



CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

Istituto per l'Ambiente Marino Costiero

Calata porta di Massa, 80133 Napoli

Indagini georadar finalizzate all'individuazione di sottoservizi

A cura di

*Antimo Angelino, Vincenzo Di Fiore, Vittorio Gargiulo, Antimo
Guarino, Michele Iavarone, Salvatore Losanno, Nicola Pelosi,
Paolo Scotto di Vettimo, Daniela Tarallo*

Ottobre 2011

INDICE

1. Premessa	3
2. Il metodo GPR	4
3. Applicazioni con il georadar.....	4
4. Meccanismo di funzionamento di un georadar	5
5. Strumentazione.....	6
6. Unità di visualizzazione.....	6
7. Unità di controllo	9
8. Antenne georadar di tipo monostatico e bistatico	9
9. Acquisizione georadar in reflection mode.....	10
10. Performance e Scelta delle antenne.....	11
11. Propagazione e riflessione dell'energia radar	13
12. Interpretazione dei dati	16
13. Velocità georadar	17
14. Effetti di scattering e focalizzazione	18
15. Risoluzione	19
16. Descrizione del piano di indagini del georadar.....	19
17. Interpretazione dei risultati ottenuti	21
18. Bibliografia	23

1. Premessa

Il presente lavoro è teso a riportare le attività relative alle indagini radar svolte al fine di identificare la rete di sottoservizi presente nel sottosuolo di P.zza Leonardo sita nel Comune di Napoli.

Il gruppo di geofisica, coordinato dal dr. Antimo Angelino e con la supervisione scientifica del dr. Vincenzo Di Fiore, ha eseguito la raccolta dati nel periodo gennaio-febbraio 2011 e la sua elaborazione.

L'attività è stata svolta nell'ambito della convenzione intercorsa tra la Edil G. Re. M. srl e l'Istituto per l'Ambiente Marino Costiero del CNR con sede in Napoli, Calata Porta di Massa, 80133 Napoli, in riferimento al progetto relativo alla predisposizione e costruzione di parcheggi interrati. Il GPR infatti permette di segnalare la presenza di lineamenti di oggetti e di strutture sepolte in modo non distruttivo e veloce attraverso riflessioni di onde elettromagnetiche; inoltre il metodo possiede un elevato potere risolutivo sia in verticale che in orizzontale, che permette di costruire modelli 2D di orizzonti litologici, sottoservizi e strutture archeologiche.

In allegato alla presente si riportano:

- 1) Planimetria con ubicazione dei profili radar
- 2) Planimetria con ubicazione dei sottoservizi

Di seguito, il team dei partecipanti:

Componente	Qualifica
Dott. Angelino Antimo	Responsabile del progetto
Dott. Di Fiore Vincenzo	Responsabile scientifico
Dott. Tarallo Daniela	Geofisica
Dott. Antimo Guarino	Geofisica e geologia
Dott. Nicola Pelosi	Geofisica
Gargiulo Vittorio	Geofisica
Scotto di Vettimo Paolo	Geofisica
Iavarone Michele	Geofisica
Losanno Salvatore	Geofisica

2. Il metodo GPR

Il metodo GPR si basa sulla trasmissione di impulsi radio (radar) ad alta frequenza nel terreno e sulla misura del tempo trascorso tra la trasmissione e la ricezione in superficie. Un impulso radar è immesso nel terreno da un'antenna trasmittente che è disposta al di sopra, o vicino alla superficie del terreno. Il pacchetto d'onde elettromagnetiche si propaga verso il basso nel terreno fino ad incontrare una superficie di discontinuità che lo riflette in parte (facendolo tornare in superficie dove è rilevata da un'antenna ricevente) e in parte lo trasmette. Le discontinuità dove si verificano riflessioni sono caratterizzate da variazioni delle proprietà elettriche del terreno, spesso correlabili a variazioni del contenuto d'acqua o a cambiamenti litologici. Riflessioni possono anche essere generate all'interfaccia tra oggetto archeologico e il terreno circostante oppure in corrispondenza di spazi vuoti nel terreno, come quelli che si possono incontrare negli scavi, cavità, tunnel ecc...

Dalla misura dei tempi di viaggio degli impulsi, se la velocità di propagazione nel sottosuolo è nota, può essere stimata in maniera accurata la profondità.

La profondità a cui l'energia elettromagnetica può penetrare e la risoluzione che ci si può aspettare nel sottosuolo sono parzialmente controllati dalla frequenza centrale del pacchetto d'onde radar trasmesso. La banda di frequenza delle antenne normalmente utilizzate varia da circa 10 MHz a 2000 MHz. Nel metodo GPR le antenne radar sono spostate sul terreno ed è possibile acquisire in continuo (*Time mode*) o in distanza (*Distance mode*): nel primo caso il sistema emette e riceve continuamente gli impulsi radar, nel secondo invece il sistema è capace di trasformare la velocità di trascinamento dell'antenna in distanze lineari. In entrambi i modi si ottengono profili bidimensionali che contengono un gran numero di riflessioni. Se i dati sono acquisiti lungo profili equidistanziati (griglie), la correlazione e l'analisi di riflessioni permette di costruire un'accurata immagine tridimensionale di lineamenti sepolti e quindi della stratigrafia ad essa associata.

3. Applicazioni con il georadar

Il GPR si usa sempre più in situazioni in cui la sua alta risoluzione costituisce un grande vantaggio e la sua limitata penetrazione è sufficiente. I suoi impieghi comprendono, oltre l'ambito archeologico, l'ambito geologico-ambientale e la sua tutela, e l'ambito urbano.

Il georadar è in grado di individuare fratture, pieghe, cavità, successioni stratigrafiche, presenza di sottoservizi, superfici di falda.

Nel campo della tutela ambientale, il georadar può essere utile per rilevare sostanze liquide contaminanti o tossiche, o per monitorare zone a rischio idrogeologico mettendo in evidenza eventuali aree soggette a crollo.

Può essere usato anche per cartografare i suoli quaternari, ad esempio per mostrare la struttura di sedimenti fluviali, oppure per studiare la struttura dettagliata di rocce superficiali serbatoio di petrolio.

L'uso del georadar risulta anche molto utile nell'impiego urbano per la sua elevata risoluzione, velocità di acquisizione e non invasività. Possono essere rilevati sottoservizi come tubazioni metalliche, cavi telefonici, distribuzione di reti di acque potabili e reflue, cavità sotto i manti stradali, condizione degli asfalti, ecc..

Inoltre, può essere usato in applicazioni forensi per individuare corpi, armi, stupefacenti nascosti ed eventuali ordigni bellici; in quest'ultimo caso il georadar andrebbe integrato con l'uso di un magnetometro.

4. Meccanismo di funzionamento di un georadar

Il funzionamento di un georadar si può così riassumere:

1) un'antenna trasmette un segnale di tipo impulsivo;

2) raggiunta una superficie di discontinuità elettromagnetica, parte del pacchetto d'onda viene riflesso in superficie;

qui viene raccolto da un'antenna ricevente (fig.1).

L'antenna di un georadar, quindi, invia nel terreno una serie d'impulsi ad intervalli di tempo stabiliti dall'operatore. La registrazione delle riflessioni e la successiva digitalizzazione (in pratica un segnale elettromagnetico diventa una doppia colonna di numeri, la prima indica il tempo, la seconda l'ampiezza del segnale a quel tempo), permette di visualizzarli sul PC nei cosiddetti radargrammi. La presenza di discontinuità nel sottosuolo dà luogo ad "iperboli di diffrazione o riflessione" (fig.1).

L'oggetto sepolto viene 'visto' dal georadar in modo deformato

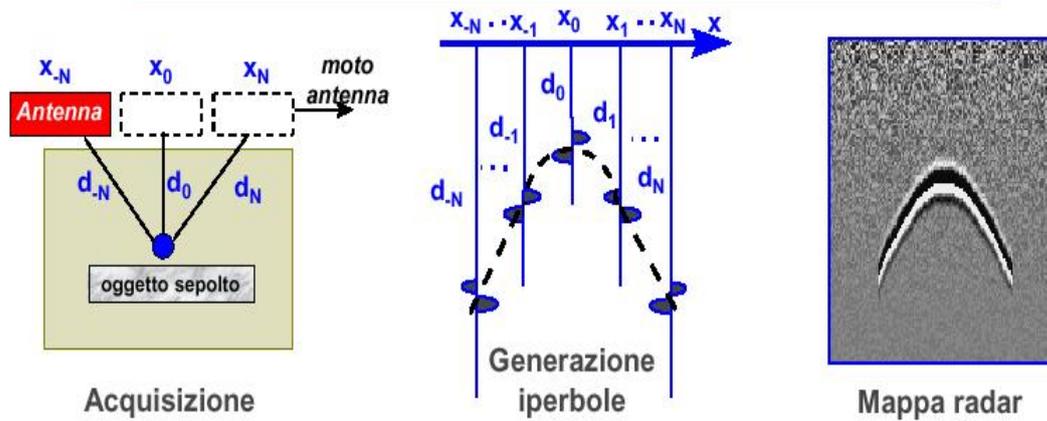


Figura 1: la prima immagine mostra come l'antenna viene trascinata sul terreno inviando continuamente impulsi verso l'oggetto sepolto. La seconda e terza immagine mostra come le onde elettromagnetiche inviate nel terreno intercettino l'oggetto sepolto dopo aver percorso distanze variabili, per questo l'onda cambia forma dopo intervalli di tempo diversi a seconda della posizione: il risultato è un'iperbole che può anche essere asimmetrica.

5. Strumentazione

I sistemi GPR possono essere suddivisi in quattro unità principali (fig. 2):



1. Unità di visualizzazione
2. Unità di controllo
3. Unità di trasmissione
4. Unità di ricezione

Figura 2: Strumentazione georadar utilizzata con antenna da 500 MHz

6. Unità di visualizzazione

Quest'unità può essere divisa in tre settori (fig.3):



Figura 3: Processore GSSI 3000 TerraSIRch©

Molte unità GPR permettono di impostare manualmente dei parametri di base prima di iniziare il lavoro. Questi aggiustamenti manuali fatti prima dell'acquisizione dei dati sono un processo che dovrebbe essere eseguito su di un certo numero di profili sperimentali prima di raccogliere i dati. Il settaggio deve rimanere fisso per tutta l'acquisizione.

A. Parametri del setup

- *Time window*: la “time window” è definita come l'intervallo di tempo, misurato in ns, in cui l'antenna ricevente percepirà e registrerà l'energia delle onde radar riflesse. La finestra temporale deve essere scelta in modo tale che la riflessione dovuta al target sia ben visibile, ad esempio al centro della finestra stessa.

- *Sample per scan*: il numero di samples (punti campione) per ogni scan (segnale registrato) dà una misura della qualità del dato. Infatti, un campione è un valore digitale che definisce istantaneamente l'onda riflessa sulla traccia. Più elevato è il numero di campioni digitali, più accurata è la ricostruzione della forma dell'onda. (fig. 4)

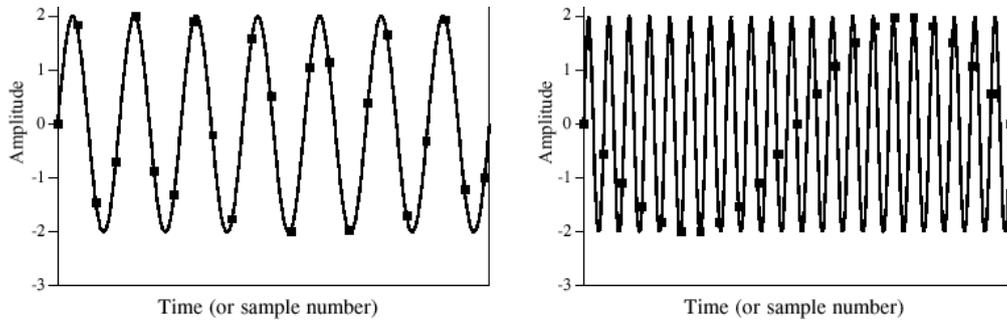


Figura 4: Si osserva come all'aumentare del numero dei punti campione per ogni segnale registrato la forma dell'onda è più accurata.

- *Numero di Scan/Unità*: questo parametro rappresenta il numero di impulsi registrati dal sistema e deve essere impostato tenendo presente che il target deve essere “coperto” da almeno 5-6 scan.

- *Gain function*: la scelta della funzione di gain viene fatta in base alla necessità di amplificare o deamplificare determinate frequenze nel segnale, in maniera tale da recuperare anche i segnali ad ampiezze più basse. Inoltre, diminuendo il gain per gli ultimi arrivi è possibile attenuare l'ampiezza del rumore del sistema.

- *Filtri*: il filtraggio dei segnali durante l'acquisizione in campagna consente di escludere determinate frequenze dai segnali stessi. Tuttavia è bene ricordare che il filtraggio preliminare dei segnali potrebbe in alcune occasioni generare una “perdita di informazioni”.

- *Stacking*: consiste in una sommatoria sincrona del segnale che serve a ridurre il rumore associato alle onde riflesse. La riduzione del rumore si ottiene mediando aritmicamente più tracce consecutive e registrando la traccia media.

B. Color scan

E' la parte dell'unità di visualizzazione che al muoversi dell'antenna riproduce in tempo reale il profilo.

C. Wiggle-trace

In questa zona è possibile vedere le ampiezze alle quali si associa il colore a seconda che sia positiva o negativa.

Molte unità digitali inoltre permettono di memorizzare informazioni generali che possono essere inserite in ogni file registrato durante un rilievo.

Queste informazioni riguardano la frequenza centrale dell'antenna, il nome del sito, nome e numero della griglia ed altre informazioni pertinenti.

7. Unità di controllo

L'unità di controllo è essenzialmente costituita da un PC portatile con un Software per l'analisi del segnale.

Quest'unità produce un impulso elettrico ad alto voltaggio che viene inviato, via cavo, alla trasmittente che amplifica il voltaggio e forma l'impulso che è poi emesso dall'antenna.

8. Antenne georadar di tipo monostatico e bistatico

Le antenne radar sono generalmente alloggiare su una slitta di plastica o fibra di vetro che è poi la parte che viene adagiata sulla superficie del terreno, o appoggiata su ruote a pochi centimetri dal suolo. Le antenne possono anche essere appoggiate direttamente sul terreno senza essere alloggiare in alcun supporto. Generalmente è possibile acquisire i segnali con un georadar in assetto monostatico e bistatico. Quando sono utilizzate due antenne, una utilizzata come antenna trasmittente e l'altra come antenna ricevente, si parla di acquisizione in bistatico (fig. 5). Quindi, nella modalità bistatica le antenne trasmettenti e riceventi sono separate tra loro e la distanza relativa, detta offset, può essere modificata.

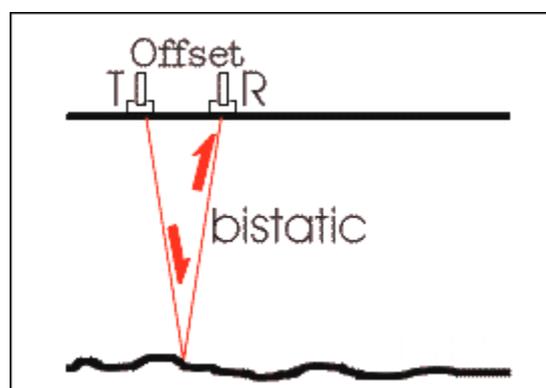


Figura 5: Un'antenna trasmette l'onda elettromagnetica nel terreno e successivamente una diversa riceve il segnale riflesso

Monostatici sono invece i georadar formati da un'unica antenna, come nel nostro caso, che prima trasmette il segnale e successivamente si abilita a ricevere (fig. 6).

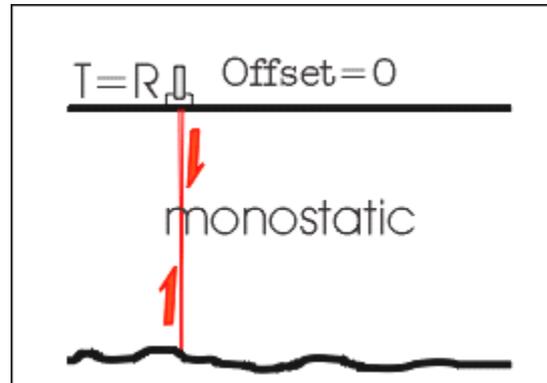


Figura 6: E' mostrato il funzionamento di un'antenna monostatica: la medesima antenna prima immette nel terreno un'onda elettromagnetica e poi ne registra l'eco.

Il termine monostatico viene anche usato per definire quei georadar che pur essendo bistatici hanno un offset molto piccolo e fisso. In pratica, in presenza di un unico contenitore, che include sia l'antenna trasmittente che quella ricevente, utilizziamo la parola monostatico.

9. Acquisizione georadar in reflection mode

Con il termine reflection mode si intendono tutte le acquisizioni georadar in cui i "punti" del sottosuolo sono illuminati spostando l'antenna lungo il profilo, cercando di mantenere una bassa e costante velocità, ed acquisendo i dati in continuo (fig. 7).

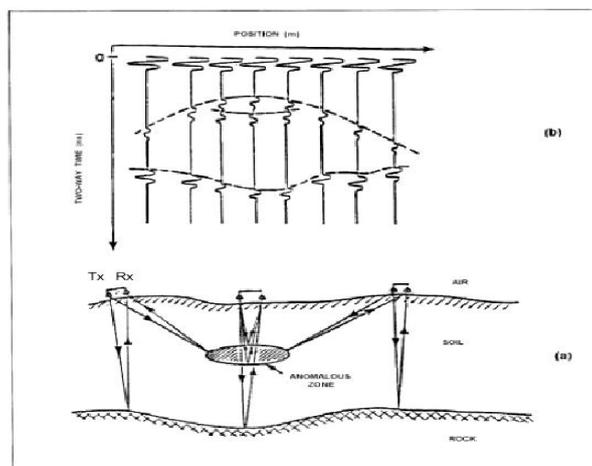


Figura 7: Acquisizione georadar in reflection mode

Con ambedue i tipi di georadar esistenti, monostatici e bistatici, i dati possono essere acquisiti in *reflection mode*.

10. Performance e Scelta delle antenne

Le antenne in commercio hanno un range di frequenze centrali che variano da 10 MHz a 2,5 GHz. In generale, i sistemi GPR usano antenne a dipolo che hanno una larghezza di banda di due ottave, ciò significa che le frequenze variano tra $\frac{1}{2}$ e 2 volte la frequenza dominante. Nel nostro caso, con una frequenza di 500 MHz di centro banda, la larghezza della banda varia da circa 250 a 1000 MHz. (fig 8).

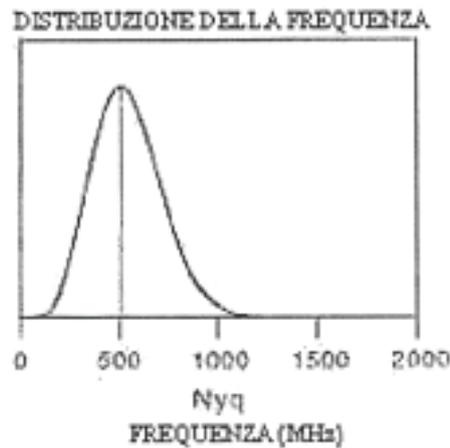


Figura 8: distribuzione della frequenza ideale di un'antenna da 500 MHz

Nella realtà la distribuzione di frequenza non è una curva a campana intorno ad un valore medio di frequenza, ma una distribuzione asimmetrica intorno ad una frequenza dominante (fig.9).

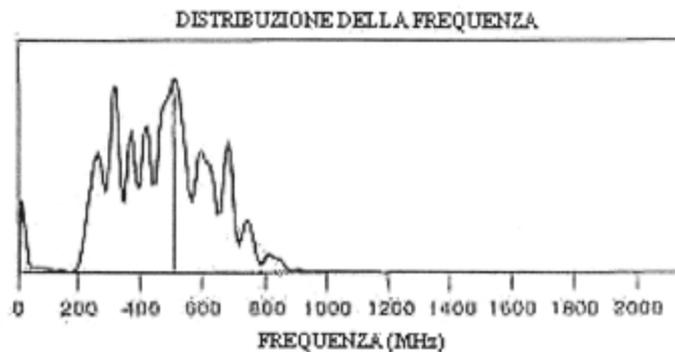


Figura 9: distribuzione della frequenza reale sempre per un'antenna da 500 MHz.

Queste variazioni della frequenza dominante possono essere causate da irregolarità della superficie dell'antenna o da altri componenti elettronici collocati all'interno del sistema antenna, e viene ulteriormente complicata quando l'energia radar si propaga nel terreno. La nuova frequenza di propagazione varierà in modo dipendente dalle proprietà elettriche del terreno, le quali determinano la velocità di propagazione. In generale, più è grande la profondità necessaria per l'investigazione, più è bassa la frequenza dell'antenna che dovrebbe essere utilizzata, ma ciò comporta una risoluzione minore. Esiste quindi una sorta di proporzionalità inversa tra la profondità di penetrazione e la risoluzione. La relazione tra la lunghezza d'onda ($\lambda=v/f$) e la frequenza di centro banda, per diverse antenne, al cambiare della permittività dielettrica relativa (RDP) è illustrata nella sottostante tabella:

Frequenza di centro banda (MHz)	Lunghezza d'onda in aria (m)	Lunghezza d'onda nel mezzo (m)	Lunghezza d'onda nel mezzo (m)	Lunghezza d'onda nel mezzo (m)
		RDP = 5	RDP = 15	RDP = 25
1000	0,30	0,13	0,08	0,06
900	0,33	0,15	0,09	0,07
500	0,60	0,27	0,15	0,12
300	1,00	0,45	0,26	0,20
120	2,50	1,12	0,65	0,50
100	3,00	1,34	0,77	0,60
80	3,75	1,68	0,97	0,75
40	7,50	3,35	1,94	1,50
32	9,38	4,19	2,42	1,88
20	15,00	6,71	3,87	3,00
10	30,00	13,42	7,75	6,00

Tabella 1: Lunghezza d'onda e frequenza di centro banda per diverse antenne al cambiare della permittività dielettrica relativa (RDP).

Si osserva in generale che mezzi con bassa RDP hanno una bassa capacità di attenuazione.

La profondità di penetrazione e la risoluzione sono molto variabili e dipendono da molti fattori come la composizione del terreno di copertura, la porosità e la quantità di umidità trattenuta. Possiamo quindi, assumendo una velocità nota (es. 10 cm/s) stimare, per effetto di skin depth, una risoluzione verticale pari a $\lambda/2 - \lambda/4$.

Frequenza di centro banda (MHz)	Profondità max (m)
35	~ 40
100	~ 30
500	~ 5
900	~ 2
1800	~ 0,5

Frequenza di centro banda (MHz)	Risoluzione (cm)
35	150-70
100	25-50
500	5-10

Tabella 2: rapporti tra frequenze e profondità; tra frequenze e risoluzione

La scelta dell'antenna deve quindi dipendere dalla profondità e dalle dimensioni del target oltre che dalle caratteristiche del terreno "inglobante" (costante dielettrica relativa e attenuazione). Un metodo speditivo per la scelta della antenna, ad esempio, si basa sull'applicazione della relazione:

$$f = \frac{150}{x\sqrt{\varepsilon}}$$

dove: f = frequenza dell'antenna;

x = dimensione lineare dell'oggetto di indagine;

ε = costante dielettrica relativa.

11. Propagazione e riflessione dell'energia radar

Dimensione del footprint

Diversamente da come s'immagina le onde GPR prodotte da un'antenna standard irradiano energia radar nel terreno attraverso un cono ellittico (fig. 10) il cui apice è al centro dell'antenna trasmittente. Questo cono ellittico di trasmissione è generalmente allungato e parallelo alla direzione di moto dell'antenna lungo la superficie del terreno (*Davis & Annan '89*).

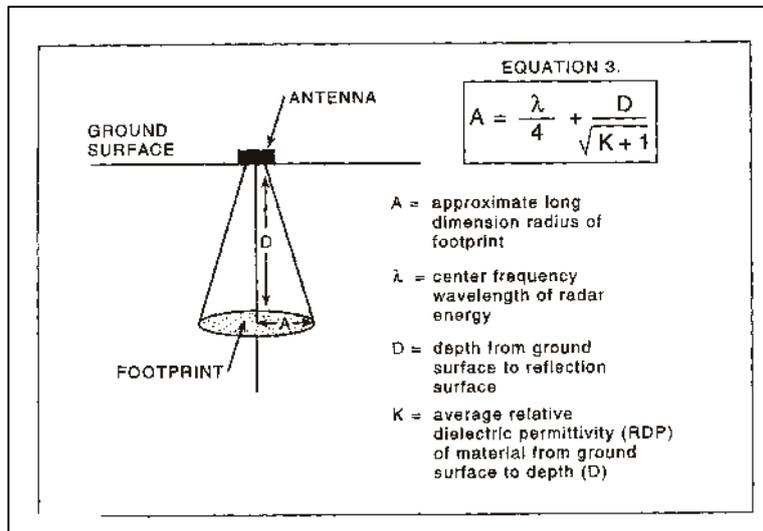


Figura 10: Cono ellittico della penetrazione del GPR nel terreno. L'equazione definisce la geometria del cono al variare della profondità e della lunghezza d'onda. Il footprint è l'area illuminata della superficie orizzontale sepolta.

Il lobo di radiazione è generato da un'antenna a dipolo orizzontale.

La stima del lobo di radiazione è importante specialmente quando si progetta la spaziatura tra le linee di una griglia in modo da mettere in evidenza tutti i bersagli di una certa importanza nel sottosuolo, cioè in modo tale che questi ultimi siano colpiti dall'energia radar trasmessa e che perciò possano generare riflessioni. Un'equazione che possa essere usata per stimare la larghezza del fascio di trasmissione a varie profondità (footprint) è:

$$r = \frac{\lambda}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon + 1}}$$

dove: r = raggio del footprint;

λ = lunghezza d'onda relativa alla frequenza di centro banda dell'antenna utilizzata;

D = profondità della superficie riflettente;

ϵ = permittività dielettrica relativa media del materiale dalla superficie del terreno alla profondità D .

Quest'equazione può essere usata solo come approssimazione grossolana nel caso reale perché in essa si assume una permittività dielettrica costante del mezzo in cui l'energia si propaga.

Le fasi riflesse

Nell'analisi di un radargramma le anomalie sono rappresentate dalla presenza di "iperboli" date da fasi riflesse. Le singole iperboli sono generate da punti sorgente. Queste forme si generano a causa dell'ampio angolo di trasmissione del raggio radar, per cui l'antenna vedrà il punto sorgente anche quando esso non è ubicato sulla sua verticale (fig. 11).

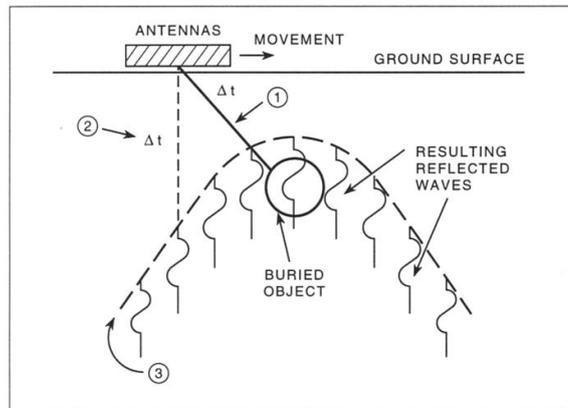


Figura 11: Si descrive il motivo per il quale un oggetto sepolto produce un'iperbole di riflessione. Il cono di trasmissione dell'energia radar, durante il trascinarsi dell'antenna, vede l'oggetto sepolto prima di arrivare sopra di esso. Tuttavia, il tempo di riflessione (Δt) è registrato come se l'oggetto fosse direttamente sotto l'antenna. Ciò implica che il tempo corretto sarà registrato solo quando l'antenna è direttamente sull'oggetto. Le riflessioni vengono registrate anche quando ci si allontana dal punto sorgente, creando l'iperbole di riflessione.

Le iperboli di riflessione si generano in presenza di discontinuità geometriche ed elettriche nel sottosuolo. E' proprio in base ad esse che si può risalire ad eventuali strutture sepolte, definirne la velocità e quindi associarla al terreno o alla discontinuità.

Le più forti riflessioni radar si generano ovviamente all'interfaccia tra due strati con proprietà elettriche molto differenti. Riflessioni d'ampiezza più piccola si verificano generalmente quando sono presenti solo piccole differenze nelle proprietà elettriche tra gli strati.

Quindi, più grande è la differenza di RDP tra i materiali del sottosuolo, più grande è l'ampiezza delle riflessioni generate. L'ampiezza dell'onda riflessa generata lungo l'interfaccia può essere quantificata usando l'equazione sottostante se la RDP dei due materiali è nota:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_1 - \epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$$

dove: R = coeff. di riflessione per incidenza normale;

ϵ_1 = RDP del materiale sovrastante;

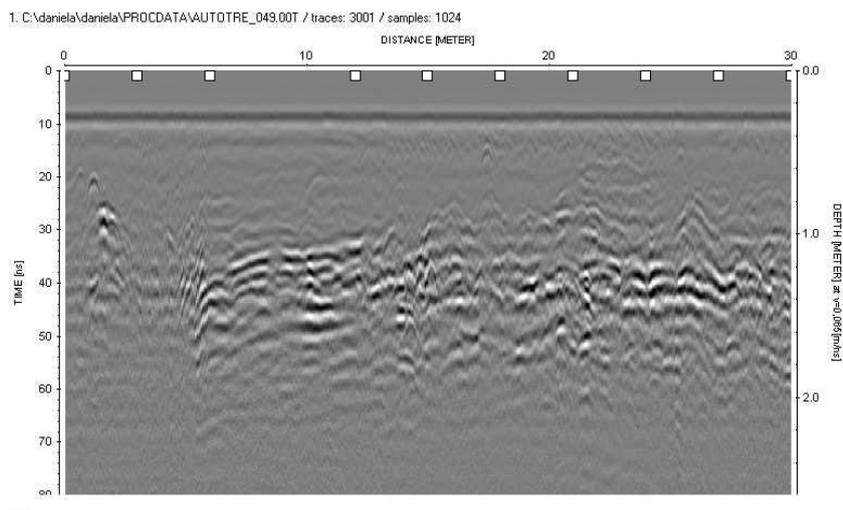
ϵ_2 = RDP del materiale sottostante.

12. Interpretazione dei dati

Le tracce registrate nell'unità di controllo vanno a costituire un radargramma che rappresenta un profilo bidimensionale verticale lungo ogni linea della griglia. In ascissa di questo grafico è raffigurata la distanza percorsa dall'antenna sulla sezione e in ordinata il tempo in ns. Le riflessioni radar sono sempre registrate in TWT, *Two-Way Time* (Tempo doppio di viaggio) che è il tempo impiegato da un'onda radar per viaggiare dalla superficie dell'antenna trasmittente al bersaglio e tornare indietro sulla superficie dell'antenna ricevente. Il tempo di andata e ritorno degli impulsi è ovviamente importantissimo per la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo. Se la velocità media V dell'onda radar attraverso il terreno è nota, è possibile convertire i tempi di viaggio in profondità tramite la semplice relazione $V = d/t$ (dove d è la distanza percorsa dall'onda e t è il tempo).

I radargrammi dopo l'acquisizione contengono generalmente del "rumore" di fondo che, deve essere eliminato affinché l'interpretazione risulti più agevole. Per eliminare il noise e correggere le scale orizzontale e verticale dei dati grezzi, è necessario che essi vengano trattati prima dell'interpretazione.

Le diverse tracce possono essere visualizzate nel formato *wiggle-trace*, dove le tracce sono disposte le une accanto alle altre, o in *linescan*, in cui ad ogni ampiezza è associato un colore o un tono di grigio (fig. 12).



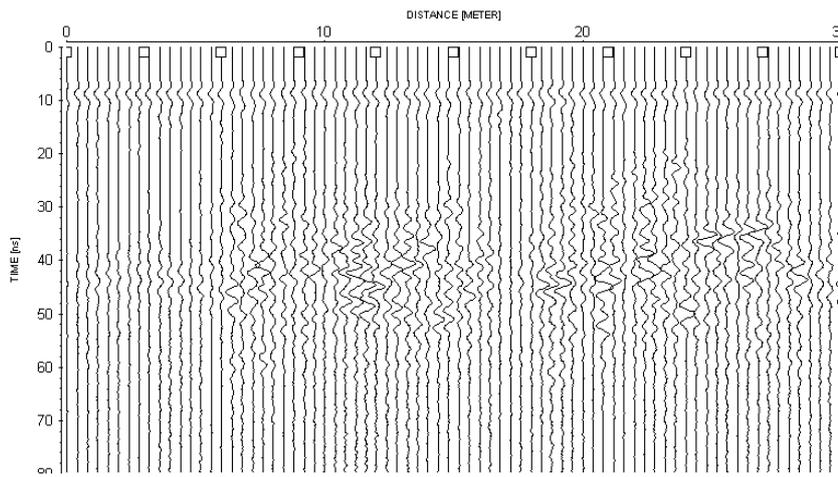


Figura 12: registrazione dei segnali riflessi relativi ad un profilo GPR. In alto il radargramma in modalità *line scan*, in basso lo stesso radargramma in modalità *wiggle-trace*.

In questo modo le riflessioni significative, che possono rappresentare importanti interfacce nel sottosuolo, sono prontamente visibili. Solitamente la forma delle bande anomale è collegata alla forma del riflettore.

I profili acquisiti in modo regolare all'interno della superficie da investigare, vengono poi elaborati al fine di posizionare le tracce radar registrate ai nodi di una griglia regolare.

Successivamente si opera sui dati seguendo questi step:

- **Editing:** eliminazione di alcune tracce, o per troppo noise o perché realizzate con una velocità di trascinamento anomala (ostacoli imprevisti). Il risultato finale consiste nel normalizzare lungo l'asse orizzontale (ossia rispetto alle distanze).
- **Filtering:** filtri passa-banda, passa-alta, passa-bassa o che rimuovono il background cioè un noise rappresentato da una banda orizzontale che viene matematicamente sottratta ai dati.
- **Stacking:** medie su tracce consecutive;
- **Gain:** amplificazione preventiva del segnale che può essere successivamente variato o eliminato.

Interpretazioni complete sussistono anche nel definire spessori, relative profondità e caratterizzazione litologica.

13. Velocità georadar

Possiamo affermare, approssimativamente, che la velocità di un'onda elettromagnetica in un mezzo è data dal rapporto tra la velocità nel vuoto dell'onda elettromagnetica (300.000 Km/s) e la radice quadrata della costante dielettrica relativa:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad [V = \text{cm/ns}]$$

dove: $\mu \approx 1$

Avendo a che fare con velocità così elevate, si preferisce esprimerle in termini di cm/ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$). La velocità della luce nel vuoto vale quindi 30 cm/ns (29.98 cm/ns). Le velocità di fase di un'onda elettromagnetica nei materiali oscillano quindi tra il limite massimo dell'aria (in verità il vuoto), 30 cm/ns e quello minimo dell'acqua, un po' più di 3 cm/ns. Tra i due limiti c'è tutta una gamma di valori che va dalle argille (5-6 cm/ns) ai calcari (10-11 cm/ns) al ghiaccio (13 cm/ns).

La velocità è controllata dalle proprietà di polarizzazione descritte dalla permittività dielettrica e dalla permeabilità magnetica e cioè dalla capacità del materiale ad immagazzinare energia e rifletterla.

Come affermato precedentemente le misure di velocità sono necessarie per trasformare i tempi in profondità. Fonti d'errore possono essere ricondotte alla non corretta interpretazione di iperboli legate alle sorgenti presenti nel sottosuolo. Il fatto che, nel suolo la velocità di fase dell'onda elettromagnetica a queste frequenze sia costante è basilare per la prospezione georadar.

Nel range di frequenze utili al georadar, i fenomeni capacitivi dominano sui fenomeni di conduzione.

14. Effetti di scattering e focalizzazione

Lo scattering si ha quando un'onda elettromagnetica incontra un materiale con caratteristiche elettriche o magnetiche diverse, provocando un cambio nella lunghezza d'onda. Se una superficie sepolta piana è inclinata o convessa verso l'alto, molta energia sarà riflessa lontano dall'antenna perciò saranno registrate riflessioni di ampiezza molto bassa (fig.13). Cosa simile accade quando l'antenna è collocata in corrispondenza di una buca stretta. Si ha in questo caso un alto grado di scattering perché le onde radar sono riflesse molte volte dentro la fossa e sono poi scatterate lontano dalla superficie dell'antenna. Ovviamente con un eccesso di scattering i dati risultano ininterpretabili. Uno scattering non voluto è detto "*clutter*". L'opposto si verifica quando la superficie sepolta è concava. In questo caso l'energia riflessa sarà focalizzata e quindi saranno registrate riflessioni di grande ampiezza (fig.13).

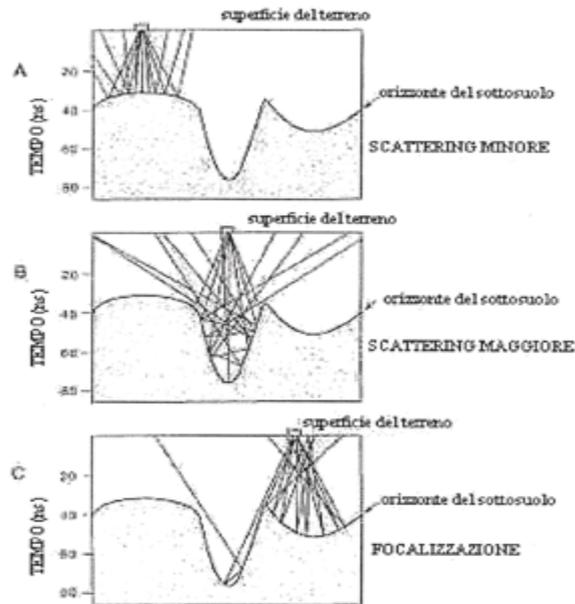


Figura 13: diagramma che illustra lo scattering e la focalizzazione a differenti collocazioni dell'antenna.

15. Risoluzione

La risoluzione è determinata dalla frequenza e quindi dalla lunghezza d'onda, dall'energia radar trasmessa nel terreno, dal contrasto delle proprietà elettromagnetiche, dalla forma, dimensioni e orientazione dell'obiettivo. La risoluzione è controllata quindi dalla quantità di energia riflessa da un corpo sepolto che a sua volta dipende dal rapporto tra le dimensioni dell'oggetto e lunghezza d'onda dell'onda radar nel terreno. Segnali a piccola lunghezza d'onda (alta frequenza) consentono di risolvere piccoli lineamenti, ma non penetreranno a grande profondità. Viceversa faglie a grande lunghezza d'onda (bassa frequenza) implicano bassa risoluzione e alta penetrazione.

Alcuni lineamenti nel sottosuolo possono essere ben evidenziati se hanno sufficiente contrasto con le proprietà del corpo incassante. Gli oggetti che sono allungati in una dimensione (tunnel, canali, tubi, etc.), dovrebbero preferibilmente coincidere con il verso normale ai profili, in modo da essere facilmente visibili nei radargrammi. Per superfici piane che possono essere associate alla stratigrafia o a larghi lineamenti archeologici piani (come il pavimento di una casa), la risoluzione è funzione della geometria, dell'inclinazione, del loro spessore (preferibilmente $>1/10$ della lunghezza d'onda), e della rugosità della superficie.

16. Descrizione del piano di indagini del georadar

L'area d'indagine (fig. 14), riguarda l'intera Piazza Leonardo sita a Napoli, con dimensioni di 64x40 metri.

Le indagini GPR sono state effettuate sia lungo la Piazza che sui marciapiedi prospicienti gli edifici. L'area totale d'indagine si estende su di una superficie pari a 5500 m² e per coprirla sono stati necessari 72 profili radar con lunghezze che vanno da circa 7m (traccia S62) fino a circa 90m (S53) per un totale di 1889.12 ml, equidistanziati dai 2 ai 3,5 metri. In particolare, dei 72 profili effettuali, 44 sono paralleli a Viale Michelangelo, 14 sono paralleli a Via Girolamo Santacroce, 3 sono perpendicolari a via Suarez. Sono stati inoltre eseguiti profili che attraversano trasversalmente l'intera Piazza Leonardo (S50 S53 S72).



Figura 14: Fase di acquisizione dei dati GPR

I dati GPR sono stati acquisiti mediante un'antenna con frequenza nominale pari a 500Mz e con unità di visualizzazione costituita dal TerraSirch3000© della GSSI.

I dati acquisiti in questo modo hanno permesso di avere informazioni geofisiche lungo una griglia ed ottenere così un'immagine del sottosuolo fino a circa 2,5 metri di profondità.

L'elaborazione dei dati GPR acquisiti in campagna è stata eseguita con il software REFLEX 3.5 su ognuna delle tracce GPR e si costituisce dei seguenti step:

- Correzione della direzione e delle coordinate dei profili
- Correzione statica
- Determinazione della velocità media di propagazione

- Filtraggio 2D (background removal)
- Migrazione fk di Stolt

In allegato sono riportati i radargrammi ottenuti.

Di seguito si analizza dettagliatamente il processing effettuato sui dati.

Dapprima è stata eseguita la *correzione statica*, per l'individuazione dell'istante zero.

Sui dati è stata eseguita anche una Migrazione fk di Stolt, sulla base di una velocità costante, in tal caso pari a 0,10 m/ns, determinata in base alla curvatura delle iperboli.

Dopo aver inserito le coordinate (così da dare la giusta direzione e posizione dei radargrammi), questi sono stati considerati prima separatamente e poi congiuntamente per ottenere informazioni sulla collocazione dei sottoservizi e sulla presenza di eventuali vuoti.

17. Interpretazione dei risultati ottenuti

Nella porzione più superficiale dei radargrammi (da 0,1m a 0,5m di profondità) non si apprezzano anomalie significative, tali da poter essere correlate alla presenza di strutture archeologiche sepolte. Da 0,5m a 1,40m sono invece osservabili anomalie elettromagnetiche significative. A profondità maggiori non si rileva invece più alcuna anomalia.

Di seguito sono riportati i punti in cui si rinviene la presenza di sottoservizi.

Profilo	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
S2	11,5	0,75								
S3	12,80	0,75								
S4	12,2	0,30	13	0,80	15	0,90				
S5	9,5	0,65	13,20	0,90						
S6	12	0,85								
S7	12,5	0,75								
S10	19	0,75								
S11	2,6	0,90	19,8	0,70						
S12	2,9	0,70								
S13	2,9	0,80	27,5	0,80						
S14	4,8	0,85	22,5	0,80	26,5	0,90				
S15	5,7	0,90	24	0,80						
S16	4,4	0,90	23,5	0,85						
S17	4,90	0,60	4,80	0,80						
S18	2,10	0,80	11	0,60						
S19	3,40	1	3,6	0,90						
S20	3	0,80	11	1						
S21	5	0,90	22	0,90	29	1,10				

S22	5	0,90	24	1	29	1,05				
S23	2,20	0,80	16,2	0,90	24	0,80	35	0,85	38,4	1,10
S24	2,10	0,90	21	0,75	24	0,90				
S25??	2,4	0,50								
S26	10,1	0,80	13	1	21	1,10				
S27	2,2	0,60	2,2	1						
S28	10,8	0,80	12,4	1,05	18,1	1,25				
S29	2,2	0,85								
S30	11	0,75	12,8	1						
S31	2	0,85								
S34	14	1								
S36	21,5	1	22,2	0,90						
S37	21	0,75								
S38	2,5	0,75								
S40	14	1								
S43	7,2	0,75								
S44	1,4	0,55	3,1	0,75						
S46	0,30	0,75	1,20	0,60	9,5	1,40				
S47	3,5	1	9	0,70	63	0,70	63,8	0,85		
S49	1	0,70	25	1,3	49,6	0,40				
S51	1,5	0,50	2	1	19	0,80	31,5	1		
S52	12	0,80	43	0,85						
S55	1	0,55								
S59	0,80	0,60								
S61	0,80	0,45								
S68	2,5	0,50								
S72	31,5	0,90								

Inoltre, nei profili S1, S2, S3, S4 è presente un riflettore comune da 0 a 11m con profondità variabile da 0,80m a 0,50m. Inoltre, il profilo S4 presenta un riflettore concavo da 16.5m a 20m a profondità di 0,40m.

In S5 il riflettore concavo si colloca a 1 m di profondità con un'estensione orizzontale da 13.4 m a 18.2m. Anche in S6 vi è un riflettore concavo che va dai 6m ai 9m con una profondità massima di 1.10m. In S9 il riflettore concavo va dai 10m ai 12m con una profondità massima di 0.60m. A partire dal profilo S10 e fino al profilo S14 è presente un riflettore obliquo con immersione verso il centro della Piazza. In S10 questo parte da 5m e si estende fino a 15m (profondità max 1.10m). In S11 il riflettore parte da 8m fino a 16.40 (prof max 1.20m). In S12 il riflettore parte dai 7.50 fino ai 15m con profondità massima di 1.40m . Sempre in S12 si evidenzia un riflettore che va dai 26m fino a 31m con una profondità di 0,85m. In S13 il riflettore obliquo parte dai 12 m fino a 16 (profondità max di 1.10m), inoltre vi è un altro riflettore che va da 28m e si estende fino a 32 m con profondità di 0.55. Anche in S14 è presente il riflettore obliquo dagli 8m fino a 11m posto a 0.75m di profondità. Sempre su S14 si evidenzia un riflettore che va da 28m a 33m con profondità di 0.75m, ed uno obliquo dai 37m ai 42m con profondità massima 0.75m.

S15

da 36m a 4m, profondità 0.60m

S22

Da 2.5m a 6m, profondità 0.80m

S23

Da 24m a 39m, profondità da 0.80m a 0.35m

S34

Da 12.5m a 15.5m, profondità di 0.50m

S35

Da 0 a 4m, profondità 0.50m

S36

Da 0 a 5m, profondità 0.50m

S37

Da 0 a 3m, profondità 0.50m

S45

Da 1.60m a 7m, profondità 0.80m

S46

Da 6m a 16m, profondità 0.60m; da 55m a 58m, profondità 0.75m

S47

Da 57m a 60m, profondità 0.75m

S48

Da 58m a 64m, profondità 0.50m

S54

Da 0 a 22m, profondità media 0.80m

S55

Da 0 a 13.80, profondità 0.15m; riflettore concavo da 3.40m a 11.50, profondità massima 0.50m

S56

Da 0 a 11.50, profondità 0.20m

Queste anomalie sono difficilmente, per forma e dimensioni, associabili a struttura archeologiche sepolte, mentre sono correlabili a sottoservizi e movimenti di terreno connessi.

18. Bibliografia

Benson R.C., Glaccum R.A., Noel M.R. "Rappresentazione schematica del metodo GPR"
Edizioni all'insegna del Giglio, 1982

Conyers L.B., Goodman B. “Ground Penetrating Radar- Introduzione per l’archeologia”
Altamira Press, A division of Sage Publication, inc. 1997

GSSI “TerraSIRch System 3000 – user’s manual” 2003

Sandmeier K.J. “ Reflex 3.5, instruction manual”, 2003

ALLEGATI



CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
Istituto per l'Ambiente Marino Costiero
Calata porta di Massa, 80133 Napoli

INDAGINE RADAR FINALIZZATA ALLA MAPPATURA DEI SOTTOSERVIZI PRESSO PIAZZA LEONARDO, NAPOLI

Carta planimetrica con ubicazione degli eventi diffratti e riflessi ascrivibili a reti di sottoservizi

Proiezione: Gauss-Boaga
Datum: ROMA1940



Legenda

- D1
- D2
- D4
- D7
- D8
- D9
- D10
- D12
- D13

