

N°6 Les analyseurs de spectre Low cost en 2014.

6a Première partie Introduction aux techniques de l'analyse spectrale.

V4.1 Aout 2014. Par Kurt Ritter he9dyy.

Avant-propos.

Depuis quelques années plusieurs fabricants (Aaronia, Hameg, Gw-Instek, TTI, RIGOL, RF Explorer) offrent des analyseurs de spectre à des prix à la portée des radioamateurs.

On peut les classer dans 3 catégories :

Catégorie I moins de 1000 CHF. Assez limités dans leurs performances.

Catégorie II 1000 à 2000 CHF. Suffisant pour les mesures courantes et la reconnaissance du signal.

Catégorie III plus de 2000 CHF. Certains s'approchent des appareils haut de gamme qui permettent de faire des mesures délicates telles que la mesure du bruit de phase d'oscillateurs.

Introduction.

Que peut-on voir ou mesurer avec un analyseur de spectre ?

La forme du Spectre et son amplitude.

Les harmoniques avec leurs amplitudes générés par un TX ou un oscillateur.

Le taux de modulation d'un Tx.

Le QRM généré par des équipements électroniques par exemple les alimentations à découpage.

Les signaux fugaces Hopping ou pulsés. (WiFi, Bluetooth, QRM, Radar)

Les pertes d'insertion d'un élément.

Le bruit thermique d'un équipement de réception.

Le bruit de Phase (Stabilité à court terme) d'un oscillateur (dans une certaine limite)

Il existe deux moyens techniques pour obtenir une représentation fréquentielle d'un signal.

1 Les analyseurs à balayage.

2 les analyseurs FFT qui peuvent être combinés avec un Oscilloscope à mémoire.

Les analyseurs de spectre à balayage.

Les analyseurs à balayage qui comportent deux sous-groupes :

1 Les analyseurs à balayage direct

2 Les analyseurs à balayage Hétérodyne.

Les deux utilisent des filtres de résolution de largeurs différentes et de ce fait leur mise en œuvre est similaire.

1 On définit une plage de mesure (SPAN) qui va d'une fréquence A une fréquence B.

2 On choisit la largeur du Filtre de résolution (RBW) en fonction du degré de détail que l'on a besoin. Fig.5.

1 Les analyseurs à balayage direct



Fig. 1a Le minimaliste

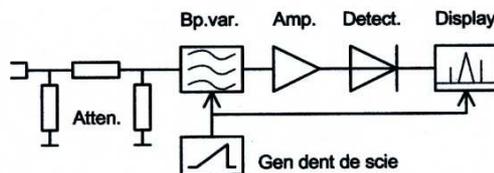


Fig.1b Analyseur à balayage directe

Principe de fonctionnement.

Le filtre de résolution (BP. Var) se déplace dans la fenêtre de mesure SPAN.

Ce genre basic d'analyseur de spectre est utilisé dans les instruments très bas de gamme.

Son principal défaut provient du filtre de résolution qui doit fonctionner sur la fréquence fondamentale, et il est difficile de faire des filtres de résolution à bande étroite et des générateurs de dent de scie linéaires qui montent en fréquence.

Ce genre d'instruments sont utilisés dans les adaptateurs panoramiques raccordés sur la MF des récepteurs par exemple les SDU (Spectrum Display Unit) de AOR .

En 2014 on trouve des « instruments » qui malgré tout montent en fréquence mais leur performances sont très limitées voir médiocres surtout en ce qui concerne la résolution. Cependant si on les utilise en tant que indicateurs de niveaux HF avec l'affichage de la fréquence ils peuvent rendre service.

2 Les analyseurs à balayage Hétérodyne.



Fig. 2a Le RIGOL DSA1030A le top du Low cost.

Il a tout d'un grand : 9 KHz à 3 GHz. RBW mini 10 Hz. DANL -146 dBm. Phase noise 88 dBc/Hz @ 10 KHz avec une RBW de 10Hz. (100 dBc/Hz serait parfait)

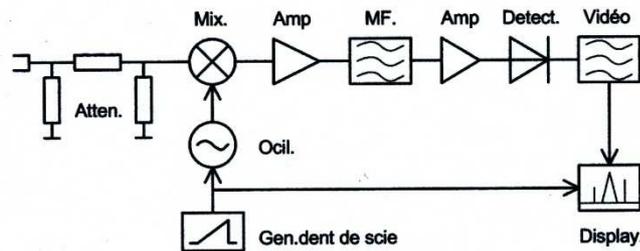


Fig.2b Analyseur à balayage hétérodyne.

Principe de fonctionnement :

La fenêtre de mesure SPAN défile devant le filtre de résolution fixe (MF)

Par le principe du Super hétérodyne la fondamentale est abaissée sur une fréquence plus basse pour être analysée. C'est donc un récepteur scanner mais sans circuit sélectif d'entrée ; le signal attaque directement le mélangeur (Mix), ceci explique leur grande sensibilité aux surcharges du circuit d'entrée. Le niveau à l'entrée du mélangeur doit impérativement rester dans sa partie linéaire, sinon l'instrument va générer des intermodulations internes et afficher des choses qui n'existent pas. Voir Fig.4b

Le principal avantage de ces instruments c'est monter en fréquence et d'être assez précis si on les utilise correctement. Ils ont également une bonne dynamique c'est à dire qu'ils peuvent afficher des signaux faibles en même temps que des signaux forts mais attention à ne pas sortir de la partie linéaire du mélangeur.

3 Analyseurs FFT Fast Fourier transforme.



Fig.3a Picotech Oscillosopes et Spectroscopes avec sorties USB

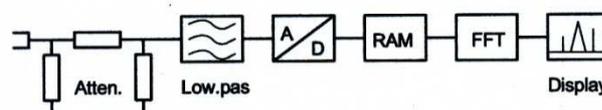


Fig.3b Analyseur FFT

Principes de fonctionnement.

Tout ce qui se trouve dans la bande passante sélectionnée est échantillonné et traité dans le module FFT.

Pour faire une mesure en plus du réglage du niveau d'entrée (atténuateur d'entrée), il faut introduire au moins deux valeurs dans l'instrument.

1 La largeur de la bande passante par exemple 60 MHz.

2 Le nombre de Bins (éléments de spectre) qui va définir le niveau de détail de la mesure. Dans la documentation de l'instrument on trouve généralement la relation entre Bins et RBW.

Le temps d'analyse dépend aussi des performances des circuits électroniques en particulier de la vitesse du convertisseur Analogique/Digital (A/D) et du traitement FFT (Fast Fourier Transforme).

L'analyse d'une fenêtre de 30 MHz avec une RBW de 100 Hz dure moins d'une seconde.

On peut donc faire des analyses en temps réel.

4 Différences entre les analyseurs à balayage et les analyseurs FFT.

Les analyseurs Hétérodyne à balayage montent bien en fréquence ; mais ils ne descendent généralement pas en dessous de 9 KHz.

Les versions Lowcost utilisent souvent des oscillateurs internes du type VCO Voltage controled oscillators qui sont assez bruyants par rapport aux oscillateurs synthétisés que l'on trouve dans les versions haut de gamme. Il e résulte un bruit de phase qui les limitent en sensibilité à cause d'un DANL élevé.

Les analyseurs FFT commencent a moins de 1 Hz mais montent mal en fréquence, cela provient des convertisseurs Analogique Digital (A/D) dont les prix deviennent astronomiques en dessus de 200 MHz (Prix 2014) d'autre part on ne pourra plus se contenter d'un filtre d'entrée Low pass ; il faudra les munir de filtres passe band a largeur variable de bonne qualité.

Le bruit de phase interne est faible car il n'a pas d'oscillateurs local ni de mélangeurs.

A l'heure actuelle 2014 si on veut monter en fréquence plus de 200 MHz ; il faut les raccorder sur la sortie MF d'un récepteur mais la qualité de l'instrument ainsi crée dépendra beaucoup de la qualité du récepteur.

Beaucoup d'analyseurs haut de gamme fonctionnent sur ce principe.

5 Les 5 commandes principales d'un analyseur de spectre et leur rôle.

1 L'atténuateur d'entrée.

On voit que les 3 types d'instrument ont un élément commun l'atténuateur d'entrée (Atten)

Cet élément d'apparence simple, joue un rôle déterminant dans l'exactitude des mesures faites avec analyseurs de spectre.

Il sert a regler le niveau correct du signal a mesurer, il faut imperativement rester dans la plage linear de l'instrument mais ce niveau peut nous jouer de vilains tours surtout lorsque on fait des mesures sur une antenne.

2 Les filtres de résolution.

En fonction des mesures, on choisira un filtre plus ou moins large désigné par RBW (*Resolution Bandwidth*)

Les RBW usuelles vont de 10 Hz à 5 MHz par pas 1 – 2 – 5 – 10. On a besoin de RBW étroites pour faire des mesures précise et détaillée de la largeur du spectre et dans ce cas on choisira la RBW la plus fine disponible.

Par contre on utilisera des RBW larges pour mesurer correctement l'amplitude des spectres et dans ce cas la largeur du filtre doit être égale à la largeur du spectre. Ceci est particulièrement important pour des signaux de plus de 25 KHz ; par exemple si on mesure l'amplitude d'un émetteur UMTS (5MHz) avec une RBW de 1 KHz l'amplitude sera sous-évaluée de plusieurs dizaines de dB.

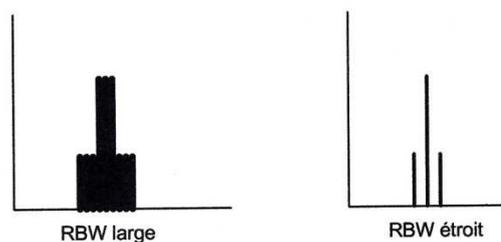


Fig.5 RBW (*Resolution bandwidth*)

Nous voyons clairement que l'emploi d'un filtre de résolution large nous trompe sur la largeur réelle du spectre.

Nous voyons aussi que la mesure de l'amplitude d'une émission de plus de 25 KHz passe par deux mesures.

La première pour déterminer la largeur et la forme exacte du spectre et la seconde pour mesurer son amplitude avec une RBW la plus proche possible de la largeur réelle du spectre.

On peut aussi calculer un facteur K de correction avec la formule : $K_{bwsig} = 10 * (\text{Log}(BW_{sig}/RBW))$

3 La plage de mesure.

Donnée en fréquence de Start et de stop ou en Fréquence centrale et la largeur de la plage de mesure SPAN.

Les analyseurs FFT ont souvent des plages de fréquences qui partent de 0. Par exemple 0 à 15 MHz on regarde la partie du spectre qui nous intéresse avec la fonction zoom.

4 les modes d'affichage : Amplitude (Free running), Moyenne (Average), Maintien du pic (Peak&Hold).

Ces fonctions doivent être expérimentées avec la mesure d'un signal connu.

5 Les fenêtres, les plus courants sont : Gauss, Hann, A sommet plat (Flat top).

Ces fonctions doivent être expérimentées avec la mesure d'un signal connu.

6 Autres caractéristiques des analyseurs de spectre.

6.1 Le SWEEP TIME : (dans le cas des analyseurs à balayage).

La vitesse d'analyse *Sweep Time* (une traversée de l'écran) dépend de la largeur du filtre de résolution RBW et de la largeur de la fenêtre de mesure SPAN. Plus le filtre est étroit plus l'analyseur doit faire de pas pour traverser la fenêtre de mesure. Chaque pas doit être interprété, affiché et mémorisé par l'instrument, ce traitement est plus ou moins rapide selon les instruments. Dans le cas d'analyseurs *Low cost* à balayage, il ne faut pas s'étonner si la mesure de la bande FM OUC avec SPAN de 30 MHz et une RBW de 100 Hz peut durer des dizaines de minutes.

6.2 Bande passante : Fréquence mini / maxi. (Par exemple 9KHz à 3GHz)

6.3 SPAN : Largeur de la fenêtre d'analyse mini / maxi. (Par exemple de 10KHz à 20 MHz)

6.4 Zéro SPAN : Oui / non. (Permet de voir la modulation d'une porteuse en mode Oscilloscope)

6.5 RBW : Largeur des filtres d'analyse disponibles mini / maxi par exemple de 100Hz à 5MHz. (1Hz c'est le top. 10Hz c'est très bien. 100Hz est la valeur minimum pour les applications Radioamateur.)

6.6 Dynamique ou Résolution verticale : C'est la hauteur de la fenêtre en dB que l'instrument peut afficher. Par exemple 80 dBm de -10 à -90 dBm ou de +10 à -70 dBm. 80dB est une valeur minimum pour les applications Radioamateurs.

6.7 DANL : *Displayed Average Noise Level*. Niveau de bruit affiché en l'absence de signal @ la RBW mini. Par exemple -100 dBm.

6.8 Phase noise : bruit de phase des oscillateurs internes. Par exemple 90 dBc/Hz @ 10 KHz.

C'est cette valeur qui limite le DANL et les possibilités de faire des mesures de bruit de phase d'oscillateurs externes. Un instrument ne peut pas mesurer un bruit de phase plus petit que son propre bruit de phase.

6.9 Tracking generator : Oui / non. Permet de faire la courbe de réponse d'un élément. (Filtres, antennes, etc.)

7 Mesure des performances d'un analyseur de spectre.

Afin de ne pas trop demander à son instrument, il faut connaître 4 valeurs fondamentales.

Entre tarentaises les valeurs minimum requises pour un usage Radioamateur.

Pour faire ces mesures il faut disposer des équipements suivants :

1 Charge fictive précise de 50 Ω .

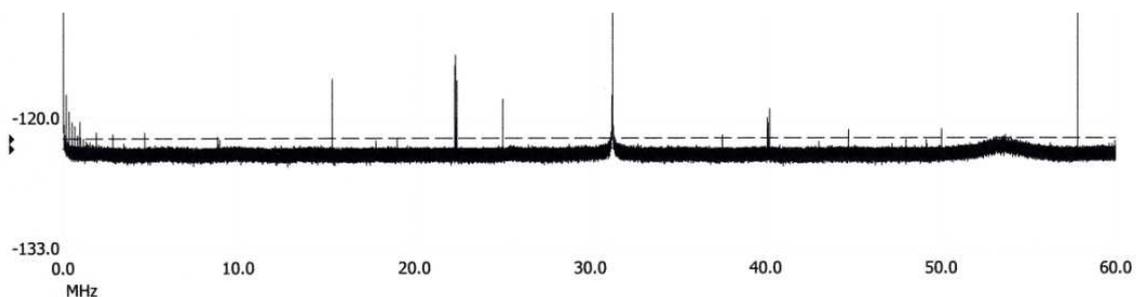
1 Oscillateur de référence à faible bruit sur 10 MHz.

1 jeux d'atténuateurs de précision permettant de descendre le signal de l'oscillateur de référence vers -100 dBm.

1 Générateur de bruit *Noise generator* calibré qui monte jusqu'à la fréquence maximum de l'instrument.

7.1 Le DANL.

Se mesure simplement avec l'instrument sur une charge de 50 Ω avec le RBW minimum disponible. (-100 dBm)

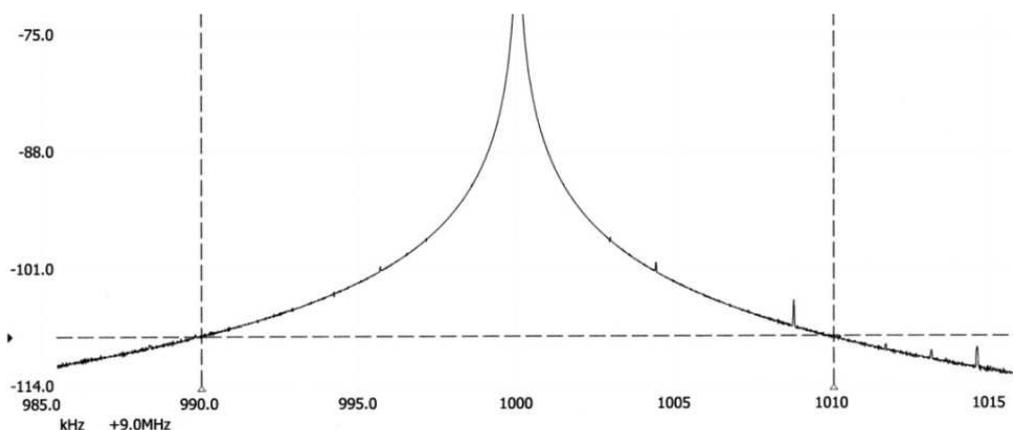


Mesure du DANL. Entre 0 et 60 MHz il y a 1 dB.

Le DANL varie avec la fréquence on voit par exemple ci-dessus une bosse vers 55 MHz. On peut trouver plusieurs bosses et creux dans une plage de 9KHz à 3 GHz.

7.2 Le bruit de phase.

Se mesure avec un oscillateur de référence à très faible bruit. (-80 dBc@10KHz)



Mesure du bruit de phase à 10 MHz.

En principe on ne mesure qu'une des bandes latérales qui devraient être symétriques, mais ce n'est pas toujours le cas raison pour laquelle je mesure les deux bandes latérales. (Est d'écrit en détail sous N°8 *Mesure du bruit de phase* du même auteur)

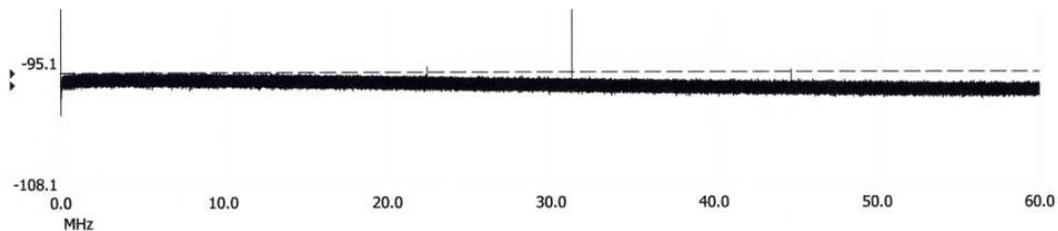
7.3 La dynamique verticale. (80 dBc)

On cherche la plus grande valeur en dB par rapport au DANL que l'instrument est capable d'afficher et de mesurer sans traces de surcharge (*Overloading*) qui provoquent des images fantôme.

On fera cela avec l'oscillateur de référence et le jeu d'atténuateurs.

7.4 La linéarité

Se mesure avec un générateur de bruit calibré. Par exemple 10KHz a 3 GHz a -100 dBm +/- 1 dB.



Mesure de la linéarité. Entre 0 et 60 MHz il y a 1.4 dB.

Dans cet exemple la sensibilité diminue linéairement avec la fréquence ; mais elle peut aussi varier « onduler » à certaines fréquences.

Les mesures ci-dessus ont été faites avec les settings suivants:

Largeur de la fenêtre de mesure (SPAN) : 60 MHz

Niveau de référence : -10 dBm

Fenêtrage : Gauss

Mode : Moyenne (32 mesures)

RBW : 57 Hz (1'048'576 Bins soit 2'097'052 échantillons)

Nous connaissons maintenant notre instrument on peut donc passer à la deuxième partie **6b Exemple de mesures.**

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

OCCO : 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 modulé en 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 moyennner 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.

Bibliographie :

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

Tektronix Analyse du spectre .pdf

HP Spectrum Analyser Basics .pdf

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

Les fenêtrages (Windowing) des analyseurs de spectre. De he9dyy Kurt Ritter.

Mesure du bruit de phase avec des analyseurs low cost. De he9dyy Kurt Ritter.

Pour obtenir les pdf ou autres renseignements.

Contact : (Auch auf Deutsch) ritterk@bluewin.ch

Kurt Ritter he9dyy aout.2014

Les analyseurs de spectre Low cost V4 rev1 aout 14.docx