

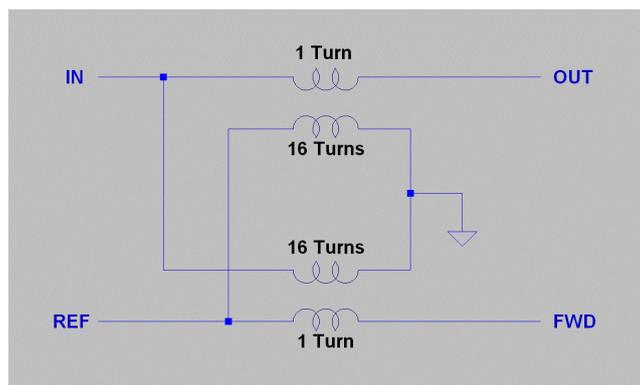
Construction d'un coupleur directionnel HF

Par K6JCA, traduction LIBRE de F1EHX.

J'ai présenté précédemment d'une partie de la théorie qui étudie les coupleurs directionnels à éléments discrets en HF. (<http://k6jca.blogspot.com/2015/01/notes-on-directional-couplers-for-hf.html>)

Maintenant, je vais en construire un.

J'utilise la topologie Tandem Coupler (voir post précédent). Voici ce à quoi ressemblera le circuit :



Pourquoi 16 tours ?

Je veux assez de tours sur le transformateur pour présenter une haute impédance sur 160 mètres, mais pas trop de tours pour ne pas qu'ils affectent la performance sur 6 mètres. Donc, je veux minimiser le nombre de tours utilisés et essayer de trouver un noyau avec un haut mu. Mais trop peu de tours signifie également que les terminaisons sur les ports FWD et REF devront dissiper une puissance plus élevée.

Avec cela en tête, mon objectif pour le facteur de couplage (couplage du port d'entrée au port Forward) est de -24 dB, ce qui signifie 16 tours sur un transformateur dont le primaire est un seul tour (c'est-à-dire $20\log(16) = 24$).

A noter que si le couplage entre le port IN et le port FWD est de -24 dB, la puissance au port FWD sera $P(\text{in}) * 0,004$ (c'est-à-dire 24 dB plus faible). Donc, si la puissance au port IN est de 100 watts, il y aura 0,4 watts au port FWD (important parce que la charge de 50 ohms sur ce port doit être capable de dissiper cette puissance).

Mais quels noyaux utiliser ? Allons dans les tiroirs et voyons ce que je peux trouver ...

En voici quelques-uns que j'ai déterrés. Je crois que ceux-ci sont principalement utilisés pour les applications d'atténuation RFI, mais ils sont faits de matériaux de type 43. Voyons voir s'ils vont convenir.



Notez qu'ils sont en ferrite, et non pas en poudre de fer (le lien à la datasheet est à la fin de ce post). Selon l'article QEX de N8LP (voir le lien à la fin), les noyaux de ferrite sont plus sujets à la saturation que les noyaux de fer en poudre. Je ne sais pas quelle puissance ces noyaux vont accepter - je vais devoir expérimenter.

[Mise à jour: plus d'infos sur l'application de ces noyaux ici :

<http://k6jca.blogspot.com/2015/07/antenna-auto-tuner-design-part-5.html>

<http://k6jca.blogspot.com/2015/12/antenna-auto-tuner-design-part-8-build.html>]

Je vais avoir besoin d'une inductance suffisante à 1,8 MHz pour m'assurer que le transformateur de détection de tension présente une impédance élevée par rapport à 50 ohms. J'ai bobiné des bobines d'essai sur deux de ces noyaux, chacun avec 16 tours de fil, puis j'ai mesuré leur inductance (ce ne sont pas les bobines avec lesquelles je suis en train de construire le coupleur). Ils étaient de 1,1mH et 0,7mH, respectivement (mesurés sur GenRad 1657 Digibridge, à 1KHz). Je ne sais pas pourquoi il y a une différence d'inductance, mais je soupçonne que c'est dû à une variation de μ dans le noyau de ferrite.

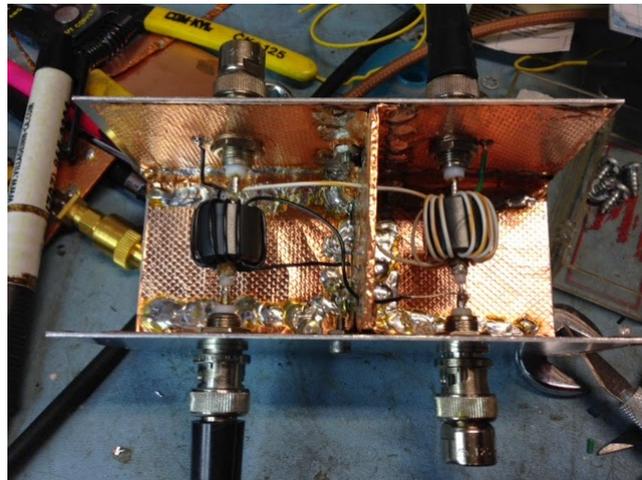
Un autre paramètre important du coupleur directionnel est la directivité. Ici, la directivité est définie comme le couplage des ports OUT vers REF moins le couplage des ports IN vers REF. La directivité affecte la précision du SWR - une mauvaise directivité signifie que le signal «direct» entre dans le port «réfléchi» et altère la lecture. Donc, mon objectif est d'avoir une directivité d'au moins -40 dB sur la gamme HF (1-30 MHz, et idéalement jusqu'à 54 MHz, mais je suis aussi prêt à sacrifier un peu à 6 mètres, si ça me donne de meilleures performances à 30 MHz et dessous).

Quelques notes de construction :

- Pour l'enroulement "un tour" j'ai utilisé un morceau de Thermax RGU-142 à travers chaque transformateur.
- La puissance maximale de ce câble coaxial est de 2 400 watts à 100 MHz. Pas mal!
- La tension de fonctionnement maximale de ce coax est de 1400 V (pas sûr si c'est un pic V ou une spécification RMS). Notez que, pour un SWR de 1: 1, 100 watts égal 100V, crête, mais à un SWR de 10: 1, la tension de crête devient 1000V. Et à 2000 watts et 1: 1 de SWR, la tension est de 450 volts. Donc, avec un SWR de 10: 1, cela deviendrait 4500 volts !.

- Le revêtement extérieur du câble coaxial a été laissé. Le blindage est légèrement découvert aux deux extrémités (et étamé) afin que je puisse expérimenter quelle extrémité de l'écran coaxial doit être mis à la terre. Ne pas mettre à la terre les deux extrémités !
- J'ai utilisé du fil isolé au lieu de fil émaillé pour les enroulements secondaires du transformateur. La défaillance d'isolement est particulièrement importante pour le transformateur de tension, dont les 16 tours du secondaire sont sur le coax. Donc, si le SWR est de 10: 1, à 100 watts, il y aura 1000V, crête, à travers les enroulements de ce transformateur. Je ne suis pas sûr de pouvoir faire confiance à l'isolation émaillée pour ne pas tomber en panne.
- Dans le boîtier, j'ai ajouté une cloison centrale (fait d'un bout de PCB) entre les deux transformateurs. J'ai constaté à travers l'expérimentation que ce diviseur devrait entrer en contact avec les trois côtés du cas dans lequel je l'ai monté. C'était un problème parce que mon boîtier est en aluminium; Je ne peux pas le souder. J'ai donc revêtu l'intérieur du boîtier avec du ruban de cuivre et soudé le diviseur dessus. Remarque : toutes les "coutures" de la bande ont été soudées sur toute leur longueur.

Voici le résultat. Pour mes premiers tests, je vais appeler le port inférieur gauche le port IN, le port supérieur gauche est le port OUT (mais cela changera plus tard, comme vous le découvrirez plus loin ...)



Dans l'image ci-dessus, le port FWD (relatif au port IN) est le port inférieur droit et le port REF est le port supérieur droit.

Mesurer et améliorer le rendement :

Faisons quelques mesures avec un analyseur de réseau vectoriel (VNA). Voici ma configuration d'essai avec un HP 3577A et l'unité de paramètre S correspondante.



La directivité sera tout à fait importante, donc je veux voir ce que je peux faire pour minimiser le couplage entre le port IN et le port REF (parce que le couplage OUT-REF est fixé à -24 dB).

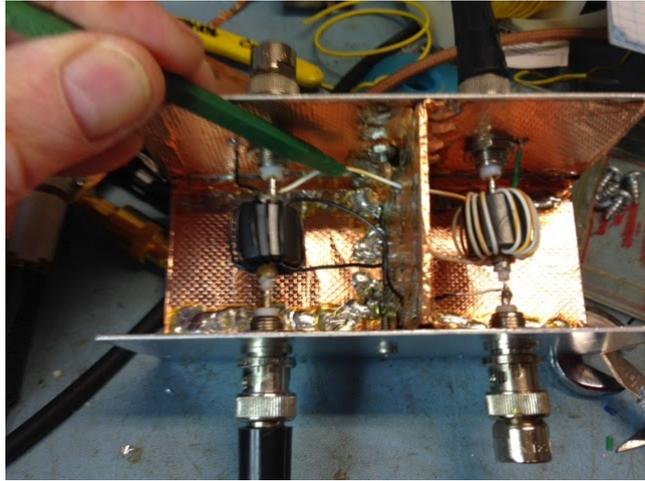
Avant de commencer à expérimenter, nous allons obtenir une ligne de base. Voici un graphe de couplage, port IN vers port REF, 0,1 - 100 MHz:



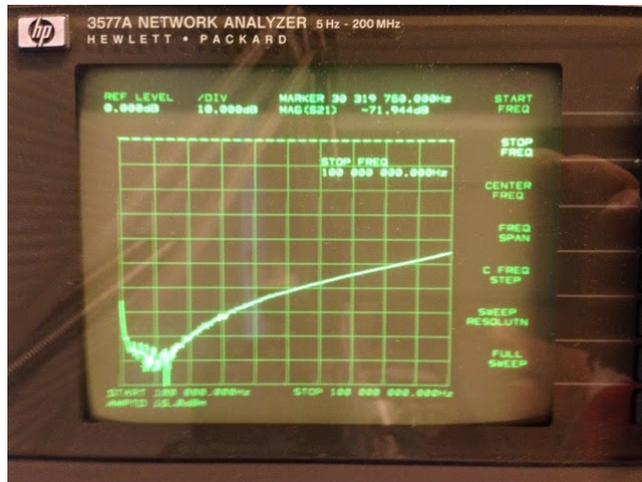
La directivité est le couplage montré ci-dessus réduit par le couplage direct (-24 dB pour 16 tours), donc il sera 24 dB plus mauvais que l'image ci-dessus.

Puis-je améliorer la directivité? Le temps d'expérimenter (c'est là que le design devient plus art que science). Voici quelques exemples de ce que j'ai essayé ...

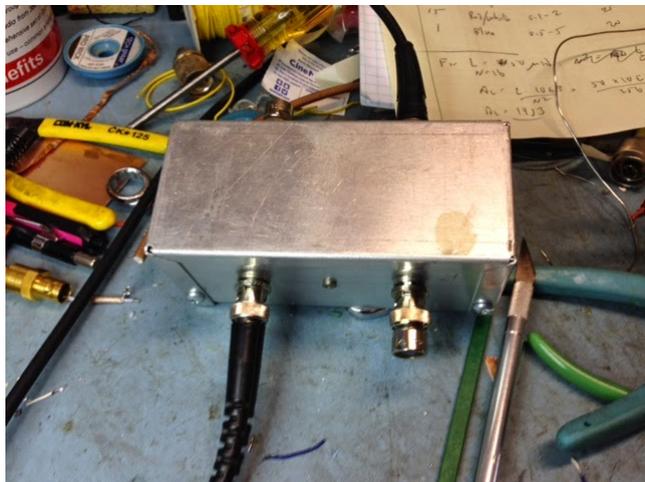
Si je déplace ce fil plus près du boîtier (à l'aide d'un bâton isolé) ...



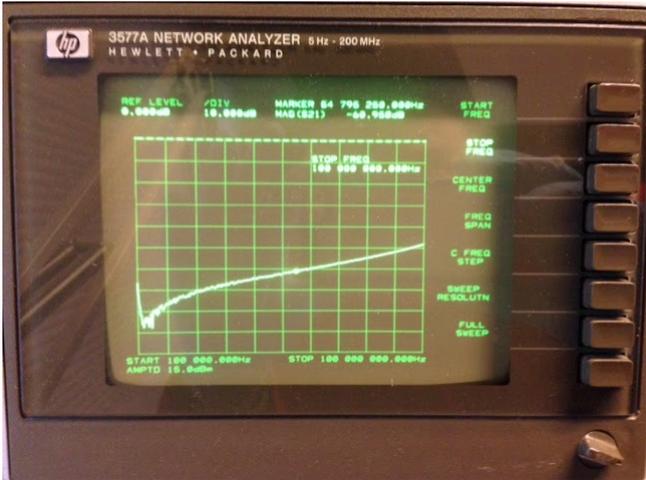
Il y a une amélioration. Le couplage est par exemple inférieur d'environ 5 dB à 30 MHz.



Donc, j'incorpore ce «gimmick» de routage des fils. Maintenant, plaçons le couvercle. Voici le couvercle, vissée.



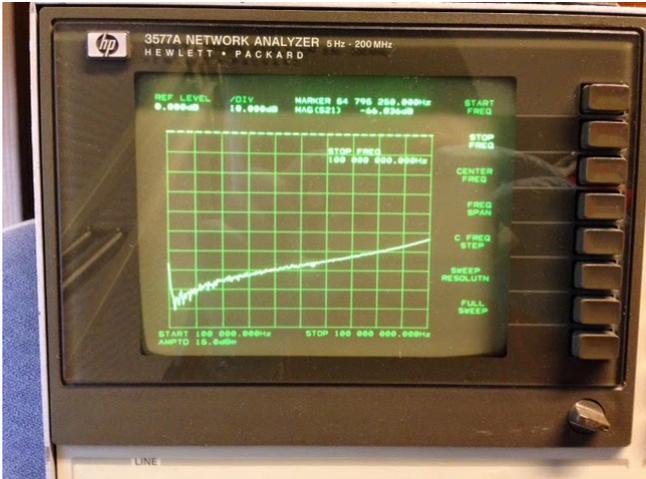
Notez que la réponse a empirée.



Mais, si je retire une seule vis ...



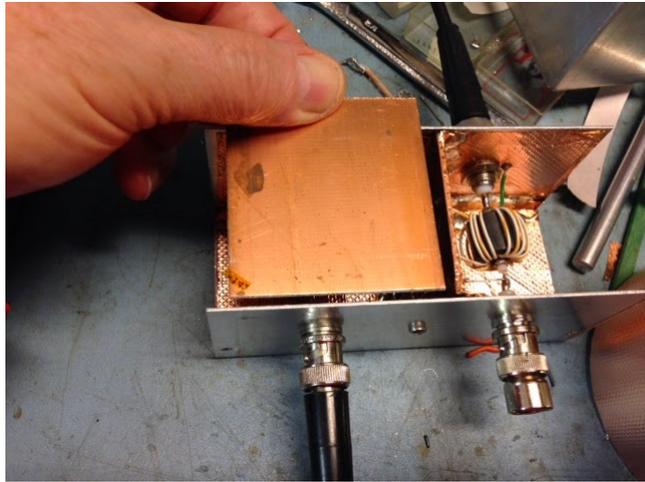
... il y a une amélioration !



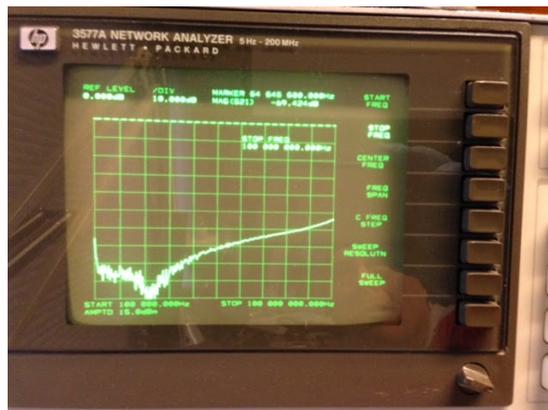
Bien !

C'est pourquoi la HF est un art - il est difficile de simuler ces types d'effets.

Un autre exemple d'effets parasites... comme je place une plaque de cuivre sur le dessus, en touchant un seul côté de la plaque, mais pas les deux côtés...



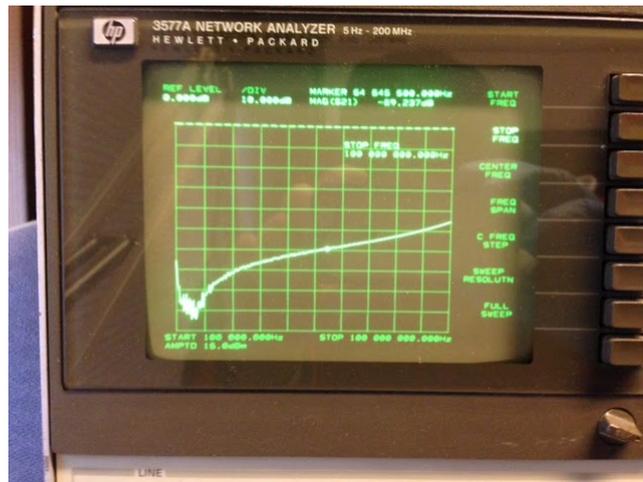
... les performances s'améliorent!



Mais si je continue à déplacer le cuivre à travers le boîtier jusqu'à ce qu'il touche aussi le côté opposé (chevauchant la séparation) ...



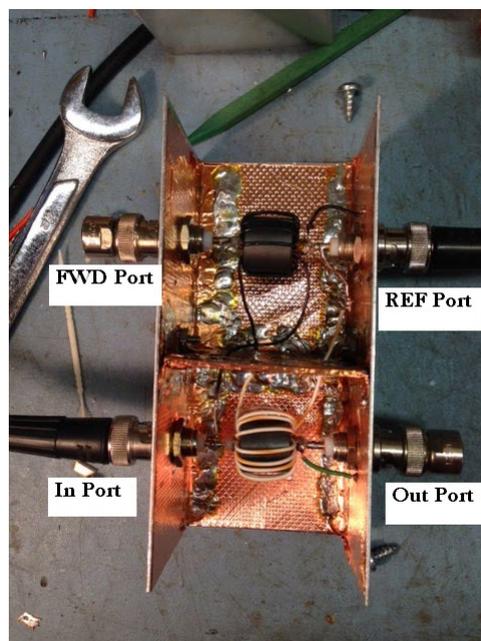
... la performance s'intensifie de 10 dB à 54 MHz!



Longue histoire courte ... après avoir passé beaucoup de temps à essayer d'améliorer la performance quand le boîtier a été fermé, j'ai finalement décidé que je n'étais pas vraiment avancé. Il était donc temps de passer à l'étape suivante : caractériser la performance du coupleur.

Mais, en faisant ces mesures de caractérisation, j'ai découvert que les ports ne sont pas tout à fait symétriques dans leur performance. Plus précisément, il existe une différence dans la directivité, selon le port que nous définissons comme notre port «IN».

Avec ces nouvelles données, j'ai redéfini la configuration de port pour maximiser la performance de directivité de 1 à 30 MHz. Voici les nouvelles attributions de ports :



Et voici les données de caractérisation du coupleur directionnel pour cette nouvelle configuration:

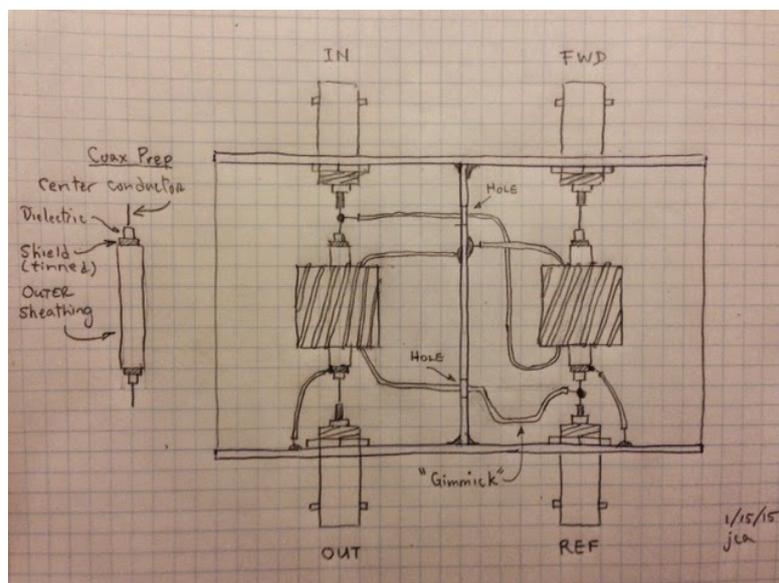
Directional Coupler Measurements, Tandem Coupler, 16 turns on 2643625002 Ferrite Core								
K6JCA								
14-Jan-15								
Frequency (MHz)	Insertion Loss, Input Port to Output Port, dB	Coupling, Input Port to FWD port, dB	Coupling, Input Port to REF port, dB	Coupling, Output Port to REF port, dB	Coupling, Output Port to FWD port, dB	Directivity (Input_to_REF - Output_to_REF), dB	Reverse Directivity (Output_to_FWD - Input_to_FWD), dB	
1	-0.06	-24.2	-92	-24.2	-82	-67.8	-57.8	
2	-0.05	-24.1	-93	-24.2	-88	-68.8	-63.9	
4	-0.06	-24.1	-94	-24.2	-87	-69.8	-62.9	
7	-0.04	-24.1	-95	-24.1	-82	-70.9	-57.9	
10	-0.04	-24.1	-92	-24.1	-79	-67.9	-54.9	
14	-0.04	-24.1	-85	-24.1	-76	-60.9	-51.9	
18	-0.04	-24.1	-79	-24.1	-74	-54.9	-49.9	
21	-0.04	-24.1	-77	-24.1	-72	-52.9	-47.9	
30	-0.04	-24.1	-70	-24.1	-69	-45.9	-44.9	
54	-0.05	-24.1	-59	-24.1	-61.5	-34.9	-37.4	
100	-0.1	-23.9	-44	-23.7	-46.6	-20.3	-22.7	
144			-29.6	-25.3		-4.3		

Notez que j'ai attribué les ports de sorte que les données de directivité avec le fond jaune soit sensiblement mieux que la «directivité inverse». En effet, dans mes applications, je vais appliquer l'alimentation au port IN et donc je veux minimiser tout couplage de cette puissance au port REF.

(Je ne sais pas pourquoi il y a une différence de directivité.) Mais si je veux que les performances supplémentaires à 54 MHz (environ 2,5 dB amélioration de la directivité), tout ce que je dois faire est d'échanger les connexions In et Out et échanger le FWD et REF).

Voici un dessin montrant les connexions de construction avec plus de détails:

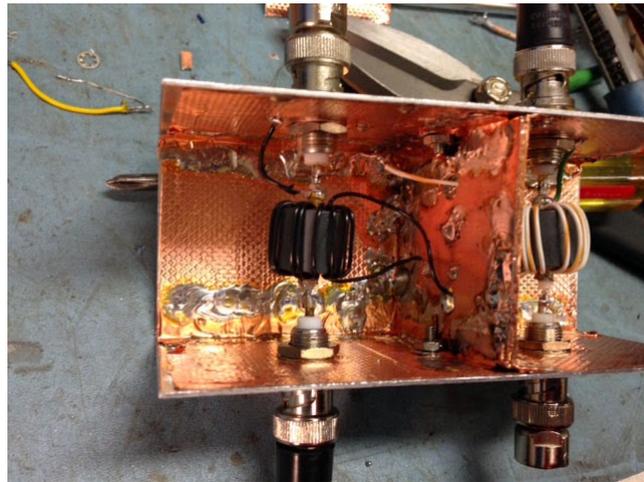
(clique sur l'image pour l'agrandir)



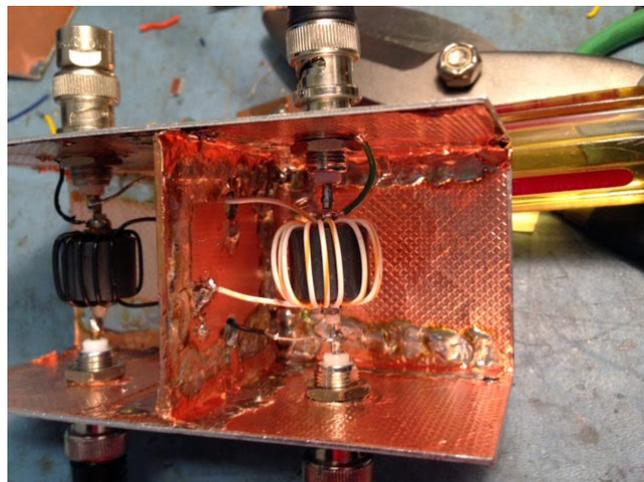
(Notez le "gimmick" de l'acheminement de l'un des fils plus près du mur du boîtier.)

Et quelques photos supplémentaires ...

Transformateur à détection de tension à gauche (connecté entre les ports REF (haut) et FWD (bas)) :



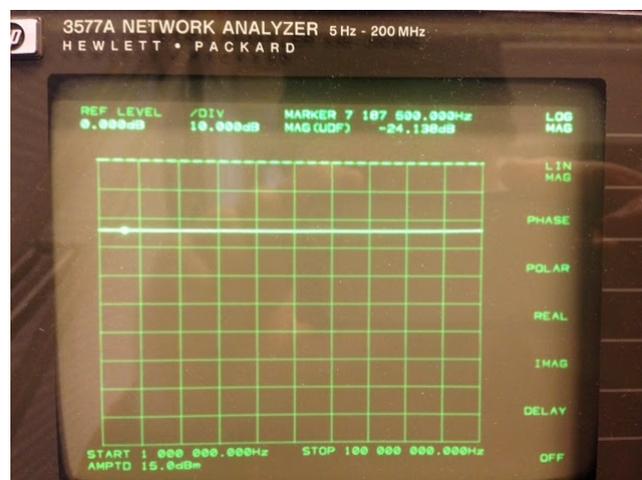
Transformateur à détection de courant à droite (connecté entre les ports OUT (haut) et IN (bas)):



Les tracés des quatre paramètres de couplage (1 - 100 MHz)

(Cliquez sur les images pour les agrandir)

IN-port to FWD-port:

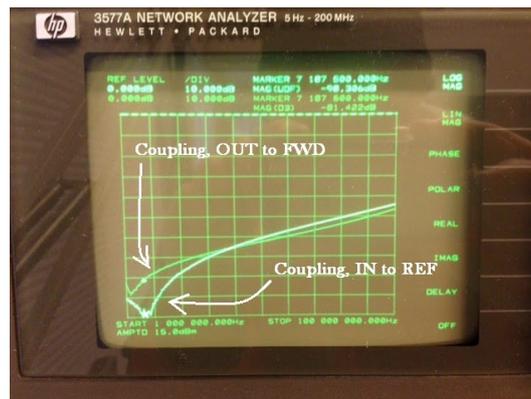


OUT-port to REF-port:

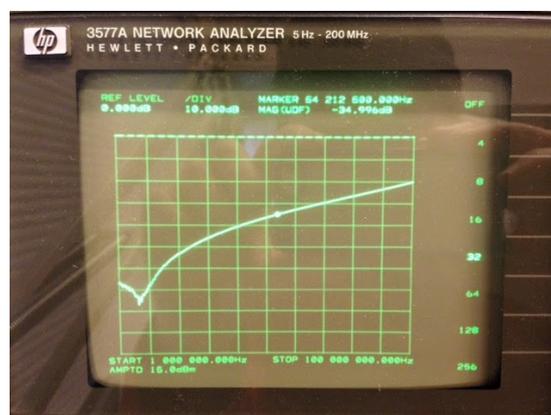


IN-port to REF-port and OUT-port to FWD-port :

Bien qu'ils doivent être identiques (ou proches), cette image montre que le couplage IN-port vers REF-port est sensiblement différent du couplage OUT-port vers FWD-port. Noter la différence à 30 MHz et au-dessous. Le couplage IN-port vers REF-port est significativement inférieur (ce que nous voulons!).



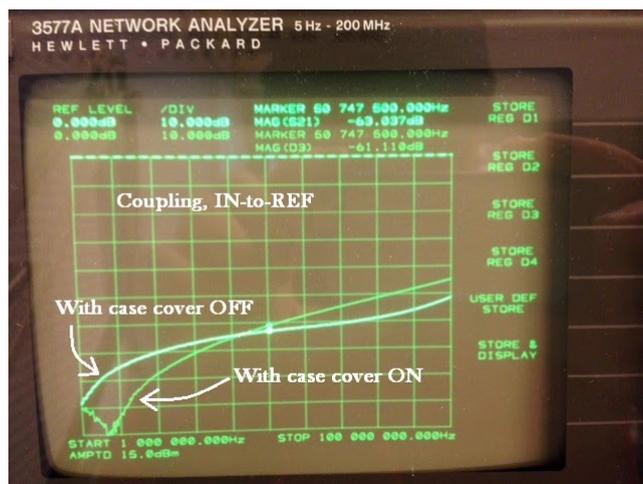
Un graphique montrant la directivité réelle (je mesure IN-to-REF, mais après avoir normalisé la mesure de OUT-à-REF à 0 dB. Ce facteur de normalisation est alors automatiquement appliqué à cette nouvelle mesure.



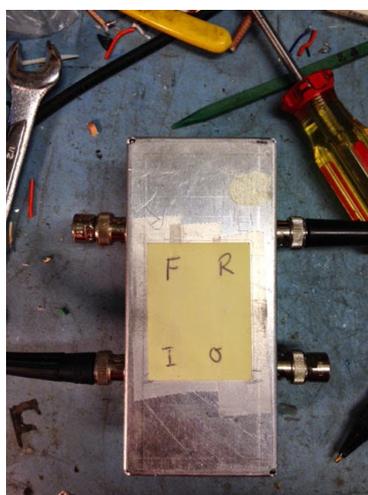
A titre d'exhaustivité, voici ce à quoi ressemble le couplage OUT-to-FWD sur la plage de 0,1 à 200 MHz (la gamme complète de l'analyseur de réseau 3577A). (Notez que le graphique IN-to-REF est à peu près le même). Les divisions horizontales sont de 20 MHz. Notez que la bosse juste à droite du milieu du graphe est droite autour de 144 MHz. On s'attend donc à de très mauvaises performances (à cause de la mauvaise directivité) sur 2 mètres!



Voici une photo intéressante. C'est ce qui arrive au couplage IN-port vers REF-port lorsque le capot supérieur du coupleur est enlevé ...



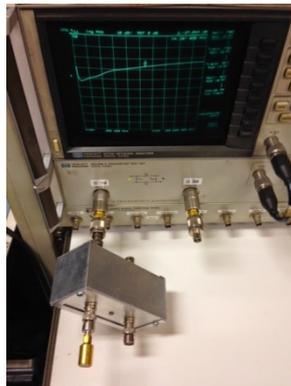
Voici le coupleur, boîtier vissé.



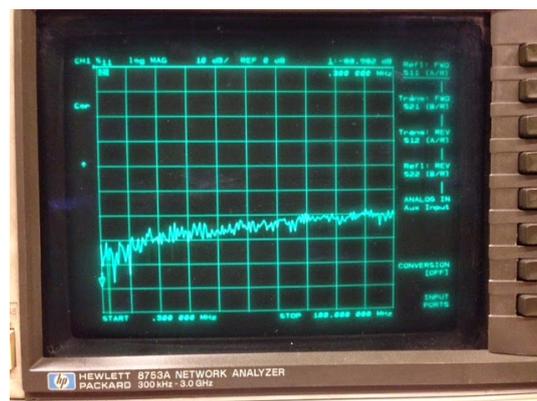
Autres mesures

(Notez que celles-ci ont été effectués avant que je ne réattribué les ports. Néanmoins, ils devraient être proches des valeurs des ports réattribués).

Jetons un coup d'oeil à S11 dans le port d'entrée avec tous les autres ports terminés dans 50 ohms. Voici la configuration :



Tout d'abord, pour la référence, regardez juste S11 de la référence de 50 ohms que j'attacherai au port de "sortie" du coupleur (approximativement -65 dB à 54 MHz).



Et voici S11 du coupleur terminé. Environ -27 dB (excuses pour le flou) à 54 MHz.



S11 de même configuration sur Smith Chart:



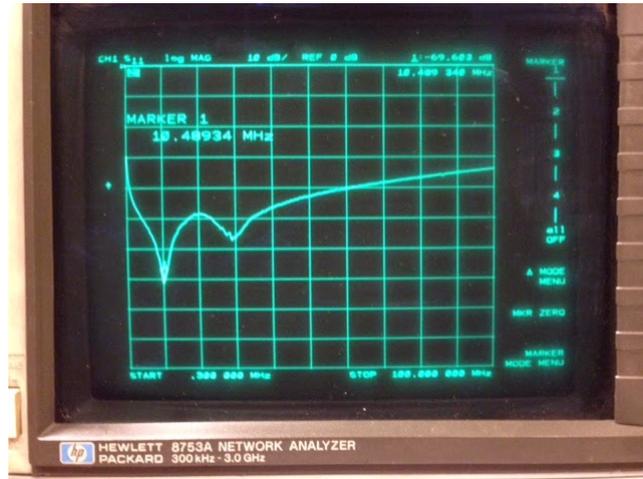
S11 avec tous les ports non terminés. C'est-à-dire, S11 du coupleur lui-même.



Mesure de la fréquence d'auto-résonance (SRF) de la bobine à 16 tours. La bobine est parallèle à la charge de 50 ohms, donc pas de câbles, pour minimiser l'effet de la capacité du câble sur SRF. Voyager le dip dans S11.



Plot S11 : Et un joli plongeon à 10 MHz. C'est le SRF (je ne sais pas pourquoi il y a un deuxième plongeon).



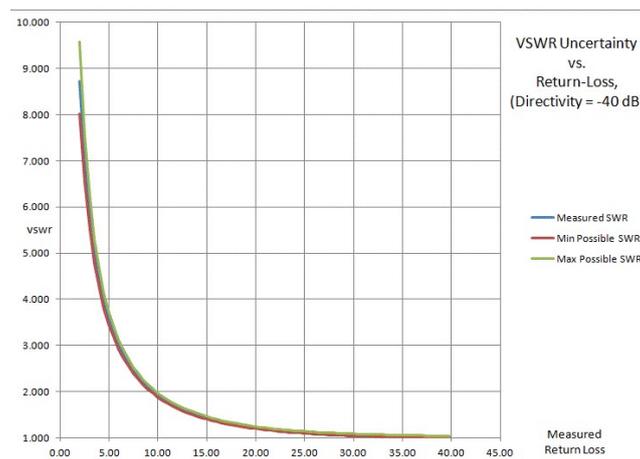
Hmmm ... Je me demande si la performance s'améliorerait si le SRF était plus élevé ...

Directivité et incertitude de SWR :

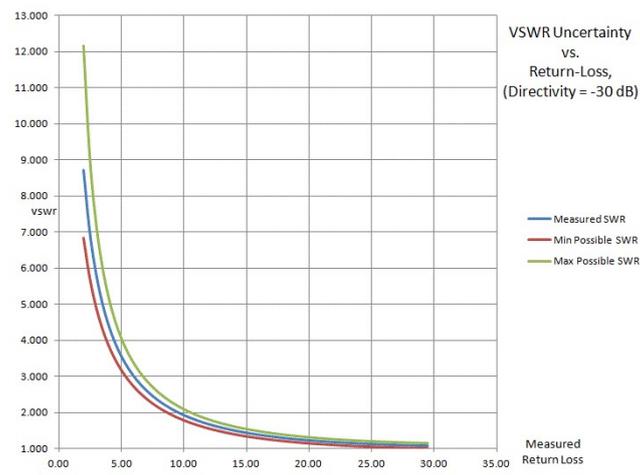
La directivité a un effet direct sur l'erreur VSWR - plus la directivité est faible, plus la lecture VSWR est incertaine (c'est-à-dire plus imprécise sera la perte de retour mesurée).

Par exemple, si la directivité est de -40 dB, l'incertitude VSWR est assez faible pour les faibles VSWR, par exemple, 5, comme le montre le graphique ci-dessous. C'est-à-dire, si votre VSWR mesuré 5: 1 ou mieux, le SWR réel sera proche de cette valeur.

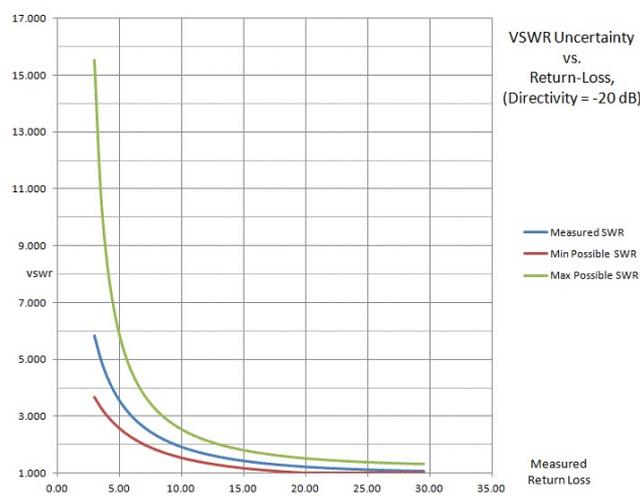
Disons que le SWR mesuré est 3: 1. Si notre directivité est de -40 dB, alors le SWR pourrait être quelque part entre 2.9: 1 et 3.1: 1 - en d'autres termes, le VSWR sera dans une plage étroite qui est essentiellement égale à 3: 1.



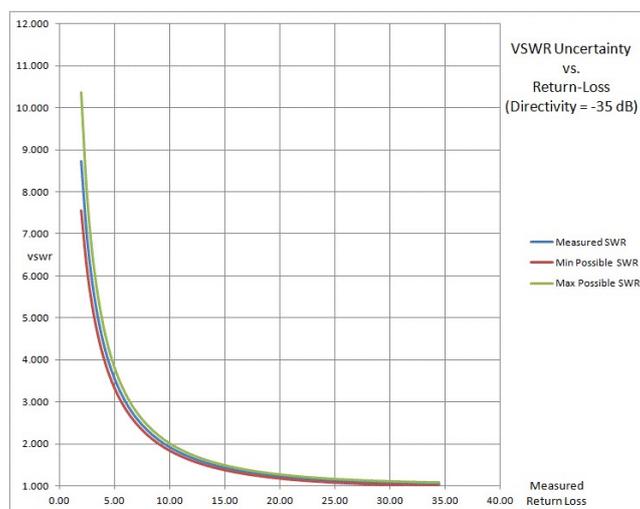
Mais à mesure que la directivité s'aggrave, l'incertitude grandit. Si la directivité = -30 dB, alors un VSWR mesuré de 3: 1 pourrait en réalité être un VSWR entre 2,7: 1 et 3,4: 1.



... ou disons que la directivité est seulement -20 dB. Maintenant, si nous mesurons un VSWR de 3: 1, le VSWR réel pourrait être n'importe où entre 2,3: 1 à 4,6: 1. Cet "étalement" s'élargit de façon significative pour les VSWR supérieurs à 3: 1, comme le montre le graphique ci-dessous.



Pour référence, voici le graphe pour une directivité de -35dB (mon coupleur à 54 MHz):



Note: Ces graphiques ont été calculés à l'aide d'un tableau Excel, «Incertitude VSWR versus Directivité, Return-Loss», qui peut être téléchargé via un lien dans la section «Liens» ci-dessous. Je

suppose que les équations dans le tableur sont correctes.

Autres Notes et Commentaires:

1. Ne branchez qu'un seul côté de chaque câble coaxial qui traverse les noyaux, pas les deux côtés!
2. Expérimentez avec quelles extrémités des enroulements du transformateur se connectent à la masse et quelles extrémités se connectent aux ports. Par exemple, le transformateur de sens de tension pourrait se connecter soit au port IN soit au port OUT, et aussi l'une des extrémités des 16 tours de ce transformateur pourrait aller au port sélectionné. Ces choix influent sur la performance. Vous devrez expérimenter et découvrir quelles connexions donnent la meilleure réponse.
3. Expérimentez la mise à la terre d'un côté ou de l'autre des blindages de chacun des câbles coaxiaux «un tour».
4. Un analyseur de réseau a été inestimable. Je ne sais pas comment j'aurais testé ce coupleur sans lui.
5. Et merci beaucoup à Dick Benson, W1QG, pour son aide et ses conseils inestimables !!!
- 6.

>>> Mises à jour importantes!!! <<<

Pour plus d'informations sur la conception des coupleurs de direction, veuillez consulter ce post: <http://k6jca.blogspot.com/2015/07/antenna-auto-tuner-design-part-5.html> .

Dans le cadre de la conception de coupleur directionnel dans ce post, j'analyse la sélection de base (entre autres). Par chance, mon choix de base (ci-dessus), Fair-Rite 2643625002, semble assez bon, par ma feuille de calcul ci-dessous (see <http://k6jca.blogspot.com/2015/07/antenna-auto-tuner-design-part-5.html> pour plus de détails).

Liens utiles :

[Directivity and VSWR Measurements](#)
[Bird, Straight Talk about Directivity](#)

[Mini-circuits, Table, Return Loss vs VSWR](#)
[EXCEL Calculator, VSWR Uncertainty versus Directivity, Return-Loss](#)

[Fair-rite 2643625002 datasheet](#)
[Thermax RGU-142 Coax Datasheet](#)

[Philips, Design of HF Wideband Power Transformers, Part 1](#)
[Philips, Design of HF Wideband Power Transformers, Part 2](#)

[N8LP Wattmeter \(QEX Article\)](#)
[N2PK Power and Return-Loss Meter](#)

Et enfin, la mise en garde standard :

J'ai pu facilement faire une erreur dans le document ci-dessus, alors s'il vous plaît approcher ce travail avec un peu de scepticisme. Ne présumez pas que tout soit correct. Et si vous trouvez une erreur, ou souhaitez plus de détails, n'hésitez pas à me contacter.