

TP 3 – Modulation/Démodulation

Mesures et capacités expérimentales visées du programme de PSI

Nature et méthodes	Capacités exigibles
1. Mesures de temps et de fréquences	
Détection synchrone.	Mesurer une fréquence par une détection synchrone à l'aide d'un multiplieur et d'un filtre passe-bas adapté à la mesure.
Modulation et démodulation.	Élaborer un signal modulé en amplitude à l'aide d'un circuit multiplieur. Réaliser une démodulation synchrone.

Notions et capacités abordées

Modulation d'amplitude.	Interpréter le signal modulé comme le produit d'une porteuse par une modulante. Décrire le spectre d'un signal modulé.
Démodulation d'amplitude.	À partir de l'analyse fréquentielle, justifier la nécessité d'utiliser une opération non linéaire. Expliquer le principe de la démodulation synchrone. Réaliser une modulation d'amplitude et une démodulation synchrone avec un multiplieur analogique.

I. Modulation AM et démodulation par détection synchrone

1) Modulation d'amplitude

La modulation d'amplitude utilise une opération non-linéaire de multiplication de deux signaux :

- un signal modulant : le signal informatif à transmettre, le message, représenté par une tension notée $u_m(t) = U_m \cos(\omega_m t)$ de fréquence $f_m = \omega_m / 2\pi$
- un signal porteur : la porteuse nécessaire au transport du message de fréquence $f_p = \omega_p / 2\pi$ très supérieure à la fréquence du message : $f_p \gg f_m$, noté :

$$u_p(t) = U_p \cos(\omega_p t)$$

L'opération analogique de multiplication est réalisée à l'aide d'un multiplieur présenté dans le document suivant

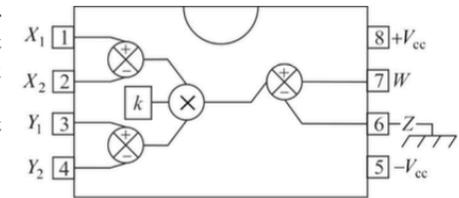
Document 1 : Multiplieur

Un multiplieur est un composant actif, alimenté comme un A.L.I par un générateur de tension continue délivrant $+V_{cc} = +15\text{ V}$ et $-V_{cc} = -15\text{ V}$. La référence de potentiel est le point milieu des deux alimentations.

Un multiplieur admet deux tensions d'entrée : $x = X_1 - X_2$ et $y = Y_1 - Y_2$.

Il fournit alors en sortie une tension $s(t) = W - Z = k \times x(t) \times y(t)$

avec $k = 0,1\text{ V}^{-1}$. On connecte souvent Z à la masse du montage, mais on peut également y appliquer une tension de décalage.



brochage du multiplieur AD633JN

Le multiplieur présente des défauts similaires à ceux de l'A.L.I.

- une bande passante d'environ 1 MHz. Au-dessus de ces fréquences, un comportement passe-bas se fait sentir (si x est sinusoïdale et y continue, l'amplitude de la sortie s chute).
- les courants d'entrée sont non nuls. Sensiblement constants, ils restent très faibles (du nA au μA).
- il existe une tension de décalage sur chaque entrée, de l'ordre de mV, qui n'entraînent pas de déformation du signal de sortie si les entrées restent de l'ordre du volt.
- le multiplieur possède une résistance de sortie faible $R_s \approx 50\ \Omega$, elle est négligeable devant les résistances de charge usuelles.
- la tension s de sortie du multiplieur est bornée par des valeurs proches des tensions d'alimentation : $V_{\text{sat}}^- \leq s \leq V_{\text{sat}}^+$. La valeur de k est choisie pour ne pas avoir de saturation avec des entrées allant jusqu'à 10 V.
- le courant de sortie est limité : $I_{\text{sat}}^- \leq i_s \leq I_{\text{sat}}^+$, courants de l'ordre de 25 mA. **Il faut donc que le circuit de charge présente une résistance d'entrée suffisante pour que le multiplieur fonctionne convenablement.**
- la pente du signal de sortie est également limitée : $\sigma^- \leq \frac{dV_s}{dt} \leq \sigma^+$ (vitesse de balayage limite : slew-rate). La pente maximale est de l'ordre de $10\text{ mV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$.

a) Génération du signal AM avec un multiplieur

Pour générer le signal modulé en amplitude, on utilisera deux GBF :

- le GBF 1 Keysight produira la porteuse sinusoïdale d'amplitude crête à crête $V_{pp} = +5\text{ V}$ et de fréquence $f_p = 10\text{ kHz}$. On notera cette tension :

$$u_p(t) = U_p \cos(\omega_p t)$$

- le GBF 2 produira le signal modulant sinusoïdal, le message à transmettre, d'amplitude crête à crête 3 V et de fréquence $f_m = 500\text{ Hz}$, auquel on aura ajouté

un offset $A = 3\text{ V}$, l'offset étant égal à la composante continue de ce signal, soit sa valeur moyenne. On notera cette tension :

$$u_m(t) = A + U_m \cos(\omega_m t)$$

Réaliser

1. Pour ce réglage du GBF 2, utiliser les mesures automatiques de l'oscilloscope sur un grand nombre de cycles.

Noter avec précision les valeurs de A et U_m obtenues.

Pour générer le signal AM, on utilisera alors le multiplieur analogique pour réaliser l'opération : $u_{AM}(t) = k u_m(t) * u_p(t)$

2. Pour réaliser les connexions nécessaires, et les mises à la masse nécessaires des entrées du multiplieur, se reporter au document 1.

Visualiser les tensions $u_m(t)$ et $u_{AM}(t)$ à l'oscilloscope en adoptant le même calibre de sensibilité verticale, et en superposant les deux « zéros » des tensions.

APPEL PROF



Appeler le professeur pour présenter la génération du signal AM

Synchronisation des signaux : il sera nécessaire de se synchroniser sur le signal de plus faible fréquence et de conserver cette synchronisation tout au long du montage !

b) Mesure du taux de modulation m

S'approprier

3. Montrer que le signal AM obtenu se met sous la forme générale :

$$u_{AM}(t) = U_{AM} (1 + m \cos(\omega_m t)) \cos(\omega_p t)$$

Exprimer U_{AM} et m en fonction de A , U_P et U_m .

Réaliser

4. Mesurer à l'oscilloscope le taux de modulation m obtenu.

Analyser/Valider

5. Comparer la mesure de m avec sa valeur attendue.

c) Analyse spectrale du signal AM

Réaliser

6. Réaliser l'analyse spectrale du signal AM à l'aide de l'outil FFT -> Menu Math. Choisir par exemple dans un premier temps -> Centre = 10 kHz et Plage 50 kHz pour les réglages de l'outil FFT pour visualiser le spectre.

Pour obtenir une bonne résolution spectrale, veillez à visualiser un nombre suffisant de périodes du signal AM, au moins dix... Vous pourrez ensuite supprimer les tensions affichées pour mieux visualiser le spectre seul.

Mesurer les fréquences et amplitudes du spectre à l'aide des curseurs, et représenter son allure sur votre compte-rendu.

La lecture des amplitudes des composantes spectrales, à l'oscilloscope, est affichée en dB selon la relation $V_{dB(lue)} = 20 \log (V_{eff}/V_{ref})$ avec $V_{ref} = 1\text{ V}$ et $V_{eff} = \text{amplitude} / \sqrt{2}$

Analyser/Valider

7. Etablir l'expression générale de la tension $u_{AM}(t)$ développée en série de fonctions sinusoïdales, pour analyser correctement son spectre. Représenter alors l'allure du spectre attendu, en repérant clairement les fréquences en fonction de f_m et f_p , et les valeurs des amplitudes en fonction de U_{AM} et m . Comparer finalement vos mesures aux valeurs attendues.

2) Démodulation du signal AM par détection synchrone

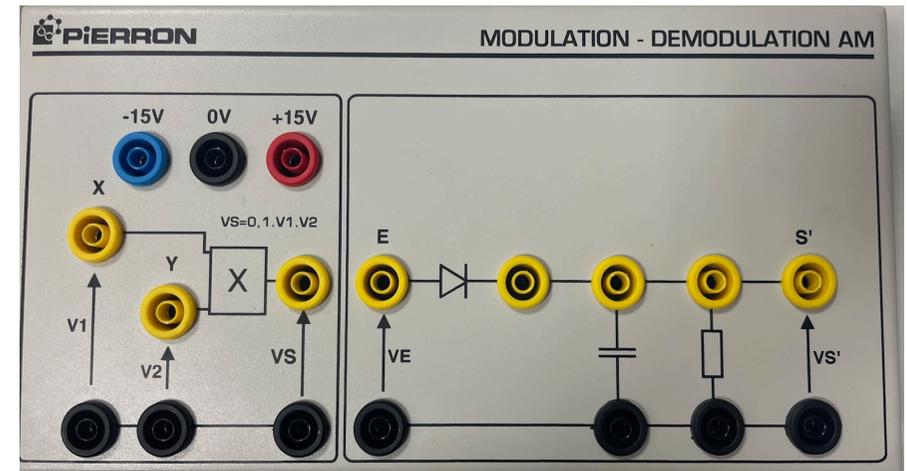
La démodulation du signal AM est réalisée par détection synchrone : cette technique consiste en la multiplication du signal AM par un signal synchrone avec la porteuse, c'est à dire à la même fréquence, et avec un déphasage constant par rapport à ce même signal.

Dans la pratique, on ne dispose pas physiquement de la porteuse à la réception du signal modulé, le signal synchrone est extrait du signal AM à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase (PLL Phase Locked Loop).

Dans ce TP, on pourra directement utiliser le signal porteur issu du GBF 2.

Après multiplication par la porteuse, le signal résultant est soumis à un filtrage passe-bas pour extraire le signal message à la fréquence f_m .

Pour réaliser cette deuxième opération de multiplication, on utilisera la partie de gauche du montage modulation/démodulation ci-dessous :



Réaliser

8. Réaliser l'analyse spectrale du signal résultant $u(t) = 0,1 u_{AM}(t) u_p(t)$ à l'aide de l'outil FFT -> Menu Math.

Choisir par exemple dans un premier temps -> Centre = 20 kHz et Plage 50 kHz pour les réglages de l'outil FFT pour visualiser le spectre, adapter ensuite ces réglages, si nécessaire pour la suite de vos mesures.

Mesurer les fréquences et amplitudes du spectre à l'aide des curseurs, et représenter son allure sur votre compte-rendu.

Analyser/Valider

9. Etablir l'expression générale de la tension $u(t)$ développée en série de fonctions sinusoïdales, pour analyser correctement son spectre. Représenter alors l'allure du spectre attendu, en repérant clairement les fréquences en fonction de f_m et f_p , et les valeurs des amplitudes en fonction de U_{AM} , U_p et m .

Comparer finalement vos mesures aux valeurs attendues.

Approprier

10. Pour le filtrage passe-bas, vous avez à disposition deux boîtes à décades variables R et C. On fixe la valeur de la résistance du filtre à $R = 1 \text{ k}\Omega$, quel choix de la valeur de C vous paraît judicieux pour extraire le message utile à la fréquence f_m ? Justifier.

Réaliser

11. Réaliser le filtrage demandé.

APPEL PROF



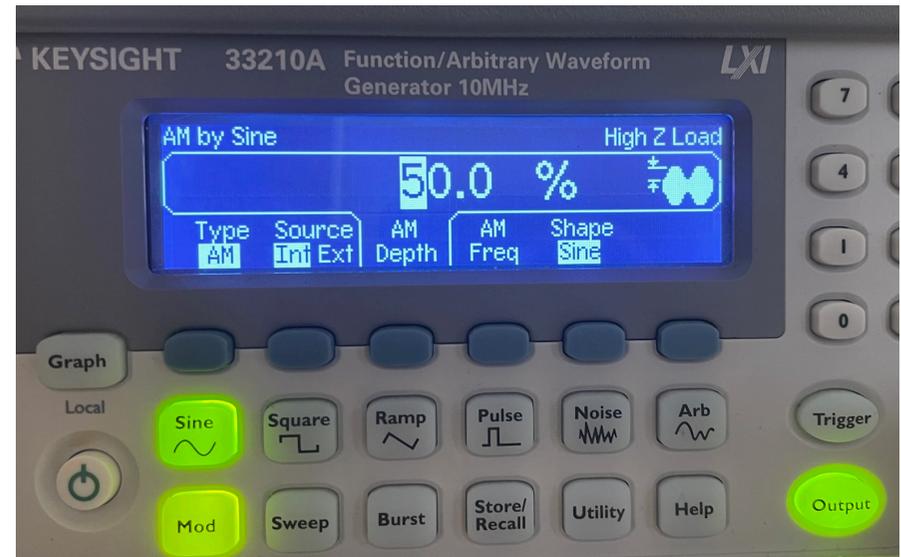
Appeler le professeur pour présenter le résultat de votre démodulation par détection synchrone

12. Modifier alors vos réglages initiaux pour obtenir une sur-modulation avec un taux de modulation $m > 1$, la technique de démodulation demeure-t-elle efficace ?

13. Quelle opération supplémentaire, vous semble nécessaire à ce stade pour la récupération du signal message ?

II. Modulation AM et démodulation par détection d'enveloppe

Pour réaliser directement la modulation AM, on utilisera le GBF Keysight avec un fréquence de modulation de 100 Hz et dans un premier temps un taux de modulation $m = 0,5$ (50 %), réglage via le bouton Mod.



La fréquence de la porteuse sinusoïdale sera réglée à 100 kHz, avec une amplitude $V_{pp} = 20 \text{ V}$, réglage via le bouton Sine.

La démodulation sera réalisée avec la partie droite du module Modulation/Démodulation (Pierron) précédent. Elle consiste en l'emploi d'une diode rapide de détection, d'un condensateur de capacité C et d'une résistance R.

Pour la synchronisation des signaux, on choisira dans le mode trigger de l'oscilloscope la fonction Ligne.

• Influence de la constante de temps RC

Choisir $R = 100 \text{ k}\Omega$ et $C = 1 \text{ nF}$, pour figer l'acquisition et visualiser les oscillations des signaux, on sélectionnera la touche Run Stop de l'oscilloscope.

Choisir en suite $R = 500 \text{ k}\Omega$ et $C = 10 \text{ nF}$ puis $R = 500 \text{ k}\Omega$ et $C = 100 \text{ nF}$.

Réaliser

1. Représenter l'allure du signal de sortie démodulé pour les différentes valeurs du produit RC. Représenter l'allure des variations rapides des oscillations si nécessaires.

Analysier

2. Pour ces trois réglages de la constante de temps RC, analyser les défauts et qualités des démodulation réalisées.

3. Quel filtrage supplémentaire vous paraît nécessaire pour récupérer le signal message avec le moins signal parasite ?

• Influence du taux de modulation m

Régler la constante de temps RC pour obtenir une démodulation de qualité pour $m = 0,5$.

Réaliser

4. Ajuster le taux de modulation m pour obtenir une sur-modulation $m > 1$. Quelle limitation apparaît alors dans cette technique de démodulation ?

Représenter l'allure des signaux modulé et démodulé.

5. Ajuster le taux de modulation pour obtenir un taux de modulation m proche de 1 et $m < 1$. Commenter.

Analyser/Valider

6. L'étude théorique de la démodulation par détection d'enveloppe (ou détection de crête) montre que son efficacité repose sur la condition suivante :

$$T_p = 1/f_p \ll RC < \frac{\sqrt{1-m^2}}{2\pi m} T_m.$$

Vérifier la condition d'une détection d'enveloppe correcte pour $m = 0,5$ et votre réglage précédent de la constante RC.

Pouvez-vous valider vos observations du 4. et 5 ?