

N°8 Mesure du bruit de phase.

Mesure du bruit de phase d'un oscillateur ou d'un instrument avec des analyseurs de spectre Low cost.
V5.1, Aout 2014. Par Kurt Ritter he9dy.

1 Avant-propos.

Les oscillateurs VCO Voltage Controlled Oscillator sont des composants bon marché et faciles à mettre en œuvre. Ils ont permis de réduire les coûts de fabrications d'un grand nombre d'appareils, mais cela au détriment de leurs performances au niveau du rapport signal bruit. De ce fait l'importance de leur mesure devient une donnée essentielle dans l'évaluation de leurs performances.

Le bruit de phase est une instabilité à court terme d'un oscillateur, en ce sens qu'il varie légèrement en amplitude, en phase et dans les cas grave carrément en fréquence. Tous les oscillateurs souffrent peu ou prou de ce phénomène, mais les VCO sont particulièrement prolifiques dans ce domaine, même ceux qui ont le label Low noise.

2 Introduction.

Le bruit de phase est en fait une légère modulation de la porteuse produite par l'oscillateur, ce qui se traduit par des bandes latérales plus ou moins importantes que l'on va mesurer avec un analyseur de spectre.

Pour définir le bruit de phase on mesure une des bandes latérales qui résultent de l'instabilité et ceci a une certaine distance de la fréquence de l'oscillateur. Dans la pratique, cette mesure est ramenée à une bande passante de 1 Hertz mesurée à 10 KHz ce qui donne des **dBc/Hz @ 10 KHz. (Voir Fig.1 et 4)**

La mesure du bruit de phase d'un oscillateur ou d'un générateur n'est pas une mesure facile, car elle est faite aux deux extrêmes limites de l'instrument, d'une part 3 dB en dessous de la saturation *Over loading* et 3 dB en dessus du bruit *DANL*. Par analogie c'est comme si on devait faire tourner un navire de 115 m de long dans un port de 120 m de large.

Le dBc deciBel to carrier

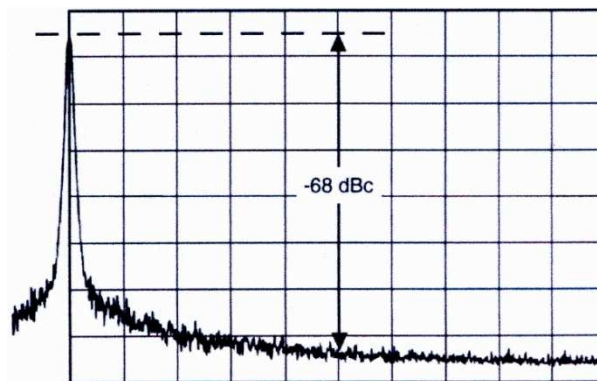


Fig.1 Spectrogramme exprimé en dBc
Attention, de ne pas confondre des dBm avec des dBc.

Deux autres points très important.

Pour mesurer le bruit de phase avec un analyseur de spectre, il faut que l'instrument soit moins bruyant que l'oscillateur que l'on veut mesurer.

Les mesures tel que représenté sur la fig.2 sont faites avec des instruments hautement spécialisés qui coutent très cher. (On parle de 80'000 US\$).

3 L'oscillateur de référence.

Pour déterminer le bruit de l'instrument on va se servir d'un oscillateur de référence à très faible bruit que l'on va mesurer avec notre analyseur de spectre.

Sachant que l'oscillateur de référence est infiniment moins bruyant que l'analyseur de spectre on mesurera automatiquement le bruit de l'instrument.

Le spectrogramme ci-dessous (Fig.2) nous montre que le bruit de phase de cet oscillateur à la valeur normée exprimée en dBc/Hz@10KHz se trouve a -172 dBc (Marker n°4).

Les dentelles que l'on voit à partir de 10Hz offset, proviennent probablement des résidus du 50Hz ou 60 Hz ou autres parasites qui ont échappé au filtrage de l'alimentation et qui ont modulé le signal qui sort de l'oscillateur. Le meilleur oscillateur du monde, si il est raccordé à une alimentation bruyante donc mal filtrée, peut se transformer en un oscillateur médiocre. (Bibl.n°3 et 4). J'en ai aussi fait l'amère expérience lors de la mise en boîte de mon OCXO Wenzel réputé pour son faible bruit de phase, qui était pourtant relié à une alimentation de laboratoire professionnelle. Pour trouver un spectrogramme propre de -75 a -115 dBm, Fig.5, j'ai dû ajouter des filtres a l'intérieur et a l'extérieur du le boitier en fonte d'aluminium de 3 mm de paroi spécialement conçu pour ses qualités EMC.

Si on ne dispose pas d'un oscillateur de référence OCXO on peut utiliser un générateur HF stable pour lequel on connaît le bruit de phase. (Données d'usine)

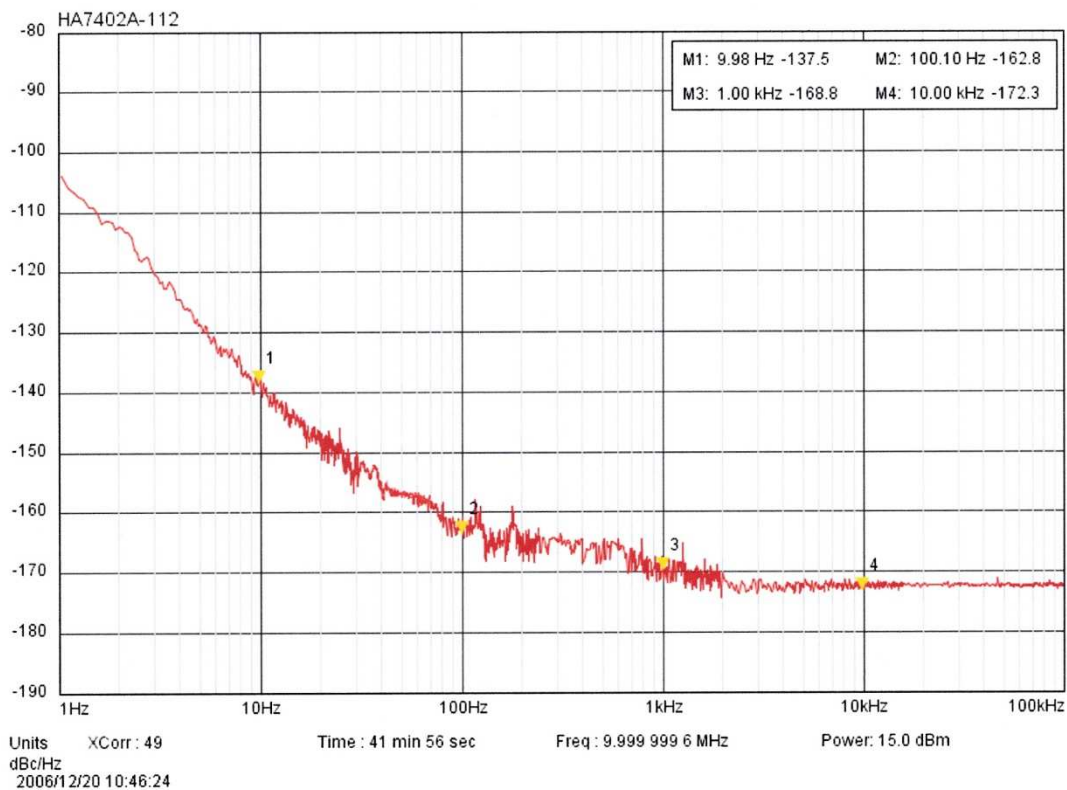


Fig.2 Spectrogramme d'usine de mon oscillateur Wenzel Streamline.

4 Mesures avec un Oscilloscope.

Il est très difficile de voir le bruit de phase avec un oscilloscope car il faut un instrument qui monte à la fréquence de la porteuse et il faut qu'il aye une très grande résolution. Cela fonctionne sur des fréquences basses comme ici sur 500KHz ; mais à partir de 50 MHz ce n'est plus possible du moins pas avec mes instruments.

Si on examine attentivement les oscillogrammes du signal mesuré (Fig.3a) on constate de légères variations de la pointe du signal. Par contre sur la (Fig.3b) qui est en mode persistance ou rémanence, on voit un épaississement du trait à la crête, ce qui signifie que le signal varie légèrement en amplitude et en phase. Cependant dans ce cas (signal peu bruité) on ne peut pas en déduire grand-chose. Par contre un signal très bruité pourra sans doute être examiné et estimé avec un bon oscilloscope.

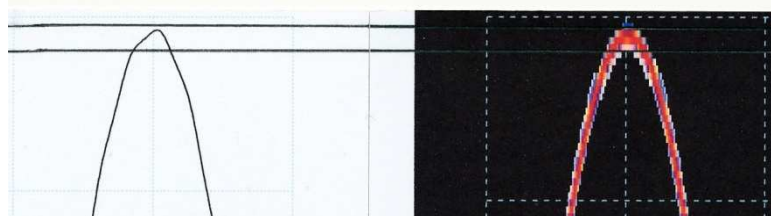


Fig.3a et 3b Oscillogrammes en haute définition de la crête du signal.

5 Mesures avec un analyseur de spectre.

Conditions préalables.

Pour mesurer le bruit de phase d'un oscillateur, il faut que l'analyseur soit moins bruité que le signal que l'on veut mesurer. On va se servir d'un oscillateur de référence à très faible bruit pour déterminer les limites de notre instrument.

Nous ne pouvons donc pas mesurer le bruit de phase de cet oscillateur puisque l'analyseur est plus bruité que l'oscillateur Fig.2. Par contre on connaîtra les performances de l'instrument, ce qui nous permettra de dire si un oscillateur xyz est plus, ou moins, bruyant que l'instrument.

Si il est plus bruyant on pourra aussi dire de combien de dBc et cela c'est déjà quelque chose d'utile à savoir.

Les 3 conditions requises pour faire la mesure.

1 Il faut que le DANL *Displayed Average Noise Level* qui est le niveau de bruit moyen affiché par l'instrument, soit plus bas que la limite de mesure imposée. Par exemple si on veut mesurer le bruit à -115 dBc il faut que le DANL soit au moins 3 dB en dessous c'est à dire -118 dBc.

On mesure le DANL simplement en bouclant l'instrument sur une charge de 50Ω avec le fenêtrage Gaussien et la RBW minimum disponible.

2 La dynamique de l'instrument c'est à dire la plage de mesure verticale doit être supérieur a la valeur mesurée. En d'autres termes on doit voir le signal dans son ensemble par exemple de -10 dBm a -130 dBm.

3 Le Filtre de résolution RBW doit être le plus proche possible de 1 Hz. Sur le spectrogramme ci-dessous (Fig.4), on voit clairement l'influence de la RBW sur le résultat de la mesure.

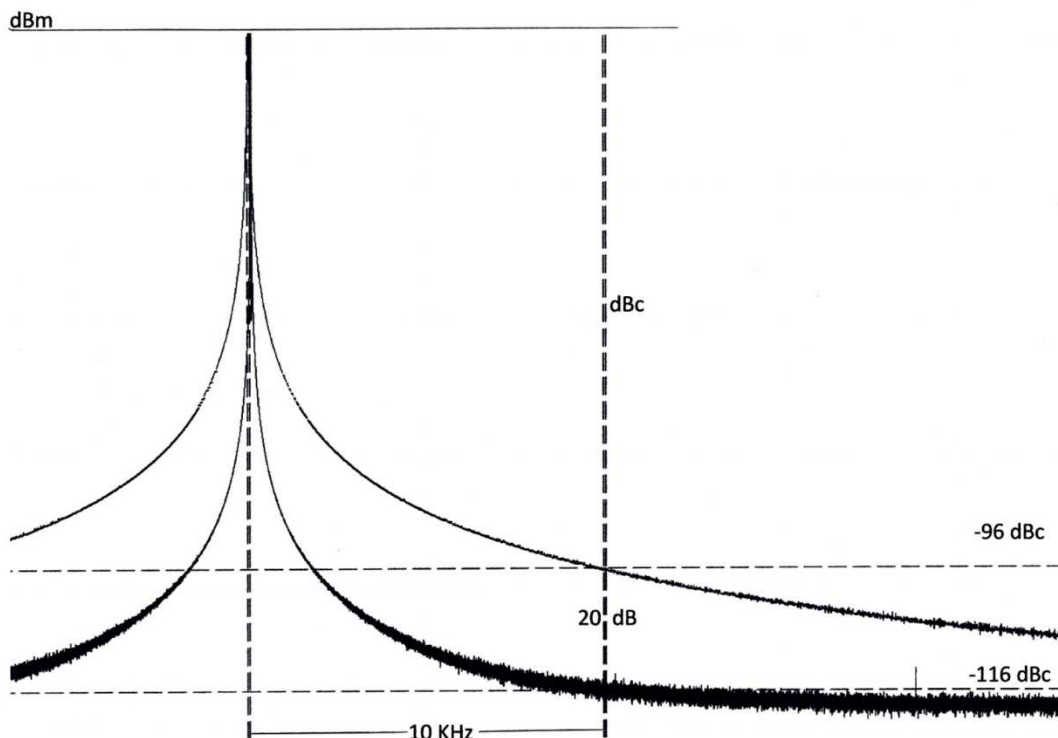


Fig.4 Deux Spectrogramme superposés d'un signal de 500 kHz mesurés avec une RBW de 1 et de 10 Hz.

La courbe a -116 dBc a été mesurée avec un RBW de 1 Hz @ 10 KHz Offset ; elle est donc exacte sans corrections. La courbe a -96 dBc a été mesurée avec un RBW de 10 Hz @ 10 KHz Offset elle doit être compensée de 20 dB. Pour comparer des mesures faites avec des instruments différents avec des RBW différents et offsets différents, il faut ramener tout ça a une valeur standard soit des **dBc/Hz @ 10 KHz** avec les facteurs de corrections ci-dessous.

6 Détermination des facteurs K.

Avec 3 facteurs de correction (un pour chaque déviation hors standard) on peut remettre les pendules à l'heure.

1 Kinst *K instrument* corrige la courbe de Gauss qui varie d'un instrument à l'autre. Il n'est pas très important et tourne aux environs de 5 dB. Il ne peut être déterminé que expérimentalement.

2 Krbw ramène une mesure faite avec un RBW plus grand que 1Hz à la valeur normalisée de 1Hz.

Il se calcule comme suit : 20 fois le Log(RBW) que l'on ajoute au dBc mesurés.

Par exemple avec un RBW de 10 Hz Krbw sera de 20 dB et avec un RBW de 100 Hz le Krbw = 40 dB.

3 Koff ramène une mesure faite avec in offset différent de 10 KHz à la valeur normalisée de 10 KHz.

On se retrouve finalement avec la formule suivante :

$$\text{dBc/Hz@10KHz} = \text{dBc mesuré} + 20 \text{ fois le Log de RBW} + \text{Kinst} + \text{Koff}$$

J'ai introduit cette formule dans un petit tableur Excel ce qui m'a permis de vérifier la validité des 3 facteurs K qui fonctionnent parfaitement avec mes **2 analyseurs FFT**.

Attention ! Cela ne veut pas dire qu'ils sont valables pour tous les analyseurs de spectre.

Pour les instruments FFT qui échantillonnent en tension ; on utilisera **20** fois le Log de RBW et Kinst 5.

Pour les instruments à balayage qui échantillonnent en courant ; on utilisera **10** fois le Log de RBW et Kinst 2.5.

(Pour plus d'informations voir Bibl.n°2)

7 Une mesure par la pratique.

On part de l'idée que l'on ne connaît rien de l'oscillateur que l'on va mesurer et on ne connaît pas non plus les performances de l'analyseur dans ce domaine de mesure. Par contre les facteurs K ci-dessous sont corrects.

On commence par faire une mesure a 10KHz offset donc avec Koff = 0

Les settings :

Atténuateur d'entrée : Set pour avoir un niveau de référence de -10 dBm au sommet du spectrogramme.

Signal injecté : -22 dBm.

Fenêtrage : courbe de Gauss.

RBW : la plus petite disponible. (Dans mon cas 14.9 Hz).

VBW (si disponible) : 3 fois RBW.

Mode : Moyenne avec 32 mesures au minimum.

Offset : 10 KHz.

On vérifie que les deux bandes latérales sont bien symétriques. Dans le cas contraire voir au chapitre 8.

On vérifie que l'on voit bien le signal à 10 KHz Offset sur chaque bande latérale (Fig. 5).

Si ces deux conditions sont remplies la mesure des dBc est correcte et il n'y a plus qu'à compenser la différence de RBW par rapport à 1 Hz pour retrouver des dBc/Hz@10KHz.

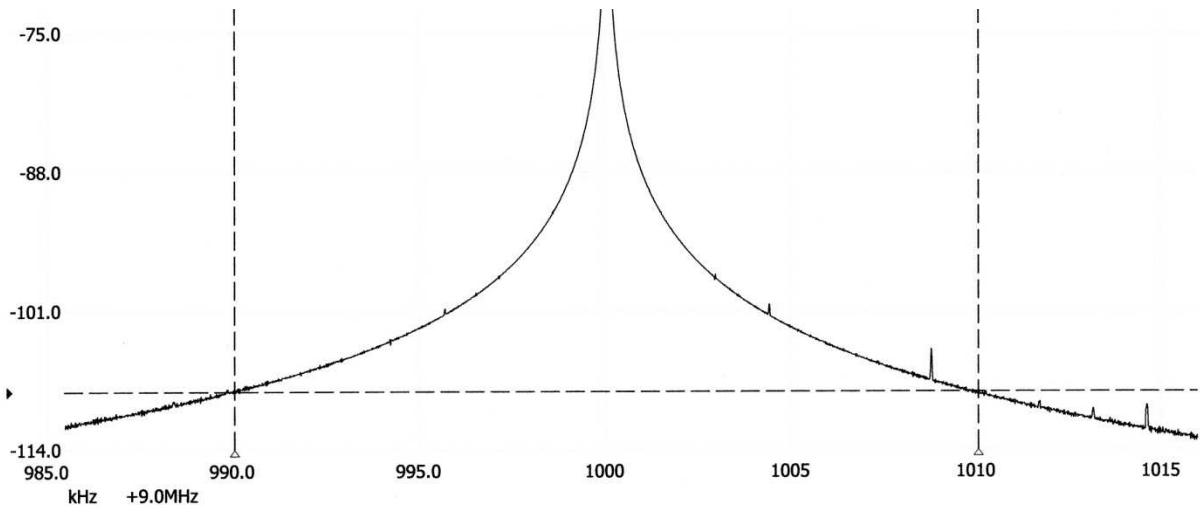


Fig.5 Ce que l'on doit trouver lors de la mesure de l'oscillateur Wenzel sur 10 MHz @ 10KHz Offset.

Instrument	Niveau de ref. -10dBm (50 mV)		Mesuré le 21.07.2014		
	Pico 3204A 60 MHz	Wenzel-500	10 MHz	TTi 2511	10 MHz
Oscillateur / fréquence					
Mesures					
DANL sur 50 Ohms dBm		-125	-122	-125	-122
Sig. Injecté dBm		-22.1	-22.1	-22.7	-22.7
Fenêtre Mhz		15.63	15.63	15.63	15.63
Mesuré @ Offset KHz		10.0	10.0	10.0	10.0
Kinst		5.0	5.0	5.0	5.0
RBW Hz		14.90	29.80	14.90	29.80
Krbw 20*(LOG(RBW)) dB		23.46	29.48	23.46	29.48
dBc mesurés		86.50	80.20	86.00	80.40
Koff		0	0	0	0
dBc/Hz @ 10 KHz Offset		115.0	114.7	114.5	114.9

Tabl.1 Résultats des mesures des oscillateurs Wenzel et TTi mesurés avec 14.9 et 29.8 Hz de RBW.

On voit que les résultats sont très proches à quelques dixièmes de dB ce qui n'est pas relevant dans la pratique. Les deux oscillateurs sont meilleurs ou équivalents au bruit de phase de l'instrument et dans ce cas on ne peut pas les départager. On sait toutes fois que le Wenzel est bien meilleur que le TTi mais ces mesures ne le montrent pas.

Quelques valeurs utiles pour calculer facilement les dBc résultants des mesures.

Krbw :	@ 1Hz	@10 Hz	@ 14.9 Hz	@29.8 Hz	@ 50 Hz	@ 100 Hz	@1000 Hz
20 x Log de RBW	0	20	23.46	29.48	34	40	60 dB
10 x Log de RBW	0	10	11.73	14.74	17	20	30 dB

Koff :	@ 5KHz Offset	@ 10KHz Offset	@ 15 KHz Offset	@ 20 KHz Offset
	6 dB	0db	-3 dB	-6 dB

Conclusions.

Sachant que l'oscillateur est bien moins bruité que l'instrument ; on vient de mesurer le bruit de phase de l'instrument et **non pas** celui de l'oscillateur.

Par contre on connaît maintenant les performances de l'instrument @ 10Mhz que l'on peut résumer comme suit :

DANL : -125 dBm

Dynamique verticale: 103 dB (125 – 22)

Bruit de Phase : 115 dBc/Hz@10KHz Offset.

RBW minimum sur la plage de fréquence de 0 à 15 MHz : 14.9 Hz.

Ces performances sont plus qu'honorables pour un instrument Low cost.

Pour fixer les idées les analyseurs de spectre à balayage low-cost descendent rarement en dessous de 90 dBc/Hz @10 KHz cela provient probablement du fait qu'ils sont équipés de VCO.

8 Une erreur de mesure propre aux analyseurs FFT.

Les 2 bandes latérales doivent être symétriques et sans Notch (encoche) dans une des bandes latérales comme on le voit sur le spectrogramme ci-dessous. (Fig.6)

Ce Notch dans le spectre peut être plus ou moins large et profond ; il provient d'un problème mathématique dans la procédure FFT appelé repliement du spectre. Les pointes (Aliasing) que l'on voit sur les bandes latérales proviennent du même problème.

Si cela se produit la valeur en **dBc** des **deux** bandes latérales sera surévaluée ; par contre l'amplitude reste correcte, cela signifie que seul le DANL est touché.

Si cela se produit avec un oscillateur variable, il suffit de le décaler de quelques Hz en dessus ou en dessous de la fréquence.

Si l'oscillateur est fixe on peut changer la RBW (Par le nombre de Bins en FFT).

En divisant le nombre de Bins par 2 : par exemple 524'288 à la place de 1'048'576 on provoque une réduction de 6 dB dans le résultat de la mesure qu'il suffira d'ajouter à la valeur en dBc mesurée.

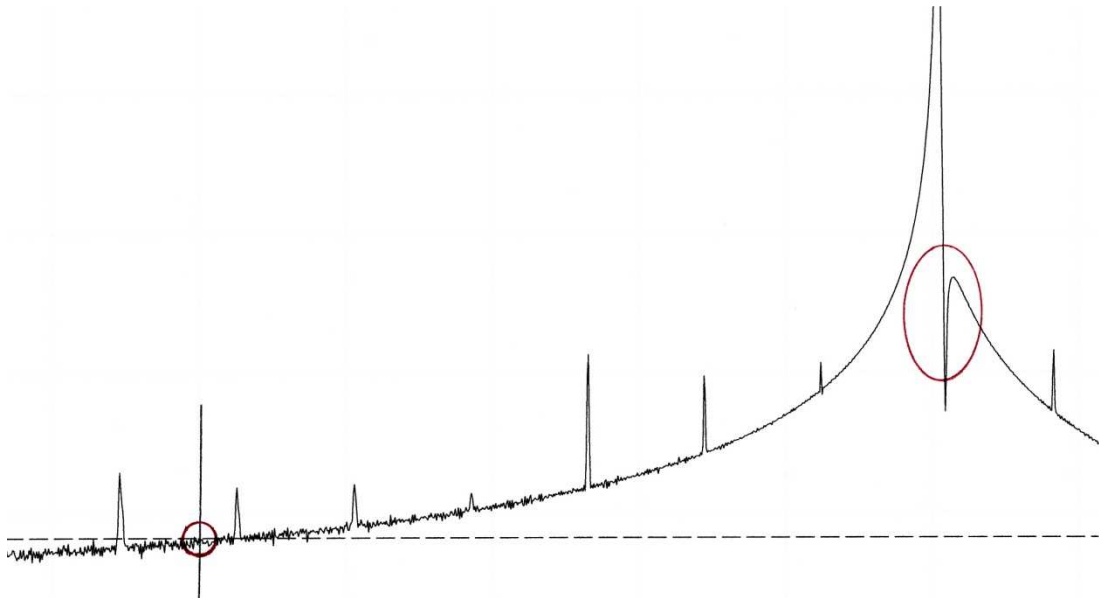


Fig.6 Bande latérale déformée par le repliement.

9 Glossaire pour analyseurs de spectre. V1 Rev0 Aout 2014.

Aliasing : Signal fantôme dus à un sous échantillonnage lors de l'analyse de signaux complexes.

Bins (Uniquement pour des analyseurs FFT) : Découpage de la plage de mesure en lignes d'analyse verticales (Bins) dont l'espacement en Hz équivaut à la largeur du filtre d'analyse (RBW) sur les analyseurs à balayage.

BW : Band Width largeur de bande.

DANL : Displayed Average Noise Level = Niveau de bruit moyen affiché.

dBm : dB par rapport au milli watt sur 50 Ohms.

dBc : dB to carrier : dB par rapport à l'amplitude du signal que l'on mesure.

dBc/Hz to carrier : dB par rapport à l'amplitude du signal par rapport à 1 Hz de RBW.

Dynamique : Dynamique verticale que l'instrument peut afficher. (dBc maximum affichable).

Drift : Glissement en fréquence lente, ou à long terme.

DUT : Device Under test. Élément sous examen ou mesure.

Carrier : Porteuse signal non modulé, porteuse blanche.

Facteurs K : Valeurs de correction que l'on introduit pour que la mesure soit correcte.

Fenêtrage : (Windowing) est une représentation « graphique » du signal qui met en évidence certaines caractéristiques du spectre. Gauss et Hann sont les plus répandus, Flat top est le plus précis pour mesurer les amplitudes.

FFT : Fast Fourier Transform = Transformée de Fourier rapide. Converti une série d'échantillons en spectre.

Intermodulations : Signaux fantôme souvent dus à la surcharge du circuit d'entrée de l'instrument.

Linéarité : Déviations en amplitude dans une plage de fréquence exprimée en dBm.

NG Noise Generator = Générateur de bruit blanc qui délivre un signal constant sur une grande plage de fréquence par exemple -100 dBm +/- 2 dB entre 1 MHz et 3 GHz. (Doit être calibré pour faire des mesures précises)

Notch : Encoche dans le spectre provoqué sciemment par un filtre Notch ou la conséquence de la procédure FFT.

Offset : Distance ou écart par rapport à la porteuse

OCXO : Oven Contoled Xtal Oscillator : Oscillateur à quartz dans une enceinte thermostatée.

QRM : Signaux parasites d'origine humaine.

QRN : Signaux parasites d'origine naturelle.

RBW : Resolution Band Width = Largeur du filtre de résolution exprimé en Hz. (voir aussi Bins)

Repliement du spectre : (analyseurs FFT) se remarque par spectre asymétrique qui fausse la mesure de l'amplitude du signal.

Sampling : Echantillonnage collecte des points de mesures. Doit comporter un nombre minimum d'échantillons.

Settings : Valeurs introduites dans l'instrument.

Signal : Signal utile qui est notre centre d'intérêt peut être un parasite si c'est lui qui nous intéresse.

Signaux complexes : Par exemple une porteuse modulée en phase et en amplitude, ou 2 porteuses modulées très proches l'une de l'autre. Cela complique singulièrement l'échantillonnage et le procédé FFT qui peut conduire à l'affichage de signaux fantômes.

SPAN : (Zoom pour les analyseurs FFT) Largeur de la fenêtre de visualisation sur l'écran.

VBW : Video Band Width = largeur du filtre vidéo qui va moyenniser le signal. Pour limiter l'erreur du niveau du spectre qui en résulte ; on introduit usuellement 3 fois la valeur de RBW.

VCO : Voltage Controlled Oscillator

10 Bibliographie :

1 Fondamentaux de l'analyse spectrale de Christoph Rauscher ISBN 978-3-939837-19-0 publié par R&S

2 National Instruments : Application note 041 The Fundamentals of FFT Based Signal Analysis.

3 L'excellent article de F9HX André Jamet paru dans Radio-Ref N°813.

4 L'excellent article de DC8RI Uwe Richter. Lokalszilator Für den transverter IRHX2010 publié dans FA 9/11

5 Les fenêtrages (Windowing) des analyseurs de spectre. Du même auteur.

Lausanne Aout 2014

Contact : ritterk@bluewin.ch