

MP 23 – Mise en forme et détection de l’information

7 janvier 2020

Laura Guislain & Pascal Wang

Niveau :

Commentaires du jury

Bibliographie

- ↗ *Cours d’électronique*, **Jeremy Neveu** → Poly modulation.
- ↗ *Electronique*, **Duffait** → Carson + formules sur la PLL
- ↗ *Poly de TP* → Montages et valeurs des composants
- ↗ *PLL*, **Girard** → Compléments sur la PLL

Table des matières

1	Câble coaxial	2
1.1	Caractérisation de la célérité	2
1.2	Mesure de Z	3
1.3	Fonction de transfert	4
2	Modulation d’amplitude (AM)	4
2.1	Introduction	4
2.2	Modulation d’amplitude	5
2.3	Démodulation AM par détection synchrone	5
3	Modulation de fréquence (FM)	6
3.1	Modulation de fréquence	6
3.2	La boucle à verrouillage de phase	7
3.3	Démodulation	7
3.4	Signaux numériques, FSK	8
3.5	Multiplexage	8
4	Passage	8
5	Compléments/Questions des années précédentes	10
6	Annexe : Introduction et enjeux	11

Préparation

Il faut au moins 3 GBF (2 pour produire un signal FM + 1 pour l'OCT) et 5 GBF si on veut faire du multiplexage. Vérifier High Z sur tous les GBF. Vérifier 1M Ω sur les voies de l'oscillo.

Introduction

Aujourd'hui, au XXI^{ème} siècle, on veut transférer des informations rapidement d'un bout à l'autre de la Terre, que ce soit par radio, TV, internet, téléphonies fixes et mobiles... Pour cela, différentes technologies de mise en forme, de transport et de détection de l'information ont été développées. Comme moyen de transmission, on trouve les lignes électriques, les guides d'ondes ou la propagation dans l'atmosphère sous la forme d'onde hertzienne. Ici on va commencer par présenter la propagation guidée dans un câble coaxial, qu'on utilise couramment en TP.

1 Câble coaxial

Développé aux alentours des années 1900 par Heaviside, physicien télégraphiste. Constitué de deux conducteurs de même axe de révolution, l'âme et la gaine, séparés par un isolant interne (ex : PE polyéthylène) et un isolant externe. [Avantage par rapport à un fil de cuivre : plus grande gamme de fréquence tolérée et moins de perte par effet Joule. Au tableau : modèle à constantes réparties sans pertes, en ARQS. Un tronçon (mésoscopique) de ce dernier peut être modélisé en première approximation par un circuit LC. La bobine modélise les effets inductifs entre l'âme et la gaine, parcourus par des courants variables. Le condensateur permet de tenir compte des phénomènes capacitifs ayant lieu entre les 2 métaux. Dans le cadre de ce modèle, un câble est caractérisé par Γ et Λ qu'on peut déterminer en mesurant $c = 1/\sqrt{\Gamma\Lambda}$ et $Z = \sqrt{\Lambda/\Gamma}$. Sinon, un câble est caractérisé par les diamètres de ses conducteurs et de la constante diélectrique de l'isolant. En fait, ce qui nous intéresse, c'est plutôt Z et c qu'on va mesurer.

Remarques

- Un courant $+I$ circule dans le fil de données (conducteur intérieur) et un courant $-I$ dans le maillage de masse (conducteur extérieur).
- Ainsi, il n'y a pas de transfert net de charges.
- Le maillage permet un écrantage protégeant des perturbations électromagnétiques extérieures.

1.1 Caractérisation de la célérité

Manipulation

Mesure de la célérité

- Prendre la bobine de 100 m de câble coaxial P58.34, un GBF, un oscilloscope.
- Envoyer en entrée un burst sinusoïdal (1 cycle, fréquence 5 MHz, amplitude 5 V, intervalle de 1 ms entre les burst), ne rien mettre en sortie du câble coaxial (impédance limite $Z = \infty$). Mettre le trigger source du GBF en **mode "int"**, sinon 1 seul burst est envoyé et l'onglet "burst period" n'est pas actif.
- Insérer un oscilloscope à l'entrée du câble coaxial avec un pont en T. Le pont en T est branché à l'oscilloscope pour ne pas prendre en compte la longueur du câble coaxial qui est branché au GBF.
- En regardant à l'oscilloscope le signal à l'entrée du câble, on doit voir le pulse envoyé puis ce même pulse qui a été réfléchi et qui est revenu.
- Le plus aisé est de prendre comme référence le premier maximum.
- Mesurer la durée entre le signal envoyé et le signal réfléchi. Repérer grossièrement le max avec un curseur puis zoomer horizontalement pour affiner la mesure du maximum. Noter la plage où les maxima sont crédibles, on trouve $\delta T = 1.03 \pm 0.01 \mu s$.

- En déduire la vitesse de propagation dans le câble $c = 2L/\delta T$. Le constructeur donne généralement le velocity ratio 66% sans incertitude. On attend donc $c = 2 \cdot 10^8$ m/s. $u(c)/c = \sqrt{(u(L)/L)^2 + (u(t)/t)^2}$

Remarques

- On voit que le signal a été atténué, ce qui n'est pas pris en compte dans le modèle.
- On choisit une fréquence de 5 MHz pour avoir une période assez courte pour que la durée du pulse ne soit pas plus longue que le temps de propagation (sinon le retour se superpose à l'aller, on peut observer cela dès 1MHz) mais on veut la fréquence pas trop haute pour éviter l'atténuation (le câble coaxial est un passe-bas).
- Choix de l'intervalle entre les burst : suffisamment long par rapport au temps de propagation dans le câble pour séparer les réflexions.
- Le pulse réfléchi est déformé : le câble est en réalité dispersif, ce qui n'est pas pris en compte dans la modélisation.
- Pour modéliser la dispersion, il faudrait introduire une résistance et conductance linéiques, c'est l'équation des télégraphistes.
- On utilise un burst sinusoïdal plutôt qu'un carré qui possède plus de fréquences pour être moins sensible à la dispersion.
- Possibilité de propagation sans dispersion mais avec atténuation à la condition de Heaviside.
- Pour être plus précis, on pourrait mesurer de multiples réflexions et faire une droite. Lorsqu'on règle l'impédance de l'oscillo sur 50Ω , on voit mieux les réflexions multiples mais l'amplitude des premiers pics est plus faible car le coefficient de transmission vers l'oscillo est plus faible.

1.2 Mesure de Z

On utilise l'adaptation d'impédance. Le coefficient de réflexion en amplitude est $r = (Z - R)/(Z + R)$.

- Placer une boîte à décades ou un potentiomètre de 100ω en sortie du câble (résistance R).
- Utiliser une jonction coaxial-banane (en Y) et deux câbles courts au lieu d'un long BNC-banane pour être en mesure prendre en compte la résistance des fils lors de la mesure à l'ohmmètre (sinon trouve une dizaine de ohm en moins).
- Chercher à annuler autant que possible l'onde réfléchie à l'entrée du câble en réduisant la résistance en sortie.
- Lorsqu'il n'y a plus d'onde réfléchie, sortir la boîte à décades ou le potentiomètre du circuit et **mesurer sa résistance à l'ohmmètre**. On attend 50Ω à comparer avec la documentation (attention, il existe d'autres câbles d'impédances différentes dans la collection).
- Le potentiomètre permet une variation plus fine.
- On mesure toujours les résistances à l'ohmmètre, pas en lisant la boîte à décades.
- L'impédance du câble $Z = \sqrt{\Lambda/\Gamma}$ dans le modèle sans perte est purement résistive, dans le sens où Z est réel et u et i ne sont pas déphasés. Mais attention : il n'y a pas d'effet Joule dans ce modèle, la résistance linéique n'a pas été prise en compte.
- En réalité, on ne pourra annuler complètement l'onde réfléchie à cause de la partie imaginaire de Z , qu'on ne peut "adapter" avec R réel. En effet, $Z = \sqrt{(r + i\omega\Lambda)/(g + i\omega\Gamma)}$ dans le modèle avec perte. On peut aussi invoquer les contacts imparfaits au niveau du potentiomètre.
- D'où le choix d'une fréquence grande pour négliger r et g dans l'expression de l'impédance mais pas trop grande pour éviter l'atténuation.
- Commentaire sur la valeur de la résistance 75Ω (wikipedia) : "Pour le transport de puissance, on aurait tendance à penser que maximiser le diamètre de l'âme diminue la résistance et donc les pertes. Ceci est vrai en continu, mais en haute fréquence, l'épaisseur réduite du diélectrique entraîne une tension de claquage plus faible, et donc une puissance maximale admissible limitée. L'optimum se réalise pour une impédance caractéristique de l'ordre de 30Ω . La valeur de 50Ω correspond à un compromis entre pertes en émission et pertes en réception."

1.3 Fonction de transfert

Présentation

Sur une longueur mésoscopique de câble, avec un pont diviseur de tension on voit que $H(j\omega) = 1/jC\omega / (1/jC\omega + jL\omega = 1/(1 - LC\omega^2))$ où $C = \Gamma dx$ et $L = \Gamma dx$. On s'attend donc à un comportement passe-bas.

Manipulation

- Retirer la boîte à décades et brancher la sortie sur l'oscilloscope.
- Régler l'impédance **d'entrée de l'oscilloscope sur 50 Ω** (en appuyant sur le bouton du numéro de voie) pour transmettre le signal à l'oscilloscope.
- Pour différentes tensions sinusoïdales (amplitude 5 V) en entrée de fréquence variable entre 1 Hz et 20 MHz, relever la tension en entrée ue et en sortie us du câble. Tracer le **gain linéique** $G_{dB} = 20 \log(us/ue)/l$ avec l la longueur du câble, en fonction de la fréquence.
- Relever la valeur de la fréquence de coupure à -3dB en lisant ou avec un fit.
- On peut illustrer la déformation d'un triangle ou carré à une fréquence inférieure à la fréquence de coupure. En effet, ces signaux possèdent des hautes harmoniques qui sont atténuées.

Remarques

- Préciser que l'impédance de l'oscilloscope peut être changée : on entend le relais quand on passe de 50 Ω à 1M Ω mais celle du GBF reste à 50 Ω .
- Si l'impédance d'entrée de l'oscilloscope n'est pas réglée en 50 Ω , il peut y avoir des réflexions multiples dans le câble, ce qui crée un effet Fabry-Pérot et perturbe la mesure du gain.
- Si l'on observe une résonance avant la coupure, il peut s'agir d'une mauvaise adaptation d'impédance ou de la présence de dissipation avec bon facteur de qualité.
- La phase du diagramme de Bode montre le déphasage entre les fréquences et donc la dispersion.
- Relier la valeur trouvée du gain linéique avec celle dans les lignes, voir la page wiki du câble coaxial.

Conclusion

- Le câble coaxial se comporte comme un filtre passe-bas de coupure de l'ordre du MHz. Pour les applications usuelles de TP on peut l'utiliser mais à plus haute fréquence la transmission sera atténuée.
- Ce moyen de transport sera alors efficace pour transporter des signaux contenant des fréquences inférieures au MHz et sur des distances de l'ordre de la centaine de mètres.

Le câble coaxial est un bon moyen de transport de l'information, il est utilisé par exemple pour relier l'antenne au décodeur TV : il est peu sensible aux perturbations (blindage), il présente des limites comme l'atténuation à haute fréquence.

On comprend qu'à chaque moyen de transport est associé une bande de fréquence optimale pour transporter de l'information.

2 Modulation d'amplitude (AM)

2.1 Introduction

On va montrer comment mettre en forme et détecter l'information. On pourrait imaginer envoyer le signal audible entre 20 Hz et 20000 Hz sous forme d'onde électromagnétique aux mêmes fréquences. Mais on rencontre deux problèmes : la taille d'antenne qui doit être de l'ordre de la longueur d'onde *i.e.* 300 km pour 1 kHz et l'encombrement : on ne pourrait distinguer RTL de NRJ. D'où la nécessité de coder l'information autrement. On utilise la modulation.

La modulation d'amplitude consiste à faire se propager une onde porteuse de fréquence élevée dont l'amplitude a été modifiée par le signal informatif.

Explication.... On ajoute un offset. On multiplie deux signaux.

2.2 Modulation d'amplitude

Préparation

- Envoyer 1 kHz en modulation et 10 kHz en porteuse (pour l'instant basse fréquence pour visualiser à l'oscilloscope). Trigger le GBF en sync du signal informatif pour ne pas rerégler le trigger à chaque changement du taux de modulation.
- Blinder sur l'amplitude des GBF en entrée à cause de l'atténuation des multiplieurs (constante $1/10 V^{-1}$). Mais attention, Attention, la diode présente le multiplieur peut déformer le signal.
- Prérégler la TF.

Présentation de la modulation d'amplitude

- Montrer le signal modulé, on a pris une porteuse à 10 kHz pour la visualisation mais en pratique c'est plus vers 100 kHz (typiquement France Inter émet à 162kHz). En mettant les origines verticales à 0, on ajuste finement l'échelle verticale du signal informatif pour qu'il coïncide avec l'enveloppe supérieur du signal modulé.
- Montrer différents taux de modulation en ajustant l'offset/l'amplitude.
- Mesurer un taux de modulation.
- Montrer la **surmodulation** $\mu > 1$: l'enveloppe n'est plus le signal informatif. Montrer l'influence de l'offset sur le taux de modulation. Sans offset, la période de l'enveloppe est la moitié du signal informatif.
- Calculer la transformée de Fourier à l'oscilloscope (dézoomer en temps pour avoir une bonne résolution) et mettre en évidence $f_p, f_p + f_i, f_p - f_i$.
- (NON) Montrer les bandes latérales du spectre en prenant des fréquences adéquates $f_m \ll f_p$ pour éviter le repliement.
- (NON) Montrer le repliement lorsqu'on module avec un spectre large : carré/triangle.

La modulation en amplitude a été étudiée. Dans la vraie vie, ce signal (radio par exemple) est envoyé par des antennes. Il se propage librement par voie hertzienne. Il est capté par une antenne réceptrice et démodulé. On ne s'intéresse pas à la transmission mais à la réception.

2.3 Démodulation AM par détection synchrone

Principe de la détection synchrone : multiplier par un signal de même fréquence que la porteuse et filtrer passe-bas. Explication en raisonnant sur le spectre : $f_p, f_p - f_i, f_p + f_i$ dans le signal modulé. Après multiplication, les fréquences du spectre sont $2f_p, 2f_p - f_i, f_i, 2f_p + f_i$. Après le passe-bas, qui coupe $f_i \ll f_c \ll f_p$, on récupère f_i . Mais cela suppose d'avoir récupéré la porteuse f_p , ce qui peut se faire avec une boucle à verrouillage de phase qu'on va voir dans la partie suivante ou un doubleur de fréquence. Mais ici, on récupère directement le signal du GBF. Autres applications de la détection synchrone : réduire le bruit, acquérir un signal de fréquence connue noyée dans le bruit.

Ici on utilise un multiplieur et un passe-bas de fréquence du troisième ordre de fréquence de coupure 10 kHz.

Manipulations qualitatives

- Câbler le montage de détection synchrone (voir poly pour les valeurs des composants). A cause de la constante de $10V^{-1}$, il faut des amplitudes suffisantes en entrée du multiplieur. Attention à bien brancher la masse de l'oscillo à celle du circuit pour observer le signal de sortie.
- Observer la démodulation. Faire varier la fréquence du signal modulant, sans dépasser la fréquence de coupure du filtre.
- Faire varier le taux de modulation avec $m > 1$ et montrer que la démodulation fonctionne encore, contrairement à la détection de crête. Même avec un offset nul la démodulation marche, contrairement à la détection de crête.
- Limites : Les hautes fréquences sont filtrées : (i) augmenter la fréquence du sinus (ii) puis envoyer un créneau ou un triangle. Le filtre enlève des harmoniques du créneau qui est déformé au niveau des discontinuités qui contiennent les HF.

- Illustrer le fading en multipliant le signal avec un signal à la même fréquence que la porteuse mais déphasé (issu d'un autre GBF). [Manneville p133]. Ça oscille si les deux GBF ne sont pas à la même fréquence (ce n'est pas tjs le cas même si on entre en commande la même valeur de f). Le fading peut aussi se produire à cause des déphasages aléatoires dus à la propagation (comme la cohérence temporelle en optique).

Blabla sur la récupération de la porteuse : PLL mais compliqué. Illustrer le fading si pas en phase.

↓ La modulation en amplitude a été utilisée historiquement par les premières radios et encore pour les talkiewalkies ou bien dans l'aéronautique. Mais la plupart des radios sont FM.

3 Modulation de fréquence (FM)

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. L'information est codée dans la variation de la fréquence instantanée de la porteuse. $v_m(t) = A_p \cos(2\pi f_p t + kA_i/f_i \sin(2\pi f_i t))$ où k facteur en Hz/V (lié à FreqDev), de sorte que la fréquence instantanée s'écrit $f(t) = 1/2\pi d\psi/dt = g_p + kA_i \cos(2\pi f_i t)$. Un signal modulé en fréquence est donc décrit par f_p la fréquence centrale, la plage de fréquences balayée $f_{max} - f_{min} = 2kA_i$ et la fréquence de balayage f_i .

Comparé à l'AM, moins sensible au bruit. Très répandue pour la radio.

L'outil fondamental pour moduler en fréquence est un oscillateur commandé en tension (OCT). Par commodité, on utilise les GBF qui peuvent être commandés en fréquence par un signal qui rentre dans leur face arrière. Indice de modulation.

3.1 Modulation de fréquence

On réalise un signal AM avec deux GBF : le premier commande en tension, le deuxième est un OCT.

Setup : porteuse 100 000 KHz et FreqDev=100 000kHz.

Illustration qualitative

- Montrer comment marche un OCT : envoyer en commande une tension constante et la changer pour voir la fréquence du signal changer.
- Envoyer un sinus lentement variable 2 Hz et 5 Vpp pour voir la modulation en live.

Manipulation : étalonnage de l'OCT

- Envoyer diverses tensions constantes V entre -5 et +5 V dans l'OCT et les mesurer avec un multimètre et mesurer la fréquence du signal f avec un fréquencemètre.
- Tracer $f(V)$. La pente de la droite donne $k = FreqDev/5V$ en Hz/V. 5V correspond à l'amplitude des signaux numériques (TTL).

Manipulation : détermination de l'excursion en fréquence ???? BOF

Vérification de la règle de Carlson

La règle de Carson porte sur l'encombrement spectral (la largeur de la bande occupée) d'un signal modulé en fréquence. Elle dit que 98 % la puissance du signal est contenu dans une fenêtre fréquentielle de largeur $B \approx 2(1+m)f_m$. [voir Manneville/Esquieu].

- Re-envoyer un signal modulé.
- Pour différentes valeurs de A_m correspondant à des indices de modulation variant entre 1 et 5, on trace le spectre de Fourier du signal modulé. Tacq=500 ns, 100 ms de mesure.
- Commentaire : on voit la fréquence de la porteuse, les fréquences de l'AM si la mod FM est basse amplitude : on parle de bande étroite $m \ll 1$. Sinon, on voit les pics à $f_p \pm n f_i$ dont l'amplitude est donnée par les fonctions de Bessel $J_n(m)$ où m est le taux de modulation. Avec un étalement dû aux autres non linéarités ?
- Ainsi, les fréquences instantanées (continues ne sont pas les fréquences du spectre de Fourier discret).
- Intégrer et cumul.
- Tracer B/f_m en fonction de kA_m/f_m pour obtenir une droite de pente 2 et d'ordonnée à l'origine 2.

On applique la règle de Carson pour savoir que les porteuses des radios FM doivent être espacées de 200 kHz.

3.2 La boucle à verrouillage de phase

Pour démoduler, on utilise une boucle à verrouillage de phase, qui est un système courant pour démoduler FM. Le but est de créer un oscillateur de fréquence variable qui va osciller à la même fréquence que le signal à démoduler. La commande envoyée à l'OCT, qui se trouve à l'intérieur de la PLL donnera le signal démodulé.

PLL : (i) multiplieur (ii) passe-bas RC + suiveur pour éviter les problèmes d'adaptation d'impédance (iii) un oscillateur commandé en tension. (i)+(ii) est un comparateur de phase. En effet, si on considère des signaux de même fréquence, si on les multiplie, $\cos(2\pi ft) \cos(2\pi ft + \phi) = 1/2(\cos(4\pi ft + \phi) - \cos(\phi))$ Si on filtre passe-bas, on récupère $\cos \phi$.

Nous pouvons définir ici 2 plages caractérisant notre montage : la plage de capture Δf_c et la plage de verrouillage Δf_v . 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 $\Delta f_v > \Delta f_c$ lors d'un enchaînement de décrochages et de verrouillages.

(NON) **Présentation du montage** Filtre ?

- Envoyer un signal porteur non modulé à 100 kHz et 4Vpp.
- Passe-bas de pulsation de coupure 10^4 rad/S. On peut montrer qu'à $f = 10^4/2\pi$ Hz, on a l'amplitude divisée par $\sqrt{2}$.
- Attention, ne pas trop bourriner sur V_e pour que $u_f \approx VeVs/10$ ne dépasse pas 5 V en entrée de l'OCT.

Présentation du montage

Synchronisation de deux signaux de même fréquence

- Envoyer un signal porteur non modulé à 100 kHz et 4Vpp. l'OCT est réglé à 100 kHz et 4 Vpp. Attention au High Z.
- Présenter les différents étages (tableau/diapo).
- Montrer le régime stable accroché synchrone : signal d'entrée, signal sorti de l'OCT déphasé de $\pi/2$, signal en sorti du filtre nul.

"Dans notre cas, nous avons déjà réglé l'oscillateur à la bonne fréquence, et la rétroaction ne la modifie donc pas. Cependant même dans ce cas simple, il y a eu une synchronisation. Les phases des deux signaux ne sont a priori pas identiques au moment de la multiplication : la sortie du comparateur est alors proportionnelle à $\cos \phi$, et la fréquence de l'OCT est modifiée : v_o se décale alors par rapport à v_m jusqu'à ce que $\cos \phi$ soit nul. La PLL se verrouille sur cette position. Cela correspond à un déphasage de $\pm\pi/2$. Pour des raisons de stabilité, c'est la position $\pi/2$ qui est choisie. En effet, si ϕ est légèrement supérieure à $\pi/2$, son cosinus est négatif et la fréquence instantanée de v_o diminue, ce qui diminue le déphasage entre v_o et v_m , et on revient bien vers $\pi/2$."

Accrochage et verrouillage

Mais la PLL reste verrouillée même si on change la fréquence en entrée.

- Faire varier la fréquence du signal en entrée et constater le verrouillage, le décrochage, l'accrochage. Constater l'hystérésis. Remarquer que le déphasage dépend de la fréquence et varie entre 0 et π . Avec les valeurs d'amplitude, ça décroche vers +4 kHz et ça raccroche vers +2.3 kHz.
- On mesure la plage de verrouillage : $2\delta f_v = k_0 k_m V_e V_f = 8\text{kHz}$ pour nos valeurs. On mesure la plage de capture (tricky, s'entraîner)
- Montrer la droite mesurée en préparation $\delta f_v = k_0 k_m V_e V_f$ (formule dans le Duffait) en fonction de V_e .
- Commenter les expressions de Δf_v et Δf_c , que doit-on augmenter pour les augmenter ?

3.3 Démodulation

On règle la fréquence centrale de l'OCT de la PLL sur celle de la porteuse. Lorsque la PLL verrouille, le signal en sortie du filtre est proportionnel au signal informatif.

Manipulations

- On garde la même porteuse.

- Envoyer un signal informatif sinusoidal : 100 Hz et 100 mVpp.
- Regarder en sortie du filtre : on retrouve le signal modulant. (Attention, comme la plage de verrouillage est faible, envoyer un signal modulant de faible amplitude, comme on le montre par la suite).
- Si on module avec une fréquence trop grande on va être coupé et déphasé ($3\pi/2$ car ordre 3 du passe-bas) par le passe-bas.
- Si on module avec une amplitude trop grande, la PLL n'accroche plus. On peut le voir en augmentant l'amplitude à 455 mVpp à 100 Hz et repérer à l'oscillo le décrochage. C'est super joli. On remarque qu'on verrouille plus longtemps qu'on accroche (hystérésis). On peut mesurer δf_v en repérant l'amplitude à laquelle le signal décroche (photo) et vérifier qu'on retombe sur les valeurs précédentes.

La boucle à verrouillage de phase est également utilisée en pratique en modulation d'amplitude afin de retrouver avec exactitude la fréquence de la porteuse. À titre d'exemple, lorsqu'on veut écouter une radio, on règle grossièrement la fréquence d'oscillation de l'oscillateur interne. Si l'on est suffisamment proche de la fréquence du signal à démoduler, la boucle à verrouillage de phase accroche et la fréquence est modifiée de façon à être exactement celle de la porteuse : le déphasage entre les deux signaux est alors constant, ce qui permet de démoduler

3.4 Signaux numériques, FSK

On peut envoyer des signaux numériques. A un niveau logique 0 ou 1 est associé une fréquence f_0 ou f_1 de la porteuse. Le FSK (frequency shift keying) est le principe de base des modems, claviers téléphonique (une touche correspondant à un signal à deux fréquences : une pour la ligne et une pour la colonne).

- En envoyant un carré, ce qui correspondrait à un signal type numérique **FSK**. On voit que les discontinuités sont lissées car les HF sont coupées. On voit aussi une réponse avec oscillations qui indique un système d'ordre au moins 2. L'amortissement est inversement proportionnel à \sqrt{RC} donc $\tau = RC$ petit pour avoir un grand amortissement mais grand pour avoir une fréquence de coupure inférieure aux HF de la PLL.
- On voudrait aussi une réponse rapide mais sans dépassement. Pour cela, on pourrait filtrer passe-bas après.

3.5 Multiplexage

- Créer deux signaux modulés 1 et 2 par deux porteuses de fréquences différentes, et avec deux signaux informatifs différents (par exemple un sinus et un triangle).
- Sommer ces deux signaux à l'aide d'un montage sommateur (voir AO wikipedia, $R=1k\Omega$), puis envoyer la sortie du sommateur sur le montage démodulateur précédent.
- En fonction de la fréquence du démodulateur choisie, on observe en sortie du filtre le signal informatif 1 ou 2.

Conclusion

Ouverture : Signal sur bruit, bit error rate, FSK, multiplexage. Il existe d'autres moyens de transmission : voie hertzienne, ou fibres optiques.

4 Passage

Temps de passage

- Introduction (1min20)
- Câble coaxial (11min)
- Modulation de fréquence (18min). 1) signal modulé en fréquence (13min) 2) démodulation du signal (5min)
- Modulation d'amplitude (pas fait)

Questions

Câble coaxial

- Dans la mesure de la vitesse de propagation dans le câble coaxial, ce sont des trains d'ondes qui se propagent. Quelle vitesse mesure-t-on? La vitesse de groupe. (ne pas la noter "c"). Est-ce que ici les deux vitesses (groupe et phase) sont égales? Pour le modèle du câble coaxial sans perte, oui. Pour le modèle avec perte, non. Il faut donc préciser à quelle fréquence on fait la mesure de vitesse.
- Y a-t-il de la dispersion dans le câble coaxial? Comment la voir? Dans le modèle du câble coaxial sans perte, le système est régi par une équation de d'Alembert, il n'y a donc pas de dispersion. Mais dans le modèle avec perte, il y en a (et c'est principalement de l'absorption). On devrait observer le train d'onde qui s'étale. Ici, il se déforme peu.
- Pour mesurer la vitesse de propagation, tu as mesuré un temps entre les deux maxima, pourquoi ne pas avoir fait la mesure à partir des bases? Si on veut mesurer la vitesse de propagation, il vaut mieux en effet mesurer à partir des bases. En mesurant à partir des maxima, on peut avoir une erreur liée à la dispersion.
- Pourquoi la mesure de la célérité dans le câble est inférieure à celle dans le vide? Car l'onde se propage dans un diélectrique. On pourrait définir l'indice du milieu avec le rapport des vitesses.
- Question sur la tension de claquage qui justifie le choix de 50Ω . Voir les notes pour la réponse.
- Quelle est l'importance de l'impédance et quel est le rapport avec le titre? Elle est importante pour avoir un maximum de signal à la transmission et à la réception.
- De quoi dépend le 50Ω ? Du câble du GBF ou de l'oscilloscope?
- Dans les mesures présentées, on veut que le GBF soit à 50Ω ou avec une grande impédance? Pour le diagramme de Bode, on veut un maximum de transfert donc 50Ω . De même, 50Ω pour la mesure de la célérité, car si l'impédance de l'oscilloscope est grande, il y aura des réflexions multiples.
- Pourquoi le modèle du câble coaxial est un modèle mésoscopique? Pour appliquer l'approximation des régimes quasi-stationnaires, on veut $l \ll \lambda$.
- Quelle est l'impédance caractéristique du vide? $Z_0 = \mu_0 c = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$
- Qu'est ce qui se passe si au bout du câble on court-circuite? Le signal est inversé (déphasage de π).
- Quel est l'intérêt de la mesure de la fréquence de coupure? Elle permet d'illustrer les limites d'un milieu de propagation. Est-ce que les milieux de propagation sont toujours des passe-bas? Non, la ionosphère (plasma) est un passe-haut.

Modulation de fréquence

- La loi de Carson est-elle une loi exacte ou approchée? C'est une loi approchée, elle est exacte pour les signaux de faibles amplitudes.
- Intérêt de la loi de Carson? Il est nécessaire de séparer les fréquences des stations sinon les signaux vont se superposer.
- Pourquoi le spectre est-il discret alors que l'on varie continûment la fréquence? Faire un développement en série, on retrouve les fonctions de Bessel. On retrouve alors le fait que les pics ne sont pas équirépartis car les fonctions de Bessels s'annulent plusieurs fois.
- Justification des paramètres d'acquisition. Il faut respecter : Shannon, et ne pas avoir un pas de temps trop faible. Le nombre de bits étant fixé, si le pas de temps d'échantillonnage est trop faible, on observe des plateaux sur le signal.
- Justification et explication de χ_2 .
- Avantages et inconvénients de la modulation d'amplitude et de fréquence. Voir au dessus. En + : la modulation de fréquence est moins sensible au bruit car le bruit perturbe plus l'amplitude que la phase. Mais l'inconvénient principale est l'atténuation du signal (il faut plus d'antenne FM que AM).
- Pourquoi dans la démodulation de fréquence on met un AO suiveur?
- Décrire un montage qui permet de faire un OCT? Comparateur à hystérésis + comparateur (voir fascicule TP).
- Quel est le principe de la boucle à verouillage de phase en quelques mots?

Manip surprise

Effet Doppler : principe de la mesure d'une vitesse par effet Doppler.

Commentaires

- Ne pas parler d'un carré de "fréquence" 5MHz, mais de "période" 5MHz.
- Attention à ne pas tourner le dos quand on manipule.
- On peut projeter l'écran de l'oscilloscope avec une caméra.
- Il faut tout dire précisément sur les paramètres (on change la fréquence, l'amplitude, ...)
- Pour les temps de passage : il faut aller plus vite sur le câble coaxial. On n'est pas obligé de tout faire avec des incertitudes. Par exemple, ici faire la première mesure (la célérité) avec des incertitudes. Ensuite faire le reste du câble coaxial rapidement en précisant qu'on ne cherche pas la précision. Si on perd du temps sur une manip, il faut passer à autre chose (par exemple ici, quelques problèmes sur Carson qui on fait perdre quelques minutes, alors qu'il est plus intéressant de présenter la démodulation).
- Dans ce montage, absolument montrer une chaîne complète de démodulation (quitte à faire moins de trucs). Une idée serait de montrer la chaîne complète (le petit plus, montrer une démodulation d'un signal provenant d'un haut parler, radio, ...) puis ensuite de casser la chaîne et d'expliquer au fur et à mesure.
- On peut mettre un tableau récapitulatif en conclusion.
- Au lieu du câble coaxial pour la transmission, on peut utiliser une diode lumineuse et un récepteur.
- Sur latis pro, il vaut mieux ne pas remplir les paramètres et le faire un direct en justifiant ses choix.
- Il n'est pas nécessaire de présenter à la fois la démodulation d'amplitude et de fréquence. Il vaut mieux faire un choix entre les deux, et pouvoir mieux le développer.

5 Compléments/Questions des années précédentes

- Quand est-ce que la capacité linéique du câble coaxial doit-être prise en compte ? Comment contourner ? Quand on mesure des faible capacités, il faut utiliser des sondes passives. (???)
- Comment faire de l'AM sans multiplicateur ? Avec un composant non linéaire pour générer les fréquences sommes et éventuellement un filtre passe-bande autour de la porteuse. On utilise un "mixeur" à diode.
- Que voit-on en XY si en X on met v_i et en Y on met v_m en AM ? On voit un trapèze. En mesurant les côtés, on peut remonter au taux de modulation.
- Que se passe-t-il si on mesure en AM le spectre d'un signal modulé par un triangle ou un carré ? Les grandes harmoniques sont repliées (à l'origine des fréquences notamment, ce n'est pas un problème d'échantillonnage).
- Comment fonctionne un multiplicateur ? Deux méthodes. (i) Amplificateur $s = Ae_1$ dont le coefficient d'amplification $A = A(e_2)$ dépend de l'autre signal. C'est la multiplication de Gilbert. (ii) Faire le logarithme du signal avec un AO : R,-,diode,sortie et + à la terre. Sommer les logarithmes et repasser à l'exponentielle en inversant diode et résistance dans le circuit log.
- Caractéristiques et limites d'un multiplicateur analogique ? Les caractéristiques d'un multiplicateur analogique est donné par Duffait. Il donne l'erreur dû à la non linéarité et inférieur à 1%, la bande passante de l'ordre du MHz, impédance d'entrée de $10M\Omega$, le slew-rate de $20V/\mu s$.
- Inconvénient de AM par rapport à FM ? AM est plus bruité, rapport signal sur bruit 10 fois plus élevé. Elles sont aussi écoutées à des distances importantes ce qui induit une distorsion.
- Comment réaliser un OCT ? On par d'un oscillateur à relaxation : par exemple une boucle avec intégrateur + comparateur à hystérésis. Le comparateur à hystérésis non-inverseur renvoie une tension de sortie $v_{s,2} = \pm V_{sat}$. À saturation positive $v_{s,2} = +V_{sat}$, l'intégrateur va intégrer cette tension au cours du temps, sa tension de sortie décroît alors linéairement à la vitesse $-V_{sat}/(RC)$. Lorsque $v_{s,1} = v_{e,2}$ atteint le seuil de l'oscillateur à relaxation $-V_0 = -R_1 V_{sat}/R_2$, le comparateur bascule à saturation négative $v_{s,2} = -V_{sat}$. La tension en sortie de l'intégrateur est alors croissante à la vitesse $V_{sat}/(RC)$, jusqu'à atteindre le seuil $+V_0$. Il y a alors à nouveau

basculement, et le cycle recommence. Au final, en sortie du comparateur on a un signal créneau et en sortie de l'intégrateur on a un signal triangulaire de même période. On peut commander la période en tension en multipliant $v_{e,1}$ la tension intégrée par le signal modulant : on intègre alors plus ou moins vite.

- Comment démoduler par détection d'enveloppe ? On utilise un détecteur de crête, constitué d'une diode et d'un filtre RC parallèle. On doit choisir $1/f_i \ll \tau \ll 1/f_p$ pour accrocher les oscillations lentes de l'enveloppe sans suivre les oscillations rapides de la porteuse. On utilise des diodes signal : l'amplitude des crêtes est toujours supérieur à 0.7V. Pour s'affranchir de la tension de seuil de la diode, utiliser un montage avec AO : en sortie diode + rétroaction sur V_- + RC parallèle (en pratique marche bof à cause de la limitation en courant de l'AO). Limites de la détection d'enveloppe : il faut $m < 1$ et pas travailler à trop haute fréquence (<100 kHz) sinon les diodes déforment le signal.
- Autre application de la détection synchrone ? Réduire le rapport signal sur bruit (rapport des puissances du bruit et du signal utile), acquérir un signal de fréquence connue noyée dans le bruit.

Commentaires

Amélioration possible du montage : mettre un amplificateur non-inverseur entre la sortie du filtre et l'OCT pour que la plage utile soit +5V -5V.

Mettre un filtre passe-bas en sortie de la PLL (hors de la PLL) pour filtrer les HF du FSK.

Alternatives :

Pour l'AM, on peut illustrer le fait que la détection synchrone permet d'éliminer du bruit (Duffait p220) en ajoutant un signal bruit au signal modulé (montage sommateur AO) et en constatant que le bruit est éliminé par la détection synchrone.

6 Annexe : Introduction et enjeux

Télécommunication : parole, écriture, forme numérique.

Mise en forme ou codage de l'information : alphabet, modulation. Transport : les lignes électriques, les guides d'ondes ou la propagation dans l'atmosphère sous la forme d'onde hertziennne. Détection : décodage, démodulation.

Pour une onde électromagnétique : canal de transmission, encombrement spectral, largeur de canal ou largeur de bande, bruit, rapport signal sur bruit, taux d'erreur par bit (bit error rate).

Modulation des fréquences audibles

Si on veut transmettre un signal audio avec une onde électromagnétique de même fréquence (de 20 Hz à 20000 Hz), on rencontre deux problèmes. (i) **Dimension de l'antenne**. Il faudrait une antenne de l'ordre de la longueur d'onde ($\lambda/2$) de 1500 km à 1.5 km. (ii) **Encombrement** : impossible à la réception de distinguer deux signaux de la même plage de fréquence (comme deux personnes qui parlent en même temps dans une pièce).

On voit ainsi qu'il est adapté de changer de gamme de fréquences : on travaille au voisinage de la fréquence de la porteuse qui est plus élevée. Cela améliore (i) la taille des antennes. Pour $f = 100\text{MHz}$, $\lambda = 3\text{m}$. (ii) l'encombrement est réduit. Une porteuse de 1MHz modulée par un signal audio n'encombre que la gamme 1.00002-1.02000MHz. (iii) Enfin la variation relative de fréquence (moins de 1%) est faible : une seule antenne peut être adaptée à tous les canaux.

Quantités à moduler

Une porteuse s'écrit $s_p(t) = A \cos(\omega t + \phi)$. On peut moduler (i) l'amplitude A (radio AM, faisceau laser dans fibre optique) (ii) la fréquence $f = \omega/2\pi$ (radio FM, télévision satellite) (iii) la phase ϕ (LAN, bluetooth, RFID). On peut les moduler de façon analogique ou numérique.

Multiplexage

Multiplexage fréquentiel : on attribue des canaux de fréquence **i.e.** on répartit le spectre électromagnétique. Un canal contient la majorité de la puissance de la porteuse modulée.

Multiplexage temporel : sur un même canal, avec un commutateur, on répartit le temps d'utilisation du canal, ce qui nécessite une synchronisation en phase. Exemple : plusieurs utilisateurs sur un câble de téléphonie fixe.

La norme GSM de téléphonie mobile utilise à la fois le multiplexage fréquentiel et le multiplexage temporel.

Récepteur super-hétérodyne

Dans les récepteurs, il n'y a pas un filtre passe-bande par canal ou un filtre passe-bande accordable en fréquence avec de bonnes performances. A la place, on utilise la technique super-hétérodyne (abréviation de "supersonic-hétérodyne", changement de fréquence par battement) qui consiste à multiplier le signal f_p à décoder avec une fréquence intermédiaire f_i produite par un oscillateur dans le récepteur. En accordant f_i , pour que $|f_p - f_i|$ tombe dans la bande passante d'un filtre passe bande.

L'oscillateur local est issu d'une chaîne multiplicatrice, d'un synthétiseur (remplace progressivement les boucles à verrouillage de phase), ou d'un simple oscillateur à quartz. Pour la multiplication, on utilise un multiplieur pour les basses fréquences, un mélangeur à diodes pour les hautes fréquences. On utilise des filtres du commerce à base de céramique. **ODG:** radio FM $f_i \sim 455\text{kHz}$, radio AM $f_i \sim 10.7\text{Mhz}$, télévision en Europe $f_i \sim 38.9\text{MHz}$.

Exemples et ordres de grandeur

Modulation d'amplitude. **ODG:** 100 kHz. longue portée, facilité de modulation/démodulation. France Inter à 162kHz avec une antenne (deux pylônes) de 350m.

Modulation de fréquence : **ODG:** 100 MHz. meilleure bande passante donc meilleure qualité sonore, moins sensible au bruit, portée plus courte que AM : 50 km. Il faut plusieurs stations qui émettent à des fréquences différentes pour éviter de capter des signaux de plusieurs stations qui sont retardés ou qui interfèrent. Vu la plus courte longueur d'onde, diffraction et réflexions en milieu urbain favorise la transmission. **ODG:** Canaux FM : télévision numérique terrestre 500-800 MHz, téléphonie mobile, Wifi, fours micro-onde en GHz $\rightarrow \lambda \sim 1\text{cm}$, les antennes tiennent dans des téléphones portables, télévision satellite 10 GHz, fibre optique 100 THz (10^{14}Hz).

Autres ordres de grandeur. Fond diffus cosmologique 100 GHz.