DIAGNOSTICA ELETTROMAGNETICA SUB-SUPERFICIALE: IL CASO DI INTERFACCIA MODERATAMENTE RUGOSA

O. M. Bucci[1,2], L. Crocco[2], T. Isernia[1]

[1]Dipartimento di Ingegneria Elettronica e delle Telecomunicazioni
Università di Napoli "Federico II", V.le Claudio, 21, 80125, Napoli
Tel.: +39 081 7683113 Fax: +39 081 5934448
e-mail: {bucci, isernia}@unina.it

[2]Istituto per il rilevamento elettromagnetico dell'Ambiente- IREA – CNR
Via Diocleziano 328 - 80124 Napoli; Tel.: +39 081 570 79 99 Fax: +39 081 570 57 34
e-mail: crocco.l@irea.cnr.it

Abstract - *This communication deals with the problem of imaging homogenous dielectric targets buried under a moderately rough interface. By means of a simple regularization strategy, the proposed approach allows the simultaneous reconstruction of the roughness profile and the dielectric permittivity of the targets by including the former in the sought unknown permittivity profile.*

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito della prospezione non-invasiva del sottosuolo l'utilizzo di tecniche di tomografia a microonde per l'elaborazione dei dati raccolti mediante GPR è utile qualora si desiderino ottenere informazioni quantitative circa l'area investigata. Tuttavia, a tal fine, occorre affrontare diverse difficoltà tanto nella scelta di un adeguato modello dello scenario che nella messa a punto di tecniche di inversione dei dati efficienti ed accurate.

Una delle maggiori difficoltà risiede nella natura non-planare dell'interfaccia aria-suolo. Poiché i dati misurati risultano influenzati dalla rugosità dell'interfaccia, ciò richiede infatti l'adozione di opportuni modelli per la diffusione elettromagnetica mediante i quali sia possibile separare i contributi relativi all'interfaccia da quelli che effettivamente contengono informazione sugli oggetti investigati.

Un possibile approccio al problema consiste nel considerare la presenza dell'interfaccia come una fonte addizionale di rumore (Gaussiano colorato) da trattare mediante opportune metodologie di tipo statistico [1]. Tuttavia tale approccio è adeguato unicamente per la *rivelazione* e non per l'*identificazione* del diffusore. Esso inoltre è inadeguato in quelle applicazioni in cui la ricostruzione dell'interfaccia rappresenta l'obiettivo stesso dell'indagine.

Un approccio alternativo, valido per superfici moderatamente rugose e basato sulla separazione del problema in due passi, è stato proposto in [2]. Nel primo passo, sfruttando il contributo di "prima riflessione" relativo ad un insieme di dati raccolti nel dominio del tempo si effettua la ricostruzione del solo profilo della rugosità. Successivamente si procede alla ricostruzione delle proprietà elettriche e morfologiche degli oggetti sepolti a partire dai dati opportunamente compensati, risolvendo il problema inverso di diffusione nell'approssimazione di Born.

L'obiettivo di questa comunicazione è quello di proporre un approccio che consenta la ricostruzione *simultanea* della rugosità e dei diffusori utilizzando dati monocromatici.

Tale scelta consente di evitare gli inevitabili effetti di dispersione e l'insorgenza di possibili artefatti (dovuti al diffusore) nella stima del profilo. Inoltre, essendo basata su un modello non-lineare, consente di superare le limitazioni intrinseche dei modelli linearizzati. L'idea base è quella di re-interpretare il profilo dell'interfaccia come una parte della permittività incognita, ovvero come un'inclusione volumetrica (omogenea) di aria nel suolo. In tal modo si trae l'ulteriore vantaggio di non dover ricorre a complessi modelli della diffusione elettromagnetica dal momento che la situazione di riferimento è rappresentata dal caso di interfaccia planare, descritta attraverso le canoniche funzioni di Sommerfeld –Green.

L'approccio proposto consiste in una opportuna generalizzazione della tecnica di inversione introdotta in [3] e particolarizzata in [4] al caso di diffusori omogenei.

2. APPROCCIO DI INVERSIONE PER INTERFACCIA PLANARE

Considerando per semplicità il caso 2D scalare (geometria invariante lungo un'asse e campi incidenti polarizzati lungo quest'asse) il problema è descritto dalla coppia di equazioni integrali:

$$E_s^v(\mathbf{r}) = \mathcal{A}_e\left(\chi E^v\right) \qquad \mathbf{r} = (x, y) \in \Gamma, \tag{1.a}$$

$$E^v(\mathbf{r}') - E_{inc}^v(\mathbf{r}') = \mathcal{A}_i\left(\chi E^v\right) \qquad \mathbf{r}' = (x', y') \in \Omega, \tag{1.b}$$

dove Ω è il dominio di indagine (sepolto), Γ è la linea di misura parallela all'interfaccia e, per ciascuna illuminazione v, E_{inc}^v, E^v e E_s^v sono rispettivamente il campo incidente, quello totale indotto in Ω e quello diffuso in superficie. $\mathcal{A}_i$ ed $\mathcal{A}_e$ sono operatori integrali che legano le correnti indotte nel diffusore rispettivamente al campo diffuso in Ω ed su Γ [3], ed il cui nucleo contiene le funzioni di Green relative alla geometria considerata. L'incognita del problema è il contrasto, $\chi = \varepsilon/\varepsilon_b - 1$, che lega la permittività equivalente incognita (ε) a quella del terreno (ε_b).

In [3] è stata proposta una tecnica di inversione regolarizzata che consiste nella ricerca del minimo globale del funzionale:

$$\phi\left(\tilde{c}, \tilde{e}^1 .. \tilde{e}^P\right) = \sum_{v=1}^{P} \frac{\left\| E_i^v + \mathcal{A}_i\left[\chi E^v\right] - E^v \right\|^2}{\left\| E_i^v \right\|^2} + \frac{\left\| \mathcal{A}_e\left[\chi E^v\right] - E_s^v \right\|^2}{\left\| E_s^v \right\|^2}. \tag{2}$$

Per combattere il mal-condizionamento del problema e ridurre la possibile occorrenza di minimi locali, in questo approccio il contrasto incognito è rappresentato mediante una base di tipo wavelet. Tale scelta, consente infatti di accomodare in maniera semplice le caratteristiche multirisoluzione della classe delle funzioni ricostruibili [3], garantendo in particolare la possibilità di localizzare un maggior numero di parametri incogniti in superficie ed un numero via via decrescente in profondità. I campioni della trasformata bidimensionale di Fourier di E^v (per ogni vista) sono assunti come incognite ausiliarie.

In diversi contesti applicativi, quali ricerca di cavità sepolte o mine anti-uomo, i diffusori sono caratterizzati dall'avere una natura essenzialmente omogenea e possono essere quindi ben descritti da una permittività costante. Al fine di sfruttare tale informazione a priori per compensare la carenza di dati indipendenti e migliorare le potenzialità dell'approccio, in [4] è stato proposto un semplice metodo basato sull'introduzione di un termine di regolarizzazione additivo:

$$\phi_{BIN}\left(\underline{c}, \underline{e}^1 .. \underline{e}^P, \chi_m\right) = \phi\left(\underline{c}, \underline{e}^1 .. \underline{e}^P\right) + \alpha^2 \sum_{pixels} |\chi|^2 \left|\chi - \chi_t\right|^2 . \tag{3}$$

Per valori sufficientemente elevati di α^2, il termine aggiuntivo forza ciascun pixel dell'immagine ricostruita ad assumere un valore nullo (ovvero assenza di oggetto) o pari a χ_t, che rappresenta la permittività del diffusore incognito. È importante notare che tale permittività può essere nota o meno e che l'approccio proposto non ha limitazioni circa il numero di diffusori omogenei presenti nella regione investigata. Inoltre, poiché entrambi i termini sono polinomi di quarto grado nelle incognite, la minimizzazione può essere efficientemente implementata mediante un algoritmo di tipo gradiente coniugato basato su minimizzazioni di linea valutate in forma chiusa.

3. IL CASO DI INTERFACCIA RUGOSA

L'approccio proposto nel precedente paragrafo può essere facilmente generalizzato al caso di diffusori omogenei sepolti al di sotto di un'interfaccia rugosa. L'assunzione di partenza è quella di inglobare la rugosità stessa nel profilo incognito, come una inclusione volumetrica di aria nel suolo. In tal modo l'incognita si presenterà come una funzione costante a tratti che potrà assumere tre differenti valori, quello della permittività del suolo, del diffusore sepolto e dell'aria.

Va notato che si è implicitamente assunto che l'interfaccia sia planare al di fuori della regione investigata. È lecito infatti assumere che i contributi "esterni" a tale regione siano trascurabili, poiché, nella configurazione considerata, la regione di misura è della stessa lunghezza del lato della regione investigata ed è a contatto con essa.

Nell'ambito dell'approccio proposto ciò è realizzato semplicemente considerando un ulteriore termine additivo:

$$\phi_{TER}\left(\underline{c}, \underline{e}^1 .. \underline{e}^P, \chi_t, \chi_o\right) = \phi\left(\underline{c}, \underline{e}^1 .. \underline{e}^P\right) + \alpha^2 \sum_{pixels} M_1 |\chi|^2 |\chi - \chi_t|^2 + \beta^2 \sum_{pixels} M_2 |\chi|^2 |\chi - \chi_o|^2 \qquad (4)$$

Nella (4), χ_o rappresenta il valore dal contrasto aria-suolo e le due maschere M_1 ed M_2 sono tali da restringere l'azione dei corrispondenti termini regolarizzanti su differenti regioni del dominio investigato. In particolare M_2 è scelta in modo da fare sì che il corrispondente addendo agisca solo sulla porzione superficiale del dominio.

Come si può osservare la complessità computazionale dell'approccio è rimane inalterata. Inoltre, grazie all'utilizzo della rappresentazione multirisoluzione per χ è possibile infittire opportunamente il numero di parametri incogniti in prossimità dell'interfaccia così da poter ottenere una stima soddisfacente del profilo della rugosità.

La principale difficoltà nell'utilizzo di uno schema di regolarizzazione quale quello proposto consiste nella determinazione della coppia di "pesi" α^2 e β^2, dal momento che, per i problemi non lineari, non esistono criteri definiti per effettuare tale scelta. Sebbene in questo contesto si mostreranno solo esempio ottenuti valutando tali "pesi" empiricamente, va tuttavia sottolineato come, interpretando la minimizzazione del funzionale (4) come un problema di stima MAP sia possibile effettuare una valutazione di questi fattori. Infatti, assumendo che i termini in (2) siano deterministici (ovvero descrivano la "fisica" del problema), i due termini di regolarizzazione possono essere attribuiti ad una caratterizzazione statistica della funzione incognita. In tal modo i "pesi" sono inglobati nel modello statistico dell'incognita ed è dunque possibile stimarli con metodologie simili a quelle proposte in [5].

4. UN ESEMPIO NUMERICO

In questo paragrafo si mostra un esempio di ricostruzione simultanea del diffusore e dell'interfaccia rugosa nel caso di un oggetto avente le caratteristiche di una mina anti-uomo ($\varepsilon = 3$) sepolta in un terreno con perdite ($\varepsilon = 7$, $\sigma = 5$ mS/m). La situazione di riferimento è mostrata in Fig.1, dalla quale si può osservare come si sia considerata anche la presenza di piccole inclusioni volumetriche di natura differente dall'oggetto cercato. Il lato della regione investigata è lungo circa il doppio della lunghezza d'onda nel terreno e si sono considerate 19 viste e 19 misure poste in corrispondenza del lato superiore della regione di indagine. I dati simulatati sono stati corrotti da un rumore additivo del 10% ed il valore scelto per i pesi è stato α^2=0.01, β^2=9x10^{-3}. Come mostra la Fig.2, l'approccio proposto non solo consente di ricostruire correttamente posizione e forma dell'oggetto incognito (si è assunto noto il valore della permittività), ma anche di rigettare le inclusioni spurie.

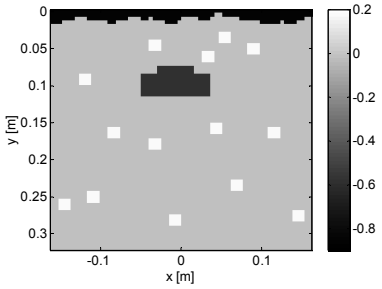

Fig.1: Profilo di Riferimento

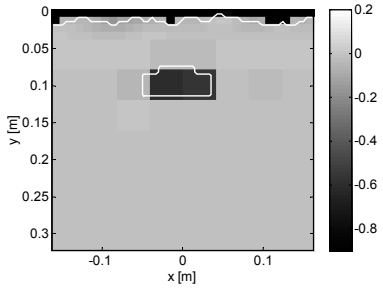

Fig.2: Ricostruzione ottenuta

La Fig.3 mostra il dettaglio relativo alla ricostruzione del profilo dell'interfaccia. Sebbene il numero di incognite utilizzato sia insufficiente a descrivere *esattamente* il profilo cercato, la strategia proposta riesce a fornire una efficace stima della rugosità.

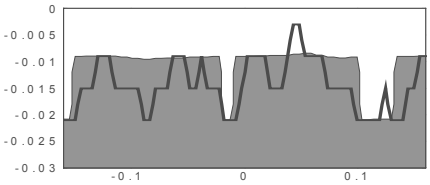

Fig.3: Confronto tra rugosità vera (linea nera) e stimata

RIFERIMENTI

1. T. Dogaru and L. Carin, "Time-domain sensing of targets buried under a rough air-ground interface", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 46, pp. 360-372, Mar. 1998.
2. V. Galdi, L. B. Felsen and D. A. Castanon, "Gaussian beam algorithm for rough surface underground imaging", *Proc. ICEAA01*, Torino, Italy, September 2001.
3. O. M. Bucci, L. Crocco, T. Isernia, V. Pascazio, "Subsurface Inverse Scattering Problems: Quantifying Qualifying and Achieving the Available Information", *IEEE Trans. On Geosci. Remote Sens.*, **39**, pp. 2527 - 2538, November 2001.
4. L. Crocco, T. Isernia, "Inverse scattering with real data: detecting and imaging homogeneous dielectric objects", *Inverse Problems*, Vol. 17, n. 6, pp. 1573-1583, December 2001.
5. V. Pascazio and G. Ferraiuolo, " Hyperparameters estimation and images MRF-based MAP estimation in microwave imaging ", Proc. IGARSS'01, Sidney, Australia, vol.7, pp. 3021-3023, 2001.