

TRAÇABILITE AU SI DES MESURES EFFECTUEES A L'AIDE D'ANALYSEURS DE RESEAUX VECTORIELS

D. Allal et B. Mellouet
Laboratoire National de Métrologie et d'Essais
29 avenue Roger Hennequin 78197 Trappes Cedex

Résumé

Les mesures de paramètres S sont traçables au SI en mesurant les deux diamètres des lignes à air étalons de calibrage. Cela permet par la détermination de leur impédance caractéristique, d'apporter une correction par une transformation d'impédance, mais également de vérifier l'exactitude du calibrage en calculant la matrice S de lignes étalons de vérification et d'évaluer les termes d'erreurs résiduelles sur la directivité et la désadaptation pour le calcul des incertitudes. Le LNE dispose d'un système de mesure de diamètres et de deux types distincts d'analyseurs de réseaux augmentant ainsi la confiance accordée aux mesures.

Abstract

Measurements of S parameters are traceable to the SI by measuring the two diameters of the calibration air line standards. That allows, by determining their characteristic impedance, to make a correction by an impedance transformation, but also to check the calibration accuracy by calculating the S matrix of verification line standards and to evaluate the residual errors terms on directivity and mismatch for uncertainty calculation. LNE has a diameter measurement system and two distinct network analyser types, thus increasing the confidence given to measurements.

Introduction

Dans le domaine de la mesure des paramètres S à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel, la question de l'étalonnage de l'appareil de mesure se pose. En effet, compte tenu de la nature matricielle et complexe du mesurande, de l'étendue fréquentielle et de la gamme des valeurs potentiellement mesurées, l'étalonnage n'est pas réalisable directement. On utilise alors la notion de calibrage, qui revient à corriger de manière automatique les erreurs de mesures. Ce calibrage permet alors de recalibrer la réponse de l'instrument sur une valeur vraie prédite calculée à partir de la valeur brute mesurée et des coefficients d'erreur déterminés grâce au calibrage. Cette correction apportée à l'appareil de mesure peut alors être vue comme une amélioration de son exactitude.

Le calibrage des analyseurs de réseaux nécessite pour une bande de fréquence donnée, l'utilisation de plusieurs étalons. En effet, les erreurs inhérentes au système sont multiples, le minimum retenu étant généralement de 12 termes d'erreurs prépondérants. Un étalon unique de type quadripôle ne peut avec ses quatre paramètres S résoudre le problème qui s'écrit alors sous la forme d'un système d'équations à 12 inconnues.

Le nombre d'étalons utilisés est généralement de trois ou quatre, voire plus, selon la méthode choisie et pour lesquels toutes ou partie de leurs caractéristiques doivent être connues. Ils sont soit considérés comme étalons primaires quand leurs caractéristiques sont dérivées d'autres grandeurs du SI, telles que les dimensions ou les propriétés électriques du matériau, soit comme étalons de transfert quand leurs caractéristiques sont déduites de mesures raccordées à d'autres étalons.

Traçabilité des mesures

Paramètres S et traçabilité

Les paramètres S d'un quadripôle, et plus généralement d'un réseau à accès multiples, sont des rapports d'ondes entrantes ou sortantes qui peuvent représenter soit un facteur de réflexion à l'un des accès, soit un facteur de transmission entre deux accès. Contrairement à d'autres types de paramètres de caractérisation des réseaux tels que les paramètres Z ou Y qui sont des grandeurs absolues, les paramètres S sont des grandeurs relatives et doivent être définis par rapport à une impédance dite de référence, généralement égale à 50 Ω. Afin de garantir la traçabilité des mesures effectuées, il est nécessaire que les paramètres S des étalons de calibrage soient correctement référencés. Par exemple, dans le cas d'une ligne de transmission, la matrice S donnée par

$$S_L = \begin{pmatrix} 0 & \exp(-\gamma l) \\ \exp(-\gamma l) & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

et ne dépendant que du terme γl , où γ est la constante de propagation et l la longueur de la ligne, est exacte à la condition qu'elle soit définie par rapport à l'impédance caractéristique Z_0 de la ligne. Si Z_0 est connue, alors la traçabilité est établie.

Calibrage de l'analyseur de réseaux

Principe Les paramètres S sont mesurés à l'aide d'un analyseur de réseaux calibré. Le calibrage revient à mesurer un certain nombre de composants étalons permettant à partir de la connaissance partielle ou complète de leurs matrices S, de résoudre un système d'équations où les inconnues sont les imperfections inhérentes au système telles que la directivité finie des coupleurs et les désadaptations de source et de charge. Ces imperfections ou erreurs, une fois déterminées, sont prises en compte dans les corrections apportées aux mesures dites brutes et permettent de déduire la valeur des paramètres S mesurés avec une exactitude qui se trouve ainsi améliorée.

Calibrage TRL Plusieurs méthodes de calibrage ont été développées parmi lesquelles la méthode TRL qui sous ses différentes formes, constitue la méthode la plus exacte. En effet, cette dernière permet de déterminer les paramètres S par rapport à l'impédance caractéristique de la ligne utilisée comme étalon et dont la traçabilité aux grandeurs du SI peut être garantie. Une transformation d'impédance suffit alors pour donner les paramètres S par rapport à l'impédance de référence choisie. Rappelons que cette méthode a été développée pour le calibrage des analyseurs de réseaux double six-port [1] mais qu'elle peut également être applicable pour le calibrage des analyseurs de réseaux classiques à quatre récepteurs [2].

L'acronyme TRL désigne les trois étalons mesurés successivement et permettant de déterminer les termes d'erreur de l'analyseur. Le premier est un *Thru*, qui est en fait le quadripôle virtuel représenté par la connexion directe des deux ports de l'analyseur. Sa matrice S est connue ($S_{11} = S_{22} = 0$ et $S_{12} = S_{21} = 1$) si les deux ports de l'analyseur présentent une impédance identique. Le *Reflect* est le second étalon qui est également un quadripôle virtuel constitué de deux charges inconnues mais identiques, de préférence désadaptées et mesurées chacune sur un des deux ports. Finalement, le *Line* qui est une ligne de transmission adaptée. Sa matrice S est partiellement connue ($S_{11} = S_{22} = 0$), son facteur de transmission $\exp(-\gamma l)$, étant une inconnue déterminée lors du calibrage. Cette ligne constitue l'étalon d'impédance par rapport à laquelle les paramètres S calculés sont donnés.

Pour que la méthode TRL garantisse la plus grande exactitude d'un point de vue de la traçabilité, certaines conditions doivent être respectées. Il faut comme mentionné plus haut, que les deux charges utilisées pour la mesure du *Reflect* soient identiques et que la ligne (*Line*), symétrique, possède une longueur permettant de la différencier de la connexion directe (*Thru*), l'idéal étant une longueur représentant un déphasage de 90° (généralement, on accepte des valeurs comprises entre 20° et 160°). De plus, il est primordial que les conditions de propagation à l'interface de la connexion directe soient identiques à celles réalisées dans la ligne, d'où la nécessité de disposer au niveau des deux ports de l'analyseur, de connecteurs de qualité de réalisation équivalente à celle de la ligne étalon. Un autre moyen est la généralisation de la méthode TRL, dite LRL qui remplace la condition *Thru* par une seconde condition *Line*. Le plan de référence du calibrage est situé au milieu de la ligne et les deux lignes présentent alors les mêmes conditions de propagation dans ce plan. Il suffit ensuite de translater le plan de référence du milieu de la ligne vers les connecteurs de l'analyseur.

Chemins de traçabilité

Le LNE a développé des analyseurs de réseaux du type double six-port dans la bande de fréquence comprise entre 100 MHz et 40 GHz, ce qui permet au Laboratoire de disposer d'un moyen alternatif de mesure des paramètres S. Une chaîne de traçabilité aux grandeurs du SI est en cours d'établissement [3]. Elle place les analyseurs commerciaux à quatre récepteurs au même niveau que nos analyseurs

six-port, principalement pour des raisons de rapidité d'exécution et de commodité de mise en œuvre (figure 1).

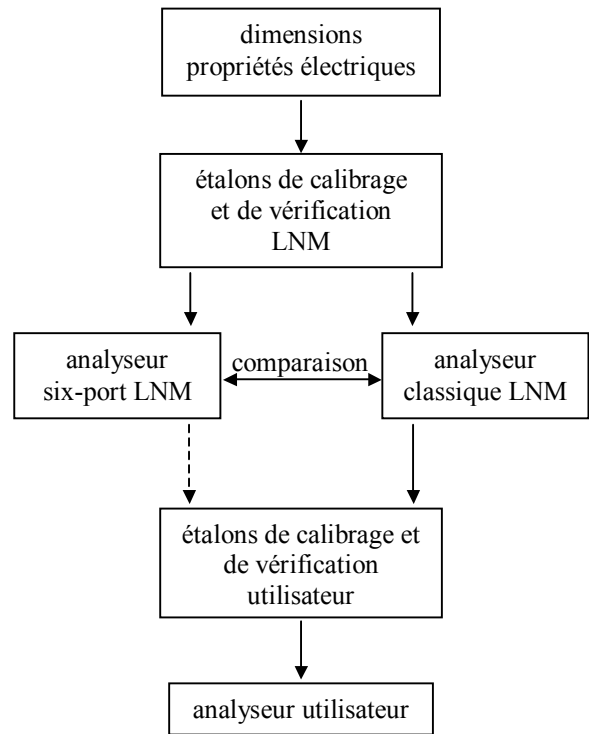


Figure 1 : schéma de traçabilité

En effet, les comparaisons qui sont actuellement effectuées selon un critère permettant de comparer les deux systèmes de manière globale, c'est-à-dire sur la bande de fréquence d'utilisation et sur la gamme de valeurs potentiellement mesurées montrent l'équivalence entre les deux types d'analyseurs à condition de respecter rigoureusement les conditions imposées par la procédure de calibrage.

La figure 2 montre un exemple de comparaison entre les deux systèmes de mesure, un analyseur six-port du LNE et un analyseur de type 8510C dans la bande de fréquence comprise entre 1 GHz et 18 GHz [4].

Un degré d'équivalence bilatéral est ensuite déterminé en calculant tout simplement la distance entre les deux mesures x_i et x_j , grandeurs complexes mesurées respectivement par les systèmes i et j . Les mesures x_i et x_j d'un point de vue géométrique sont représentés par deux points dans le plan [5] :

$$d_{ij} = \|x_i - x_j\| \quad (2)$$

Dans cet exemple précis, l'incertitude élargie sur le degré d'équivalence ramené à la bande de fréquence traitée et aux valeurs mesurées, compte tenu des incertitudes associées aux deux mesures a été estimée à 0,011. Ce résultat montre l'équivalence des deux systèmes, hormis le cas des fréquences basses où les écarts observés sont dus à l'utilisation d'une ligne étalon dont la connexion ne semble pas garantir un bon niveau de répétabilité d'autant plus que les deux systèmes utilisant des connecteurs de structures

différentes, cet écart s'en trouve accentué [6]. Cet exemple montre l'intérêt de la méthode LRL par rapport à la TRL pour amoindrir l'effet dû aux connecteurs.

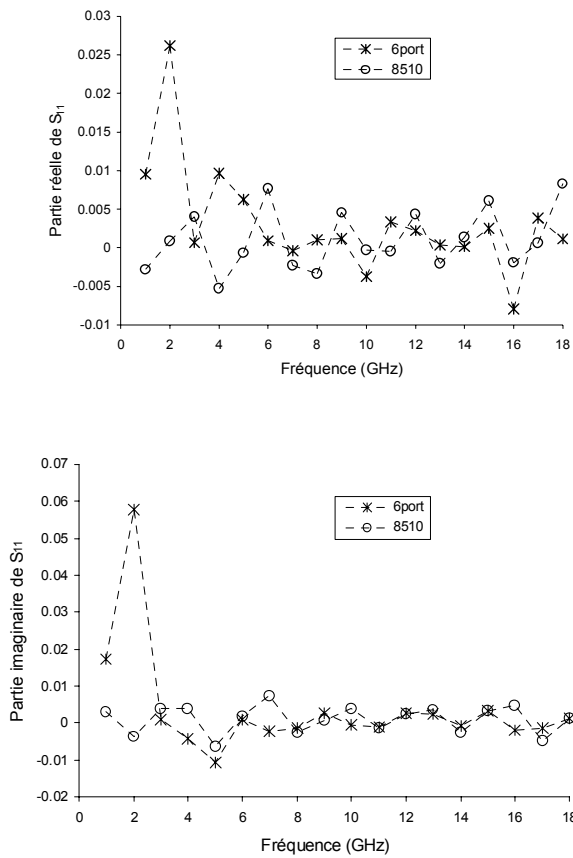


Figure 2 : comparaison dans le cas d'une ligne à air 50 Ω

Mesure dimensionnelle

Les analyseurs de réseaux qu'ils soient du type six-port ou classique, peuvent être raccordés aux grandeurs du SI *via* les lignes étalons de la méthode TRL (ou LRL) par des mesures dimensionnelles. C'est dans ce cadre que le laboratoire de métrologie électrique haute fréquence du LNE s'est doté de deux systèmes complémentaires de mesure de l'impédance caractéristique des lignes coaxiales étalons. Ces lignes étalons dites lignes à air, ne contiennent pas de diélectrique et le conducteur central ne peut être maintenu au centre de la ligne que lors de la connexion.

Le premier système est un banc de mesure du diamètre du conducteur central a . Il s'agit d'un micromètre à balayage laser, calibré par rapport à des piges étalons aux diamètres nominaux considérés.

Le second système est un appareil utilisant des tampons convertisseurs pneumatiques permettant de mesurer sans contact, le diamètre interne du conducteur extérieur b et calibré également par rapport à des bagues de références aux diamètres nominaux considérés.

Ces deux bancs et les procédures associées sont en cours de mise en place afin de disposer d'un raccordement au

niveau national. Les incertitudes espérées sont inférieures au micromètre et l'incertitude ainsi déduite sur l'impédance caractéristique, de l'ordre de $2 \cdot 10^{-2} \Omega$.

Impédance caractéristique La détermination de l'impédance caractéristique d'une ligne coaxiale repose sur la connaissance des deux diamètres a et b et de l'épaisseur de peau δ du matériau utilisé pour la construction de deux éléments constituant la ligne. En effet, on peut dans le cas des lignes coaxiales à faibles pertes, utiliser l'approximation suivante [7] :

$$Z_0 \approx Z_{00}(1-F) \quad (2)$$

où Z_{00} est l'impédance caractéristique de la ligne sans pertes et est donnée par :

$$Z_{00} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln(b/a) \quad (3)$$

et F est un facteur correctif complexe qui permet de tenir compte des pertes et dépend des diamètres a et b et de l'épaisseur de peau δ :

$$F = (j-1) \frac{\delta}{b} \frac{1+b/a}{4 \ln(b/a)} \quad (4)$$

Correction absolue Les coefficients d'erreur déterminés grâce au calibrage de type TRL permettent de déduire les paramètres S du composant mesuré par rapport à l'impédance caractéristique de la ligne étalon Z_0 . Cette impédance étant déduite de mesures dimensionnelles, on peut utiliser la transformation d'impédance suivante qui permet alors de donner ces mêmes paramètres par rapport à l'impédance de référence 50 Ω [8] :

$$S' = S - (I + S)\Gamma(I - S\Gamma)^{-1}(I - S) \quad (5)$$

où I est la matrice identité et Γ est une matrice diagonale des facteur de réflexion de l'impédance de référence par rapport à l'impédance caractéristique de la ligne.

Correction relative Dans le cas d'un calibrage par la méthode LRL, on peut également grâce aux mesures dimensionnelles faire une caractérisation complète des deux lignes étalons. En effet, on peut également déduire la constante de propagation grâce à l'approximation suivante :

$$\gamma \approx j\beta_0(1-F) \quad (6)$$

où β_0 est la constante de phase de la ligne sans pertes et F le facteur correctif tel que défini dans (4).

Ces mesures de diamètre sont typiquement effectuées par pas de 1 mm. A chaque étape, la matrice chaîne du quadripôle élémentaire est calculée à partir de l'impédance caractéristique et de la constante de propagation. La matrice S globale est alors construite à partir de la mise en cascade de ces quadripôles élémentaires [9].

Les écarts observés entre les deux lignes étalons permettent en appliquant une méthode de perturbation de propager l'erreur due à cet écart [10]. En effet, si on prend la petite ligne comme référence, on réécrit la matrice S de la grande ligne en rajoutant des termes d'erreur aux

paramètres S idéaux dans le cas des deux lignes aux caractéristiques de propagation identiques :

$$S_L = \begin{pmatrix} \delta_{S11} & \exp(-\gamma) + \delta_{S12} \\ \exp(-\gamma) + \delta_{S21} & \delta_{S22} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Ces écarts ajoutés permettent alors d'établir des expressions analytiques des déviations obtenues sur la valeur des paramètres S du composant mesuré.

Étalons de vérification

Les étalons de vérification permettent d'évaluer l'exactitude d'un calibrage. Généralement, on utilise des affaiblisseurs dont la caractéristique est traçable aux étalons d'affaiblissement, et des lignes à air dont l'impédance caractéristique et la constante de propagation et donc la matrice S peuvent également être calculées. Il est ainsi possible en mesurant ces étalons de vérifier dans quelle mesure les corrections apportées par le calibrage sont valables, en les confrontant aux valeurs prévues, traçables au SI.

Évaluation des incertitudes selon EA-10/12

Un guide d'évaluation des incertitudes de mesure quand elles sont réalisées à l'aide d'un analyseur de réseaux a été produit par l'EA [11]. Ce guide développe les méthodes permettant d'évaluer les principales sources d'incertitudes que sont la directivité effective, les adaptations effectives de source et de charge, les défauts de tracking (dus aux différences entre les voies empruntées par les signaux réfléchis et transmis et le signal incident) et de linéarité, l'isolation, les répétabilités de système et de connecteur, la flexion des câbles et les conditions ambiantes. Cette évaluation est basée sur la philosophie suivante. En mesurant des étalons dont la traçabilité au SI est établie, on peut *a posteriori* mettre en évidence les imperfections résiduelles, subsistant après calibrage.

Par exemple, dans le cas de la mesure du facteur de réflexion Γ d'une charge, l'incertitude en module, tenant compte des erreurs résiduelles après calibrage peut s'écrire de la façon suivante :

$$U = D + T\Gamma + M\Gamma^2 + R \quad (8)$$

où D représente la directivité effective, T l'effet conjoint de tracking et de non-linéarité, M l'adaptation effective et R les contributions aléatoires.

Afin d'évaluer le terme D , le guide préconise l'utilisation d'une ligne à air terminée par une charge adaptée. La mesure après calibrage permet de mettre en évidence en fonction de la fréquence une oscillation sinusoïdale (ripple) superposée à la courbe qu'on obtiendrait avec la charge seule. Ce ripple est proportionnel à la directivité résiduelle que l'on cherche à évaluer. Pour le terme M , on utilise un court-circuit au lieu de la charge adaptée.

Conclusion

Cet article traite de la mise en place d'une chaîne de traçabilité pour la mesure des paramètres S à l'aide des

analyseurs de réseaux. Dans le cas des lignes coaxiales, cette traçabilité passe par la détermination des diamètres des lignes à air étalons de calibrage et de vérification pour le calcul de l'impédance caractéristique et la matrice S de telles lignes. Le LNE s'est doté d'un banc de mesure de diamètres pour garantir cette traçabilité. Il sera alors possible dans un avenir proche de raccorder au niveau national, les lignes à air étalons, qu'elles soient utilisées pour le calibrage, pour la vérification ou pour l'évaluation des termes d'erreurs résiduelles. Le LNE dispose par ailleurs, d'un moyen de mesure alternatif, l'analyseur six-port qui permet par comparaison de montrer l'équivalence, dans les limites définies par les incertitudes établies, entre les deux types de systèmes, tous deux traçables aux mêmes grandeurs. Cette équivalence augmente ainsi la confiance que l'utilisateur pourra accorder aux résultats de mesures.

Références

- [1] G. F. Engen et C. A. Hoer, "Thru-reflect-line: an improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer", IEEE Trans. MTT, Vol. 27, pp. 983-987, Décembre 1979.
- [2] D. Rytting, "Network analyzer error models and calibration methods", dans Hewlett-Packard RF & Microwave Symposium, 1987.
- [3] Rapport d'activité 2005 de la métrologie française, Revue Française de Métrologie, 2006-3 n°7, 2006, 16.
- [4] D. Allal et A. Litwin, "Equivalence de deux analyseurs de réseaux vectoriels pour la traçabilité des paramètres S" Revue Française de Métrologie, à paraître.
- [5] M. Zeier, "On the analysis of multidimensional quantities in measurement comparisons", dans CPEM2006, Turin, Juillet 2006, 458-459.
- [6] J. R. Juroshek, C. A. Hoer et R. F. Kaiser, "Calibrating network analyzers with imperfect test ports", IEEE Trans. MTT, 38, août 1989, 898-901.
- [7] J. R. Juroshek et G. M. Free, "Measurements of the characteristic impedance of coaxial air line standards", IEEE Trans. MTT, Vol. 42, pp. 186-191, Février 1994.
- [8] P. I. Somlo et J. D. Hunter, Microwave impedance measurements, Londres : Peter Peregrinus Ltd, 1985.
- [9] M. Kossel, P. Leuchtmann et J. Rüfenacht, "Traceable correction method for complex reflection coefficient using calculable air line impedance standards", IEEE Trans. I&M, Vol. 53, pp. 398-405, Avril 2004.
- [10] U. Stumper, "Uncertainty of VNA S-parameter measurement due to nonideal TRL calibration items", IEEE Trans. I&M, Vol. 54, pp. 676-679, Avril 2005.
- [11] European co-operation for Accreditation, "EA Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA)", Publication EA-10/12, Mai 2000

