Calibration de VNA

F4IHX - Mehdi Khairy

2019-09-07

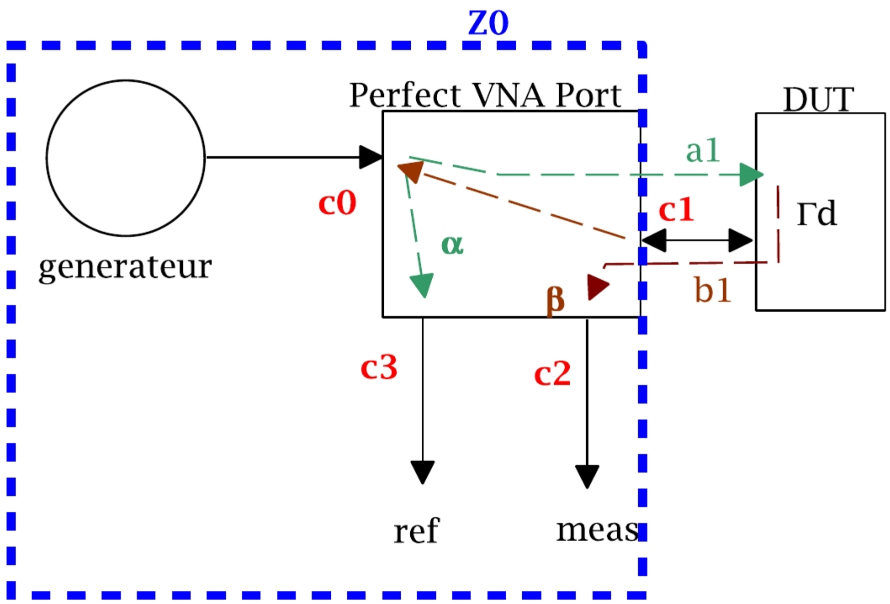
Contents

1 Fonctionnement de l'analyseur de réseau vectoriel

Un analyseur de réseau vectoriel est un appareil de mesure servant à qualifier des "composants" électroniques. Il fonctionne sur un principe de caractérisation de boite noire. Un analyseur idéal émet une sinusoide connue et mesure l'amplitude/phase relative du signal refléter et du signal traversant. Ces mesures permettent de caractériser le DUT (device under test) en tant que boite noire et d'établir la matrice de paramètres correspondant au composant.

2 Principe

2.1 Modèle idéal



Dans le cas d'un VNA idéal l'impédance de sortie du port est nominale à Z0 (généralement 50 ohm mais aussi 75 ou 300 suivant les sytèmes analysés).

On peut considérer le coupleur de sortie comme parfait ce qui veut dire qu'il n'existe pas de chemin entre les ports **c1/c3** et les ports **c0/c2**. On peut aussi considérer que $\alpha = \beta$ car un il s'agit d'un coupleur parfait et symétrique.

Cette configuration permet d'effectuer la mesure du coefficient de réflexion du DUT (Γ_d):

$$\begin{aligned} a1 &= gen.(1-\alpha) \\ b1 &= \Gamma_d.a1 = \Gamma_d.gen.(1-\alpha) \\ meas &= \beta.b1 = \beta.\Gamma_d.gen.(1-\alpha) \\ ref &= gen.\beta \end{aligned}$$

La mesure du coefficient de réflexion dans cette configuration est donc celle du DUT à un facteur pres connu:

$$\begin{aligned} \Gamma_m &= \frac{meas}{ref} \\ &= \Gamma_d(1-\alpha) \end{aligned}$$

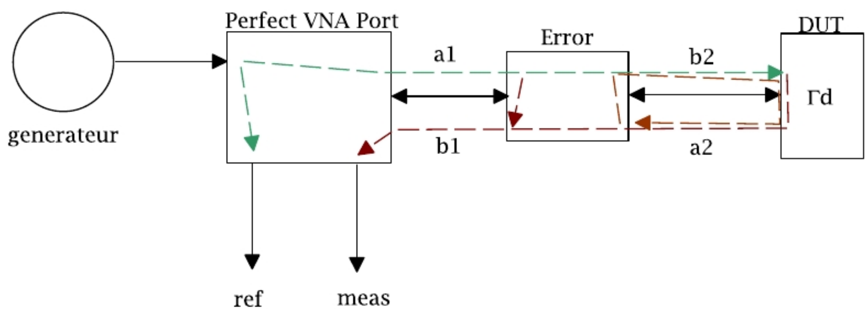
Dans une implémentation réelle il est peu probable d'atteindre un tel niveau de précision dans la réalisation mécanique et électrique de l'appareil. Cela pollue inévitablement la mesure.

Il va donc falloir compenser ces défauts avec une calibration de l'appareil.

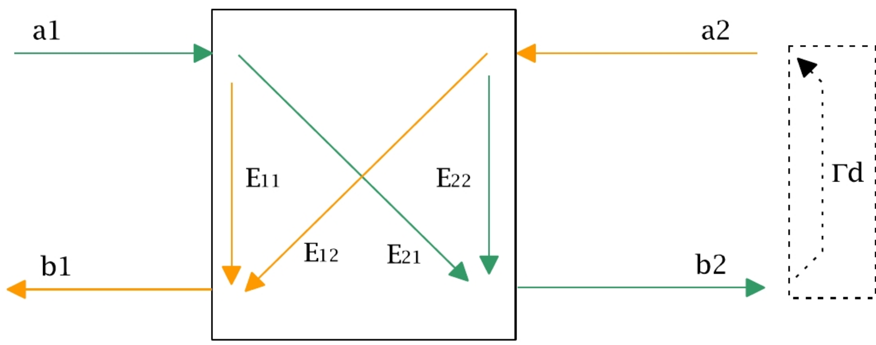
3 Calibration 1 port

3.1 Modèle

Pour simplifier les calculs et ne pas devoir qualifier tous les chemins d'erreurs de manière exhaustive, il est possible de considérer un VNA idéal suivi d'un **DUT virtuel** qui représentera les défauts de l'appareil, ce DUT virtual s'intercale avant le DUT réel et vient donc modifier la mesure.



Le but de la calibration va donc consister à définir suffisamment d'élément de la matrice de paramètre d'erreurs pour compenser les défauts de mesure. Nous considérons que les coefficients de couplage du coupleur de sortie sont unitaires, le coefficient sera corrigé directement par la calibration. $ref = a1$ et $meas = b1$.



Il s'agit d'une matrice de paramètres S (voir Annex. TDB).

$$\begin{bmatrix} b1 \\ b2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} a1 \\ a2 \end{bmatrix} => \begin{cases} b1 & = a1.E_{11} + a2.E_{12} \\ b2 & = a1.E_{21} + a2.E_{22} \end{cases}$$

On remarquera que dans la calibration mono port $a2 = b2.\Gamma_d$. On peut ici utiliser un diagramme de flux ou simplement développer les équations précédentes.

$$b2 = a1.E_{21} + b2.\Gamma_d.E_{22} = -\frac{(E_{21}.a1)}{E_{22}.\Gamma_d - 1}$$
$$b1 = a1.E_{11} + \Gamma_d.E_{12}.\frac{-E_{21}.a1}{E_{22}.\Gamma_d - 1} = \frac{a1.(E_{11}.E_{22}.\Gamma_d - E_{12}.E_{21}.\Gamma_d - E_{11})}{E_{22}.\Gamma_d - 1}$$
$$\frac{b1}{a1} = \frac{\Gamma_d.(E_{11}.E_{22} - E_{12}.E_{21}) - E_{11}}{E_{22}.\Gamma_d - 1}$$

Dans ce cas de figure la caracterisation complete de la matrice d'erreur n'est pas importante, ce qui compte c'est de trouver des coefficients de compensation. En resolvant l'équation précédente pour Γ_d on peut trouver les inconnues regroupables en termes. Définissons Γ_m comme la mesure du rapport $\frac{b1}{a1}$

$$\Gamma_m = \frac{\Gamma_d.(E_{11}.E_{22} - E_{12}.E_{21}) - E_{11}}{E_{22}.\Gamma_d - 1}$$
$$\Gamma_d = \frac{\Gamma_m - E_{11}}{(E_{11}.E_{22} - E_{12}.E_{21}) - E_{22}.\Gamma_m}$$

Γ_d est exprimable en fonction de 3 termes:

- E_{11}
- E_{22}
- $(E_{11}.E_{22} - E_{12}.E_{21})$

Définissons $\Delta = (E_{11}.E_{22} - E_{12}.E_{21})$.

$$\Gamma_d = \frac{\Gamma_m - E_{11}}{\Delta - E_{22}.\Gamma_m}$$

Nous avons donc une expression de Γ_d en fonction de 3 inconnues. Il est donc possible de compenser les erreurs en réalisant 3 mesures sur des calibres arbitraires connus.

3.2 Equation générique

Définissons une fonction de Γ_d retournant Γ_m, cette fonction servira de base au calcul des coefficients de correction:

$$f(\Gamma_d) = \frac{\Delta.\Gamma_d - E_{11}}{\Gamma_d.E_{22} - 1}$$

L'étape suivante sera donc de choisir 3 calibres connus, pour réaliser 3 mesures de référence ainsi qu'extraire les coefficients de calibration.

3.3 Calibration SOL - Short Open Load

Un exemple courant de calibration pour les mesures coaxiales est la calibration SOL(T), dans ce cas précis les calibres utilisés sont une charge adaptée (généralement 50Ω), un court-circuit et un circuit ouvert.

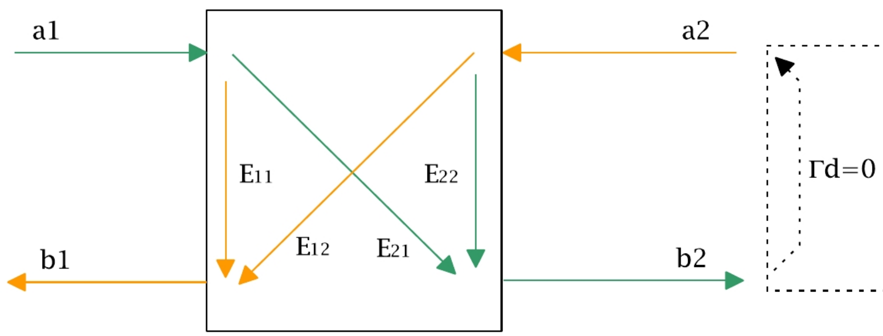


Figure 1: Schema charge adaptée

Dans le cas de la charge adaptée le coefficient de réflexion est 0:

$$\Gamma_{ml} = f(0) = E_{11}$$

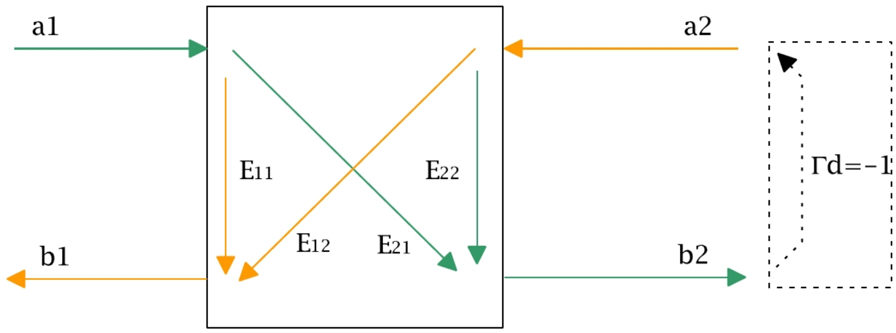


Figure 2: Schema court-circuit

Dans le cas du court-circuit le coefficient de réflexion est -1:

$$\Gamma_{ms} = f(-1) = \frac{-\Delta - E_{11}}{-E_{22} - 1}$$

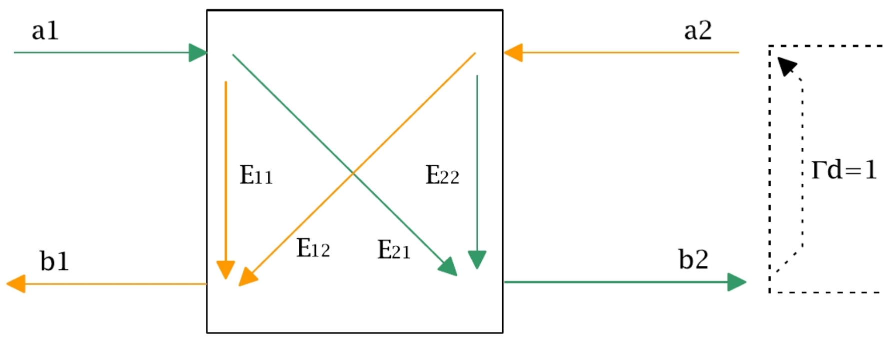


Figure 3: Schema circuit ouvert

Dans le cas du court-circuit le coefficient de réflexion est 1:

$$\Gamma_{mo} = f(1) = \frac{\Delta - E_{11}}{E_{22} - 1}$$

Ces trois mesures forment un systèmes de 3 équations à trois inconnues:
$\begin{cases} \Gamma_{ml} & = E_{11} \\ \Gamma_{ms} & = \frac{-\Delta - E_{11}}{-E_{22}-1} \\ \Gamma_{mo} & = \frac{\Delta - E_{11}}{E_{22}-1} \end{cases} => \begin{cases} E_{11} & = \Gamma_{ml} \\ E_{22} & = -\frac{-\Gamma_{ms} - \Gamma_{mo} + 2.\Gamma_{ml}}{\Gamma_{mo} - \Gamma_{ms}} \\ \Delta & = -\frac{\Gamma_{ml}.(\Gamma_{ms} + \Gamma_{mo}) - 2.\Gamma_{mo}.\Gamma_{ms}}{\Gamma_{mo} - \Gamma_{ms}} \end{cases}$

Il est possible maintenant de définir Γ_d en fonction d'une mesure Γ_m et des trois mesures de calibration.

$$\Gamma_d = \frac{\Gamma_m - E_{11}}{\Delta - E_{22}.\Gamma_m}$$

4 Calibration 2 port

4.1 Modèle

ICI SCHEMA VNA 2 PORT
On a donc 3 matrices (1 matrice d'erreur par port et la matrice du DUT) ainsi qu'un certains nombres de chemins paralleles qui corespondent au couplage entre port et aux defauts d'isolation.
PRESENTATION DU SYSTEME D'EQUATION

4.1.1 Traversée

En développant le système de paramètres S concernant la mesure traversante on obtient:
DEFINIR SYSTEME
Définissons $\Gamma_{M21} = \frac{b4}{a1}$ et $\Gamma_{M12} = \frac{b1}{a4}$:

$$\Gamma_{M21} = \frac{D_{21}.E1_{21}.E2_{21}}{((D_{11}.D_{22} - D_{12}.D_{21}).E1_{22} - D_{22}).E2_{11} - D_{11}.E1_{22} + 1}$$
$$\Gamma_{M12} = \frac{D_{12}.E1_{12}.E2_{12}}{((D_{11}.D_{22} - D_{12}.D_{21}).E1_{22} - D_{22}).E2_{11} - D_{11}.E1_{22} + 1}$$

On peut se rendre compte que $E1_{21}$ et $E2_{21}$ sont sur le même chemin dans le cas d'une mesure Γ_{M12} et que $E2_{12}$ et $E1_{21}$ sont liés sur le même chemin dans une mesure Γ_{M21}.

4.1.2 Réflexion

PARTIE A REVOIR PAS SUR QU'ELLE SOIT NECESSAIRE LA CAL 1 PORT DONNE LE X_{22}. UTILE POUR DETECTER UN MISMATCH DE PORT ?
Le même developpement peut se faire pour la mesure de réflexion de chaque port (réfexion du port 2 sur le port 1 et inversement).
Définissons $\Gamma_{M11} = \frac{b1}{a1}$ et $\Gamma_{M22} = \frac{b4}{a4}$:

$$\Gamma_{M11} = \frac{(((D_{11}.D_{22} - D_{12}.D_{21}).E1_{11}.E1_{22} + (D_{12}.D_{21} - D_{11}.D_{22}).E1_{12}.E1_{21} - D_{22}.E1_{11}).E2_{11} - D_{11}.E1_{11}.}{(((D_{11}.D_{22} - D_{12}.D_{21}).E1_{22} - D_{22}).E2_{11} - D_{11}.E1_{22} + 1)}$$
$$\Gamma_{M22} = \frac{((((D_{11}.D_{22} - D_{12}.D_{21}).E1_{22} - D_{22}).E2_{11} - D_{11}.E1_{22} + 1).E2_{22} + ((D_{12}.D_{21} - D_{11}.D_{22}).E1_{22} +}{(((D_{11}.D_{22} - D_{12}.D_{21}).E1_{22} - D_{22}).E2_{11} - D_{11}.E1_{22} + 1)}$$

4.2 Equations génériques

Nous rédfinissons le sytème d'équation en ajoutant les mesures traversantes et nous obtenons donc 4 relations:

$$\begin{cases} f_{11}(D_{11}) & = \frac{E1_{11}*E1_{22}*D_{11} - E1_{12}*E1_{21}*D_{11} - E1_{11}}{E1_{22}*D_{11} - 1} \\ f_{22}(D_{22}) & = \frac{D_{22}*E2_{11}*E2_{22} - D_{22}*E2_{12}*E2_{21} - E2_{22}}{D_{22}*E2_{11} - 1} \\ f_{12}(D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}) & = \frac{D_{12}*E1_{12}*E2_{12}}{((D_{11}*D_{22} - D_{12}*D_{21})*E1_{22} - D_{22})*E2_{11} - D_{11}*E1_{22} + 1} \\ f_{21}(D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}) & = \frac{D_{21}*E1_{21}*E2_{21}}{((D_{11}*D_{22} - D_{12}*D_{21})*E1_{22} - D_{22})*E2_{11} - D_{11}*E1_{22} + 1} \end{cases}$$

4.3 Calibration SOLT - Short Open Load Through

En plus des 6 mesures de calibration nous rajoutons deux mesures traversantes entre les deux ports avec un calibre connu. Nous considérons le calibre **through** comme parfait: Through $= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

{