Électronique non linéaire et numérique

L'électronique non linéaire et numérique est au cœur des systèmes modernes de communication et de traitement du signal. Contrairement aux systèmes linéaires, les composants non linéaires, comme les diodes et les multiplieurs, permettent de réaliser des opérations complexes telles que la modulation, la démodulation et la conversion analogique-numérique. Ces technologies sont essentielles pour les applications modernes, allant des télécommunications à l'instrumentation électronique.

Parmi les applications clés des circuits non linéaires, on peut citer :

- La modulation et la démodulation des signaux pour les communications radio.
- La conversion analogique-numérique (CAN) et numérique-analogique (CNA) pour le traitement numérique des signaux.
- Les systèmes de détection et de filtrage pour l'extraction d'informations.

Les progrès technologiques ont permis de surmonter de nombreuses limitations des composants non linéaires, ouvrant la voie à des systèmes plus performants et plus compacts.



Fig 1. multiplieur analogique utilisé dans les systèmes de modulation.

Table des matières

1 Composants non linéaires . . . 3
1.1 La diode . . . 3
1.2 Le multiplieur . . . 3
1.3 Analyse de signaux multipliés . . . 3
2 Modulation et démodulation . . . 5
2.1 Modulation d'amplitude (AM) . . . 5
2.2 Démodulation par diode et circuit RC . . . 5
2.3 Démodulation par détection synchrone . . . 5

1 Composants non linéaires

1.1 La diode

La diode est un composant électronique fondamental formé par une jonction PN. Elle permet le passage du courant dans un sens (polarisation directe) et le bloque dans l'autre (polarisation inverse). Ce comportement non linéaire est décrit par l'équation de Shockley :

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

où :

- I_D est le courant traversant la diode,
- I_S est le courant de saturation inverse (de l'ordre de 10^{-12} A),
- V_D est la tension aux bornes de la diode,
- n est le facteur d'idéalité (de l'ordre de 1 à 2),
- V_T est la tension thermique, définie par $V_T = \frac{kT}{q}$ (de l'ordre de 26 mV pour une diode à 25°C).

Les diodes sont utilisées dans de nombreuses applications, notamment :

- Le redressement de signaux alternatifs en signaux continus.
- La protection des circuits contre les inversions de polarité.
- La détection de crête dans les circuits de démodulation.

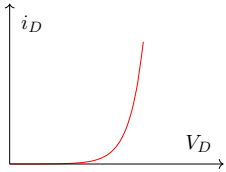


Fig 2. Caractéristique d'une diode.

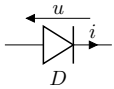


Fig 3. Symbole et schéma d'une diode.

1.2 Le multiplieur

Un multiplieur est un circuit électronique actif qui réalise la multiplication de deux signaux. Il est souvent utilisé dans les systèmes de communication pour la modulation et la démodulation des signaux. Les multiplieurs peuvent être construits à partir de composants non linéaires, comme des transistors ou des diodes.
Les applications des multiplieurs incluent :

- Les mélangeurs de fréquence pour transposer un signal d'une fréquence à une autre.
- Les détecteurs synchrones pour la démodulation des signaux modulés.

Son symbole électrique est représenté en *Figure 4*.

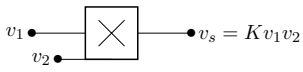


Fig 4. Schéma électrique du multiplieur.

Son fonctionnement idéalisé est le même que l'ALI :

- impédance d'entrée infinie ($i_+ = i_- = 0$ A),
- impédance de sortie nulle,
- bande passante infinie.

Le multiplieur permet ainsi de réaliser l'opération de multiplication (non linéaire) de deux signaux.

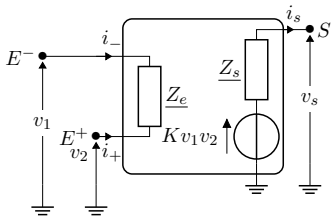


Fig 5. Modélisation statique du multiplieur

1.3 Analyse de signaux multipliés

La multiplication de deux signaux harmoniques conduit à la formation d'un signal présentant des fréquences différentes de celles des deux signaux multipliés. Considérons deux signaux :

$$v_1(t) = V_1 \cos(\omega_1 t) \quad \text{et} \quad v_2(t) = V_2 \cos(\omega_2 t)$$

Le signal $v_s(t)$ en sortie du multiplieur de gain K est :

$$v_s(t) = \frac{1}{2} K V_1 V_2 \left(\cos((\omega_1 + \omega_2)t) + \cos((\omega_1 - \omega_2)t) \right)$$

comme représenté spectralement en *Figure 6*. L'apparition de nouvelles fréquences est ainsi caractéristique du traitement non linéaire du signal.

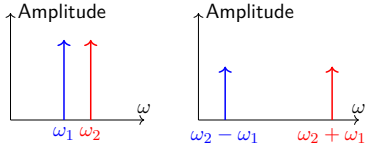


Fig 6. Effet de la multiplication sur le spectre des signaux.

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/

2 Modulation et démodulation

La modulation d'un signal est une opération de base préalable à la transmission sans fil d'un signal. Cette étape évite d'envoyer directement un signal non adapté vers une antenne réceptrice.

La modulation permet ainsi de transposer le signal sonore sur une onde porteuse de fréquence beaucoup plus élevée. Cela facilite la transmission à travers l'atmosphère ou d'autres milieux, car les ondes de haute fréquence se propagent mieux et peuvent être captées par des antennes de taille raisonnable. La modulation a également l'avantage de multiplexer plusieurs signaux sur une même bande de fréquences, ce qui optimise l'utilisation du spectre électromagnétique. Par exemple, en radio AM ou FM, plusieurs stations peuvent émettre simultanément sur différentes fréquences porteuses sans interférer entre elles.

2.1 Modulation d'amplitude (AM)

La modulation d'amplitude (AM) est une technique de modulation où l'amplitude d'une onde porteuse est variée en fonction du signal à transmettre. Le signal modulé est donné par :

$$s(t) = [1 + m \cdot u(t)] \cdot \cos(\omega_p t) \tag{2}$$

où :

- m est l'indice de modulation,
- $u(t)$ est le signal modulant,
- ω_p est la pulsation de la porteuse.

La modulation d'amplitude (AM) est une technique largement employée dans les communications radio en raison de sa simplicité et de son efficacité. Grâce à un simple multiplicateur de signaux, il est possible de générer un signal modulé $s(t)$. Pour éviter la surmodulation, il est nécessaire que $1 + m \cdot u(t) > 0$, la valeur de m doit donc être suffisamment petite.

Prenons l'exemple d'un signal harmonique $u(t) = U_0 \cos(\omega_m t)$, où la pulsation ω_m se situe généralement entre 10^3 et 10^4 rad $\cdot$ s^{-1}. Ce signal, qui contient l'information à transmettre, est modulé en amplitude par une onde porteuse de pulsation ω_p, bien plus élevée, typiquement entre 10^8 et 10^9 rad $\cdot$ s^{-1}.

L'analyse spectrale de ce signal modulé révèle que le spectre du signal modulant est transposé autour de la fréquence de la porteuse de manière symétrique. Cela permet de transmettre efficacement l'information à des fréquences plus élevées, adaptées à la propagation sans fil. Ce processus est illustré dans la figure de l'analyse spectrale (voir *Figure 7*).

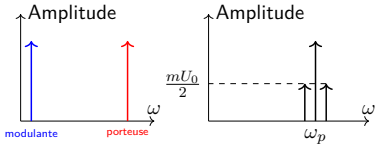


Fig 7. Spectre d'un signal modulé.

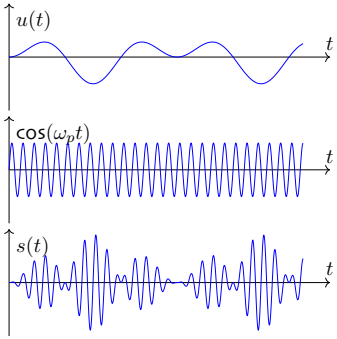


Fig 8. Signal modulé en amplitude.

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/

2.2 Démodulation par diode et circuit RC

La démodulation par diode et circuit RC est une méthode simple pour récupérer l'enveloppe d'un signal modulé en amplitude. Le circuit utilise une diode pour redresser le signal et un circuit RC pour filtrer les composantes haute fréquence, ne laissant que l'enveloppe du signal.
Les étapes de la démodulation sont les suivantes :

- Redressement du signal modulé par la diode.
- Filtrage passe-bas par le circuit RC pour récupérer l'enveloppe.

Ce circuit fonctionne comme un détecteur de crête du signal modulé permettant ainsi de reconstituer le signal modulé de manière passive. L'inconvénient de ce circuit étant que la détection de crête n'est adaptée que pour une constante de temps $\tau = RC$ adaptée au signal d'entrée.

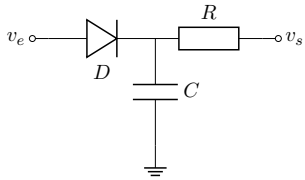


Fig 9. Circuit de démodulation par diode.

2.3 Démodulation par détection synchrone

La détection synchrone repose sur la multiplication du signal modulé par une réplique de la porteuse, de même fréquence et en phase. Cette opération ramène le signal utile dans sa bande de base : en effet, si le signal d'entrée contient une composante modulante à la fréquence ω_m autour de la porteuse ω_p, la multiplication engendre deux termes, l'un centré à ω_m (différence de fréquences) et l'autre à $2\omega_p \pm \omega_m$ (somme des fréquences).

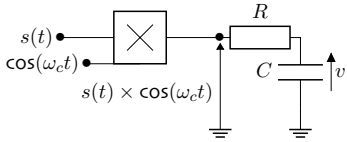


Fig 10. Détection synchrone.

Le premier correspond au message d'origine, tandis que le second reste un terme indésirable de haute fréquence. On applique alors un filtre passe-bas RC, qui supprime la partie située autour de $2\omega_p$ et ne conserve que la bande de base.

Le spectre du signal de sortie se réduit donc essentiellement au contenu du message initial, situé autour de ω_m.

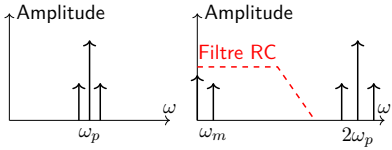


Fig 11. Analyse spectrale de la démodulation.

Contrairement à la démodulation par diode, ce montage présente l'avantage de ne pas être sensible à la surmodulation.

Document sous licence Creative Commons « Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale 3.0 non transposé (CC BY-NC 3.0) ».
Pour plus d'informations : creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/