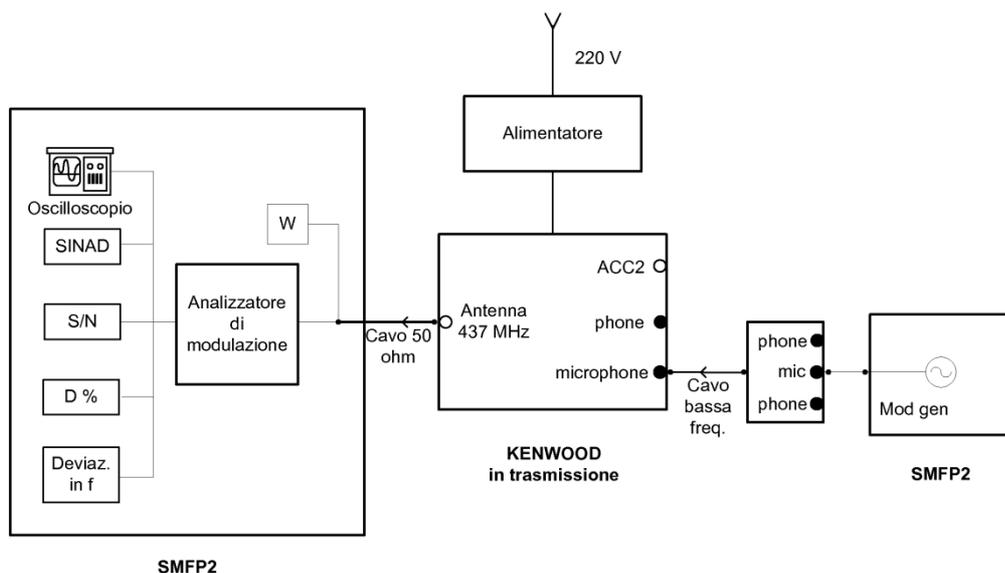


Figura 3.3 Schema delle misure con il Kenwood in modalità trasmissione

### 3.2.1.1 Misura della massima potenza trasmessa

Inserendo un wattmetro all'uscita a 430 MHz del Kenwood si è potuta misurare la potenza massima che è in grado di trasmettere. Per queste misure si mantengono i seguenti valori:

- frequenza di trasmissione: 437 MHz del Kenwood, visualizzata 437.00021 MHz sul SMFP2
- la frequenza di modulazione di 1 kHz dell'SMFP2
- indice di modulazione variabile

Dalle specifiche sul manuale di utilizzo [par. 3.1.1] la potenza massima in uscita è stimata essere 40 Watt. Dalle misure effettuate risulta invece che il livello massimo della potenza in uscita è 31.5 Watt, pari a 44.9 dBm.

### 3.2.1.2 Misura della deviazione in frequenza

Sempre con la connessione al jack *microphone* sul Kenwood, tramite l'SMFP2 che genera segnali audio di ampiezza variabile viene misurata la deviazione in frequenza del trasmettitore relativa alla variazione del livello di ampiezza del segnale modulante. La deviazione in frequenza rappresenta la massima differenza tra la portante modulata e la frequenza della portante non modulata:

$$\Delta f_p = k_f \frac{V_m}{2\pi} \quad [3.1]$$

con  $V_m$  ampiezza della modulante,  $k_f$  costante di proporzionalità caratteristica del modulatore. Per questo calcolo si considera il valore di deviazione più alto, quello più basso e il valore medio misurato. A causa delle componenti non lineari del trasmettitore, si è misurata anche la distorsione del segnale relativa ai livelli considerati. Nella tabella seguente si riporta l'andamento della distorsione in percentuale e la deviazione in frequenza.

V (mV)	- $\Delta f$ (kHz)	f (kHz)	+ $\Delta f$ (kHz)	d %
1.0	1.60	1.58	1.56	2.5
1.5	2.30	2.26	2.20	3.4
2.0	2.98	2.88	2.82	4.5
2.5	3.62	3.50	3.40	5.2
3.0	4.22	4.06	3.90	6.0
3.5	4.60	4.34	4.10	10.8
4.0	4.64	4.40	4.16	18.9
5.0	4.64	4.45	4.26	26.0

Tabella 3.1 Deviazione in frequenza e distorsione al variare dell'ampiezza del segnale modulante

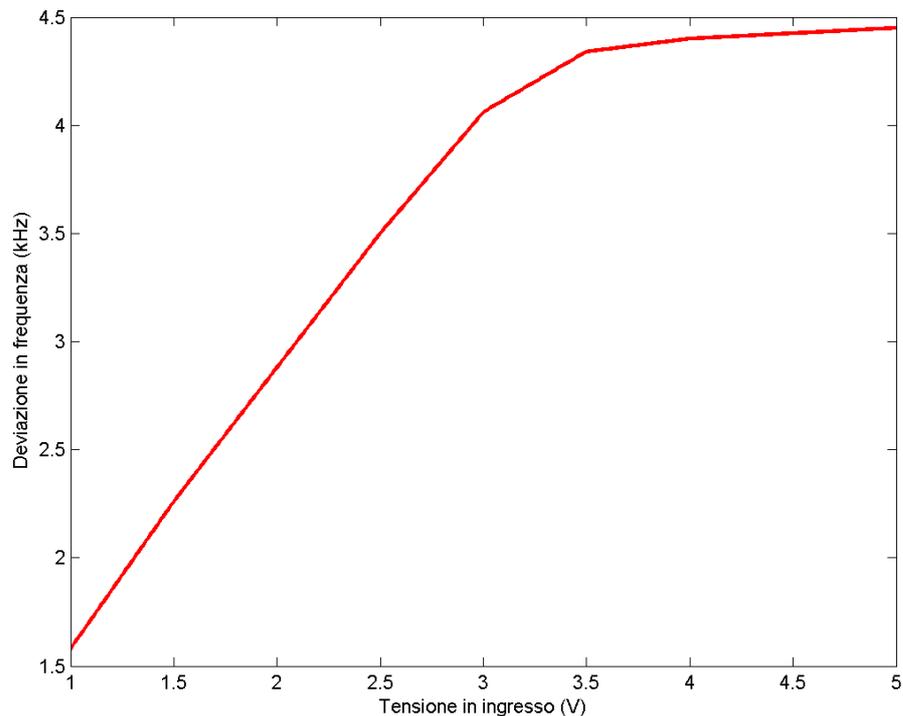


Figura 3.4 Variazione della deviazione in frequenza al variare dell'ampiezza del segnale modulante

### 3.2.2 Modalità ricezione

In questo caso l'SMFP2 funge da generatore di segnali a radiofrequenza modulati, ricevuti dal Kenwood attraverso il cavo a  $50\Omega$  collegato al connettore 430 MHz sul retro del ricevitore [fig. 3.5]. Lo stesso SMFP2, connesso al jack *phone* del Kenwood attraverso la scatola delle misure, consente di effettuare misure sul funzionamento del ricevitore.

Tra le caratteristiche di un ricevitore, quali:

- Frequenza e banda di ricezione
- Sensibilità
- Selettività del segnale desiderato

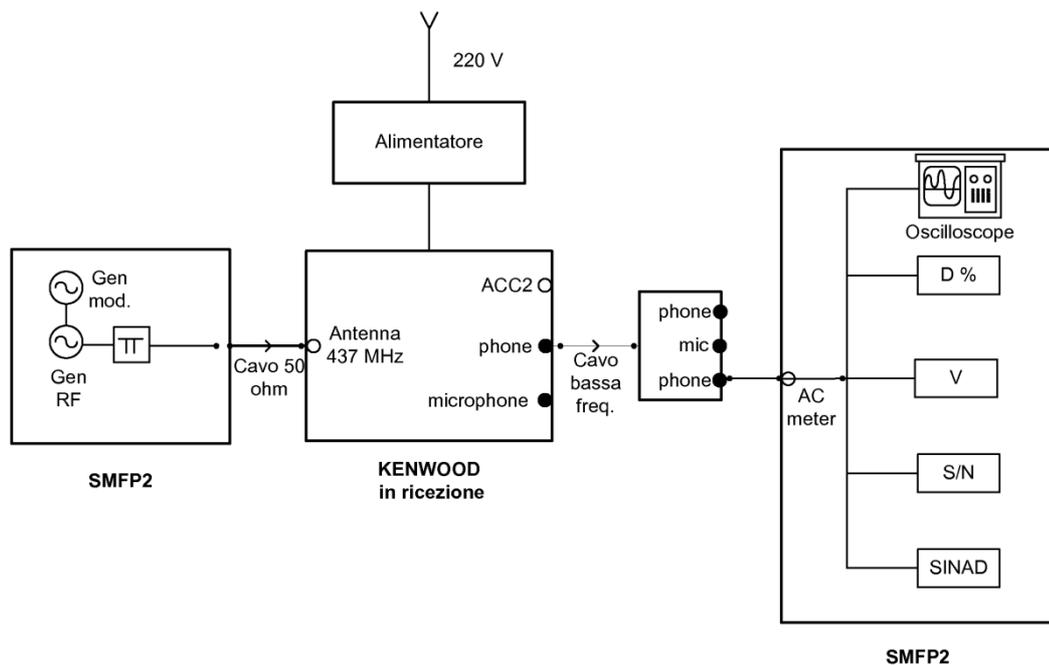


Figura 3.5 Schema delle misure con il Kenwood in modalità ricezione

è stato possibile tramite l'SMFP2 studiare la sensibilità del ricevitore e la sua risposta in frequenza al variare della potenza del segnale trasmesso dal generatore SMFP2.

### 3.2.2.1 Misura del S/N, SINAD, distorsione e tensione in uscita.

Il segnale ricevuto dal Kenwood viene prelevato attraverso la scatola delle misure dall'uscita *phone* e visualizzato sul SMFP2. Tramite questo strumento, al variare dei dBm di potenza del segnale trasmesso verso il Kenwood, si possono analizzare le variazioni del S/N, SINAD, distorsione e livello del segnale demodulato dal ricetrasmittitore, direttamente visualizzati sui display dell'SMFP2 o calcolati selezionando i tasti relativi. Questa serie di misure è stata svolta impostando:

- 437 MHz frequenza di ricezione del Kenwood, corrispondente a 436.9994 MHz sull'SMFP2
- indice di modulazione dell'SMFP2 a 3 kHz

Dalla figura 3.6 e dalla tabella 3.2 si può notare il modo in cui S/N e SINAD, misurati in dB, calano al diminuire della potenza del segnale ricevuto dal Kenwood, e di quanto aumenti la distorsione del segnale ricevuto: infatti, al diminuire della potenza del segnale, l'effetto del rumore e della distorsione sono più evidenti. Il calcolo del SINAD tiene conto della distorsione oltre che del rumore:

$$\text{SINAD} = \frac{S + N}{S + N + D}$$

Tramite lo strumento di misura viene rilevato anche il livello di tensione del segnale demodulato dal Kenwood, misurato in mV. Tutti i valori misurati sono risultati molto oscillanti, vengono pertanto considerati per ciascuna misura circa i valori medi visualizzati sui diversi display dell'SMFP2.

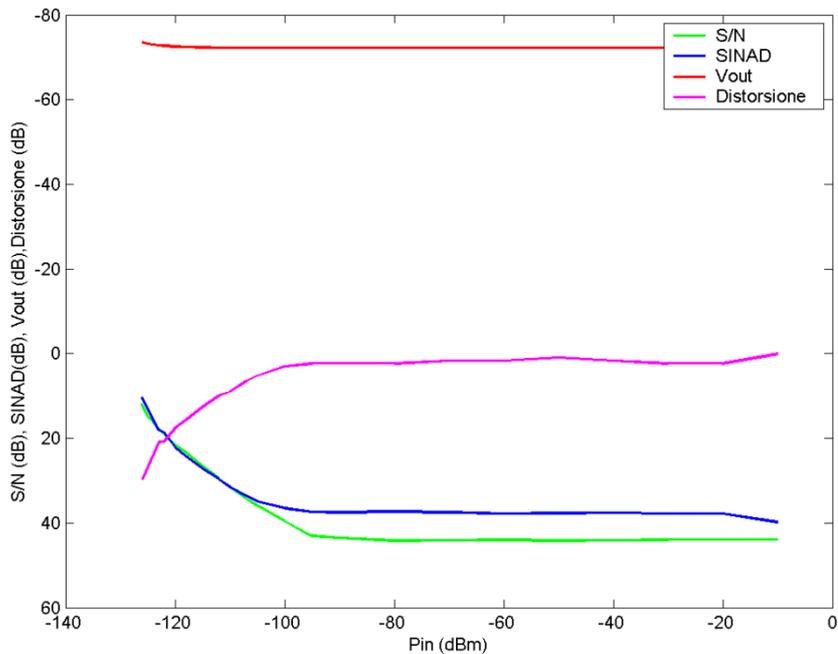


Figura 3.6 S/N, SINAD,  $V_{out}$  e distorsione, al variare della  $P_{in}$

<b>P<sub>in</sub>(dBm)</b>	<b>V<sub>out</sub>(mV)</b>	<b>S/N(dB)</b>	<b>SINAD(dB)</b>	<b>d %</b>
-10	0.238	43.9	39.7	01.0
-20	0.241	43.9	37.7	01.3
-30	0.241	43.8	37.7	01.3
-40	0.241	44.0	37.5	01.2
-50	0.242	44.1	36.0	01.5
-60	0.243	44.0	37.7	01.2
-70	0.243	44.0	37.4	01.2
-80	0.243	44.1	37.2	01.3
-90	0.243	43.4	37.4	01.3
-95	0.243	43.0	37.3	01.3
-100	0.243	39.5	36.5	01.4
-105	0.243	35.8	34.8	01.8
-107	0.242	34.2	33.4	02.1
-110	0.241	31.5	31.4	02.8
-112	0.241	29.4	29.6	03.1
-115	0.240	26.5	27.1	04.2
-118	0.235	23.2	24.1	06.0
-120	0.235	21.5	22.0	07.5
-122	0.230	18.8	18.5	10.9
-123	0.227	17.6	17.9	11.0
-125	0.217	14.7	12.9	21.5
-126	0.208	12.5	10.3	30.0

Tabella 3.2 Livello di tensione in uscita dal Kenwood, S/N, SINAD e distorsione, al variare della potenza del segnale ricevuto.

È stata effettuata anche una prova della misura del livello di tensione del segnale prelevato all'uscita del demodulatore del Kenwood, impostando l'SMFP2 come generatore di segnali non modulati. I valori di tensione al variare della potenza in ingresso sono riportati di seguito, sempre alla frequenza di 436.9994 MHz visualizzata sullo strumento di misura.

$P_{in}(dBm)$	$V_{out}(mV)$
-50	1.5
-70	1.5
-90	1.6
-95	1.8
-100	2.5
-105	4.0
-107	4.8
-110	6.5
-112	8.8
-115	12.0
-118	15.2
-120	20.0
-122	25.8
-123	30.0
-125	45.0
-126	55.0
-128	70.0
-130	82.0

Tabella 3.3 Variazione della  $V_{out}$  al variare della  $P_{in}$  per segnali non modulati

### 3.2.2.2 Risposta del ricevitore al variare della frequenza modulante

Per valutare la banda di ricezione del ricevitore, viene variata la frequenza del segnale modulante dell'SMFP2. Al variare della frequenza si vede la rispettiva variazione della tensione del segnale prelevato dal demodulatore del Kenwood e quindi la risposta in frequenza del ricevitore. Per prelevare il segnale demodulato si sono utilizzate due uscite: l'uscita *phone* sul fronte del Kenwood e l'uscita per la comunicazione dati sul connettore ACC2 (*Accessory2*) sul retro dello strumento tramite il pin 3: *main receiver audio* e il pin 4: *ground main receiver audio* di tale connettore. L'utilità di questa misura è la valutazione della larghezza di banda del ricevitore, al fine di verificare la sua eventuale attitudine a ricevere segnali contenenti dati, trasmessi dal satellite Atmocube. In figura 3.7 si denota una risposta in frequenza stretta, adatta alle comunicazioni audio per cui il Kenwood TS790 è stato progettato.

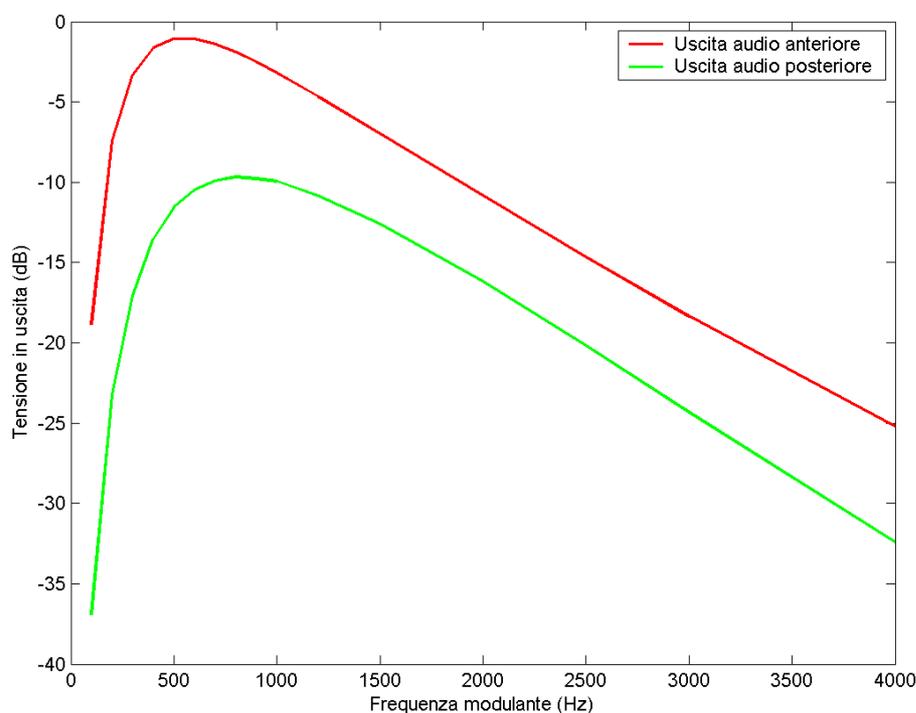


Figura 3.7 Risposta del ricevitore al variare della frequenza modulante

### 3.2.3 Verifica della compatibilità del Kenwood con il ricetrasmittitore CC1100

Scelto il CC1100 come ricetrasmittitore sul satellite Atmocube, è stata fatta una prova della compatibilità tra lo stesso e il ricetrasmittitore Kenwood TS790. Avendo a disposizione una scheda con il ricetrasmittitore CC1100, collegato con un traslatore di livello al microprocessore, si è programmato il CC1100 in trasmissione con le seguenti caratteristiche:

- Potenza in uscita a radiofrequenza: 0 dBm
- Velocità di trasmissione: 10 kbps
- Deviazione in frequenza: 5 kHz
- Modulazione 2-FSK,

Questa serie di misure è stata fatta con il CC1100 alla frequenza di 433 MHz, 432.999187 MHz effettivi, frequenza utilizzata per misure svolte in precedenza sull'integrato. Il Kenwood è sintonizzato alla frequenza di ricezione di 433.005 MHz.



Figura 3.8 Scheda con il CC1100 il TTL e il microprocessore.

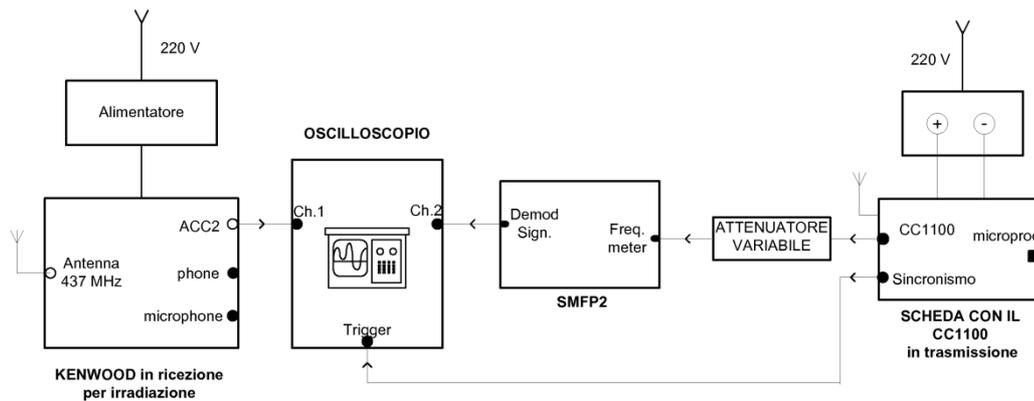


Figura 3.9 Diagramma a blocchi delle misure: alimentatori, Kenwood, attenuatore, CC1100, SMFP2 e oscilloscopio

Per verificare che il ricetrasmettitore Kenwood demoduli correttamente il segnale trasmesso dal CC1100, si programma quest'ultimo affinché trasmetta inizialmente sequenze di uni e zeri prestabilite. Il segnale trasmesso dal CC1100 viene ricevuto dal Kenwood per irradiazione. Tramite un oscilloscopio, è possibile visualizzare il segnale demodulato dal Kenwood e prelevato attraverso l'uscita del pin *main receiver audio* del connettore ACC2 per la comunicazione dati sul retro del ricevitore. Vengono riportati nelle figure 3.10, 3.11 e 3.12 i segnali demodulati dal Kenwood e visualizzati sull'oscilloscopio, avendo impostato il CC1100 in modo che trasmetta le seguenti sequenze di uni e zeri:

- 111110000011111000001111100000... : cinque '1' e cinque '0', frequenza  $\approx 1$  kHz
- 110011001100110011001100110011... : due '1' e due '0', frequenza  $\approx 2$  kHz
- 101010101010101010101010101010... : un '1' e uno '0', frequenza  $\approx 5$  kHz

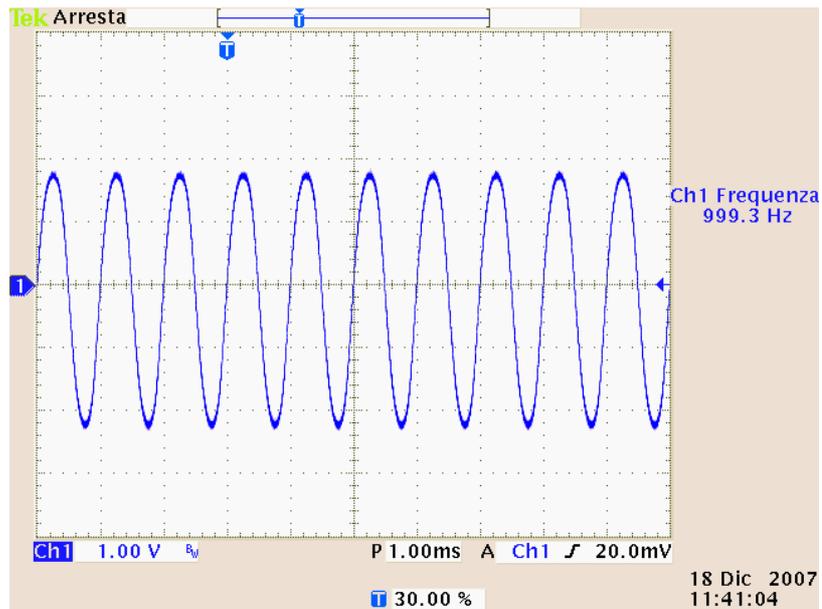


Figura 3.10 Sequenza: 5 zeri e 5 uni

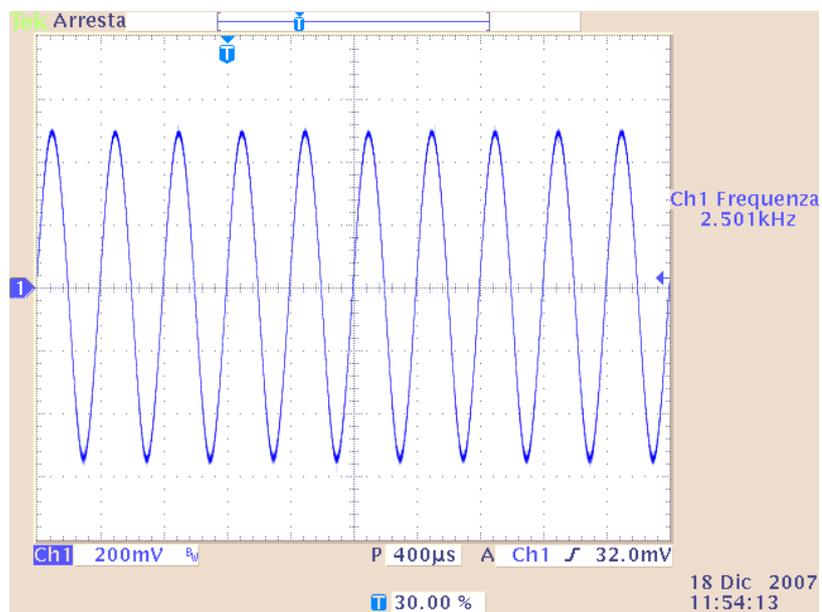


Figura 3.11 Sequenza di 2 zeri e 2 uni

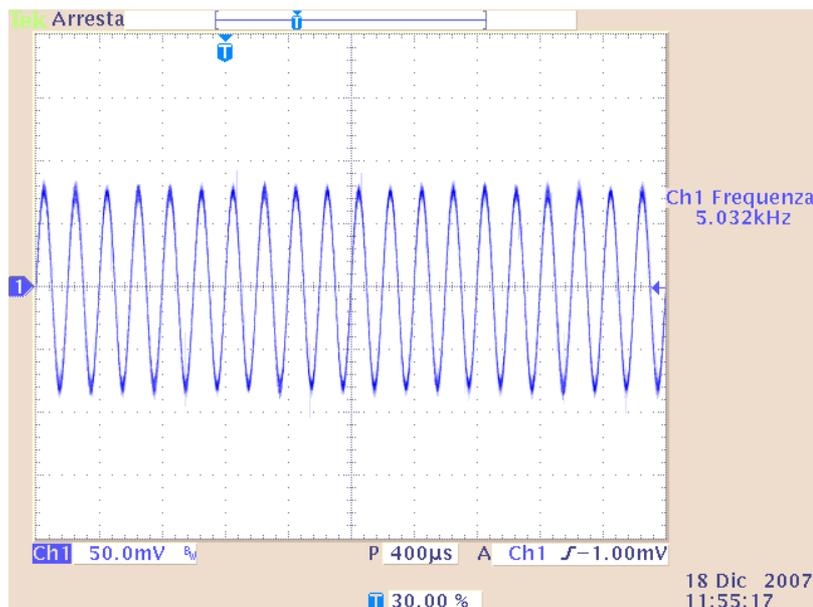


Figura 3.12 Sequenza di 1 zero e 1 uno

Come si può notare dalle figure, il segnale all'aumentare della frequenza subisce una diminuzione in ampiezza. Gli zeri e gli uni sono comunque distinguibili.

Successivamente si è programmato il CC1100 affinché trasmetta una sequenza casuale di uni e zeri. Si confronta il segnale demodulato dal Kenwood con la sequenza di uni e zeri trasmessi dal CC1100. Per visualizzare il segnale inviato dal CC1100, si connette questo trasmettitore attraverso un attenuatore variabile al jack *freq. meter* dell'SMFP2 che, tramite l'uscita *demod. sign.*, fornisce la sequenza di uni e zeri trasmessi all'oscilloscopio [fig. 3.9]. Viene estratto inoltre, attraverso il led verde del microprocessore sulla scheda del CC1100, il sincronismo dei pacchetti. Questa serie di segnali è stata visualizzata sull'oscilloscopio con memoria, e viene riportata in figura 3.13. Come si può notare, il Kenwood non è in grado di demodulare correttamente il segnale FSK che viene trasmesso dal CC1100.

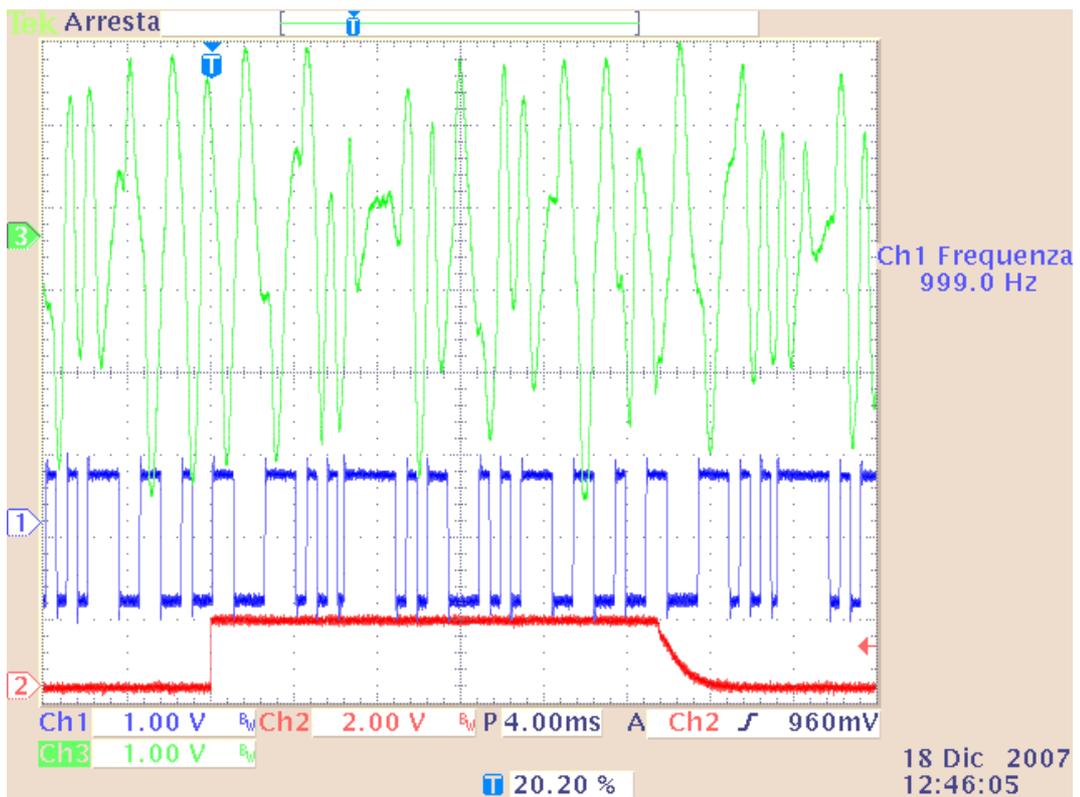


Figura 3.13 Sequenza casuale. In verde: segnale demodolato dal Kenwood, in blu: uni e zeri trasmessi dal CC1100, in rosso: durata pacchetto

### 3.2.4 Conclusioni sul ricetrasmittitore TS790

Tramite l'SMFP2 della Rode&Schwarz è stato possibile studiare il funzionamento del Kenwood sia in trasmissione che in ricezione. Per la trasmissione si è visto che la potenza in uscita è inferiore a quella riportata sul manuale di utilizzo e si è studiato il livello di distorsione e di deviazione in frequenza al variare del livello del segnale da trasmettere. In ricezione è emersa sia la caratteristica del Kenwood di trasmettere e ricevere segnali solo di tipo audio, la risposta in frequenza infatti è limitata, sia l'incapacità di modulare e demodulare segnali FSK generati dal CC1100, modulazione scelta per la comunicazione con Atmocube. Si può pertanto concludere che il ricetrasmittitore Kenwood non è utilizzabile integralmente per questo tipo di collegamento satellitare.

## Capitolo 4

---

### La scelta del ricetrasmittitore a terra

#### 4.1 Le possibili alternative al Kenwood

Da quanto risulta dall'analisi esposta nel capitolo precedente, non è possibile per il progetto Atmocube utilizzare integralmente il ricetrasmittitore Kenwood TS790. Una soluzione potrebbe essere il prelievo del segnale a media frequenza all'interno del ricetrasmittitore a valle del demodulatore in ricezione e a monte del modulatore in trasmissione introducendo ulteriori strumenti che ricostruiscano il segnale. Questo procedimento richiede però lo studio dei circuiti interni al ricetrasmittitore che dovrebbe venir smontato in alcune parti. Tuttavia ci sono delle soluzioni alternative. Ci sarebbe la possibilità di realizzare un sistema trasmittente e ricevente non integrato sia sul satellite che a terra. Oppure si può realizzare un sistema non integrato sul satellite e far uso di un ricetrasmittitore commerciale a terra.

#### 4.2 La scelta del CC1100 a terra

La compatibilità col CC1100 sul satellite è garantita, il problema della corretta demodulazione dei dati è risolto e non è necessario inserire un TNC per l'impacchettamento corretto dei dati per quanto riguarda il datalayer della pila ISO-OSI della comunicazione: queste caratteristiche oltre alla flessibilità di programmazione, il basso costo, e la possibilità di realizzare una valida rete di adattamento e di amplificazione, fa risaltare l'utilizzo del CC1100 anche a terra come la scelta più vantaggiosa. Di seguito si riportano

le caratteristiche principali e alcune delle misure effettuate sul suo funzionamento.

## 4.2.1 Caratteristiche del CC1100

Il CC1100 prodotto dalla Chipcon[5] con 20 pin e 4×4 mm di dimensione, è adatto a trasmissioni in UHF: può essere configurato alle bande di 315 MHz, 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz, ma è possibile programmarlo anche alle bande 300-348 MHz, 800-928 MHz e alla banda di nostro interesse 400-464 MHz. La sensibilità di questo integrato è alta: -110 dBm alla bitrate di 1,2 kbps e solo 1% d'errore sui pacchetti ricevuti. Il datarate può arrivare fino a un massimo di 500 kbps. Le modulazioni supportate sono: FSK, GFSK, MSK, OOK e ASK. La massima potenza trasmissibile è +10dBm in qualsiasi banda lo si utilizzi. Il consumo di corrente in ricezione è basso: 15.4 mA alla frequenza di lavoro di 433 MHz con 1.2 kbps di bitrate. L'AGC control consente il controllo del guadagno del LNA. Per migliorare le prestazioni della comunicazione dati è possibile abilitare il Forward Error Correction con Interleaving che consente di limitare gli errori in burst.

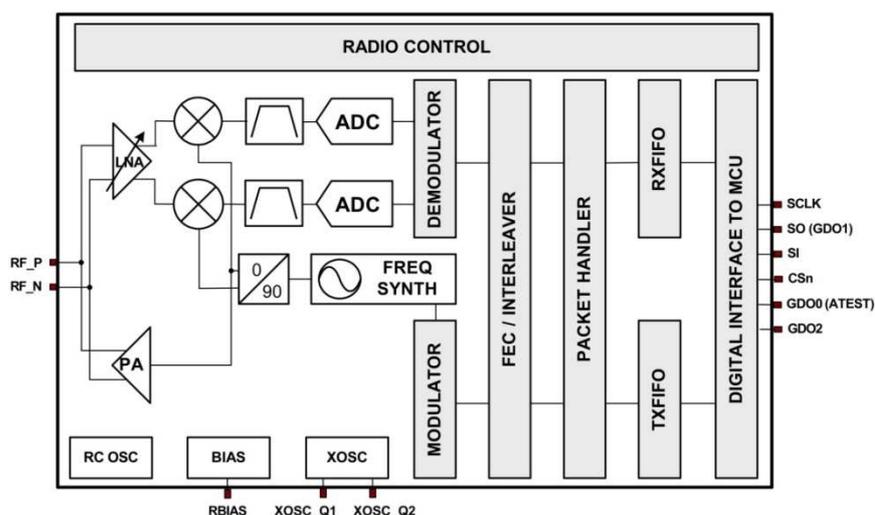


Figura 4.1 Schema a blocchi del CC1100

Può venir programmata anche la funzione Preamble Quality Indicator (PQI), per rilevare i preamboli e proteggere la parola di sincronizzazione in presenza di rumore. Per la trasmissione su canale è supportato il CCA (Clear Channel Assessment): prima di trasmettere verifica che il canale sia libero. La possibilità di operare sulla codifica di canale è una delle ulteriori motivazioni della scelta di questo integrato come ricetrasmittitore. All'interno dei pacchetti inviati dal ricetrasmittitore sono presenti diversi campi che risultano quindi essere variabili in base alle scelte di configurazione [fig. 4.2]. Un pacchetto è composto da un preambolo per il riconoscimento di inizio pacchetto, una parola per il sincronismo, un campo lunghezza e indirizzo di destinazione, una sezione per i dati da inviare e un codice per il controllo errori CRC, a ridondanza ciclica. Per la configurazione dell'integrato si utilizza il software *SmartRF Studio*.

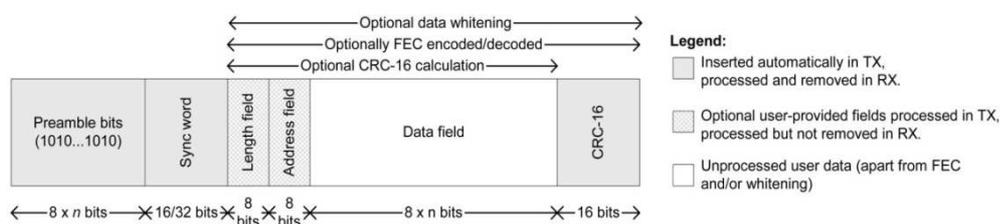


Figura 4.2 Formato pacchetti del CC1100

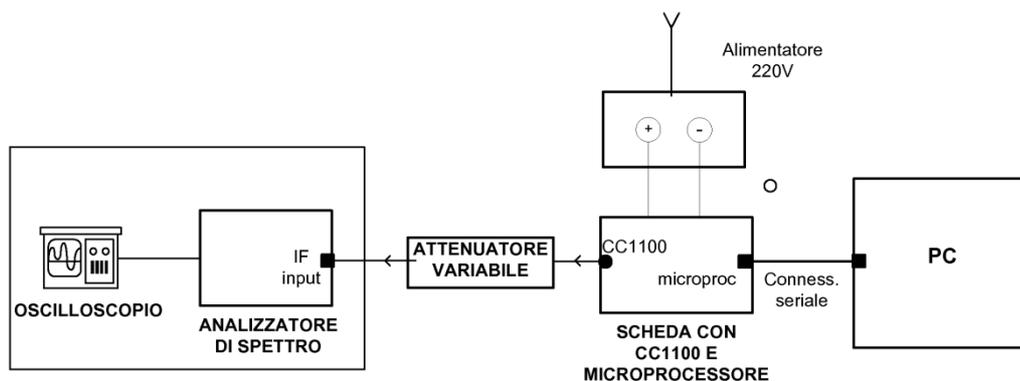


Figura 4.3 Diagramma a blocchi delle misure sul CC1100

## 4.2.2 Misure sul ricetrasmittitore CC1100

Lo studio del CC1100 era stato svolto dallo studente Giovanni Gobbesso[6], per l'inserzione dell'integrato sul satellite Atmocube. Oltre allo studio sul Kenwood mi è stato possibile effettuare anche qualche analisi ulteriore su alcune caratteristiche del funzionamento di questo ricetrasmittitore.

Per questa serie di misure, sono stati raffigurati su un analizzatore di spettro, connesso attraverso l'uscita IF all'attenuatore variabile e quindi al CC1100 [fig.4.3], i picchi della modulazione FSK trasmessi [fig. 4.4], alla frequenza precedentemente impostata di 433 MHz.

Selezionando poi sull'analizzatore di spettro la modalità span zero si è potuto notare il corretto funzionamento dell'integrato, senza interruzioni nello spettro. Tramite un oscilloscopio collegato in serie all'analizzatore di spettro, è stato poi possibile visualizzare i pacchetti trasmessi [fig.4.5].

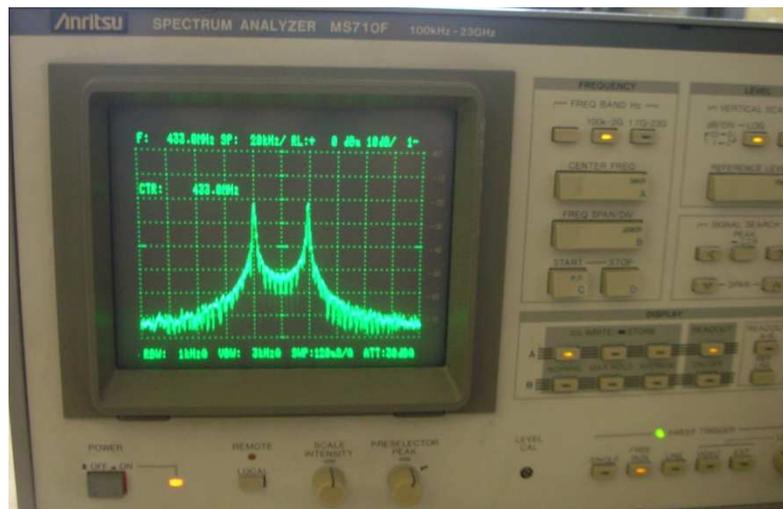


Figura 4.4 Analizzatore di spettro: picchi della modulazione 2-FSK

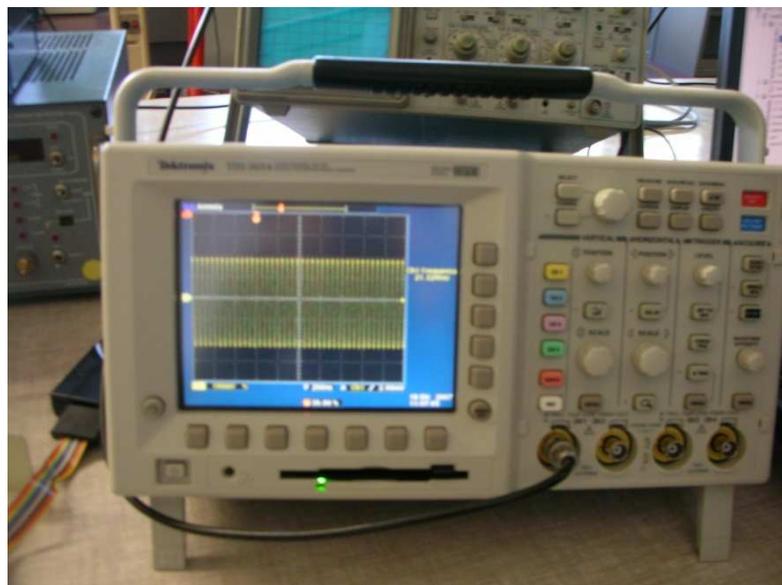


Figura 4.5 Oscilloscopio: visualizzazione dei pacchetti trasmessi

### 4.2.3 Inserimento del CC1100 nella stazione a terra per Atmocube.

Valutato il corretto funzionamento dell'integrato alla modulazione di interesse, ci sono ancora diversi test da fare prima di stabilire definitivamente il suo utilizzo come ricetrasmittitore a terra. Come prima cosa, con l'aiuto di Diego Derganz, un collaboratore della ditta Elcon in cui è stata montata la scheda dell'integrato, è stato possibile programmare il funzionamento del CC1100 alle frequenze di interesse per la nostra comunicazione satellitare intorno ai 437 MHz, precisamente a 437.490 e 437.847 MHz. Su un analizzatore di spettro abbiamo visto che la frequenza centrale effettivamente corrisponde a quella a cui l'integrato è stato programmato. Lo studente Gobbesso aveva in precedenza effettuato misure utilizzando due CC1100: uno programmato in ricezione e uno in trasmissione. Il suo studio ha riguardato il calcolo dell'indice di modulazione del CC1100 con lo strumento SMFP2, misure sulla trasmissione di pacchetto con attenuazione di canale e il controllo dello spettro di potenza del segnale di preambolo. Tramite l'utilizzo di un attenuatore è stato misurato che la comunicazione fosse accettabile fino a 93dB di attenuazione e che però fosse consigliato il reset dell'integrato dopo un certo periodo di tempo per evitare che un pacchetto errato rendesse sbagliata tutta la trasmissione dei pacchetti successivi. Inoltre, il calcolo della sensibilità mostrava che solo amplificando il segnale in trasmissione e/o in ricezione consentiva di soddisfare le specifiche della trasmissione. Verranno svolti in questi mesi ulteriori test su questo integrato, per accertarsi dell'esattezza della scelta.

Resta anche da decidere come adattare il CC1100 a terra: c'è la possibilità di utilizzarne uno unico per la trasmissione e la ricezione, due che ricevano contemporaneamente in modo da combinare il segnale o due uno in trasmissione uno in ricezione. La scelta più opportuna sembra essere

quest'ultima, con l'inserzione di un amplificatore di potenza in trasmissione e un LNA in ricezione.

## Capitolo 5

---

# Lo schema completo della stazione a terra con la scelta di due CC1100

### 5.1 Scelta ottimale: due CC1100

Dall' analisi effettuata nel capitolo precedente, la scelta del CC1100 anche a terra sembra essere quella ottimale. Sotto questa ipotesi si identifica come configurazione più consona un CC1100 programmato per la sola ricezione e un CC1100 programmato per la sola trasmissione, collegati da un commutatore alla stessa antenna Yagi-Uda. Entrambi gli integrati necessitano di una rete di amplificazione adatta, e spiegata in seguito. I due ricetrasmittitori sono poi collegati al microprocessore. Quest'ultimo è connesso al traslatore di livello che, attraverso l'interfaccia RS232, riceve i dati dal computer di gestione. Questa configurazione della stazione a terra non necessita dell'utilizzo del TNC per la costruzione dei pacchetti, essendo gli integrati a terra e sul satellite dello stesso tipo e in grado di creare autonomamente i pacchetti. Per la realizzazione dei vari sistemi ci si avvale di componenti nuovi o di circuiti già realizzati in precedenza e inseribili in questa configurazione. In seguito viene riportato lo schema generico della stazione a terra di Basovizza, con i vari sistemi.

#### 5.1.1 Sistema di ricezione

Come si nota dalla figura 5.2, riguardante la parte della stazione a terra destinata alla ricezione, dopo il preamplificatore d'antenna il segnale ricevuto

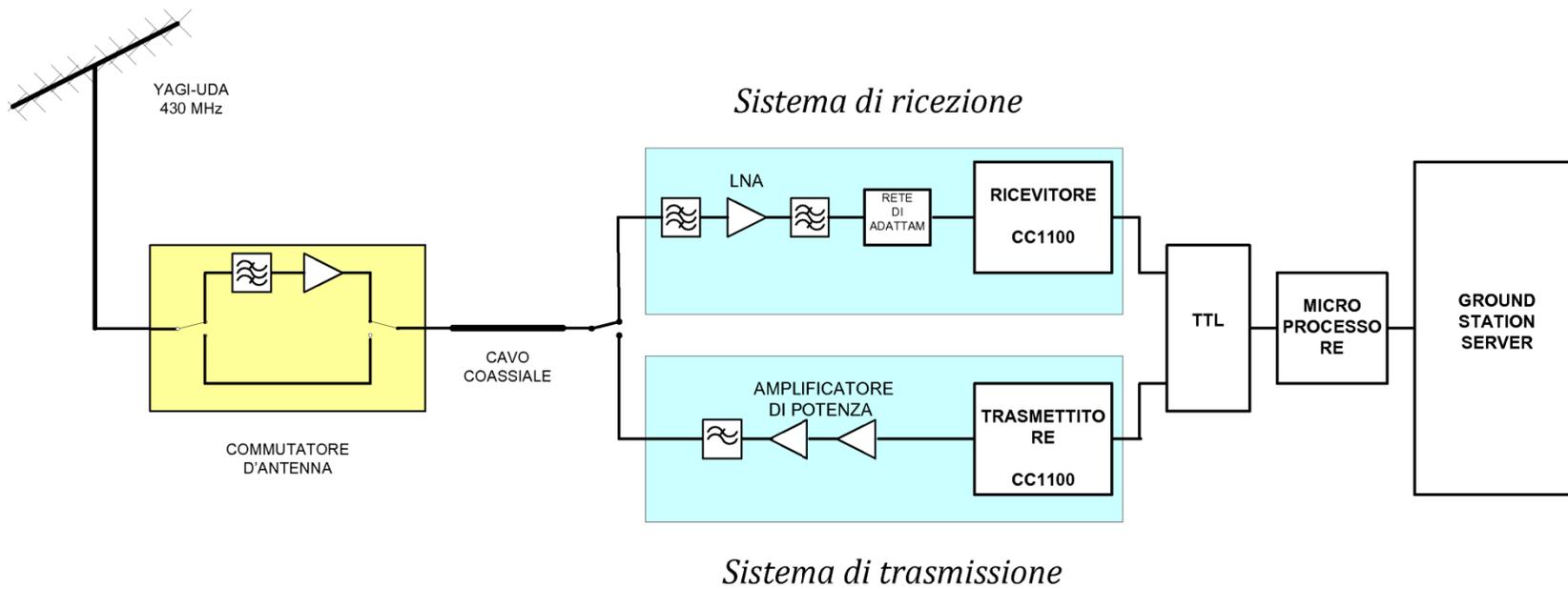


Figura 5.1 Schema a blocchi della stazione a terra con due CC1100.

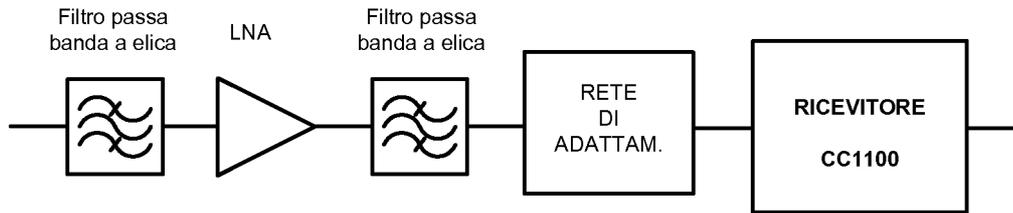


Figura 5.2 Schema a blocchi del sistema di ricezione

viene filtrato attraverso un filtro passa banda che ne limita la banda e attenua i prodotti di intermodulazione, amplificato da un amplificatore a basso rumore e filtrato di nuovo. Questo sistema è stato studiato e realizzato qualche anno fa dallo studente Moretti. Agli inizi del progetto Atmocube infatti era stato progettato integralmente un ricetrasmittitore per la stazione a terra da questo studente, ma che poi, nell'evoluzione del progetto satellitare, non è risultato adeguato. È possibile comunque conservare l'amplificatore e i filtri ad elica per il sistema di ricezione a terra per Atmocube. È poi necessaria una rete di adattamento per trasferire la massima potenza al CC1100 configurato come ricevitore.

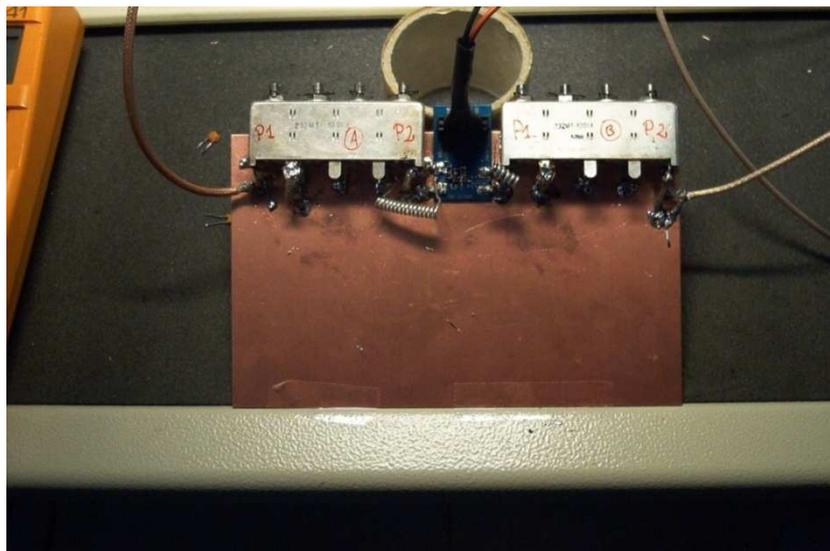


Figura 5.3 Foto del circuito realizzato da Moretti, con in filtri ad elica

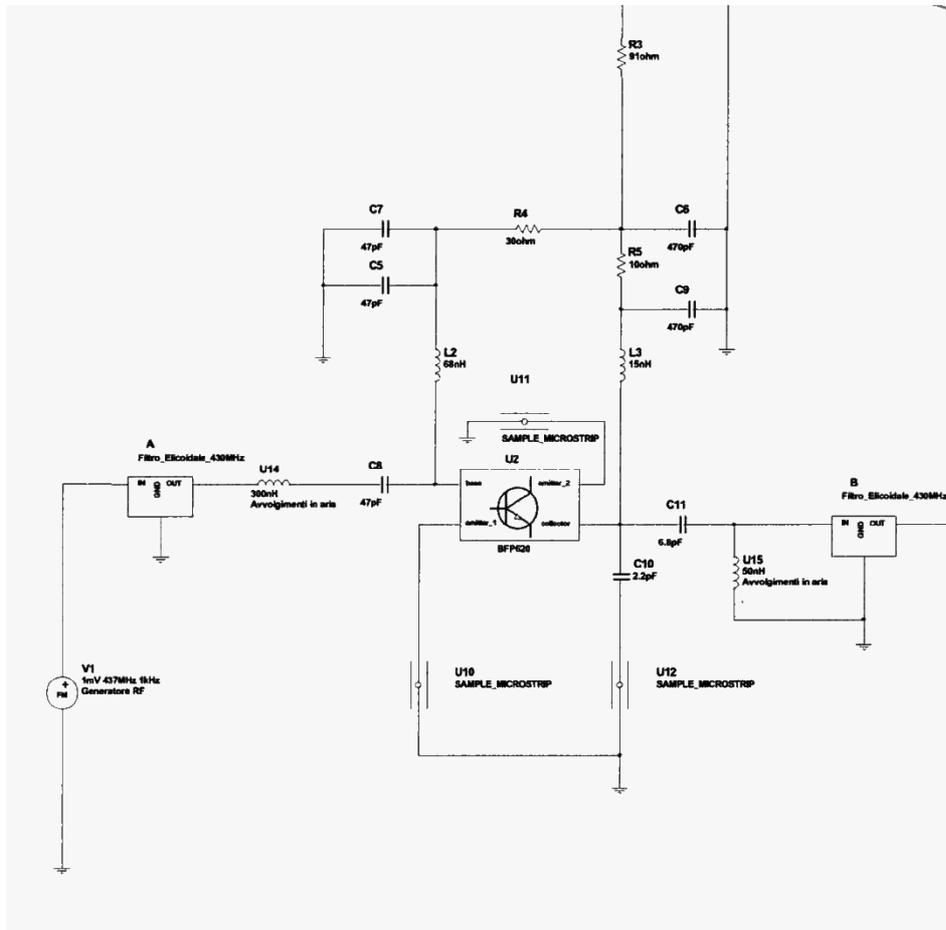


Figura 5.4 Parte del circuito di Moretti, con amplificatore e filtri ad elica

## 5.1.2 Sistema di trasmissione

Il CC1100 consente una trasmissione di segnali fino alla potenza di +10 dBm pari a 10 mW, valore a cui per sicurezza l'integrato non verrà comunque impostato. Configurando in trasmissione un CC1100, controllato dal microprocessore, l'inserzione di un amplificatore di potenza permette l'amplificazione del segnale da 10 mW a 30 W per la trasmissione nella tratta di uplink. Con questo sistema dunque si garantisce che in questa tratta il segnale abbia sufficiente potenza per arrivare al satellite. All'uscita di questo, un filtro passa basso consente di limitare l'emissione di segnali indesiderati

alle frequenze multiple della fondamentale e di limitare l'interferenza sul canale adiacente.

## Capitolo 6

---

### Conclusioni

Sulla base delle specifiche del progetto Atmocube, è stato possibile effettuare uno studio sulla stazione a terra per questo tipo di satellite. Avendo a disposizione gli strumenti usati in precedenza da un'altra missione spaziale con sede all'OAT di Basovizza, è stata fatta un'analisi per verificare quali risultano essere effettivamente utilizzabili per il satellite. Il sistema di antenne Yagi-Uda, ad esempio, è adatto per la trasmissione alla frequenza radioamatoriale di 437 MHz. Operando lavori di manutenzione e installando un software opportuno sarà possibile muovere automaticamente le antenne a seconda della posizione del satellite. Lo studio presentato in questo elaborato ha riguardato in particolar modo la ricerca di un possibile ricetrasmittitore da introdurre a terra, che soddisfacesse le specifiche richieste da questa trasmissione. Il ricetrasmittitore Kenwood TS790, facente parte della strumentazione presente a Basovizza, non è risultato adeguato. Le misure effettuate su tale ricevitore hanno mostrato la sua inattitudine a demodulare i segnali FSK provenienti dal trasmettitore CC1100 destinato al satellite; anche se la modulazione scelta fosse la GFSK si incontrerebbe lo stesso problema. Una valida alternativa a questo ricetrasmittitore è l'impiego del CC1100 anche a terra. Con questo integrato è garantita la compatibilità con lo stesso a bordo del satellite. Per sfruttare al meglio le prestazioni del CC1100 si è pensato, sebbene sia in grado di alternare trasmissione e ricezione, di farne uso di uno singolo per la ricezione e di un altro per la trasmissione. I due, provvisti di un'opportuna rete di filtraggio e amplificazione, dovrebbero poi esser collegati all'antenna tramite un commutatore. In fine dal computer, collegato al microprocessore da un traslatore di livello, deve risultare possibile il controllo di tutto il sistema. Diverse interfacce devono infatti

consentire la gestione dei dati ricevuti dal satellite e salvati nel database, il monitoraggio dei dispositivi a bordo e il controllo dell'antenna e dei ricetrasmittitori a terra.

Anche se mi è stato possibile valutare alcuni tra gli aspetti principali della realizzazione di questa stazione a terra, ce ne sono ancora diversi da affrontare perché la stazione risulti operativa. Sarà necessario fare ulteriori prove pratiche sui ricetrasmittitori, assemblare la rete di amplificazione in trasmissione e in ricezione, provvedere all'acquisto del server della stazione a terra oltre che provvedere alla manutenzione o alla sostituzione di elementi quali rotori e cavi per il collegamento con l'antenna. Per quanto mi riguarda sarei molto felice di poter continuare a fornire il mio modesto contributo per il completamento della stazione a terra anche oltre il lavoro di tesi. Credo che il coinvolgimento degli studenti alla collaborazione della messa in orbita di un satellite come Atmocube sia un'opportunità davvero di notevole interesse.

## **CC1100**

### **Single Chip Low Cost Low Power RF Transceiver**

#### **Applications**

- *Ultra low power UHF wireless transceivers*
- *315/433/868 and 915 MHz ISM/SRD band systems*
- *AMR – Automatic Meter Reading*
- *Consumer Electronics*
- *Two-way RKE –Remote Keyless Entry*

#### **Product Description**

The **CC1100** is a low cost true single chip UHF transceiver designed for very low power wireless applications. The circuit is mainly intended for the ISM (Industrial, Scientific and Medical) and SRD (Short Range Device) frequency bands at 315, 433, 868 and 915 MHz, but can easily be programmed for operation at other frequencies in the 300-348 MHz, 400-464 MHz and 800-928 MHz bands.

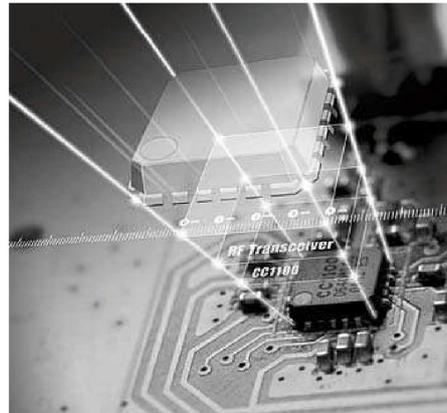
The RF transceiver is integrated with a highly configurable baseband modem. The modem supports various modulation formats and has a configurable data rate up to 500 kbps. The communication range can be increased by enabling a Forward Error Correction option, which is integrated in the modem.

**CC1100** provides extensive hardware support for packet handling, data buffering, burst transmissions, clear channel assessment, link quality indication and wake-on-radio.

The main operating parameters and the 64-byte transmit/receive FIFOs of **CC1100** can be controlled via an SPI interface. In a typical system, the **CC1100** will be used together with a

microcontroller and a few additional passive components.

**CC1100** is part of Chipcon's 4th generation technology platform based on 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS technology.



#### **Key Features**

- Small size (QLP 4x4 mm package, 20 pins)
- True single chip UHF RF transceiver
- Frequency bands: 300-348 MHz, 400-464 MHz and 800-928 MHz
- High sensitivity ( $-110$  dBm at 1.2 kbps, 1% packet error rate)
- Programmable data rate up to 500 kbps
- Low current consumption (15.4 mA in RX, 1.2 kbps, 433 MHz)
- Programmable output power up to +10 dBm for all supported frequencies
- Excellent receiver selectivity and blocking performance

- Very few external components: Totally on-chip frequency synthesizer, no external filters or RF switch needed
- Programmable baseband modem
- Ideal for multi-channel operation
- Configurable packet handling hardware
- Suitable for frequency hopping systems due to a fast settling frequency synthesizer
- Optional Forward Error Correction with interleaving
- Separate 64-byte RX and TX data FIFOs
- Efficient SPI interface: All registers can be programmed with one "burst" transfer

**Features (continued from front page)**

- Digital RSSI output
- Suited for systems compliant with EN 300 220 (Europe) and FCC CFR Part 15 (US)
- Wake-on-radio functionality for automatic low-power RX polling
- Many powerful digital features allow a high-performance RF system to be made using an inexpensive microcontroller
- Integrated analog temperature sensor
- Lead-free "green" package
- Flexible support for packet oriented systems: On chip support for sync word detection, address check, flexible packet length and automatic CRC handling
- Programmable channel filter bandwidth
- OOK and flexible ASK shaping supported
- FSK, GFSK and MSK supported.
- Automatic Frequency Compensation (AFC) can be used to align the frequency synthesizer to the received centre frequency
- Optional automatic whitening and de-whitening of data
- Support for asynchronous transparent receive/transmit mode for backwards compatibility with existing radio communication protocols
- Programmable Carrier Sense (CS) indicator
- Programmable Preamble Quality Indicator (PQI) for detecting preambles and improved protection against sync word detection in random noise
- Support for automatic Clear Channel Assessment (CCA) before transmitting (for listen-before-talk systems)
- Support for per-package Link Quality Indication

# Bibliografia

---

- [1] Martin Davidoff. *The radio Amateur's Satellite Handbook*. 2001
- [2] Wilbur L. Pritchard, Henri G. Suyderhoud, Robert A. Nelson. *Satellite Communication System Engineering* Second Edition.
- [3] Paolo Pitacco. *Manuale delle comunicazioni digital*. Edizioni C&C.
- [4] J.G.Proakis M.Salehi. *Communication Systems Engineering*. Prentice-Hall.
- [5] Chipcon CC1100 single chip low cost low power RF transceiver. [http://www.chipcon.com/files/CC110\\_Data\\_Sheet\\_1\\_1.pdf](http://www.chipcon.com/files/CC110_Data_Sheet_1_1.pdf). Datasheet (Rev 1.1)
- [6] Gobbesso Giovanni. *Studio per la progettazione della parte a bassa potenza del ricetrasmittitore del satellite Atmocube*. Corso di laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni, A.A. 2006/2007.
- [7] Alessandro Cuttin. *Progetto di sistema del satellite Atmocube architettura di comunicazione e architettura di sistema*. Corso di laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni, A.A 2005/2006.
- [8] Mauro Popesso. *Studio per la progettazione dell'amplificatore RF di potenza per il trasmettitore del satellite Atmocube mediante l'utilizzo del software di simulazione AWR.*. Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica, A.A. 2005/2006.
- [9] Samuele Falcomer. *Analisi e progetto di un'antenna da installare sul satellite Atmocube*. Corso di laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni A.A 2005/2006.
- [10] Walter Caharija. *Sistema di alimentazione del satellite Atmocube*. Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica, A.A. 2005/2006.
- [11] Daniele Tavagnacco. *Analisi delle perturbazioni atmosferiche per un satellite di orbita bassa*. Corso di Laurea in Fisica, A.A. 2004/2005.
- [12] Tommasini

[13] Cubesat web site *cubesat.atl.calpoly.edu*

[14] GENSO web site *www.genso.org*

[15] Flavio Falcinelli. *Semplici note costruttive per la costruzione di antenne Yagi-Uda*. [http://www.radioastrolab.it/ra/doc\\_pdf/Yagi.pdf](http://www.radioastrolab.it/ra/doc_pdf/Yagi.pdf)