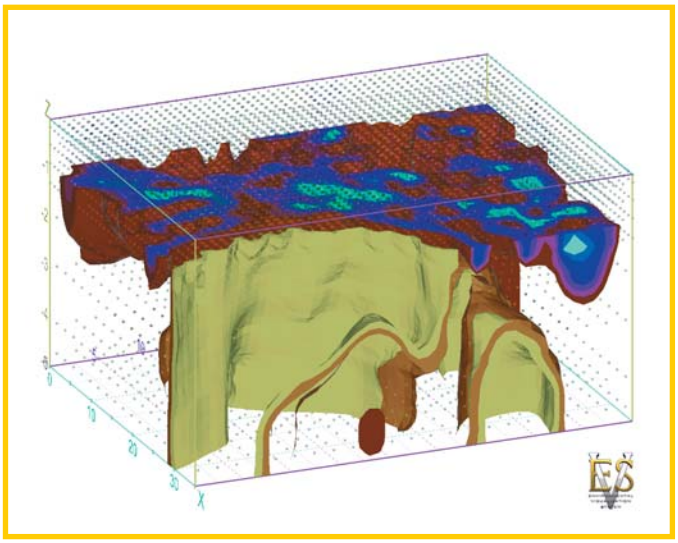
Museo Civico di Rovereto

Atti del Workshop in geofisica

Geologia e Geofisica applicate ai Beni Culturali

(In occasione dell'Anno Europeo del Patrimonio Culturale)

Rovereto (Trento), 6-7 dicembre 2018



Estratto

Mus. civ. Rovereto	Atti del Workshop in geofisica	6-7 dicembre 2018	3-21	2019

LORENZO CAPINERI, LUCA BOSSI, PIERLUIGI FALORNI [1], SERGEY IVASHOV, VLADIMIR RAZEVIG, ANDREY ZHURAVLEV [2] & TIMOTHY BECHTEL [3]

UTILIZZO DEL RADAR SUBSUPERFICIALE DI TIPO OLOGRAFICO PER L'INDAGINE NON DISTRUTTIVA DEI BENI CULTURALI E DEI MATERIALI PER L'INGEGNERIA

Abstract - Lorenzo Capineri, Luca Bossi, Pierluigi Falorni, Sergey Ivashov, Vladimir Razevig, Andrey Zhuravlev & Timothy bechtel - Use of the holographic subsurface radar for the non-destructive survey of cultural heritage and materials for engineering.

The use of holographic subsurface radar for non-destructive investigations for the cultural heritage, the engineering materials and a repertoire of paleontological samples: the technical characteristics of this type of radar are described, the peculiarities compared to other survey systems. Experimental methods for field investigations performed during the last decade are shown and then the most interesting cases are discussed.

Keywords: Radar - Subsurface - Holography - Diagnostics - Cultural heritage.

Riassunto - Lorenzo Capineri, Luca Bossi, Pierluigi Falorni, Sergey Ivashov, Vladimir Razevig, Andrey Zhuravlev & Timothy bechtel - Utilizzo del radar subsuperficiale di tipo olografico per l'indagine non distruttiva dei beni culturali e dei materiali per l'ingegneria.

Il radar subsuperficiale di tipo olografico per l'indagine non distruttiva applicato ai beni culturali, ai materiali per l'ingegneria e a reperti o campioni di interesse paleontologico: vengono descritte le caratteristiche tecniche di questo tipo di radar, le peculiarità rispetto ad altri sistemi di indagine, le

[1] *Lorenzo Capineri*, lorenzo.capineri@unifi.it; *Luca Bossi*, l.bossi@unifi.it; *Pierluigi Falorni*, pfalorni@gmail.com. Università di Firenze, DINFO (Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione), Via di S. Marta 3, 50139 Firenze (FI).

[2] *Sergey Ivashov*, sivashov@rslab.ru; *Andrey Zhuravlev*, azhuravlev@rslab.ru; *Vladimir Razevig*, vrazevig@rslab.ru. Remote Sensing Laboratory Bauman Moscow State Technical University Moscow, 2nd Baumanskaya st., 5, 105005, Moscow, Russia.

[3] *Timothy Bechtel*, timothy.bechtel@fandm.edu. Department of Earth & Environment, Franklin & Marshall College, 17603-3003, Lancaster, PA, USA.

potenzialità di applicazione su beni culturali e per diagnostica su materiali per l'ingegneria. Vengono mostrate diverse applicazioni dove la metodica può essere applicata con successo.
Parole chiave: Radar - Subsuperficiale - Olografia - Diagnostica - Beni culturali.

Comparazione tra il radar penetrante ad impulsi e il radar olografico

I due tipi di radar sono caratterizzati da principi di funzionamento diversi e questo ne influenza le caratteristiche e le potenziali applicazioni. In Fig. 1 è riportato lo schema di principio relativo al funzionamento di entrambi i dispositivi. Il radar GPR ad impulsi trasmette un segnale elettromagnetico discontinuo nel tempo: gli impulsi vengono riflessi dalle discontinuità elettromagnetiche e ricevuti come eco dopo un certo intervallo temporale proporzionale alla distanza tra l'antenna radar e il riflettore. È utilizzabile per indagini ad una profondità superiore alla durata equivalente nel mezzo dell'impulso generato. Da un punto di vista tecnologico ridurre la durata dell'impulso significa poter indagare con elevata risoluzione assiale discontinuità di impedenza elettrica presenti a bassa profondità (5-20 cm), ma questo impone costi maggiori dell'elettronica e una emissione di impulsi elettromagnetici a banda larga. Inoltre, l'interferenza fra l'impulso trasmesso e quello ricevuto richiede la configurazione bi-statica delle antenne trasmittenti e riceventi, a scapito della compattezza e leggerezza dell'apparato di misura. La risoluzione laterale dipende dalla lunghezza d'onda del segnale elettromagnetico ed è, in generale, non elevata.

Il radar di tipo olografico emette un'onda elettromagnetica continua nel tempo, la frequenza è singola (CW - Continuous Wave) oppure variabile a gradino (SF - Step Frequency).

Questo tipo di radar è in grado di registrare un ologramma, un'immagine bidimensionale che rappresenta la figura di interferenza. L'ologramma si ottiene mediante l'interazione tra un'onda, utilizzata come riferimento, con caratteristiche di coerenza spaziale e temporale e la riflessione data dall'oggetto illuminato con la radiazione di riferimento. Una delle caratteristiche del dato fornito dal radar olografico è che anche senza elaborazione, permette una visualizzazione delle discontinuità (forma e dimensioni) presenti nel mezzo direttamente rappresentando il segnale di uscita in ampiezza su una mappa di coordinate spaziali relative alle posizioni occupate dall'antenna durante gli istanti di campionamento (Daniels, 2004). Inoltre, mediante elaborazione, l'ologramma consente, se illuminato con una radiazione equivalente a quella utilizzata come riferimento durante la registrazione, di riprodurre l'immagine dell'oggetto riflettente che ha permesso la generazione dell'ologramma stesso. Questo processo può essere ottenuto attraverso una simulazione al calcolatore che permette di visualizzare l'immagine focalizzata su un piano parallelo al piano dell'ologramma ad una data distanza da esso. In Fig. 2 vengono mostrate, a titolo di esempio, la registrazione e la ricostruzione dell'immagine di un oggetto sferico con il principio dell'olografia.

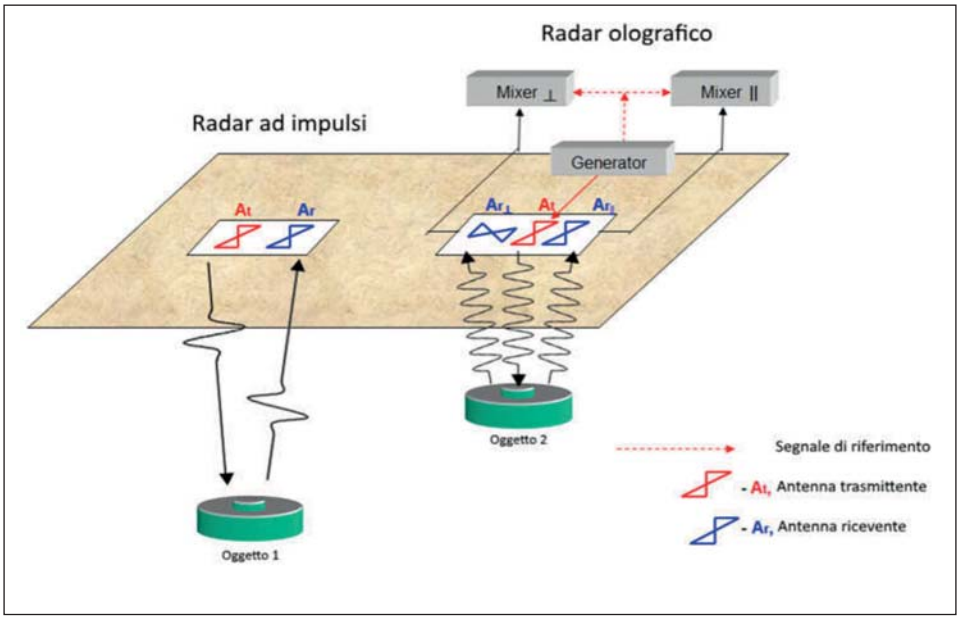


Fig. 1 - Modello di funzionamento del radar penetrante ad impulsi (a sinistra) e del radar di tipo olografico ad onda continua (a destra).

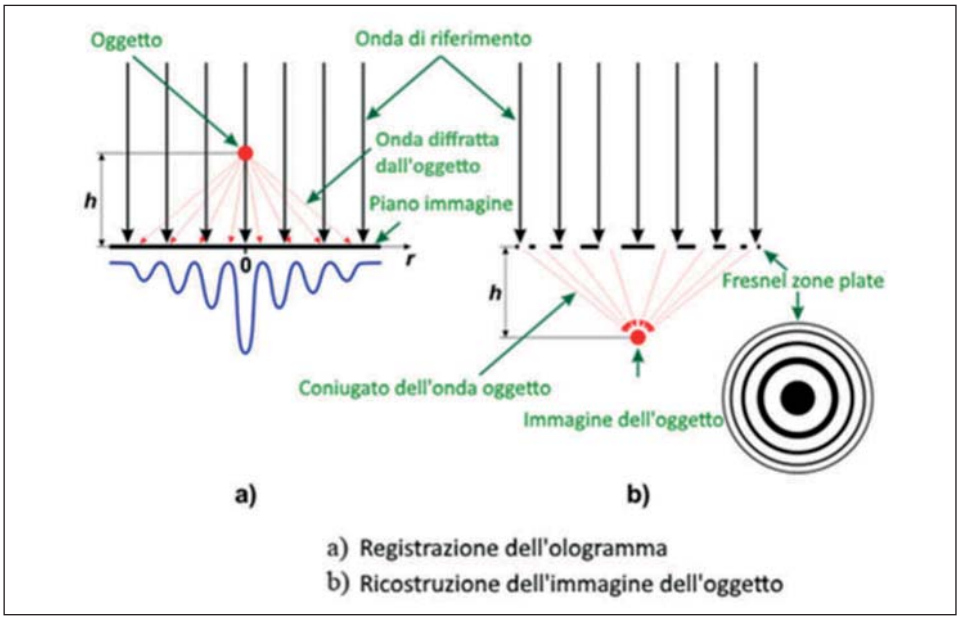


Fig. 2 - Schema del principio di registrazione dell'ologramma di un oggetto sferico e di ricostruzione dell'immagine.

Le prestazioni del radar olografico variano in relazione alla lunghezza d'onda del segnale tramesso e al tipo di mezzo indagato, essendo un radar ad onda continua (CW). A titolo di esempio, considerando il prodotto commerciale Rascan®, si ha una profondità di penetrazione che può andare, in un mezzo favorevole alla propagazione, da 35 cm (con frequenza 2 GHz) a 15 cm con frequenza 7 GHz, garantendo una risoluzione laterale e quindi una risoluzione di immagine di 4 cm nel caso del 2 GHz, che scende a 1,5 cm con il radar a 7 GHz. (Tab. 1).

		RASCAN-4/2000	RASCAN-5/4000	RASCAN-5/7000
Frequency band, GHz		1.6 – 2.0	3.6 – 4.0	6.4 – 6.8
Number of frequencies		5		
RF output, W		$6 \cdot 10^{-3}$ (*)		
Sensitivity, W		10^{-9}		
Resolution in the plane of sounding at shallow depths, cm		4	2	1.5
Maximum sounding depth (depends on medium properties), cm		35	20	15
Dimensions, mm	Antenna	160 × 310 × 210 handle length – 1030	95 × 148 × 119	
	Control unit	157 × 63 × 200		
	In package	570 × 230 × 390	380 × 460 × 130	
Weight, kg	Antenna	w/o handle – 2.0 with handle – 2.5	0.6	
	Control unit	0.7		
	In package	9	5.5	

Tab. 1 - Comparazione delle caratteristiche dei radar commerciali della famiglia Rascan®.

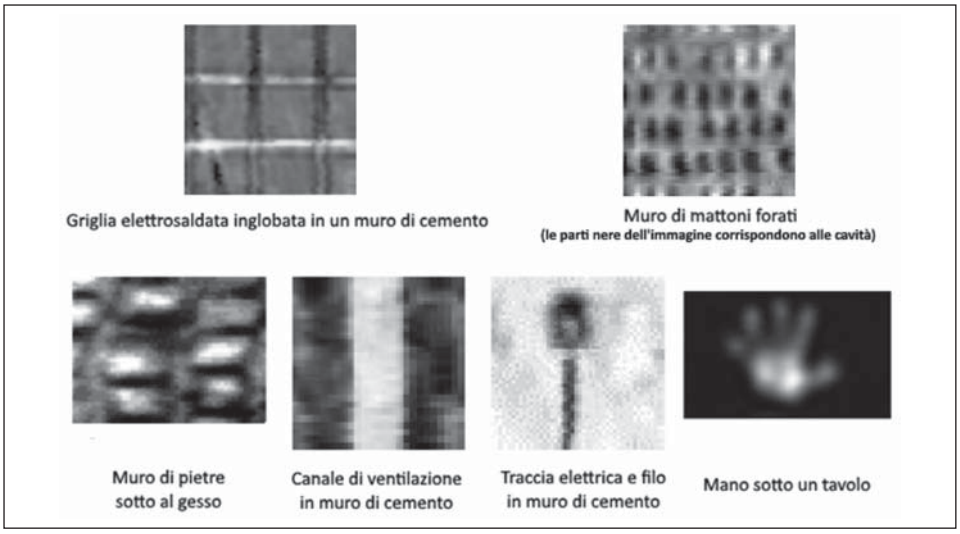


Fig. 3 - Esempi di scansione con radar olografico a 4 GHz.

La risoluzione elevata consente indagini dettagliate sia per discontinuità dielettriche nelle strutture dei materiali, come ad esempio delle fessurazioni, sia per analisi dei primi strati di suolo, pavimenti o elementi in muratura, come mostrato in Fig. 3 (Bechtel, Capineri, Ivashov, Razevig, Vasiliev & Zhuravlev, 2011). Si osserva inoltre che nella stessa antenna a cavità cilindrica risonante, sono state realizzate due antenne riceventi in polarizzazione parallela $A_R||$ e perpendicolare $A_R\perp$ (vedi Fig. 1). Questa caratteristica risulta particolarmente importante per la realizzazione di immagine a microonde di oggetti di forma allungata (es. barre di rinforzo in cemento armato etc.). Le due immagini sono acquisite e visualizzate contemporaneamente e quindi direttamente confrontabili.

Esempi applicativi del radar olografico con scansione manuale (piani, pavimenti, legno)

I. Ispezione nella chiesa di San Biagio nei pressi di Siena

La Chiesa di S. Biagio fu costruita nei pressi della città di Siena da Antonio da Sangallo nel corso del XV secolo. Il team internazionale di scienziati italiani, americani e russi ha effettuato un'ispezione del pavimento nella Chiesa di S. Biagio. Scopo di questo esperimento era cercare cavità nascoste sotto il pavimento usando GPR commerciali - RASCAN e GSSI radar.

La ricerca di cavità nascoste sotto il pavimento Fig. 4 (Ivashov *et al.*, 2011) è stata fatta con particolare riferimento ad un medaglione in marmo. Era utile determinare la presenza della cavità e di un eventuale contenuto.

Fig. 4 - Chiesa di San Biagio, Siena (sinistra); scansione di un medaglione marmoreo (destra).

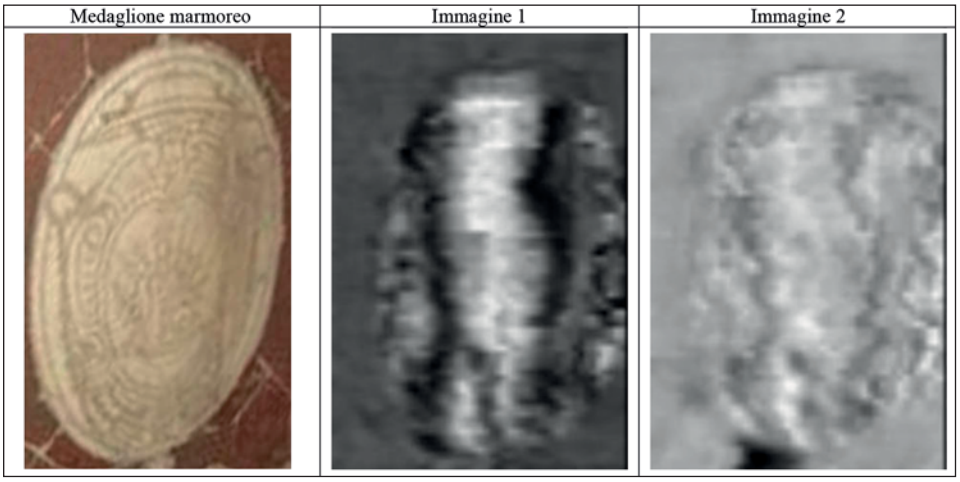


Fig. 5 - Scansione con Rascan a 4 GHz nella chiesa di San Biagio.

In Fig. 5 sono mostrati i risultati della scansione manuale. I dati del radar olografico sono disponibili come due immagini che si riferiscono a due polarizzazioni diverse dell'antenna ricevente. Il radar utilizzato è il Rascan® a 4 GHz e la scansione viene condotta a mano, utilizzando una griglia disegnata su cartone per avere un riferimento spaziale per le coordinate dell'immagine.

Nelle scansioni con radar olografico sono visibili due elementi laterali (più scuri nelle immagini in bianco e nero) all'interno della superficie del medaglione. Da notare che la scansione manuale permette una buona ricostruzione dell'immagine ma con sensibili disallineamenti di riga.

II. Confronto tra immagine termica e scansione olografica

Questo esempio di scansione mostra il confronto tra un'immagine termica di due mattoni posti sotto una lastra di pietra e una scansione con radar olografico a 4 GHz (Fig. 6).

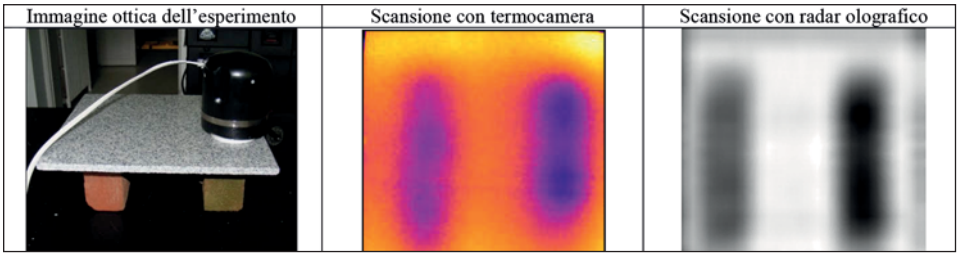


Fig. 6 - Confronto tra immagine ottenuta con radar olografico e termocamera di materiale laterizio dietro lastra di granito.

Le immagini termiche sono comunemente utilizzate per l'analisi nell'edilizia, ad esempio per determinare strutture di sostegno celate alla vista di materiale non omogeneo con quello visibile, oppure aperture murarie preesistenti chiuse in epoche successive. Infatti, grazie alla diversa conducibilità e capacità termica dei materiali (es. pietra, mattoni, legno, ecc.) è possibile evidenziare con una termocamera il contrasto termico che si viene a creare tra di essi. Nell'esperimento condotto in laboratorio il contrasto termico è stato generato ponendo i mattoni in frigorifero e scaldando la lastra di pietra per realizzare una termografia dinamica con gradiente di temperatura. L'immagine termica ottenuta presenta una dinamica di 2,6°C.

Il radar olografico (immagine a sinistra nella Fig. 6), permette di ottenere un'immagine di contrasto confrontabile o migliore in termini di risoluzione pur non richiedendo nessun tipo di contrasto termico. Di contro l'acquisizione manuale con l'antenna olografica richiede un tempo di preparazione e scansione molto maggiore della termocamera. Il limite delle acquisizioni manuali con strumenti prossimi alla superficie vale per molte tecniche di indagine non distruttiva (ad esempio ultrasuoni, GPR).

III. Rivelazione di spaccature in lastre di marmo

Viene mostrata la scansione di lastre di marmo al fine di individuare spaccature. Anche in questo esperimento il confronto è con uno dei metodi comunemente utilizzato, ovvero la termografia (al centro della Fig. 7).

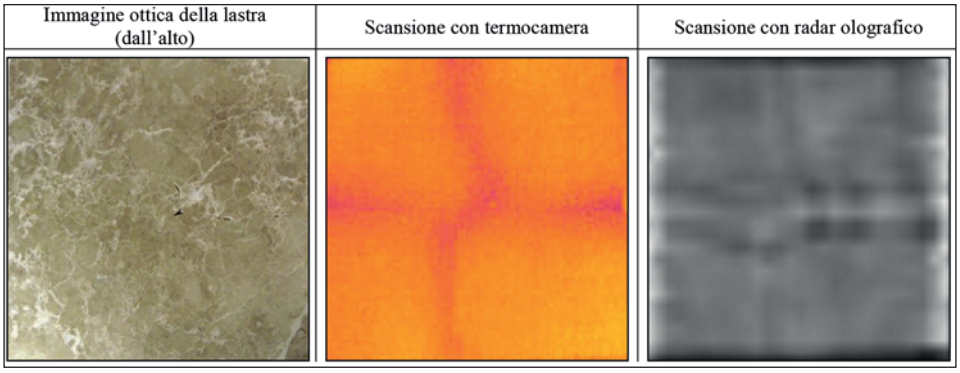


Fig. 7 - Scansione con termocamera (al centro) e con radar olografico (a destra) di una lastra di marmo con fessurazioni verticali e orizzontali.

Anche in questo caso, l'immagine olografica a 4 GHz consente la visualizzazione delle fessurazioni. In base all'orientamento delle fessurazioni, l'immagine olografica in polarizzazione parallela o perpendicolare può esaltare maggiormente il contrasto. Nell'esempio riportato la fessurazione orizzontale ha un contrasto maggiore di quella verticale.

IV. Ispezione materiale ligneo

Sia per l'indagine su beni culturali sia per le strutture recenti di ingegneria civile, il materiale ligneo è oggetto di grande interesse: vari meccanismi di danneggiamento possono degradare il legno come umidità o insetti xilofagi (Becthel, Capineri, Falorni, Ivashov, Razevig & Zhuravlev, 2016), (Capineri, Falorni, Frosinini, Mannucci, Macchioni, Olmi, Palanti, Penoni, Pieri, Priori, Riminesi, Santacesaria & Todaro, 2012). Il campione è composto da tre tavole di pino secco con danni interni da termiti che hanno scavato canali dalle fessurazioni sui bordi, in particolare sul lato verticale destro delle tavole. Anche in questo esperimento, le scansioni olografiche sono confrontate con immagini termografiche. Le anomalie rilevate dal RASCAN (al centro) e termiche (in basso) nella Fig. 8, mostrano una straordinaria coincidenza e confermano che il danno che è visibile sui bordi si estende nelle assi. Le tavole e le immagini hanno una larghezza di 25 cm, lunghezza variabile. Le immagini termiche hanno una dinamica di 3,9 °C.

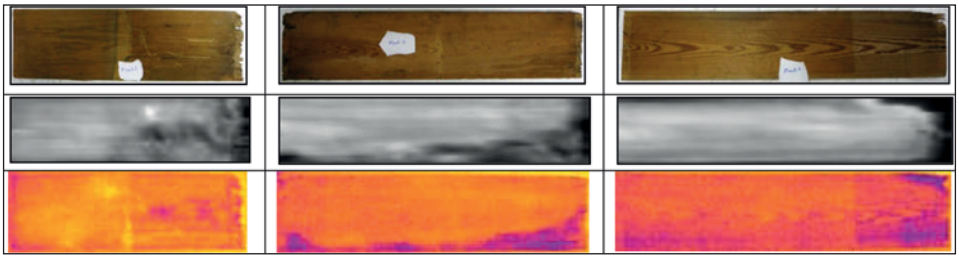


Fig. 8 - Confronto tra scansione olografica e immagine termica per una tavola di legno attaccata da insetti xilofagi. Immagine ottica (in alto), immagine olografica (al centro), immagine termica (sotto).

V. Lo studio sul crocifisso ligneo di S. Marco - Firenze

La Croce di San Marco risale alla metà del XIV secolo ed è attribuita a Puccio di Simone. L'opera può essere considerata una delle più grandi della pittura fiorentina: raggiunge un'altezza totale di 6,30 metri. L'asse è costituito da una parte verticale e una parte orizzontale, il braccio, uniti da una giuntura tra il legno. Lo spessore delle tavole di pioppo è di 7 cm e l'intero supporto, comprese le traverse, raggiunge uno spessore di circa 25 cm per un peso totale stimato in circa 500 kg.

Per questa prima fase di misurazioni è stato deciso di esaminare tre zone che coprono le aree dell'infrastruttura di supporto e l'area dell'inserto in rilievo per l'aureola. La croce è stata protetta con un panno soffice (in verde nella Fig. 9) con sovrapposto un foglio sottile di plexiglass dotato di linee di scansione numerate per avere un riferimento spaziale durante la scansione. Dove si è reso necessario, la lamina di plexiglass è stata bloccata con una morsa.

Fig. 9 - Crocifisso ligneo di S. Marco con indicata (in giallo) l'area scansionata (sinistra). Crocifisso durante l'acquisizione dei dati (destra).

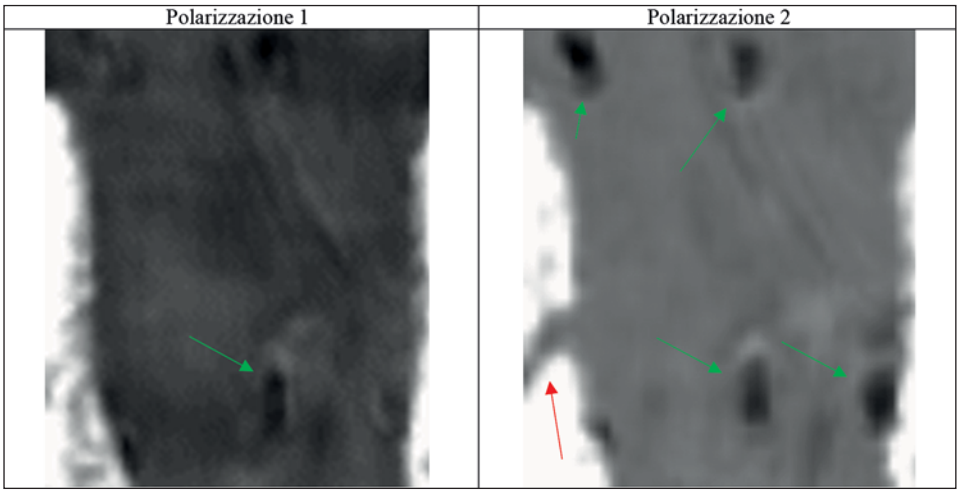


Fig. 10 - Scansioni olografiche su crocifisso di S. Marco con antenna a differenti polarizzazioni.

In Fig. 10 sono visibili le scansioni con differenti polarizzazioni dell'antenna. Da notare i nodi del legno (freccia verde) e, nella figura a destra, una parte del sangue che sgorga dal costato del Cristo dipinto sulla croce (freccia rossa). Si ipotizza che il radar rilevi con grande accuratezza questo pigmento perché la tinta contiene un alto tenore di metallo, oppure sotto alla vernice è presente una lamina metallica per dare risalto alla vernice stessa.

VI. Analisi condotta su pavimentazione del "Senate Building" in San Pietroburgo

A San Pietroburgo, il famoso edificio del Senato, costruito dall'architetto italiano Carlo di Giovanni Rossi nel 1829-1834, era in fase di ricostruzione e doveva essere

posato il parquet. Tubi di riscaldamento, elettricità e cavi di comunicazione sono stati posizionati sotto il pavimento dell'edificio. Tuttavia, come molte volte accade in edifici di interesse storico, la loro posizione non era stata documentata. La modalità di posa del pavimento in legno, formato da lastre di compensato, prevede il fissaggio al substrato di cemento. Questo non poteva essere fatto per paura di danneggiare i

Fig. 11 - Operazioni di scansione manuale con radar olografico a 2GHz (sinistra e centro), pozzetti di derivazione (destra).

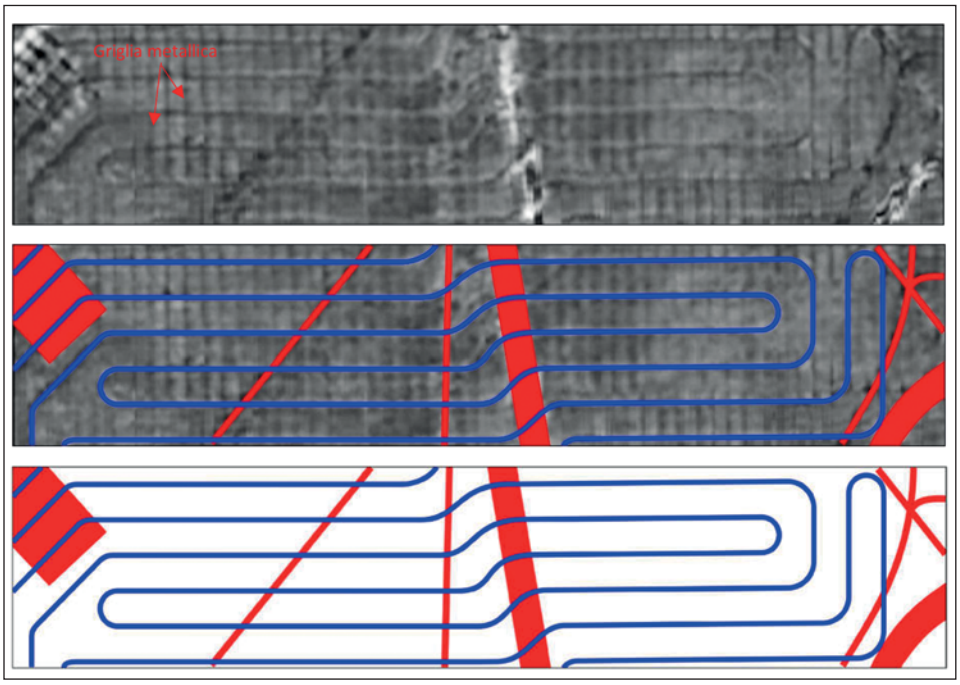


Fig. 12 - Porzione di pavimento sottoposta ad analisi. Le dimensioni dell'area sono 1.7 x 8.0 m. Scansione con radar Rascan a 2GHz. Le tubature sono fissate ad una griglia metallica di dimensioni 150 mm x 150 mm e profonde 30/50 mm. Immagine radar (in alto). Mappa della posizione dei tubi e delle condutture elettriche sovrapposta all'immagine radar (al centro). Rappresentazione delle strutture interne al pavimento (sotto).

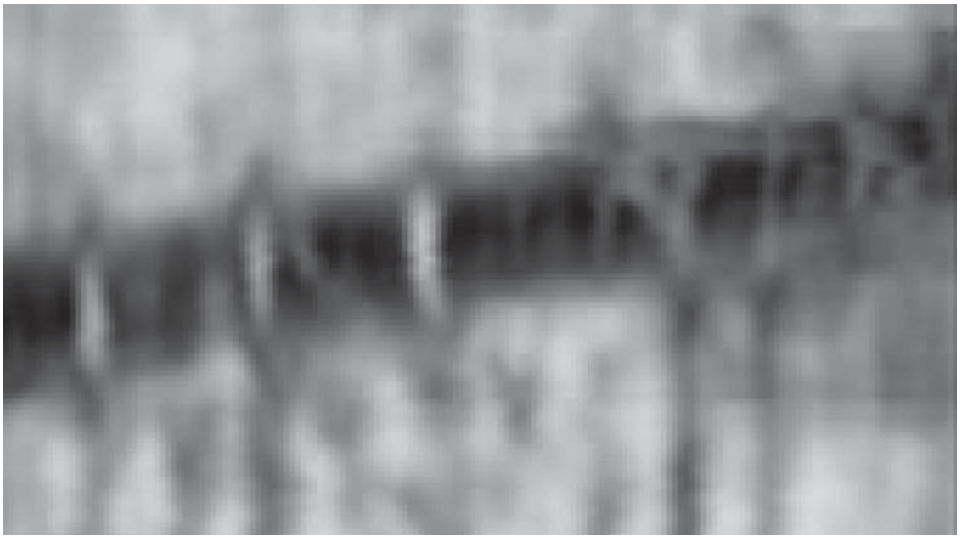


Fig. 13 - Particolare del pavimento con visibile la curvatura dei tubi idraulici passanti sopra una forassite elettrica.

tubi e altre condotte. Al nostro laboratorio è stato chiesto di effettuare la ricerca della posizione dei tubi e delle linee della rete elettrica e di comunicazione.

Data la profondità del pavimento, si è utilizzato il radar Rascan 4/2000 a 2GHz. In Fig. 11 alcune immagini fotografiche dell'attività di scansione.

Grazie alle scansioni con radar olografico è stato possibile creare una mappa dettagliata dei percorsi delle condutture sepolte nel cemento (Fig. 12).

Un aspetto rilevante delle immagini prodotte dal radar olografico è la possibilità di percepire, semplicemente con l'osservazione, la profondità degli elementi scansionati. In Fig. 13 è riportato uno zoom di una porzione della scansione mostrata in Fig. 12, dove è visibile la curvatura dei condotti del riscaldamento (elementi in verticale) che si sovrappongono ad una conduttura elettrica (la linea scura in orizzontale).

Scansione automatizzata di materiali per l'ingegneria (schiume, plastiche, compositi)

Nel normale impiego il radar olografico consente l'utilizzo manuale. Il dispositivo viene mosso sulla superficie dell'oggetto avvalendosi, eventualmente, di una griglia disegnata su un materiale trasparente alle onde elettromagnetiche che funge da riferimento (cartone o tappeto di gomma o plexiglas sottile).

Tuttavia, un leggero disallineamento è inevitabile in fase di costruzione dell'immagine radar. Ci sono campi d'impiego di questo tipo di dispositivi in cui il disal-

lineamento può essere inaccettabile o fuorviante nella successiva analisi dei dati. Per questa ragione, nel corso del tempo, si è resa necessaria la progettazione di un sistema di scansione automatizzato, in cui il movimento del radar (oppure, simmetricamente, dell'oggetto), viene fatto mediante un sistema di movimentazione meccanica. Questa esigenza diviene ancora più importante incrementando la frequenza operativa e quindi una lunghezza d'onda che diminuisce fino ad essere comparabile all'entità del disallineamento della scansione con il radar (tipicamente alcuni mm per un operatore addestrato).

Un primo sistema di scansione meccanizzata è visibile in Fig. 14. È stata applicata una speciale configurazione sperimentale che consente il campionamento a punti programmabili arbitrari, e il test di vari parametri di scansione e radiazione (Chizh, Ivashov, Razevig & Zhuravlev, 2016). Tutto il processo di acquisizione dei dati avviene in modalità automatica. In questo sistema un'antenna olografica ad alta frequenza (>7GHz) è utilizzata per la diagnostica di materiali a bassa costante dielettrica e bassa attenuazione.

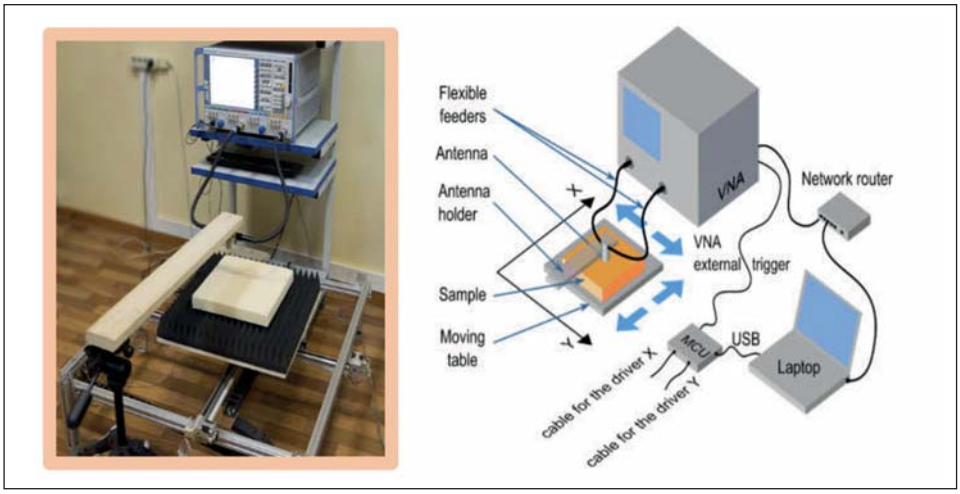


Fig. 14 - Sistema di scansione automatico.

I. Scansione di materiale composito

Per la diagnostica di materiali compositi, le frequenze utilizzate sono più alte: 22-26 GHz. Per la scansione è stata sviluppata un apposito sistema (Fig. 15).

In Fig. 16 è mostrata la scansione olografica di un materiale composito costituito da una struttura in poliuretano sovrapposta ad una lamina di alluminio. Si può osservare la linea di saldatura di due parti di alluminio con il relativo materiale di apporto. L'immagine olografica permette di distinguere con chiarezza le tre cavità

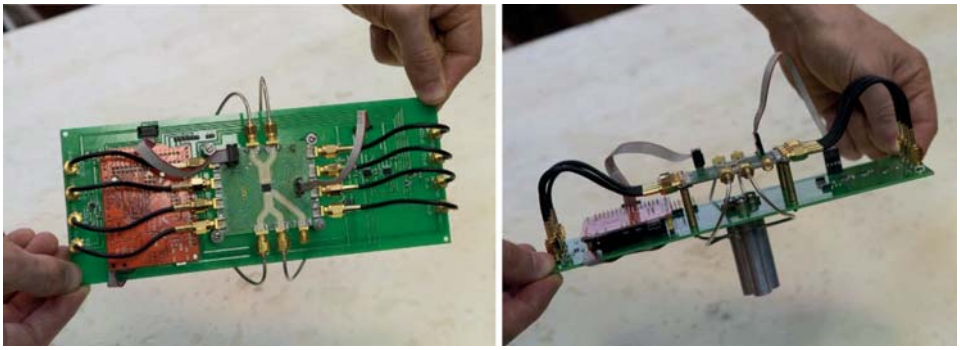


Fig. 15 - Radar olografico con banda 22-26 GHz per diagnostica di materiali compositi.

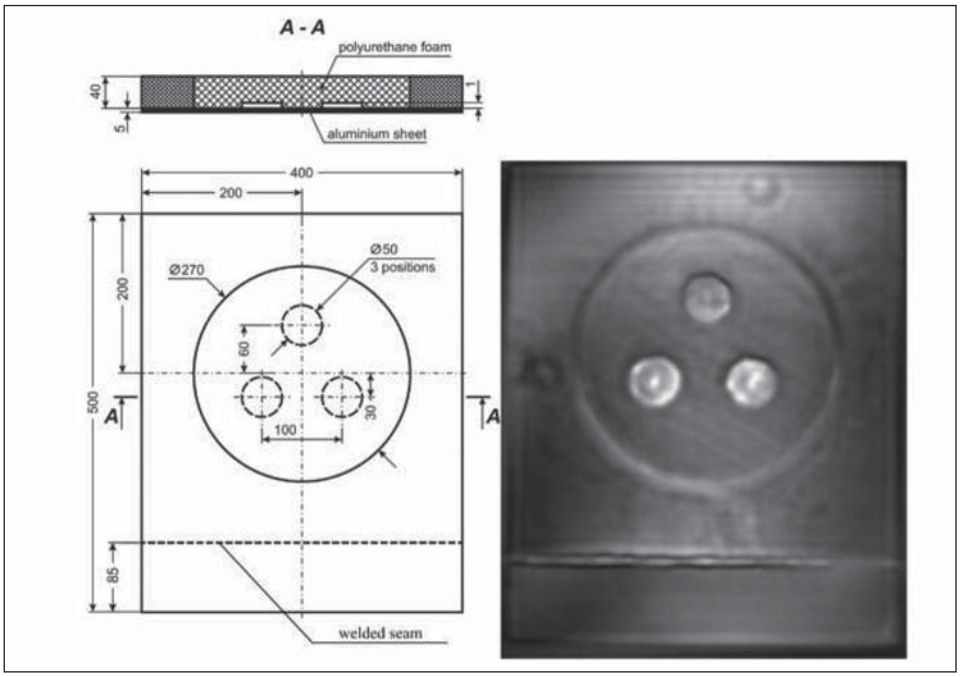


Fig. 16 - Struttura in materiale composito. Disegno tecnico (a sinistra) e immagine olografica (a destra).

circolari ricavate all'interno del poliuretano e non visibili dall'esterno (Bechtel, Binu, Capineri, Chizh, Ivashov, Razevig & Zhuravlev, 2018). La qualità molto alta dell'immagine può essere paragonata ad una immagine a raggi X, considerando che quest'ultima è più complessa e costosa per essere utilizzata sul campo, anche per problemi di sicurezza per la salute dell'operatore.

Scansione di impronte di dinosauro

Nella Fig. 17 è presenta una scansione effettuata su un calco e relativa gettata in gesso su un'impronta di dinosauro (var. *Anamoepus* dal Dinosaur State Park nel Connecticut, USA). Questo tipo di applicazione mostra come il radar olografico sia utilizzabile anche con campioni delicati, la cui superficie irregolare non permette acquisizioni a contatto dell'antenna.

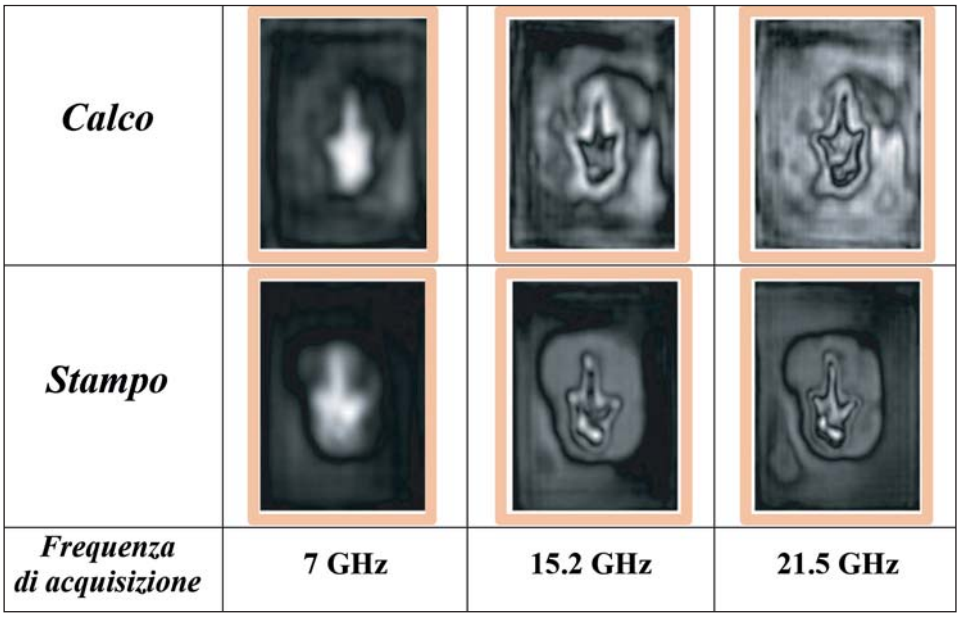


Fig. 17 - Scansioni a più frequenze di un calco di impronta di dinosauro.

Il calco ha dimensioni di 255 mm x 255 mm con altezza di 27 mm. L'impronta ha una dimensione di circa 110 mm x 75 mm.

L'esperimento è stato condotto acquisendo immagini olografiche a frequenze diverse: 7 GHz, 15.2 GHz, 21.5 GHz. L'antenna è stata posta a 25 mm dalla superficie del campione (Bechtel, Capineri, Inagaki, Ivashov, Razevig, Windsor C. & Zandonai F., 2013).

Sistemi di scansione semi-autonomi basati su piattaforme robotizzate

Nella prospettiva di ottenere scansioni ad alta risoluzione e alta qualità di acquisizione, sono stati messi a punto alcuni sistemi di scansione robotizzata (es. Fig. 18, Fig. 19) per applicazioni mobili, ovvero laddove non è possibile utiliz-

Fig. 18 - Prima versione prototipale di sistema robotizzato per acquisizione olografica del suolo controllato in remoto.

Fig. 19 - Sperimentazione dello scanner robotico per ricerca nel campo paleontologico al "Parco dei Lavini di Marco" (Rovereto, TN), (Museo Civico Rovereto).

zare la strumentazione di scansione da laboratorio, sia per condizioni ambientali difficili, sia per l'estensione dell'area scansionata (Arezzini, Bechtel, Calzolai, Capineri, Inagaki, Ivashov &Windsor, 2013). Un'area applicativa in tal senso è quella della scansione del suolo per individuare oggetti sepolti in prossimità della superficie (ad esempio le mine antiuomo) oppure per scansioni di aree di interesse paleontologico.

L'impiego di un sistema robotizzato consente anche di integrare più sensori (accelerometri, inclinometri, GPS, giroscopi, ecc.) al fine di ottenere una miglior comprensione del dato olografico e del contesto ambientale in cui la scansione viene effettuata.

Il sistema robotizzato di seconda generazione consente il controllo da remoto, l'interconnessione mediante rete Internet e l'acquisizione della zona scansionata anche da uno scanner tridimensionale con tecnologia Photonic Mixed Device (PMD).

Scansione di lastre in calcare con inclusioni presso il Museo Civico di Rovereto

Sono stati condotti esperimenti di scansione olografica su lastre di calcare con inclusioni fossili in possesso dell'archivio del Museo Civico di Rovereto.

La scansione è stata fatta con antenna a 4 GHz con sistema robotizzato (Fig. 20). Lo studio era rivolto ad individuare inclusioni anche laddove non visibili ad occhio nudo e la distribuzione all'interno della lastra di cui è visibile la sezione di un osso sulla superficie di taglio.

Fig. 20 - Scansione lastre in calcare con inclusioni fossili (cerchiato in rosso).

In Fig. 21 è visibile la scansione della lastra con il radar olografico. L'inclusione risulta visibile nell'immagine al centro (polarizzazione 2) mentre nell'immagine a sinistra (polarizzazione 1) si nota come con una polarizzazione d'antenna perpendicolare è visibile una traccia, corrispondente all'inclusione ma celata alla vista, che si estende all'interno della lastra (area cerchiata in rosso).

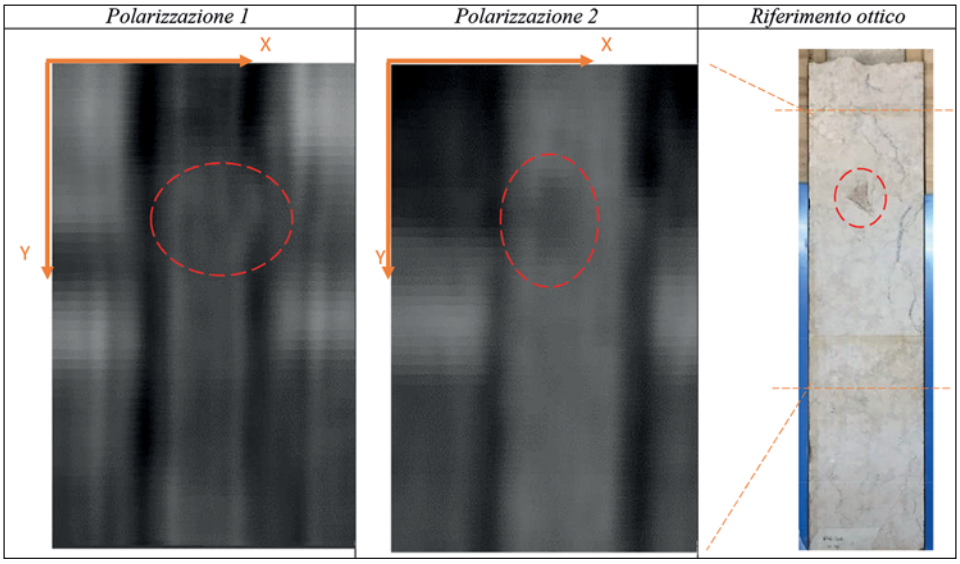


Fig. 21 - Scansione di una inclusione fossile in lastra di roccia carbonatica (Radar olografico 4 GHz).

Conclusioni

La tecnologia del radar olografico è stata sviluppata e sperimentata dagli anni 2000 per diversi ambiti applicativi con lo scopo primario di rendere le immagini facilmente interpretabili dall'utilizzatore. Gli ambiti applicativi di riferimento in questo lavoro sono le indagini dei materiali di interesse per l'ingegneria e i beni culturali. A fronte di questa grande esperienza svolta da diversi gruppi di ricerca internazionali e utilizzatori finali (professionisti, enti di ricerca, aziende) in tutto il mondo, possiamo dire che vi sono alcune applicazioni che hanno successo grazie alle caratteristiche uniche dell'olografia a microonde.

Oltre alla semplicità di utilizzo e ai costi contenuti dell'apparato, l'indagine con radar olografico offre l'opportunità di registrare immagini ad alta risoluzione (circa $\lambda/4$) delle strutture interne degli oggetti o materiali, mediante la scansione su un lato. In questa qualità i radar olografici differiscono dai dispositivi a raggi X che operano in trasmissione e quindi richiedono un accesso a due lati alla struttura in esame. Si deve anche notare che l'accesso con strumentazione su due lati è impossibile nella maggior parte dei casi di interesse per le indagini sul patrimonio culturale.

Selezionando la frequenza operativa corretta diversi materiali (cemento, gesso, mattoni, legno, rocce, suolo naturale) di interesse per il patrimonio culturale possono essere studiati ma anche materie plastiche, schiume e materiali compositi. Sono stati costruiti scanner e antenne che operano a varie frequenze (2 GHz, 4 GHz, 7 GHz, 18 GHz, 22,26 GHz). La sperimentazione più recente con antenne olografiche

montate su scanner meccanici ha garantito un'elevata risoluzione di campionamento spaziale con grande dettaglio nella ricostruzione di forme e dimensioni. Infine si è sviluppato un primo prototipo di scanner robotizzato controllato a distanza in modo da aumentare la produttività per scansioni di grandi aree e diminuire gli errori del campionamento spaziale che risultano limitanti per le scansioni manuali con radar olografici ad alta frequenza. Inoltre, con il controllo remoto e l'accessibilità dei dati in tempo reale, l'operatore lavora in sicurezza quando la scansione viene effettuata in condizioni ambientali ostili (es. temperature estreme, luoghi con accessibilità limitata, etc.).

Bibliografia

Bechtel T., Capineri L., Inagaki L., Ivashov S., Razevig V., Windsor C. & Zandonai F., 2013 - RASCAN holographic radar for detecting and characterizing dinosaur tracks, *IEEE 7th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*, Nantes (France), pp. 1-6.

Chizh M., Ivashov S.I., A., Razevig V.V. & Zhuravlev A.V., 2016 - Experimental validation of sparse sensing technique in subsurface microwave holography, *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, Shanghai (China), pp. 1734-1738.

Bechtel T. D., Capineri L., Ivashov S.I., Razevig V. V., Vasiliev I. A. & Zhuravlev A. V., 2011 - Holographic Subsurface Radar of RASCAN Type: Development and Applications, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(4), pp. 763-778.

Bechtel T., Binu T., Capineri L., Chizh M., Ivashov S., Razevig V. & Zhuravlev A., 2018 - Frequency Influence in Microwave Subsurface Holography for Composite Materials Testing, 1*7th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, Rapperswil (Switzerland), pp. 1-4.

Arezzini I., Bechtel T., Calzolai M., Capineri L., Inagaki M., Ivashov S. & Windsor C., 2013 - High resolution imaging with a holographic radar mounted on a robotic scanner, *Progress in Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2013 Stockholm*, ISBN:9781934142264, pp. 1583-1585.

Daniels D.J., 2004 -Ground Penetrating Radar 2nd edition, *ed. Institution of Electrical Engineers* - University of Michigan.

Becthel T., Capineri L., Falorni P., Ivashov S., Razevig V. & Zhuravlev A., 2016 - Water detection in thermal insulating materials by high resolution imaging with holographic radar, *ISEMA 2016*, Edirfir - Edizioni Firenze, ISBN:978-88-7970-800-5, pp. 507-513.

Capineri L., Falorni P., Frosinini C., Mannucci M., Macchioni N., Olmi R., Palanti S., Penoni S., Pieri S., Priori S., Riminesi C., Santacesaria A. & Todaro C., 2012 - Riflettometria a microonde per la diagnostica non distruttiva nel settore dei beni culturali, *Museo Civico Rovereto, Rovereto Dicembre 2011*, Edizioni Osiride, ISBN:9788874981793, pp. 3-12.

Capineri L. Falorni P., Frosinini C., Macchioni N., Mannucci M., Olmi R., Palanti S., Penoni S., Pieri S., Priori S., Riminesi C., Santacesaria A. & Todaro C., 2012 - Microwave Reflectometry for the Diagnostic of Cultural Heritage Assets, *PIERS 2012 Kuala Lumpur*, ISBN:9781934142202, pp. 778-781.