

MP23 – MISE EN FORME, TRANSPORT ET DÉTECTION DE L'INFORMATION

1^{er} mai 2019

Lagoin Marc & Ramborghi Thomas

Commentaires du jury

- Ne pas restreindre le montage à la modulation d'amplitude.
- Ne pas mettre le problème de la récupération de la porteuse sous silence dans le cas de la démodulation synchrone.

Bibliographie

- ✚ *TP d'électronique sur la communication*, **Jérémy Ferrand** Principal sources de données pour les expériences
- ✚ *Cours d'ondes*, **Jérémy Ferrand** Pour la théorie du transport de l'information dans un câble coaxial.
- ✚ Les ressources utiles pour la bibliographie sont données au début dans le TP (Duffait, Expériences d'électronique ; Quaranta 4, Dictionnaire de physique expérimentale, Tome 4 ; Girard, Boucles à verrouillage de phase)

Expériences

- ☞ Caractérisation du câble coaxial (vitesse de propagation, impédance et fonction de transfert)
- ☞ Modulation d'amplitude grâce à un multiplieur
- ☞ Démodulation d'amplitude grâce à la détection synchrone
- ☞ Modulation de fréquence
- ☞ Démodulation de fréquence grâce à une boucle à verrouillage de phase
- ☞ Multiplexage

Table des matières

1	Caractérisation d'un moyen de transport : le câble coaxial	3
1.1	Mesure de la vitesse de propagation	4
1.2	Mesure de l'impédance en sortie du câble	4
1.3	Étude de sa fonction de transfert	4
2	Modulation et démodulation d'amplitude	5
2.1	Modulation d'amplitude à l'aide d'un multiplieur	5
2.2	Démodulation d'amplitude par détection synchrone	6
3	Modulation et démodulation de fréquence	7
3.1	Modulation de fréquence à l'aide d'un oscillateur commandé en tension	8
3.2	Démodulation de fréquence à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase	9
4	Multiplexage	10

Introduction

- Les différents moyens utilisés pour le transport de l'information sont les lignes électriques, les guides d'ondes ou la propagation dans l'atmosphère sous la forme d'onde hertzienne.
- Le nombre d'information transmise étant de plus en plus nombreux, nous devons être capables d'en transmettre plusieurs à l'aide d'un unique canal (multiplexage). Cependant, les signaux audio transmis dans la vie courante se trouvent dans une petite fourchette de fréquences (entre 20Hz et 20kHz), délimitée par les limites d'audibilité. Il faut trouver un moyen pour que les signaux restent distinguables lorsqu'ils arrivent chez le particulier. Nous effectuons pour cela de la modulation, modifiant le signal informatif et nous permettant ainsi l'accès à un intervalle de fréquence plus vaste, puis à de la démodulation pour réobtenir le signal d'intérêt.
- Pour avoir une résonance dans une antenne il faut avoir une longueur d'antenne multiple de la demi-longueur d'onde (voir cours sur les ondes de Jérémy Ferrand). Ainsi, pour émettre une onde de fréquence 1kHz, il faudrait une antenne de l'ordre de la centaine de kilomètre.

Nota Bene : Avoir en tête les bandes passantes des 3 modes pour pouvoir justifier leur domaine d'utilisation respective.

1 Caractérisation d'un moyen de transport : le câble coaxial

Nous étudierons ici le transport au travers d'un câble coaxial tel que ceux que nous utilisons à longueur de journée en TP. Un tronçon (mésoscopique) de ce dernier peut être modélisé en première approximation par un circuit LC. En effet la présence d'une bobine est justifiée par les phénomènes d'induction entre l'âme et la gaine parcourus par des courants variables opposés en tout point. Le condensateur permet de tenir compte des phénomènes capacitifs ayant lieux entre les 2 métaux.

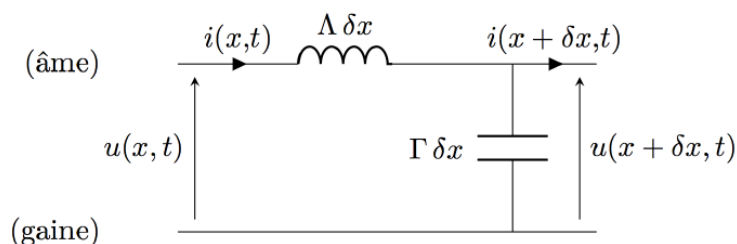


FIGURE 1 – Schématisation d'un tronçon mésoscopique d'un câble coaxial. Cette figure a été prise dans le poly de Jérémy Ferrand.

Nous pouvons calculer la relation de structure reliant l'intensité et la tension en tout point de l'espace et du temps :

$$\begin{cases} i(x; t) &= f(x - ct) + g(x + ct) \\ u(x; t) &= Z[f(x - ct) - g(x + ct)] \end{cases} \quad (1)$$

Nota Bene : On s'est placé ici en ARQS électrique ici.

La connaissance de l'impédance et de la vitesse de propagation permettent de caractériser le couplage entre ces deux grandeurs ; ce qui fera l'objet des 2 première sous-partie.

1.1 Mesure de la vitesse de propagation

- On envoie dans une bobine de câble coaxial $L = 100\text{m}$ un burst sinusoïdal (1 cycle, fréquence 5MHz, amplitude 5V, intervalle entre les burst 1ms).
- Observation à l'oscilloscope du pulse envoyé ainsi que du pulse réfléchi à l'entrée du câble. De la durée les séparant, on en déduit la vitesse de propagation ($2 \times 10^8\text{m/s}$)
- On observe que le pulse réfléchi est déformé en raison de la dispersion $\rightarrow$ limite du modèle $\rightarrow$ Équation des télégraphistes pour aller plus loin.

Nota Bene : Choix d'un burst sinusoïdal pour éviter la dispersion en fréquence dans le câble que l'on retrouverait pour un créneau par exemple.

1.2 Mesure de l'impédance en sortie du câble

- On ajoute une boîte à décade en sortie du câble et on regarde pour quelle résistance R_{decad} l'onde en sortie s'annule. Nous avons alors effectué une adaptation d'impédance (l'impédance du câble est alors égale à R_{decad} . Il ne reste plus qu'à mesurer la résistance à l'aide d'un ohmmètre.
- Le coefficient de réflexion en amplitude est $r = \frac{(Z - R_{decad})}{(Z + R_{decad})}$.

Nota Bene : Mesurer la résistance au multimètre pour être plus précis.

1.3 Étude de sa fonction de transfert

La fonction de transfert aux bornes de la capacité est de la forme :

$$\mathcal{H} = \frac{\frac{1}{jC\omega}}{\frac{1}{jC\omega} + jL\omega} = \frac{1}{1 - CL\omega^2} \quad (2)$$

avec : C et L la capacité et l'inductance linéique multiplié par la longueur mésoscopique respectivement.

Le câble coaxial se comporte donc à priori comme un filtre passe-bas. Nous allons le vérifier en traçant son diagramme de Bode. Pour cela, nous allons relever la tension en entrée U_e et celle en sortie U_s du câble coaxial.

Nota Bene : Il faut régler l'impédance d'entrée de l'oscilloscope sur 50Ω .

On trace le gain linéique G_{dB} en fonction de la fréquence sur Regressi. Il est donné pour un câble de longueur l par :

$$G_{dB} = 20 \frac{\log(\frac{u_s}{u_e})}{l} \quad (3)$$

Nota Bene : On obtiendra une fréquence de coupure de l'ordre du MHz.

Nous pouvons alors conclure qu'il est possible de transporter des signaux de fréquence inférieure au MHz sur une distance d'une centaine de mètre.

Nota Bene : Si l'on observe une résonance avant la coupure, il peut s'agir d'une mauvaise adaptation d'impédance.

2 Modulation et démodulation d'amplitude

2.1 Modulation d'amplitude à l'aide d'un multiplieur

On définit un signal modulé en amplitude comme un signal pour lequel l'amplitude d'une porteuse U_p varie en fonction du signal d'intérêt U_i . On réalise ce type de signal en multipliant U_p et U_i à l'aide par exemple d'un multiplieur :

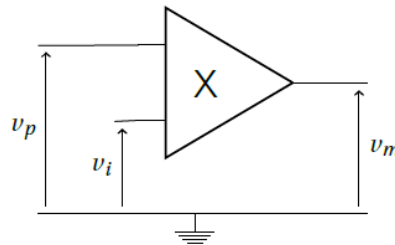


FIGURE 2 – Schéma d'un multiplieur. Cette figure a été prise dans le poly de Jérémy Ferrand.

Cette opération est associée à l'équation : $U_m(t) = \kappa U_i(t) \times U_p(t)$ avec : κ un facteur de proportionnalité.

Dans le cas d'une porteuse et d'un signal d'intérêt sinusoïdaux (de la forme $U_i(t) = A_i (1 + m \cos(2\pi f_i t + \varphi))$ et $U_p = A_p \cos(2\pi f_p t)$ avec m le taux de modulation), nous obtenons :

$$U_m(t) = \kappa A_i A_p \left(\cos(2\pi f_p t) + \frac{m}{2} \cos(2\pi(f_p - f_i)t - \varphi) + \frac{m}{2} \cos(2\pi(f_p + f_i)t + \varphi) \right) \quad (4)$$

- On prend pour U_p une amplitude de 2V et une fréquence de 10 kHz, pour U_i une amplitude de 1V et une fréquence de 500 Hz. A l'aide de Latis Pro, on calcule la transformée de Fourier du signal modulé et l'on observe un pic à 9500 Hz et un à 10500 Hz sans composante continue.
- Le signal en temporel est surmodulé et possède une enveloppe de fréquence 1000 Hz. L'ajout d'une composante continue avec un taux de modulation inférieur à 1 permet de supprimer ce problème. Enfin, si $m > 1$ alors le signal est déformé.

La figure ci-dessous a été prise sur le site http://public.iutenligne.net/electronique/launay/modulation_analogique/chap2/2-1-a.html.

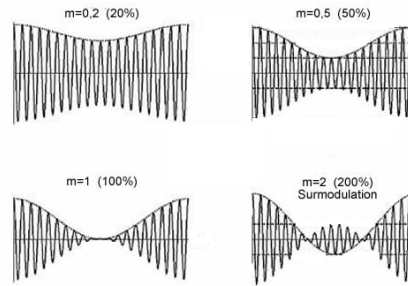


FIGURE 3 – Courbe expliquant l'impact du choix du taux de modulation sur la forme de signal modulé.

Nota Bene : Pour obtenir une bonne résolution sur Latis pro nous pourrions prendre 2000 points, un intervalle entre 2 points de 10 μ s (il faut que cette valeur soit au minimum supérieure à la moitié de la période de la porteuse), et un temps total d'acquisition de 10ms (au minimum égal à la période du signal d'intérêt).

2.2 Démodulation d'amplitude par détection synchrone

Nous allons à présent donner une méthode permettant de démoduler le signal afin d'obtenir le signal d'intérêt. Nous pouvons pour cela faire de la détection d'enveloppe ou de la détection synchrone. Nous allons ici vous montrer la seconde car il s'agit d'une technique encore très utilisée contrairement à la modulation d'amplitude et sa démodulation par détection d'enveloppe puisqu'elle permet d'acquérir un signal dont la fréquence est théoriquement connue mais qui est expérimentalement cachée dans un important bruit (on utilise pour cela un lock-in).

Avec le GBF, envoyer sur l'entrée v_m un signal modulé en amplitude (porteuse sinus 100kHz et 2 V, modulation avec taux de 50%, à 5kHz).

- La première étape du processus consiste à multiplier notre signal modulé par un signal sinusoïdal de même fréquence que la porteuse.

Notons ici que le récepteur doit donc connaître cette porteuse! Nous prenons ici U_m fabriqué directement avec un GBF (avec une porteuse sinusoïdale de fréquence 100kHz, d'amplitude 2 V et une modulation avec un taux de 50% à 5kHz) ainsi d'une sinusoïde noté U_{pd} (de fréquence 100kHz et d'amplitude 5 V). Nous enlèverons ici par soucis de simplicité la composante continue du signal informatif puisque cette dernière n'est pas nécessaire. On obtient un signal U_{mesure} défini par :

$$U_{mesure}(t) = \kappa' \left(\frac{A_i A_p}{2} \left(\cos(2\pi(f_p - f_i)t - \varphi) + \cos(2\pi(f_p + f_i)t + \varphi) \right) \right) \times A_{pd} \cos(2\pi f_p t + \varphi_{pd}) \quad (5)$$

$$= \mathcal{A} \left(\cos(2\pi(2f_p - f_i)t + \varphi') + \cos(-2\pi f_i t + \varphi'') + \cos(2\pi(2f_p + f_i)t + \varphi''') + \cos(2\pi f_i t + \varphi''') \right) \quad (6)$$

Le calcul de la transformée du signal nous donne donc 3 pics correspondant à des fréquences de : $(2f_p - f_i)$, $(2f_p + f_i)$ et f_i .

Nous pouvons observer qu'un offset oscillant de très basse fréquence s'ajoute à la tension. Ceci est expliqué par le fait que φ et φ_{pd} ne sont a priori pas identiques. Il est possible d'utiliser une boucle à verrouillage de phase pour éviter cet offset. Cette technique sera abordée plus tard dans le cadre de la démodulation de fréquence.

- La seconde étape consiste à filtrer les fréquences $(2f_p - f_i)$ et $(2f_p + f_i)$ de manière à récupérer uniquement un signal à la fréquence d'intérêt.

Nous utilisons ici un filtre passe bas d'ordre 3 en prenant 2 résistances $R = 3.9k\Omega$, 2 condensateurs de capacité $C = 1nF$, et une bobine d'inductance $L = 45.57mH$.

Un schéma complet du circuit est donné ci-dessous :

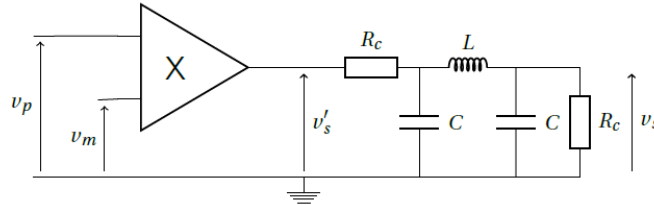


FIGURE 4 – Schéma du dispositif permettant d'effectuer de la démodulation synchrone. Cette figure a été prise dans le poly de Jérémie Ferrand.

3 Modulation et démodulation de fréquence

3.1 Modulation de fréquence à l'aide d'un oscillateur commandé en tension

Nous allons à présent donner un second type de modulation, plus robuste que la première pour transmettre un signal lorsque l'atténuation ou le bruit est important. Il s'agit de la modulation de fréquence. Le signal d'intérêt est ici inscrit dans les variations de la fréquence de la porteuse et non plus dans son amplitude comme précédemment. Cette grandeur dépend donc ici du temps et prend la forme :

$$f_m(t) = f_p + \kappa U_i(t) = f_p + \kappa A_i \cos(2\pi f_i t) \quad \text{avec : } \kappa \text{ un facteur de proportionnalité exprimé en } \text{HzV}^{-1} \quad (7)$$

Cette fréquence instantanée est reliée à la phase instantanée $\phi_m(t)$ par la relation :

$$f_m(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_m(t)}{dt} \quad (8)$$

Cette phase intervient dans le signal modulé U_m qui par définition s'écrit :

$$U_m(t) = A_m \cos(\phi_m(t)) \quad (9)$$

Ainsi, pour que la fréquence de notre signal $U_m(t)$ soit f_m , il nous faut créer un signal ayant pour expression :

$$U_m(t) = A_m \cos\left(2\pi f_p t + \frac{\kappa A_i}{f_i} \sin(2\pi f_i t)\right) = A_m \cos\left(2\pi f_p t + \beta \sin(2\pi f_i t)\right) \quad (10)$$

Nous appellerons β l'indice de modulation.

Pour fabriquer un tel signal nous utiliserons simplement un GBF qui sait délivrer ce type de signaux. Nous prendrons les caractéristiques suivantes : un sinus de fréquence 100kHz, d'amplitude $8V_{pp}$ et un offset nul. Cette commande correspond aux paramètres de la porteuse. Puis en appuyant sur la touche Mod nous choisirons mode Fm, source int, freq dev 50Hz, FM 0.5Hz et une forme de sinus. Ces derniers correspondent quant à eux à la fréquence du signal d'intérêt pour FM définissant la période des oscillations et la plage en fréquence sur laquelle varie ces oscillations pour freq dev.

Après avoir observé que le signal correspond bien à celui que l'on souhaitait réaliser, nous pouvons effectuer 2 mesures quantitatives :

- La mesure du facteur de proportionnalité κ .

Pour cela, nous plaçons le GBF en mod source ext et nous relions sa face arrière à un générateur de tension continu. La freq dev est ici de 100kHz. Nous mesurons la fréquence en sortie du GBF pour différentes valeurs de tension en entrée variant entre $-5V$ et $5V$ (les mesurer au multimètre pour être plus précis). Nous réaliserons ici seulement quelques points, les autres ayant été faits en préparation. Nous obtenons alors une droite de coefficient directeur κ .

3.2 Démodulation de fréquence à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase

La boucle à verrouillage de phase est un système couramment utilisé pour la démodulation. Il peut être décomposé en 3 parties :

- un oscillateur commandé en tension qui va, comme son nom l'indique, osciller à la même fréquence que le signal d'entrée que l'on souhaite démoduler.
- un multiplieur qui multiplie le signal à démoduler avec celui de l'oscillateur.
- un filtre passe-bas (+ suiveur pour d'adaptation d'impédance) qui va supprimer la partie commune entre les 2 signaux qui ont été multipliés et ne garder ainsi que la différence de phase entre les deux ; ce qui va permettre à l'oscillateur de s'ajuster au le signal d'entrée. Cette phase est l'écart de l'oscillation à une oscillation sinusoïdale. En effet l'OCT ne fournit qu'un simple sinus et doit recevoir une information correspondant à la modulation. Cette information corrective représente donc par définition le signal d'intérêt. Il sera donc possible de le récupérer en mesurant la tension en sortie du comparateur de phase (multiplieur + filtre passe-bas).

Le schéma ci-dessous au montage complet de la boucle à verrouillage de phase :

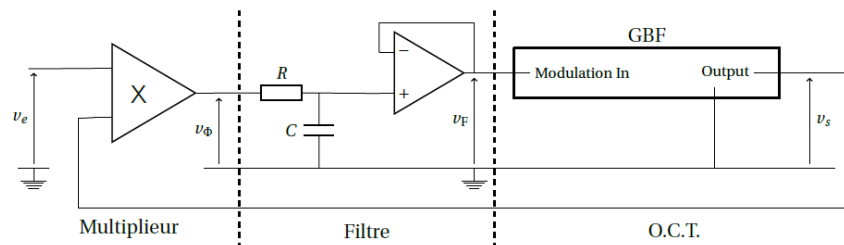


FIGURE 5 – Schéma du dispositif permettant d'effectuer de la démodulation de fréquence. Cette figure a été prise dans le poly de Jérémy Ferrand.

Nota Bene : Nous pouvons définir ici 2 plages caractérisant notre montage : la plage de capture et la plage de verrouillage. La première correspond à l'intervalle de fréquence sur lequel la boucle se verrouille. Si la fréquence d'entrée appartient à cette plage alors la boucle parvient à suivre le signal incident. La seconde plage est appelée plage de verrouillage. Il s'agit ici de l'intervalle en fréquence sur lequel la boucle reste accordée. Ces 2 intervalles sont différents et nous pouvons donc observer une hystérésis lors d'un enchainement de décrochages et de verrouillages.

Voici les différentes grandeurs prises pour effectuer ce montage :

GBF créant le signal modulé : Nous en utilisons 2 ici afin de pouvoir comparer le signal démodulé avec le signal d'intérêt. Le premier est un sinus de fréquence 100 kHz, d'amplitude $10 V_{pp}$ et d'offset nul + Mod FM en source ext de freq dev (amplitude de la modulation) 20 Hz. Le second est un sinus de fréquence 500mHz, d'amplitude $5 V_{pp}$ et d'offset nul.

Filtre : résistance de $10k\Omega$ et capacité de $22nF$

OCT : sinus de fréquence 100kHz, d'amplitude $10 V_{pp}$ et d'offset nul + Mod FM en source ext de freq dev 100 Hz.

Nota Bene : Attention, si les amplitudes des signaux arrivant sur le multiplieur sont trop importants, la diode présente dans ce dernier déformera le signal.

4 Multiplexage

Un exemple d'application auquel nous pouvons penser à ce moment-ci est la radio. lorsque nous tournons le boutons pour rechercher notre radio favorite nous effectuons un réglage grossier de l'oscillation de l'OCT. Lorsque nous nous approchons suffisamment proche de la fréquence qui lui est associée (porteuse) la boucle accroche. Le signal peut alors être démodulé et nous pouvons écouter notre chanson tout en chantant (ou une émission au combien intellectuelle).

Comme nous l'avons dit en début de montage, plusieurs signaux peuvent être transportés sur la même voie en même temps. C'est le cas pour la radio. Positionnons alors un sommateur au début du montage précédent et envoyons 2 signaux différents modulés en fréquence. Nous reprendrons celui utilisé précédemment auquel nous ajoutons le suivant :

Second GBF : sinus de fréquence 200kHz, d'amplitude $8V_{pp}$ et d'offset nul + Mod FM en source int de freq dev (amplitude de la modulation) 20 Hz, d'FM 10 Hz et de forme sinusoïdale.

Pouvons enfin en fonction du réglage de l'OCT récupérer l'un ou l'autre des signaux modulés. Pour récupérer le premier, il suffit de laisser les réglages de l'expérience précédente. Pour le second signal il faut prendre :

OCT : sinus de fréquence 200kHz, d'amplitude $20V_{pp}$ et d'offset nul + Mod FM en source ext de freq dev 70 Hz.

Un schéma du sommateur (inverseur ici) pris sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Montages_de_base_de_l%27amplificateur_op%C3%A9rationnel est proposé ci-dessous :

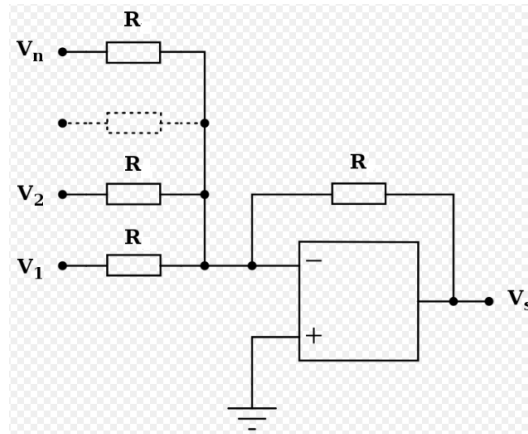


FIGURE 6 – Schéma du dispositif sommateur pris sur wikipédia. Nous avons pris des résistances de $1000\ \Omega$