



ISSN 1590-2595

quaderni di geofisica

n. 28

LA RADIOPROPAGAZIONE NEI GHIACCIAI: CONSIDERAZIONI UTILI PER L'ELABORAZIONE DI DATI DA RADAR GLACIOLOGICO

Cesidio BIANCHI, Umberto SCIACCA

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

2003

Direttore

Enzo Boschi

Comitato di Redazione

Cesidio Bianchi
Tecnologia Geofisica

Rodolfo Console
Sismologia

Giorgiana De Franceschi
Relazioni Sole-Terra

Leonardo Sagnotti
Geomagnetismo

Giancarlo Scalera
Geodinamica

Ufficio Editoriale

Francesca Di Stefano
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
Tel. (06) 51860468
Telefax: (06) 51860507
e-mail: distefano@ingv.it

**LA RADIOPROPAGAZIONE NEI GHIACCIAI:
considerazioni utili per l'elaborazione
di dati da radar glaciologico**

Cesidio BIANCHI, Umberto SCIACCA

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Roma

Indice

1. Introduzione	5
2. Richiami sui principi dei sistemi radar	5
2.1 Generalità e misura della distanza	5
2.2 Potenza ricevuta	6
2.3 Ambiguità	6
2.4 Risoluzione radiale	6
2.5 Guadagni delle antenne e risoluzione orizzontale	7
3. Caratteristiche generali del sistema radar glaciologico impiegato	8
4. Stima dei fattori che influenzano l'ampiezza del segnale ricevuto	8
4.1 Generalità	8
4.2 Perdite dovute alle linee, la depolarizzazione e la diffusione	9
4.3 Perdite subite nell'attraversamento delle interfacce	9
4.4 Assorbimento nel mezzo	11
4.5 Effetto di focalizzazione rifrattiva	12
4.6 Focalizzazione per riflessione	12
4.7 Attenuazione complessiva	14
5. Taratura del sistema	14
6. Alcuni risultati sperimentali	15
7. Ulteriori considerazioni su riflessioni da discontinuità e diffusione	16
Bibliografia	20

1. Introduzione

Da alcuni anni l'INGV sta partecipando a progetti di ricerca nel campo della radioglaciologia, cioè lo studio dei ghiacciai tramite sistemi radar particolari conosciuti anche come Radio Echo Sounding (RES) nella letteratura in lingua inglese. Lo scopo del presente lavoro non è quello di compendiare tutte le conoscenze di base utili in questo genere di indagini, esistendo alcuni testi che coprono l'argomento (per esempio [Bogorodsky 1985]). Tuttavia gli esiti del lavoro svolto in Istituto e i risultati delle campagne hanno portato alla pubblicazione di alcuni lavori, come [Tabacco et al. 2000; Bianchi et al. 2001], la formulazione dei quali ha richiesto lo svolgimento preventivo di considerazioni teoriche, essenzialmente di Elettromagnetismo, e l'approntamento di procedure di calibrazione. Questa pubblicazione raccoglie le suddette considerazioni.

Nel laboratorio dell'INGV è stato approntato un prototipo di radar glaciologico di nuova concezione, ma le uniche prospezioni finora realizzate si sono basate sull'impiego di un radar ad inviluppo sviluppato presso lo stesso laboratorio in collaborazione con l'Università di Milano [Tabacco et al. 1999]. Ci soffermeremo pertanto su alcune considerazioni generali riguardanti questo tipo di RES che ci ha permesso di arrivare ad alcune conclusioni relative alla propagazione delle onde elettromagnetiche nei ghiacciai freddi. Maggiore attenzione verrà invece dedicata all'analisi dei vari fattori che possono influenzare l'ampiezza del segnale ricevuto, in modo che da essa sia possibile estrarre informazioni aggiuntive rispetto alla semplice profondità del bedrock e dello spessore del ghiaccio. Concluderanno il lavoro alcune considerazioni su come il sistema è stato calibrato e sul tipo di segnale che viene ricevuto, comprese le informazioni sulla forma della superficie riflettente [Bianchi et al. 2001].

Il presente lavoro ha un taglio prevalentemente fisico e tecnologico, dunque non saranno trattati argomenti riguardanti da vicino la Glaciologia. Al contrario, pur non presupponendo che il lettore abbia conoscenze specialistiche sui radar, si daranno per scontate conoscenze generali di Elettromagnetismo, Elettronica e Teoria dei Segnali.

2. Richiami sui principi dei sistemi radar

2.1 Generalità e misura della distanza

È noto che un sistema radar basa la possi-

bilità di rilevare la presenza di un oggetto nello spazio sulla ricezione di un'eco ricevuta in seguito alla "illuminazione" (in senso lato) dell'ambiente circostante da parte del sistema. In questo senso il radar può essere considerato un sistema che permette di estrarre informazioni dall'ambiente (telerilevamento) in maniera sostanzialmente analoga a quanto può fare uno strumento di misura. Rispetto ad altri sistemi di telerilevamento però il radar, per quanto appena detto, si contraddistingue per essere di tipo attivo, cosa che implica maggiore complessità.

Immaginando di trasmettere un impulso di breve durata, si dovrà aspettare l'eco. La distanza dell'oggetto riflettente può essere ricavata facilmente con la relazione:

$$h = \frac{v\tau}{2} \quad (2.1)$$

dove si è indicato con τ il ritardo tra trasmissione e ricezione, mentre v è la velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica nel mezzo, che si suppone nota (ovviamente, se vengono attraversati più mezzi, bisognerà tenere conto delle differenti velocità). La (2.1) ha per conseguenza che, qualora non esistano fonti di disturbo, è possibile rilevare la presenza e la distanza di un oggetto semplicemente misurando l'intervallo di tempo τ , dato che risulta facile identificare in ricezione il picco o i picchi corrispondenti agli oggetti riflettenti rispetto al rumore di fondo.

Ovviamente le cose si complicano allorché nell'ambiente si vengano a trovare fonti di disturbo, quali rumore elevato o oggetti in grado di riflettere l'energia em in maniera significativa, ma ai quali non si è assolutamente interessati (il cosiddetto "clutter", es. una montagna), perché i picchi ricevuti possono risultare di più difficile identificazione, o addirittura essere mascherati. È anche possibile che i riflettori abbiano caratteristiche "non standard", cioè siano mezzi che non rinviano l'energia incidente in maniera concentrata, ma distribuita; l'effetto in ricezione è analogo a quello rilevabile in presenza di mezzi dispersivi, pur essendo possibile che i mezzi incontrati non lo siano. Un esempio di tale situazione si ha proprio nei ghiacciai, nei quali esistano varie stratificazioni, le cui superfici di separazione possono dar luogo a riflessioni di quantità significative di energia.

2.2 Potenza ricevuta

Esistendo i citati disturbi, la teoria e la tecnica radar si sono preoccupate di migliorare le prestazioni a partire dall'analisi della potenza ricevuta, che può essere calcolata con la classica "equazione radar", che si riporta nel caso di interesse in cui i riflettori siano estesi (non concentrati come nel caso dei radar per rilevamento di aerei), vale a dire che la loro estensione è almeno un ordine di grandezza maggiore della lunghezza d'onda impiegata. La sostanziale differenza rispetto al caso di riflettori concentrati è la dipendenza della potenza dalla distanza, che segue una legge del tipo r^2 anziché r^4 . Nella equazione che si riporta più sotto si sono indicate con P_r e P_t le potenze ricevute e trasmessa, r la distanza percorsa dall'onda em dall'antenna trasmittente a quella ricevente, G_t e G_r i rispettivi guadagni, λ la lunghezza d'onda dell'onda em che viene ricevuta; infine con G_p e L_p si sono volute indicare sinteticamente tutte le fonti di guadagno o perdita che il segnale può incontrare lungo il percorso tra trasmettitore e ricevitore.

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi \cdot r^2} \cdot \frac{G_p}{L_p} \cdot \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (2.2)$$

Nella (2.2) il primo termine si può interpretare come la densità di potenza che decresce con r^2 , il secondo termine tiene conto delle vicende radiopropagative dell'onda e.m. e il terzo termine è relativo all'area effettiva di cattura dell'antenna ricevente. La relazione (2.2), valida quando le dimensioni del riflettore sono molto maggiori della lunghezza d'onda λ (riflettori coerenti) può essere impiegata in vari modi. In generale sono incogniti vari parametri in essa contenuti, alcuni dei quali possono essere determinati con precisione ponendosi in condizioni note. Ad esempio, volendo determinare i guadagni delle antenne, ci si pone in condizioni controllate (un ambiente dalle caratteristiche ben note) e si applica la (2.2), effettuando così una calibrazione del sistema, della quale si parlerà nel seguito. Una volta conosciuti i parametri caratteristici del sistema, si può usare la (2.2), a partire dalla misura della P_r , e ricavare proprietà del mezzo indagato, racchiuse nei termini G_p e L_p . Ciò può essere svolto dopo aver analizzato i fenomeni che influenzano questi parametri, cosa che verrà fatta in un prossimo paragrafo.

2.3 Ambiguità

La maggior parte dei sistemi radar è di tipo "ad impulsi", vale a dire che essi sono basati sulla trasmissione di una sequenza di brevi impulsi, con una frequenza detta PRF (Pulse Repetition Frequency). Tuttavia, se l'intervallo tra due impulsi consecutivi è troppo breve, si presenta il rischio che l'eco relativa ad un certo impulso trasmesso arrivi dopo che è partito l'impulso successivo, dando luogo al fenomeno dell'ambiguità: in altre parole all'eco viene attribuita una distanza errata. D'altro canto non è possibile allontanare troppo tra loro gli impulsi trasmessi per non compromettere altre prestazioni del sistema; tra queste vi è la possibilità di un'integrazione dell'energia di più impulsi ricevuti, che diventa inefficace se questi sono troppo distanziati. Altre considerazioni potrebbero essere svolte nel caso in cui il sistema sia concepito per rilevare, oltre alla distanza, anche la velocità dell'oggetto riflettente; ebbene si potrebbe dimostrare che le prestazioni come rivelatore di velocità peggiorano al diminuire della PRF. In campo glaciologico non si è interessati alle velocità, mentre finora non si sono costruiti sistemi che fanno uso di integrazione degli impulsi ricevuti; questo permette una maggiore libertà nella scelta della PRF, che viene limitata solo dalla massima distanza alla quale si vuole arrivare (D_{max}); da cui:

$$PRF \leq \frac{v}{2D_{max}} \quad (2.3)$$

dove v è la velocità di propagazione. La (2.3) vale per un mezzo omogeneo; se sono presenti più mezzi con velocità diverse bisogna tenerne conto, la formula diviene più complessa, ma la sostanza non cambia. Ad esempio, se si vuole raggiungere la profondità di circa 4 km la PRF deve essere inferiore a circa 20 kHz. La scelta definitiva della PRF viene influenzata da considerazioni di carattere pratico riguardanti alcuni apparati costituenti il radar (es. l'acquisitore / campionatore e la memoria che deve ospitare i dati acquisiti).

2.4 Risoluzione radiale

Una delle più importanti caratteristiche di un sistema radar è la risoluzione, vale a dire la capacità di distinguere due riflettori posti a breve distanza l'uno dall'altro. Qualora si

voglia determinare la risoluzione in direzione radiale, essa è in prima analisi inversamente proporzionale alla durata dell'impulso trasmesso. Tuttavia è possibile dimostrare che ciò che influenza la risoluzione è in definitiva la banda occupata dal segnale e non la sua durata temporale; con opportuna codifica dell'impulso trasmesso è possibile impiegare impulsi lunghi, ma che occupano larghe bande, ed ottenere risoluzioni equivalenti a quelle di impulsi brevi non codificati. Il prototipo del radar glaciologico costruito in INGV fa uso di una tale tecnica, che consente di migliorare il rapporto tra rapporto segnale rumore ricevuto e la potenza di picco trasmessa.

Volendo calcolare la risoluzione nel caso di impulso convenzionale si può adattare la (2.1) dando a h il significato di risoluzione in distanza. Se invece si volesse impiegare un impulso codificato che occupi una banda B , essa diverrebbe proporzionale a $v/2B$ (v è sempre la velocità di propagazione); il valore esatto dipende dal particolare codice usato. Per dare un ordine di grandezza dei valori di interesse, ad un impulso di $1\mu s$ corrisponde una risoluzione teorica di 84 m nel ghiaccio.

2.5 Guadagni delle antenne e risoluzione orizzontale

Oltre alla risoluzione in senso radiale, il sistema radar è caratterizzato anche da una risoluzione orizzontale, che è fortemente influenzata dal guadagno delle antenne. Il RES sviluppato all'INGV è aerotrasportato e fa uso di antenne lineari disposte sotto alle ali, quindi orientate in direzione trasversale rispetto al moto del velivolo.

La risoluzione in direzione trasversale è influenzata solo dalla particolare disposizione delle antenne, perciò per la sua stima basta un semplice calcolo basato sulla conoscenza del diagramma di radiazione del dipolo a mezz'onda ripiegato. Dato che l'antenna irradia le superfici sottostanti anche sotto angoli molto grandi rispetto alla verticale, in teoria si potrebbero ricevere echi da punti anche molto distanti, e la risoluzione sarebbe assai scadente. Però, oltre un certo angolo l'energia irradiata diviene bassa; ad esempio, si può scegliere di considerare trascurabile la radiazione per angoli superiori a quello che corrisponde a metà potenza rispetto alla verticale; per il dipolo usato esso è di circa 28° (non considerando l'effetto delle ali). Se si definisce come risoluzione la larghezza della fascia di superficie illuminata dall'antenna dal fascio appena

definito, essa è pari a poco più di 300 metri sulla superficie del ghiaccio, per un'altezza di volo di 300 m. Ovviamente il fascio irradiato dalle antenne si allarga man mano che si penetra nel ghiaccio; anche tenendo conto dell'effetto di focalizzazione dovuto al passaggio in un mezzo con diversa velocità di propagazione, per una profondità di 2 km la larghezza della fascia illuminata può arrivare a 1700 m.

Considerando quello che succede in direzione longitudinale, al discorso appena fatto andrebbe aggiunto l'effetto di una eventuale integrazione degli impulsi. Qualora la si adotti, essa tende a sommare i contributi di più invii e riflessioni, ottenuti con l'aereo in movimento; il risultato è una "media" di zone del terreno diverse e quindi una perdita di risoluzione. In realtà un semplice calcolo mostra che la maggiore limitazione proviene anche in questo caso dalla scarsa direttività delle antenne. Il dipolo usato infatti non ha praticamente direttività in senso longitudinale; ammettendo un angolo di illuminazione di circa 80° , si arriva a valori di 3400 e di oltre 6000 metri, rispettivamente in superficie e a 2 km di profondità. Per evitare che l'integrazione degli impulsi possa ulteriormente peggiorare questi valori, si dimostra facilmente che il numero di impulsi integrati M deve essere:

$$M \leq \frac{l \cdot PRF}{v_a} \quad (2.4)$$

dove l è la risoluzione ammessa e v_a la velocità dell'aereo. Ebbene, inserendo nella (2.4) valori tipici ($v_a = 70$ m/s e $PRF = 1$ kHz), si arriva ad un valore massimo per M di quasi 50'000, che non rappresenta un vincolo significativo.

La scarsa direttività delle antenne può influenzare negativamente le prestazioni del sistema anche in un altro modo. Disporre di una grande risoluzione radiale è ovviamente un pregio del sistema, ma gli sforzi tesi ad aumentare la banda del segnale utilizzabile hanno un senso solo se effettivamente si possono rilevare stratificazioni nei ghiacci. In generale, come si vedrà meglio nel seguito, il coefficiente di riflessione di una discontinuità tra strati di ghiaccio può essere tale da non permettere ad una grande quantità di energia di essere riflessa e rivelare la presenza della discontinuità. Se poi l'eco proveniente da una di queste discontinuità si sovrapponesse a del clutter di diversa provenienza, si rischierebbe di non riuscire più a rivelarla. Tale eventualità non è remota, infatti la grande ampiezza del fascio di antenna provoca l'illuminazione di

una vasta area della superficie ghiacciata e, siccome esiste sempre una frazione di energia che viene riflessa per il cosiddetto backscattering (cioè retrodiffusa verso la sorgente non seguendo le leggi della riflessione), quest'ultima potrebbe agire da clutter e mascherare deboli echi provenienti da discontinuità che si trovino subito sotto alla superficie che presenta il backscattering. Sia il radar di vecchio tipo che il nuovo non hanno tenuto conto di questo effetto per semplificare il progetto e avendo valutato che la perdita di efficienza fosse trascurabile. Nell'ultimo paragrafo si tornerà su questo effetto dando anche alcune valutazioni quantitative.

Esiste infine la possibilità che grandi riflettori, come una montagna, provochino echi spuri, ma essi possono essere abbastanza facilmente identificati in base alla loro posizione temporale, anche se ciò non esclude che possano provocare mascheramento di deboli echi sottostanti la superficie del ghiaccio.

3. Caratteristiche generali del sistema radar glaciologico impiegato

In questo paragrafo si descriveranno brevemente le caratteristiche del RES che è stato impiegato nelle campagne effettivamente realizzate. Ciò a solo scopo esemplificativo, al fine di agganciare le considerazioni teoriche che si svolgeranno nel seguito alla effettiva esistenza di un apparato sperimentale che ne consenta la verifica.

L'apparato usato è un radar classico ad impulsi, aerotrasportato, che lavora con una portante radio di 60 MHz; tale frequenza non permette di impiegare antenne direttive, anche considerando la particolare sistemazione sul mezzo di trasporto. Le antenne usate sono dipoli ripiegati risonanti a mezz'onda sistemati sotto alle ali dell'aereo; le due antenne, la trasmittente e la ricevente, sono sistemate una per ala.

La potenza di picco dell'impulso trasmesso è di 62 dBm; esso è semplice, cioè non codificato, e lungo 1 o 0.3 μ s (la durata può essere commutata dall'operatore), corrispondenti ad una risoluzione teorica di 84 o di 25 m. Il ricevitore è basato su un rivelatore ad inviluppo e fa uso di un amplificatore logaritmico al fine di ottenere un'ampia dinamica. La larghezza di banda è di circa 16 MHz.

Il segnale d'eco viene campionato ad una frequenza di 20 MHz e memorizzato per un tempo di 51.2 μ s (corrispondenti ad una profondità massima di 4 km). La PRF è di

circa 20 kHz, ma l'effettiva velocità di acquisizione è molto più bassa per ragioni legate ai mezzi di calcolo (poco più di 1 Hz). La risoluzione orizzontale perciò è di circa 20 tracce al km (50 m).

I profili longitudinali sono stati ottenuti volando ad un'altezza costante di 300 m; la navigazione è stata assistita da un ricevitore GPS a bordo che ha fornito longitudine, latitudine, altitudine e il tempo da associare ad ogni traccia acquisita.

4. Stima dei fattori che influenzano l'ampiezza del segnale ricevuto

4.1 Generalità

Come si è detto, l'equazione radar (2.2) funge da base per qualunque analisi dell'ampiezza del segnale ricevuto. Essa può essere utilmente resa più compatta riscrivendola come segue:

$$P_r = \frac{P_t G_a^2}{L_g} \cdot \frac{G_p}{L_p} \quad (4.1)$$

dove si è indicato con G_a il guadagno delle antenne, dato che quella trasmittente e quella ricevente sono identiche; mentre L_g esprime la cosiddetta "attenuazione geometrica", cioè l'attenuazione del segnale per il solo fatto che l'energia si distribuisce su superfici via via maggiori allontanandosi dal trasmettitore (per comodità si è inglobato in questo termine anche la lunghezza d'onda):

$$L_g = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad (4.2)$$

Per dare subito un'idea dell'entità di questa attenuazione, si consideri che, per $\lambda = 5$ m e $r = 1200$ m, L_g supera i 9'000'000 (70 dB), mentre per $r = 6.6$ km si arriva addirittura a

$$L_g \approx 230'000'000 \text{ (84 dB);}$$

confrontando questi valori con quelli che si vedranno in seguito, legati a diverse cause di attenuazione, si nota che L_g è il fattore predominante nell'attenuazione complessiva.

In questo paragrafo si vogliono esplicitare i fattori di attenuazione e guadagno contenuti

nei termini sinteticamente indicati con G_p e L_p . È possibile considerare tutto il tragitto tra trasmettitore e ricevitore come un sistema lineare non dispersivo che sottopone il segnale in ingresso ad attenuazioni. I fenomeni che si verificano sono vari ed articolati, ma è possibile rappresentarli matematicamente con dei semplici coefficienti. In particolare si può porre

$$L_p = L_c \cdot L_d \cdot L_s \cdot L_t \cdot L_r \cdot L_a, \quad (4.3)$$

dove i vari pedici si riferiscono alle varie cause di attenuazione: quelle dovute ai cavi e alle linee di trasmissione (c), alla depolarizzazione (d), allo scattering (s), alle perdite nel passaggio attraverso una superficie di discontinuità, che possono essere dovute a non completa trasmissione (t) o riflessione (r), all'assorbimento nel mezzo (a).

Le cause di aumento dell'ampiezza dei segnali sono solo due: una è stata chiamata "effetto rifrattivo" (G_r), l'altra è invece legata alla focalizzazione causata da superfici riflettenti concave (G_f):

$$G_p = G_r \cdot G_f \quad (4.4)$$

Nel seguito del paragrafo ci si soffermerà su ciascuno dei termini introdotti. Si supporrà di voler penetrare un unico blocco di ghiaccio, senza cioè stratificazioni, delimitato superiormente dall'interfaccia con l'aria e inferiormente dalla roccia oppure dall'acqua del mare.

Nel seguito si farà spesso uso di unità logaritmiche (dB o dBm) per semplificare i calcoli.

4.2 Perdite dovute alle linee, la depolarizzazione e la diffusione

Le linee di trasmissione che trasportano l'energia em da e verso le antenne provocano sempre delle attenuazioni ai segnali in transito; tuttavia, considerando che nel caso in esame le frequenze in gioco non sono molto elevate e che i cavi sono piuttosto corti, l'attenuazione finisce con l'essere piccola; se poi i cavi vengono scelti opportunamente e mantenuti in buono stato di manutenzione, questa causa di attenuazione può essere addirittura trascurata in confronto ad altre come la già esaminata attenuazione geometrica. Volendo dare una valutazione quantitativa, si può

porre:

$$L_c \approx 1 - 2 \text{ dB.}$$

A conclusioni analoghe si arriva considerando il parametro L_d , col quale si tiene conto della perdita dovuta alla cosiddetta "depolarizzazione". Lavorando con antenne a polarizzazione lineare, è essenziale che l'orientamento dei campi em trasmesso e ricevuto sia lo stesso, ma capita sempre che una piccola frazione dell'energia arrivi al ricevitore polarizzata in direzione normale a quella utile, con conseguente perdita di efficienza. Tuttavia questo effetto assume rilievo per altri tipi di sondaggi, quali quelli svolti per lo studio della ionosfera; nel nostro caso, anche considerando le frequenze in gioco, è assolutamente trascurabile. Una valutazione di massima porta a:

$$L_d < 1 \text{ dB.}$$

Più delicato è invece considerare i casi di riflessione delle radio onde su superfici riflettenti non perfettamente speculari. Infatti, quando esistono delle asperità di estensione paragonabile alla lunghezza d'onda, una frazione dell'energia incidente viene rinviata in direzione differente da quella imposta dalla legge della riflessione speculare applicata alla superficie "media" (quella cioè che trascura le asperità); questo fenomeno è spesso indicato col termine scattering. Fortunatamente durante le prospezioni effettuate non si sono incontrate superfici accidentate e si può stimare inferiore ad un dB l'effetto dello scattering; ciò non esclude che in altri casi esso non possa assumere valori maggiori.

Un fenomeno analogo al precedente è la diffusione dovuta a disomogeneità di volume nel mezzo attraversato, l'unica differenza è che ora la deviazione dalla direzione di propagazione principale avviene durante la propagazione e non al momento della riflessione su una superficie di separazione.

In generale ed escludendo casi particolarmente sfavorevoli, si può stimare la perdita totale (scattering e volume) compresa tra 1 e 6 dB, perciò:

$$L_s \approx 1 \div 6 \text{ dB.}$$

4.3 Perdite subite nell'attraversamento delle interfacce

È noto dalla teoria dell'elettromagnetismo che ogni volta che un'onda em attraversa la superficie di separazione fra due mezzi con proprietà diverse, una parte dell'energia viene

riflessa ed un'altra viene rifratta e, se sono applicabili le assunzioni dell'ottica geometrica, i raggi che emergono, seguono la direzione imposta da ben note leggi (della riflessione e di Snell). Anche la suddivisione dell'energia tra raggio riflesso e rifratto segue leggi precise, che vengono di seguito richiamate nell'ambito dei casi di interesse. La previsione di come l'energia incidente si suddivide tra raggio rifratto e riflesso è importante perché solo uno dei due è significativo per il funzionamento del sistema radar, mentre l'energia che viene portata dall'altro raggio è considerata persa.

Nel caso della prima interfaccia che si incontra, quella aria- ghiaccio, sarà l'energia riflessa ad essere considerata una "perdita", dato che si desidera che il più possibile dell'energia penetri nel ghiaccio. All'interfaccia ghiaccio- mezzo sottostante (roccia o acqua di mare) si ha la situazione opposta, dato che, se una parte dell'energia continua a propagarsi nel mezzo sottostante, non potrà essere più utilizzata perché difficilmente verrà riflessa da strati ancora inferiori. Infine eventuali superfici di separazione tra strati diversi di ghiaccio hanno comportamenti "neutri", poiché, se è vero che è importante che dell'energia penetri ulteriormente per sondare tutto il ghiacciaio, è anche vero che la frazione riflessa non può essere considerata una perdita, in quanto, anzi, è proprio essa che porta con sé informazioni preziose sulla costituzione interna del ghiacciaio. Considerato poi che le stratificazioni del ghiaccio non implicano grandi differenze tra le proprietà elettromagnetiche dei mezzi (entrambi ghiaccio), possiamo senz'altro trascurare questi casi, limitandoci alle superfici di passaggio tra aria, ghiaccio e acqua. Comunque in un successivo paragrafo si daranno alcuni cenni sull'entità dell'energia riflessa da discontinuità nel ghiaccio.

Per calcolare la frazione di energia riflessa e rifratta rispetto a quella incidente, si fanno le seguenti ipotesi: che l'onda elettromagnetica si propaghi secondo le modalità tipiche dello spazio libero (modo TEM), che i mezzi attraversati siano omogenei ed isotropi, che la permeabilità magnetica sia praticamente uguale a quella del vuoto ($\mu = \mu_0$), che quindi le proprietà dei mezzi siano determinate solo dall'indice di rifrazione, definito da:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (4.5)$$

dove ϵ_r è la costante dielettrica relativa del

mezzo. A rigore, la teoria elettromagnetica (vedi ad es. [Bekefi, 1981]) prevede per ϵ_r un valore complesso, esprimibile quindi in una forma del tipo: $\epsilon_r = \epsilon' + i \cdot \epsilon''$. La presenza della parte immaginaria rende conto delle attenuazioni che il campo subisce nell'attraversare il mezzo, dovute in massima parte alla sua conducibilità non nulla. La stima di quanto il campo si attenui penetrando nei mezzi verrà fatta nel successivo paragrafo, per ora si ricorda che il valore della parte immaginaria di ϵ_r è dato da $\sigma/(\epsilon_0 \cdot \omega)$, essendo σ la conducibilità e ω la pulsazione dell'onda. Nella gran parte dei casi essa è trascurabile, ma non se la propagazione avviene nell'acqua, come si vedrà tra breve.

Ebbene, se l'incidenza è normale i campi elettrici e magnetici sono paralleli alla superficie di separazione, in tal caso si può dimostrare che il rapporto tra i quadrati dei moduli del campo elettrico riflesso e di quello incidente è dato da (il mezzo "1" è quello dove si propagano le onde incidente e riflessa, il "2" quello al di sotto della superficie riflettente):

$$R^2 = \frac{|\vec{E}_r|^2}{|\vec{E}_i|^2} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (4.6)$$

avendo indicato con R^2 tale rapporto, che coincide con il rapporto di potenza cercato; in altre parole, se la frazione di energia riflessa è considerata perdita $L_r \equiv 1 - R^2$.

Analogamente si può determinare il rapporto tra la potenza che passa nel mezzo "2" dopo rifrazione (energia "trasmessa") e quella incidente, essa è pari a:

$$\begin{aligned} T^2 &= \frac{|\vec{E}_t|^2}{|\vec{E}_i|^2} \cdot \frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{2n_1}{n_1 + n_2} \right)^2 \cdot \frac{n_2}{n_1} = \\ &= \frac{4n_1 \cdot n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (4.7) \end{aligned}$$

Anche in questo caso, se l'energia trasmessa è considerata persa, $L_t \equiv 1 - T^2$. Ovviamente deve essere sempre $R^2 + T^2 = 1$. Nella tabella 4.1 sono riportati i valori tipici per le parti reale e immaginaria di ϵ_r dei mezzi che si incontrano in Glaciologia (ϵ'' è calcolato per

una frequenza di 60 MHz). Il valore da introdurre nelle (4.6) e (4.7) è la radice del modulo di ϵ_r .

Mezzo	ϵ'	σ	ϵ''	n
aria	1.0	0	0	1.00
fin	2.1	10^{-7}	10^{-5}	1.44
ghiaccio	3.2	10^{-5}	10^{-3}	1.79
roccia	10.0	10^{-5}	10^{-3}	3.16
gh. marino	3.4	10^{-1}	30	5.49
acqua dolce	81.0	10^{-3}	0.3	9.00
acqua mare	84.4	3	900	30.10

Tabella 4.1 Caratteristiche dei mezzi.

A commento dei dati in tabella va detto che i valori relativi al ghiaccio marino ed alla roccia vanno intesi come valori medi, dato che quelli effettivi possono variare di più di un ordine di grandezza a seconda della struttura chimica e fisica dei mezzi. Il "fin" è costituito da neve non ancora del tutto trasformata in ghiaccio.

Con i dati della tabella 4.1 è possibile determinare i valori delle perdite in corrispondenza a coppie di mezzi di interesse; essi sono riportati in tabella 4.2. Nella tabella si è indicata direttamente la perdita L in dB, mentre tra parentesi si è indicato se la perdita è dovuta a riflessione o a trasmissione. Si noti che un valore è indicato raddoppiato rispetto a quanto previsto dalle (4.6) e (4.7) poiché l'onda em viene sottoposta due volte alla perdita, prima all'andata e poi al "ritorno". Si è inserita la superficie ghiaccio - acqua dolce per valutare anche i casi in cui si incontrino laghi di acqua dolce sotto ad un ghiacciaio.

Interfaccia (rifles. / trasm.)	Perdita L (dB)
ghiaccio - aria (Rx2)	0.7
ghiaccio - acqua marina (T)	1.0
ghiaccio - acqua dolce (T)	3.5
ghiaccio - roccia (T)	11.2

Tabella 4.2 Perdite per riflessione/ rifrazione.

In definitiva, per valutare la perdita complessiva bisogna fare riferimento alle situazioni che effettivamente si possono incontrare. Se si è in presenza di un ghiacciaio antartico, esso poggia sulla roccia, invece nel caso si studi una lingua glaciale essa galleggia sul mare; le perdite complessive saranno rispettivamente:

$$L_{r+t}(\text{ghiaccio su roccia}) \approx 12 \text{ dB},$$

$$L_{r+t}(\text{ghiaccio su mare}) \approx 2 \text{ dB}.$$

4.4 Assorbimento nel mezzo

Qualunque mezzo di propagazione presenta una sia pur piccola conducibilità elettrica, la quale, nel momento in cui il mezzo viene attraversato da un'onda em, provoca la comparsa di correnti parassite che dissipano energia; il risultato è che l'ampiezza dei campi decade esponenzialmente secondo una legge del tipo:

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha r} \quad (4.8)$$

dove A è l'ampiezza che l'onda ha dopo aver percorso un cammino r, mentre A_0 è quella che si ha per $r=0$. La (4.8) consente di determinare l'ampiezza dei campi e, quindi, della potenza in transito una volta che sia nota la costante α . La teoria elettromagnetica, nelle ipotesi già assunte all'inizio del paragrafo 4.3 fornisce per detta costante il valore approssimato:

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2 \cdot c \cdot n \cdot \epsilon_0} \quad (4.9)$$

dove c e ϵ_0 sono la velocità della luce e la costante dielettrica del vuoto, n l'indice di rifrazione del mezzo e σ la conducibilità elettrica dello stesso. La (4.9) è approssimata perché per giungervi si è fatta l'ipotesi che ϵ_r (e quindi n) sia puramente reale, cosa che si verifica se nel mezzo non è contenuta acqua di mare (liquida o solida); in tutti gli altri casi non è possibile trascurare del tutto l'effetto della conducibilità sull'attenuazione, ma la parte immaginaria di ϵ_r diviene comunque trascurabile rispetto a quella reale. Con tale ipotesi, partendo dall'espressione della costante di propagazione k^2 per calcolarne la parte immaginaria (che determina l'attenuazione), si giunge alla (4.9) usando uno sviluppo di McLaurin per $\epsilon'' \approx 0$ arrestato al secondo termine.

Nei casi pratici conviene esprimere L_a in dB attraverso la relazione:

$$L_a = 8.69 \cdot r \text{ [dB]} \quad (4.10)$$

essendo $8.69 = 20 \cdot \log_{10}(e)$. Dai dati della tabella 4.3 si possono calcolare i valori delle attenuazioni L_a nei casi di interesse; ad esempio nel caso di una lingua glaciale spessa 300 m [Bianchi C., et. al. 2001], con un valore di $\sigma = 1.6 \cdot 10^{-5}$ S/m si ha un'attenuazione di ≈ 8.8 dB mentre per il ghiacciaio antartico ($\sigma \approx 5.8 \cdot 10^{-6}$ S/m) spesso 3 km, si arriva a ≈ 32 dB. Nel punto

di massimo spessore del ghiacciaio antartico, circa 4810 m, l'attenuazione potrebbe giungere a $L_a \approx 51$ dB.

In definitiva, se per piccoli spessori di ghiaccio l'assorbimento non è molto rilevante, diverso è il caso di grossi ghiacciai, per i quali il valore diviene critico, il secondo per importanza dopo quello relativo alla attenuazione geometrica.

4.5 Effetto di focalizzazione rifrattiva

Si tratta di un effetto di focalizzazione dovuto alla rifrazione alla discontinuità aria - ghiaccio. Per capire il fenomeno si faccia riferimento alla figura 4.1.

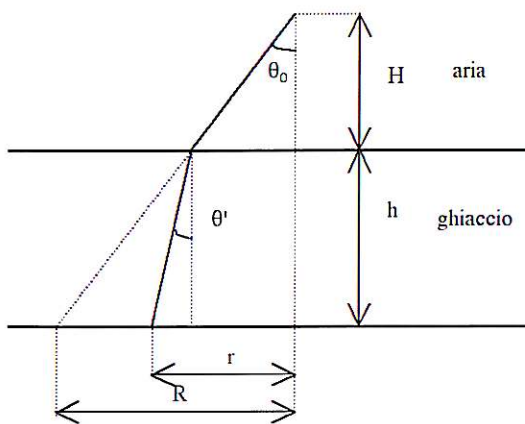


Figura 4.1 - Rifrazione tra aria e ghiaccio

Si assume che sia possibile considerare raggi ottici e ad essi applicare le regole dell'ottica geometrica. Un generico raggio in uscita dall'antenna emerge con un angolo θ_0 rispetto alla verticale; dopo rifrazione alla superficie aria - ghiaccio l'angolo dalla verticale diviene θ' , essendo i due angoli legati tra loro dalla legge di Snell:

$$\sin \theta_0 = n_g \cdot \sin \theta' \quad (4.11)$$

dove n_g è l'indice di rifrazione del ghiaccio (vedi anche 4.5), mentre si è assunto che per l'aria detto indice sia unitario. Dato il valore di n_g risulta sempre $\theta' < \theta_0$. Da notare che, dato che le antenne usate sono poco direttive, è possibile che esistano raggi emergenti con angoli piuttosto elevati. Le leggi della riflessione speculare imporrebbero ai raggi come quello riportato in figura di non tornare verso il trasmettitore, in quanto riflessi verso l'esterno. Si è detto però che esiste sempre una frazione di energia che torna indietro per scattering; ebbene, tale frazione diviene via via minore man mano che aumen-

ta l'angolo θ , come è possibile apprendere anche da [Skolnik 1989]. Accade così che, se il fascio è costituito da raggi che si mantengono vicini alla normale, la riflessione per scattering risulta più efficiente rispetto al caso in cui i raggi fossero rimasti ad un angolo θ_0 maggiore. La rifrazione alla discontinuità aria - ghiaccio ha provocato un effetto che ricorda quello della focalizzazione da una lente.

Nell'intento di dare una descrizione quantitativa del fenomeno si è cercato di esprimere in forma analitica il coefficiente che regola la frazione di energia rinviata per scattering (chiamata σ^0), in modo da inserirlo nell'equazione radar classica, che differisce dalla (2.2) per la dipendenza dalla quarta potenza della distanza (una valutazione analoga viene svolta in un successivo paragrafo, al quale si rimanda per maggiori dettagli). Si è così posta una semplice legge lineare del tipo:

$$\sigma^0 = k_1 - k_2 \vartheta \quad (4.12)$$

dove le costanti k_1 e k_2 sono state valutate basandosi sul grafico di [Skolnik 1989]. Ipotizzando $h \gg H$ si è trovato il rapporto tra l'energia ricevuta in caso di focalizzazione rispetto al caso in cui essa non abbia luogo. Si è trovata una legge complessa di variazione con l'angolo θ ; essa però mostra una debole variazione in aumento con l'angolo, come previsto qualitativamente.

Una diversa valutazione è portata avanti da [Bogorodsky 1985]; essa è basata sulla differenza tra le aree "illuminate" sul fondo del ghiaccio (di raggi R e r in fig. 4.1). Si trova così una relazione più semplice e nel caso generale di valori di H/h qualunque. La legge trovata mostra una leggera variazione in aumento al diminuire del rapporto H/h , cioè l'effetto diviene più sensibile per grossi spessori del ghiaccio. In ogni caso il guadagno è sempre modesto; in definitiva, rifacendosi ai due casi di lingua glaciale e ghiacciaio spesso, si possono porre i seguenti valori:

$$\begin{aligned} G_r(\text{lingua glaciale}) &\approx 2 \text{ dB}, \\ G_r(\text{ghiacciaio}) &\approx 4 \text{ dB}. \end{aligned}$$

4.6 Focalizzazione per riflessione

Si tratta di un effetto che ha luogo ogni volta che la superficie riflettente non è piana, ad esempio all'interfaccia inferiore tra una lingua glaciale e il mare. Se la superficie è concava si

comporta come uno specchio convergente e in ricezione si noter  un aumento dell'intensit  del segnale; il contrario se la superficie mostra la convessit  verso l'alto. Valutazioni analitiche e simulazioni numeriche hanno portato, nel caso di superficie riflettente sferica ad un'espressione per il guadagno G_f del tipo:

$$G_f \cong \pm \frac{1}{\left(1 - \frac{r}{R_0}\right)^2}, \quad (4.13)$$

in cui R_0   il raggio di curvatura della superficie e r la distanza dal radar. Le analisi sulle forme dei riflettori e delle potenze ricevute sono in accordo con quest'ultima relazione. I valori di G_f (validi per $r < R_0$) possono raggiungere ± 8 dB, ricordando che in caso di superficie convessa si ha un'attenuazione e non un guadagno, perci  va preso il segno negativo. La (4.13) pu  essere ricavata a partire da semplici considerazioni di ottica geometrica. Nell'ipotesi di riflettore sferico, dove R_0   il raggio di curvatura, r e q le distanze rispettivamente del punto sorgente e del punto immagine, vale la nota relazione:

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R_0}. \quad (4.14)$$

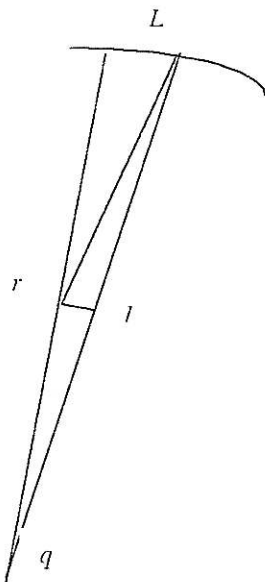


Figura 4.6 - Relazione geometrica tra la superficie riflettente illuminata e l'area di cattura dell'antenna

Ponendosi in una sezione piana del siste-

ma a simmetria sferica (figura 4.6), supponiamo di porre al punto r il sistema RES che illumina un'area di dimensioni lineari L della calotta sferica in questione. Al punto r dove il RES   posizionato (livello dell'area di cattura dell'antenna ricevente) i raggi riflessi investono un'area di dimensione lineare l ; in prima approssimazione una relazione tra triangoli simili ci permette di scrivere:

$$l = L \cdot \frac{q - r}{q} \quad (4.15)$$

Eliminando q tra le equazioni (4.14) e (4.15) avremo:

$$l = 2L\left(1 - \frac{r}{R_0}\right) \quad (4.16)$$

Pertanto la densit  di potenza P (vettore di Poynting) sull'antenna ricevente sar  proporzionale al reciproco di l , cio  :

$$P \propto \frac{1}{\left(1 - \frac{r}{R_0}\right)} \quad (4.17)$$

Passando in due dimensioni, P diviene proporzionale a l^2 , cosa che conduce alla relazione (4.13). Tale relazione si   dimostrata estremamente interessante in quanto ha permesso di quantificare le variazioni della potenza ricevuta del segnale e del bilancio complessivo delle

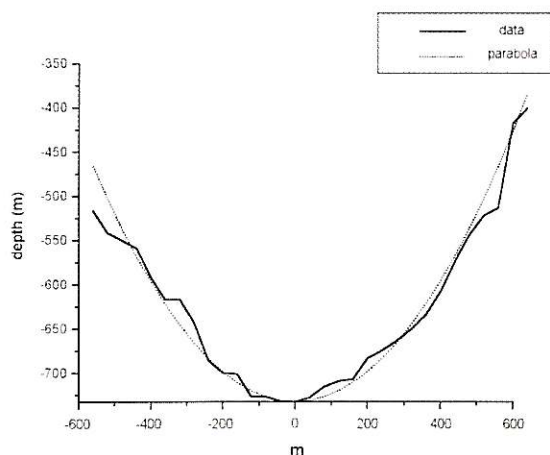


Figura 4.7 - Esempio di profilo rilevato confrontato con quello teorico

attenuazioni e dei guadagni. Nella figura 4.7 è visibile un esempio di confronto tra quanto previsto dalla teoria ed il profilo effettivo di una zona in cui è presente una concavità.

4.7 Attenuazione complessiva

Volendo calcolare l'effetto complessivo delle attenuazioni e dei guadagni di cui alle (4.3) e (4.4) si può notare che essi sono separabili in tre categorie; si hanno infatti dei contributi che sono praticamente fissi, dipendendo dal sistema, essi sono L_c , L_d e L_s . Altri contributi dipendono unicamente dalle superfici di interfaccia che l'onda em incontra e non dalla distanza percorsa; essi sono L_r , L_t e G_r . Infine vi sono i fattori che dipendono dalla lunghezza del percorso: L_p , L_a e G_r . Il fattore L_s , in realtà sarebbe da ascrivere tra quelli superficiali o di percorso, ma data la sua lieve entità, le sue variazioni sono molto limitate e tali da poterlo considerare costante.

Nella tabella 4.3 si sono riportate le stime in precedenza ricavate nei due casi di una lingua glaciale su mare spessa 300 m, e di un ghiacciaio su roccia, spesso 3 km, con l'aereo ad una quota fissa di 300 m. Nella tabella si è inserito anche un valore plausibile per il guadagno di antenna. Notare che i guadagni figurano negativi.

Parametro	Valore (lingua)	Valore (ghiaccio)
$2xG_a$	-7	-7
L_c	1	1
L_d	1	1
L_s	3	3
L_r	1	1
L_t	1	11
G_r	± 8	≈ 0
L_e	70	84
L_a	9	32
G_r	-2	-4
Tot.	77 ± 8	122

Tabella 4.3 Attenuazione totale (dB)

L'attenuazione di 122 dB calcolata in tabella 4.3 non è il massimo valore poiché in alcune circostanze si può arrivare a valori di attenuazione di circa 165 dB. Il valore di attenuazione totale consente di prevedere l'intensità del segnale ricevuto, e quindi di valutare, in sede di progetto, la potenza del trasmettitore e la sensibilità del ricevitore. A solo titolo di esempio, con una sensibilità del sistema di -100 dBm bisogna disporre di una potenza di trasmissione di 65 dBm (oltre 3000 W). In questo calcolo abbiamo trascurato il rumore interno del ricevi-

tore e dell'ambiente nel suo complesso che degradano anch'essi le prestazioni del radar. In pratica alcuni valori potrebbero essere non noti, come ad esempio il guadagno delle antenne. Infatti, pur essendo esse dei semplici dipoli ripiegati, la loro posizione al di sotto delle ali ne rende difficile la valutazione del guadagno in via teorica. Per determinare detto guadagno quindi si è reso necessario effettuare una "taratura" del sistema in condizioni ambientali note. Di questo si parlerà nel prossimo paragrafo.

5. Taratura del sistema

Al fine di determinare il guadagno delle antenne, si sono effettuati alcuni voli di prova su superfici ghiacciate o sul mare, misurando la potenza ricevuta e mettendola in relazione con quanto previsto dall'equazione radar. In entrambi i casi si prende in considerazione solo l'energia riflessa dalla prima superficie (ghiaccio o acqua marina) senza ulteriori analisi di echi provenienti da riflessioni da strati sottostanti. Dato che il percorso è breve si lavora con potenze in ricezione relativamente alte e per evitare di lavorare vicino alla saturazione del ricevitore si impiegano attenuatori sulla linea d'antenna. I segnali ricevuti sono stati mediati su varie centinaia di tracce, inoltre si è dovuto trovare la relazione che lega l'ampiezza della tensione in ingresso al ricevitore con quella all'uscita, e la relazione che lega quest'ultimo valore al dato fornito dal programma usato per le visualizzazioni. Per la prima relazione si è trovata la relazione empirica:

$$V_o = A \log(V_i/V_{ref}) + B$$

con $A=0.5$, $B=3.7$, $V_{ref}=1V$ (B può essere interpretato come l'uscita che si ha per un ingresso di 1V). per la seconda relazione, indicando con C il valore letto in uscita dal programma:

$$C = k_1 (V_o - k_2)$$

con $k_1=116.36$ e $k_2=1.908$. In definitiva, la relazione che fornisce la potenza ricevuta in funzione del valore letto C (la potenza è calcolata per una resistenza caratteristica di 50 ohm) è:

$$[P_r]_{dBm} = 0.3438 \cdot C - 58.67$$

Sono stati effettuati due tipi di voli per calibrazione, uno sul mare e l'altro sul ghiaccio. In questi casi la tabella delle attenuazioni 4.3 va riscritta come in tabella 4.4.

In tabella si sono lasciati indicati con let

Parametro	Valore (mare)	Valore (ghiaccio)
$2 \times G_n$	-g	-g
L_c	1	1
L_d	1	1
L_s	≈ 1	L_x
L_r	0	0
L_t	1	11
G_f	0	0
L_g	64	64
L_n	0	0
G_r	0	0
Tot:	68-g	77+ L_x -g

Tabella 4.4 Attenuazioni (taratura) (dB)

tere i parametri incogniti, cioè il guadagno delle antenne g e l'attenuazione per scattering su ghiaccio L_x (per quella sul mare si attendeva un valore molto piccolo).

Effettuate le misure e ricavati i valori di P_r si sono inseriti tutti i dati nell'equazione radar, ottenendo nei due casi:

$$P_{r(\text{mare})} = -25 = 36 - 68 + g$$

$$P_{r(\text{ghiaccio})} = -35 = 36 - 77 + g - L_x$$

che permettono di trovare

$$g = 7$$

$$L_x = 1$$

Ciò vuol dire che la lingua glaciale sulla quale si è fatta la taratura non ha provocato molto scattering e che il guadagno per singola antenna è di circa 3.5 dB, valore compatibile col fatto che il dipolo ripiegato ha un guadagno di circa 2.16 dB, ma esso si trova sotto ad un'ala dell'aereo, cosa che porta all'aumento del guadagno per l'effetto dell'immagine.

È da notare infine che il valore trovato per lo scattering non è detto che si ripresenti nei sondaggi veri e propri, dato che è dovuto alla riflessione non perfetta sulla superficie del ghiaccio. In presenza di un sondaggio reale non si è interessati all'energia riflessa ma a quella che attraversa il corpo del ghiaccio e, nei confronti di quest'ultima, lo scattering superficiale assume molto minor peso. D'altro canto può comparire una diffusione interna al volume,

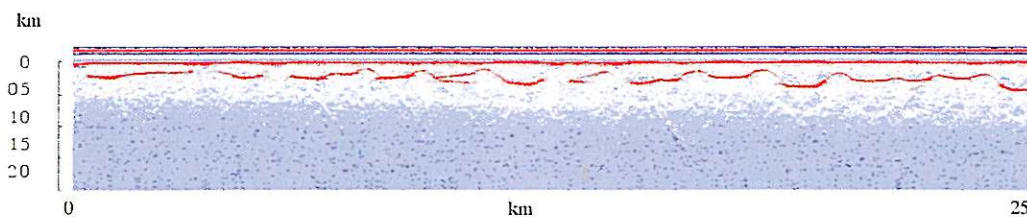


Figura 6.1 - Esempio di profilo

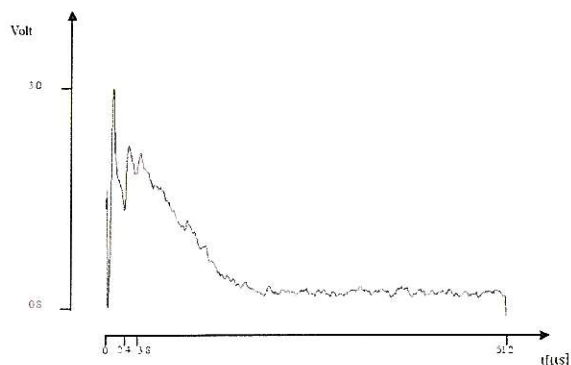


Figura 6.2 - Esempio di traccia in ricezione

come detto in 4.2, perciò è prudente lasciare il valore di 3 dB nella tabella 4.3.

6. Alcuni risultati sperimentali

A solo scopo esemplificativo vengono riportate alcune figure che mostrano quanto ottenibile col radar descritto al paragrafo 3.

La figura 6.2 riporta un esempio di singola traccia, cioè l'eco corrispondente ad un singolo impulso trasmesso. I vari picchi corrispondono a riflessioni su interfacce.

La figura 6.1 invece riporta un intero profilo, ottenuto elaborando le tracce acquisite durante un volo (nel caso riportato lungo 70 km). A diverse intensità del segnale corrispondono varie intensità dei colori.

Sfruttando le informazioni contenute nei tempi di arrivo si possono determinare con sufficiente precisione tutte le attenuazioni della tabella 4.3, cosa che consente di determinare i parametri sui quali era presente un'incertezza residua. In particolare è stato possibile determinare l'entità del guadagno per focalizzazione per riflessione G_f . La figura 6.3 mostra quanto trovato per tale guadagno, mostrando nel contempo il profilo di profondità corrispondente. La curva chiamata "t2" è stata determinata unicamente con i dati di ritardo, invece la "S" con i dati stimati per G_f . Come si vede esiste una evidente correlazione tra i due andamenti. Un'esposizione approfondita di simili analisi però va oltre gli scopi della presente pubblicazione ed è argomento di altri lavori in preparazione.

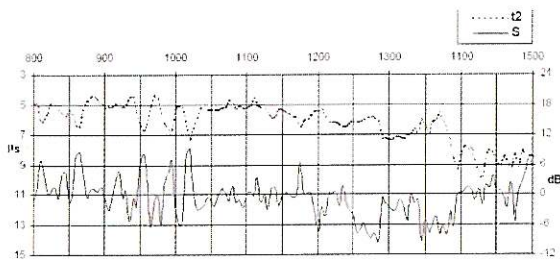


Figura 6.3 - Relazione tra profilo e G_f

7. Ulteriori considerazioni su riflessioni da discontinuità e diffusione

In questo ultimo paragrafo si riprendono le considerazioni circa l'energia riflessa e il backscattering di cui si è accennato in 2.5. In particolare è emerso che l'energia che ritorna in antenna da una direzione diversa dalla verticale può sovrapporsi a quella dovuta a riflessione su discontinuità interne al ghiaccio. Ci si è proposto di valutare l'entità di tale energia "disturbante" e di confrontarla con quella "utile" allo scopo di prevedere fino a che punto il backscattering possa coprire i segnali utili. Questo studio è importante anche per migliorare il progetto di un nuovo radar a migliore risoluzione.

In termini qualitativi le grandezze che ci si aspetta influenzino il fenomeno sono, da un lato, la "riflettività" per backscattering (che diminuisce man mano che ci si allontana dalla verticale), dall'altro le costanti dielettriche dei ghiacci, essendo le differenze tra quelle relative a strati diversi a provocare riflessione, perciò è da attendersi che piccole differenze possano essere difficili da rilevare. Nella valutazione entra in maniera determinante anche il potere risolutivo del sistema radar, infatti, per poter discriminare tra energie riflesse da zone diverse delle superfici riflettenti, non si può usare l'equazione radar (2.2), ma quella più generale valida per riflettori concentrati; in essa ha un ruolo fondamentale la superficie efficace del riflettore, la quale in definitiva dipende dalla risoluzione. Un altro fattore che influenza i calcoli è la direttività delle antenne, che però, essendo queste poco direttive, è stata trascurata, vale a dire che si è assunto un guadagno costante con l'angolo; ciò ha come conseguenza che i risultati dello studio saranno conservativi rispetto alla realtà, ma la cosa non può che essere positiva in sede di progetto, visto che la realizzazione pratica finisce sempre con il risultare peggiore di quanto previsto dalla teoria.

Per la comprensione di quanto segue si faccia riferimento alla figura 7.1 che rappresen-

ta la sezione secondo un piano verticale dello scenario investigato dal radar. Si è supposto che il radar (su aereo) si trovi in aria nel punto P; la linea P''Q'' rappresenta la superficie di separazione tra l'aria ed il mezzo 1, mentre la linea VT' è l'analoga tra il mezzo 1 ed il 2. I due mezzi potrebbero essere ghiaccio e roccia oppure due strati di ghiaccio con caratteristiche elettriche diverse; la trattazione è generale e può essere applicata ad entrambi i casi.

Nella figura si vede la traccia di un "cono" (con semiapertura pari all'angolo P'PP''); esso illumina la superficie di raggio P'P'' (oppure T'V in profondità). La differenza di inclinazione, rispetto alla verticale, tra PP'' e P''V è dovuta alla rifrazione (legge di Snell). Il cono segnato in figura è quello che delimita la superficie utile massima, vale a dire quella che rinvia da ogni suo punto echi che arrivano con ritardi compresi entro la risoluzione del radar. In altre parole la differenza di percorso massima, tra PT' e PV (=PT'') deve essere pari alla risoluzione ammessa per il radar.

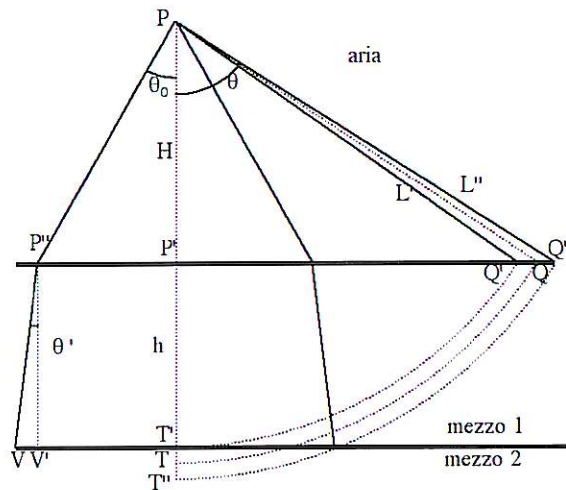


Figura 7.1 - Schema usato per l'analisi

Una volta calcolata l'energia che viene rinvia dalla superficie utile (di raggio T'V) essa va paragonata con quella riflessa per backscattering provocato dalla superficie superiore del ghiaccio (zona Q'Q''). Quest'ultima non è costante, ma dipende dall'angolo P'PQ sotto cui viene vista la superficie diffondente. Il confronto ha senso nel momento in cui l'energia rinvia per backscattering arriva allo stesso istante di quella "utile" prima definita. In altre parole il ritardo associato alla distanza PQ deve essere uguale a quello associato alla superficie utile. Si noti che nella figura si è disegnata la distanza PQ esattamente identica alla PT per motivi di chiarezza espositiva (si è disegnato anche un arco di circonferenza per ulteriore chiarezza),

anche se la differente velocità di propagazione nei due mezzi fa sì che la distanza percorsa sia diversa, ciò che deve essere uguale è il tempo di arrivo. Di questo si è tenuto conto nei calcoli.

Un'ultima considerazione generale riguarda la sezione Q'Q". Essa individua un elemento di area che rinvia energia verso il radar, ma in realtà di tali elementi ve ne sono molti, dato che tutta la superficie della corona circolare di raggio P'Q e spessore Q'Q" (non segnata in figura) provoca echi che giungono al radar allo stesso istante. Date le caratteristiche dello scattering si è assunto che questi echi arrivino al ricevitore con fasi casuali, perciò l'eco risultante è stata calcolata ipotizzando una somma in potenza di echi provenienti da areole di lato Q'Q", vale a dire che la potenza risultante, se tali areole sono N, è pari a N² volte la potenza rinviata da una sola area.

Per concludere queste considerazioni generali si elencano le definizioni degli enti geometrici che compaiono in figura.

PP' = H	altezza del radar dal suolo
P'T = h	spessore dello strato "mezzo 1"
PQ = L	distanza di Q dal radar
PQ' = L'	distanza di Q' dal radar
PQ'' = L''	distanza di Q'' dal radar
P'PQ = θ	angolo generico
P'PP'' = θ ₀	semiapertura "utile" in aria
VP''V' = θ'	semiapertura utile nel mezzo 1
P'Q = D	distanza corrispondente a θ
Q'Q'' = ΔQ	altezza della corona di raggio D
P'P'' = r	raggio della zona utile
T'V = r'	raggio della zona utile al fondo del mezzo 1

Le relazioni fisiche che interessano sono la legge di Snell (4.9) e l'equazione radar. La prima va riscritta sostituendo a n_g l'indice n₁ del generico mezzo 1, inoltre è opportuno, per gli usi futuri, trovare una relazione diretta tra i coseni degli angoli anziché i seni; essa è la seguente:

$$\cos\theta' = \frac{\sqrt{n_1^2 - 1 + \cos^2\theta_0}}{n_1} \quad (7.1)$$

Per quanto riguarda l'equazione radar, quella da usare in questo caso non è la (2.2) ma quella classica, che viene scritta in modo da fornire l'attenuazione introdotta dal percorso tra trasmettitore e ricevitore; essa nello spazio libero si scrive:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{G_a^2 \lambda^2 \sigma^0 \cdot \Delta A}{(4\pi)^3 \cdot d^4} \quad (7.2)$$

dove λ è la lunghezza d'onda usata (in aria), G_a il già definito guadagno delle antenne, d la generica distanza coperta (es. PQ). Le differenze rispetto alla (2.2) usata in precedenza sono la dipendenza dalla quarta potenza della distanza ed il nuovo termine dato dal prodotto σ⁰ΔA. Esso è la cosiddetta "sezione radar" (radar cross section), avente le dimensioni di un'area, che rappresenta l'areaequivalente in grado di assorbire l'energia proveniente dal trasmettitore e rinviarla al ricevitore. In generale tale sezione assume valori difficilmente prevedibili e viene studiata con metodi statistici. Ciò a cui siamo interessati ora è però solo l'energia riflessa per riflessione quasi speculare alla discontinuità tra il mezzo 1 ed il 2, e quella riflessa per backscattering. Per determinare la seconda [Skolnik 1989] ha separato il contributo puramente geometrico (l'area elementare ΔA) da quello "fisico", chiamato σ⁰, determinato sperimentalmente. I valori trovati sono stati riportati su grafici; essi sono solo indicativi e non possono descrivere il caso generale, tuttavia sono stati usati nella presente trattazione per poter arrivare a delle valutazioni quantitative del backscattering.

Il problema circa i valori che assume σ⁰ non sussiste nel caso di riflessione alla discontinuità mezzo 1- mezzo 2, dato che essa segue le normali leggi della riflessione, dunque σ⁰ in questo caso non è altro che il coefficiente di riflessione R² definito dalla (4.6), perciò, nel valutare l'energia riflessa dalla zona "utile", si dovrà sostituire a σ⁰ quel valore. Infine, nell'attraversare la superficie aria- mezzo 1, l'energia subirà un'attenuazione proporzionale a T².

L'ultimo problema da risolvere per valutare le attenuazioni in gioco è la determinazione della attenuazione subita nell'attraversamento del mezzo 1 (da P' a T), problema già affrontato in 4.4. Dalle (4.9) e (4.10) si ricava L_a = 4630 σ h / n₁ (dB). Ora n₁ ≈ 1.79, mentre per σ (si tratta della conducibilità, non della cross section!) si può porre 1.12 · 10⁻⁵, perciò in definitiva si può porre (tornando alle unità lineari):

$$L_a = 1.0067 T^2 \quad (7.3)$$

In base a quanto detto, l'equazione radar (7.2) deve essere corretta sostituendo a σ⁰ le quantità σ_{ij} (coefficienti di riflessione nel passaggio dal mezzo i al mezzo j, 0 = aria):

$$\sigma_{01} = \frac{(1 - n_1)^2}{(1 + n_1)^2}, \quad (7.4)$$

$$\sigma_{12} = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}. \quad (7.5)$$

Più che al valore assoluto di n_2 siamo interessati al rapporto tra n_2 e n_1 , perciò si pone per definizione

$$\gamma = \frac{n_2}{n_1}, \quad (7.6)$$

che trasforma la (7.5) in

$$\sigma_{12} = \frac{(\gamma - 1)^2}{(\gamma + 1)^2}, \quad (7.7)$$

Dunque la (7.2) può essere riscritta come segue (il pedice u sta per "utile"):

$$\left. \frac{P_r}{P_t} \right|_u = \frac{G_a^2 \lambda^2 \cdot \sigma_{12} \cdot (1 - \sigma_{01})^2 \cdot \Delta A_{TV}}{(4\pi)^3 \cdot (H + h)^4 \cdot L_a}. \quad (7.8)$$

In essa G_a e λ sono stati assunti costanti, così come n_1 che determina σ_{01} . Purtroppo L_a dipende da h e quest'ultima non è arbitraria, ma in precisa relazione con l'angolo θ , che può essere considerato come una variabile indipendente. In altre parole, per ogni θ esiste un preciso h che determina un'eco allo stesso istante. A complicare le cose si mette anche l'area di raggio TV (ΔA_{TV}), la quale, oltre a dipendere da h , è determinata anche dall'angolo θ_0 ; in altre parole, per calcolare ΔA_{TV} bisogna prima trovare la relazione che lega θ_0 alla risoluzione.

Per arrivare a determinare la relazione suddetta si determinano per primi i tempi di arrivo minimo e massimo. Essi sono associati ai percorsi PP'T' e PP''V rispettivamente:

$$t_1 = \frac{2}{c} \cdot (H + hn_1), \quad (7.9)$$

$$t_2 = \frac{2}{c} \cdot \left(\frac{H}{\cos\theta_0} + \frac{hn_1}{\cos\theta'} \right), \quad (7.10)$$

Definendo L (a cui è associato l'angolo θ) come il percorso dato dalla media dei valori di L' e L'' , esso è dato da:

$$L = \frac{L' + L''}{2} = \frac{H}{\cos\theta}. \quad (7.11)$$

Ricordando che

$$L^i = \frac{ct^i}{2}, \quad (7.12)$$

(con i che vale come apice ' o '' le (7.9) e (7.10) possono essere inserite nella (7.11), arrivando all'equazione:

$$\frac{hn_1}{H} \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta'} + 1 \right) + \frac{1}{\cos\theta_0} + 1 = \frac{2}{\cos\theta}. \quad (7.13)$$

D'altro canto, per quanto detto sulla risoluzione, deve essere:

$$t'' - t' = \delta t, \quad (7.14)$$

dove δt è la risoluzione del radar in termini temporali (intervallo minimo risolvibile). La (7.14) in base a quanto trovato per t' e t'' , diventa:

$$hn_1 \left(\frac{1}{\cos\theta'} - 1 \right) + H \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta_0} - 1 \right) = \frac{c\delta t}{2}. \quad (7.15)$$

Le (7.13) e (7.15) costituiscono un sistema di equazioni. In esso la presenza di θ' è solo apparente, dato che è possibile eliminarla usando la (7.1). In definitiva le incognite sono solo θ , θ_0 e h , dato che H e n_1 possono essere considerati costanti. La soluzione analitica del sistema presenta grosse difficoltà, perciò si è scelta la strada di determinare per via numerica i valori di θ_0 e h in funzione di alcuni valori di θ , precisamente quelli tra 10° e 80° a passi di 10° ; la soluzione ovviamente dipende anche da δt . Per un radar a bassa risoluzione ($\delta t = 1\mu s$) e valori di θ non elevatissimi si sono trovati valori di θ_0 poco variabili, intorno a $40^\circ \div 50^\circ$. Per una risoluzione di 150 ns si ha un'analogia variazione limitata, intorno a $15^\circ \div 20^\circ$. Andando a calcolare gli h che corrispondono ai θ_0 trovati, si nota che per bassi θ la soluzione diviene negativa,

θ (°)	σ^0 (adim.)	θ_0 (°)	h (m)
10	$4.1 \cdot 10^{-1}$	49	-39
20	$1.0 \cdot 10^{-1}$	49	-31
30	$4.4 \cdot 10^{-2}$	49	-16
40	$1.6 \cdot 10^{-2}$	48	92
50	$7.2 \cdot 10^{-3}$	47	51
60	$3.2 \cdot 10^{-3}$	46	130
70	$1.2 \cdot 10^{-3}$	43	280
80	$4.4 \cdot 10^{-4}$	36	760

Tabella 7.1a - σ^0 , θ_0 e h in funzione di θ (risoluzione $\delta t = 1 \mu s$)

denotando un'evidente mancanza di soluzione fisica al problema impostato (ciò accade se l'angolo θ scende sotto al valore per cui PQ' diviene verticale, corrispondente a $h=0$). La tabella 7.1 riporta tutti i valori trovati, nella parte a per la bassa risoluzione, nella parte b per quella alta.

Ora è possibile calcolare l'area ΔA_{TV} , che vale ovviamente $\pi T^2 V^2$. Dopo alcuni passaggi algebrici si trova:

$$\Delta A_{TV} = \pi \sqrt{1 - \cos^2 \theta_0} \cdot \left(\frac{H}{\cos \theta_0} + \frac{h}{\sqrt{n_1^2 - 1 + \cos^2 \theta_0}} \right) \quad (7.16)$$

θ (°)	θ_0 (°)	h (m)
10	22	-3.7
20	22	4.5
30	21	20
40	21	45
50	20	87
60	19	160
70	17	320
80	14	790

Tabella 7.1b - θ_0 e h in funzione di θ (risoluzione $\delta t = 0.15 \mu s$)

Tramite i valori numerici trovati per le coppie $\theta_0 - h$ è possibile determinare ΔA_{TV} e gli altri parametri che compaiono nella (7.8), arrivando ad una relazione che fornisce la generica attenuazione in funzione di θ e γ . Ciò che si cerca però non è il valore assoluto dell'attenuazione ma la relazione tra θ e γ nel caso in cui l'attenuazione associata alla riflessione speculare appena trovata uguagli quella che potrebbe esistere per il fenomeno del backscattering. Allo scopo di valutare quest'ultima quantità si può riprendere la (7.2) e cercare di determinare anche in questo caso l'entità dell'area ΔA . In realtà, come accennato in precedenza, non esiste un'unica area che riflette in maniera coerente, ma tante areole che rinviano energia in modo casuale. L'entità media del potere riflettente di

una singola areola è descritta dal parametro σ^0 , dunque resta da determinare quanto è grande una singola areola e quante esse sono. In prima approssimazione si può considerare un'areola come quadrata di lato ΔQ , mentre per il loro numero si può porre:

$$N = \frac{2\pi \cdot P' Q}{\Delta Q} = \frac{2\pi H \cdot \tan \theta}{\Delta Q} \quad (7.17)$$

inoltre

$$\Delta Q = \sqrt{L'^2 - H^2} - \sqrt{L^2 - H^2} \quad (7.18)$$

Dato che L' e L'' sono già stati determinati, tramite le (7.9), (7.10) e (7.12), e ricordando che la distanza d che compare nella (7.2) coincide con $L = H / \cos \theta$, è possibile trovare un valore di attenuazione per backscattering in corrispondenza degli stessi valori di θ prima considerati ($10^\circ + 80^\circ$).

A questo punto non resta che confrontare i valori trovati per le due attenuazioni. Sottraendo da quella relativa alla riflessione speculare quella per scattering si ottiene un trinomio di 2° grado nella variabile γ (uno per ogni scelta di θ). Studiandone il segno si possono determinare i valori di γ ammissibili, cioè quelli che consentono la rivelazione di una discontinuità, in caso contrario l'eco proveniente da essa viene coperto dal segnale di scattering.

La tabella 7.2 riporta i valori trovati per γ ; i valori ammessi sono quelli per $\gamma < \gamma_1$ o per $\gamma > \gamma_2$ (la mancanza di dato si ha per gli angoli per i quali si avevano valori negativi di h in tabella 7.1). Come si vede, man mano che l'angolo θ aumenta, l'intervallo di valori ammessi per γ si incrementa fino a circa 70° , tornando poi a diminuire, questo perché l'energia diffusa diminuisce, ma non tanto quanto quella riflessa, perché quest'ultima risente fortemente dell'aumento di h .

Le tabelle 7.1 e 7.2, anche se ricavate come una specie di funzione che fornisce γ in funzione di θ , vanno in realtà lette all'inverso:

θ (°)	r' (m)	γ_1 (adim.)	γ_2 (adim.)
20	-	-	-
30	-	-	-
40	18	mai	mai
50	19	0.18	5.4
60	19	0.33	3.0
70	20	0.38	2.6
80	22	mai	mai

Tabella 7.2a - γ in funzione di θ (risoluzione $\delta t = 1 \mu s$)

θ (°)	r' (m)	γ_1 (adim.)	γ_2 (adim.)
20	11	mai	mai
30	11	mai	mai
40	11	0.27	3.7
50	11	0.46	2.2
60	12	0.58	1.7
70	12	0.63	1.6
80	14	0.28	3.6

Tabella 7.2b - γ in funzione di θ
(risoluzione $\delta t = 0.15 \mu s$)

data una profondità h , si legge a quale angolo θ corrisponde e quali valori di γ sono ammessi. Si noti che i valori minori di uno sono in realtà solo delle soluzioni matematiche, dato che, essendo $n_1 = 1.79$, perché n_2 rimanga maggiore di uno γ non può essere inferiore a circa 0.56.

Dal confronto tra le parti a e b della tabella, valide per due risoluzioni differenti, si può notare che la migliore risoluzione amplia l'intervallo di valori utili per γ . In ogni caso i valori assoluti trovati sono piuttosto grandi, cosa che può far disperare di vedere altro che materiali radicalmente diversi dal ghiaccio, come la roccia o una cavità piena d'acqua o d'aria. In realtà a migliorare le cose giunge il guadagno delle antenne che limita l'energia ricevuta da direzioni differenti dalla verticale. Questa considerazione fa capire l'importanza di disporre di antenne sufficientemente direttive, almeno per un angolo pari al θ_0 trovato.

Bibliografia

- Bekefi G. e Barrett A.H. (1981). *Vibrazioni elettromagnetiche onde e radiazioni*. Zanichelli.
- Bianchi C., Chiappini M., Passerini A., Tabacco I.E., Zirizzotti A. e Zuccheretti E. (2001). *Morphology of bottom surfaces of glacier ice tongues in the east antarctic region*. Annali di Geofisica Vol. 44, n°1.
- Bianchi C., Chiappini M., Tabacco I.E., Zirizzotti A. e Zuccheretti E. (2001). *Quasi-parabolic reflecting bottom surfaces of the Drygalski antarctic floating ice tongue*. In corso di stampa su Annali di Geofisica.
- Bogorodsky V.V., Bentley C.R. e Gudmandsen P.E. (1985). *Radioglaciology*. Reidel Publ. Company.
- Carlson A.B. (1986). *Communication systems*. McGraw-Hill.
- Davies K. (1990). *Ionospheric radio*. IEE Electromagnetic wave series 31, Peter Peregrinus Ltd.
- Frolik J.L. e Yagle A.E. (1995). *Reconstruction of multilayered lossy dielectric from plane wave impulse response at two angle of incidence*. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 33 N.2.
- Herique A. e Kofman W. (1997). *Determination of*

the ice dielectric permittivity using the data of the test in Antarctica of the ground-penetrating radar for Mars 1998. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 35 N.2, 1997.

- Skolnik M. (1989). *Radar handbook*. McGraw-Hill.
- 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, Vol.42 N.2.
- Tabacco I.E., Bianchi C., Chiappini M., Zirizzotti A. e Zuccheretti E. (2000). *Analysis of the bottom topography of the glacier ice tongue of Ross Sea Coast Line (Antarctica)*. Annals of Glaciology, Vol. 30.