

# Rapporti tecnici

## INGV

**Misure RES in banda HF su  
ghiacciai antartici**

# 350



## **Direttore Responsabile**

Silvia MATTONI

## **Editorial Board**

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV-RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.173 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



# Rapporti tecnici INGV

## MISURE RES IN BANDA HF SU GHIACCIAI ANTARTICI

Umberto Siacca, Achille Zirizzotti, Stefano Urbini, Giuseppe Tutone

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Geomagnetismo, Aeronomia e Geofisica Ambientale)

# 350





## Indice

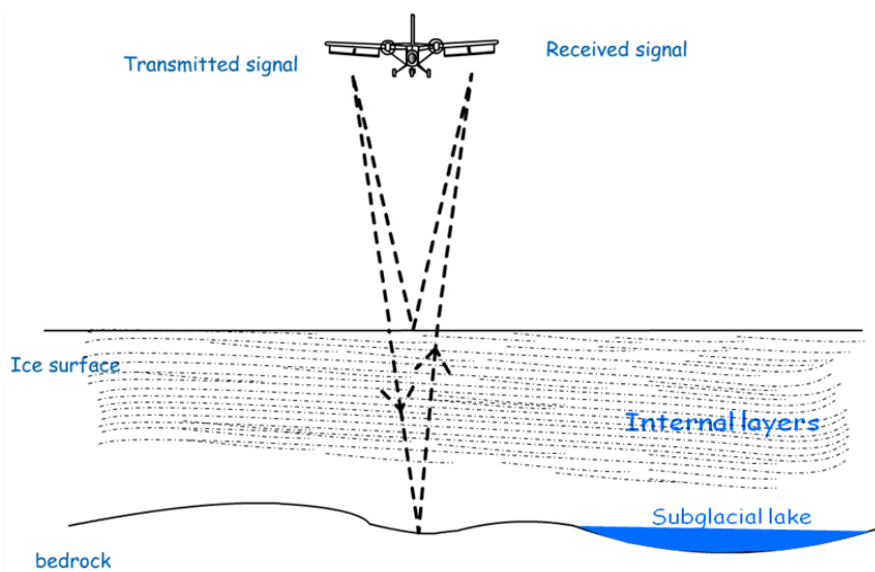
Introduzione.....	7
1. Richiami sull'attenuazione delle radio onde nei ghiacciai .....	8
2. Considerazioni sulla risoluzione verticale .....	10
3. Schema a blocchi del sistema e riassunto delle prestazioni.....	11
4. Antenne.....	12
5. Adattatori di antenna.....	14
6. Sistema completo e risultati di alcune misure in Antartide .....	18
Bibliografia .....	21
Appendice A. Richiami sul calcolo della risoluzione in distanza .....	23
Appendice B. Considerazioni sulle definizioni di radar monostatico e bistatico .....	27



## Introduzione

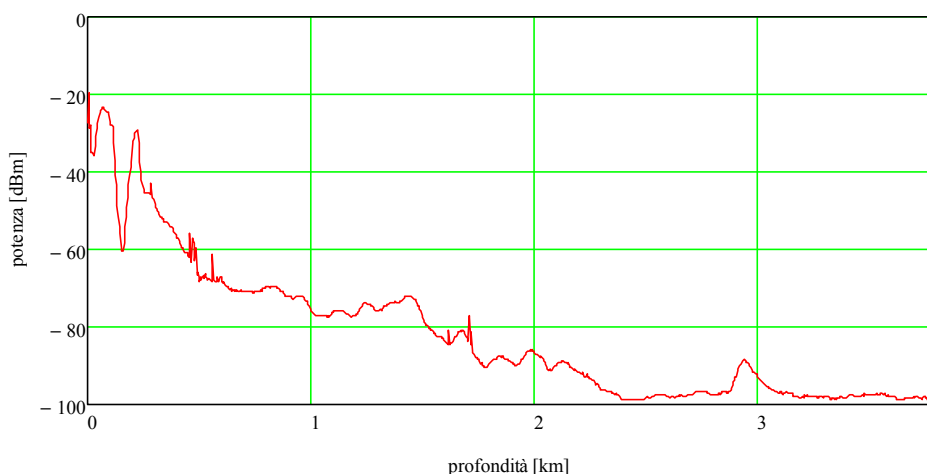
Le tecniche RES (Radio *Echo* Sounding) sono ampiamente utilizzate in glaciologia per studiare molte delle caratteristiche dei ghiacciai, tra cui lo spessore complessivo, eventuali stratificazioni e disomogeneità, le caratteristiche dell'interfaccia tra ghiaccio e fondo roccioso, nonché quella con eventuali laghi subglaciali.

La tecnologia è basata sull'impiego di un radar pseudo-monostatico ad impulsi, usualmente aereotrasportato, ma che può essere anche adagiato a terra e spostato su opportuno veicolo per sondare punti differenti. Gli impulsi elettromagnetici sono inviati verso il basso e gli echi vengono analizzati per estrarne le informazioni rilevanti (fig.1). Circa la definizione di radar "pseudo-monostatico" si rimanda alle considerazioni svolte in appendice B.



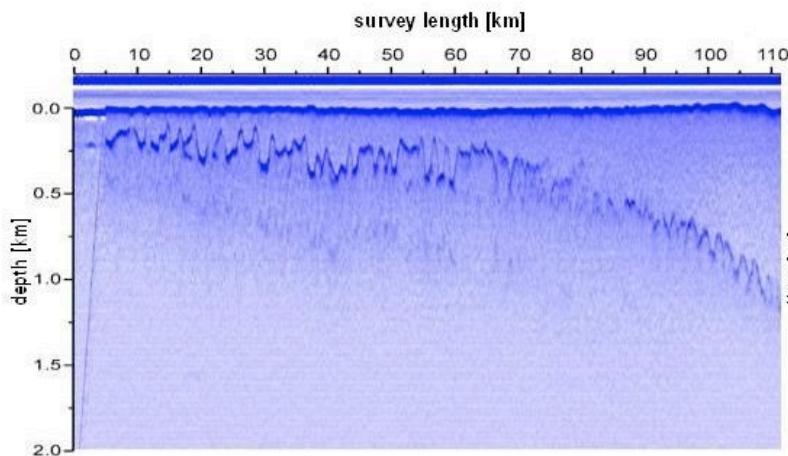
**Figura 1.** Schema di funzionamento di un sistema RES.

A differenza dei normali radar, che restituiscono impulsi riflessi "concentrati" nel tempo in corrispondenza a singoli riflettori posti nell'ambiente circostante, nel caso del radar glaciologico si ha un segnale d'eco continuo dovuto alla riflessione da parte delle varie stratificazioni del ghiaccio. In fig. 2 è riportato un esempio di eco corrispondente alla ricezione di una sola traccia (o di più tracce integrate, relative alla stessa posizione del radar). L'ampiezza va gradatamente diminuendo man mano che il tempo dalla trasmissione aumenta, tranne che in corrispondenza di echi provenienti da forti discontinuità, tipicamente la prima interfaccia aria-ghiaccio e quella ghiaccio-roccia.



**Figura 2.** Esempio di forma di una traccia d'eco.

Se si riportano le tracce, acquisite man mano che l'aereo (o il generico veicolo) si sposta sul ghiacciaio, su uno stesso grafico si ottiene il profilo del ghiacciaio lungo la direzione dello spostamento del veicolo (fig. 3). Ora l'asse dei tempi è verticale, mentre l'asse orizzontale rappresenta lo spazio percorso in superficie dal veicolo che porta il radar. Le informazioni sull'ampiezza vengono rese da differenti intensità della traccia stessa.



**Figura 3.** Esempio di un profilo di ghiacciaio.

L'INGV è da molti anni impegnato nella esecuzione di campagne di misura su ghiacciai, prevalentemente in Antartide, utilizzando strumentazione per la gran parte sviluppata internamente all'Istituto, la quale è stata aggiornata e migliorata nel tempo [Tabacco, 1999; Zirizzotti, 2008]. In questo Rapporto Tecnico si descrivono le trasformazioni apportate al sistema in vista della campagna antartica 2015-16. Dato che si tratta di trasformazioni basate su un sistema preesistente, non viene qui ripetuta nel dettaglio l'analisi e il progetto del sistema, perché essa può essere trovata in un precedente Rapporto Tecnico, al quale si rimanda [Zirizzotti et al., 2012].

La modifica principale apportata riguarda la possibilità di usare frequenze inferiori per i sondaggi. Ciò è stato fatto in vista di un più proficuo sfruttamento della strumentazione per lo studio dei ghiacciai alpini, i quali hanno caratteristiche differenti da quelli antartici, principalmente il minore spessore (centinaia di metri anziché alcuni chilometri) e la temperatura (attorno ai  $-10^{\circ}\text{C}$  anziché circa  $-20^{\circ}/-50^{\circ}\text{C}$ ) (per gli studi sulle caratteristiche dei ghiacciai [Zirizzotti, 2010; Zirizzotti, Cafarella et al., 2012; Zirizzotti, 2014; Zirizzotti, 2016]). Inoltre sono presenti molte fratturazioni che, aumentando lo *scattering* interno al ghiacciaio, possono abbassare notevolmente il livello del segnale ricevuto. Per diminuire l'influenza dello *scattering* si è allora pensato di adottare frequenze di lavoro più basse, ma ciò ha reso necessario adattare alcune delle caratteristiche dello strumento e progettare un nuovo sistema di antenne. Di questi adattamenti si parla in questo lavoro, che è completato dalla presentazione di alcuni risultati di misure rilevate in Antartide.

## 1. Richiami sull'attenuazione delle radio onde nei ghiacciai

I sistemi RES usati in passato per le campagne antartiche sono stati portati da un piccolo aereo bimotore DHC-6 Twin Otter, con le antenne montate sotto alle ali (la trasmittente sotto ad un'ala e la ricevente sotto all'altra). Nel corso dell'ultima campagna è stato invece usato un elicottero, con il sistema di antenne montato appeso sotto al velivolo, il quale ha volato ad altezze inferiori. È poi possibile che misure di dettaglio del fondo roccioso possano essere eseguite da terra utilizzando un veicolo del tipo "gatto delle nevi" (in questo caso le antenne vengono trascinate con delle slitte).

Per un corretto dimensionamento del sistema bisogna scegliere la potenza in trasmissione e la sensibilità del ricevitore in modo tale da sopportare l'attenuazione prevedibile del segnale. A questo scopo in [Bianchi, 2003] si trova un'analisi di tutte le cause di attenuazione e su di essa ci basiamo per alcuni richiami sull'argomento. Da notare che nella figura 2 la potenza ricevuta della traccia radar raggiunge livelli molto bassi di  $-100\text{dBm}$  (confrontabili con il rumore termico della strumentazione). Come vedremo tra breve, i contributi predominanti sono dati dalla cosiddetta "attenuazione geometrica" e da quella di assorbimento nel

mezzo, pertanto va presa in considerazione la distanza massima percorsa dal segnale, fino a quando cioè non incontra il fondo roccioso e torna indietro verso il radar.

L'altezza dal suolo ghiacciato nel caso di trasporto su aereo è in genere dell'ordine (il pedice ANT ricorda che ci riferiamo all'Antartide):

$$h_{aria-ANT} \approx 300m. \quad (1)$$

Peraltro la maggior parte del cammino delle onde elettromagnetiche si svolge all'interno del ghiacciaio, che può essere profondo vari chilometri. Anche se la profondità massima può essere maggiore, si può porre come caso più tipico:

$$h_{ghia-ANT} \approx 4000m. \quad (2)$$

Per determinare le caratteristiche di attenuazione è necessario conoscere la lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica usata e le caratteristiche del mezzo (indice di rifrazione  $n$ , permittività dielettrica  $\epsilon_0$  e conducibilità  $\sigma$ ). Indicando con  $f$  la frequenza della portante utilizzata, con  $c$  la velocità della luce nel vuoto e con  $r$  lo spazio percorso in metri (va calcolato il doppio percorso andata + ritorno), si ha per l'attenuazione geometrica  $L_g$  e l'attenuazione del mezzo (ghiaccio)  $L_a$ :

$$L_g = 20 \cdot \log \frac{4\pi n f r}{c}, \quad (3)$$

$$L_a = 8.69 \cdot \alpha \cdot r. \quad (4)$$

i valori trovati sono direttamente espressi in dB (tutti i dati e le formule di questo paragrafo sono desunti da Bianchi, [2003]). Nella (4) si è indicato con  $\alpha$  il fattore di attenuazione al metro che si calcola con:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2cn\epsilon_0}. \quad (5)$$

Il valore della permittività è noto ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$ ), mentre gli altri parametri possono variare a seconda del tipo di ghiaccio (in aria  $n=1$  e  $\sigma=0$ ). I valori tipici che ci interessano per un ghiacciaio antartico valgono:  $n \approx 1.8$  e  $\sigma \approx 5.8 \times 10^{-6} S/m$ ; da essi si ricava:  $\alpha \approx 6.1 \times 10^{-4} dB/m$ ,  $L_a \approx 42 dB$  e  $L_g \approx 88 dB$ , quest'ultima calcolata nel caso della precedente versione del RES che funzionava con  $f=40 MHz$ . Considerando che tutte le altre cause di attenuazione contribuiscono al massimo per circa  $10 \div 15 dB$ , si capisce come le due attenuazioni appena calcolate siano di gran lunga predominanti. In definitiva troviamo:

$$L_{tot-ANT-40} \approx 130 dB. \quad (6)$$

Dato che siamo interessati a future misure su ghiacciai alpini, ripetiamo i calcoli per questi ultimi, tenendo conto che ci si deve muovere su elicottero, per cui:

$$h_{aria-ALP} \approx 30m, \quad (7)$$

e che il ghiacciaio è molto meno spesso:

$$h_{ghia-ALP} \approx 200m. \quad (8)$$

Considerando valori tipici di  $n \approx 1.8$  e  $\sigma \approx 1.6 \times 10^{-5}$ , troviamo:  $\alpha \approx 1.7 \times 10^{-3} dB/m$ ,  $L_a \approx 6 dB$  e  $L_g \approx 62 dB$ . In definitiva:

$$L_{tot-ALP-40} \approx 68 dB. \quad (9)$$

Questo valore è stato ricavato ipotizzando mezzi trasmissivi omogenei, ma, come si è anticipato nell'introduzione, i ghiacciai alpini sono molto fratturati, pertanto l'attenuazione effettiva può essere molto maggiore, ragione che ha portato a concepire un sistema che lavori a frequenza più bassa; la maggiore lunghezza d'onda infatti fa subire minori perdite per *scattering* dovuto alle fratturazioni. Considerazioni legate all'ingombro delle antenne e alla banda utilizzabile hanno suggerito di non scendere troppo con la frequenza ed adottare un valore  $f=12\text{ MHz}$ , per la prima volta quindi abbandonando la banda VHF per entrare nella HF.

Il nuovo sistema HF è stato provato in Antartide, ma usando l'elicottero al posto dell'aereo. Ripetendo i calcoli per questo caso si trova la stessa attenuazione nel mezzo, perché essa dipende poco dalla frequenza (il passaggio da 40 a 12 MHz altera di poco  $n$  e  $\sigma$ ); invece l'attenuazione geometrica è inferiore. Si arriva quindi a:

$$L_{tot-ANT-12} \approx 120\text{ dB}. \quad (10)$$

Per le future misure sui ghiacciai alpini invece è da attendersi:

$$L_{tot-ALP-12} \approx 58\text{ dB}. \quad (11)$$

Purtroppo la minore perdita nella propagazione viene compensata dal minor guadagno delle antenne, come si vedrà meglio nel seguito; per questo motivo si è pensato di non cambiare la potenza in trasmissione e la sensibilità del ricevitore.

## 2. Considerazioni sulla risoluzione verticale

Il RES che funzionava a 40 MHz faceva uso di impulsi semplici (non codificati, con involuppo approssimativamente rettangolare) della lunghezza minima di  $\tau = 200\text{ ns}$ , ai quali corrispondeva una banda a radio frequenza  $BW = 10\text{ MHz}$  e ad una risoluzione nel ghiaccio pari a:

$$\Delta h = \frac{c\tau}{2n}, \quad (12)$$

quindi  $\Delta h \approx 20\text{ m}$ . Rinunciando alla forma rettangolare, a parità di durata si può restringere la banda ma non è detto che ciò porti alla semplificazione nel riconoscimento dell'impulso in ricezione, col rischio di peggiorare la risoluzione.

La risoluzione data dalla (12) è appropriata per tutte le indagini, purtroppo il passaggio a frequenze nella gamma delle HF rende molto difficile mantenere la stessa banda, principalmente perché il sistema di antenne non consente di ottenere larghezze di banda frazionarie ( $BW/f$ ) oltre un fattore  $1/3 \div 1/2$ , senza distorcere la forma dell'impulso e in definitiva peggiorando la risoluzione. In appendice A viene spiegato come sia possibile adottare impulsi relativamente brevi ma con fronti smussati, che mantengono una risoluzione elevata e al contempo una banda piuttosto piccola; si adotta pertanto la seguente formula che lega la durata all'occupazione spettrale a RF:

$$BW \approx \frac{0.6}{\tau}. \quad (13)$$

A causa della limitazione in banda imposta dalle antenne si considera una banda passante  $BW = 4\text{ MHz}$ , la durata corrispondente di un impulso smussato è quindi  $\tau \approx 150\text{ ns}$  e quindi la risoluzione corrispondente diviene  $\Delta h \approx 15\text{ m}$ , confrontabile con il vecchio dato, ottenuto però con impulsi che, per la maggiore larghezza di banda, erano rettangolari.

In definitiva nel predisporre il radar HF non si sono dovute apportare sostanziali modifiche al sistema, dato che gli impulsi vengono creati semplicemente programmando opportunamente i circuiti che formano l'impulso (come multiplo di un certo numero di cicli della portante a radio frequenza) e le durate sono paragonabili a quelle del vecchio sistema.

### 3. Schema a blocchi del sistema e riassunto delle prestazioni

Per comodità del lettore si riporta lo schema a blocchi del sistema RES, così come era stato progettato e descritto in Zirizzotti et al., [2012]; l'attuale radar ricalca il vecchio schema.

I segnali vengono generati all'interno del PC di controllo, raffigurato in basso, quindi inviati ad un DAC e trasmessi tramite un amplificatore di potenza. Gli echi ricevuti dall'antenna ricevente passano attraverso un preamplificatore a basso rumore e successivamente vengono suddivisi in due cammini differenti. In entrambi i percorsi vi è un filtro che seleziona la banda di interesse ed un rivelatore ad involuppo che ha una caratteristica dinamica di tipo logaritmico, cosa che rende possibile dinamiche più elevate e fornisce un'uscita già proporzionale al livello in dB del segnale. La differenza tra i due cammini sta nella presenza di un amplificatore in uno solo di essi, mentre nell'altro vi è un attenuatore, ciò fa ottenere una differenza di guadagno tra i due rami di 35 dB. Nello schema gli attenuatori passivi sono indicati con il simbolo del resistore; a parte quello appena citato, inserito allo scopo di attenuare di molto il segnale nel secondo ramo ricevente, tutti gli altri sono inseriti solo per migliorare l'adattamento tra i vari blocchi, cosa che si ottiene già con un'attenuazione di circa 2 dB. All'uscita dai rivelatori i segnali passano nell'ADC e vengono quindi memorizzati ed elaborati. Nella tabella 1 sono riassunte le principali caratteristiche del sistema. Il motivo per cui si è scelta proprio la frequenza di 12 MHz è legato alle dimensioni delle antenne ed è spiegato in un successivo paragrafo.

Come si può vedere dalla tabella, vi è la possibilità di acquisire i dati con due diverse frequenze, 50 e 100 MHz, entrambe molto superiori alla frequenza minima data dalla banda passante del sistema. I punti acquisiti per una singola traccia sono però gli stessi, cioè 2048, pertanto la profondità di penetrazione massima varia in conseguenza come riportato in tabella (si è trascurata l'altezza del velivolo sulla superficie del ghiaccio, in quanto molto più piccola). Per il futuro uso nei ghiacciai alpini ovviamente la penetrazione verrà limitata dalla profondità del ghiacciaio e non dalle caratteristiche del sistema.

In tabella è anche riportato un valore di numero di tracce integrate. Si tratta di un normale processo di media non coerente, effettuato per migliorare il rapporto segnale rumore. Alla frequenza di ripetizione degli impulsi di 1927 Hz, ciò vuol dire che il tempo totale per l'integrazione può essere di 5 o 10 ms; il valore più opportuno va scelto in base a considerazioni sulla risoluzione orizzontale e sulla velocità di spostamento del velivolo.

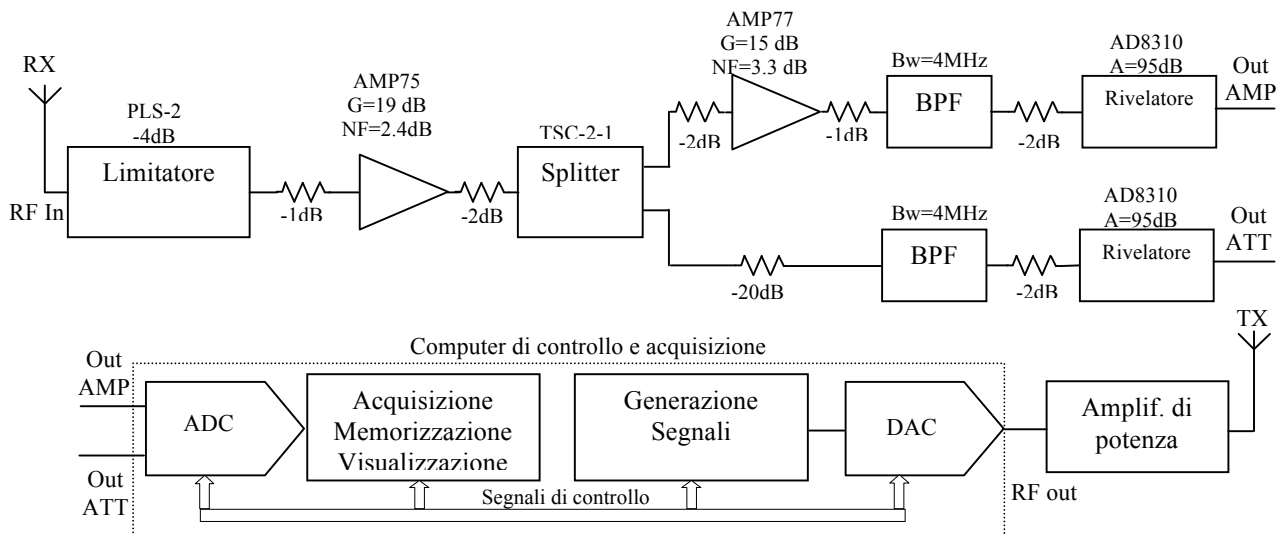


Figura 4. Schema a blocchi del nuovo RES.

Parametro	Valori
Frequenza della portante RF	12 MHz
Durata dell'impulso trasmesso	167-667 ns (2-8 cicli della portante)
Tipologia dell'impulso	semplice non codificato
Frequenza di ripetizione dell'impulso	1927 Hz
Potenza trasmessa di picco	4 kW
Tipologia ricevitore	rivelatore logaritmico ad involuppo
Larghezza di banda del ricevitore	4 MHz
Dinamica del ricevitore	da +10 a -100 dBm
Risoluzione dell'acquisitore	14 bit
Frequenza di acquisizione	50 / 100 MHz
Durata dell'acquisizione	40.96 / 20.48 $\mu$ s (2048 punti)
Profondità di penetrazione max.	3.4 / 1.7 km
Numero di tracce integrate	10 o 20
Potenza elettrica assorbita	~700 W @ 24V
Dimensioni	54x56x65 cm
Peso	60 kg

**Tabella 1.** Caratteristiche principali del sistema RES a 12 MHz.

#### 4. Antenne

Rispetto ai precedenti radar in VHF, la realizzazione del nuovo radar in HF ha incontrato come principale problema quello della realizzazione di antenne adeguate. È noto infatti che le dimensioni di un'antenna crescono al crescere della lunghezza d'onda e mantenere piccole dimensioni, anche se non pregiudica necessariamente il funzionamento, sicuramente diminuisce l'efficienza, in termini di guadagno e di area efficace del dispositivo.

Le antenne dei vecchi RES, essendo piccole, potevano essere fissate sotto alle ali dell'aereo che portava il sistema radar. Dovendo aumentare le dimensioni, non si è potuto continuare a sfruttare tale disposizione, si è pensato pertanto ad un'antenna a filo, posta su un telaio portante di legno da appendere sotto al velivolo, che in questo caso non è più un aereo ma un elicottero.

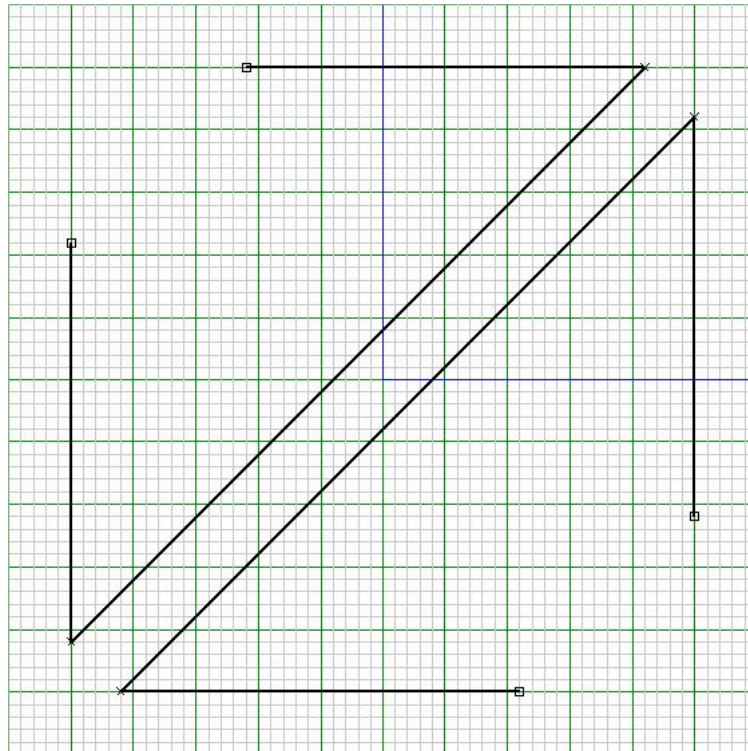
Questo cambiamento di disposizione però non sarebbe stato ancora sufficiente, permanendo problemi costruttivi, infatti a frequenze attorno ai 10 MHz corrispondono lunghezze d'onda dell'ordine di 30 metri e quindi antenne che, nel caso di un dipolo a mezz'onda, sarebbero state lunghe circa 15 metri, ancora troppo per qualcosa che andava appeso sotto ad un elicottero. A questo problema va aggiunto anche quello della larghezza di banda, che per il RES può raggiungere valori molto elevati, in termini frazionari: ad esempio, se si fosse mantenuta la banda di 10 MHz, si sarebbe dovuta realizzare un'antenna con prestazioni costanti da 5 a 15 MHz. Sono allora state prese alcune decisioni di progetto per attenuare il più possibile questi problemi:

- si è aumentata leggermente la frequenza centrale, portandola da 10 a 12 MHz;
- si è diminuita la banda operativa, portandola a 4 MHz (quindi essa va da 10 a 14 MHz);
- si è rinunciato a costruire un'antenna risonante, ammettendo caratteristiche aperiodiche;
- si è cercato comunque di fare in modo che il diagramma di radiazione avesse il massimo verso il basso.

Queste scelte hanno avuto come contropartita un guadagno piuttosto basso e una impedenza molto diversa da quella tipica per i cavi di collegamento (50  $\Omega$ ), cosa che ha comportato complicazioni per l'adattamento.

Dopo varie considerazioni e simulazioni al calcolatore, alla fine la scelta è caduta sulla struttura riportata in fig.5, che per la sua forma è stata chiamata "a doppia freccia".





**Figura 5.** Dimensioni dell'antenna.

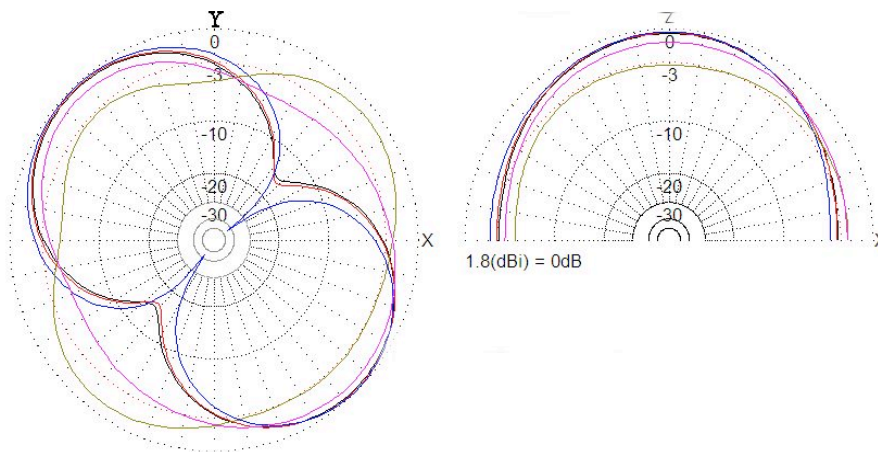
La figura presenta una quadrettatura in cui ogni quadrato maggiore ha lato di 0.5 m (quindi i quadratini interni hanno lato di 10 cm); tutta la struttura può essere compresa all'interno di un quadrato di 5 m di lato. Si possono notare due linee nere spezzate, che corrispondono a due antenne, dato che ne serve una in trasmissione ed una in ricezione; esse sono uguali come forma anche se poste in maniera speculare. Ogni antenna consiste di un filo costituito da tre sezioni; la parte più lunga corre molto vicino alla diagonale del quadrato (circa 6.5 m) ed è interrotta al centro (l'interruzione è minima e non è riportata in figura); le altre due sezioni sono costituite da due tratti di filo più corti (3.2 m), lunghi circa il 60% del lato del quadrato. La lunghezza totale di ogni antenna è di 12.9 m, ottenendo in questo modo una lunghezza dello stesso ordine di grandezza di quella di un dipolo a mezz'onda a 12 MHz. La separazione tra i tratti lunghi e paralleli è di 57 cm.

Si è cercato di mantenere le due antenne così ripiegate comprese all'interno di un quadrato di 5 m di lato perché questo era un vincolo massimo per poterlo appendere sotto all'elicottero che avrebbe portato il radar. Le alimentazioni alle antenne sono portate da coppie bifilari molto corte che si innestano al centro di ciascun tratto lungo in corrispondenza dell'interruzione; ogni coppia proviene da un balun e i due balun sono posti al centro del quadrato. I fili sono realizzati con bronzo fosforoso del diametro di 1.4 mm, ricoperto da una guaina in gomma.

Per antenne di queste dimensioni è difficile effettuare misure in campo lontano del diagramma di radiazione, pertanto le prestazioni sono state stimate usando un programma di calcolo, in modo da avere un supporto alle scelte progettuali. I diagrammi di radiazione sul piano orizzontale e verticale sono riportati in fig. 6, ottenuti immaginando di alimentare una sola antenna; i diagrammi così calcolati tengono conto della presenza della seconda antenna, considerata passiva.

Le varie linee colorate si riferiscono ad alcune frequenze all'interno della banda di interesse:

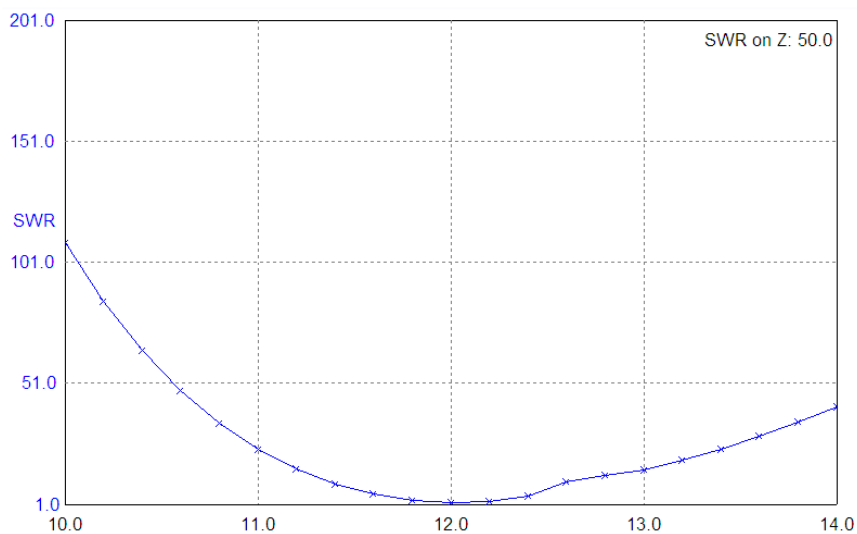
- 10 MHz: nero;
- 11 MHz: rosso;
- 12 MHz: blu;
- 13 MHz: verde;
- 14 MHz: magenta.



**Figura 6.** Diagrammi di radiazione di una singola antenna.

In corrispondenza della frequenza centrale si ha il comportamento più vicino a quello di un dipolo orientato lungo la bisettrice del primo e terzo quadrante del piano XY, quindi ottenendo un profondo minimo di radiazione; alle altre frequenze le prestazioni si scostano da questo andamento. La diminuzione del guadagno nel piano orizzontale non è molto significativa, e anzi può essere di aiuto perché echi derivanti da eventuali riflettori non posti sotto all'antenna vengono trattati diversamente e parzialmente attenuati.

La prestazione più importante è però il guadagno nel piano verticale, che varia molto poco con la frequenza: è massimo proprio sulla verticale a 12 MHz, raggiungendo +1.8 dB rispetto all'antenna isotropica, ma abbassandosi solo di circa 3 dB al massimo (a 13 MHz).

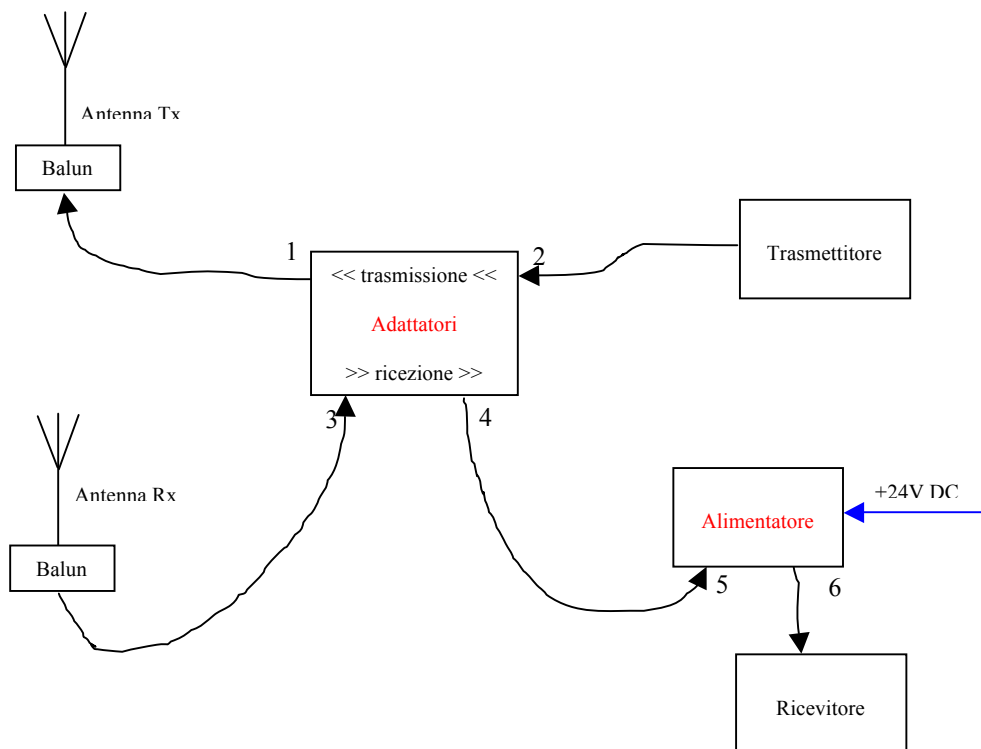


**Figura 7.** Andamento del SWR.

In fig. 7 è riportato l'andamento del rapporto onde stazionarie (Standing Wave Ratio – SWR), che fa capire che, in assenza di opportuni provvedimenti, si ha un buon adattamento solo alla frequenza centrale della banda, mentre già a qualche centinaia di kHz da essa diventa intollerabilmente elevato.

## 5. Adattatori di antenna

La difficoltà di adattare l'antenna a tutte le frequenze ha suggerito l'adozione di provvedimenti differenti in trasmissione ed in ricezione. Lo schema di fig. 8 mostra in generale come vanno fatte le connessioni tra le antenne e trasmettitore e ricevitore.

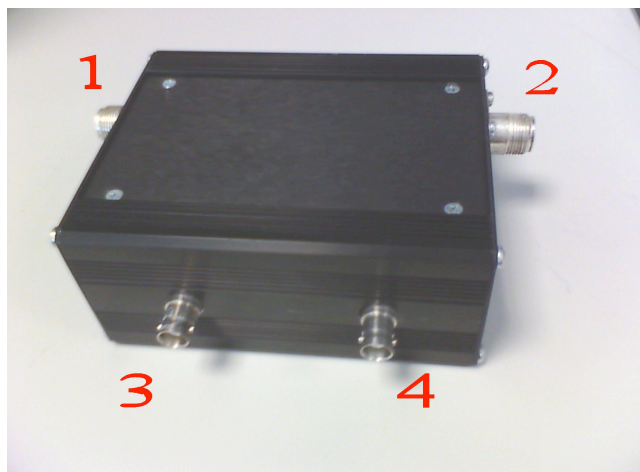


**Figura 8.** Schema delle connessioni alle antenne.

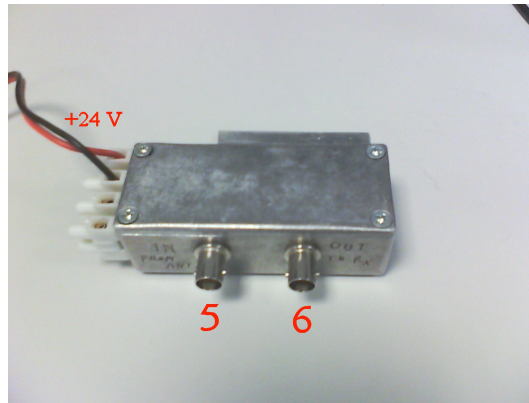
Le antenne sono di tipo bilanciato, pertanto per la connessione ai cavi coassiali vanno utilizzati due balun, che in questo caso non realizzano anche l'adattamento ma solo la conversione da connessione bilanciata a sbilanciata. I cavi che collegano i balun ai connettori 1 e 3 della scatola centrale sono molto corti per evitare problemi di disadattamento. La scatola centrale (di metallo) contiene sia l'adattatore in trasmissione che quello in ricezione che saranno descritti nel seguito; il suo aspetto è visibile in fig.9.

Dato che l'adattatore in ricezione è attivo, esso necessita di alimentazione, che viene fornita da apposito circuito posto vicino al ricevitore e contenuto in un'altra scatola metallica raffigurata in fig.10.

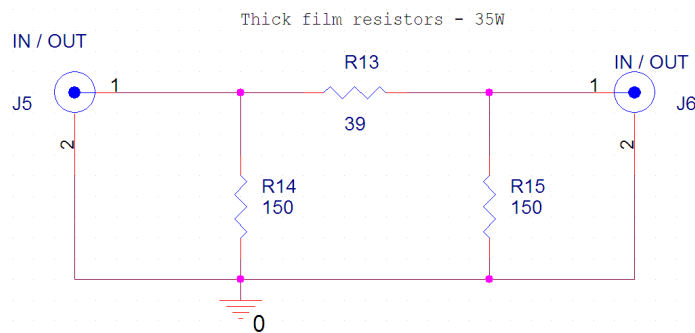
In trasmissione l'adattamento ha come scopo primario quello di evitare che molta energia torni indietro dall'antenna al trasmettitore, con possibili danneggiamenti. Data la grande banda frazionaria risulta estremamente difficile il progetto di un adattatore reattivo, che per sua natura risuona per una sola frequenza o per una banda limitata attorno ad essa. Si è optato quindi per un tipo di adattamento (peraltro adottato anche nella normale tecnica radio) di tipo passivo: una rete di resistenze che presenti dal lato del trasmettitore una impedenza molto vicina a quella della linea, indipendentemente dalle variazioni dell'impedenza dal lato dell'antenna. Lo schema elettrico dell'adattatore è riportato in fig.11.



**Figura 9.** Scatola contenente gli adattatori di antenna.



**Figura 10.** Scatola contenente l'alimentatore.



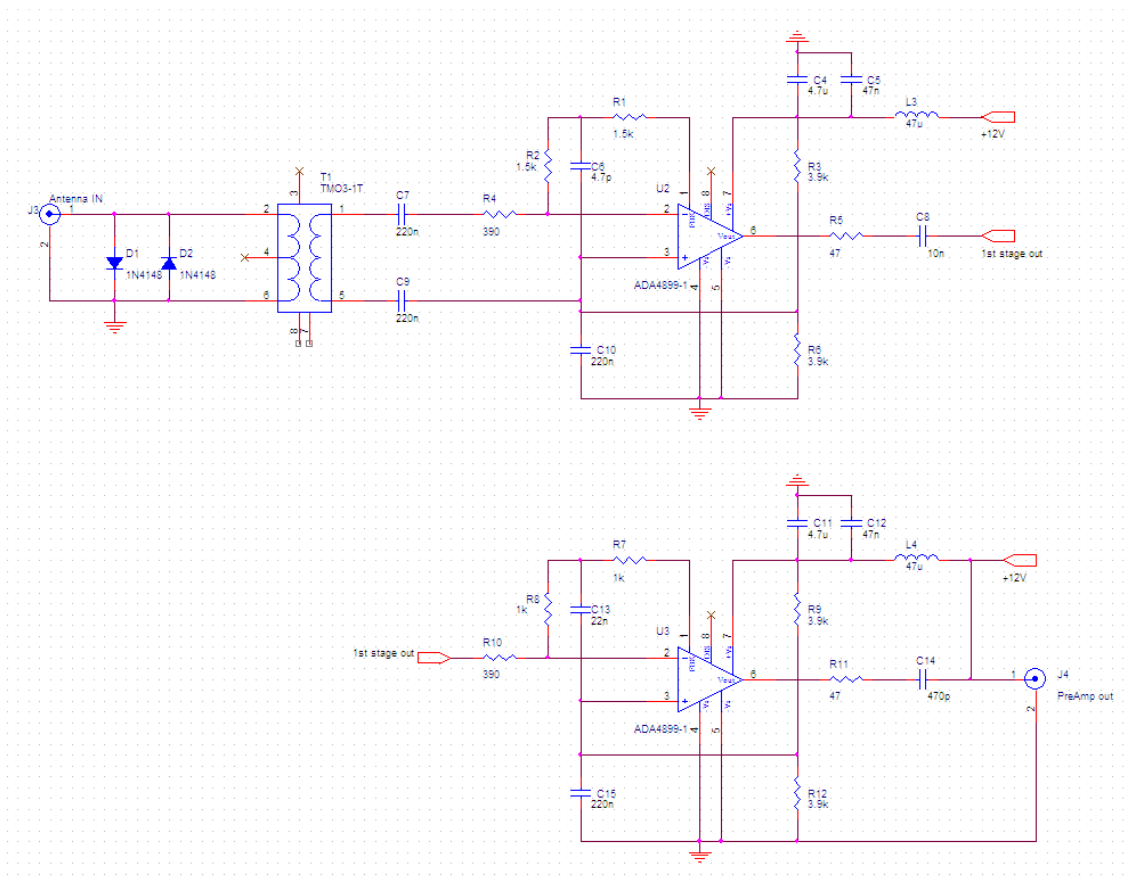
**Figura 11.** Schema elettrico dell'adattatore in trasmissione.

Perché il dispositivo si comporti secondo quanto atteso alle alte frequenze, si sono dovuti utilizzare resistori per alta frequenza, costruiti con tecnologia a film spesso e capaci anche di dissipare notevoli quantità di potenza. Stime teoriche portano a dissipazioni massime sulla resistenza di  $39\ \Omega$  del 75% della potenza continua erogata dal trasmettitore, ma che si raggiungerebbero solo se l'uscita fosse in corto circuito, oppure di circa il 50% sulle resistenze di  $150\ \Omega$  in caso di carico infinito. Per essere sicuri che il dispositivo possa funzionare anche in condizioni diverse e più severe di quelle attuali (in cui la potenza media erogata è di circa 1-5 W) si sono scelti resistori da 35 W.

L'attenuazione teorica di un circuito del genere, nel caso in cui fosse chiuso sull'impedenza nominale di  $50\ \Omega$ , sarebbe di 6.1 dB, valore che sale notevolmente per impedenze differenti, che purtroppo si incontrano all'interno della banda di interesse. Ciò che si voleva ottenere però era un rapporto onde stazionarie adeguato al buon funzionamento del trasmettitore. In effetti i valori misurati di SWR anche nei casi estremi di carico in corto circuito o circuito aperto non hanno mai superato il valore di 1.7 su un'ampia banda (da 0.1 a 100 MHz), cosa che rende utilizzabile l'adattatore anche per usi futuri in sistemi differenti, cioè che funzionano a frequenza diversa e potenze maggiori. La contropartita di tutto questo è un'attenuazione differenziale del segnale all'interno della banda utile, che porta a distorsioni nella forma dell'impulso, con effetti simili a quelli di una limitazione in banda. Per questo motivo al momento della stima della risoluzione si è preso in considerazione l'impiego di un impulso con fronti non ripidi.

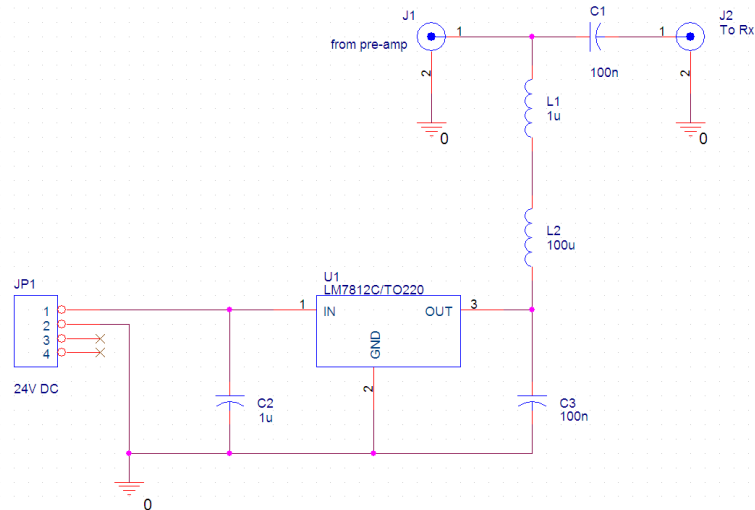
In ricezione il problema di un segnale di elevata energia che torna indietro sulla linea di trasmissione non si pone, anzi, in molti casi, se la frequenza non è troppo elevata, come è il caso delle HF, è possibile trattare l'antenna come un generatore di segnale che va solo amplificato. Il tipo di generatore da considerare dipende dalle caratteristiche dell'antenna: se si tratta di antenne a telaio con bassa impedenza si può pensare ad un generatore di corrente, il contrario se si tratta di antenne a dipolo, che invece si comportano in maniera più simile ad un generatore di tensione con una resistenza serie.

L'antenna utilizzata, anche se non risona a tutte le frequenze, può essere considerata abbastanza simile ad un dipolo, pertanto il segnale presente ai suoi morsetti può essere semplicemente pre-amplificato da un amplificatore di tensione posto attaccato all'antenna; esso deve avere alta impedenza di ingresso e impedenza di uscita corrispondente a quella del cavo di connessione al ricevitore vero e proprio. La soluzione adottata ha funzionato egregiamente, anche se può essere migliorata, in quanto, per motivi legati ai tempi ristretti per la spedizione antartica, si è riutilizzato un circuito di test sviluppato in precedenza per ricerche su nuovi tipi di antenne da usare in HF. Lo schema elettrico è riportato in fig. 12, mentre in fig.13 è riportato lo schema del circuito che fornisce l'alimentazione all'amplificatore.



**Figura 12.** Pre-amplificatore di antenna in ricezione.

I diodi D1 e D2 servono solo come protezione da eventuali sovratensioni presenti in ingresso. Il trasformatore T1 viene usato come elevatore di impedenza (di un fattore 3; ciò non sarebbe stato necessario, ma era presente nel circuito originale). I due stadi di amplificazione sono basati sui due operazionali U2 U3 in configurazione invertente, ma con il terminale positivo che si trova a massa solo per il segnale, mentre il livello continuo è tenuto a metà strada tra la massa e l'alimentazione. Si sono introdotti anche i condensatori C6 e C13 per migliorare la risposta in frequenza. L'alimentazione viene portata dal cavo connesso all'uscita J4 e poi separata dal segnale con gli usuali componenti (induttori L3, L4 e condensatori C4, C5, C8, C11, C12, C14).



**Figura 13.** Alimentatore per l'amplificatore di Figura 12.

L'alimentatore è costituito da un semplice regolatore 7812 corredato da alcuni induttori e condensatori per migliorare il ripple e per il solito disaccoppiamento col segnale. L'alimentazione in ingresso è di 24V perché sul velivolo è quella disponibile.

Sono stati costruiti due esemplari di amplificatore e misurate le caratteristiche, che sono riassunte nel seguito. La corrente assorbita dalla coppia amplificatore / alimentatore è di  $50 \pm 5$  mA. Il guadagno varia con la frequenza anche di molto, però solo se lo si misura su un'ampia banda da 0.1 a 100 MHz. Iniettando un segnale di -30 dBm, sufficientemente basso per evitare compressioni, il guadagno è stato misurato variare da un minimo di circa 2 dB (a 0.1 MHz) ad un massimo di circa 49 dB (a 1.6 MHz); il valore particolarmente basso a 0.1 MHz dipende dai condensatori di blocco inseriti tra i vari stadi, cosa che rende l'amplificatore non sfruttabile al di sotto di circa 1 MHz. Limitando la misura alle frequenze di interesse in HF, da 1 a 14 MHz, la variazione è molto minore: tra 36 e 38 dB, accettabile per gli usi del RES. Si è infine misurato il livello che provoca la compressione a 1 dB a 12 MHz, che è risultata avvenire per un ingresso di 2Vpp.

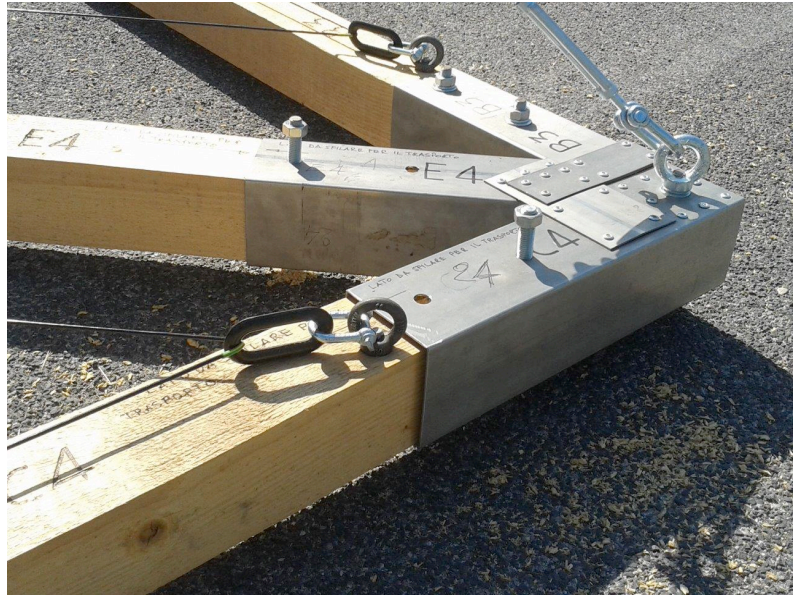
## 6. Sistema completo e risultati di alcune misure in Antartide

In fig.14 a) è riportata la foto che raffigura il sistema RES completamente assemblato nel suo rack e già posto a bordo dell'elicottero usato per il sondaggio. La strumentazione utilizza un inverter per generare la tensione di alimentazione a 220 V per tutta la strumentazione utilizzando l'alimentazione in DC a 24 V dell'elicottero. In alto sul rack è visibile il piccolo oscilloscopio per il monitoraggio del funzionamento delle tracce radar e dei segnali di controllo dello strumento. Il computer di acquisizione e generazione dei segnali radar ha un monitor da rack a cassetto che può essere estratto in caso di necessità, altrimenti con un computer portatile si può collegare in modo remoto per comandare l'acquisizione e configurare i parametri del radar. In figura 14 b) è visibile un particolare di un angolo della struttura in legno e ferro che sorregge l'antenna, in questa inquadratura si vedono anche i fili neri che costituiscono le antenne vere e proprie. Tutta la struttura è stata progettata e realizzata nei laboratori della Sezione Roma 2 dell'INGV. La struttura è stata poi smontata e spedita in pezzi che sono stati assemblati in Antartide prima della campagna di misure. In fig.15 invece è possibile vedere un'immagine del telaio che regge le antenne, posto a terra prima che l'elicottero si alzi in volo, dopo il rifornimento di carburante. Il secondo elicottero in figura forniva l'assistenza al primo in caso di problemi. In questa figura è possibile notare le alette stabilizzatrici (in arancione) aggiunte sulla struttura dell'antenna per mantenerla in assetto durante il volo. Al centro, sulla diagonale, la scatola arancione con tutta l'elettronica degli adattatori e preamplificatori di antenna. Si possono vedere anche i cavi raccolti sul ghiaccio che dalla struttura si raccordano opportunamente al centro, per essere collegati al verricello baricentrale dell'elicottero. I fili della antenna sono invece troppo piccoli per essere visti in figura.





a



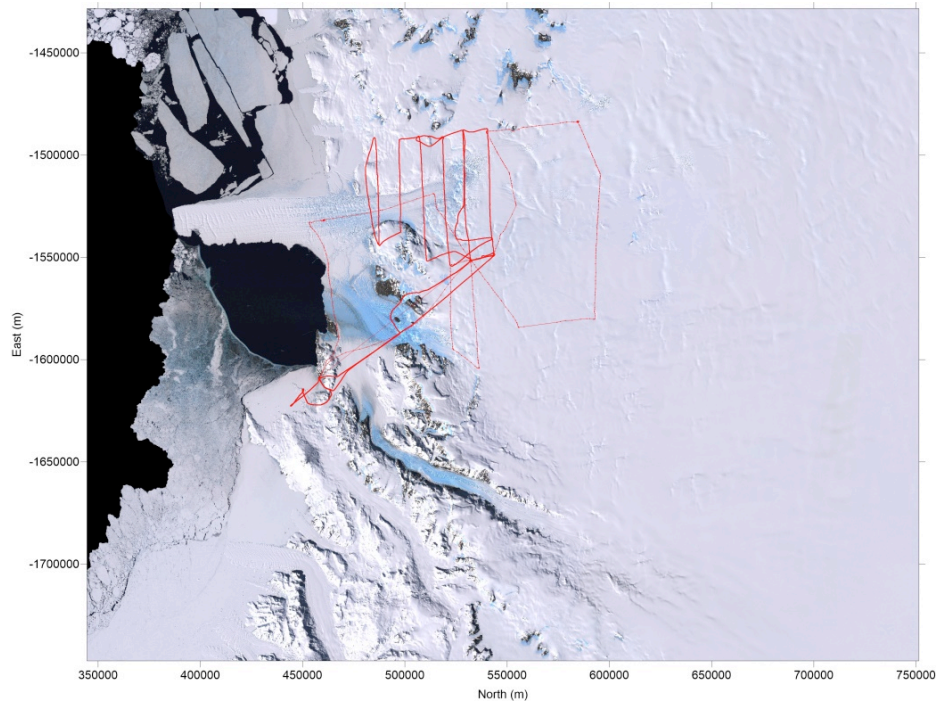
b

**Figura 14.** a) Rack della strumentazione RES montata a bordo dell'elicottero B) particolare della struttura che sorregge l'antenna.



**Figura 15.** Telaio di sostegno delle antenne posato sul ghiaccio durante il rifornimento del carburante degli elicotteri sul sito di misura durante la campagna di misure sul David Glacier.

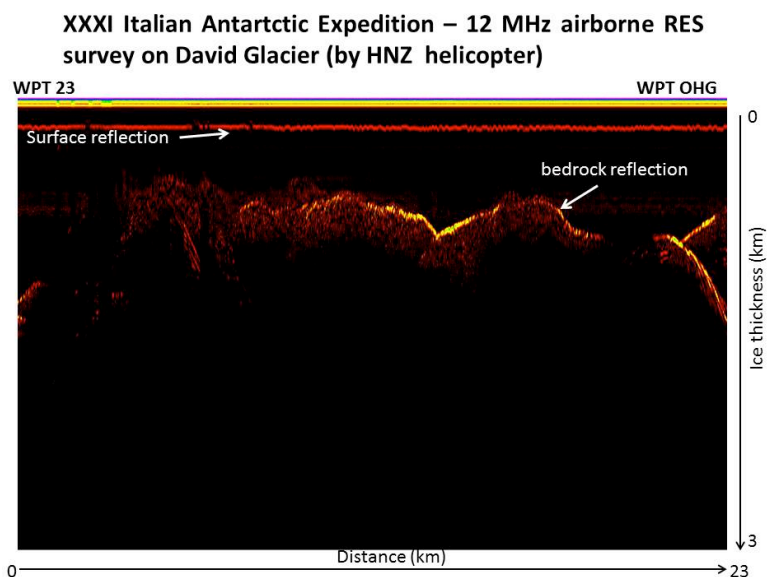
Dal 14 al 25 Novembre 2015 sono state effettuate le misure e i test della strumentazione, grazie a voli dedicati pianificati con la logistica della base. In figura 16 sono visibili i percorsi dei voli effettuati sul David Glacier nella zona vicino alla base italiana "Mario Zucchelli" in Antartide. Per completare tutto il percorso sono stati necessari tre voli di circa 6 ore ciascuno, per un totale di circa 1700 km, con un volo di test iniziale per provare tutta la strumentazione.



**Figura 16.** Percorso dei voli effettuati sul David Glacier.

In figura 17 è visibile il radargramma di un tratto del David Glacier. Lungo i 23 km di tracce radar acquisite sono state evidenziate le riflessioni della superficie del ghiaccio e le riflessioni del fondo roccioso. Dalla differenza dei due echi è possibile misurare lo spessore del ghiacciaio in questo punto e mettendo insieme tutte le linee acquisite con una opportuna elaborazione è possibile valutare la morfologia del fondo e quindi la conformazione del ghiacciaio. I dati sono stati parzialmente elaborati in Antartide per verificare il funzionamento complessivo della strumentazione. Il sistema si è comportato complessivamente molto bene dimostrando buona affidabilità e offrendo buoni risultati soprattutto per la stabilità in volo della struttura della antenna che verrà riutilizzata nelle prossime campagne con i dovuti miglioramenti.

I dati raccolti verranno successivamente elaborati e utilizzati dai progetti PNRA che ne hanno fatto richiesta e saranno comunque disponibile alla comunità Glaciologica.



**Figura 17.** Radargramma di un tratto del David Glacier.



## Bibliografia

- Bianchi C. e Sciacca U., (2003). *La radiopropagazione nei ghiacciai. Considerazioni utili per l'elaborazione dei dati da radar glaciologico*. Quaderni di Geofisica, n° 28.
- Skolnik M., (1990). *Radar Handbook (2nd edition)*. McGraw-Hill Professional, USA.
- Tabacco I.E., Bianchi C., Chiappini M., Passerini A., Zirizzotti A. e Zuccheretti E., (1999). *Latest improvements for the echo sounding system of the Italian radar glaciological group and measurements in Antarctica*. Annali di Geofisica, 42, 2, 271-276.
- Willis N., (2005). *Bistatic Radar (2nd edition)*. SciTech Publishing, Raleigh NC (USA).
- Zirizzotti A., Baskaradas J.A., Bianchi C., Sciacca U., Tabacco I.E. e Zuccheretti E., (2008). *Glacio RADAR system and results*. Proc. RADAR '08, IEEE, 26-30 May 2008 Roma, pp. 1-3.
- Zirizzotti A., Cafarella L., Baskaradas J. A., Tabacco I. E., Urbini S., Mangialetti M., and Bianchi C., (2010). *Dry-wet bedrock interface detection by radio echo sounding measurements*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.48, Issue 2343-2348, DOI:10.1109/TGRS.2009.2038900.
- Zirizzotti A., Baskaradas J.A. e Tutone G., (2012). *Ricevitore ad inviluppo per misure RES*. Rapporti Tecnici INGV, n° 227.
- Zirizzotti A., Cafarella L., Urbini S., (2012). *Ice and bedrock characteristics underneath Dome C (Antarctica) from Radio Echo Sounding data analysis*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.50, Issue 1 37 – 43, DOI:10.1109/TGRS.2011.2160551.
- Zirizzotti A., Cafarella L., Urbini S., Baskaradas J.A., (2014). *Electromagnetic ice absorption rate at Dome C, Antarctica*. Journal of Glaciology, Vol.60, No.223, DOI: 10.3189/2014JoG13J208.
- Zirizzotti A., Cafarella L., Urbini S., Baskaradas J.A., Settini A., (2016). *Assessment of electromagnetic absorption of ice from ice core measurements*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.54, Issue 8 4758-4763, DOI 10.1109/TGRS.2016.2551300.



# Appendice A

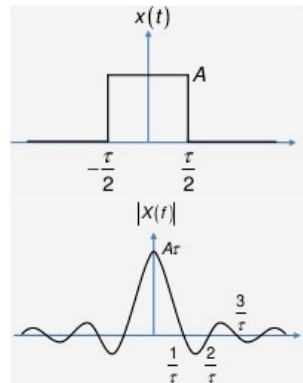
Richiami sul calcolo della  
risoluzione in distanza



Quando ci si propone di determinare la risoluzione in distanza di un radar, come impulso di riferimento si prende usualmente quello rettangolare, la cui espressione analitica nel dominio del tempo e della frequenza è sotto riportata.

$$s(t) = A \cdot \text{rect}_\tau(t) = \begin{cases} A & \text{per } |t| < \tau/2 \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

$$S(f) = A \cdot \tau \cdot \frac{\sin(\tau\pi f)}{\tau\pi f}$$



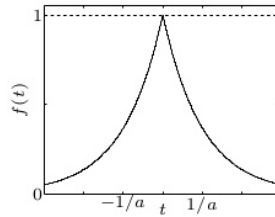
Se si riuscisse veramente a realizzare un impulso del genere (durata  $t=\tau$ , in cui si è usato il pedice  $r$  per indicare che l'impulso è rettangolare), la determinazione della sua esatta posizione temporale non darebbe alcun problema: dato che i fronti di salita e di discesa sono verticali, la loro collocazione temporale potrebbe in linea di principio essere determinata con precisione infinita. Dalla posizione dei fronti discende sia la collocazione temporale dell'impulso (come media tra i due) che la sua discriminazione da un eventuale secondo impulso vicino, che potrebbe essere distinto facilmente se il suo baricentro dista almeno  $\tau_r$  dal primo (in realtà potrebbe trovarsi anche più vicino, ma la discriminazione sarebbe più complicata). La presenza del rumore non altererebbe in alcun modo il rilevamento dei tempi, dato che per qualunque rumore additivo i fronti rimarrebbero verticali e non ne sarebbero influenzati.

Tutto questo deriva dalla teoria dei segnali, che afferma che la risoluzione dipende dalla banda del segnale usato per il sondaggio e tanto più è larga la banda tanto migliore è la risoluzione. Nel nostro caso la banda è virtualmente infinita, tuttavia si può calcolare che la maggior parte dell'energia è compresa entro il lobo principale dello spettro, che termina al primo zero posto a  $f_{0r}=1/\tau_r$ . L'inverso di questo valore è proprio la lunghezza  $\tau_r$  dell'impulso e coincide con la risoluzione. Se si volesse calcolare, come si fa di solito trattando di risposte di apparati elettronici, la frequenza alla quale il modulo al quadrato dello spettro (corrispondente all'energia) scende di 3 dB, cioè la densità di energia si è dimezzata rispetto al massimo, si troverebbe un valore inferiore:  $f_{Br}=0.44/\tau_r$ , valore che può essere assunto come banda "nominale" occupata dal segnale rettangolare. Se il segnale è usato per modulare una portante, va ricordato che la banda occupata raddoppia, perché tutto lo spettro, anziché essere centrato attorno ad  $f=0$ , viene traslato attorno alla frequenza della portante (sia sopra che sotto).

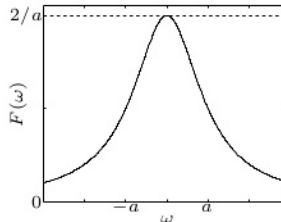
Tutto questo ha solo un valore teorico, perché nei casi reali la banda deve essere limitata e ciò porta a dei fronti non più verticali. Una limitazione in banda fino a circa  $f_{0r}$  non distorcerebbe l'impulso di molto, mentre limitando la banda a  $f_{Br}$  la distorsione sarebbe molto maggiore, con delle "code" temporali molto lunghe. Ciò che si fa di solito è ammettere una banda pari a  $f_{0r}$  e una risoluzione pari a  $\tau_r$ , tralasciando le durate dei tempi di salita e di discesa, considerate trascurabili rispetto alla lunghezza dell'impulso. La tecnica radar si preoccupa quindi di limitare la potenza di picco trasmessa, introducendo codifiche che allungano la durata temporale, abbassino la potenza di picco mantenendo la sua energia costante e conservando la banda. Con opportuna elaborazione in ricezione si riesce a "comprimere" l'impulso e lasciare inalterata la risoluzione.

Ci si può chiedere fino a che punto si può limitare la banda, accettando un allungamento dell'impulso. Se limitiamo la lunghezza dell'impulso la banda necessaria tende ad allargarsi, ma se si accetta che i fronti non siano ripidi, ciò può mantenere la banda entro limiti accettabili. La situazione limite si raggiunge per un impulso formato solo dai due fronti, di salita e di discesa. Per portare avanti i calcoli senza troppe difficoltà consideriamo che i fronti abbiano forma esponenziale, formando il cosiddetto impulso esponenziale bilatero, del quale sono sotto riportate le rappresentazioni analitiche nel dominio del tempo e della frequenza.

$$s(t) = e^{-a|t|} \quad a > 0$$



$$S(f) = \frac{2a}{a^2 + 4\pi^2 f^2}$$



Come primo passo si può calcolare la durata di un impulso del genere. Ovviamente esso ha durata infinita, ma se ne può dare una definizione accettabile prendendo gli istanti per i quali assume la metà del valore massimo. Si trova dopo semplici passaggi:

$$\tau_e = \frac{2 \ln 2}{a} \approx \frac{1.386}{a},$$

in cui la durata è stata chiamata  $\tau_e$  per mantenere uniformità con la analoga definizione valida per l'impulso rettangolare, ma col pedice  $e$  per ricordare che l'impulso è esponenziale.

Vogliamo ora calcolare la frequenza alla quale lo spettro si riduce di un fattore  $\sqrt{2}$  rispetto al valore massimo, ottenendo:

$$f_{Be} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\sqrt{2} - 1} \approx 0.102 \cdot a \approx \frac{0.14}{\tau_e},$$

valore che va confrontato con  $f_{Br} = 0.44/\tau_r$  ricavato in precedenza per l'impulso rettangolare. La banda occupata è pertanto circa tre volte più piccola che nel caso precedente.

Ricordando che la banda effettiva trasmessa su portante è il doppio, si trova in definitiva:  $B \approx 0.3/\tau$ , che è il valore adottato per il RES, anche se gli impulsi usati in pratica non hanno proprio la forma dell'esponenziale bilatero qui considerato. Tale banda è solo quella nominale, ma nessun limitatore di banda la limita in maniera netta, né tanto meno l'antenna, pertanto l'energia che passa per frequenze esterne alla banda nominale non potrà che migliorare le caratteristiche dell'impulso trasmesso.

Le considerazioni sulla risoluzione fin qui svolte possono indurre a pensare che si possa, a parità di banda, ridurre la durata dell'impulso di molto e ottenere risoluzioni maggiori, contrariamente ai risultati teorici che affermano che la risoluzione è determinata solo dalla banda. In realtà, non usando impulsi rettangolari, o approssimativamente tali, la minor durata dell'impulso viene ottenuta pagandola con dei fronti non ripidi, pertanto, in presenza del rumore, la determinazione della posizione dell'impulso e dei fronti viene affetta da errore (aumenta la deviazione standard della distribuzione dei valori misurabili per i tempi), tanto maggiore quanto più i fronti sono smussati.

# Appendice B

Considerazioni sulle definizioni di  
radar monostatico e bistatico





Volendo aderire alla lettera alla definizione, il RES oggetto di questo Rapporto Tecnico potrebbe essere definito come “radar bistatico”. Infatti la definizione afferma che quando un sistema radar è dotato di antenna trasmittente e ricevente poste in località differenti andrebbe chiamato bistatico e non monostatico; tuttavia vari fattori inducono a considerare in maniera critica la definizione, come fanno peraltro anche vari autori. Quando infatti vi sono antenne separate poste nello stesso sito (come ad esempio nei radar CW per i quali non è facile usare la stessa antenna) il termine bistatico non è usato. Vi sono inoltre esempi di radar (come alcuni OTH) in cui le antenne possono addirittura essere separate di decine di chilometri, ma tale separazione è piccola comparata con la dislocazione del bersaglio.

Il problema è che la definizione IEEE di radar bistatico non specifica di quanto l’antenna trasmittente e ricevente debbano essere distanti perché il sistema si possa definire tale. All’uopo [Skolnik, 1990] parla di “considerevole distanza”, comparata con quella del bersaglio. Una definizione che può contribuire a definire meglio i contorni del problema è quella che si trova in [Willis, 2005]. Per considerare un radar come bistatico deve essere verificata almeno una delle seguenti condizioni:

- l’angolo formato dalle direzioni trasmettitore-bersaglio e bersaglio-ricevitore è comparabile (o maggiore) della larghezza del lobo principale di radiazione delle antenne (ammesse uguali);
- le distanze trasmettitore-bersaglio e bersaglio-ricevitore differiscono di una quantità che è una frazione significativa delle distanze stesse.

Nel nostro caso, pur essendo presenti due antenne, esse sono alla stessa distanza da qualunque bersaglio, essendo poste a pochi metri l’una dall’altra, mentre i vari riflettori nel ghiaccio si trovano a distanze dell’ordine delle centinaia o migliaia di metri, quindi la seconda condizione non è rispettata. Non è verificata neanche la prima, dato che i lobi di radiazione sono praticamente coincidenti, puntano sulla stessa zona e i bersagli vedono la trasmittente e la ricevente nella stessa posizione.

Tutto questo vuol dire anche se si fosse usata una sola antenna le intensità dei segnali e i ritardi negli echi sarebbero stati del tutto sovrapponibili a quelli del sistema con due antenne, portando alla medesima elaborazione dei segnali ed alle stesse uscite. In base a quanto detto per il RES non si può parlare di radar bistatico, ma, semmai, di “pseudo monostatico” o “quasi bistatico”.

# Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

# Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2016 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**