

TRAITEMENT DU SIGNAL
TELECOMMUNICATIONS

Traitement du signal et télécommunications

INTRODUCTION

Le principe de base des télécommunications est de transporter un message entre une source et un destinataire par le biais d'un canal. Les gammes de fréquence des différents messages sont très diverses: voix humaine (300 à 3000 Hz) pour le téléphone, musique (16 Hz à 20 kHz) pour la HiFi, signal de télévision (30 Hz à 6 MHz pour un poste 625 lignes). Quatre types de canaux sont actuellement en utilisation et chacun a des limitations physiques quant aux gammes de fréquences des porteuses véhiculées: canaux hertziens (plus de 100 kHz), les câbles et lignes diverses (de quelques Hz à quelques GHz), les guides d'ondes et les satellites (de l'ordre du GHz), et les fibres optiques (10^{14} Hz).

Un message ne peut pas être envoyé directement sur le canal de transmission car, d'une part, les fréquences des canaux et des messages ne coïncident pas forcément (il faut adapter la fréquence du signal au mode transmission) et, d'autre part, il s'agit surtout de pouvoir transmettre plusieurs messages sur un même réseau. De plus, le signal doit être amplifié. D'où la nécessité de moduler le message à l'aide d'un signal porteur afin de l'adapter au canal. A la réception, il faut effectuer l'opération inverse: la démodulation.

Il existe deux procédés de transmission: numérique et analogique, associés respectivement aux modulations numérique et analogique. Deux types principaux de modulation ont été développées pour la transmission analogique: modulation d'amplitude (AM), et modulation de fréquence (FM). Ils ont été étendus à la transmission numérique. Le terme "numérique" désigne un échantillonnage et un codage du signal analogique en éléments binaires (0 et 1) réalisés avant la transmission. La transmission numérique s'est développée intensément ces dernières années car elle permet entre autres d'augmenter le nombre de canaux disponibles dans une gamme de fréquences et de s'affranchir du bruit lié à la transmission de faibles signaux.

Ce poly est décomposé en deux parties inégales en longueur. Dans la partie "Traitement du signal" sont traités divers aspects de la modulation et la démodulation d'amplitude et de fréquence, pour des signaux aussi bien analogiques que numériques. Dans la partie "Transmission du signal" nous illustrons le fonctionnement d'une fibre optique .

D) MODULATION - TRAITEMENT DU SIGNAL

Références : Max - Méthodes et techniques de traitement du signal
Picinbono - Théorie des signaux et des systèmes
Horowitz - The arts of Electronics
Malvino
Auvray - Circuits et composants électroniques
Auvray - Electronique des circuits analogiques
Fontolliet - Système de télécommunications

1) Transformée de Fourier d'un signal

On étudie le spectre d'un signal sinusoïdal, fourni par un générateur BF, en l'envoyant sur un oscillo numérique qui permet de faire une transformée de Fourier.

Lire attentivement la notice de l'oscillo pour être capable d'obtenir le spectre et de trouver les paramètres du calcul de la transformée de Fourier réalisée par l'oscillo. Si l'oscillo peut fonctionner en mode analogique ou en mode numérique, il est important de se placer en mode numérique préalablement.

Calcul de la transformée de Fourier numérique d'un signal

- Fenêtre d'analyse du signal : le calcul de la transformée est fait sur une durée T finie qui correspond en général à la partie du signal visible sur l'écran de l'oscillo et qui est facile à calculer en utilisant le calibre temporel.
- Numérisation du signal : en mode numérique le signal est échantillonné régulièrement avec un pas t_e , le temps d'échantillonnage. La fenêtre définie précédemment correspond donc à un nombre n de points tel que $T = nt_e$. Le nombre de points n est généralement une puissance de 2 (512, 1024, ...).

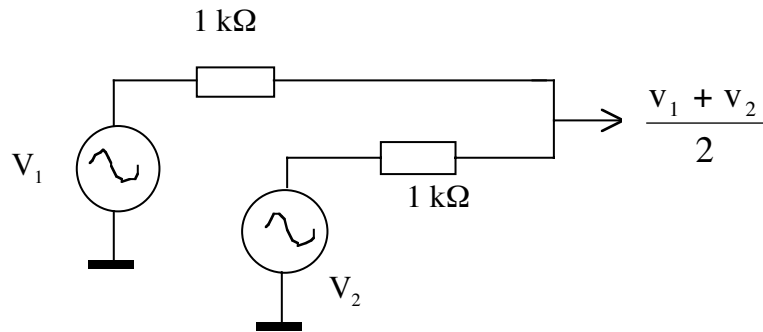
On définit aussi la fréquence d'échantillonnage $f_e = 1/t_e$.

- Résolution en fréquence du spectre obtenu : deux points du spectre sont séparés par l'intervalle $\delta f = 1/T$
- Bornes en fréquence du spectre obtenu : la borne supérieure du spectre vaut $f_{\max} = 1/2t_e = f_e/2$. En toute rigueur le spectre s'étend de $-f_{\max}$ à $+f_{\max}$.

Comme le signal de départ est réel ce spectre est symétrique par rapport à $f=0$ et on limite souvent son tracé à l'intervalle $[0, f_{\max}]$. Certains oscillos permettent aussi de tracer le spectre sur un intervalle plus limité $[f_{\min}, f_{\max}]$.

Vérifier expérimentalement les points suivants (utiliser les curseurs de l'oscillo)

- Identification de la fréquence du signal : comparer la mesure avec la valeur donnée par un fréquencemètre
- Résolution en fréquence du spectre : analyser la somme de deux signaux de fréquences voisines. Pour additionner simplement les signaux issus de deux générateurs de tension, on peut faire le montage suivant. Les résistances de $1\text{ k}\Omega$ sont indispensables.



- Fréquence maximum du spectre

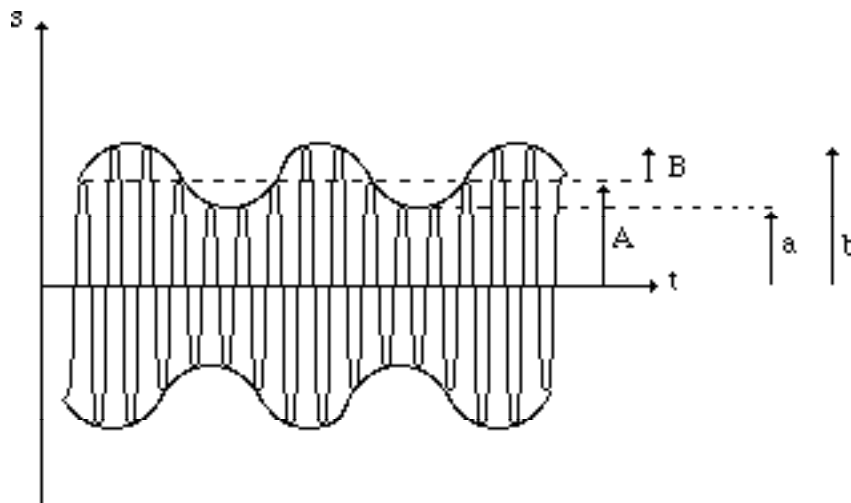
Limitations du calcul de transformée de Fourier

On a vu plus haut que pour une fréquence d'échantillonnage donnée, la fréquence maximum du spectre est fixée : $f_{\max} = f_e/2$. Ceci implique qu'on ne peut pas analyser un signal à une fréquence $f > f_{\max}$ (théorème de Shannon). Le vérifier en réalisant l'expérience suivante : fixer les paramètres de la transformée de Fourier et augmenter progressivement la fréquence du signal à analyser. Comparer la mesure de cette fréquence avec celle effectuée avec un fréquencemètre. Constaté que pour $f > f_{\max}$, on obtient toujours un pic dans le spectre mais qu'il est à une fréquence différente de f . On a ce qu'on appelle un repliement du spectre (en anglais "aliasing") : le pic obtenu est symétrique du pic réel par rapport à f_{\max} . Plus on augmente f plus la fréquence apparente semble diminuer. Si on continue à augmenter f au delà de $2 f_{\max}$, la fréquence du pic obtenu se met à réaugmenter...

2) Modulation d'amplitude (AM)

A. Caractéristiques générales d'un signal modulé en amplitude

Dans le cas général, un signal de modulation d'amplitude s'écrit en fonction du temps : $s = [A + B \cos(\omega_1 t)] \cos(\omega_0 t)$ et a l'allure suivante :



$\omega_1 = 2\pi f_1$ f_1 : fréquence de modulation (typiquement 0.5 kHz)

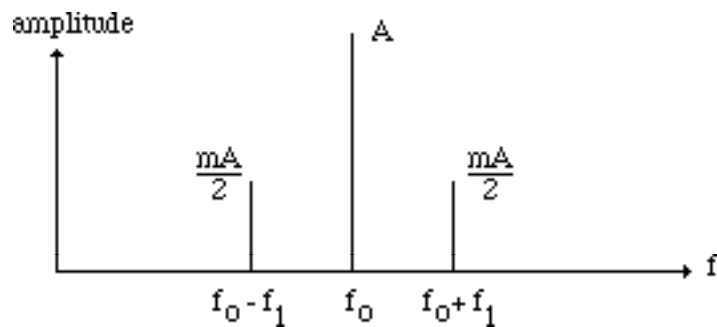
$\omega_0 = 2\pi f_0$ f_0 : fréquence de la porteuse (typiquement 50 kHz)
 pour nos montages d'agrégation.

L'amplitude du signal varie entre $a = A - B$ et $b = A + B$

On est amené à définir le taux de modulation par $m = \frac{b - a}{b + a} = \frac{B}{A}$ ou $B = mA$

Le signal s peut s'écrire : $s = A \cos(\omega_0 t) + \frac{B}{2} \cos(\omega_0 + \omega_1) t + \frac{B}{2} \cos(\omega_0 - \omega_1) t$.

Le spectre en fréquence d'un tel signal comprend donc les fréquences f_0 , $f_0 + f_1$ et $f_0 - f_1$ mais pas la fréquence f_1 :



Noter que la modulation d'amplitude est une opération multiplicative.

Remarque : ne pas confondre modulation et addition.

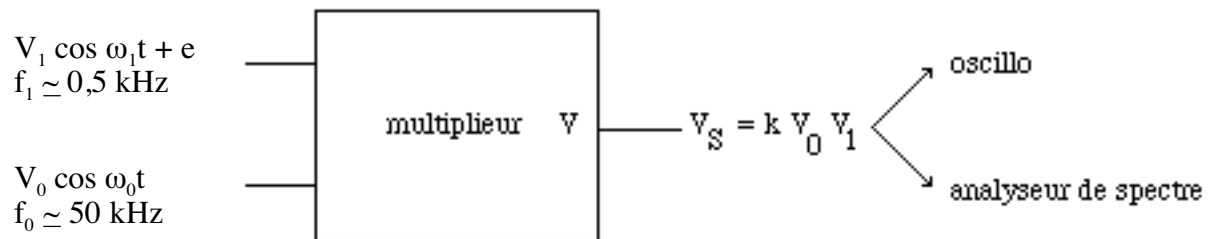
Dans l'addition l'amplitude est constante et le spectre comprend les fréquences f_0 et f_1 :



B. Spectre en fréquence d'un signal modulé en amplitude

Pour observer le spectre en fréquence, il est indispensable d'avoir une modulation à fort taux et de bonne qualité.

C'est pourquoi on propose ici de produire un signal modulé en amplitude grâce au multiplieur analogique. En utilisant deux générateurs BF, envoyer deux tensions alternatives à l'entrée du multiplieur (amplitude maximum : 5V; les témoins rouges doivent rester éteints).

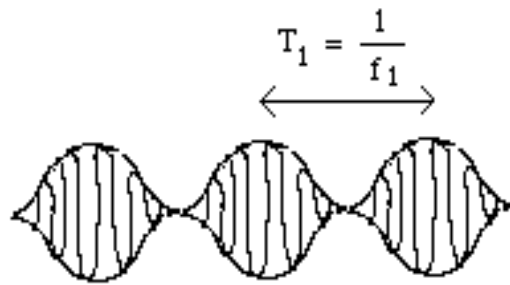


Ici "e" est une tension continue de décalage.

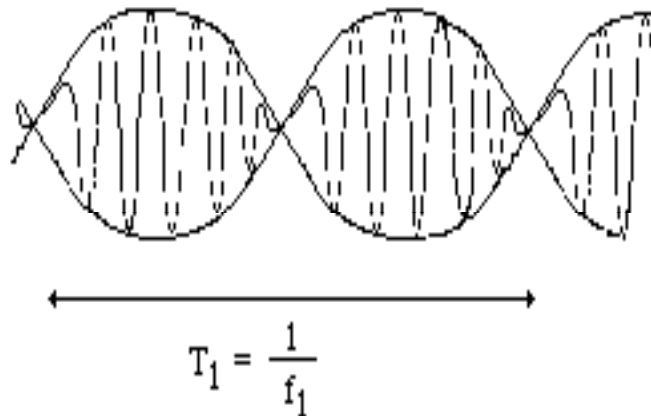
Remarque : il existe aussi des générateurs permettant de faire de la modulation d'amplitude: (par exemple le TEKTRON FG 504).

En réglant la tension de décalage du BF, le taux de modulation peut varier de 0 à l'infini en passant par 100 %.

- Si $m = 100\%$ (cas où $a = 0$) alors $s = A [\cos \omega_0 t + \cos (\omega_0 + \omega_1) t + \cos (\omega_0 - \omega_1) t]$



- Si $m = \infty$ (cas où $A = 0$) alors $s = \frac{B}{2} [\cos (\omega_1 + \omega_0) t + \cos (\omega_1 - \omega_0) t]$



Etudier le spectre en fréquence du signal modulé : comparer les amplitudes des différentes composantes pour différents taux de modulation. Attention, l'échelle utilisée par l'oscilloscope numérique fixe le niveau de référence en dBV ($V(dBV) = 20 \log \left(\frac{V_{\text{efficace}} (\text{Volts})}{1 \text{ Volt}} \right)$) et la variation par rapport à ce niveau en dB.

Remarquer que dans le cas d'un taux infini (on reconnaît une figure de battements) la fréquence centrale disparaît: c'est de la modulation sans porteuse.

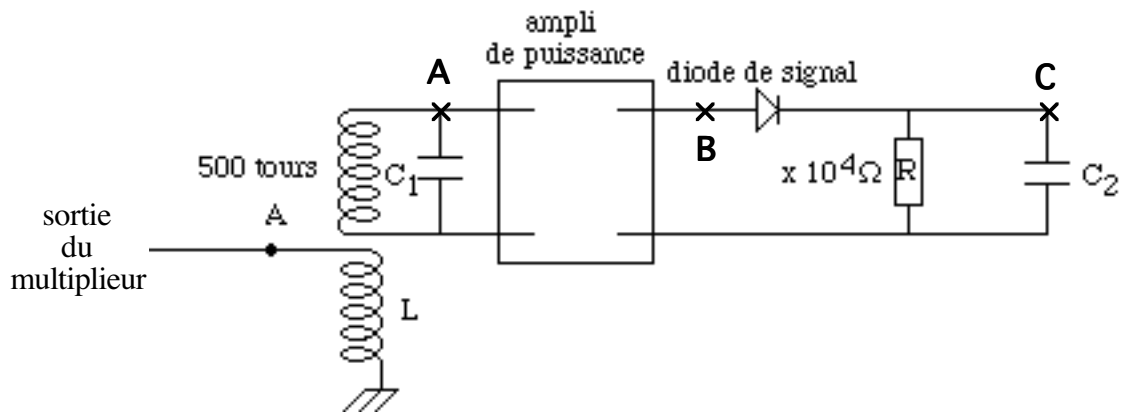
Quels en sont les avantages et les inconvénients ?

C. Détection de la modulation d'amplitude

C.1. Par détecteur de crête

On illustre le principe de l'émission et de la réception radio. Le signal sortant de l'ampli-op est envoyé sur une bobine Leybold (500 tours) qui joue le rôle d'antenne d'émission.

Le circuit récepteur est constitué d'une bobine Leybold (500 tours) et d'un condensateur accordable C_1 (si on prenait des bobines 1000 tours, on serait gêné par la résonance propre des bobines qui est de l'ordre de 50 kHz). Le placer à proximité immédiate du circuit émetteur (bobines accolées, sans fer) ; l'accorder sur la fréquence de la porteuse. L'ensemble des deux bobines, émetteur et récepteur, symbolise une transmission aérienne. Le signal traverse un ampli de puissance afin d'avoir une amplitude suffisante pour attaquer un redresseur à diode. On filtre ensuite avec un circuit RC pour extraire la modulation. On choisira un produit RC_2 compris entre la période de la porteuse et la période de la modulation qu'on souhaite détecter.



Manipulation

Visualiser à l'oscillo les différentes étapes de la détection : optimiser l'accord à la réception, obtenir un bon redressement puis un bon filtrage. Comparer avec le signal Y_1 du BF.

Analyser le signal en différents points (A, B, C) de la chaîne de traitement en observant son spectre de Fourier.

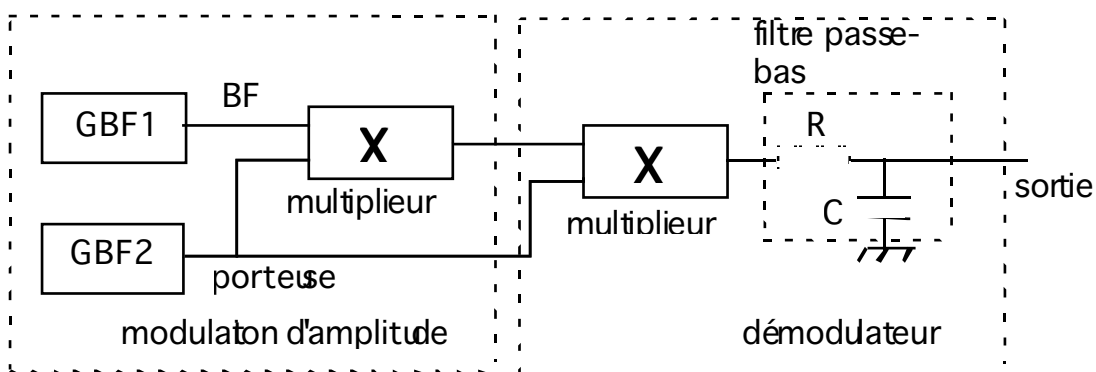
C.2. Démodulation d'amplitude synchrone

Référence : BUP n°771 B. Le Goff pp 307-318.

a) Principe

On dispose d'un signal modulé en amplitude (f_1 fréquence modulante, f_2 fréquence porteuse). On désire récupérer l'information véhiculée par la fréquence modulante. Dans ce type de détection, dite synchrone, on multiplie le signal modulé par un signal à la fréquence exacte de la porteuse, d'où l'adjectif synchrone.

b) Montage



Le premier ensemble (GBF1, GBF2, multiplieur 1) réalise la modulation d'amplitude. Faire varier le taux de modulation avec la composante continue et l'amplitude de GBF1.

Visualiser le signal de sortie global et le comparer au signal modulant. Noter la qualité de la démodulation en fonction de la fréquence de coupure du filtre passe-bas.

Faire varier le taux de modulation et montrer que le signal restitué est bien conforme au signal modulant.

Pour être plus démonstratif, on peut placer à la sortie de la modulation d'amplitude un démodulateur classique à diode et montrer la différence des comportements, en particulier quand il y a surmodulation.

Dans la réalité, on ne dispose pas directement d'un signal à la fréquence exacte de la porteuse. On utilise une boucle à verrouillage de phase pour retrouver la porteuse à partir du signal modulé en amplitude.

3) Modulation de fréquence (FM)

Références Auvray- Electronique des circuits analogiques (Chap. 9)

Fontolliet - Système de télécommunications (Dunod) - (Chap. 8)

A. Introduction

La porteuse de pulsation ω voit sa pulsation modulée de $\omega_0 - \Delta\omega$ à $\omega_0 + \Delta\omega$ par un signal de basse fréquence de pulsation Ω :

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega \cos\Omega t = \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{où } \Phi \text{ est la phase du signal, donc :}$$

$$\Phi = \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin\Omega t$$

L'équation du signal est donc :

$$v = a \cos\left(\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin\Omega t\right)$$

$\Delta\omega$ est l'excursion en pulsation qui est en général proportionnelle à l'amplitude du signal basse fréquence.

B. Spectre d'un signal modulé en fréquence

Contrairement à la modulation d'amplitude, le spectre contient une infinité de raies. Néanmoins, ces raies n'ont une amplitude importante que dans un certain intervalle de pulsation :

$$\omega_0 - \Delta\omega - \Omega \leq \omega \leq \omega_0 + \Delta\omega + \Omega$$

Cet intervalle est appelé usuellement bande de Carson. (Il correspond à 98% de l'énergie des raies latérales). On vous propose de vérifier cette règle.

Utiliser un BF modulable en fréquence réglé sur une porteuse de l'ordre de 10 kHz (f_0). Le signal basse fréquence (F) sinusoïdal est délivré par un autre BF et injecté sur l'entrée modulation du premier. Mesurer l'excursion en fréquence en procédant de la façon suivante : on voit sur l'écran une sinusoïde dont la période varie de T_{\min} à T_{\max} , en déduire f_{\min} et f_{\max} , d'où Δf .

Analyser ensuite le spectre du signal modulé en fréquence avec l'oscillo numérique et vérifier approximativement la règle de Carson grâce à l'échelle vertical de l'oscillo. La détermination de la bande de Carson nécessite un critère, choisir par exemple -20 dB. On pourra étudier les quatre cas suivants.

Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
$\Delta f = 1 \text{ kHz}$	$\Delta f = 0,1 \text{ kHz}$	$\Delta f = 1 \text{ kHz}$	$\Delta f = 0,1 \text{ kHz}$
$F = 1 \text{ kHz}$	$F = 1 \text{ kHz}$	$F = 0,1 \text{ kHz}$	$F = 0,1 \text{ kHz}$

- En émission radio (100 MHz)

Celle-ci est obtenue en modifiant les caractéristiques d'un circuit oscillant par action du signal BF sur une capacité variable (diode varicap) ou sur une self variable (noyau de ferrite saturé); en

pratique l'excursion en fréquence est très faible (environ 10^{-3}) ce qui la rend inobservable à l'oscilloscope. Ceci nous semble difficilement réalisable dans le cadre en bois de l'agrégation.

- Les générateurs de fonctions actuels (wobblateurs) fonctionnent sur un principe totalement différent :
 - un générateur à relaxation produit des signaux triangulaires d'amplitude bien constante mais de fréquence variable.
 - ces signaux sont envoyés dans un circuit non linéaire qui les transforme en sinusoides. Voir pour mémoire les manip proposées dans le poly oscillateurs. Elles sont cependant assez lourdes (17 kg).

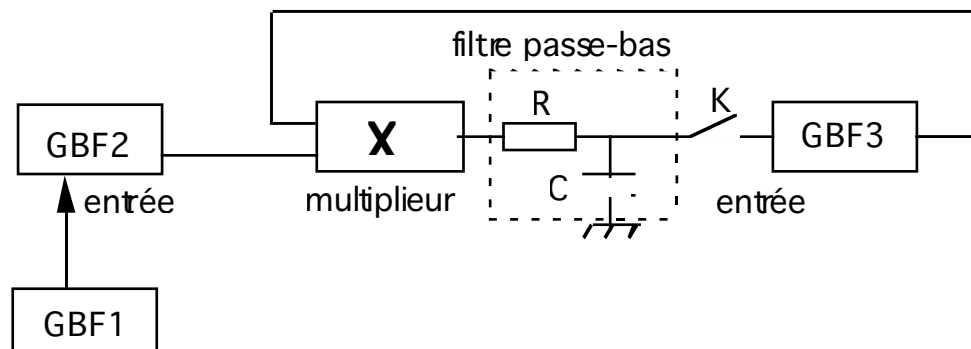
4) Boucle à verrouillage de phase

Références : BUP n° 772 J. Esquieu. Transmissions numériques pp 547-576
F.Manneville, J.Esquieu Systèmes bouclés linéaires Dunod pp 31-32

La boucle à verrouillage de phase (PLL: Phase Locked Loop) est couramment utilisée pour la démodulation de fréquence aussi bien en analogique qu'en numérique.

Notez qu'il est aussi possible de placer ces expériences dans le montage Asservissements.

Réaliser le montage suivant.



GBF2 fournit une tension sinusoïdale de fréquence f_2 qui peut être modulée sur son entrée VCF par GBF1. La cellule RC est un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure doit être faible devant f_2 . La sortie du filtre est envoyée sur l'entrée VCF de GBF3 dont la fréquence f_3 peut donc être modifiée autour de la valeur choisie initialement.

A. Principe

C'est un système asservi. Si la fréquence de GBF3 varie, l'ensemble multiplieur-filtre fournit un signal qui ramène cette fréquence à sa valeur initiale. Cette valeur initiale, quand la boucle fonctionne correctement, est exactement la fréquence f_2 . La fréquence de GBF3 est donc asservie à celle de GBF2.

Soient $V_2 \sin \omega t$ et $V_3 \sin(\omega' t + \phi) = V_3 \sin[(\omega + \Delta\omega)t + \phi]$ les tensions données par GBF2 et GBF3. La sortie du multiplieur fournit la tension :
 $V = k V_2 \sin \omega t \cdot V_3 \sin[(\omega + \Delta\omega)t + \phi] = 0,5 k V_2 V_3 \{ \cos[\Delta\omega t + \phi] - \cos[(2\omega + \Delta\omega)t + \phi] \}$
 où k est la constante du multiplieur (de l'ordre de $0,1 V^{-1}$).

Le filtre passe-bas est choisi de façon que seule la composante basse fréquence passe. L'entrée VCF de GBF3 reçoit donc la tension

$$V_r = 0,5kV_2V_3\cos[\Delta\omega t + \phi]$$

Une étude complète montre, et on l'admettra, que cette tension se fixe à une valeur indépendante du temps $V_r = 0,5kV_2V_3\cos(\phi)$ (c'est-à-dire que $\Delta\omega = 0$).

Cette tension V_r , appliquée à l'entrée VCF de GBF3, ramène la fréquence de GBF3 de ω' à ω . La différence de pulsations $\Delta\omega$ (donc de fréquences) est donnée par :
 $\Delta f = \Delta\omega / (2\pi) = CV_r = 0,5kCV_2V_3\cos(\phi)$.

Les limites de $\cos(\phi)$ (compris entre 1 et -1) donnent les limites de Δf , proportionnelle aux amplitudes V_2 et V_3 . C'est bien la différence de phase entre les deux signaux qui est la grandeur qui intervient dans l'asservissement, d'où le nom du dispositif.

B. Etude de la boucle de verrouillage

Pour commencer, ne pas connecter GBF1.

Il faut deux oscilloscopes car il y a trois signaux à visualiser dans cette étude : les deux sorties des GBF et la tension V_r .

Fixer les fréquences de GBF2 (f_2) et de GBF3 (f_3) à deux valeurs très voisines (prendre des fréquencemètres si les GBF n'en comportent pas). Visualiser les sorties des GBF avec K ouvert : la synchronisation simultanée des deux est impossible.

Fermer K : les deux signaux sont maintenant à la même fréquence. Si ce n'est pas le cas, agir sur les amplitudes des signaux V_2 et V_3 .

Mettre en évidence l'asservissement dans les deux cas suivants :

- faire varier f_2 : constater que f_3 suit f_2 . Noter l'évolution de la tension de sortie du filtre V_r .
- chercher à faire varier f_3 avec le bouton de réglage de GBF3 : constater que f_3 reste en fait constant. Noter l'évolution de la tension de sortie du filtre.

Dans le cas où la boucle est verrouillée, le GBF3 est caractérisé par deux fréquences : la fréquence imposée par la boucle (f_2) et sa fréquence "naturelle" qui serait celle du signal sans asservissement.

Dans les deux cas, montrer les limites de l'asservissement et leurs dépendances par rapport aux amplitudes des signaux. Montrer en particulier que, si l'asservissement ne fonctionne plus, on le rétablit par augmentation de l'amplitude d'un des GBF 2 ou 3.

On peut mener une étude plus quantitative en déterminant la constante C. Pour cela, appliquer une tension V_0 à l'entrée VCF de GBF3 et noter la variation de fréquence.

Montrer en particulier :

- que la tension de sortie du filtre V_r est continue (avec un résidu alternatif qui dépend de RC), et qu'elle est nulle si la fréquence f_3 "naturelle" est choisie égale à f_2 .
- que les deux signaux délivrés par GBF2 et GBF3 sont déphasés entre 0 et π , avec comme cas particulier $\pi/2$ quand f_3 "naturelle" vaut f_2 .
- que le décrochage de l'asservissement a lieu quand le déphasage arrive aux valeurs extrêmes 0 et π . Dans cette situation, la tension de sortie du filtre est sinusoïdale, de valeur moyenne nulle et de fréquence $|f_2 - f_3|^1$.

¹le phénomène est plus complexe car la tension à la sortie du filtre fait varier f_3 autour de sa valeur "naturelle".

C. Application à la démodulation de fréquence

La tension de sortie du filtre est proportionnelle à la différence des fréquences f_2 (imposée par GBF2) et f_3 (que devrait fournir GBF3 sans l'asservissement). On réalise donc une transformation fréquence-tension, donc une démodulation de fréquence.

Connecter GBF1 à l'entrée modulation de fréquence de GBF2. La fréquence f_1 doit être faible par rapport à f_2 et l'amplitude de GBF1 faible. La sortie de GBF2 est donc maintenant une tension modulée en fréquence (porteuse f_2 , modulante f_1).

Comparer à l'oscilloscope la tension donnée par GBF1 et la sortie du filtre. Noter les distorsions et les décrochages en jouant sur les amplitudes des trois GBF et la fréquence de coupure du filtre.

D. Démodulation en numérique

Si le signal de GBF1 est un carré symétrique (composante continue nulle), f_2 prend deux valeurs différentes. Une de ces fréquences peut être l'image d'un "1" logique et l'autre d'un "0". Un signal numérisé se traduit donc par une succession de trains de sinusoïdes de deux fréquences différentes.

C'est donc une modulation de fréquence (Frequency Shift Keying) par une tension qui n'est jamais nulle (Non Remise à Zéro) d'où le nom N.R.Z.-F.S.K donné à ce signal en particulier utilisé dans les transmissions par MODEM.

La sortie du filtre reproduit en principe un signal carré similaire au signal carré de GBF1. Montrer, en agissant sur les amplitudes de GBF2 et GBF3 et la constante de temps RC, que ce signal est plus ou moins déformé. En conclure que la vitesse de transmission d'une information est limitée par ce dispositif.

II) TRANSMISSION D'UN SIGNAL PAR FIBRE OPTIQUE

Référence : Systèmes de Télécommunications. P.G. Fontolliet
Optoélectronique. E. Rosencher

A. Présentation

On utilise le boîtier diode laser. La diode laser peut être modulée en courant en appliquant à l'entrée modulation située à l'arrière de l'appareil une tension variable. Il faut tenir compte de la conversion courant tension (4mA/V) pour ne pas risquer d'endommager la diode (ne pas appliquer un courant négatif et ne pas dépasser le courant maximal toléré).

Dans un premier temps, on ne module pas la diode. Régler l'injection dans la fibre pour maximiser la puissance transmise : on peut s'aider d'une photodiode montée de manière appropriée.

B. Transport d'un signal audio

On envoie un signal provenant d'un générateur BF ou, mieux, d'un radiocassette. Limiter l'amplitude de la modulation pour éviter la saturation de l'électronique.

Le signal reçu par la photodiode peut être observé à l'oscilloscope ou envoyé sur le haut parleur.
Remarque : cette expérience est identique à celle réalisée dans le poly « Hyperfréquences », seule la fréquence de la porteuse change (10^{14} Hz dans un cas contre 10^9 Hz dans l'autre).