

Chapitre 2 : Les mélangeurs

1. Le mélangeur idéal

1.1. Définition

Un mélangeur est un circuit électronique qui génère en sortie un signal proportionnel au produit des signaux présents sur ses deux entrées.

Pour un mélangeur idéal :

$$s(t) = K e_1(t) e_2(t)$$

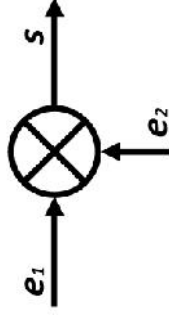


Figure 1 : Symbole d'un mélangeur.

Un mélangeur est très présent dans les circuits de télécommunication, on l'utilise dans les circuits changeur de fréquence, modulateurs et démodulateurs, détecteurs de phase, doubleurs de fréquence...

1.2. Spectre de fréquence d'un mélangeur

Soit un mélangeur idéal avec le signal e_1 sur la première entrée, et le signal e_2 sur la deuxième :

$$\begin{aligned} e_1(t) &= E_1 \cos(\omega_1 t) & e_2(t) &= E_2 \cos(\omega_2 t) \\ s(t) &= K e_1(t) e_2(t) = e_1(t) = K E_1 E_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \\ s(t) &= \frac{K E_1 E_2}{2} [\cos(\omega_1 + \omega_2)t + \cos(\omega_1 - \omega_2)t] \end{aligned}$$

On obtient à la sortie deux signaux aux fréquences : $f_1 - f_2$ et $f_1 + f_2$, on les appelle fréquences images.

Le spectre de fréquence de $S(t)$ est montré par la figure 2. A l'entrée on a deux signaux de fréquences f_1 et f_2 . À la sortie on récupère deux composantes $f_1 - f_2$ et $f_1 + f_2$.

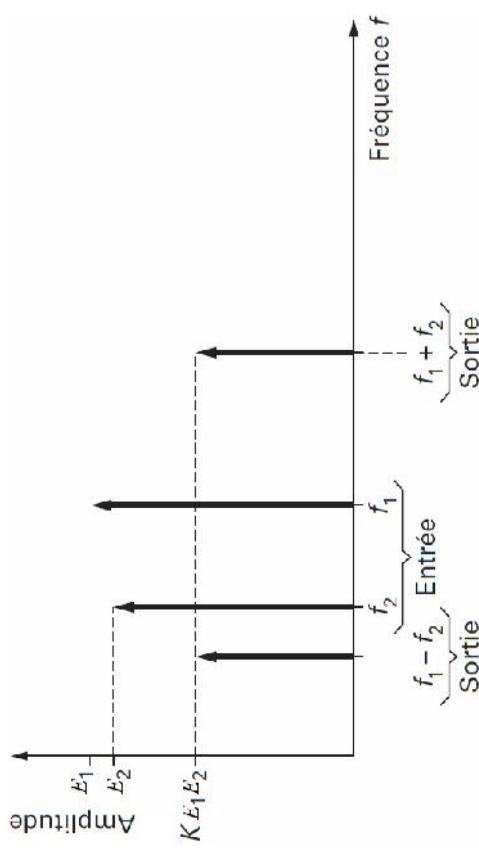


Figure 2 : Spectre de fréquence pour un mélangeur idéal.

1.3. Notation des accès d'un mélangeur

Souvent, l'un des accès de mélangeur est connecté à un oscillateur local (car il est interne pour le circuit). On note cet accès « OL ».

Un deuxième accès constitue l'unique entrée de mélangeur, il reçoit le signal HF à traiter. Cet accès est noté « RF ».

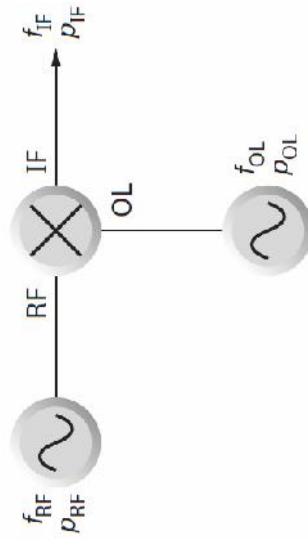


Figure 3 : Les trois accès d'un mélangeur.

Le troisième accès constitue alors la sortie du mélangeur. Ici on récupère les deux fréquences images, mais souvent on a besoin que d'une des deux fréquences. Cette fréquence est appelée fréquence intermédiaire. On note cet accès par « IF ».

1.4. Le gain de conversion

Il est défini comme le rapport de puissance de l'une des deux composantes résultantes du mélange, à la puissance du signal présent sur le port RF :

$$G_c = \frac{P_{IF}}{P_{RF}}$$

En décibels : $G_c(dB) = 10 \cdot \log(G_c) = (P_{IF})_{dBm} - (P_{RF})_{dBm}$

2. Le mélangeur réel

Soit un composant non linéaire avec la fonction de transfert suivante :

$$i(t) = a_2 v^2(t)$$

$$\text{Soit : } e_1(t) = E_1 \cos(\omega_1 t) \quad e_2(t) = E_2 \cos(\omega_2 t)$$

$$\text{Si : } v(t) = e_1(t) + e_2(t) \quad \text{Alors : } i(t) = a_2 [E_1 \cos(\omega_1 t) + E_2 \cos(\omega_2 t)]^2$$

$$i(t) = a_2 E_1^2 \cos^2(\omega_1 t) + a_2 E_2^2 \cos^2(\omega_2 t) + 2a_2 E_1 E_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t)$$

$$i(t) = \frac{a_2}{2} (E_1^2 + E_2^2) + \frac{a_2 E_1^2}{2} \cos(2\omega_1 t) + \frac{a_2 E_2^2}{2} \cos(2\omega_2 t) + a_2 E_1 E_2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t + a_2 E_1 E_2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t$$

Nous avons une composante continue et les deux harmoniques $2f_1$ et $2f_2$, en plus des deux fréquences images $f_1 - f_2$ et $f_1 + f_2$. Il est possible donc de récupérer ces deux dernières fréquences par filtrage.

Dans la pratique, les fonctions de transfert peuvent être plus complexes :

$$i(t) = a_0 + a_1 v(t) + a_2 v^2(t) + a_3 v^3(t) + \dots + a_n v^n(t)$$

On obtient plusieurs composantes fréquentielles :

- $f_1, 2f_1, 3f_1, \dots, nf_1$.
- $f_2, 2f_2, 3f_2, \dots, nf_2$.
- Les combinaisons de produits d'intermodulation : $f_1 + f_2, \dots, nf_1 \pm mf_2, m$ et n sont des entiers (1, 2, 3, ...).

Donc pour réaliser un mélangeur, il est possible d'utiliser un composant non linéaire (diode, transistor, etc.) suivi d'un filtre passe-bande.

3. Réalisation des mélangeurs

3.1. Mélangeur à diode

Le circuit ci-dessous est un mélangeur à diode. Nous avons deux signaux e_1 , e_2 des chacune des entrées.

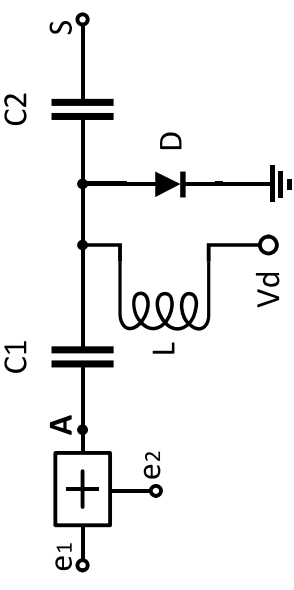


Figure 4 : Un mélangeur à diode.

Au point A, la sortie du sommateur on obtient : $e_1 + e_2$. La diode est polarisée par l'alimentation continue V_d . C_1 et C_2 sont des capacités de liaison.

La caractéristique d'une diode pour les faibles valeurs de la tension de polarisation n'est pas linéaire. L'expression caractéristique de la diode est donnée par :

$$I_D(V_D) = I_0(e^{\alpha V_D} - 1)$$

En utilisant une approximation polynomiale, il est possible d'écrire I_D sous la forme :

$$I_D(V_D) = I_0 + I_0 \alpha V_D + \frac{1}{2} I_0 \alpha^2 V_D^2 + \dots$$

L'ordre de l'expression dépend des niveaux de signal de signal (e_1 et e_2). Pour des signaux suffisamment faibles, il est possible de limiter l'ordre de la non-linéarité.

En prenant que les trois premiers termes, la tension à la sortie s'écrit :

$$I_D = a_0 + a_1 V_D + a_2 V_D^2 = a_0 + a_1(e_1 + e_2) + a_2(e_1 + e_2)^2$$

$$I_D = a_0 + a_1 e_1 + a_1 e_2 + a_2 e_1^2 + a_2 e_2^2 + 2a_2 e_1 e_2$$

On filtre tous les termes à part le produit des deux signaux d'entrée.

3.2. Mélangeur à transistors

Pour un transistor à effet de champ, le courant drain I_D et la tension grille source sont liés par une relation de la forme : $I_D = a_0 + a_1 V_{GS} + a_2 V_{GS}^2$

Pour le circuit de la figure 5 : $V_{GS} = e1 - e2$

$$D'où : I_D = a_0 + a_1(e1 - e2) + a_2(e1 - e2)^2$$

$$D'où : I_D = a_0 + a_1 e1 - a_1 e2 + a_2 e1^2 + a_2 e2^2 - 2a_2 e1 e2$$

Le terme représentant la multiplication est : $(-2a_2 e1 e2)$.

Le courant I_D à la sortie, contient un terme proportionnel à la multiplication des deux signaux des entrées.

Ce montage est simple, mais un de ses inconvénients, c'est le manque d'isolation entre ses différents pôles. C'est-à-dire que le signal appliqué à la grille peut atteindre directement la source et la sortie. De même pour le signal appliqué sur la source qui peut atteindre la sortie. On utilise des circuits plus complexes pour obtenir les performances désirées.

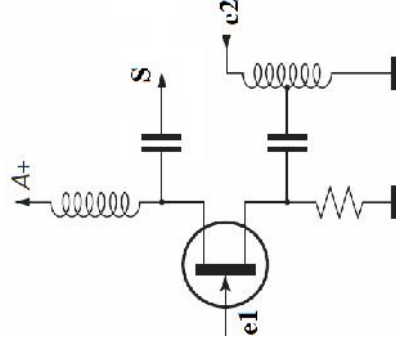


Figure 5 : Exemple d'utilisation d'un transistor en tant que mélangeur.

3.3. Cellule de Gilbert

La figure 6 montre un mélangeur à cellule de Gilbert. V_1 et V_2 sont les deux tensions d'entrées et V_0 est la tension de sortie.

Pour simplifier l'analyse de ce circuit, on suppose que les transistors sont identiques. Les courants I_B sont négligeables, et que la source de courant I_{EE} est idéale.

$$I_{C5} = I_{C1} + I_{C2} \dots \dots (1)$$

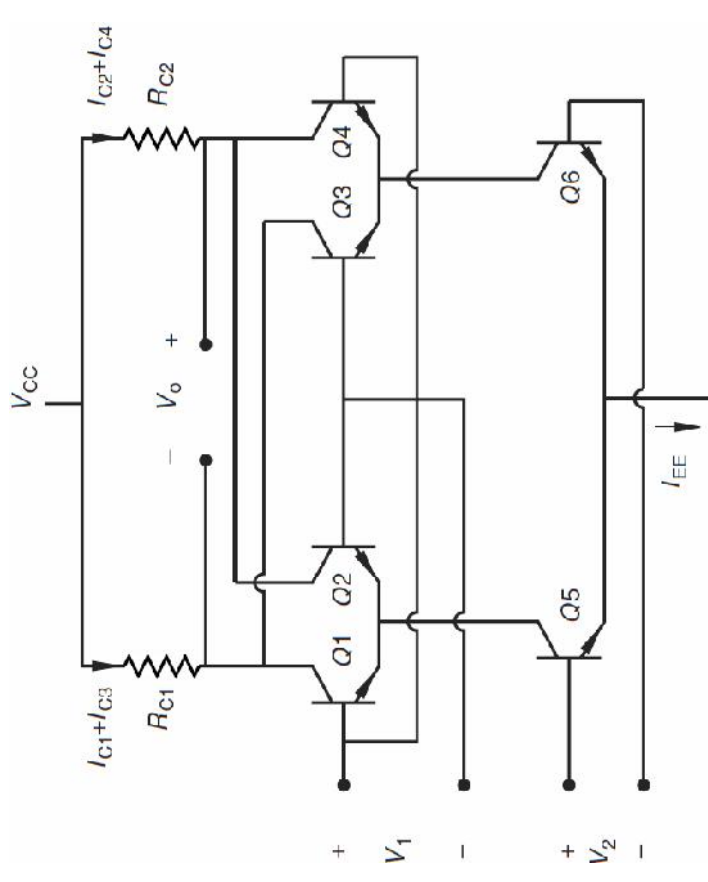


Figure 6 : Cellule de Gilbert.

On rappelle l'expression de la caractéristique I_C fonction de V_{BE} :

$$I_C = I_S e^{\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)}$$

- I_S est le courant de saturation inverse de la jonction émetteur base.
- V_T , c'est la tension thermique du transistor (paramètre technologique $V_T \sim 26mV$ pour un semi-conducteur en température ambiante).

On exprime le rapport des courants I_{C1} et I_{C2} :

$$\frac{I_{C1}}{I_{C2}} = \frac{e^{(V_{BE1}/V_T)}}{e^{(V_{BE2}/V_T)}} = e^{(V_1/V_T)} \dots \dots (2)$$

On combine (1) et (2) :

$$I_{C1} = \frac{I_{C5}}{1 + e^{(-V_1/V_T)}} \quad I_{C2} = \frac{I_{C5}}{1 + e^{(V_1/V_T)}}$$

De la même façon, on obtient I_{C3} et I_{C4} :

$$I_{C3} = \frac{I_{C6}}{1 + e^{(V_1/V_T)}} \quad I_{C4} = \frac{I_{C6}}{1 + e^{(-V_1/V_T)}}$$

Pour les transistors Q5 et Q6, on trouve :

$$I_{C5} = \frac{I_{EE}}{1 + e^{(-V_2/V_T)}} \quad I_{C6} = \frac{I_{EE}}{1 + e^{(V_2/V_T)}}$$

En utilisant la maille de V_0 :

$$V_0 = (I_{C1} + I_{C3})R - (I_{C2} + I_{C4})R = [(I_{C1} - I_{C4}) - (I_{C2} - I_{C3})]R$$

$$V_0 = R \left[\frac{I_{C5} - I_{C6}}{1 + e^{(-V_1/V_T)}} - \frac{I_{C5} - I_{C6}}{1 + e^{(V_1/V_T)}} \right] R$$

$$V_0 = R I_{EE} \left(\frac{1}{1 + e^{(-V_1/V_T)}} - \frac{1}{1 + e^{(V_1/V_T)}} \right) \left(\frac{1}{1 + e^{(-V_2/V_T)}} - \frac{1}{1 + e^{(V_2/V_T)}} \right)$$

Calculons les termes entre parenthèses :

$$\frac{1}{1 + e^{(-V_1/V_T)}} - \frac{1}{1 + e^{(V_1/V_T)}} = \frac{e^{(V_1/2V_T)}}{e^{(V_1/2V_T)} + e^{(-V_1/2V_T)}} - \frac{e^{(-V_1/2V_T)}}{e^{(-V_1/2V_T)} + e^{(V_1/2V_T)}}$$

$$\frac{1}{1 + e^{(-V_1/V_T)}} - \frac{1}{1 + e^{(V_1/V_T)}} = \frac{e^{(V_1/2V_T)} - e^{(-V_1/2V_T)}}{e^{(V_1/2V_T)} + e^{(-V_1/2V_T)}} = \text{th}(V_1/2V_T)$$

Par analogie :

$$\frac{1}{1 + e^{(-V_2/V_T)}} - \frac{1}{1 + e^{(V_2/V_T)}} = \text{th}(V_2/2V_T)$$

D'où : $V_0 = R I_{EE} \text{th}(V_2/2V_T) \text{th}(V_1/2V_T)$

$\text{th}(x) \approx x$, si x est très faible ou bien très élevé.

Donc il faut que : $V_2, V_1 \ll V_T$ ou $V_2, V_1 \gg V_T$:

$$V_0 = \frac{R I_{EE}}{(2V_T)^2} V_2 V_1 = K V_2 V_1$$

La cellule de Gilbert est le montage de mélangeur à transistors le plus utilisé parce que facilement intégrable. Plusieurs circuits intégrés basés sur la cellule de Gilbert, sont mis sur le marché, comme LM1496, AD835 et NE612.

4. Exemple d'utilisation du circuit intégré SA602A

Le circuit intégré SA602A est un mélangeur basé sur le circuit de Gilbert. Il peut fonctionner avec des fréquences d'entrée allant jusqu'à 500MHz, et contient un oscillateur intégré.

Dans l'exemple de la figure 8, on a utilisé un quartz 44.545MHz pour l'oscillateur.

L'entrée de mélangeur est connectée à une source RF de 45MHz.

Sur la sortie on obtient les deux fréquences (455KHz et 89.545MHz). Le filtre céramique SFG455A3 placé à la sortie (patte 4) permet de ne garder que la fréquence 455KHz.

Donc ce circuit est un changeur de fréquence de 45MHz vers 455KHz.

Figure 7 : Schéma bloc de SA602A.

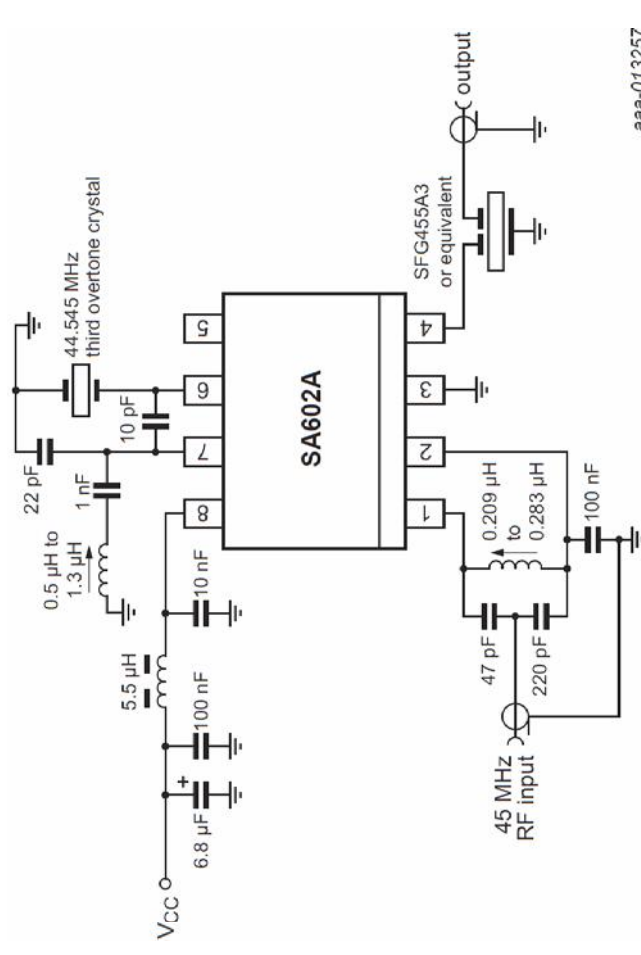


Figure 8 : Un changeur de fréquence à base de SA602A.

aaa-013257