

Petit problème de ligne HF

Robert BERRANGER, F5NB.

Première partie, posons le problème

Hier, une personne ressemblant beaucoup à F6FQX m'a apporté un paquet en me disant de ne pas craindre de l'ouvrir et d'en faire un bon usage. Celui-ci contient deux boîtes fermées (soudées), un câble coaxial RG213 de 1 m de long, de la connectique, plus un mot étrange me proposant un marché si je réponds correctement à une question concernant un montage particulier de tout ce matériel. J'ai décidé de me faire aider et c'est pourquoi je vous propose le petit problème.

Dans le colis, il y a le schéma de la figure 1 expliquant la manière de connecter les éléments.

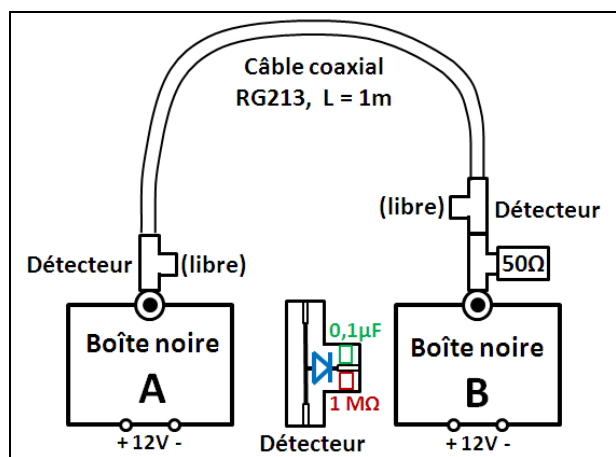


Figure 1 : Montage pour la mesure

Bien sûr, je n'ai pas le droit d'ouvrir les boîtes "noires" pour voir ce qu'il y a dedans. L'une d'elle contient un oscillateur 50 MHz que je dois alimenter en 12V pour qu'il sorte 16 dBm sur une charge de 50 Ω. L'autre contient une simple résistance de charge de 50 Ω et les bornes d'alimentation sont shuntées par une résistance qui consomme la même puissance que l'oscillateur. Après avoir connecté tous ces éléments et raccordé l'alimentation, je ne dois plus **en aucun cas** modifier le système. Ensuite je dois me munir d'un contrôleur universel classique (électronique), utilisé en voltmètre DC, calibre 2V.

Maintenant la question :

On connecte le contrôleur d'une façon particulière, puis on ne touche plus à rien. Une fois l'alimentation mise en marche, on fait **une seule lecture** au voltmètre. **Cette seule lecture doit suffire à déterminer dans quelle boîte se trouve l'oscillateur.** Naturellement, la réponse n'est valide que si on l'argumente "scientifiquement".

Voici pour ma part l'enjeu du problème : Si ma réponse est bonne, je gagne deux années d'espérance de vie. Si ma réponse est mauvaise, j'en perds une. Alors je me demande si la personne qui m'a livré le colis est un ange ou un démon pour se donner tant de pouvoir. Puis

je me dis que c'est peut-être vraiment F6FQX. En effet, cette promesse ne lui coûterait rien car je n'ai aucun moyen de contrôler qu'elle se vérifiera, vu que je ne connais pas mon destin actuellement (*). Mais dans le doute, je préfère demander l'avis de mes amis radioamateurs par l'intermédiaire de Radiio-REF.

(*) *F6FQX se réfèrerait sans doute à cette étude faite par un groupe de gériatres qui a conclu que les retraités qui continuaient à faire travailler intellectuellement leurs neurones augmentaient significativement leur espérance de vie.*

Deuxième partie, les réponses...

Réponses des OM :

Les réponses peuvent se classer en trois catégories.

Dans la première, on trouve ceux qui préconisent de connecter le voltmètre aux bornes, soit de la boîte A, soit de la boîte B. Ensuite, en partant de la puissance de sortie de l'oscillateur, ils calculent les tensions que l'on aurait dans les deux cas possibles et la lecture du voltmètre nous indique lequel est correct.

Le problème, c'est qu'ils rajoutent une hypothèse concernant l'impédance de la source. Par exemple, une source de courant parfaite. Or, l'impédance de la source n'est pas spécifiée dans l'énoncé du problème, et une réponse bonne pour une source de courant est fautive pour une source de tension.

Dans la deuxième catégorie, on trouve ceux qui utilisent les pertes dans le coaxial. Ils branchent leur voltmètre en différentiel entre les deux détecteurs, le "+" côté boîte A, et le "-" côté boîte B. Comme les pertes entraînent une diminution de tension entre l'entrée et la sortie, le signe de cette différence de tension indique où est l'oscillateur. C'est une erreur. En effet, cela fonctionnerait si la ligne était toujours chargée par 50Ω . Or ce n'est pas le cas, à cause de la charge supplémentaire de 50Ω connectée côté boîte B.

Dans la troisième catégorie, on trouve la bonne réponse, celle que je vais développer.

Mais ceux qui ont répondu avant le complément de mai n'ont pas vu le piège "diabolique" qui s'était glissé dans la figure 1 du mois d'avril.

En effet, les détecteurs n'étaient pas chargés. Ceci n'est pas un problème si on fait la mesure aux bornes d'un seul détecteur. Mais si on fait la mesure en différentiel, alors on mesure toujours 0V, et il n'y a pas de réponse valide au problème. En effet, si une ddp existe entre les deux détecteurs, aucun courant ne peut circuler dans l'impédance du voltmètre car la diode du côté Umin est en inverse et aucun courant ne peut la traverser.

Ce n'était pas prévu et je n'ai vu l'erreur que lors de la publication d'avril. C'est pourquoi j'ai ajouté une résistance de charge de $1\text{ M}\Omega$ dans les détecteurs modifiés du complément de mai.

Ma réponse

J'ai écrit qu'elle ne demandait qu'une seule phrase, la voici :

"Si, en connectant le voltmètre en différentiel entre les détecteurs, on ne mesure que quelques mV, alors la ligne quart d'onde est chargée par 50Ω (ROS 1) et l'oscillateur est dans la boîte B, et si l'on mesure plus de 700 mV, alors la ligne est chargée par 25Ω (ROS 2) et l'oscillateur est dans la boîte A."

Raisonnement sans papier, ni crayon, ni calculatrice (pour les forts en calcul mental).

On remarquera que :

1 - A 50 MHz, $\lambda = 6\text{m}$ ($300/50$) et la longueur électrique du coaxial est de $1\text{m} / 0,667 = 1,5\text{m}$, soit le quart d'onde. La ligne a donc des propriétés particulières que nous allons utiliser.

2- Si la charge $50\ \Omega$ est dans la boîte A, la ligne est chargée par $50\ \Omega$ et le ROS est de 1. Alors, la ligne fonctionne en onde progressive et les tensions détectées à son entrée et à sa sortie sont les mêmes à quelques mV près, à cause des (très faibles) pertes.

3 - Si la charge $50\ \Omega$ est dans la boîte B, la charge supplémentaire de $50\ \Omega$ est en parallèle avec elle et la ligne ($Z_0 = 50\ \Omega$) est chargée par $25\ \Omega$ ($50 // 50$) ce qui entraîne un ROS de 2 ($50\ \Omega / 25\ \Omega$). Alors la ligne est l'objet d'une onde stationnaire de rapport 2. Comme la charge est inférieure à Z_0 et est purement résistive, elle se trouve à un nœud (minimum) de tension. La ligne étant longue du quart d'onde, son entrée est à un ventre (maximum) de tension et le rapport entre les deux est de 2 (autre définition du ROS : $\text{ROS} = V_{\text{max}} / V_{\text{min}}$). On peut faire une estimation grossière de ces tensions en partant de la puissance que la source débiterait sur une charge de $50\ \Omega$, soit $+16\ \text{dBm}$ ($= 40\ \text{mW}$, sachant que $0\ \text{dBm} = 1\ \text{mW}$). Avec un ROS de 2, la source serait chargée par $100\ \Omega$ ($25\ \Omega \times 2^2$), et la tension serait égale à [racine de ($0,04 \times 100$)] = $2\ \text{V}$, soit $2,8\ \text{V}$ après détection crête. La tension à la charge serait la moitié, soit $1,4\ \text{V}$, et la tension mesurée au voltmètre DC serait de $1,4\ \text{V}$ également. En se donnant une grosse marge de deux fois en fonction des conditions réelles du système, on obtient une tension différentielle minimum de $0,7\ \text{V}$.

Donc on peut affirmer que si la tension mesurée en différentiel est supérieure à $700\ \text{mV}$, alors la charge est bien dans la boîte B.

C'est beaucoup plus long à écrire qu'à penser...

Démonstration détaillée

Supposons que la boîte noire B contienne l'oscillateur et la boîte A la charge $50\ \Omega$. Nous obtenons le schéma de la figure 2 (source de tension pour simplifier).

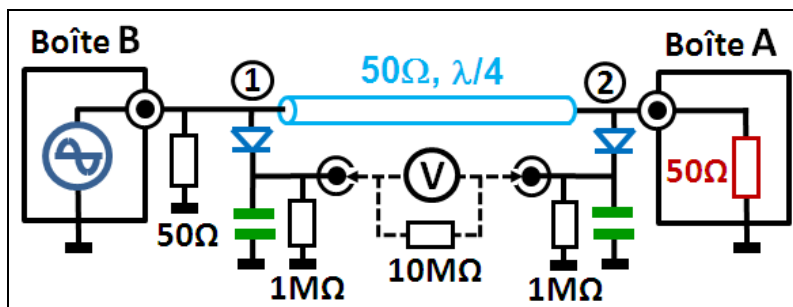


Figure 2 : Hypothèse 1 : boîte A = charge

Supposons maintenant que ce soit l'inverse. Nous obtenons le schéma de la figure 3.

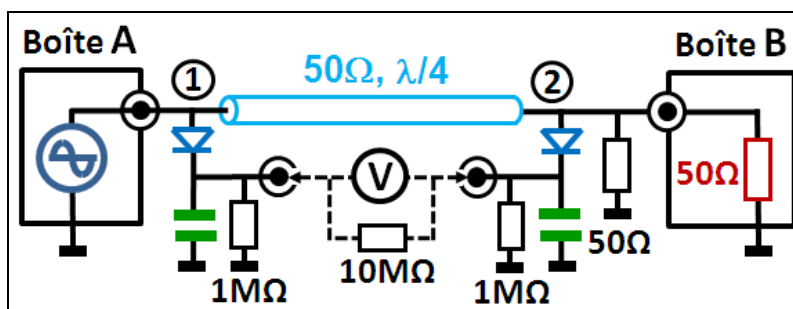


Figure 3 : Hypothèse 2 : boîte B = charge

On aura noté que le câble coaxial (genre RG213) a un diélectrique en polyéthylène avec un coefficient de vélocité de 0,667. Alors, 1 m de ce câble aura à 50 MHz une longueur électrique de 1,5 m ($1/0,667$), soit $\lambda/4$ ($\lambda = 300/50 = 6$ m). Il a une impédance de 50Ω et pour un mètre de ce câble, à 50 MHz les pertes sont négligeables dans ce problème.

Dans les deux cas, on connectera le contrôleur universel, utilisé en voltmètre DC-2V, entre les points (1) et (2), soit aux pinoches centrales à la sortie des deux détecteurs (mesure différentielle). Noter que la polarité de la mesure n'a pas d'importance.

Puis on met en route l'alimentation... (suspense !)

Premier cas : le voltmètre mesure au plus quelques mV.

Dans ce cas, nous sommes dans la configuration de la figure 2, c'est-à-dire que la boîte B contient l'oscillateur et la boîte A la charge.

En effet, la ligne étant chargée par son impédance caractéristique fonctionne en onde progressive. Cela veut dire que les tensions HF à son entrée et à sa sortie sont **les mêmes** à quelques millivolts près à cause des pertes dans le coaxial. Peu importe alors ces tensions.

Deuxième cas : le voltmètre mesure plus de 700 mV.

Dans ce cas, nous sommes dans la configuration de la figure 3, c'est-à-dire que la boîte A contient l'oscillateur et la boîte B la charge.

En effet, la ligne $Z_0=50\Omega$ étant chargée par une impédance Z_c de 25Ω (50Ω en parallèle sur la charge 50Ω) est le siège d'une onde stationnaire de rapport 2 ($50/25$). Comme elle a une longueur de $\lambda/4$, elle présente à son entrée une impédance égale à Z_0^2 / Z_c , soit $2500 / 25 = 100 \Omega$ (en négligeant les pertes très faibles).

La puissance transmise W étant constante dans la ligne et les impédances étant "réelles", la tension à l'entrée U_e sera deux fois plus importante que celle à la sortie U_s ($U = \text{racine de } [W \times R]$). Le voltmètre différentiel indiquera donc une tension correspondant *grosso modo* à U_s car $U_e = 2 \times U_s$. Compte tenu de la puissance de sortie de l'oscillateur, on présume que cette tension sera plus importante que 700 mV, largement supérieure aux quelques mV de l'autre cas.

Nous pourrions aller plus loin et essayer de calculer cette tension différentielle ⁽¹⁾, mais nous allons nous heurter à un problème qui provient de l'impédance interne de la source qui est inconnue. Nous pouvons dans un premier temps supposer qu'elle soit de 50Ω .

Avec un ROS de 1, nous aurions une source de f.é.m. qui débiterait dans une résistance interne de 50Ω en série avec une charge de 50Ω dissipant 40 mW. Un calcul facile donne une f.é.m. de 2,828 V.

Avec un ROS de 2, nous avons une source de f.é.m. de 2,828 V qui débite dans une résistance interne de 50Ω en série avec une charge de 100Ω . La tension aux bornes de la charge (entrée de la ligne) est alors de $(2,828 / 150 \times 100) = 1,886$ V, et la puissance transmise est égale à $(1,886^2 / 100) = 35,56$ mW, soit un facteur de transmission de $(35,56 / 40) = 0,889$ ⁽²⁾.

Nous obtenons donc :

- $U_e = 1,886 V_{HF}$, soit 2,517 V DC $[(1,886 \times 1,414) - 0,15]$ avec 1,414 = facteur de détection crête et 0,15V = seuil de la diode.
- $U_s = \text{racine de } [0,03556 \times 25] = 0,943 V_{HF}$, soit 1,183 V DC (en négligeant les pertes dans le coaxial).

Le voltmètre indiquerait donc une tension de 1,334 V à quelques mV près car les diodes de détection ne débitent pas le même courant et ne sont pas forcément identiques. Par ailleurs, il y aura quand même quelques pertes.

Maintenant, voyons le cas extrême où l'impédance de source est nulle (source de tension parfaite). Nous aurions :

- $U_e = U_{fem} = \text{racine de } [0,04 \times 50] = 1,414 V_{HF}$, soit 1,85 V DC.
- Puissance transmise = $1,414^2 / 100 = 20 \text{ mW}$ ($P=U^2/R$).
- $U_s = \text{racine de } [0,02 \times 25] = 0,707 V_{HF}$, soit 0,85 V DC.

Le voltmètre indiquerait donc une tension de 1 V à quelques mV près.

Poursuivons avec l'autre cas extrême où l'impédance de source est infinie (source de courant parfaite). Nous aurions :

- $U_e = (\text{racine de } [0,04 / 50]) \times 100 = 2,828 V_{HF}$ ⁽³⁾, soit 3,85 V DC ($I_e = I_{fem}$, car source de courant).
- Puissance transmise = $2,828^2 / 100 = 80 \text{ mW}$ ($P=U^2/R$).
- $U_s = \text{racine de } [0,08 \times 25] = 1,414 V_{HF}$, soit 1,85 V DC.

Le voltmètre indiquerait donc une tension de 2 V à quelques mV près.

Ainsi, en fonction de l'impédance interne de la source, la tension différentielle lue sur le voltmètre DC serait comprise entre 1 et 2 V, donc bien au dessus des 700 mV (minimum estimé "à vue de nez").

Noter que si le ROS de 2 avait été obtenu avec une charge de 100 Ω au lieu de 25 Ω , les rapports de puissances auraient été inversés entre source de tension et source de courant. On voit alors qu'il faut faire très attention quand on calcule la puissance transmise. Elle est très dépendante de l'impédance de la source ⁽⁴⁾.

Pour finir on notera que l'on est obligé de détecter les tensions HF afin de supprimer le déphasage entrée/sortie qui, étant de 90°, fausserait une mesure différentielle faite, par exemple, à l'aide d'un oscilloscope.

Merci à ceux qui ont répondu au petit problème :

F5EDP, F6CSS, F6GKP, F6CAX, F4RGT et F1BOH.

Je peux prédire à tous ces OM un gain de deux ans d'espérance de vie. En effet, peu importe que la réponse soit bonne, ce qui compte, c'est de faire fonctionner ses neurones...

Merci également à mes complices : F6FQX et F6BPS.

Annexe : Historique du petit problème

J'étais en train d'écrire la série des "Comment ça marche ?" sur les lignes et nous avons des échanges sur le sujet avec F6FQX et F6BPS (tous deux anciens formateurs à F6KRK). F6FQX a alors exposé ce petit problème qu'il posait à la fin de son cours sur les lignes :

Soit une boîte noire qui contient un oscillateur HF à 25 MHz et soit une boîte noire identique extérieurement qui contient une charge 50 Ω .

Question : Comment connaître le contenu des boîtes en utilisant le matériel de mesure du labo de F6KRK (appareils et accessoires) et en effectuant une liaison particulière entre elles ?

Réponse : On les relie avec deux cordons coaxiaux de 1m (RG58) en série avec deux T de mesure au ras des boîtes plus un autre T et une charge 50 Ω en parallèle sur une boîte (on a ainsi réalisé le montage de la figure 1 en remplaçant les détecteurs par des T de mesure). Puis

on effectue deux mesures successives sur les T avec un oscilloscope muni d'une sonde haute impédance. Si les mesures sont égales, l'oscillateur est dans la boîte côté charge 50Ω supplémentaire et si on mesure deux tensions différentes (*grosso modo* dans un rapport de 2), alors c'est la charge qui est dans cette boîte.

J'ai tout de suite pensé à un petit problème pour Radio-REF, mais je le trouvais un peu trop facile. Alors, après une analyse logique du système, je me suis dit qu'une seule mesure différentielle devrait suffire, à condition de détecter les tensions HF. Et c'était parti !

Notes.

- (1) Pour $Z_0=50\Omega$, $Z_c=25\Omega$ (ROS 2) et $L=\lambda/4$.
- (2) 0,889 est le coefficient de transmission en puissance pour un ROS de 2. Il peut être relevé dans une table de correspondance des différentes valeurs liées au ROS. Dans notre cas, nous retrouverions le même coefficient pour une charge ramenée de 25Ω au lieu de 100Ω , et pour toutes les impédances complexes résultant d'un ROS de 2. Mais attention, ce coefficient n'est valable que si la source est adaptée à la ligne, ce qui n'est jamais précisé, d'où certaines confusions. Je rappelle que le ROS est indépendant de l'impédance de la source.
- (3) $I_{source} = \text{racine de } (W/R)$, soit $28,28 \text{ mA}_{HF}$ pour 40 mW dans 50Ω . Alors $U_e = 0,02828 \times 100 = 2,828 \text{ V}_{HF}$.
- (4) Il faut aussi tenir compte des limitations de la source en tension et en courant et surtout de l'ALC HF pour un émetteur. J'ai déjà commis plusieurs articles sur ce sujet dans Radio-REF.