

## MODULATION ET DEMODULATION

### 1. Objectifs

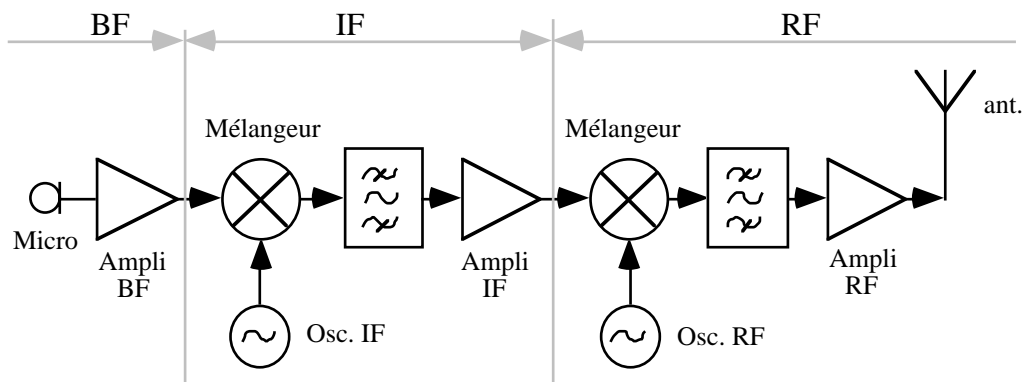
La modulation et la démodulation interviennent dans toutes sortes de transmission d'informations analogiques et numériques. Les différents procédés présentent des largeurs de bande et des rapports signal sur bruit spécifiques.

Le signal original contenant l'information n'est quasiment jamais transmis tel quel (en bande de base) dans le canal de transmission. Il peut subir plusieurs modulations successives. Par exemple, pour la radiodiffusion, le signal audio BF (basse fréquence) module une première fois une porteuse IF (Intermediate Frequency) à fréquence fixe. Ce signal subit ensuite une translation en fréquence pour l'amener dans la bande de fréquence attribuée à son canal de transmission. Les canaux de transmission, et donc les fréquences d'émission, se situent aux fréquences appelées RF (Radio Frequency). Cette plage de fréquence est très large puisqu'elle s'étend d'environ 100 kHz pour la radiodiffusion à 30 GHz pour les communications par satellite.

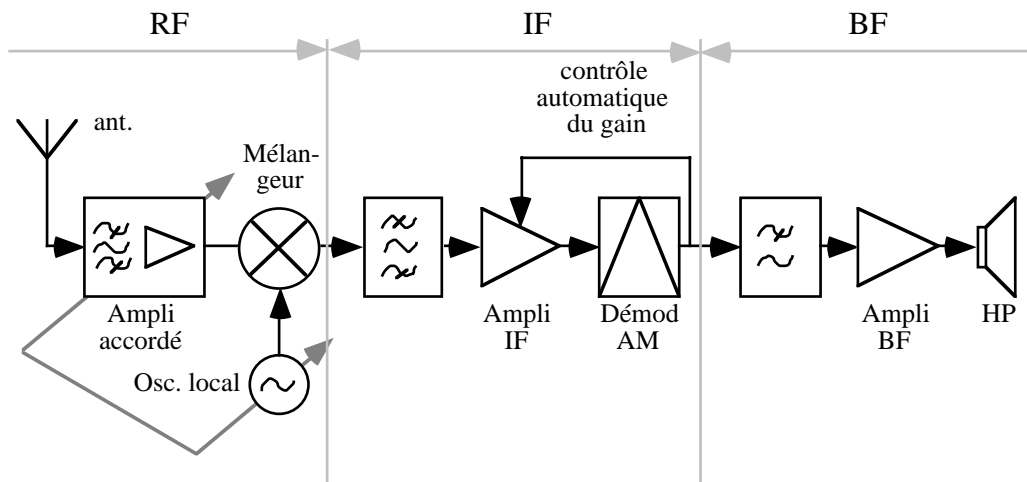
A la réception, on opère à nouveau une translation aux fréquences IF, avant d'effectuer la démodulation pour retrouver le signal primaire en bande de base.

Le principe de la translation en fréquence se nomme l'hétérodynage. Elle s'effectue par multiplication, à l'aide d'un mélangeur équilibré (balanced mixer), du signal à traduire par un signal sinusoïdal de fréquence égale au décalage fréquentiel désiré. Cette opération est suivie d'un filtrage pour conserver la seule composante spectrale utile.

Les figures ci-dessous représentent le principe d'un émetteur et d'un récepteur AM utilisant l'hétérodynage. Dans un émetteur ou un récepteur, tous les canaux de même modulation sont traités à la même fréquence intermédiaire fixe et normalisée (par exemple: 455 kHz pour la radiodiffusion AM ou 10.7 MHz pour la FM), alors que la plage de translation aux fréquences RF est spécifique à chaque canal.



Principe d'un émetteur AM avec hétérodynage

Master 1<sup>er</sup> semestre

Principe d'un récepteur AM avec hétérodynage

Dans le cadre de ces travaux pratiques, seront étudiées les différentes modulations et démodulations intervenant aux fréquences intermédiaires IF dans les transmissions de radiodiffusion.

- Modulation et démodulation SSB (Single Side Band)
- Modulation et démodulation AM (Amplitude Modulation)
- Modulation et démodulation FM (Frequency Modulation)

## 2. Dispositifs à étudier

- Un type d'oscillateur local LC
- La modulation SSB par modulation AM-P et filtrage
- La démodulation SSB par modulation inverse
- La modulation AM+P réalisée avec un mélangeur équilibré
- La démodulation AM à détection d'enveloppe
- La démodulation AM synchrone
- La modulation FM à varicap
- La démodulation FM à boucle à verrouillage de phase (PLL)
- Le démodulateur FM à détecteur à quadrature

Notations:

$U_1$  : signal modulant ou signal primaire

$U_p$  : porteuse non-modulée

$U_2$  : signal modulé ou signal secondaire

$U_3$  : signal primaire reconstitué après démodulation

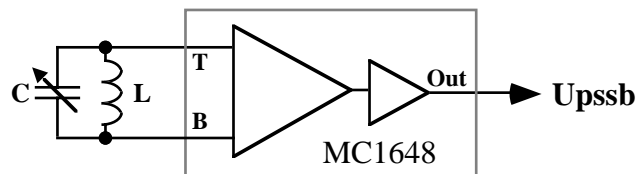
### 3. Bibliographie

- [1] Traité d'électricité Vol.XVIII: système de télécommunications, Prof. P.-G. Fontoillet, PPR.
- [2] Circuits et systèmes électroniques, Prof. Michel Declercq, EPFL.
- [3] Rappels théoriques en annexe à cette donnée.
- [4] Notices des composants en annexe.

### 4. L'oscillateur

Cet élément est essentiel pour toutes les différentes modulations faisant l'objet de ce laboratoire, c'est pourquoi nous y consacrons une étude particulière. Il est composé principalement d'un amplificateur et d'un circuit oscillant LC.

#### 4.1 Schéma de principe



#### 4.2 Données

$$C \approx 370 \text{ pF} \pm 40 \text{ pF}$$

$$f_{pssb} = 455 \text{ kHz}$$

#### 4.3 Prévisions théoriques

- 4.3.1 Ce circuit oscille à la fréquence de résonance de la cellule LC. Calculer la valeur de l'inductance L pour obtenir la fréquence  $f_{pssb}$  désirée.

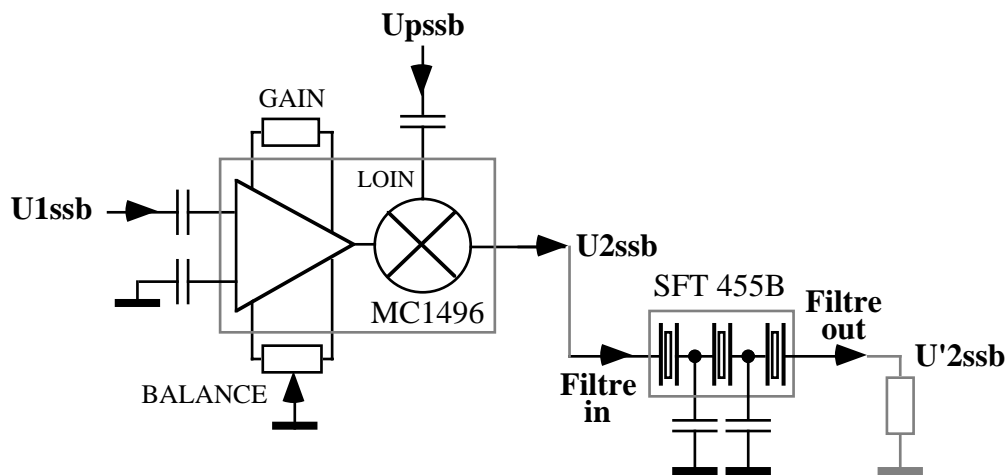
#### 4.4 Mesures

- 4.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope 10x. Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à  $1 \text{ M}\Omega$ , ou une sonde active branchée sur une entrée à  $50 \Omega$ .
- 4.4.2 Placer sur le circuit l'inductance calculée sous 4.3.1. Observer la forme et le spectre du signal de sortie  $U_{pssb}$  de cet oscillateur. Vérifier la plage d'ajustage de la fréquence autour de la valeur désirée.

## 5. La modulation SSB par modulation AM-P et filtrage

Comme expliqué dans [1] et [3], la modulation SSB s'effectue par la multiplication de la porteuse et du signal primaire. La multiplication se fait dans les quatre quadrants par un mélangeur équilibré selon le principe présenté dans [2]. La porteuse n'apparaît pas à la sortie. On réalise ainsi une modulation d'amplitude à porteuse supprimée (AM-P) comportant donc deux bandes de part et d'autre de  $f_{pSSB}$ . A l'aide d'un filtre passe-bande, on élimine l'une des deux bandes latérales (dans notre cas, la bande inférieure). On obtient ainsi une modulation à bande latérale unique.

### 5.1 Description du circuit



### 5.2 Données

$f_{1ssb} = 300 \text{ Hz à } 3400 \text{ Hz}$

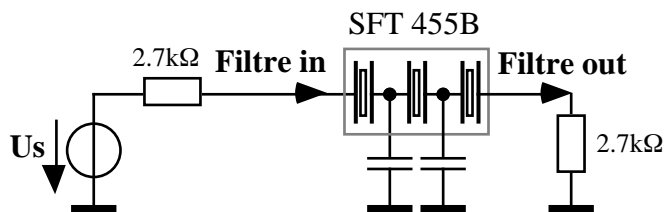
$f_{pssb} = 455 \text{ kHz}$

### 5.3 Prévisions théoriques

- 5.3.1 Enumérer les avantages et inconvénients de la modulation SSB par rapport à d'autres modulations.
- 5.3.2 A partir du schéma ci-dessus et du schéma équivalent du MC1496 dans [4], expliquer mathématiquement la fonction réalisée par ce circuit (cf [2], chap. PLL).
- 5.3.3 Esquisser les tensions  $U_{1ssb}$ ,  $U_{pssb}$  et  $U_{2ssb}$ .
- 5.3.4 Esquisser le spectre de ces signaux ainsi que de celui du signal résultant  $U'_{2ssb}$  à la sortie du filtre.
- 5.3.5 Le filtre est un modèle à trois résonateurs céramiques. Expliquer le choix de cet élément.
- 5.3.6 Esquisser  $U_{2ssb}$  lorsque le mélangeur n'est pas correctement équilibré. Comment cela se traduit-il dans le spectre de  $U_{2ssb}$  ?

Master 1<sup>er</sup> semestre**5.4 Mesures**

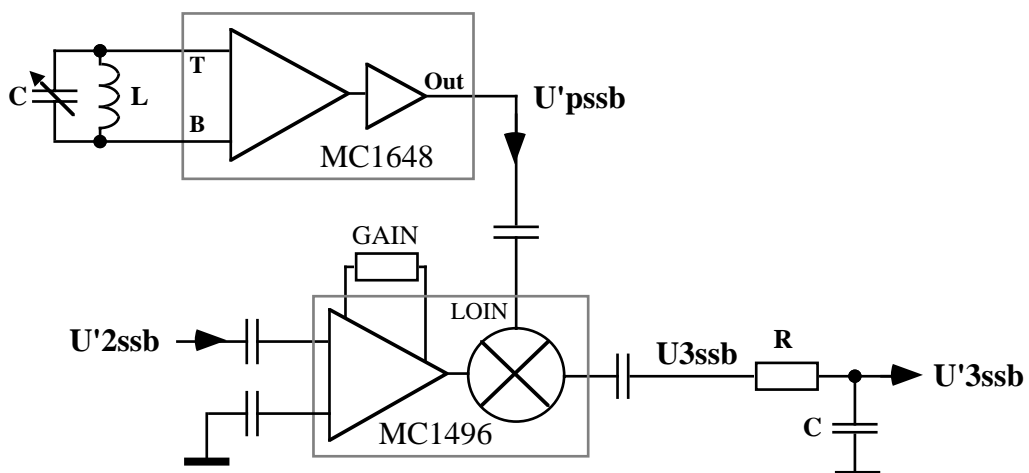
- 5.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope 10x . Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à 1 M $\Omega$ , ou une sonde active branchée sur une entrée à 50  $\Omega$ .
- 5.4.2 Ne pas encore connecter U<sub>2ssb</sub> à Filtrein. Observer à l'oscilloscope et à l'analyseur de spectre le signal U<sub>2ssb</sub> et ajuster le potentiomètre BALANCE MOD. SSB pour atténuer au mieux la porteuse.
- 5.4.3 Mesurer en détail à l'analyseur de réseaux la réponse en fréquence du filtre passe-bande. Les caractéristiques des filtres céramiques sont sensibles aux impédances de source et de charge. Veiller à ce que le dispositif de mesure présente des résistances de source et de charge d'environ 3 k $\Omega$ .



- 5.4.4 Connecter U<sub>2ssb</sub> à Filtrein, et Filtreout à U'<sub>2ssb</sub>, les étages avant et après le filtre assurent ainsi des impédances de source et de charge correctes. Avec un signal U<sub>1ssb</sub> à la fréquence minimale (300Hz), observer le spectre du signal U'<sub>2ssb</sub> et ajuster la fréquence de la porteuse pour atténuer au mieux la bande latérale inférieure sans atténuer la bande supérieure de plus de 3 dB. Commenter.

**6. La démodulation SSB par modulation inverse**

Cette technique de démodulation est expliquée dans le rappel théorique [3]. Le démodulateur est donc composé d'un oscillateur local à la même fréquence que la porteuse d'émission, d'un multiplieur et d'un filtre passe-bas.

**6.1 Description du circuit**

Master 1<sup>er</sup> semestre**6.2 Données**

$$f'_{\text{pssb}} = f_{\text{pssb}}$$

**6.3 Prévisions théoriques**  $C = 22 \text{ nF}$  ,  $R = 10 \text{ k}\Omega$ 

- 6.3.1 Dimensionner le filtre passif passe-bas RC à la sortie du multiplicateur, sachant que la résistance de sortie de celui-ci est de  $2.7 \text{ k}\Omega$ .
- 6.3.2 Esquisser le spectre des signaux à la sortie du multiplicateur et après filtrage.
- 6.3.3 Exprimer la relation liant les rapports signal sur bruit à l'entrée et à la sortie du démodulateur SSB.
- 6.3.4 Quel sera l'effet d'un écart de fréquence entre la porteuse et l'oscillateur local ?

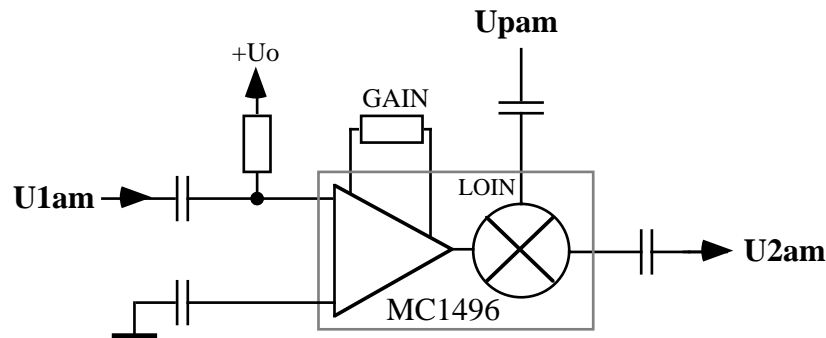
**6.4 Mesures**

- 6.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope  $10\times$  . Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à  $1 \text{ M}\Omega$ , ou une sonde active branchée sur une entrée à  $50 \Omega$ .
- 6.4.2 Ajuster  $f'_{\text{pssb}}$  au plus près possible de la valeur réelle  $f_{\text{pssb}}$ .
- 6.4.3 Observer à l'oscilloscope et à l'analyseur de spectre le signal  $U'_{3\text{ssb}}$  pour un signal primaire à la fréquence minimum  $300 \text{ Hz}$  et à  $1 \text{ kHz}$ . Discuter les éventuelles distorsions.
- 6.4.4 Sélectionner le micro en entrée et juger de la qualité d'une transmission vocale. Quel est l'effet d'un écart de fréquence entre la porteuse et l'oscillateur local ?

## 7. Modulation d'amplitude AM

La modulation d'amplitude AM requiert également une multiplication comme nous l'avons signalé dans le rappel théorique [3]. Nous allons réutiliser le même mélangeur que pour la SSB. Une composante à la fréquence porteuse est obtenue en déséquilibrant le mélangeur, ce qui équivaut à ajouter une composante continue au signal modulant.

### 7.1 Description du circuit



L'oscillateur générant la porteuse  $U_{pam}$  est identique à celui utilisé pour la modulation SSB. Sa fréquence n'est pas ajustable, car elle n'est pas critique dans cette expérience.

### 7.2 Données

$$f_{1am} = 300 \text{ Hz à } 3400 \text{ Hz}$$

$$f_{pam} = 455 \text{ kHz}$$

### 7.3 Prévisions théoriques

7.3.1 A partir du schéma ci-dessus et du schéma équivalent du MC1496 dans [4], expliquer mathématiquement la fonction réalisée par ce circuit (cf [2], chap. PLL).

7.3.2 Esquisser qualitativement les tensions  $U_{1am}$ ,  $U_{pam}$  et  $U_{2am}$ .

7.3.3 Esquisser les spectres théoriques de ces signaux.

### 7.4 Mesures

7.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope 10x. Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à  $1 \text{ M}\Omega$ , ou une sonde active branchée sur une entrée à  $50 \Omega$ .

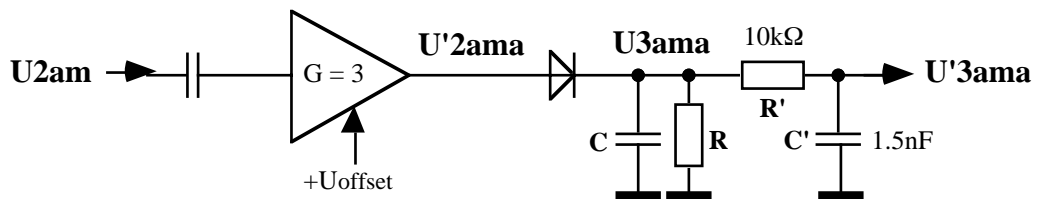
7.4.2 Observer à l'oscilloscope et à l'analyseur de spectre les signaux  $U_{1am}$ ,  $U_{pam}$  et  $U_{2am}$ .

7.4.3 Mesurer le taux de modulation  $m$  de ce modulateur.

## 8 ~~La démodulation d'amplitude par détection d'enveloppe (A)~~

Ce démodulateur, caractérisé par son extrême simplicité, est composée d'un redresseur détecteur de crête et d'un filtre passe-bas de lissage. Pour que ce système fonctionne, le signal d'entrée doit avoir une amplitude suffisamment élevée sous une impédance faible, d'où la présence d'un amplificateur avant le détecteur de crête.

### 8.1 Description du circuit



L'amplificateur est polarisé de façon à avoir un offset de +9 V en sortie.

### 8.2 Données

$$U'_{2ama} \approx 9 \text{ VDC} + 4 \text{ Vc-c} \quad f_{pama} = 455 \text{ kHz}$$

### 8.3 Prévisions théoriques

- 8.3.1 Analyser le fonctionnement de ce montage. Esquisser les signaux  $U'_{2ama}$  et  $U_{3ama}$ . Expliquer l'avantage d'avoir à l'entrée du détecteur de crête, une composante continue beaucoup plus grande que la porteuse modulée.
- 8.3.2 Déterminer les valeurs des éléments  $R$  et  $C$  pour obtenir moins de 5% d'oscillations résiduelles sur la détection d'enveloppe.
- 8.3.3 Quelle est l'utilité du filtre formé de  $R'$  et  $C'$  ?
- 8.3.4 Ce type de détecteur fonctionne pour une modulation AM avec un taux de modulation  $m < 1$ . Qu'obtient-on à la démodulation si  $m > 1$  ?
- 8.3.4 Exprimer la relation liant les rapports signal sur bruit avant et après démodulation.

### 8.4 Mesures

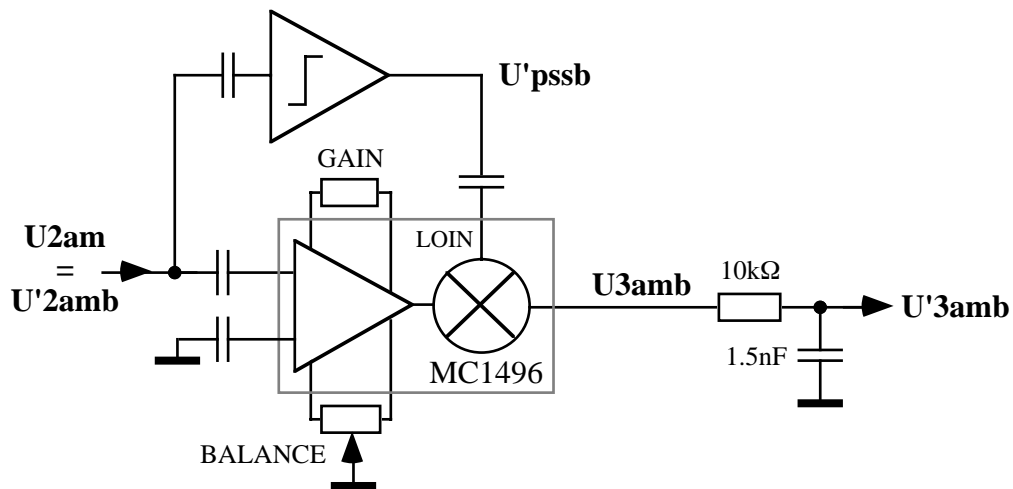
- 8.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope 10x. Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à  $1 \text{ M}\Omega$ , ou une sonde active branchée sur une entrée à  $50 \Omega$ .
- 8.4.2 Observer la forme et le spectre des signaux  $U_{2am}$ ,  $U'_{2ama}$ ,  $U_{3ama}$  et  $U'_{3ama}$ .
- 8.4.2 Mesurer le taux d'oscillations résiduelles sur les tensions  $U_{3ama}$  et  $U'_{3ama}$ .
- 8.4.3 Observer l'effet d'une surmodulation ( $m > 1$ ).
- 8.4.4 En utilisant le micro en entrée, juger de la qualité d'une transmission vocale.



## 9. La démodulation d'amplitude synchrone (B)

Le signal à démoduler est tout d'abord amplifié et limité pour reconstituer une porteuse secondaire non modulée  $U'_{pamb}$  en phase avec la porteuse modulée. En multipliant, dans un mélangeur équilibré, le signal modulé avec cette porteuse synchrone, on transpose à nouveau le signal primaire en bande de base.

### 9.1 Description du circuit



### 9.2 Données

$$U'_{2amb} \approx 1.3 \text{ Vc-c}$$

$$f_{pamb} = 455 \text{ kHz}$$

$$U'_{pamb} \approx 1.4 \text{ Vc-c}$$

### 9.3 Prévisions théoriques

9.3.1 En supposant que la porteuse reconstituée est déphasée d'environ 30 degrés par rapport à la porteuse modulée, esquisser qualitativement les tensions  $U'_{2amb}$ ,  $U'_{pamb}$ ,  $U_{3amb}$  et  $U'_{3amb}$ .

9.3.2 Quelle est la cause du déphasage entre la porteuse reconstituée et la porteuse modulée ? Etablir la relation entre l'amplitude de  $U'_{3amb}$  et ce déphasage ?

### 9.4 Mesures

9.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope 10x. Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à 1 MΩ, ou une sonde active branchée sur une entrée à 50 Ω.

9.4.2 Observer la forme et le spectre des signaux  $U_{1am}$ ,  $U_{2am}$ ,  $U_{3amb}$  et  $U'_{3amb}$ .

9.4.3 Observer l'effet d'une surmodulation ( $m > 1$ ). Proposer une solution pour démoduler un signal AM+P avec un indice de modulation supérieur à 1.

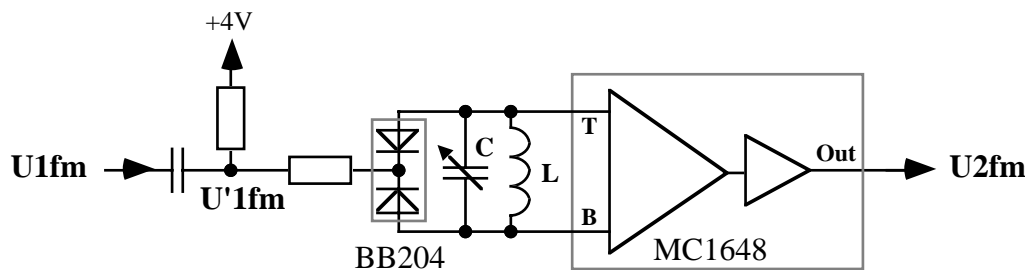
9.4.4 En utilisant le micro en entrée, juger de la qualité d'une transmission vocale.

9.4.5 Comparer cette méthode de démodulation avec la détection d'enveloppe.

## 10. La modulation de fréquence

La modulation de fréquence est réalisée en commandant directement la fréquence de l'oscillateur générant la porteuse avec le signal primaire. Dans le cas d'un oscillateur LC, ceci est obtenu à l'aide d'une diode VARICAP placée dans le circuit résonnant. Une telle diode a une capacité de jonction fonction de la tension inverse appliquée. Si celle-ci est fonction du signal primaire, l'élément capacitif du circuit résonnant et donc la fréquence d'oscillation, le seront également. Dans une plage de fréquence limitée la relation entre la variation fréquence et la tension de modulation peut être considérée comme linéaire.

### 10.1 Description du circuit



### 10.2 Données

$$L = 1 \mu\text{H}$$

$$f_{\text{pfm}} = 10.7 \text{ MHz}$$

$$f_{1\text{fm}} = 50 \text{ Hz à } 15 \text{ kHz}$$

$$\Delta f_{\text{pfm}} = \pm 75 \text{ kHz}$$

### 10.3 Prévisions théoriques

- 10.3.1 Calculer l'indice de modulation minimum et la largeur de bande  $B_{2\text{fm}}$  maximum occupée par le signal  $U_{2\text{fm}}$ .
- 10.3.2 On impose une tension inverse de repos de 4 V à la VARICAP BB204. En utilisant les caractéristiques de ce composant, calculer l'amplitude maximale du signal modulant  $U_{1\text{fm}}$  pour obtenir la déviation de fréquence spécifiée et la capacité  $C$  en parallèle avec la VARICAP.

### 10.4 Mesures

- 10.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope 10x. Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à  $1 \text{ M}\Omega$ , ou une sonde active branchée sur une entrée à  $50 \Omega$ .
- 10.4.2 Sans modulation ajuster  $C$  pour obtenir la fréquence porteuse désirée.
- 10.4.3 Appliquer le signal modulant de 800 Hz et observer le spectre du signal  $U_{2\text{fm}}$ . Régler l'amplitude du signal modulant pour obtenir la déviation de fréquence  $\Delta f_{\text{pfm}}$  prévue donc la largeur de bande  $B_{2\text{fm}}$  correspondante.

Master 1<sup>er</sup> semestre

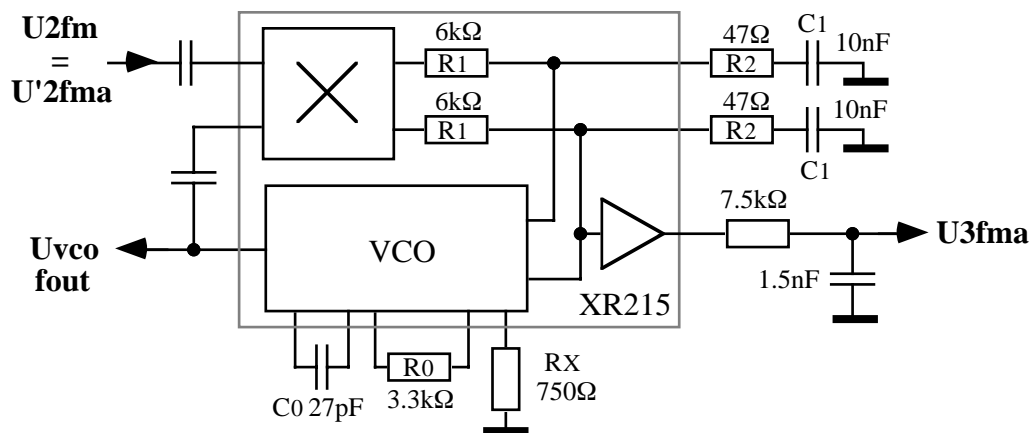
- 10.4.4 On constate que la fréquence centrale se décale lorsque l'amplitude de la modulation augmente. Expliquer ce phénomène. Retoucher C pour centrer le spectre de  $U_{2fm}$  sur 10.7 MHz.
- 10.4.5 Faire varier la fréquence du signal modulant et observer son influence sur le spectre de  $U_{2fm}$ .
- 10.4.6 Ajuster la fréquence du signal modulant à 15 kHz et comparer le spectre de  $U_{2fm}$  avec la prévision théorique donnée en annexe (échelle verticale linéaire).

## 11. Le démodulation de fréquence par PLL

Les boucles à verrouillage de phase s'appliquent particulièrement bien à la démodulation de fréquence. En effet lorsque la boucle est verrouillée, les fréquences d'entrée et celle du VCO sont égales et la tension de commande du VCO est proportionnelle à cette fréquence.

L'avantage de ces systèmes est leur facilité d'intégration, car ils ne nécessitent aucune inductance.

### 11.1 Description du circuit



### 11.2 Données

$$f_{pfm} = 10.7 \text{ MHz}$$

$$\Delta f_{pfm} = \pm 75 \text{ kHz}$$

### 11.3 Prévisions théoriques

- 11.3.1 En s'inspirant du schéma ci-dessus et de la notice du circuit XR215, déterminer les caractéristiques de la PLL : fréquence libre  $f_0$  d'oscillation du VCO, gain  $K_0$  du VCO, gain  $K_d$  du comparateur de phase, fréquence de coupure du filtre passe-bas de boucle, bande passante et amortissement, domaine de capture (capture range)  $\Delta\omega_C$  et domaine de verrouillage (lock range)  $\Delta\omega_L$ .
- 11.3.2 Exprimer la relation liant les rapports signal sur bruit avant et après démodulation.

## 11.4 Mesures

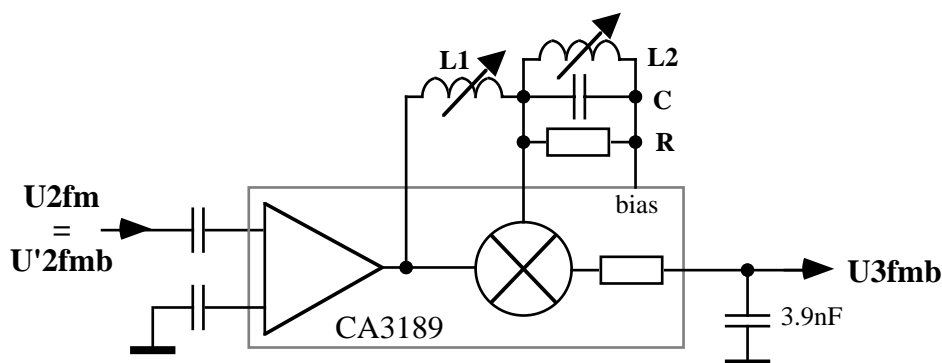
- 11.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope 10x . Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à  $1\text{ M}\Omega$ , ou une sonde active branchée sur une entrée à  $50\ \Omega$ .
- 11.4.2 Mesurer la fréquence libre d'oscillation du VCO pour un signal nul à l'entrée.
- 11.4.3 Appliquer le signal  $U'_{2fm}$  à l'entrée de la PLL et mesurer la fréquence du VCO. Vérifier que la PLL est bien calée sur la fréquence reçue.
- 11.4.4 Observer à l'oscilloscope et à l'analyseur de spectre le signal démodulé. Commenter.
- 11.4.6 Evaluer la qualité de la démodulation par audition du signal de sortie  $U_{3fma}$ .

## 12. La démodulation FM par détecteur à quadrature (B)

Le procédé de démodulation FM le plus répandu est le détecteur à quadrature, car il ne peut pas perdre complètement le signal reçu au contraire de la PLL lorsqu'elle décroche.

Bon nombre de fabricants proposent des démodulateurs de fréquence intégrés. Généralement ils sont composés d'amplificateurs-limiteurs, d'un contrôle automatique du gain (AGC) de l'amplificateur RF, d'une détection de niveau de réception et d'un contrôle du signal audio de sortie (Mute). En revanche le réseau LC de déphasage se trouve à l'extérieur du circuit.

### 12.1 Description du circuit



### 12.2 Données

$$f_{\text{pfm}} = 10.7\text{MHz}$$

$$\Delta f_{\text{pfm}} = \pm 75\text{ kHz}$$

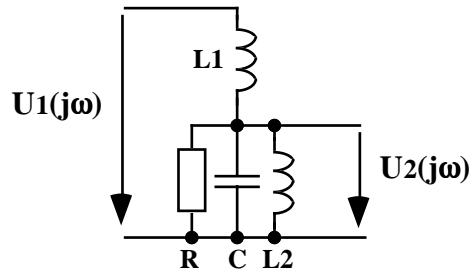
$$L_1 = 10\ \mu\text{H}$$

$$L_2 = 2.2\ \mu\text{H}$$

$$R = 3.9\text{ k}\Omega$$

## 12.3 Prévisions théoriques

12.3.1 Le réseau de déphasage LC a la structure suivante:



Calculer la fonction de transfert :  $H(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)}$

- 12.3.2 Esquisser ou simuler son atténuation et son déphasage autour de sa bande passante et leurs valeurs à la fréquence centrale du filtre LC.
- 12.3.3 Calculer la valeur de la capacité pour que la fréquence de résonance de ce filtre passe-bande soit centrée sur  $f_{pm}$ .
- 12.3.4 En considérant les composants de ce réseau comme des éléments idéaux, calculer son facteur de qualité  $Q$ . Quels sont les critères de choix du facteur de qualité ?

## 12.4 Mesures

- 12.4.1 Pour éviter de perturber le montage par les capacités importantes des câbles coaxiaux, utiliser systématiquement une sonde d'oscilloscope 10x. Pour l'analyseur de spectre, utiliser une sonde passive connectée à une entrée à  $1\text{ M}\Omega$ , ou une sonde active branchée sur une entrée à  $50\ \Omega$ .
- 12.4.2 Placer la capacité calculée sous 12.3.2 sur le circuit. Ajuster au besoin l'inductance  $L_2$  afin d'obtenir un signal démodulé présentant le moins de distorsions possibles.
- 12.4.2 Observer à l'oscilloscope et à l'analyseur de spectre la tension de sortie du démodulateur  $U_{3fmb}$ . Commenter les éventuelles distorsions.
- 12.4.3 Quelle est l'avantage d'un démodulateur jouant sur la phase du signal.
- 12.4.4 Faire varier la fréquence centrale de la porteuse FM. Quelles déformations audibles observe-t-on et comparer ce détecteur à quadrature avec la démodulation par PLL.

## 13. Conclusion

- 13.1 Etablir une récapitulation comparative des différentes modulations étudiées dans ce travail.