Un confronto tra tecniche di calibrazione per la misura di permittività a larga banda mediante la tecnica del cavo coassiale troncato

G. d'Ambrosio(1), R. Massa (1), M.D. Migliore (2)

1) DIE, Università di Napoli "Federico II", Via Claudio

2) DAEIMI, Università di Cassino, Via Di Biasio, Cassino
md.migliore@unicas.it

Abstract

The standard SOL calibration technique and a novel technique using two reference liquids only approximatively known are compared in the framework of truncated-cable wideband permittivity measurement. Experimental results using ethanol and methanol as reference liquids show a more accurate reconstruction using the novel technique.

La misura di permittività di liquidi mediante la tecnica della sonda coassiale e la procedura di calibrazione OSL

Il sistema di misura attualmente più utilizzato per la caratterizzazione elettromagnetica di materiali liquidi è basato su un analizzatore di reti vettoriale e una sonda costituita da cavo coassiale troncato (fig 1). Una estremità della sonda è immersa nel campione da analizzare, mentre l'altra è collegata all'analizzatore che misura il coefficiente di riflessione, sia Γ_b, in modulo e fase, sulla sezione di discontinuità B-B' tra cavo e dielettrico. Noto Γ_b , è possibile ricavare la permittività complessa del materiale in esame ($\varepsilon_{campione}$) mediante un opportuno modello che leghi Γ_b ad $\varepsilon_{campione}$, ovvero una funzione del tipo $\Gamma_b = f(\varepsilon_{campione})$ localmente invertibile nell'intorno di $\varepsilon_{campione}$, quale per esempio il modello "di funzione razionale" [1].

Nelle misure con analizzatore di reti è necessario effettuare una correzione degli errori presenti a causa della risposta del circuito di misura mediante una opportuna procedura calibrazione. Con riferimento alla fig. 2, si supponga che il carico di cui si vuole valutare il coefficiente di riflessione sia Γ_L . Il carico è connesso alla "sezione di misura" dell'analizzatore, (sia essa la sezione 1, nodi a_1 e b_1) tramite un circuito a microonde, modellata tramite i parametri *S*, o, come di uso comune nell'ambito delle misure, mediante i parametri *E*. A causa della presenza del circuito il coefficiente di riflessione alla sezione 2 è diverso da quello del carico. E' pero' possibile ottenere il coefficiente alla sezione 1 se sono noti i parametri *E*.

La procedura di calibrazione usualmente adottata utilizza tre carichi noti per stimare i parametri *E*.. Si noti che poiché i parametri *E* variano con la frequenza, la procedura deve essere ripetuta in tutto l'intervallo di frequenza di interesse.

La precisione ottenuta mediante la procedura di calibrazione dipende in modo critico dalla precisione con cui sono noti i carichi. Il problema della precisione dei carichi è particolarmente grave nel caso delle misure di permittività mediante sonda coassiale troncata. La calibrazione in questo caso avviene utilizzando un corto circuito (Short), lasciando la sonda irradiare in spazio libero ("aperto in aria", Open), e immergendola in un liquido di permittività considerata nota (Load) [2]. I valori di permittività dei liquidi riportati in letteratura sono pero' affetti da una incertezza non trascurabile (5% - 10%) che causa una erronea correzione dei dati misurati [3]. Inoltre variazioni del valore di permittività con la temperatura e impurità nei liquidi di calibrazione contribuiscono ad aumentare l'incertezza nella stima dei parametri *E* e quindi nella valutazione della permittività del liquido incognito.

Calibrazione mediante due liquidi di permittività non perfettamente nota

Questo metodo [3] si basa sull'utilizzo di opportune informazioni a priori sui liquidi di calibrazione che rendono non necessaria l'ipotesi forte sulla perfetta conoscenza della loro permittività. In particolare, una classe di liquidi ampiamente adottata per la calibrazione ha una legge di dispersione di Cole-Cole. Tale informazione può essere utilizzata per stimare i parametri *E*. Si considerino due liquidi la cui permittività abbia una legge di dispersione tipo Cole-Cole $\varepsilon^{(j)} = \varepsilon_\infty^{(j)} + \dfrac{\varepsilon_0^{(j)} - \varepsilon_\infty^{(j)}}{1+\left(j2\pi f\tau^{(j)}\right)^{1-\alpha^{(j)}}}$ dove j indica il liquido (j=1,2) f è la frequenza, ed ε_∞, ε_0, τ e α sono il valore i parametri di Cole-Cole, che rappresenteranno le incognite del problema e costituiranno gli elementi del vettore incognito $\underline{x}$=($\varepsilon_\infty^{(j)}$, $\varepsilon_0^{(j)}$, $\tau^{(j)}$ e $\alpha^{(j)}$). Siano $\Gamma_{m_k}^S$, $\Gamma_{m_k}^O$, $\Gamma_{m_k}^{(1)}$ i coefficienti di riflessione misurati alla frequenza f_k con la sonda a contatto, rispettivamente, con il corto circuito, con il circuito aperto e con il liquido, e $\Gamma_{m_k}^S$, $\Gamma_{m_k}^O$, $\Gamma_{m_k}^{(1)}$, $\Gamma_{m_k}^{(2)}$ i coefficienti di riflessione misurati alla frequenza f_k con la sonda, rispettivamente, posta in corto circuito, in condizioni di "aperto in aria" e a contatto con i due liquidi. Considerando la rete di errore mostrata in Fig 2, si ha [3]:

$$E_{D_k} = \frac{\Gamma_k^S\Gamma_k^O\Gamma_{m_k}^{(j)}\left(\Gamma_{m_k}^S - \Gamma_{m_k}^O\right) + \Gamma_k^O\Gamma\left(\underline{x}^{(j)}, f_k\right)\Gamma_{m_k}^S\left(\Gamma_{m_k}^O - \Gamma_{m_k}^{(j)}\right) + \Gamma_k^S\Gamma\left(\underline{x}^{(j)}, f_k\right)\Gamma_{m_k}^O\left(\Gamma_{m_k}^{(j)} - \Gamma_{m_k}^S\right)}{\Gamma_k^S\Gamma_k^O\left(\Gamma_{m_k}^S - \Gamma_{m_k}^O\right) + \Gamma_k^O\Gamma\left(\underline{x}^{(j)}, f_k\right)\left(\Gamma_{m_k}^O - \Gamma_{m_k}^{(j)}\right) + \Gamma_k^S\Gamma\left(\underline{x}^{(j)}, f_k\right)\left(\Gamma_{m_k}^{(j)} - \Gamma_{m_k}^S\right)}$$

Poiché il termine Ed non dipende dal carico, l'espressione precedente deve essere indipendente dal liquido di calibrazione. Quindi, i vettori dei parametri possono essere ottenuti imponendo, ad ogni frequenza, l'uguaglianza tra gli errori di direttività E_d relativi ai due liquidi $\underline{E}_D\left(\underline{x}^{(1)}\right) = \underline{E}_D\left(\underline{x}^{(2)}\right)$, dove $\underline{E}_D\left(\underline{x}^{(j)}\right) = \left(E_{D_1}^{(j)}, \ldots, E_{D_k}^{(j)}, \ldots\right)$. La presenza di errori non correggibili nei dati misurati e l'utilizzo di un modello approssimato per la permittività rendono pero' impossibile il soddisfacimento dell'uguaglianza in senso stretto. E' stata quindi cercata una soluzione generalizzata stabilizzando la soluzione mediante la procedura di regolarizzazione di Tikhonov, risolvendo il problema $\min\limits_{\underline{x}^{(1)},\underline{x}^{(2)}}\left(\left\|\underline{E}_D\left(\underline{x}^{(1)}\right) - \underline{E}_D\left(\underline{x}^{(2)}\right)\right\|^2 + \alpha\left(\left\|\underline{E}_D\left(\underline{x}^{(1)}\right)\right\|^2 + \left\|\underline{E}_D\left(\underline{x}^{(2)}\right)\right\|^2\right)\right)$.

A causa della forte non linearità del problema, la soluzione è, in generale, non unica, ed è necessario utilizzare come punto di partenza un valore vicino al valore delle incognite. Nei casi analizzati è stato adottato come punto di partenza il valore dei parametri di Cole Cole riportato in letteratura.

Dopo la minimizzazione, i termini di errore sono calcolati nel seguente modo:

$$\underline{E}_D = \frac{\underline{E}_D\left(\underline{x}^{(1)}\right) + \underline{E}_D\left(\underline{x}^{(2)}\right)}{2}; \qquad E_{S_k} = \frac{\left(1+\dfrac{1}{\Gamma_k^O}\right)E_{D_k} - \left(\Gamma_{m_k}^S + \dfrac{\Gamma_{m_{Ok}}^O}{\Gamma_k^O}\right)}{\Gamma_{m_k}^S - \Gamma_{m_k}^O}; \qquad E_{R_k} = \left(E_{D_k} - \Gamma_{m_k}^S\right)\left(1 + E_{S_k}\right)$$

Sistema di misura e risultati

Il sistema utilizzato è mostrato in Fig 1, e si compone di:

Analizzatore di reti vettoriale: Wiltron/Anritsu modello 37277C
Cavo coassiale flessibile: Wiltron modello 3670K50-1 s.n. 302028
Kit di calibrazione: Wiltron modello 3650
Sonda: cavo coassiale troncato di lunghezza L = 7.5 cm con connettore GPC 3.5 Maschio; diametro conduttore esterno= 2.98 mm, diametro conduttore interno= 0.912 mm, dielettrico Teflon, ε'= 2.1 e ε''=0 a T=25 °C nella banda 100MHz-10GHz
Bagno termostatico: Grant W6
Termometro digitale: Physitemp Thermalert modello TH-8
Provetta in plastica

Passo preliminare alle misure è stata la valutazione dell'influenza della dimensione della provetta nella misura. Infatti i modelli presuppongono un semispazio di illimitato riempito del materiale in prova. E' quindi necessario che la dimensione della provetta che contiene il liquido sia tale da avere una intensità del campo trascurabile in vicinanza delle pareti della provetta. E' stato quindi simulato il sistema sonda-provetta alla frequenza di 2.45 GHz con CST MicroWave Studio. I risultati mostrano che le dimensioni trasverse della provetta siano tali da verificare la condizione di applicabilità dei modelli.

Per verificare il metodo di calibrazione è stata eseguita la misura della permittività di acqua distillata utilizzando come liquidi di calibrazione etanolo e metanolo. Nella calcolo dei parametri E i liquidi di calibrazione sono stati considerati non perfettamente noti, con un errore massimo del 5 % e del 13 % rispettivamente per il metanolo e l'etanolo rispetto ai valori riportati in letteratura [2], in accordo con la procedura esposta di seguito:

1) è stato effettuata la misura del coefficiente di riflessione alla sezione BB' della sonda terminata su un corto circuito, su un aperto in aria ed immersa in etanolo, in metanolo e in acqua distillata

2) il valore attribuito alla permittività dei due liquidi di riferimento (etanolo e metanolo) è stata variata in modo casuale nell'ambito dell'errore massimo fissato

3) sono stati calcolati i parametri E sia con il metodo SOL sia con il metodo con due liquidi partendo dai valori modificati della permittività dei liquidi di calibrazione

4) è stato calcolato la permittività dell'acqua effettando la correzione con i parametri ottenuti al passo 3

I passi 2-4 sono stati ripetuti in modo da ottenere informazioni sull'errore nella ricostruzione della permittività dell'acqua causata dall'incertezza sui liquidi di calibrazione.

La procedura di minimizzazione ha fornito in generale risultati migliori rispetto al metodo SOL. Solo in caso di valori dei liquidi di calibrazione fortemente errati il programma è caduto in una trappola. E' pero' da notare che i valori dei parametri di cole-cole fornito dalla procedura di minimizzazione in questi casi era talmente errato da determinare riscostruzioni della permittività dell'acqua palesemente errate, rendendo facilmente identificabile la presenza di trappole nella soluzione. In fig 3 è riportato come esempio il valore della parte immaginaria della permittività dell'acqua fornito dal programma nel caso soluzione errata, confrontata con il valore atteso. Le soluzioni associate a trappole sono state quindi facilmente identificate ed escluse.

I risultati finali sono riportati in tabella 1 (parte reale della permittività dell'acqua) e 2 (parte immaginaria). La prima colonna della tabella riporta la frequenza, la seconda i valori di permittività dell'acqua indicati nei due riferimenti [2] e [4], la terza, quarta e quinta i valori di permittività con la fascia di incertezza ottenuti con il metodo SOL e calibrazione con metanolo, etanolo e con i due carichi rispettivamente. SI nota come la fascia di incertezza ottenuta con il metodo proposto sia minore rispetto a quella ottenuto con la calibrazione SOL.

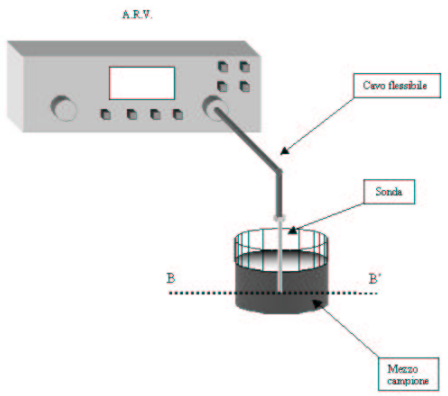

Fig 1: Sistema di misura

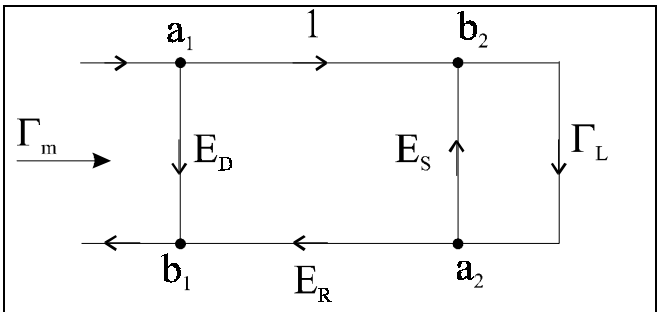

Fig 2: Schema del circuito di errore

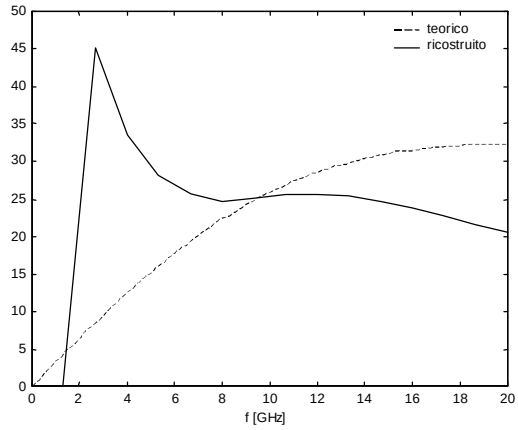

Fig 3: Permittività ricostruita (parte immaginaria) nel caso in cui il programma di minimizzazione cade in una trappola

f [GHz]	Valore teor. [4]-[2]	Cal.con metanolo	Cal. con etanolo	Cal. con met. + et.
2.7097	69.1-76.2	71.0±4.4%	73.7±12.6%	74.1±3.3%
5.3544	65.8-72.3	69.0±2.9%	67.1±13.3%	70.3±2.5%
8.0240	61.2-67.0	65.8±4.3%	61.5±14.4%	66.0±2.8%
10.6937	55.8-61.0	60.3±6.43%	54.9±17.0%	60.3±2.3%
13.3384	50.3-54.8	53.1±9.3%	48.3±21.4%	54.0±1.9%
16.0080	44.9-49.0	45.0±12.1%	42.2±27.4%	48.0±1.7%
18.6777	40.1-43.8	36.8±16.1%	37.3±34.4%	42.9±3.1%
20.0000	37.8-41.4	33.1±21.3%	35.3±37.8%	40.7±4.9%

f [GHz]	Valore teor. [4]-[2]	Cal.con metanolo	Cal. con etanolo	Cal. con met. + et.
2.7097	8.6-10.0	9.7±14.0%	10.1±39.4%	10.0±50.2%
5.3544	16.2-18.4	16.4±15.6%	19.5±20.1%	17.1±11.2%
8.0240	22.4-25.1	23.8±11.2%	24.4±14.2%	22.7±4.8%
10.6937	26.9-29.9	31.0±13.0%	28.9±11.1%	27.9±6.2%
13.3384	29.9-33.0	36.5±16.5%	31.1±10.1%	31.0±9.1%
16.0080	31.6-34.8	39.3±19.8%	31.2±9.9%	32.0±11.7%
18.6777	32.3-35.5	39.8±21.2%	30.1±10.0%	31.6±13.6%
20.0000	32.4-35.6	39.2±21.1%	29.3±10.1%	31.4±14.3%

Tabella 1 e 2: parte reale e parte immaginaria della permittività ottenuta utilizzando i diversi metodi di calibrazione

Ringraziamenti

Si ringrazia l'Ing. Vincenzo Mastroianni, che ha curato la parte sperimentale e di elaborazioni dati.

[1] J.M. Anderson, C.L. Sibbald, S.S. Stuchly, "Dielectric Measurement Using a Rational Function Model", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol.42, No.2, pp. 199-204, February 1994

[2] A. Nyshadham, C.L. Sibbald, S.S. Stuchly, "Permittivity Measurement Using Open-Ended Sensors and Reference Liquid calibration – An Uncertainty Analysis", IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, vol.40, No.2, pp.305-314, February 1982

[3] M.D. Migliore, "Partial Self-Calibration Method for Permittivity Measurement Using Truncated Coaxial Cable", Electronics Letters, vol.36, No.15, pp.1275-1277, July 2000

[4] National Bureau of Standards, "Tables of Dilectric Dispersion Data for Pure Liquids and Dilute Solutions", Circular 589, 1958