

Banc d'essai du récepteur FUNcube Dongle

Le FUNcube Dongle est un récepteur SDR large bande très attrayant (www.funcubedongle.com). Sa réputation en tant que récepteur polyvalent est faite.

De nombreuses discussions mettent en évidence la nécessité de filtres RF à son entrée. La recherche de données RF et de ses caractéristiques sur le Web ne donne guère résultats ; toutefois on peut y trouver certaines mesures faites par des utilisateurs, sur la sensibilité FM en SINAD.

Ce rapport a permis d'évaluer les performances du FUNcube Dongle en termes de tenue aux signaux forts. Les mesures sont confirmées entre elles par le niveau de blocage et le point d'interception de troisième ordre. En deuxième moitié de ce rapport, la mesure de facteur de bruit donne l'image de la sensibilité du FUNcube Dongle.



Figure 1 : Le FUNcube Dongle (image de www.funcubedongle.com)

Mesure de linéarité :

Les mesures de linéarité définissent le comportement du récepteur en signaux forts. Elles comprennent le niveau de blocage et point d'interception troisième ordre.

Configuration d'essai pour les mesures de linéarité :

- Funcube Dongle testé : numéro de série S/N 2789
- Logiciel HDSDR version 2.11
- Réglage des gains par défaut : LNA= 20 dB, Mixer = 4 dB ; IF = 6 dB ; amplificateurs FI 0/0/0 dB et 3/3 dB (Figure 2)
- L'équilibrage de phase et de gain ont été effectués à 101 MHz avec -75 dBm à l'entrée.
- Accord +10 kHz du zéro central.

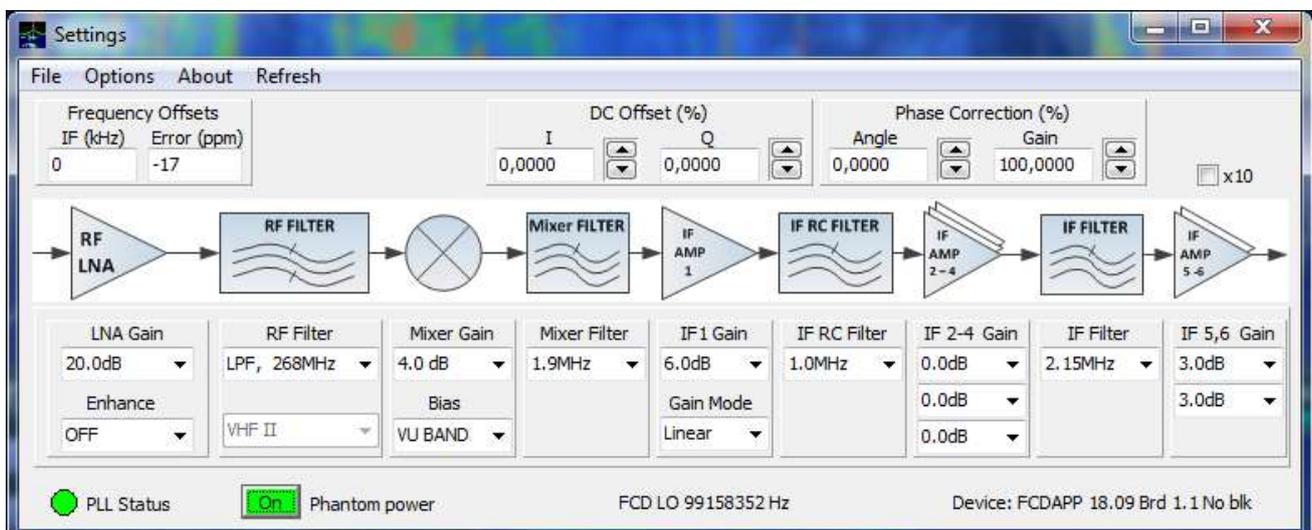


Figure 2 : Configuration par défaut du FUNcube dongle.

- Générateurs de signaux : SMG and SMS de Rhode & Schwarz
- Coupleur RVZ 6 dB (deux résistances de 50 Ohms) : de Rhode & Schwarz

Les mesures ont été effectuées à 101 MHz pour éviter la 10^e harmonique d'une base de temps 10 MHz de précision du labo de F5RCT. Cette fréquence fut également choisie en raison du comportement du FCD s'il est précédé d'un convertisseur HF dont le résidu d'oscillateur local influence la réception.

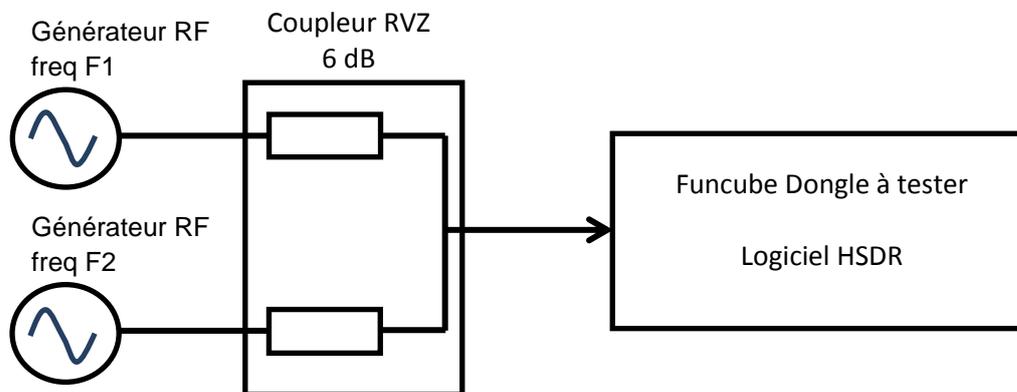


Figure 3 : Dispositif de mesure.

Mesure de la plage de dynamique:

Un signal de 101 MHz est appliqué à l'entrée antenne du FCD :

- **Signal minimum détectable en mode CW : -136 dBm** ; ce niveau est détectable à l'oreille.
- **Signal maximum: -68 dBm**

Le niveau maximum est arrêté dès l'apparition de raies de saturation à 3 dB du plancher de bruit de l'affichage du spectre principal. Nous remarquons que l'espacement de ces raies est identique à la différence de fréquence entre la raie centrale et le signal appliqué.

Niveau de blocage à 3 dB du récepteur :

- Un signal utile est généré à 101 MHz pour un niveau de -132 dBm (environ > 3 dB au-dessus du niveau minimal).
- Un signal brouilleur est généré à 100 MHz. Le niveau est augmenté jusqu'à atteindre une perte de 3 dB du signal utile. (gain du LNA : 20 dB)

Niveau de blocage : -45 dBm

Ce niveau correspond au point de compression du récepteur.

Ce niveau est typique des récepteurs IQ intégrés à large bande fonctionnant en courants faibles. Un mélangeur intégré **sans LNA** possède un niveau de blocage proche de -15 à -20 dBm. Ceci explique le problème de réduction de la sensibilité en présence de signaux hors bande (FM, TV, GSM). La fuite de l'oscillateur local d'un convertisseur HF mis en tête peut aussi désensibiliser l'entrée du FCD.

Ce faible niveau de blocage montre la nécessité de faire précéder le FCD d'un filtre de bande en présence d'un convertisseur ou d'un LNA.

F4EGX utilisé son FCD pour la réception des satellites défilants dans la bande 437 MHz, il obtient de très bons résultats avec un LNA filtré devant le FCD.

F6BZG a essayé de recevoir des informations météorologiques d'un aéroport local dans la bande aviation 128 MHz directement avec le FCD configuré à 20 dB de gain du LNA. La réception fut fortement améliorée pour 10 dB de gain du LNA en raison de la proximité de la bande de radiodiffusion FM !

Le niveau de blocage peut être facilement détecté lorsque le bruit du spectre augmente (figure 6), et la qualité s'améliore en réduisant le gain du LNA.

L'insertion de filtres passe-bande à l'entrée du FCD réduit fortement l'effet de blocage par des signaux indésirables. Par exemple, un filtre passe-bande à 145 MHz, de 2 MHz de large, préserve les signaux faibles des émetteurs FM et de la bande aviation.

Point d'interception du troisième ordre :

La mesure de linéarité du point d'interception du troisième ordre (IP3) est le paramètre le plus important pour caractériser un récepteur en plus de sa sensibilité, celle-ci à son tour définie par le facteur de bruit.

L'IP3e définit la linéarité et la capacité d'un récepteur à tenir les signaux forts. Le suffixe « e » signifie «à l'entrée ». Le point d'interception est mesuré à l'entrée du récepteur, et son niveau est lié à la puissance d'entrée en dBm.

Nous n'entrerons pas dans les détails théoriques sur l'IP3, mais nous allons rappeler quelques principes de base:

- Une règle empirique pour estimer l'IP3e consiste à le prendre 10dB au-dessus du point de compression (figure 4) : précédemment nous avons mesuré -45 dBm comme niveau de compression, cela donne environ -35 dBm comme IP3e !

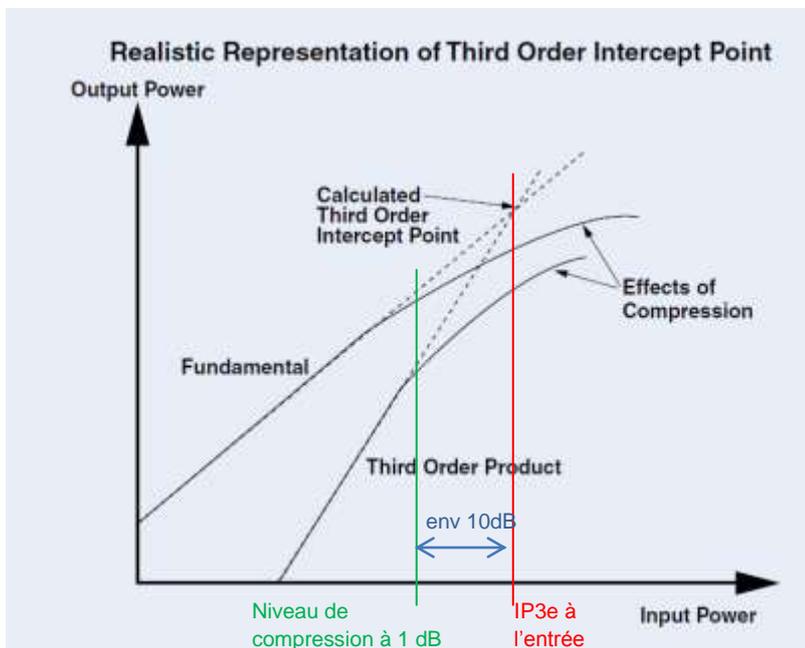


Figure 4 : Illustration de l'IP3E par rapport au niveau de compression.

- Pour la bande VHF, il est recommandé d'avoir l'IP3e supérieur à -10 dBm. La proximité de la bande FM donne aisément des niveaux de -40 dBm à quelques km d'un émetteur.
- Pour la bande HF, les signaux étant plus forts, il est recommandé d'avoir l'IP3e supérieur à +10 dBm.

- IP3e est très agressif ! Si les deux signaux brouilleurs augmentent de 1 dB, les produits d'intermodulation augmentent de 3 dB !
- Par rapport l'affirmation précédente, un atténuateur résistif de 10 dB à l'entrée du récepteur réduira les produits d'intermodulation de 30 dB ! ...mais la sensibilité sera dégradée de 10 dB !
- L'IP3e d'étages en cascade a un comportement opposé au facteur de bruit : l'IP3e du dernier étage dominera toute la chaîne. L'IP3e global dépend de l'IP3e et du gain individuel de chaque étage.
- En ajoutant un LNA de 10 dB de gain avec un IP3e le plus élevé possible devant un récepteur, on obtient l'IP3e total dégradé de 10 dB !
- L'intermodulation causée par la réception de signaux hors bande (émetteur de radiodiffusion HF) peut être facilement améliorée par des filtres passe-bande d'entrée. Il est plus difficile de supprimer l'intermodulation d'un LNA, ou d'un mélangeur, dans la bande utile, car il est impossible de construire un filtre étroit ajustable de 3 kHz de bande passante à l'entrée antenne (figure 5).
- L'intermodulation du second ordre peut être facilement supprimée par de larges filtres de bande (figure 5).

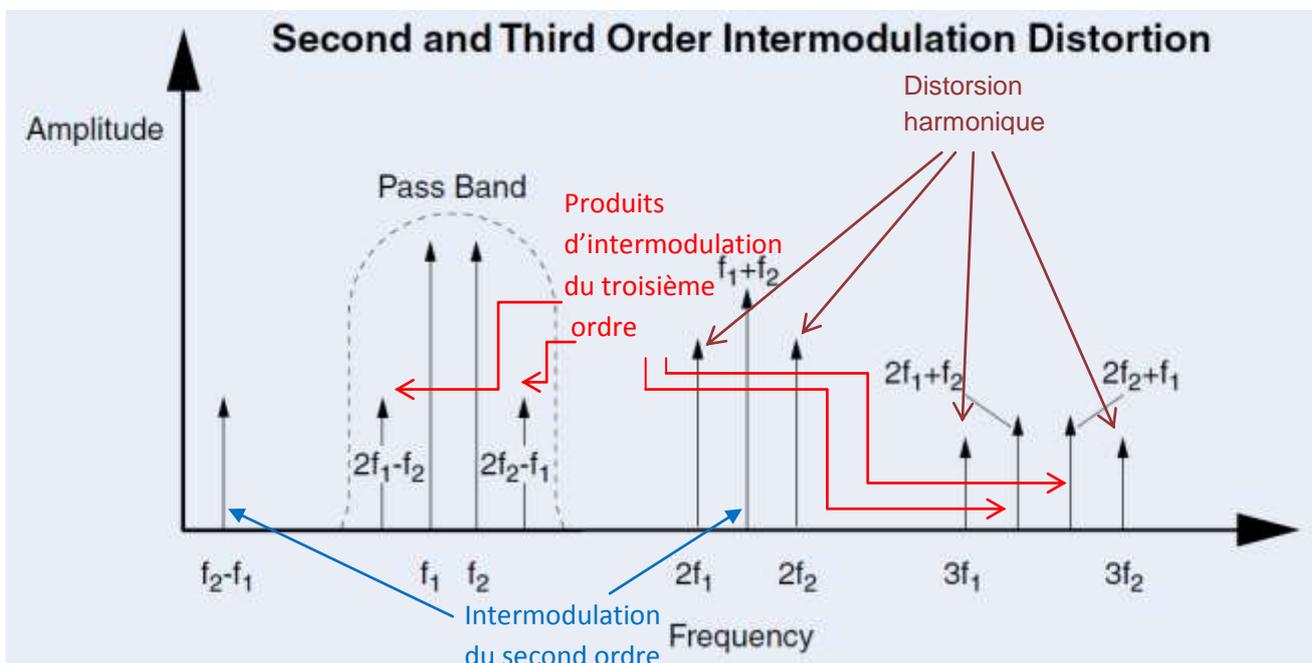


Figure 5 : Distorsion d'intermodulation et harmoniques causées par deux signaux F1 F2 :

Incertitudes de mesure :

- La tolérance sur le niveau absolu des 2 générateurs RF : +/-0,5 dB
- La lecture niveau d'intermodulation IMD3 est de +/-0,5 dB
- La tolérance sur IP3e est de +/-1,5 dB

La procédure de mesure est très simple :

- Les deux générateurs F1 = 102 MHz et F2 = 103 MHz sont augmentés simultanément pour créer un signal d'intermodulation sur le récepteur accordé ici à 101 MHz.
- On note le niveau de puissance de F1 et F2 : $P_e(F1) = P_e(F2)$.
- On note le niveau d'intermodulation sur l'écran du spectre affiché HSDR en plaçant la souris dessus comme un marqueur.
- L'un des générateurs est fixé à l'atténuation maximale (sans le couper ou activer la fonction RF OFF) pour garder l'adaptation correspondante à 50 Ohms.

- L'autre générateur est fixé à 101 MHz et le niveau est ajusté pour obtenir la même valeur que la raie d'intermodulation notée précédemment par le marqueur sur l'écran HDSDR.
- La lecture de la puissance du générateur à 101 MHz est le niveau de produit d'intermodulation P_{imd3e} .
- L'IP3e est calculé par la formule : $IP3e = (3 \times P_e - P_{imd3e}) / 2$ avec les valeurs en dBm.

Résultats de mesures d'intermodulation du Funcube dongle :

Nous avons fait des mesures avec des perturbations de la bande à espacement de 1 MHz ceci pour différentes valeurs de gain du LNA interne au FCD.

F1 = 102 MHz
 F2 = 103 MHz
 F(IMD3) = 101 MHz

| LNA gain | niveaux de F1 et F2 $P_e(F1) = P_e(F2)$ [dBm] | Niveaux IMD3 P_{imd3e} [dBm] | Point d'interception $IP3e = (3 \times P_e - P_{imd3e}) / 2$ [dBm] |
|----------|---|--------------------------------------|--|
| 20 dB | -70 | -140 | -35,0 |
| 10 dB | -61 | -128 | -27,5 |
| 0 dB | -53 | -119 | -20,0 |
| -5 dB | -50 | -115 | -17,5 |

La valeur de -35 dBm est confirmée par la mesure précédente du niveau de blocage.

Par rapport aux émetteurs-récepteurs VHF, l'IP3e de -35 dBm est un compromis pour ce récepteur large bande intégré avec 20 dB de gain du LNA.

Avec un convertisseur HF, les niveaux des signaux utiles de -63 dBm (S9 + 10dB), sont facilement obtenus. Ils génèrent un niveau d'intermodulation de -119 dBm qui est plus fort qu'un signal détectable minimal en mode CW (tel que mesuré précédemment à -136 dBm).

Puis nous avons fait une mesure à un espacement de 10 kHz pour obtenir l'IP3e global de la chaîne de réception et du traitement.

F1 = 101.01 MHz
 F2 = 101.02 MHz
 F(IMD3) = 101.00 MHz

| LNA gain | niveaux de F1 et F2 $P_e(F1) = P_e(F2)$ [dBm] | Niveaux IMD3 P_{imd3e} [dBm] | Point d'interception $IP3e = (3 \times P_e - P_{imd3e}) / 2$ [dBm] |
|----------|---|--------------------------------------|--|
| 0 dB | -54 | -119 | -21,5 |

Dans la bande utile, la chaîne de réception et de traitement n'a aucune influence sur la valeur de l'IP3e. Nous sommes proches des incertitudes de mesure.

La mesure d'intermodulation du troisième ordre confirme la nécessité des filtres de bande, ou d'un LNA sélectif, pour obtenir le meilleur du récepteur Funcube Dongle. Lors de la réception de signaux satellites faibles en milieu urbain, soyons conscient de la proximité de stations de base de téléphonie mobile (900 et 1800 MHz) qui peuvent comprimer l'étage d'entrée de ce récepteur !

On remarquera l'absence de blindage électromagnétique sur ce récepteur. Même avec l'entrée connectée à une charge coaxiale 50 Ohms, des signaux FM sont visibles 6 dB au-dessus du bruit du spectre affiché. Ceci pourrait être résolu par un enrobage avec de la feuille de cuivre adhésive reliée à la masse des connecteurs SMA et USB.

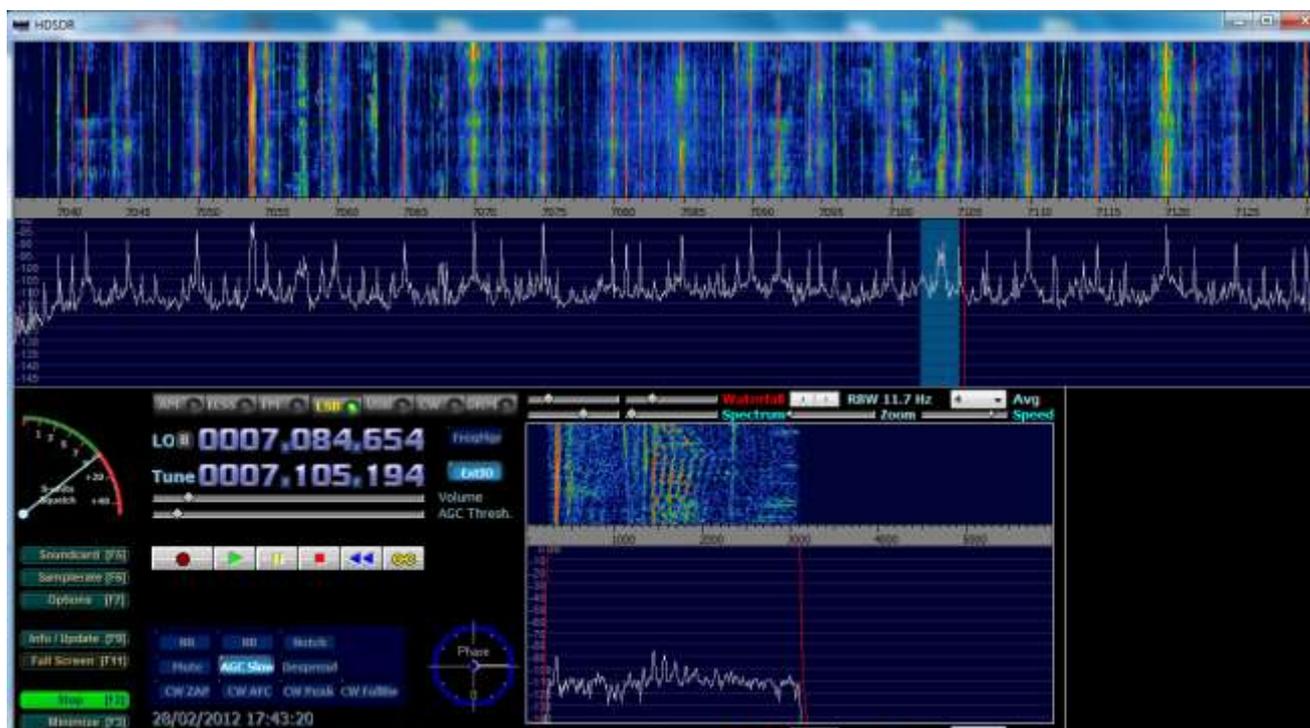


Figure 6 : Exemple de saturation et intermodulation avec le convertisseur de CT1FF en amont du Funcube Dongle.

Mesures du facteur de bruit :

La mesure du facteur de bruit définit la sensibilité du récepteur par la quantité de bruit supplémentaire à la sortie. Le rapport signal à bruit en sortie correspond au rapport signal à bruit en entrée dégradé par le facteur de bruit. Un bon facteur de bruit pour les récepteurs VHF et UHF sans LNA externe se doit d'être inférieur à 4 dB. Comme référence, l'émetteur-récepteur commercial IC-910 H a un facteur de bruit de 3,7 dB sur la bande VHF.

Configuration d'essai pour les mesures de facteur de bruit :

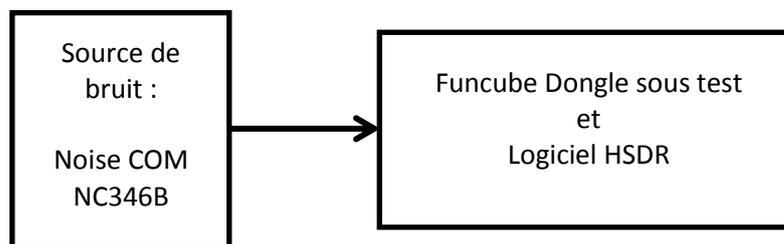
- Funcube Dongle testé : numéro de série S/N 2789
- Logiciel HDSDR version 2.11
- Réglage des gains par défaut : LNA= 20 dB, Mixer = 12 dB ; IF = 6 dB ; amplificateurs FI 0/0/0 dB
- L'équilibrage de phase et de gain a été effectué à 101 MHz avec -75 dBm à l'entrée.
- Accord +10 kHz du zéro central.

Une source de bruit calibrée est connectée au récepteur. Cette source est activée et désactivée pour obtenir le niveau de bruit de sortie défini comme « chaud » (on) et « froid » (off).

Le logiciel HDSDR est configuré en USB, RBW = 93 Hz, AVG = 128, durée de 300 à 3000 Hz dans la fenêtre de démodulation.

Le zoom et le facteur offset d'échelle sont ajustés pour une résolution maximale de 0,25 dB d'appréciation.

Une feuille de calcul extrait le facteur Y des niveaux de bruit de sortie en dB et calcule le facteur de bruit en dB par un passage en grandeurs linéaires.



La mesure de facteur de bruit par la méthode du facteur Y :

Le rapport de bruit mesuré à la sortie de l'EST (équipement sous test) est communément appelé « Y-factor » dans le jargon de la radioélectricité. Le facteur Y est le rapport entre la puissance de bruit en sortie de l'EST lorsque le générateur de bruit est activé (chaud : Nh) puis désactivée (froid : bruit de référence Nc). Sans entrer dans les détails, le facteur de bruit peut être relié à l'entrée.

Le facteur Y est le rapport entre la puissance (en watts) d'une charge 50 Ohms à chaud et à froid défini comme : $Y = N_h/N_c$

Si la source de bruit est à la température ambiante, alors $N_c = N_o$ et l'équation devient : $Y = N_h/N_o$

Notons que la méthode du facteur Y est une méthode relative et ne dépend pas du reste de l'équipement.

Tout ce dont vous avez besoin est de mesurer avec précision les niveaux de puissance, tandis que la source de bruit est désactivée et activée.

Le facteur de bruit est lié au facteur Y comme indiqué ci-dessous :

$$F = ENR / [Y-1]$$

Notez que les paramètres ci-dessus sont en unités linéaires.

Normalement, l'ENR (excess noise ratio) est indiqué sur la source de bruit est en décibels.

Cela doit être converti en unités linéaires pour le calcul du facteur de bruit, ou de convertir Y-1 en dB, ce qui donne :

$$NFdB = ENRdB - 10\log(Y - 1)$$

Qui peut être réduit à Y si $Y \gg Y-1$

$$NFdB = ENRdB - YdB \text{ avec } YdB = PdB(Nh) - PdB(Nc)$$

En simplifiant :

$$NFdB = ENRdB - PdB(Nh) + PdB(Nc)$$

L'erreur associée à cette approximation est : $ER = ENR / (Y^2 - Y)$ (en rapports linéaires)

Avantages de cette méthode :

- Le matériel nécessaire est moindre. Vous avez besoin d'une source de bruit calibrée et d'un wattmètre ou d'un voltmètre RMS en dB pour mesurer les niveaux de puissance bruit pour la source ON et OFF.
- La méthode peut être utilisée pour mesurer le bruit sur une large plage de fréquence.

Inconvénients de cette méthode :

- En raison de la limitation de la source de bruit, si le facteur de bruit de l'EST est très élevé, les résultats ne seront pas très précis.
- Le matériel doit être stable de sorte que vous puissiez obtenir des mesures reproductibles.

Incertitudes de mesure :

- Tolérance sur le niveau absolu de la source de bruit : +/- 0,02 dB
- Lecture niveau de bruit : +/-0,5 dB
- Tolérance sur le facteur de bruit +/-1,5 dB

Dans le tableau ci-dessous, le facteur de bruit est retourné pour différentes fréquences suivant la configuration du récepteur.

Les meilleures performances à 3,2 dB de facteur de bruit sont obtenues à 437 MHz pour le gain du LNA à 30 dB.

Sur la bande VHF (de 100 à 144 MHz), le facteur de bruit de 5 dB obtenu avec 20 dB gain du LNA est acceptable pour une exploitation dans des conditions réelles de réception.

En changeant de gain du LNA de 20 à 30 dB on améliore légèrement la sensibilité (0,5 à 1 dB), mais l'IP3e en entrée se réduit de -10 dBm ! Lors de la mesure de d'IP3e, nous n'avons pas fait d'évaluation avec 30 dB de gain pour le LNA, car le récepteur sature trop facilement dans cette configuration qui réduit les performances globales.

A 1296 MHz, les pertes d'entrée sont plus élevées que la bande 437 MHz. De toute façon, l'aide d'un bon LNA est nécessaire pour compenser la perte du câble d'antenne.

Nous avons vérifié le facteur de bruit à 51 MHz ; Notre récepteur est capable de démodulation, mais nous sommes hors de la fréquence spécifiée minimale de 64 MHz.

| FCD tuned Freq (MHz) | FCD LNA gain (dB) | Output Cold noise (- dBm) | Output Hot noise (- dBm) | Y factor (dB) | (Y-1) factor (dB) | Source ENR (dB) | Noise Figure (dB) |
|----------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|---------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 100 | 20 | 123,50 | 112,50 | 11,00 | 10,64 | 15,80 | 5,16 |
| 100 | 30 | 118,75 | 107,25 | 11,50 | 11,18 | 15,80 | 4,62 |
| 100 | 10 | 126,00 | 120,50 | 5,50 | 4,06 | 15,80 | 11,74 |

| | | | | | | | |
|-------|----|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| 144,3 | 20 | 122,50 | 112,00 | 10,50 | 10,09 | 15,80 | 5,71 |
| | 30 | 119,00 | 107,25 | 11,75 | 11,45 | 15,80 | 4,35 |

| | | | | | | | |
|-----|----|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| 437 | 20 | 122,00 | 111,00 | 11,00 | 10,64 | 15,70 | 5,06 |
| | 30 | 118,75 | 106,00 | 12,75 | 12,50 | 15,70 | 3,20 |

| | | | | | | | |
|------|----|--------|--------|-------|-------|-------|------|
| 1296 | 20 | 122,50 | 113,00 | 9,50 | 8,98 | 15,50 | 6,52 |
| | 30 | 118,75 | 108,00 | 10,75 | 10,36 | 15,50 | 5,14 |

| | | | | | | | |
|----|----|--------|--------|------|------|-------|-------|
| 51 | 20 | 123,00 | 118,50 | 4,50 | 2,60 | 15,80 | 13,20 |
| | 30 | 118,75 | 113,00 | 5,75 | 4,40 | 15,80 | 11,40 |

Pour finir, nous avons évalué les performances avec un convertisseur de CT1FFU HF modifié [1].

Nous avons utilisé une source de bruit différente avec de excès de bruit de 22 dB.

En raison de faibles valeurs de Y, les résultats sont approximatifs !

Décalage de fréquence : 106,250 MHz

| | | | | | | | |
|----|----|--------|--------|------|-------|-------|------|
| 7 | 10 | 129,75 | 127,50 | 2,25 | -1,80 | 22,00 | 24,0 |
| 30 | 20 | 127,00 | 125,00 | 2,00 | -1,56 | 22,00 | 23,5 |

Normalement un bon récepteur HF devrait avoir de 12 à 15 dB de facteur de bruit, mais ce convertisseur fonctionne correctement sur les bandes 20, 40 et 80 m même avec le gain du LNA configuré à 0 dB !

Conclusion :

Le FUNcube dongle a bonne sensibilité et permet de profiter pleinement de ses capacités. Ces tests montrent la nécessité d'un filtre d'entrée contre l'intermodulation et la compression.

Pour le meilleur compromis, nous recommandons d'utiliser le FCD avec un LNA externe à filtre de bande et pas plus de 10 à 15 dB de gain.

N'oubliez pas que ce produit a été développé pour des fins d'enseignement. Il permet à tous l'accès à une gamme de fréquences très large (64 à 1700 MHz), ceci dans tous les modes « bande étroite » et pour un prix très compétitif ! Ce qui est déjà en soi une prouesse !

Une partie du prix d'achat est remis à l'AMSAT UK pour leurs projets spatiaux.

Remerciement à F6BZG pour le prêt du récepteur.

F5RCT Jean-Matthieu STRICKER

[1] : Test report and modifications of the CT1FFU HF converter available on <http://f5rct.free.fr/explorer/> in directory Documents\Banc.Essais\

Liens :

IMD3 measurement :

<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/4384>

<http://downloadfile.anritsu.com/RefFiles/en-US/Services-Support/Downloads/Application-Notes/Application-Note/11410-00257a.pdf>

Noise figure :

<http://www.qsl.net/ct1dmk/noisefm.pdf>

<http://www.qsl.net/ct1dmk/nfsa.html>