

Comment ça marche ?

Les transmissions radio-numériques

4 - Modulations mixtes et mod./démod. I-Q

Par le radio-club F6KRK

Après avoir vu les modulations d'amplitude, de fréquence et de phase, nous allons continuer avec les modulations mixtes et les variantes. Nous allons ensuite aborder le principe de la modulation et de la démodulation I-Q.

Modulations mixtes n QAM

QAM est mis pour "Quadrature Amplitude Modulation". En clair, cela veut dire que l'on fait de la modulation d'amplitude et de phase combinées d'une manière doublement symétrique dans les 4 cadrans du cercle de phase (revoir fig. 3 du précédent "Comment ça marche") à l'aide de deux signaux en quadrature (I et Q) ⁽¹⁾. En conséquence, n est un multiple quaternaire de m au carré, m étant le nombre de niveaux des composantes I et Q par cadran. Le 4QAM ($m=1$) est en fait du QPSK. Donc, on démarre avec du 16QAM ($m=2$) dont on voit le diagramme des états sur la figure 1.

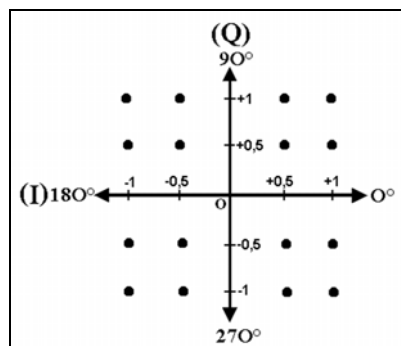


Figure 1 : Diagramme du 16QAM

Avec le 16QAM, nous avons une combinaison de douze angles possibles pour la phase et de trois niveaux pour l'amplitude ⁽²⁾.

Avec m croissant, nous pouvons avoir du 36QAM, 64QAM, 100QAM, 144QAM, 196QAM et 256 QAM, mais seules les valeurs en puissances de deux sont utilisées.

Comme pour le PSK, l'encombrement spectral est lié uniquement au nombre de bauds. Donc l'intérêt d'un n QAM élevé se trouve dans le rapport entre bits/s et bauds qui atteint 8 avec le 256QAM. Naturellement, plus n augmente et plus la sensibilité diminue, comme pour le PSK.

La génération et la démodulation du n QAM se font par modulateur et démodulateur universels I-Q.

MSK et GMSK

MSK est mis pour "Minimum Shift Keying". C'est un 2FSK optimisé avec $m = 0,5$, mais généré par modulation de phase au lieu de modulation de fréquence. Nous obtenons un minimum d'encombrement spectral pour du 2FSK. Malgré tout, il reste des lobes secondaires en $\sin(x)/x$ dus aux transitions. On peut les réduire en filtrant passe-bas le signal de modulation dit "en bande de base". Par exemple avec un filtre gaussien, nous obtenons le GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). La contre partie se paie par une démodulation plus complexe et une sensibilité diminuée comme nous le verrons dans le prochain "Comment ça marche".

La différence entre le MSK et le PSK réside dans la variation de phase qui est linéaire, et non plus brusque. Cette variation est de 90° par symbole, positive pour un symbole à "1" et négative pour un symbole à "0". On peut donc avoir quatre états de phase à la fin de chaque symbole, comme pour le QPSK, mais ici, du fait des $\Delta\phi$ limités à $\pm 90^\circ$, le nombre de bits/s est de un par baud. Par ailleurs, l'amplitude du signal modulé est constante.

Modulation et démodulation du MSK et du GMSK

Elles peuvent se faire de la même manière que pour le FSK. On peut aussi utiliser un modulateur et un démodulateur I-Q universels.

Modulateur universel I-Q

Examinons le schéma de la figure 2.

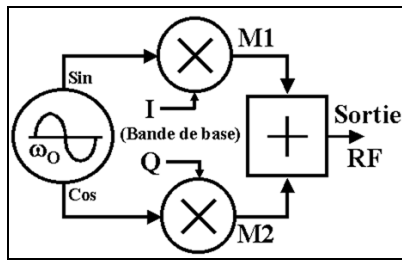


Figure 2 : Modulateur universel I-Q

Nous avons un oscillateur (ω_0) à la fréquence porteuse dont la sortie sinus est multipliée par le signal de modulation en phase (I), et la sortie cosinus (déphasée de 90°) est multipliée par le signal de modulation en quadrature (Q). Les multiplieurs M1 et M2 sont constitués de mélangeurs équilibrés et linéaires. Ensuite les deux signaux sont additionnés pour obtenir la sortie modulée. Ce montage est très connu des radioamateurs, il s'agit de la génération d'un signal BLU par la méthode du "phasing". Si le signal de modulation en quadrature est déphasé de $+90^\circ$, nous obtenons une BLU sup et s'il est déphasé de -90° , nous obtenons une BLU inf. Ceci est montré sur la figure 3.

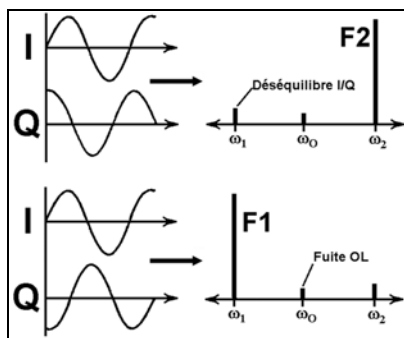


Figure 3 : Fonctionnement du modulateur I-Q

Les porteuses Sin et Cos peuvent être obtenues, soit par deux déphasages de $+45^\circ$ (R-C) et de -45° (C-R) d'un oscillateur à la fréquence F, soit par déphasage de 180° d'un oscillateur à 2F, et divisions par 2 à l'aide de deux bascules. Les multiplieurs peuvent être des mélangeurs équilibrés. La commutation Sup / Inf peut être faite, soit par une inversion de phase sur la voie I ou Q, soit par une inversion de phase sur les voies sin ou cos, soit par interversion des voies sin et cos, soit par inversion du signe de l'additionneur (qui devient soustracteur).

Sur la figure 3, les spectres contiennent des raies parasites résiduelles. Elles sont dues aux déséquilibres des voies, en amplitude et en phase, du fait de l'imperfection des composants.

Génération du nFSK

Cette génération paraît évidente quand nous nous reportons à la figure 3. Le shift sera égal au double de la fréquence de modulation (raisonnez BLU). Ainsi nous aurons une fréquence pour du 2FSK, deux fréquences pour du 4FSK, etc... Le sens du shift sera obtenu par modulation de l'une des voies, I ou Q, en BPSK.

Génération du MSK et du GMSK

Le MSK est un cas particulier du 2FSK avec un indice de modulation de 0,5. Pendant la durée d'un symbole, la phase varie linéairement de $\pm 90^\circ$. La variation est positive ($+\Delta F$) pour un symbole à 0 et négative ($-\Delta F$) pour un symbole à 1. Ceci est obtenu en modulant BPSK les deux voies I et Q. Nous avons sur la figure 4 un exemple de génération MSK.

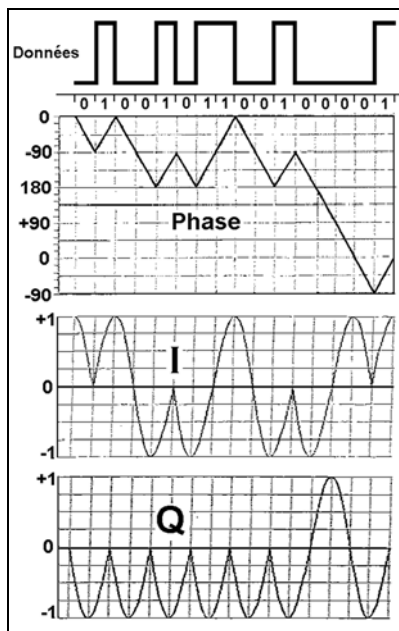


Figure 4 : Génération du MSK à l'aide d'un modulateur I-Q

Pour le GMSK, il suffit de filtrer passe-bas les données avec un filtre gaussien. Ceci a pour effet "d'arrondir" les transitions de phase I et Q, et de "lisser" les variations de phase du signal. Nous en verrons les conséquences dans le prochain "Comment ça marche".

Génération du BPSK

Une seule voie suffit. On peut par exemple faire $Q = 0$ et $I = \pm 1$. Ce modulateur ne présente aucun intérêt pour générer uniquement du BPSK.

Génération nPSK

Pour le QPSK, la méthode est entièrement décrite dans la figure 3 du précédent "Comment ça marche". Noter qu'il n'est pas nécessaire d'avoir des modulateurs linéaires, sauf si l'on filtre les données I et Q pour limiter la largeur du spectre émis.

Pour le n PSK d'ordre supérieur, les données I et Q seront à plusieurs niveaux, ce qui implique des modulateurs linéaires.

Génération n ASK

Il suffit de relier I et Q (travail dans un seul quadrant) qui pourront avoir n niveaux.

Génération n QAM

C'est exactement la même opération que pour la génération du n PSK. La différence réside dans les rapports en amplitude entre I et Q qui génèrent un signal à amplitude constante dans le n PSK, et avec un codage supplémentaire en amplitude pour le n QAM.

Modem adaptatif

En général, avec un modulateur universel I-Q, les signaux de base sont générés numériquement par un DSP, puis convertis en analogique par un CNA (DAC). Cela permet de changer de modulation d'une manière dynamique en fonction de la qualité de la transmission, sans changer les caractéristiques de la Radio.

Par exemple, dans une même largeur de canal, nous pouvons faire du 16QAM, puis, la liaison se dégradant, passer à du QPSK, du MSK, puis à du 2FSK avec des débits en diminution. La pratique a montré que cette façon de procéder était plus efficace que de garder du 16QAM en augmentant le codage et la redondance.

Démodulateur universel I-Q

Le démodulateur I-Q est exactement l'inverse du modulateur I-Q.

Reprenons la figure 2. Il suffit de remplacer "sortie RF" par "entrée RF", et "entrées I-Q" par "sorties I-Q". Ensuite, les signaux I et Q seront convertis en numérique par un CAN (ADC) puis analysés par un DSP par exemple.

Dans le prochain "Comment ça marche", nous aborderons l'encombrement spectral selon les modes et leur sensibilité aux bruits.

La Rubrique "Comment ça marche" est une activité collective du radio-club F6KRK (<http://www.f6krk.org>). Pour une correspondance technique concernant cette rubrique : "f5nb@orange.fr".

Notes :

- 1) *Désolé, mais nous ne savons pas faire plus clair sans rajouter une page.*
- 2) *Ce n'est pas la seule façon de faire du 16QAM. Celle-ci est la plus facile à démoduler. Imaginez un diagramme avec 8 états de phase et trois niveaux pour les composantes I et Q.*