Systèmes Linéaires et Signaux
Première année

ESPCI PARIS
EDUCATION SCIENCE INNOVATION

Analyse spectrale
à l'aide d'un analyseur de spectre analogique

Il existe plusieurs techniques pour obtenir le contenu fréquentiel d'un signal analogique. La plus connue est l'analyse par transformée de Fourier numérique. Elle donne d'excellents résultats mais elle fait appel à un échantillonnage, ce qui implique certaines contraintes d'utilisation.

Une autre technique consiste à mesurer la puissance du signal analogique en utilisant des transpositions de fréquences et des bancs de filtres d'analyses. Avec cette technique, on balaye un domaine fréquentiel (ou span), avec un filtre d'analyse (ou de résolution) plus ou moins étroit donc plus ou moins sélectif. On mesure pour chaque point de fréquence la puissance passant à travers le filtre d'analyse. Cette méthode à l'origine complètement analogique est la plus ancienne et la plus utilisée dans la mesure spectrale des signaux aux hautes fréquences.

Depuis quelques années les analyseurs de spectres "analogiques" les plus perfectionnés incluent un échantillonnage et un traitement numérique du signal analogique après transposition des fréquences hautes vers une fréquence basse unique (de l'ordre de 10MHz). Les différents filtres analyse employés sont analogiques ou numériques. Cependant, contrairement à un traitement par transformée de Fourier sur un oscilloscope numérique par exemple, le problème de l'échantillonnage du signal ne se pose pas. Le signal est toujours sur-échantillonné.

L'objectif de ce TP est de vous familiariser avec l'analyse spectrale analogique qui offre une autre approche de la décomposition spectrale que la FFT avec des utilisations différentes. Vous vous familiariserez ainsi avec les notions de niveau de référence, de filtre de résolution, de plancher de bruit, avec l'utilisation du "span" (avec en particulier le mode "zero span" qui permet d'obtenir des informations temporelles par une analyse fréquentielle).

Matériel nécessaire :
- Analyseur de spectres ROHDE &SCHWARZ FSC6
- Générateur arbitraire Agilent 33120A ou 33220A
- Un oscilloscope.

Table des matières

1 Notions élémentaires et prise en main de l'analyseur de spectre. 2
1.1 Influence du "span" et du filtre de résolution de mesure. . . . 2
1.2 Notion de bruit de phase 2
1.3 Notion de plancher de bruit 2

2 Visualisation de signaux modulés en amplitude, puis en fréquence. 3
2.1 Modulation d'amplitude 3
2.1.1 Modulation normale 3
2.1.2 Mesure en "zero span" pour une modulation lente 4
2.2 Modulation de fréquence 4
2.2.1 Modulation normale 4
2.2.2 Mesure en Span zéro 4

1 Notions élémentaires et prise en main de l'analyseur de spectre.

1.1 Influence du "span" et du filtre de résolution de mesure.

L'objectif de cette manipulation est de comprendre le maniement du domaine de fréquence exploré (SPAN). Celui-ci peut être défini de deux façons :

- une fréquence de départ et une fréquence d'arrivée : Touche **[FREQ]**
- un span ou intervalle de fréquences, centré sur une fréquence centrale. Touche **[SPAN]**

Un autre réglage principal de l'appareil est le niveau de référence (Ref Level) touche **[AMPT]** (amplitude) qui permet de régler le gain de la chaîne d'acquisition en mettant en ligne ou en retirant des atténuateurs en tête de la chaîne d'amplification de l'analyseur de spectre.

Vous allez maintenant effectuer les manipulations suivantes pour comprendre le fonctionnement de base de l'analyseur de spectre.

1. Réglez le générateur arbitraire pour qu'il vous génère un signal sinusoïdal à 2MHz non modulé, d'une puissance de -30 dBm**.** Vérifiez par le calcul et sur le générateur que cela correspond bien à une amplitude de 20 mV crête/crête.
2. Appuyez sur la touche bleue **[PRESET]** pour remettre l'analyseur de spectre dans sa configuration par défaut. Notez le temps de mesure (balayage).
3. Réglez la fréquence centrale sur 2 MHz de façon à visualiser le signal du générateur. Notez la modification correspondante de l'étendue de mesure (SPAN).
4. Passez en signal carré de rapport cyclique 50% toujours à 2MHz. En réglant une étendue de mesure de 30 MHz (Touche **[SPAN]**), dénombrez et interprétez les pics de fréquences sur l'écran.
5. Maintenant, en modifiant les réglages, vous "zoomerez" sur la fréquence fondamentale à 2MHz et sur ses éventuelles harmoniques. Vous noterez qu'il ne s'agit pas d'un simple zoom, mais que l'analyse fréquentielle est alors de plus en plus précise. Commentez l'influence de la diminution du "span" sur le temps de balayage observé.
6. Pour un "span" donné, il est possible d'améliorer la résolution spectrale en diminuant manuellement la valeur du filtre de résolution (Menu **[BW/RBW/Manual RBW]**). Quel peut-être l'intérêt de cette fonction ? Quel est, à votre avis, l'intérêt d'un filtre vidéo qui ne joue que sur l'affichage et non sur la mesure du signal ? (Menu **[BW/VBW]**)

1.2 Notion de bruit de phase

1. Repassez au signal sinusoïdal de départ (fréquence 2MHz et puissance -30dBm). En augmentant et en diminuant la largeur du filtre de résolution, on observe une variation correspondante de la largeur du pic de fréquence du générateur. Expliquez le phénomène observé.
2. En temps normal, qu'implique une raie spectrale (pic à l'écran) large pour un générateur ?

La "largeur de pic" intervient dans la notion de bruit de phase d'un oscillateur. Le niveau de bruit de phase est défini pour un filtre de résolution donné (w). Il est mesuré sous forme d'écart de puissance par rapport au niveau mesuré à la fréquence centrale. Le bruit de phase est mesuré pour différents écarts de fréquence spécifiques (Δf), par rapport à la fréquence centrale. Le résultat est ainsi en dB_c/Hz à $\Delta f Hz$ (écart en Hz par rapport à la fréquence centrale) comme l'indique la figure 1.

1.3 Notion de plancher de bruit

En fonctionnement, vous observez une ligne de base sur l'écran même en l'absence de signal. Il s'agit du niveau du bruit mesuré par l'analyseur de spectre au travers de sa chaîne de mesure que l'on appelle plancher de bruit. Tout signal de puissance inférieure à ce plancher n'est pas visualisé. Vous allez observer qu'il est possible de modifier dans une certaine mesure le niveau de ce plancher de bruit afin d'améliorer la sensibilité de l'appareil.

1. Fixez l'analyse fréquentielle sur la fondamentale du signal (2MHz avec puissance de -30 dBm) avec un "span" de **1MHz**. et un niveau de référence de +10dBm.
2. A l'aide d'un marqueur, mesurez le niveau moyen du plancher de bruit et la valeur de la puissance émise à 2MHz.
3. Diminuer ensuite progressivement le niveau de référence jusqu'à -30dBm en indiquant l'influence de la baisse du niveau de référence sur la valeur en dBm du plancher de bruit donc sur la sensibilité de l'appareil et sur la valeur de la puissance émise à 2MHz. Notez également la valeur de l'atténuateur lors de la diminution (valeur **Att** affichée à l'écran).
4. Proposez une explication pour cette évolution du plancher de bruit en fonction du niveau de référence.

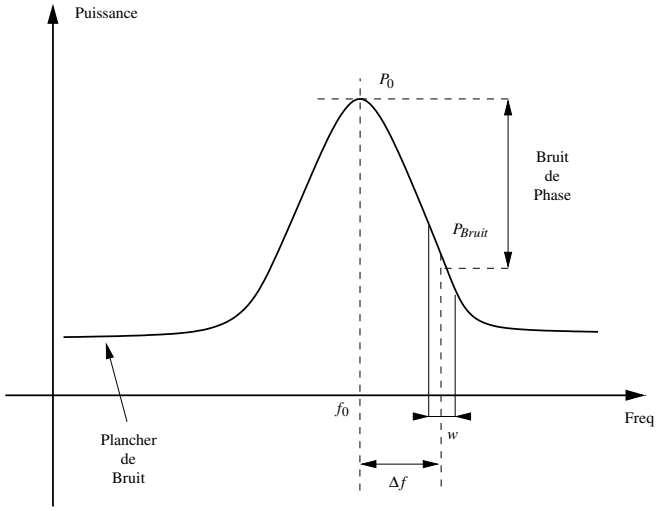

FIGURE 1 – Bruit de Phase

5. Expliquez également l'influence du filtre de résolution sur le plancher de bruit. Vous modifierez manuellement le filtre de résolution pour un "span" de 1MHz.
6. Observez l'évolution de la trace à l'écran quant vous passez en mode "average" pour la trace 1 **[Trace/Trace Mode/Average]**. Quelle est la limitation de cette méthode de diminution du niveau de bruit ?

2 Visualisation de signaux modulés en amplitude, puis en fréquence.

2.1 Modulation d'amplitude

2.1.1 Modulation normale

Vous réglerez le générateur arbitraire pour qu'il génère un signal sinusoïdal à la fréquence de 2MHz, de puissance -30 dBm et modulé en amplitude **[Mod/AM]**. Vous réglerez une fréquence de modulation (fréquence audio) de 10kHz **[AMfreq]** avec un taux de modulation de 50% **[AMdepth]**.

1. Commencez par visualisez sur l'oscilloscope, donc en temporel, le signal émis par le générateur.
2. Maintenant vous allez analyser ce signal avec l'analyseur de spectre en réglant ce dernier sur la fréquence porteuse à 2MHz, avec une étendue de mesure ("span") de 500kHz , un niveau de référence de -20dBm et enfin avec un filtre de résolution en mode automatique [RBW Auto]. Qu'observez-vous ?
3. Visualisez maintenant avec plus de précision le spectre obtenu en modifiant le span. Notez le nombre de raies spectrales obtenues.
4. Sachant que le signal modulé en amplitude s'écrit sous la forme suivante :

$$S(t) = A\left[1 + m_a \cos(2\pi f_m t)\right]\cos(2\pi f_0 t) \tag{1}$$

   Avec $m_a = \frac{A_m}{A}$ le taux de modulation en amplitude, f_m la fréquence modulante, et f_0 la fréquence de la porteuse. Expliquez le spectre obtenu.

   Pour bien assimiler le contenu du spectre d'un signal modulé en amplitude, vous modifierez successivement : (i) la fréquence du signal de modulation, (ii) le taux de modulation, (iii) la nature du signal modulant (sinusoïde, triangle, carré, bruit....). Décrivez ce que vous observez.
5. Que peut-il se passer au niveau spectral si le circuit de modulation n'est pas strictement linéaire ?
6. Pour cette question uniquement passez maintenant en signal carré.

   Contrairement à une analyse par FFT, vous pouvez, sans modification de vos réglages, observer facilement le spectre aux fréquences harmoniques de la fréquence fondamental en changeant seulement la fréquence centrale de votre analyse. Faites le et expliquez ce que vous observez. Cette possibilité est une illustration de la différence d'approche entre une analyse par transformée de Fourier mathématique et une mesure par analyseur de spectre.

2.1.2 Mesure en “zero span” pour une modulation lente

En fonctionnement normal, un analyseur de spectre balaye un intervalle fréquentiel et donne ainsi le contenu spectral du signal mesuré, dans la bande de fréquences considérée. Si maintenant, on bloque l'analyseur de spectre sur une fréquence fixe (mode "zero span" sur la fréquence centrale) alors il devient possible de suivre la variation de puissance mesurée pour cette fréquence, en fonction du temps, au travers du filtre d'analyse sélectionné.

1. Pour une modulation d'amplitude très lente (fréquence modulante très basse de 1Hz **[AMfreq]** pour la porteuse à 2MHz), basculez le mode de balayage de l'analyseur en analyse temporelle **[SPAN/Zero SPAN]**. Jouez sur les réglages de balayage temporel **[sweep/Manual Sweep]**, sur le filtre résolution **[RBW]** et sur l'échelle en puissance **[AMP]** pour optimiser l'affichage du signal obtenu. Expliquez ce que vous observez
2. Faites varier de nouveau la nature du signal modulant d'une sinusoïde à un signal triangulaire puis à un signal carré. Quelle est la fréquence des signaux obtenus ? Qu'avez-vous fait comme opération par rapport à la porteuse modulée initiale ?

2.2 Modulation de fréquence

2.2.1 Modulation normale

Vous réglerez le générateur hyperfréquence pour qu'il vous génère une sinusoïde à la fréquence de 2MHz modulée en fréquence **[Mod/FM]**, et de puissance -30 dBm. Vous réglerez une fréquence de modulation (fréquence audio) de 10kHz **[FMfreq]**, avec une excursion en fréquence de 20kHz **[FreqDev]**.

1. Commencez par visualisez sur l'oscilloscope, donc en temporel, le signal émis par le générateur.
2. Maintenant vous allez analyser ce signal avec l'analyseur de spectre en réglant ce dernier sur la fréquence porteuse à 2MHz, avec une étendue de mesure (“span”) de 500kHz, un niveau de référence de -20dBm et enfin avec un filtre de résolution en mode automatique **[RBW Auto]**. Qu'observez-vous ?
3. Visualisez avec une plus grande précision le spectre obtenu en modifiant le span et le niveau de référence. Que remarquez-vous par rapport au signal modulé en amplitude ?
4. Sachant que pour un signal modulé en fréquence, on a la relation 2

$$freq(t) = f_0 + \Delta f \cos(2\pi f_m t) \tag{2}$$

   soit un signal modulant qui s'écrit alors selon l'équation :

$$S(t) = A\cos\left(2\pi f_0 t + m_f \, sin\,(2\pi f_m t)\right) \tag{3}$$

   Avec $mf = \frac{\Delta f}{f_m}$ le taux de modulation en fréquence, f_m la fréquence modulante, et f_0 la fréquence de la porteuse. Expliquez le spectre obtenu.

   Pour bien assimiler le contenu du spectre d'un signal modulé en fréquence, vous modifierez successivement : (i) la fréquence du signal de modulation, (ii) l'excursion en fréquence, (iii) la nature du signal modulant (sinusoïde, triangle, carré, bruit....). Décrivez ce que vous observez.
5. Qu'en concluez-vous quant à l'occupation spectrale d'un signal modulé en fréquence, par rapport à un signal modulé en amplitude ? Quel peut-être l'intérêt d'un signal modulé en fréquence ?

2.2.2 Mesure en Span zéro

Vous allez de nouveau utiliser l'analyse temporelle de l'analyseur de spectre.

1. Pour une modulation de fréquence lente (fréquence modulante **[FMfreq]** très basse de 1Hz), basculez le mode de balayage de l'analyseur en analyse temporelle **[SPAN/Zero SPAN]**. Jouez sur les réglages de balayage temporel **[Sweep/Manual Sweep]**, sur le filtre résolution **[RBW]** et sur l'échelle en puissance **[AMP]** pour démoduler correctement le signal du générateur.
2. Obtenez-vous le signal attendu ? Vérifiez en particulier la fréquence du signal obtenu.
3. Pour obtenir le signal souhaité, augmentez la fréquence centrale réglée sur l'analyseur de spectre. Ceci revient à décaler la fenêtre d'analyse fréquentielle. Vous devez pouvoir retrouver la bonne fréquence.
4. Maintenant élargissez légèrement la bande passante du filtre d'analyse. Vous devez pouvoir retrouver le signal modulant attendu en jouant sur le filtre de résolution de l'analyseur et son centrage en fréquence. Vous avez ainsi réalisé un discriminateur de fréquences, en utilisant la pente du filtre pour transformer une variation de fréquence en une variation de puissance (donc de tension). Expliquez pourquoi.

5. Faites de nouveau varier la nature du signal modulant d'une sinusoïde à un signal triangulaire puis à un signal carré. Commentez ce que vous obtenez.

NB : En passant d'un signal modulant sinusoïdal à un signal carré, vous passez d'une modulation analogique continue, à une modulation numérique à 2 états : 2 états d'amplitude pour la modulation d'amplitude (2-ASK / Amplitude Shift Keying) et 2 états de fréquence pour la modulation de fréquence (2-FSK / Frequency Shift Keying).