

GIOVANNI GALIERO¹, RAFFAELE PERSICO¹,
MARCO SACCHETTINO¹, GRAZIA MARIA SIGNORE²

¹CO.R.I.S.T.A. - Consorzio di Ricerca per Sistemi di Telerilevamento Avanzato,
Piazzale Tecchio 80, 80125 Napoli

²Dipartimento di Beni Culturali Università di Lecce,
Via D.Birago 64, 73100 Lecce

NUOVE TECNICHE DI PROSPEZIONE ARCHEOLOGICA MEDIANTE STRUMENTI MULTIFREQUENZA

SUMMARY

In this work we present some results obtained in a measurement survey performed with a stepped frequency Ground Penetrating Radar (GPR). The GPR and the survey at hand have been conceived for archaeological purposes.

The stepped frequency GPR has been developed by the Italian Research Consortium CO.R.I.S.T.A. in the framework of the ARCHEO project, financed by Italian M.U.R.S.T. The system can work within a large bandwidth and both in ungated and gated mode. It is equipped with a positioning system able to move the transmitting and receiving antennas of the GPR independently on each other and to place them automatically and in a precise fashion.

The GPR has been tested first in laboratory of CO.R.I.S.T.A., then in a controlled site, and finally in the real archaeological site of Cales, near Capua (Southern Italy), preventively and appositely studied by a team of archaeologists.

The final results obtained in the field have been coherent with a previous prospecting performed at Cales and have individuated some new further buried targets, whose nature is still unknown at the moment.

INTRODUZIONE

Le tecniche di prospezione mediante GPR hanno avuto un considerevole sviluppo negli ultimi decenni grazie alla molteplicità delle applicazioni ad esse legate, che possono variare dal “demining” alle indagini archeologiche, dalla diagnostica di opere architettoniche alla rivelazione di strutture idrogeologiche. Le diverse applicazioni richiedono frequenze di esercizio in generale diverse e, in conseguenza di ciò, antenne ed architetture elettroniche anch'esse differenti. I principi di funzionamento sono però sempre gli stessi, per cui può essere di interesse esporre o apprendere tecniche che sono state messe in atto e utilizzate per una certa applicazione anche in un contesto non strettamente legato a quella specifica applicazione. In particolare, in questo lavoro viene presentato un sistema *stepped frequency* per prospezioni sotterranee realizzato presso il laboratorio del Consorzio di Ricerca per Sistemi di Telerilevamento Avanzato (CO.R.I.S.T.A.) nell'ambito del progetto ARCHEO, finanziato dal Ministero per l'Università e la Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.). ARCHEO è un progetto dedicato alla realizzazione di opportuni strumenti e software di sostegno all'indagine archeologica, realizzati mediante un lavoro ed un approccio alla problematica multidisciplinari (FIORANI *et al.*, 2000a; FIORANI *et al.*, 2000b). Il GPR oggetto del presente contributo è uno di questi strumenti. Per la sua realizzazione si è partiti da un approccio al problema nel dominio della frequenza (più precisamente un approccio multifrequenza), in quanto esso può

permettere di conseguire una maggiore dinamica e versatilità dello strumento. La maggiore dinamica è dovuta alla maggiore energia che può essere processata in condizioni di funzionamento lineare delle elettroniche (NOON, 1996). In questo contesto, inoltre, la versatilità (legata all'approccio multifrequenza) si riferisce alla possibilità di raccogliere in modo semplice dati sperimentali per effettuare ricostruzioni tomografiche del sottosuolo (PERSICO *et al.*, 2000). A parte l'aspetto multifrequenza, lo strumento realizzato è versatile anche perché può essere programmato automaticamente per svolgere le prospezioni in varie configurazioni e precisamente (seguendo una terminologia ampiamente utilizzata (DANIELS, 1996) *in common offset lineare, common source, common receiver, common depth point e common offset planare*). In ciascuna delle configurazioni elencate, lo strumento può funzionare in modalità continua (ovvero con le antenne in trasmissione ed in ricezione contemporaneamente in funzione) e in modalità interrotta (ovvero con l'antenna in ricezione che entra in funzione in intervalli di tempo in cui l'antenna in trasmissione è spenta). Le due modalità sono state tenute entrambe a disposizione, in quanto la prima consente una maggiore dinamica del sistema, mentre la seconda riduce il problema dell'accoppiamento fra le antenne (NOON, 1996; STICKLEY *et al.*, 1999). Abbiamo avuto modo di verificare sperimentalmente l'utilità di disporre di entrambe le modalità in passato (ALBERTI *et al.*, 2001).

Verranno in questa sede mostrati alcuni risultati sperimentali e inediti ottenuti in campagne esterne di misura, realizzate insieme da ricercatori del CO.R.I.S.T.A. e da archeologi. La collaborazione fra queste due differenti professionalità ha avuto lo scopo di realizzare prospezioni mirate, ed in particolare tese a rispondere alle esigenze della ricerca archeologica. Dettagli tecnici sullo strumento verranno invece evitati, dal momento che essi sono stati già ampiamente esposti altrove (ALBERTI *et al.*, 2000; ALBERTI *et al.*, 2002).

A chiusura di questa introduzione vogliamo sottolineare, per puntualizzare gli aspetti più innovativi del lavoro compiuto, che in effetti la teoria su cui si basa la tecnica *stepped frequency* è nota da tempo (ROBINSON *et al.*, 1974) ma è tuttora poco diffusa tanto che, a nostra conoscenza, lo strumento messo a punto nell'ambito di ARCHEO è l'unico GPR *stepped frequency* mai realizzato in Italia.

Il presente lavoro è organizzato nel seguente modo: viene presentata brevemente l'antica Cales (CE), sito archeologico nel quale sono state eseguite le prospezioni. Successivamente vengono esposti e commentati i risultati sperimentali ottenuti. Seguono, infine, le conclusioni.

IL SITO ARCHEOLOGICO DI CALES

La Soprintendenza Archeologica di Napoli e Caserta ha concesso al CO.R.I.S.T.A. di validare i prototipi strumentali, realizzati nell'ambito del progetto ARCHEO, nel complesso archeologico urbano della romana Cales situato su un pianoro tufaceo ai piedi delle montagne che segnano il limite settentrionale della pianura campana, a sud del centro moderno di Calvi Risorta, in provincia di Caserta.

L'area è attualmente sfruttata per fini agricoli e questo rende difficile l'applicazione di un adeguato programma di tutela. Scavi clandestini si sono ripetuti fin dagli inizi del '900 e perdurano tuttora mettendo a repentaglio la conservazione delle strutture antiche.

Alcuni degli edifici dell'antica città sono coperti solo parzialmente e con le strutture conservate in parte anche in elevato, oppure ancora da scavare, nascoste a bassa profondità. Pertanto, il complesso archeologico si è rivelato un contesto ideale per la sperimentazione degli strumenti di nuova creazione del progetto ARCHEO dal momento che le strutture antiche parzialmente fuori terra hanno potuto fornire un utile indirizzo per la loro calibrazione.

La colonia latina di Cales è stata fondata dai Romani nel 334 a.C. (Tito Livio, *Ab Urbe Condita*, VIII, 16, 11-14; Velleio Patercolo, *Historiae Romanae*, I, 4, 3), su un villaggio degli Ausoni (popolazione indigena della Campania), del quale sono stati individuati resti di capanne e la necropoli (JOHANNOWSKY, 1961; GASPERETTI *et al.*, 1999). L'impianto urbano della colonia non è stato mai indagato sistematicamente.

Di esso si conservano lungo i margini del pianoro tufaceo tratti della cinta muraria riferibili a diverse fasi cronologiche (JOHANNOWSKY, 1961). La necropoli si estende ad W della città. In essa sono state ritrovate alcune tombe e monumenti funerari di età tardo-repubblicana (JOHANNOWSKY, 1961).

Nel settore N-E della città sono stati identificati i resti dell'anfiteatro, costruito probabilmente nel I sec. a.C. ed oggetto di rifacimenti in età imperiale (JOHANNOWSKY, 1961), mentre nell'area mediana è stato messo in luce il complesso delle cosiddette "terme centrali", datato al primo quarto del I sec. a.C. (JOHANNOWSKY, 1961). Ad W di esso (al di là dell'attuale strada vicinale Ponte delle Monache, nella quale è stato riconosciuto il *cardo maximus* della città romana), di recente è stato interamente portato alla luce il teatro il cui impianto si data agli inizi del I sec. a.C.. L'edificio subisce trasformazioni in età augustea, mentre tra la fine del I e gli inizi del II sec. d.C. si ipotizza un rifacimento della decorazione architettonica della *scaena* (DE CARO, 1999).

Il teatro appare pesantemente spoliato e in cattivo stato di conservazione. Della *cavea*, interamente sostruita su un sistema di dodici arcate, non è più leggibile l'articolazione delle gradinate; nell'orchestra si conserva solo in qualche punto il rivestimento pavimentale; la *scaena* appare ormai privata del suo apparato decorativo lapideo e scultoreo. Alle spalle del muro di fondo della *scaena* sono state portate alla luce dieci colonne in laterizio poggianti su blocchi di tufo grigio riferibili ad un *porticus* (DE CARO, 1999).

Gli scavi condotti dalla Soprintendenza Archeologica nel 1999 hanno rinvenuto sul lato S-W del monumento parte di una strada a basoli di calcare, che doveva probabilmente condurre all'interno del teatro (DE CARO, 1999). La strada non è stata completamente scavata e non se ne conosce l'intero percorso. In questa parte centrale della città romana dominata dall'edificio del teatro si è proceduto alla sperimentazione del GPR (Fig. 1). Sono state effettuate una serie di misure con lo strumento all'esterno del monumento e, in particolare, alle spalle del colonnato dietro al muro della *scaena* ed in prossimità del basolato, indicato sulla planimetria con la lettera S (Fig. 1). Sono state condotte prospezioni a N-W e a S della strada romana, al fine di accertarne la prosecuzione e l'andamento nella parte non ancora scavata. In questa

sede si presentano i risultati delle prove effettuate a pochi metri dal margine meridionale del basolato (quadrati A e B) e di quelle condotte più a S in una zona ubicata all'esterno della recinzione che delimita l'area scavata, oltre la strada vicinale denominata S.Pietro (quadrato C su Fig. 1). Nel primo caso lo strumento è stato posizionato in asse con un muro di contenimento posto ad E del basolato (quadrato A). Ci si è poi spostati a m 1 di distanza ad W del quadrato A per effettuare le misure nel quadrato B coprendo così

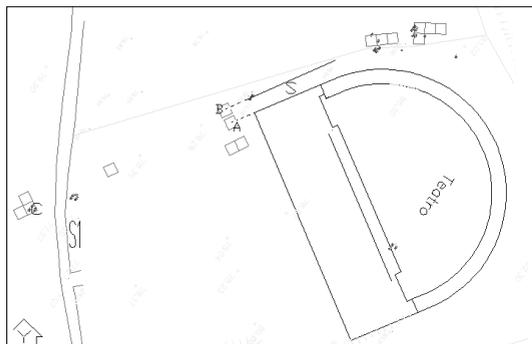


Fig. 1 - Pianta dell'area del teatro romano di Cales.

l'intera larghezza del basolato. In questa area la prosecuzione della strada romana al di sotto del piano di campagna era stata in precedenza accertata da piccoli saggi di scavo poi ricoperti, e perciò si è privilegiata questa zona come fondamentale *test-site* di verifica del funzionamento dello strumento. Nel secondo caso (quadrato C), invece, si è posto lo strumento in direzione dell'asse mediano della strada romana, a S del sentiero moderno S1 al fine di accertare la continuazione del basolato anche all'esterno dell'area del teatro e l'esistenza di qualche relazione tra esso e l'assetto stradale moderno.

RISULTATI SPERIMENTALI

Prima di passare ai risultati delle prospezioni mostriamo, in Fig. 2, il sistema GPR *stepped frequency* sul campo. In primo piano è visibile il sistema di posizionamento con sopra le antenne, rette da assali mobili comandati da motori passo-passo. Sulla destra dell'immagine è visibile il furgoncino a bordo del quale è stata montata la strumentazione elettronica. Mostriamo, a questo punto, il risultato di una prospezione eseguita in corrispondenza del quadrato A di Fig. 1. La prospezione aveva lo scopo di testare lo strumento. Infatti è noto, come detto, che in corrispondenza del quadrato A c'è il prosieguo della strada S (indicata in Fig. 1). La prospezione è stata eseguita in *common offset* planare, con 4 scan lungo quattro rette parallele, ovvero 4 "B-scan" (DANIELS, 1996), distanti fra loro 70 cm. Lungo ciascuna linea sono state eseguite 11 misure a distanza di 25 cm l'una dall'altra. I *gaps* delle antenne sono stati tenuti alla costante distanza di 55 cm. La banda utilizzata (anche per la prospezioni mostrate in seguito) è stata da 200 MHz a 800 MHz, con passo 2 MHz. La Fig.3 rappresenta uno di questi 4 B-scan ed è stata eseguita in modo che nella parte finale le misure fossero in corrispondenza dei basoli della antica strada (che sappiamo essere alla profondità di 40 cm circa). Dall'intensità del colore si può notare come questa fattezze risulti evidente nello scan lineare mostrato. Un andamento analogo mostrano anche gli altri 3 B-scan, ma piuttosto che mostrarli tutti, preferiamo dare una rappresentazione complessiva del risultato ottenuto sullo scan planare. Una rappresentazione complessiva tridimensionale, infatti, può fornire una più immediata e statisticamente significativa evidenza delle strutture pianamente estese che possono presentarsi. Essa tiene conto, inoltre, della potenza degli impulsi ricevuti lungo tutto lo scan planare anziché lungo un singolo scan lineare, e pertanto può consentire una più significativa valutazione comparativa della potenza ricevuta nelle varie posizioni. Per contro, una rappresentazione tridimensionale si scontra con la impossibilità di rappresentare visivamente il grafico di una funzione di tre variabili (che sono due coordinate lineari sul piano dell'interfaccia aria-suolo ed il tempo della propagazione "andata e ritorno" degli impulsi sintetici irradiati). Per ottenere dunque una visualizzazione che dia un'idea complessiva dei ritorni radar più significativi, sono stati interpolati gli istanti di massima intensità dell'impulso sintetico ricevuto in funzione della posizione, con eliminazione (mediante la imposizione di un fittizio valore zero) degli istanti di massimo degli impulsi poco significativi in termini di ampiezza. Infatti, non avrebbe avuto senso tenere in conto i tempi di ritorno di impulsi privi di un significativo valore energetico, e perciò spesso dovuti molto più probabilmente ad una delle tante fonti di rumore presenti



Fig. 2 - Immagine dello strumento: in primo piano c'è il sistema di posizionamento con sopra le antenne, il rack è a bordo del furgone sulla destra.

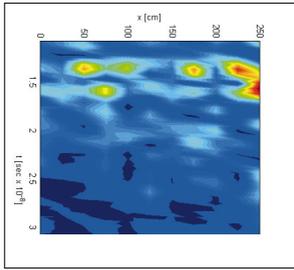


Fig. 3 - Prospezione in common offset lineare su una strada romana sepolta.

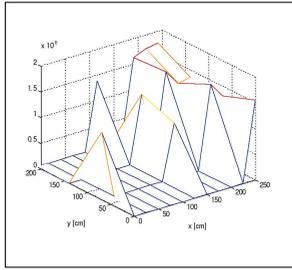


Fig. 4 - Interpolazione planare dei tempi di ritorno degli impulsi significativi sulla strada romana (quadrato A)

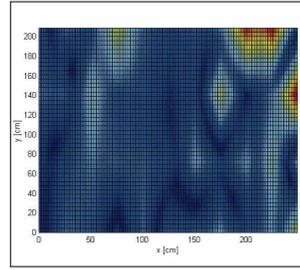


Fig. 5 - Taglio orizzontale in corrispondenza del tempo di 15 ns sotto la strada romana di Cales (quadrato A).

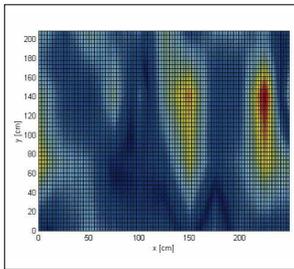


Fig. 6 - Taglio orizzontale in corrispondenza del tempo di 12ns sotto la strada romana di Cales (quadrato A).

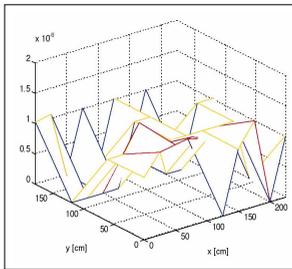


Fig. 7 - Interpolazione planare dei tempi di ritorno degli impulsi significativi al di fuori del recinto del teatro (quadrato C).

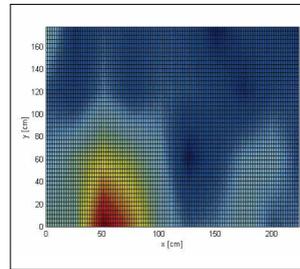


Fig. 8 - Taglio orizzontale in corrispondenza del tempo di ritorno di 15 ns al di fuori del recinto del teatro (quadrato C).

piuttosto che ad un oggetto sepolto. Per queste eliminazioni è stato scelto un livello di soglia pari al 50% dell'ampiezza del più alto fra i massimi registrati. Sono inoltre stati eliminati (anche nelle altre prospezioni mostrate nel seguito) i ritorni apparenti registrati nei primi 10 nanosecondi, dove abbiamo riscontrato (ALBERTI *et al.*, 2001) che l'accoppiamento diretto fra le antenne in trasmissione ed in ricezione può creare degli artefatti. Il risultato è mostrato in Fig. 4, dove si può apprezzare come in tutti e quattro i B-scan i ritorni significativi si siano avuti nell'ultima parte, ovvero sulla strada. Un'altra visualizzazione si può ottenere esaminando porzioni del sottosuolo corrispondenti ad un fissato tempo di ritorno (con buona approssimazione associabile ad una certa profondità). Il tempo fissato è stato di 15 ns, corrispondente mediamente al tempo del massimo degli impulsi di ritorno significativi (Fig. 4). La Fig. 5 è stata ottenuta interpolando linearmente i dati a disposizione. Si può ancora notare una maggiore importanza del segnale radar ricevuto in corrispondenza della strada. Altri profili orizzontali sono stati ricavati in corrispondenza di diversi tempi di ritorno (fino a 20 ns), e in tutti i casi i ritorni radar più significativi sono stati "dallo stesso lato". In Fig. 6, in particolare, è mostrato quello ottenuto in corrispondenza del tempo di ritorno di 12 ns. Un analogo scan è stato fatto in corrispondenza del quadrato B, dove si è analizzata "dall'altro lato" la strada sottostante. I risultati ottenuti sono confermativi delle deduzioni evincibili dal quadrato A, anche se non li riportiamo per brevità.

Infine mostriamo i risultati ottenuti relativamente al quadrato C di Fig. 1, che è in linea

con una supposta continuazione rettilinea della strada S, prolungata per ipotesi oltre il sentiero S1. Il numero di B-scan eseguiti è 4, distanziati di 60 cm fra loro, per ciascuno dei B-scan sono state eseguite 10 misure distanziate di 25 cm l'una rispetto all'altra. In Fig. 7 mostriamo l'interpolazione dei massimi significativi, ed in Fig. 8 mostriamo un profilo orizzontale alla profondità di 15 ns. Complessivamente, varie anomalie risultano presenti in Fig. 7, ma non si individuano alcune parti "privilegiate" rispetto alle altre. Si nota invece, dal profilo orizzontale di Fig. 8, una significativa risposta localizzata in basso a sinistra: questo fa pensare ad un oggetto fortemente riflettente, in quanto la risposta a 15 ns in quella zona è molto più intensa delle code degli impulsi con diverso punto di massimo. In effetti ci sembra verosimile che non siamo in presenza di una superficie orizzontale discontinua come appunto il basolato dal momento che la risposta dello strumento in questa zona è diversa da quella fornita nei quadrati A e B a ridosso della strada romana. Tuttavia il GPR sembra abbia comunque rilevato un'anomalia diffusa di forte intensità. La natura di questo oggetto potrà essere chiarita solo attraverso l'esecuzione di un saggio di scavo archeologico nel quadrato C.

CONCLUSIONI

In questo lavoro è stata illustrata una parte dei risultati ottenuti in una campagna di prospezioni GPR eseguita nell'area archeologica della città romana di Cales.

Lo strumento utilizzato per le prospezioni è stato un GPR *stepped frequency* costruito nel laboratorio del CO.RI.S.T.A., e la campagna è stata effettuata da ricercatori del CO.RI.S.T.A. in collaborazione con archeologi.

I risultati presentati sono l'atto conclusivo di un lavoro di studio, di progetto, di sintesi e di sperimentazione progressivamente sviluppato nell'ambito del progetto ARCHEO e descritto nei suoi vari stadi ed aspetti nei riferimenti forniti, in particolare nei lavori (ALBERTI *et al.*, 2000; FESTINESE, 2001; SIGNORE, 2001).

Dal momento che ARCHEO si è appena concluso, ci auguriamo che lo strumento possa essere ancora utilizzato, dietro autorizzazione del Ministero, per ulteriori prospezioni che siano da un lato di effettiva utilità alla ricerca archeologica (ma anche ad altri tipi di ricerca: si pensi ad esempio alla possibilità di analizzare stratificazioni poco profonde dovute a frane) e dall'altro servano come continua diagnosi dello strumento stesso, al fine di poterlo ulteriormente migliorare e perfezionare.

Alcuni possibili miglioramenti sono già stati individuati ed esposti nelle conclusioni di un precedente lavoro (ALBERTI *et al.*, 2001), e riguardano essenzialmente la maneggevolezza e la robustezza dello strumento.

RINGRAZIAMENTI

Vogliamo ringraziare il Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.) per aver consentito la realizzazione dello strumento.

Vogliamo poi sentitamente ringraziare la Soprintendenza ai Beni Archeologici di Napoli e Caserta, che ha consentito la sperimentazione del GPR a Cales.

BIBLIOGRAFIA

ALBERTI G., CIOFANIELLO L., DELLA NOCE M., ESPOSITO S., GALIERO G., PERSICO R., and VETRELLA S., 2000 – Advanced stepped frequency GPR development, Proc. of the Conference on Subsurface Sensing Technologies and Applications II, at SPIE's Annual Meeting in July/August 2000, San Diego, USA: 484-492.

- ALBERTI G., CIOFANIELLO L., DELLA NOCE M., ESPOSITO S., GALIERO G., PERSICO R., SACCHETTINO M., VETRELLA S., 2002 – A Stepped Frequency GPR System for Underground Prospecting. *Annals of Geophysics*, vol. 45, n. 2: 375-391.
- ALBERTI G., CIOFANIELLO L., GALIERO G., PERSICO R., SACCHETTINO M., VETRELLA S., 2001 – A stepped frequency GPR system working both in ungated and gated mode. *Proc. of Workshop “Radar a bassa frequenza”, Napoli (Italy), September 2001: 1-11.*
- DANIELS D. J., 1996 – *Surface-Penetrating Radar*, The Institution of Electrical Engineers, London: 142-190.
- DE CARO S., 2000 – L’attività della Soprintendenza Archeologica di Napoli e Caserta nel 1999, in *ACT XXXIX convegno di studi sulla Magna Grecia, Taranto, 1999: 617-643.*
- FESTINESE C., 2001 – ARCHEO-Apparecchiature e tecniche avanzate per il rilevamento ed il recupero delle zone archeologiche. In *Guermadi M. P. (a cura di): Rischio Archeologico: se lo conosci, lo eviti. Atti Convegno Cartografia Archeologica e Tutela del Territorio, Ferrara, 24-25 marzo 2000. IBC, Documenti 31, Firenze: 381-383.*
- FIORANI L., BORTONE M., MATTEI S., RUOCCHIO C., SALOMÉ A., VETRELLA S., 2000a – Miniaturized electro-optical sensors for archaeological prospecting, *Proc. of the Conference on Subsurface Sensing Technologies and Applications II, at SPIE’s Annual Meeting in July/August 2000, San Diego, USA: 442-446.*
- FIORANI L., BORTONE M., MATTEI S., RUOCCHIO C., SALOMÉ A., VETRELLA S., 2000b – Miniaturized laser range-finder for the volumetric characterization of underground cavities. *Proc. of the Conference on Subsurface Sensing Technologies and Applications II, at SPIE’s Annual Meeting in July/August 2000, San Diego, USA: 457-463.*
- GASPERETTI G., PASSARO C., DE CARO S., 1999 – Novità dal territorio degli Ausoni. In *Barra Bagnasco M., De Miro E., Pinzone A. (a cura di): Magna Grecia e Sicilia. Stato degli studi e prospettive di ricerca. Atti dell’Incontro di Studi. Messina 2-4 dicembre 1996, Di.Sc.A.M.: 145-158.*
- JOHANNOWSKY W., 1961 – Relazione preliminare sugli scavi di Cales, *Bollettino d’Arte*, s. IV, 46: 258-268.
- NOON D. A., 1996 – *Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Enhances Ground Penetrating Radar Performance. Ph.D. Thesis, Department of Electrical & Computer Engineering, University of Queensland, Australia: 59-87.*
- PERSICO R., ALBERTI G., ESPOSITO S., LEONE G., SOLDOVIERI F., 2000 – On multifrequency strategies of use of G.P.R. systems. *Proc. of the Conference on Image Reconstruction from Incomplete Data, at SPIE’s Annual Meeting in July/August 2000, San Diego, USA: 26-34.*
- ROBINSON L., WEIRAND W. B., YUNG L., 1974 – Location and Recognition of Discontinuities in Dielectric Media Using Synthetic RF Pulses, *Proc. IEEE*, vol. 62, (1): 36-44.
- SIGNORE G. M., 2001 – Progetto ARCHEO: Cales, un’applicazione. In: *Guermadi M. P. (a cura di) Rischio Archeologico: se lo conosci, lo eviti. Atti Convegno Cartografia Archeologica e Tutela del Territorio, Ferrara, 24-25 marzo 2000. IBC, Documenti 31, Firenze: 384-390.*
- STICKLEY G. F., NOON D. A., CHERNIAKOV M., LONGSTAFF I. D., 1999 – Gated stepped-frequency ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics*, vol. 43, n. 2: 259-269.

