

Evaluation des performances des baluns HF dans le domaine temporel

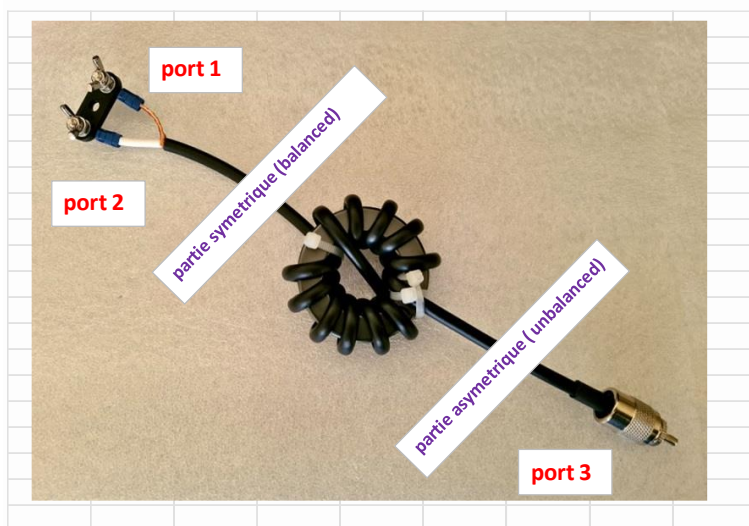
KJ4EGU – Carlo Francescangeli

Il existe d'innombrables articles techniques et vidéos sur le thème des « mesures des baluns ». La plupart d'entre eux se concentrent exclusivement sur la mesure du VSWR, de la « choke » impédance ou de la perte d'insertion comme seul critère pour juger de la qualité d'un balun.

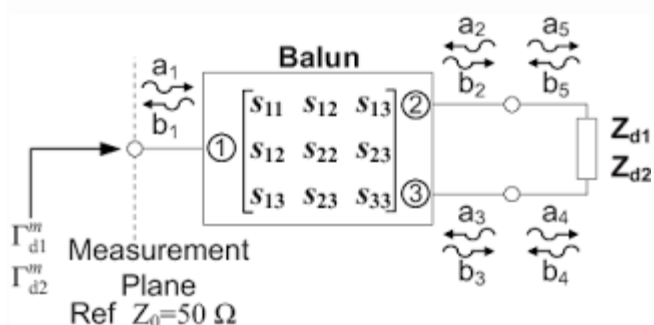
Cependant, le seul objectif de tout balun est sa capacité à rejeter les courants de mode commun, ce qui permet de connecter un appareil asymétrique (*unbalanced*), par exemple un câble coaxial, à un appareil symétrique (*balanced*) tel qu'une antenne symétrique, par exemple un dipôle. C'est la raison pour laquelle il a été inventé.

La façon la plus précise de caractériser un balun est l'utilisation d'un VNA (Analyseur de réseau vectoriel) à 4 ports mais cet instrument coûte plusieurs dizaines de milliers d'Euros.

Les baluns généralement utilisés dans le monde Ham radio sont des dispositifs à 3 ports (2 ports symétriques + 1 port asymétrique)



Une méthode classique consiste à utiliser un simple analyseur de réseau vectoriel (VNA) en mesurant 2 ports à la fois tout en terminant le troisième sur 50 ohms (réf. 2). Six mesures sont donc nécessaires, et les 9 paramètres de dispersion (*S parameters*) finaux sont calculés mathématiquement.



Cela requiert une certaine expertise pour leur manipulation. La méthode est présentée par W6WO (réf. 3). Une amélioration plus précise est décrite par K6JCA. (réf. 4)

La procédure de mesure CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) que j'utilise fréquemment est simple, directe, peu coûteuse et fournit d'excellents résultats proches de ceux effectués avec des instruments de laboratoire de mesure les plus performants. Cette méthode est une mesure complète de balun directes à 3 ports.

Tous les types de baluns à courant, baluns de tension, choke balun, baluns avec rapports d'impédance différents, transformateurs RF, ligne symétrique, tuner d'antenne symétrique, amplificateurs différentiels, etc... peuvent être évalués avec cette méthode. La seule limite est la fréquence du générateur utilisé.

1. Nomenclature

BALUN : **BAL**anced – **Un**balanced

CMRR : *Common Mode Rejection Ratio* - taux de rejection en mode commun

DM : *Differential Mode* - Mode différentiel, 2 signaux identiques avec la même amplitude et un déphasage de 180 degrés entre eux.

CM : *Common Mode* - Mode commun, signifie 2 signaux identiques avec la même amplitude et la même phase

CMC : *Common Mode Current*, courant perturbateur circulant généralement à l'extérieur de la gaine d'une ligne coaxiale.

2. Comprendre le fonctionnement des baluns

Un balun peut être observé sous 2 angles différents.

Du côté asymétrique (*Unbalanced*), le balun se comporte comme un diviseur de puissance à 2 voies. Les 2 signaux de sortie ont une tension égale de 50% avec un déphasage de 180 degrés. (Fig. 1)

Dans le cas de balun réel un déséquilibre d'amplitude et de phase apparaît aux bornes sorties (Fig. 2)

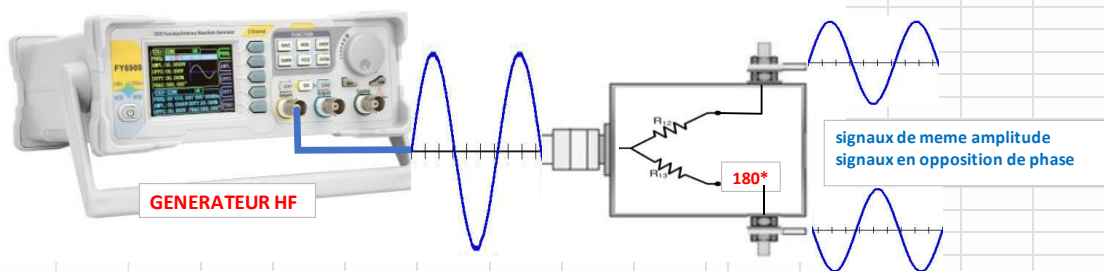


Fig 1 : Balun ideal - diviseur de puissance 2 voies déphasées de 180 degrés

source : KJ4EGU

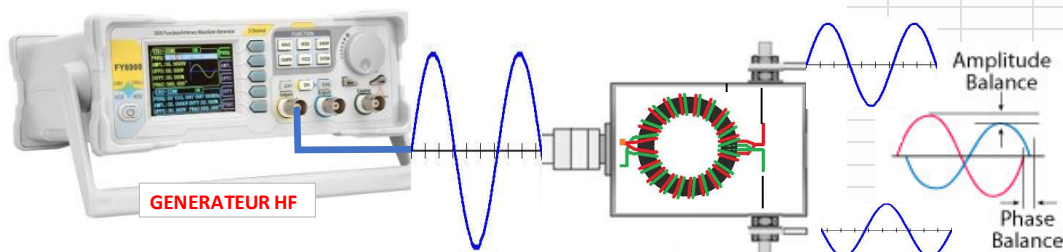


Fig 2 : Balun réel - déséquilibre d'amplitude et de phase

source : KJ4EGU

Du côté symétrique (*Balanced*), le balun peut être considéré comme un « amplificateur différentiel » à gain unitaire qui ne permet aux signaux de passer du côté asymétrique (*Unbalanced*) que lorsqu'il y a une différence de tension à ses bornes. Nous appellerons ce mode le mode différentiel DM. (Fig. 3)

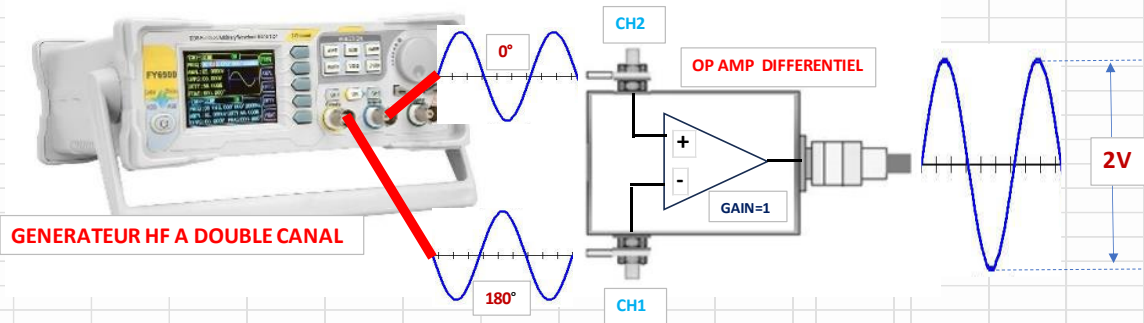


Fig 3 : Balun idéal - en mode différentiel - (DM - Differential Mode)
source : KJ4EGU

Tous les baluns ont des pertes, aussi minimes soient-elles. La tension de sortie en mode différentiel DM est légèrement inférieure (Fig. 4) et n'est pas la somme arithmétique parfaite des 2 signaux d'entrée.

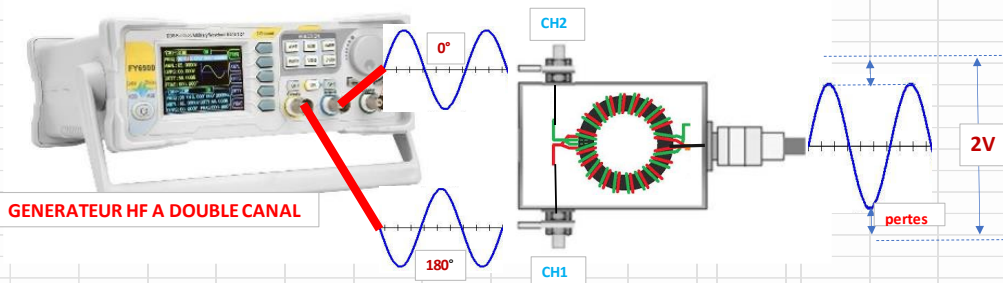


Fig 4 : Balun réel - en mode différentiel - (DM - Differential Mode)
source : KJ4EGU

Cependant, lorsque les 2 tensions aux bornes sont identiques (CM Common Mode - ce qui signifie même tension et même phase), l'amplificateur différentiel ne permet pas aux signaux de passer vers le connecteur coaxial (port asymétrique) (Fig. 5)

En mode commun, les deux signaux sont identiques, et « l'amplificateur différentiel » devrait théoriquement rejeter (*choke*) tout courant en mode commun, car il n'y a pas de différence de potentiel de tension à ses bornes, créant ainsi une perte d'insertion très élevée vers le port asymétrique (*Unbalanced*). **C'est le balun idéal.** (Fig. 5)

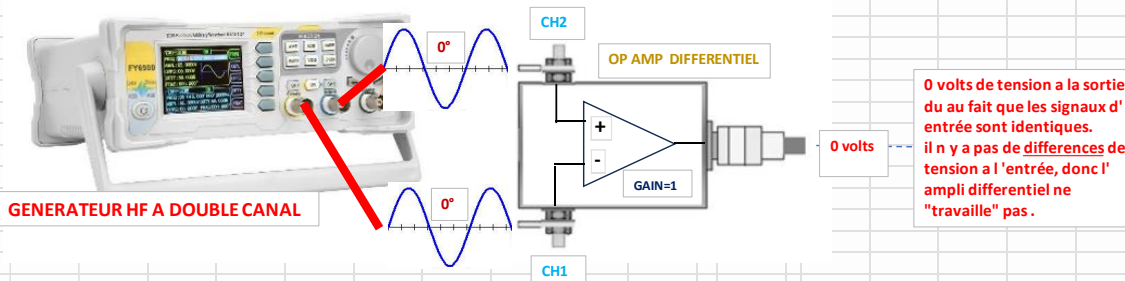
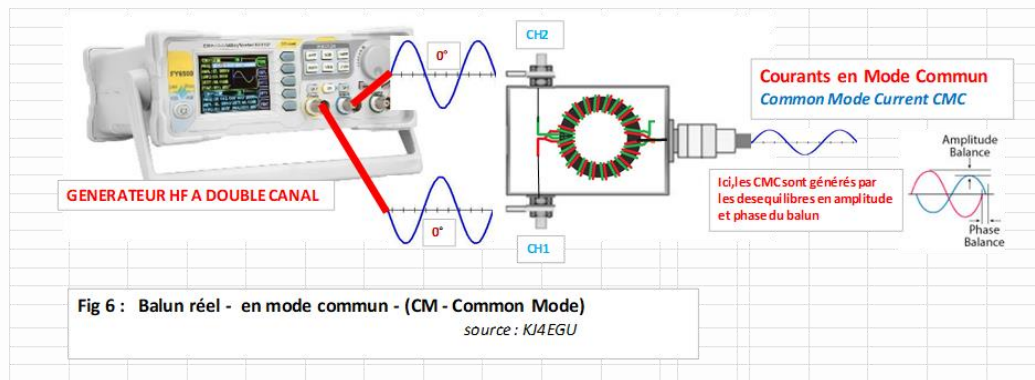


Fig 5 : Balun idéal - en mode commun - (CM - Common Mode)
source : KJ4EGU

Malheureusement, tout balun présente un certain déséquilibre d'amplitude et de phase. Ce déséquilibre rend les 2 signaux à la borne symétrique légèrement différents. Une différence de tension apparaît à ses bornes et s'écoule à travers « l'amplificateur différentiel à gain unitaire » à l'extérieur de la ligne coaxiale (fig. 6).

C'est la genèse des courants en mode commun (CMC Current Mode Currents) et c'est précisément ce défaut que nous allons mesurer.



3. Principe de mesure du CMRR

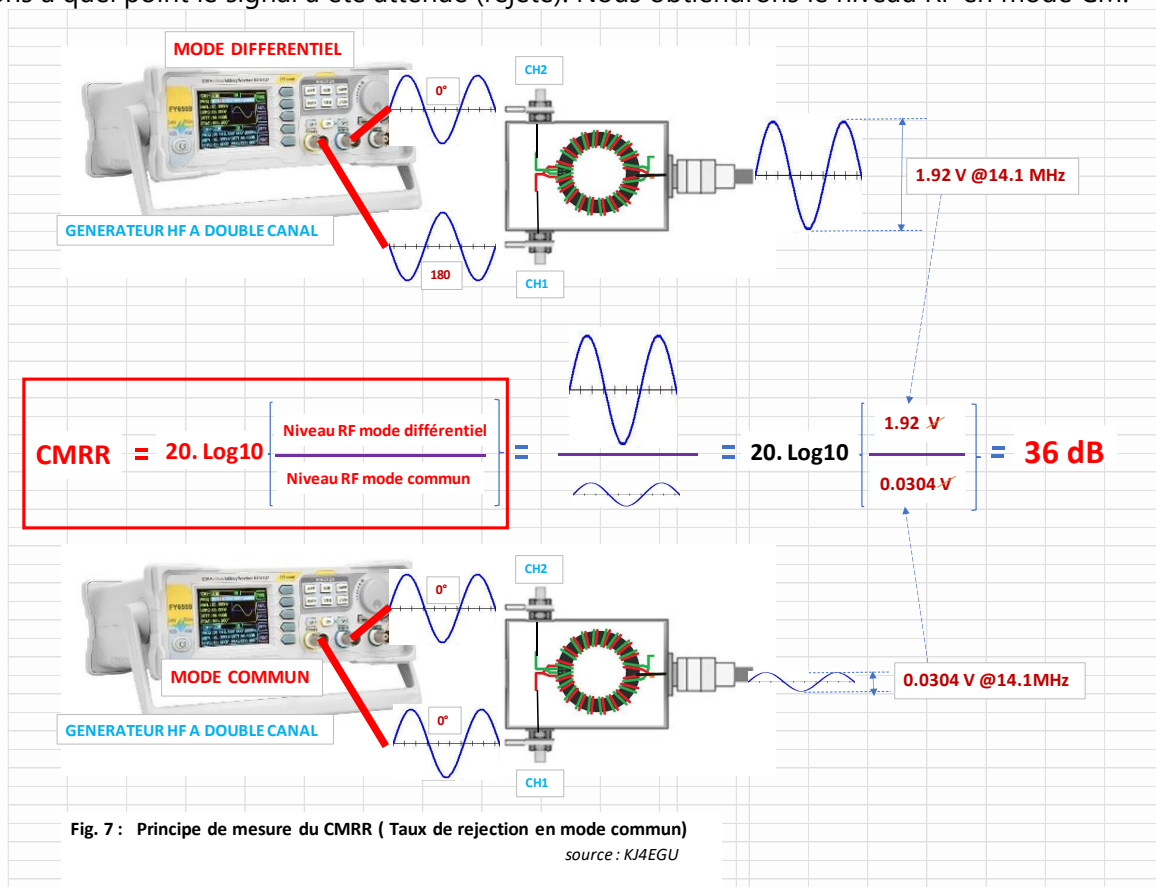
La méthode est simple.

Un générateur de signal HF DDS (*Direct Digital Synthesis*) à double canal est converti en générateur CMRR de précision. Les signaux sont toujours appliqués aux bornes symétriques (*Balanced*) et le détecteur RF se connecte au port asymétrique (*Unbalanced*)

Nous verrons plus en détails dans un prochain paragraphe comment passer en mode DM en CM sur le générateur HF en appuyant simplement sur une simple touche sur le générateur HF.

Tout d'abord, nous appliquerons un signal en mode différentiel (DM) (même amplitude avec un déphasage de 180 degrés) aux bornes symétriques du balun. Nous mesurerons le niveau RF en mode DM.

Ensuite, nous appliquerons un signal en mode commun (CM) (même amplitude, même phase) et nous mesurerons à quel point le signal a été atténué (rejeté). Nous obtiendrons le niveau RF en mode CM.



Le rapport entre DM et CM donne directement le CMRR (*Common Mode Reject Ratio*) **qui est le facteur de mérite du balun.** (Fig. 7). Il s'exprime généralement en dB (décibels).

Le taux de réjection en mode commun (CMRR) est une mesure de la façon dont les signaux en mode commun (CMC) sont atténués du port symétrique vers le port asymétrique. Ce rapport dépend de l'amplitude et du déséquilibre de phase du balun

Le CMRR est donc le premier facteur à tenir en compte au moment d'évaluer, de construire ou d'acheter un balun. Un fournisseur, un bricoleur expérimenté qui ne donne pas sa valeur dans ses spécifications techniques reconnaît implicitement que son balun est peu ou pas performant.

Un balun avec un moindre déséquilibre d'amplitude et de phase présentera également un CMRR amélioré et un faible courant circulant à l'extérieur du coaxial. Un CMRR faible signifie un CMC plus élevé.

Ci-joint un tableau (Fig. 8) qui peut servir de guide afin d'évaluer le CMRR d'un balun, il est basé sur mon expérience professionnelle mais aussi à partir de données techniques stipulées dans des catalogues de matériel à usage professionnel.

CMRR dB	Amplitude Unbalance	Phase Unbalance	Balun performance
20 dB	+/- 10 %	+/- 10 deg	Poor
30 dB	+/- 5 %	+/- 3 deg	Good
40dB	+/- 1.5 %	+/- 1 deg	Excellent
50 dB	+/- 0.5 %	+/- 0.25 deg	Professional
65 dB	+/- 0.02 %	+/- 0.01 deg	KJ4EGU generator
inf	+/- 0 %	+/- 0 deg	ideal balun
source : KJ4EGU			

Fig. 8 : CMRR en fonction des déséquilibres d'amplitude et de phase

4. Interprétation physique des valeurs du CMRR.

Un CMRR de 36 dB a deux significations distinctes :

1. **Au niveau puissance.** Cela indique que les courants parasites CMC (Common mode courants) circulant à l'extérieur du câble coaxial sont 36 dB moins important que la puissance utile qui circulent à l'intérieur du câble, soit 2 % la puissance circulant à l'extérieur du coax et 98 % à l'intérieur. Ci-joint la formule

$$\text{CMC (\%)} = 100 * \left[10^{\frac{\text{CMRR}}{10}} \right]$$

$$\text{CMC} = 100 * 10^{\frac{36 \text{ dB}}{10}} = 2 \% \text{ de la puissance qui circulent à l'extérieur du câble coaxial}$$

2. **Au niveau courant.** Les courants parasites CMC circulant à l'extérieur de la gaine du coaxial représente $\text{CMC} = 100 * \left[10^{\frac{\text{CMRR}}{20}} \right] = 100 * 10^{\frac{36 \text{ dB}}{20}} = 63$ fois
Donc le courant (non désiré) qui circule à l'extérieur du câble coaxial est 63 fois plus faible que le courant interne.

Prenons maintenant le cas d'un balun dont le VSWR est < 1.08 sur toute la bande HF, sa perte d'insertion est de 0.3 dB (7% de pertes) et sa puissance max est de 2 KW. A priori le dispositif apparait attractif. Le fabricant ne mentionne pas la valeur du CMRR.

Cependant la mesure du CMRR donne une valeur 22 dB soit des courants CMC de l'ordre de 8 % qui circulent à l'extérieur du coax. Avec 2 KW de puissance la situation devient compliquée et embarrassante pour le voisinage.

5. Générateur CMRR

Il s'agit d'un générateur de signal DDS (*Direct Digital Synthesis*) 60 MHz de double canal à petit budget avec des spécifications très intéressantes.

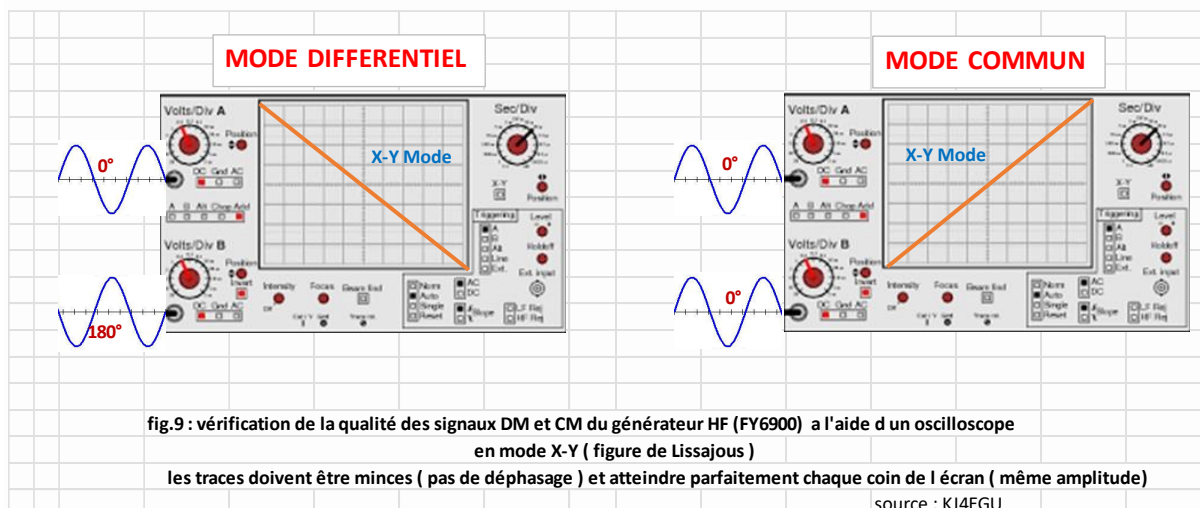
Le coût en 2021 était d'environ 100 USD. Le modèle FY6900 que j'utilise a été également commercialisé par une marque renommée mondiale dans le domaine des instruments RF. (Réf. 1)

Ce générateur de signaux multiples utilise un convertisseur D/A à grande vitesse, une fréquence d'échantillonnage de 250 MSa/s, une résolution verticale de 14 bits, 2 sorties identiques de 50 ohms avec une faible distorsion harmonique.

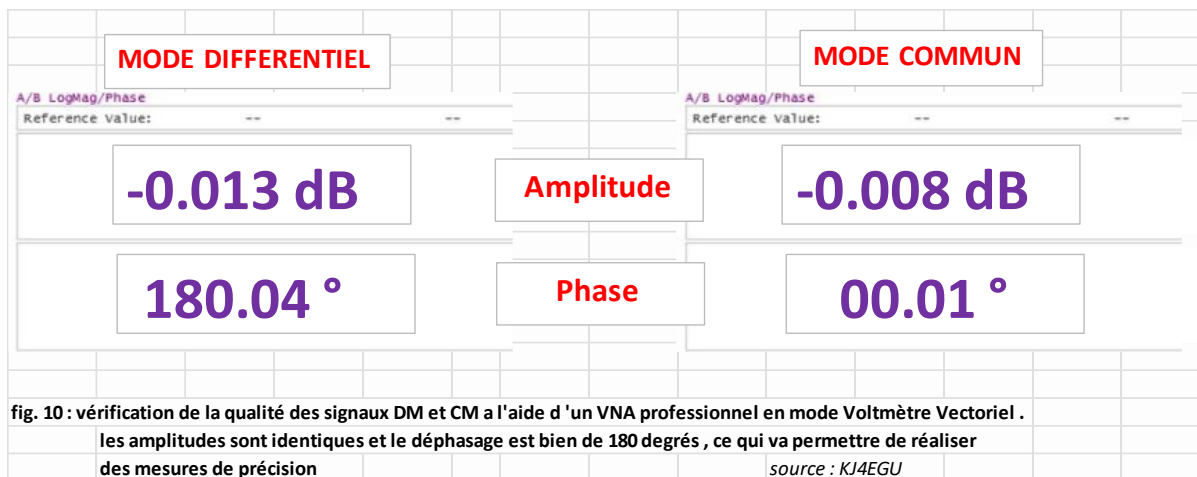
Cet appareil dispose également d'un fréquencemètre allant jusqu'à 80 MHz.

Le signal d'amplitude sur les deux canaux atteint 5 Vpp à 60 MHz **avec une résolution minimale de 1 mV** soit une dynamique de 73 dB ! Afin de maximiser la pureté (faible distorsion harmonique) sur chaque canal, je recommande de ne pas utiliser plus de 1 Vpp. Il en résulte des signaux sinusoïdaux très propres avec une distorsion harmonique (mesurée avec un analyseur de spectre de laboratoire) aussi faible que 51 dBc @ 14.100 MHz, ce qui est absolument remarquable vu le bas prix de l'instrument.

La phase de chaque canal peut être ajustée séparément de 0 à 359,99 degrés avec une résolution aussi faible que 0,01 degré, ce qui en fait un candidat idéal pour mesurer de manière ultra précise les baluns. Il est donc possible de produire 2 signaux sinusoïdaux parfaitement identiques l'un en CM et un autre avec un déphasage de 180 degrés (DM) **moeynnant une simple touche**. La vérification des amplitudes et phase des signaux s'est réalisée sur un oscilloscope en mode XY (Fig. 9).



Chaque trace doit être une mince ligne droite et doit coïncider parfaitement avec chaque coin de l'écran. Aucun défaut perceptible n'a été observé. La validation de la mesure a été effectuée à l'aide d'un VNA professionnel fonctionnant en mode voltmètre vectoriel. (Fig. 10)



Ce générateur de signal HF dispose d'une fonction de balayage (*sweep*) continu de 0,000001 Hz à 60 MHz mais cette fonction n'est disponible que sur le ch1. Cette limitation empêche le balayage continu du balun en mode différentiel et commun. Sur toute la plage de fréquence du générateur

Pour faciliter les mesures, j'ai mémorisé 20 presets couvrant différentes fréquences grâce au banc de mémoire du générateur. 2 presets (DM et CM) sont nécessaires pour chaque fréquence.

Nous pouvons facilement évaluer le balun sur 10 fréquences différentes couvrant toute la bande HF.

Le logiciel inclus avec l'appareil permet de connecter le générateur de signaux à un ordinateur PC. Tous les paramètres sont réglables sur l'écran du PC. Les mesures CMRR complètes d'un balun prend moins de 60 secondes.

6. Détecteur RF

L'avantage de cette méthode de mesure est l'utilisation de différents détecteurs RF généralement disponibles dans n'importe quel shack radio. Ceux qui ont la plus grande plage dynamique sont les plus recommandés.

La fig. 11 montre différentes options et résultats comprenant un transceiver HF, SDR, analyseur de spectre, milli wattmètre, etc... Un détecteur à diode et un oscilloscope à faible coût (8 bits) peuvent être utilisés, mais avec une plage dynamique limitée.

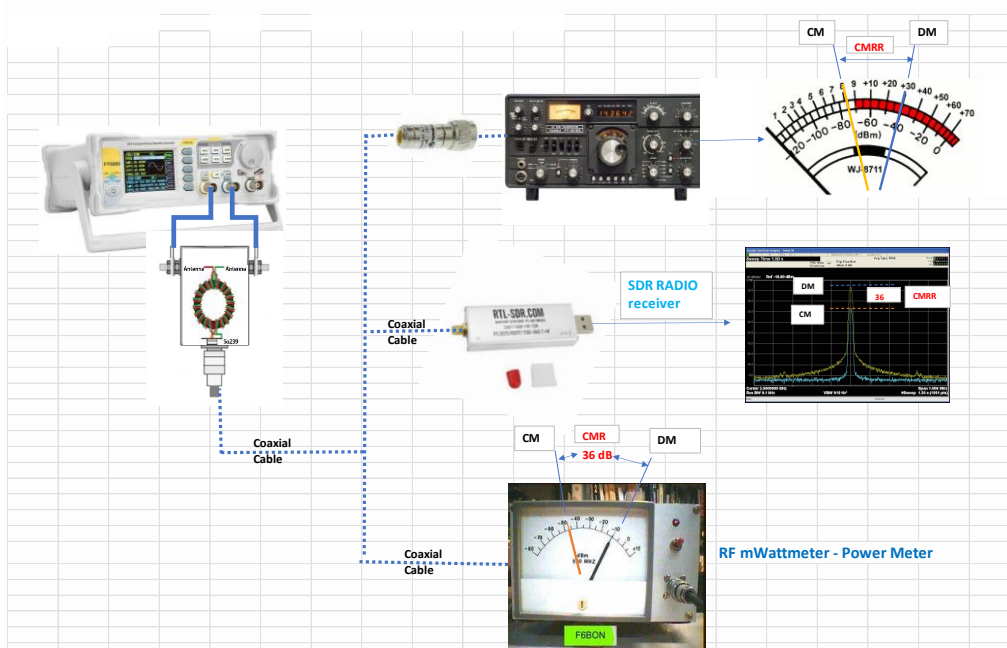


Fig. 11 : détecteurs RF – différentes options Source : KJ4EGU

L'émetteur-récepteur HF omniprésent dans n'importe quel radio shack est probablement le meilleur détecteur RF dont certains nouveaux modèles ont une dynamique supérieure à 100 dB.

Le CMRR est généralement exprimé en dB. Chaque unité du S-mètre équivaut à 6 dB. Des précautions particulières doivent être prises pour éviter de saturer ou d'endommager le détecteur RF.

Il est donc recommandé de connecter un atténuateur RF à l'entrée de chaque détecteur, afin d'éliminer d'éventuelles erreurs d'adaptation d'impédance entre le balun et le détecteur RF.

7. Connexions de balun

Le côté symétrique (*Balanced*) du balun est connecté directement au pôle positif BNC des canaux 1 et 2, à l'aide d'un adaptateur. Les adaptateurs BNC - banane sont très populaire, mais les adaptateurs BNC - terminal a vis est plus pratique. (Fig. 12)



Fig. 12 : adaptateurs BNC

La connexion vers la masse des connecteurs BNC ch1 et ch2 n'est pas nécessaire, les signaux DM et CM sont flottants et connectés en interne sur le châssis frontal du générateur.

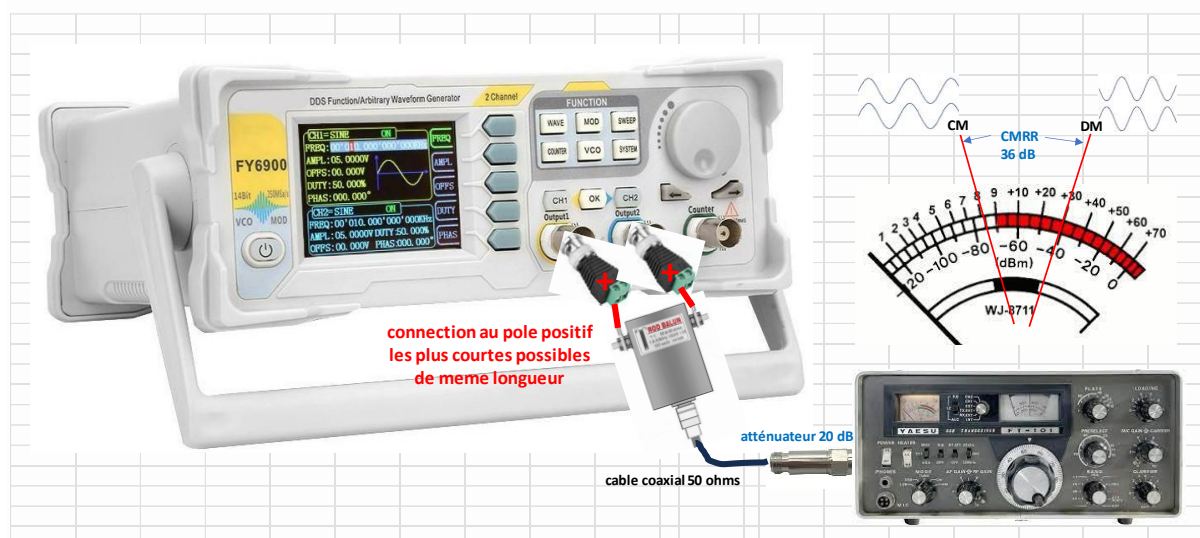


Fig. 13 : connexion du balun directement sur les adaptateurs BNC
Lecture du CMRR sur le S-mètre du transceiver

Source : KJ4EGU

Les baluns ayant des connecteurs RF sur chaque port, doivent être connectés directement au générateur HF avec 2 câbles coaxiaux de même longueur, à l'aide d'adaptateur coaxiaux adaptés

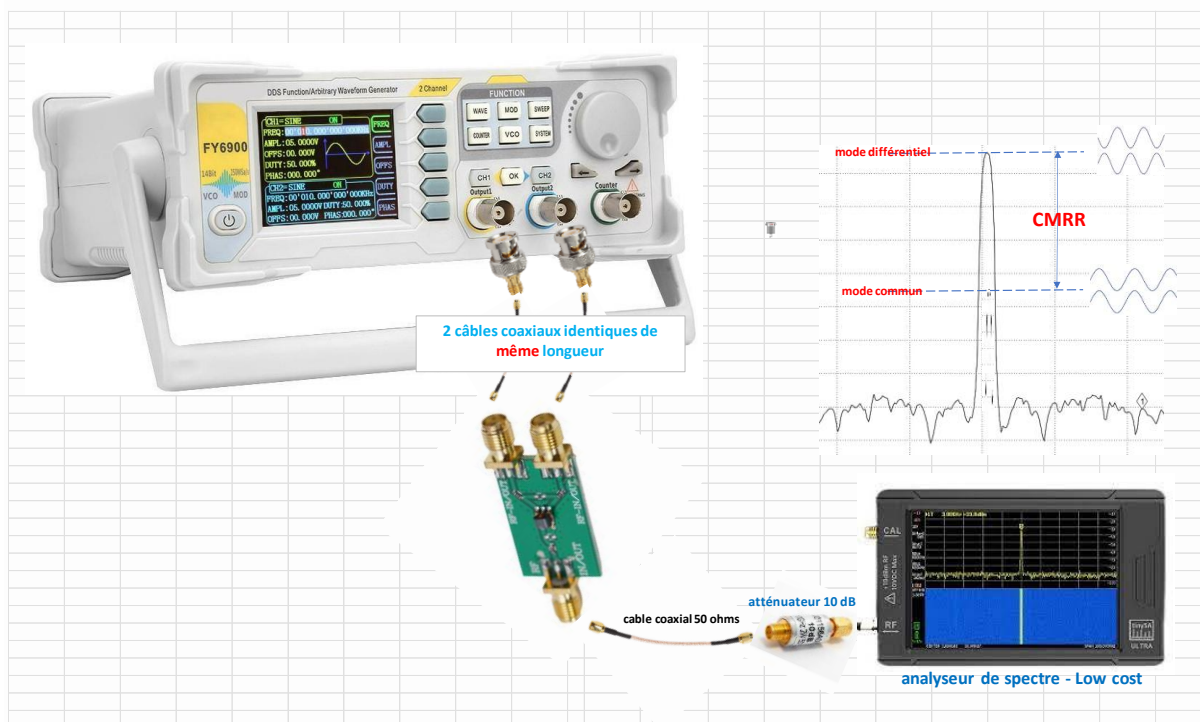


Fig. 14 : connexion du balun avec câbles coaxiaux via des adaptateurs BNC appropriés
Lecture du CMRR sur l'écran d'un analyseur de spectre ou SDR

Source : KJ4EGU

L'impédance de sortie du générateur CMRR sur chaque canal est de 50 ohms. Les baluns ayant un rapport d'impédance différent peuvent être mesuré également sans erreurs pertinentes car les mesures DM et CM sont effectuées dans les mêmes conditions. **Différentes valeurs d'impédances modifient le niveau de tension appliqué, mais ne modifient pas le rapport DM/CM. (Fig. 7)**

Dans le but d'éviter des confusions, Il est important de signaler que cette méthode ne mesure pas le VSWR.

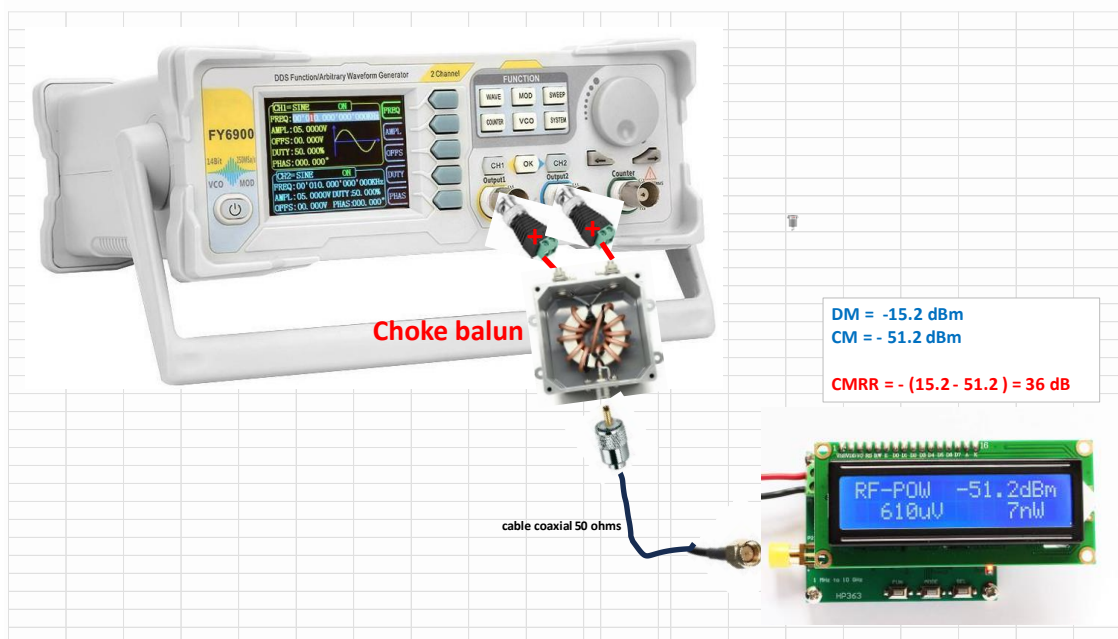


Fig. 15 : connexion du choke balun
Lecture du CMRR a l'aide d'un simple milli – wattmètre a 25 euros

Source : KJ4EGU

8. Mesure du CMRR

La procédure est simple :

Étape 1 : connecter les bornes symétriques du balun au pôle **positif** des canaux 1 et 2.

Étape 2 : connecter la borne balun asymétrique au détecteur RF, si nécessaire, via un atténuateur avec un câble coaxial de 50 ohms. (Fig. 16)

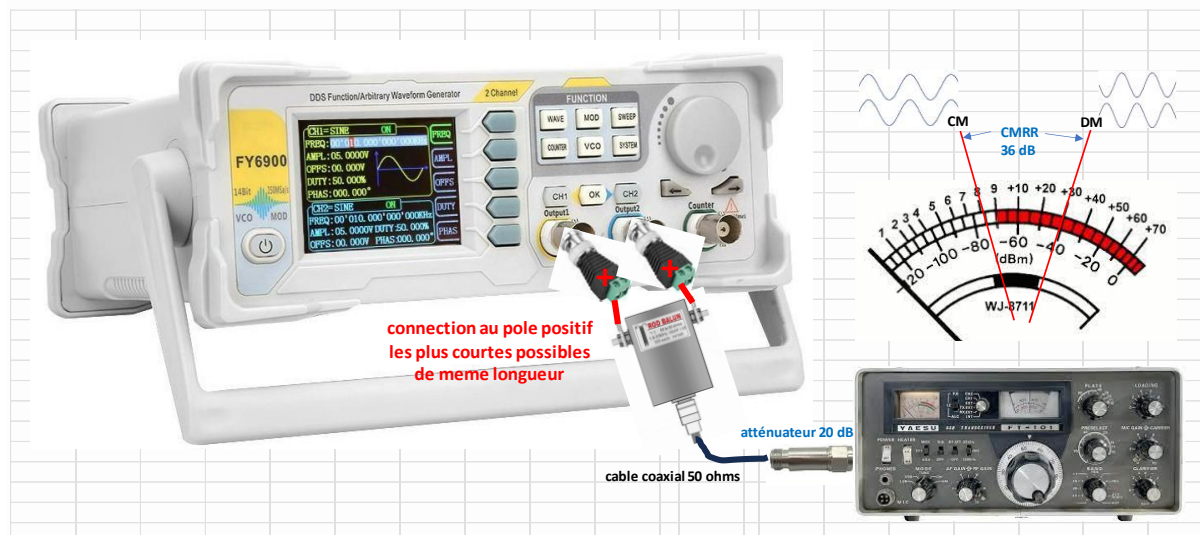


Fig. 16 : connexions du balun

Source : KJ4EGU

Étape 3 : DM : Régler le signal au canal 1 : Freq 1 - 1.000 V - phase 180.000 deg (Fig. 16)

Régler le signal au canal 2 : Freq 1 - 1.000 V – phase 000.000 deg, sauvegarder en mémoire 1.

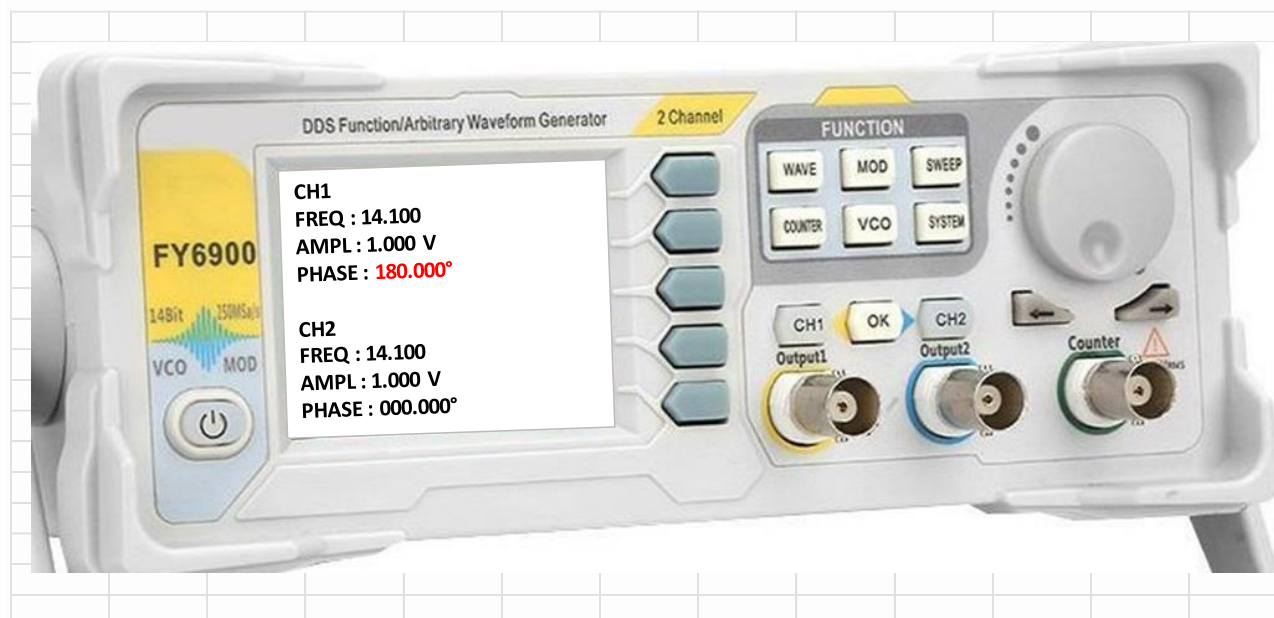


Fig. 16 : paramétrages du générateur en mode différentiel - DM

Source : KJ4EGU

Etape 4 : CM : Régler le signal au canal 1 : Freq 1 - 1.000 V - phase 000.000 deg. (Fig. 17)

Régler le signal au canal 2 : Freq 1 - 1.000 V – phase 000.000 deg, sauvegarder en mémoire 2.

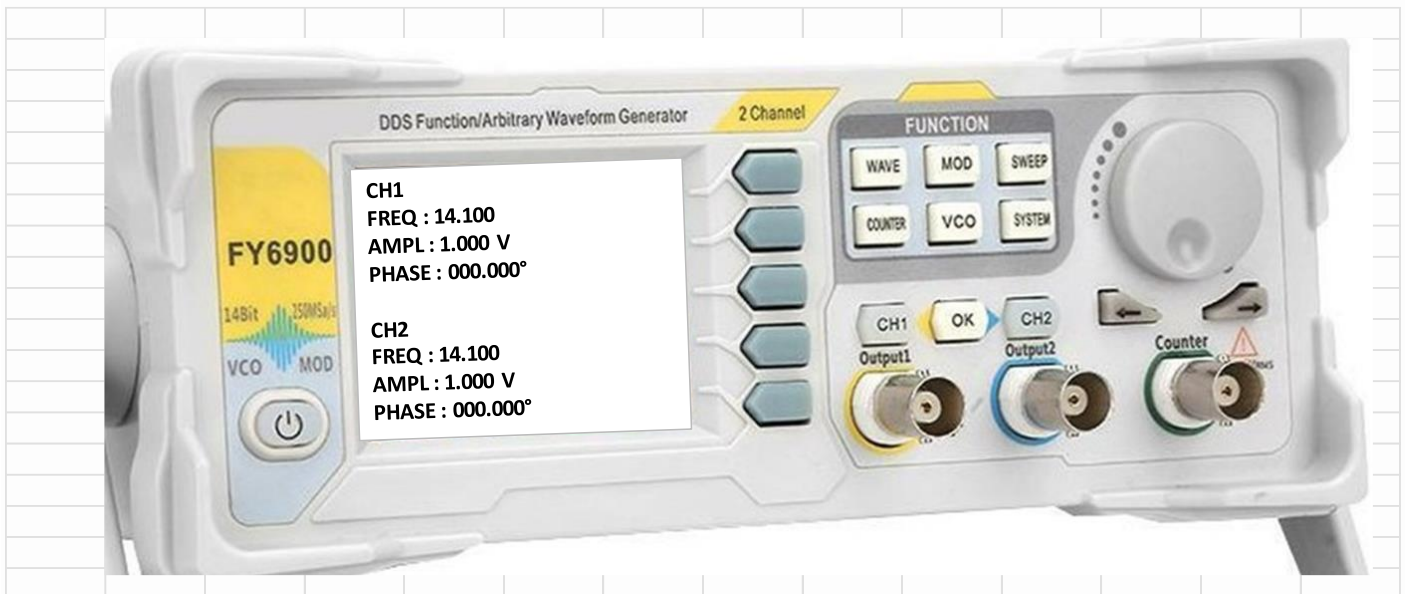


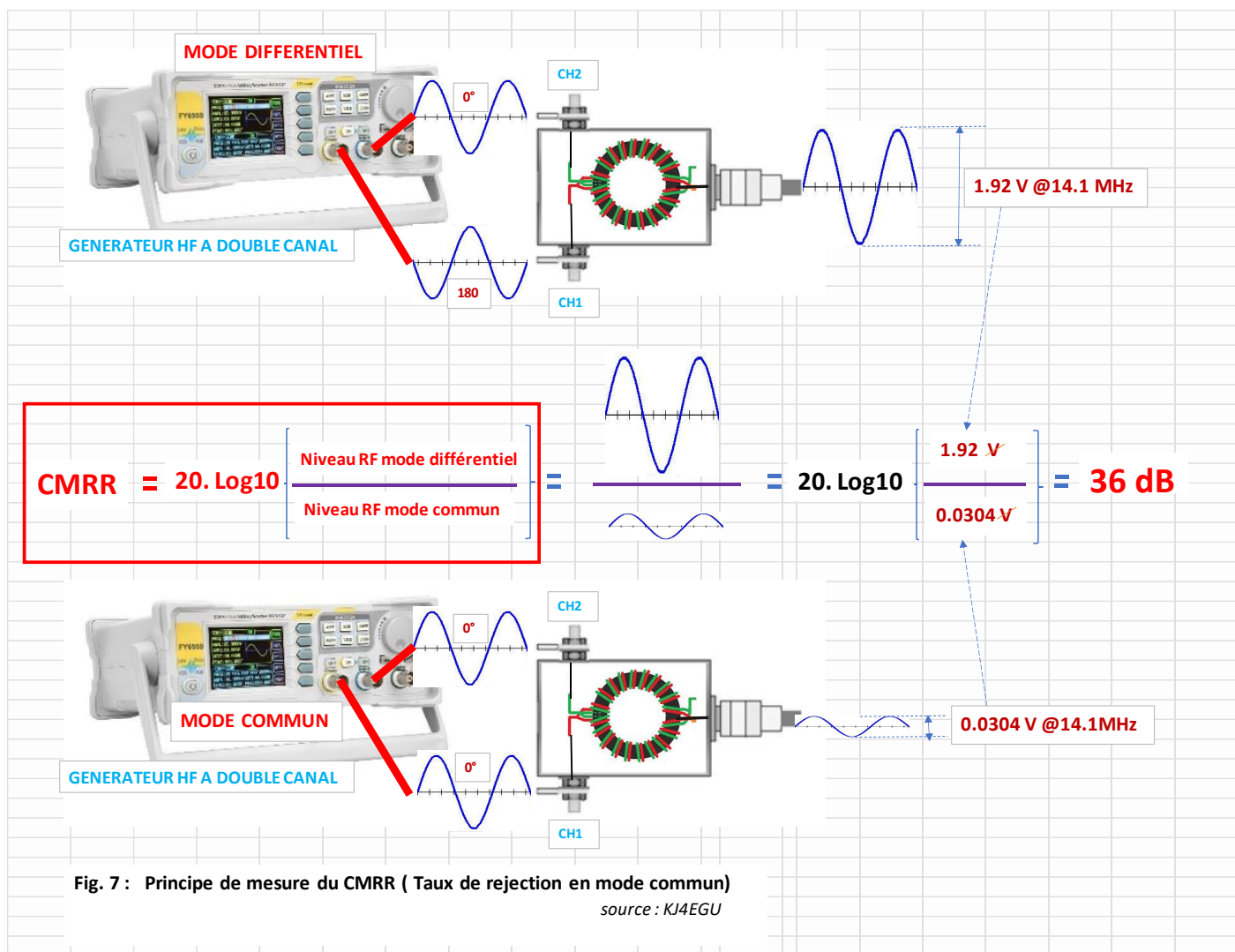
Fig. 17 : paramétrages du générateur en mode commun - CM

Source : KJ4EGU

Etape 5 : rappeler la mem1 (LOAD 1) le signal DM, lire la valeur DM sur le détecteur.

Étape 6 : rappeler la mem 2 (LOAD 2) le signal CM, lire la valeur CM sur le détecteur.

Étape 7 : les valeurs des niveaux RF DM et VM donnera la valeur du CMRR. (Fig. 17)



Répéter la même procédure en changeant uniquement la fréquence (fréquence 2, fréquence 3, fréquence 4, etc...). En enregistrant chaque nouvelle fréquence dans le banc de mémoire interne permettra dans le futur de réaliser les mesures de baluns en 60 secondes ! (Fig. 18)

	mode	MHz	ampl	phase	memoire
freq 1	DM	1.850	1.000	180.00	1
freq 1	CM	1.850	1.000	000.00	2
freq 2	DM	3.750	1.000	180.00	3
freq 2	CM	3.750	1.000	000.00	4
freq 3	DM	7.100	1.000	180.00	5
freq 3	CM	7.100	1.000	000.00	6
freq 4	DM	10.125	1.000	180.00	7
freq 4	CM	10.125	1.000	000.00	8
freq 5	DM	14.150	1.000	180.00	9
freq 5	CM	14.150	1.000	000.00	10
freq 6	DM	18.100	1.000	180.00	11
freq 6	CM	18.100	1.000	000.00	12
freq 7	DM	21.150	1.000	180.00	13
freq 7	CM	21.150	1.000	000.00	14
freq 8	DM	24.950	1.000	180.00	15
freq 8	CM	24.950	1.000	000.00	16
freq 9	DM	28.500	1.000	180.00	17
freq 9	CM	28.500	1.000	000.00	18
freq 10	DM	52.000	1.000	180.00	19
freq 10	CM	52.000	1.000	000.00	20

Fig. 18 : mise en mémoire des fréquences en mode DM et CM
Source : KJ4EGU

9. Limitations

Cette méthode de mesure a ses propres limites.

Premièrement, il ne permet pas d'évaluer le VSWR. Cependant, chaque OM a toujours la possibilité de mesurer le ROS d'un balun avec son transceiver, avec un analyseur d'antenne, nanoVNA, ou appareil similaire etc...

La mesure de la perte d'insertion est avec cette méthode est imprécise. Les mesures classiques effectuées avec un VNA à très faible puissance (-10 dBm) ne donnent qu'une valeur approximative car les pertes sont plus élevées à pleine puissance RF nominale et sont difficiles à évaluer.

L'autre inconvénient réside du fait que les mesures sont effectuées sur certaines fréquences et ne donnent pas un balayage continu. Cela est dû à la limitation du générateur RF à très faible coût utilisé.

Cependant, avec ses 20 mémoires, ce petit générateur RF vous permet d'analyser très rapidement 10 fréquences différentes couvrant n'importe quelle partie de toutes les bandes HF et 6 m.

10. Générateur CMC

La modification de l'amplitude et de la phase sur chaque canal permet de convertir le générateur CMRR en un puissant générateur CMC créant artificiellement n'importe quel type de courant de mode commun, ce qui est un moyen instructif de démystifier et de mieux comprendre les origines et les causes des CMC.

Il est permis en outre de simuler et vérifier le comportement de certains baluns connectés à des antennes non symétriques citons par exemple les populaires EFHW Antenna (*End Fed Half Wave antenna*), off-center-fed dipole (OCFD), etc...

D'autres applications intéressantes sont possibles également comme l'étalonnage des mesureurs de CMC

10. Conclusions

Contrairement aux méthodes traditionnelles à l'aide d'un VNA, cette méthode est en fait un analyseur à 3 ports appliquant un signal mode différentiel / mode commun directement au balun sans avoir besoin d'utiliser des composants passifs externes tels que transformateur symétriseur, adaptateur d'impédance, VNA fixture, pinces bananes, résistances de charge, etc.

Pas de calibration préalable nécessaire mais aussi moins d'erreurs de mesures dus aux ajouts composants passifs externes, longueurs de câble, accessoires etc...

De plus le port asymétrique (*unbalanced*) est toujours connecté à un détecteur RF de 50 ohms via un atténuateur afin d'éliminer d'éventuelles réflexions résiduelles. Cela permet d'effectuer des mesures dans des conditions presque idéales avec des moyens financiers très limités, utilisant en partie du matériel existant dans la plupart des shack radio.

Cette procédure originale présentée ici s'effectue dans le domaine temporel avec la source du signal connectée aux bornes symétriques (*balanced*). Les mesures à l'aide d'un VNA sont réalisées dans le domaine des fréquences avec la source connectée au port asymétrique (*unbalanced*)

Un balun avec un CMRR peu performant présentant un excellent VSWR avec de faibles pertes d'insertion n'est pas très utile.

Le CMRR est le facteur essentiel pour juger, **en premier lieu**, la performance de n'importe quel balun.

73's à tous - KJ4EGU / Carlo F.

10. Références

- (1) <https://www.wavetek.com/products/wavetek-function-generator-fy-6900?variant=31286380232756>
- (2) https://shop.richardsonrfpd.com/docs/rfpd/Anaren_De-embed-BalunTesting_applicationnote.pdf
- (3) W6WO - Measuring HF Balun Performance, QEX Nov/Dec 2010
- (4) K6JCA blog - An Alternate Method for Characterizing Baluns and Common-Mode Chokes