

ASPETTI TEORICI E SPERIMENTALI PER UNA ACCURATA VALUTAZIONE DELLA COSTANTE DIELETTRICA MEDIANTE TECNICA TDR

Alessandro Galli ⁽¹⁾, Elena Pettinelli ⁽²⁾, Annamaria Cereti ⁽²⁾ e Francesco Bella ⁽²⁾

⁽¹⁾ Università “La Sapienza” di Roma, Dipartimento di Ingegneria Elettronica;
Via Eudossiana 18, 00184 Roma.

galli@die.uniroma1.it

⁽²⁾ Università “Roma Tre”, Dipartimento di Fisica “E. Amaldi”;
Via della Vasca Navale 84, 00146 Roma.

Abstract

In this work, theoretical and experimental investigations have been carried out on the main factors that affect the accurate evaluation of dielectric properties using Time Domain Reflectometry (TDR). Dielectric-constant measurements have been performed under different experimental conditions for various types of materials having a wide range of permittivity values. Interpretation of the results on the basis of transmission-line theory emphasizes the importance of a suitable calibration procedure that takes into account various critical aspects in order to significantly improve the reliability of the TDR technique for permittivity measurements.

CONSIDERAZIONI INTRODUTTIVE

Tra le diverse applicazioni della tecnica TDR (Time Domain Reflectometry), un rilievo specifico è stato assunto negli ultimi decenni dalla caratterizzazione delle proprietà elettromagnetiche dei materiali [1]. Il metodo ha avuto importanti applicazioni in agricoltura e idrogeologia, consentendo una valutazione abbastanza semplice ed efficiente della permittività e della conducibilità di mezzi con proprietà fisico-chimiche anche molto differenziate (materiali granulari, soluzioni, terreni secchi o parzialmente acquosi, ecc.) [2,3].

La tecnica TDR presenta peraltro interessanti potenzialità anche nelle più recenti ricerche in ambito spaziale (ad esempio, nella determinazione delle proprietà ignote del sottosuolo di pianeti come Marte) [4], proponendosi come approccio alternativo a diverse possibili tecniche in bassa e in alta frequenza.

In questi tipi di applicazioni può risultare vantaggioso l'impiego di un apparato TDR collegabile a sonde di tipo bifilare da inserire nel terreno. Nondimeno, l'utilizzazione di tale tecnica sembra richiedere opportuni criteri in fase di calibrazione quando si vogliono determinare con particolare accuratezza le proprietà elettromagnetiche dei mezzi [3,4]. Il presente studio intende esaminare dal punto di vista teorico e sperimentale una serie di aspetti inerenti all'influenza delle procedure sperimentali TDR per un'adeguata valutazione della permittività di vari tipi di materiali dielettrici di interesse applicativo.

APPARATO SPERIMENTALE TDR

Come è noto, la tecnica TDR per le misure di permittività è fondamentalmente basata sulla valutazione della velocità di un segnale in una struttura trasmissiva di lunghezza fissata circondata dal dielettrico in esame [1]. La strumentazione principale è costituita usualmente da un generatore di impulsi, un campionatore, un oscilloscopio e un cavo coassiale. L'apparato di laboratorio qui impiegato si basa sullo strumento TDR "Tektronix 1502B", collegato tramite un 'balun' a una linea bifilare schermata, che è ulteriormente connessa a una sonda bifilare inseribile nel materiale da caratterizzare, quest'ultimo posto in un contenitore cilindrico di vetro.

In Fig. 1 si presentano le caratteristiche principali di un sistema TDR: schema generale dello strumento (Fig. 1a), sonda di tipo linea bifilare (Fig. 1b), forma d'onda ideale del segnale TDR nel tempo (Fig. 1c), apparato di laboratorio qui utilizzato (Fig. 1d), tipica 'traccia' della forma d'onda rilevabile sperimentalmente (Fig. 1e).

Nella realizzazione delle misure sono stati introdotti opportuni accorgimenti per il controllo delle proprietà termiche e geometriche del sistema. Si sono quindi specificate una serie di configurazioni sperimentali atte a mostrare possibili variabilità ed errori nelle procedure di calibrazione. Sono stati effettuati diversi tipi di misure, variando ad esempio la distanza e/o il diametro dei conduttori delle sonde, oppure modificando le dimensioni volumetriche e l'omogeneità dei materiali in esame, ecc.. Per ottenere una casistica di risultati sufficientemente generale ci si è riferiti a dielettrici aventi valori di permittività alquanto differenziati: in particolare acqua deionizzata, etanolo e aria [4].

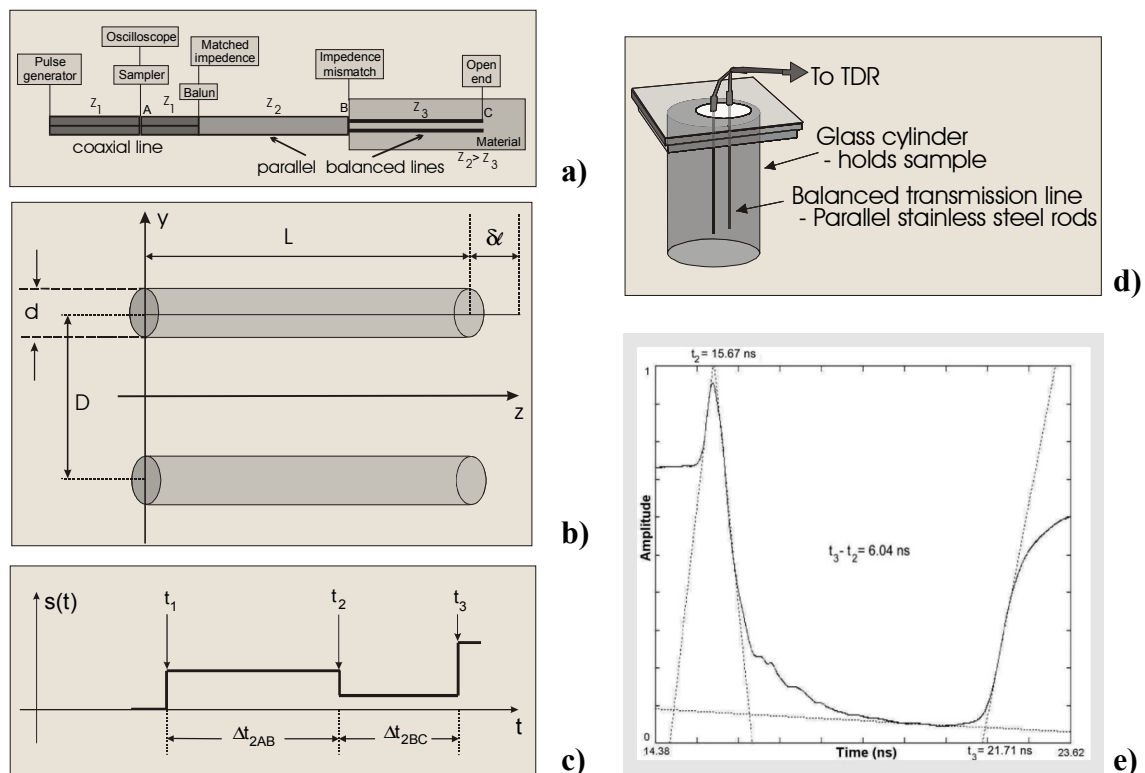


Fig. 1 – Strumentazione TDR: a) schema di principio di un sistema di misura TDR; b) linea di trasmissione bifilare utilizzabile come sonda TDR; c) forma d'onda TDR ideale rilevabile in funzione del tempo; d) schema dell'apparato di laboratorio utilizzato; e) tipico andamento della forma d'onda del segnale acquisito dallo strumento TDR in funzione del tempo.

MISURE TDR: ASPETTI CRITICI, RISULTATI E DISCUSSIONE

Il TDR consente di valutare la permittività del mezzo che circonda le sonde mediante l'analisi delle forme d'onda nel dominio del tempo rilevate dallo strumento [1]. L'esame dei dati di laboratorio evidenzia peraltro una complicata influenza di diversi aspetti di natura pratica in grado di alterare in maniera sostanziale le forme d'onda stesse e la relativa interpretazione dei dati. Tra questi aspetti vanno evidenziati:

- la tecnica di estrazione delle informazioni derivabili dalle forme d'onda;
- gli effetti reattivi e radiativi delle sezioni di discontinuità e di troncamento;
- l'influenza della geometria della linea di trasmissione (diametro d e spaziatura D della linea bifilare) e delle dimensioni del campione dielettrico analizzato.

E' stato quindi possibile interpretare il rilievo assunto sperimentalmente dagli aspetti di calibrazione inquadrandoli in un ambito teorico, facendo riferimento in particolare alle caratteristiche elettromagnetiche delle linee di trasmissione equivalenti. Limitazioni di spazio ci consentono di riportare e di discutere brevemente solo alcuni risultati ottenuti.

In Tab. I si forniscono alcuni dati sperimentali relativi ai diversi tipi di materiali esaminati (aria, etanolo e acqua), includenti tra l'altro i tempi di transito per le riflessioni delle forme d'onda, utili per dedurre i valori di permittività dalla conoscenza della velocità di propagazione dell'onda nella struttura trasmissiva di lunghezza nota; in tal caso si può notare come, se non si apporta alcuna correzione ai dati misurati, si perviene a una valutazione sperimentale assai poco attendibile. I dati riportati in Tab. II sono stati invece calcolati dopo aver valutato alcuni degli aspetti che influenzano le misure TDR: tra questi, in primo luogo, si è considerato e opportunamente quantificato il contributo di tipo reattivo presente alle terminazioni aperte delle sonde, generalmente riconducibile a un effetto di aumento della lunghezza equivalente della linea di trasmissione: tale fenomeno è in grado di influenzare in maniera sostanziale la relativa valutazione di costante dielettrica, come risulta dalla notevole riduzione dell'errore.

Tab. I: Misure TDR di ϵ_r ($D = 9 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$): valori 'non compensati'						
Materiale	Temp. (°C)	t_2 (ns)	t_3 (ns)	ϵ_r (TDR) $\pm \Delta\epsilon_r$	ϵ_r (val. rif.)	Errore rel.
Aria	23.0 ± 0.5	15.63	16.52	1.82 ± 0.03	1.0005364	82%
Etanolo	22.9 ± 0.1	15.67	18.92	23.8 ± 0.1	25.11	5.2%
Acqua	24.3 ± 0.1	15.63	21.68	82.1 ± 0.3	78.60	4.5%

Tab. II: Misure TDR di ϵ_r ($D = 9 \text{ mm}$, $d = 3 \text{ mm}$): valori 'compensati'						
Materiale	δl (m)	$L_{eq} = L_s + L_c + \delta l$ (m)	ϵ_r (TDR) $\pm \Delta\epsilon_r$	ϵ_r (val. rif.)	Errore rel.	
Aria	0.0044	0.244 ± 0.001	1.23 ± 0.03	1.0005364	23%	
Etanolo	0.0044	0.2122 ± 0.0008	22.0 ± 0.1	25.11	12.4%	
Acqua	0.0044	0.2088 ± 0.0007	78.2 ± 0.3	78.60	0.5%	

Legenda: Tab. I: oltre ai valori di temperatura degli esperimenti, sono indicati i tempi di transito del segnale riflesso, t_2 e t_3 (Fig. 1c e 1e), da cui derivare i valori di permittività ϵ_r (TDR) a partire dalla velocità del segnale e dalla lunghezza della linea; l'errore sperimentale è indicato con $\Delta\epsilon_r$; l'errore relativo è calcolato rispetto a valori di riferimento presenti in letteratura; Tab. II: compensazione della lunghezza della sonda L_s in termini di una lunghezza equivalente L_{eq} , tenendo conto di un opportuno incremento δl relativo agli effetti reattivi terminali della linea bifilare 'in aperto' (Fig. 1b) e di altri fattori legati alle disomogeneità di materiali nell'apparato di laboratorio, come il coperchio del contenitore (L_c), ecc. (Fig. 1d).

L'influenza della geometria della linea di trasmissione è stata verificata variando sistematicamente le dimensioni e la spaziatura della linea bifilare. Alcuni risultati sono riportati per il caso dell'acqua in Fig. 2a, dove si mostra l'entità della dipendenza della costante dielettrica relativa da D per alcuni valori di d . In Fig. 2b si riporta infine un effetto delle non omogeneità dei materiali: un campione di acqua è ulteriormente circondato da un recipiente più ampio contenente sostanze diverse (aria, etanolo e ancora acqua). Si evidenzia come l'effetto legato al volume del materiale, sebbene spesso sottovalutato, può invece risultare rilevante per la precisione della misura.

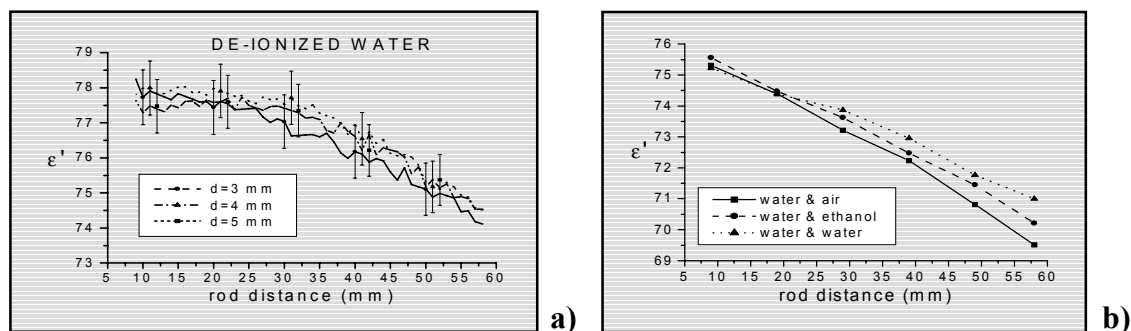


Fig. 2 – Effetto dei parametri geometrici e fisici nelle misure TDR; valori di costante dielettrica relativa per l'acqua deionizzata: a) in funzione della distanza D (mm) e per differenti diametri d (mm) delle sonde bifilari; b) in funzione della distanza D (mm) delle sonde per un campione di materiale ulteriormente circondato da mezzi differenti (aria, etanolo e acqua).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'elaborazione dei dati TDR ha evidenziato come, in una accurata misura della permittività, un rilievo particolare può essere assunto da fattori talvolta piuttosto trascurati o sottovalutati in letteratura. L'influenza della geometria della struttura è stata analizzata variando sistematicamente sia il diametro sia la distanza tra i conduttori della linea e considerando allo stesso tempo volumi diversi dei materiali in esame, aventi proprietà dielettriche alquanto differenziate. Si è messa in luce quantitativamente la particolare importanza degli effetti di discontinuità e troncamento della linea, che agiscono sulla precisione del calcolo delle lunghezze e dei tempi effettivi in cui avvengono le riflessioni dei segnali inviati nelle sonde. Sulla base dell'analisi teorica si sono potute così apportare specifiche correzioni nella valutazione della costante dielettrica, verificando poi sperimentalmente i notevoli miglioramenti nell'accuratezza del TDR.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] H. Fellner-Feldegg, "The measurement of dielectrics in the time domain", *Journal of Physical Chemistry*, 73, pp. 616-623, marzo 1969.
- [2] G. C. Topp, J. L. Davis e A. P. Annan, "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines", *Water Resources Research*, 16, pp. 574-582, 1982.
- [3] S. J. Zegelin, I. White e G. F. Russell, "A critique of the Time Domain Reflectometry technique for determining field soil-water content", in *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice*, SSSA, 30, pp. 187-208, 1992.
- [4] E. Pettinelli, A. Cereti, A. Galli e F. Bella, "Time Domain Reflectometry: calibration techniques for accurate measurement of the dielectric properties of various materials", *Review of Scientific Instruments*, in corso di pubblicazione, 2002.