

Comment ça marche ?

Les transmissions radio-numériques

3 - Modulations de phase

Par le radio-club F6KRRK

Dans le précédent "Comment ça marche" nous avons déjà vu les modulations nASK (dont OOK) et nFSK avec les applications CW et RTTY. Nous allons continuer la description des modulations de base employées dans les transmissions numériques avec les modulations de phase.

Modulations de phase

Si une modification (modulation) de la fréquence est aisément compréhensible, une modulation de phase est moins évidente.

Nous rappellerons à l'aide de la figure 1 les caractéristiques d'un signal sinusoïdal.

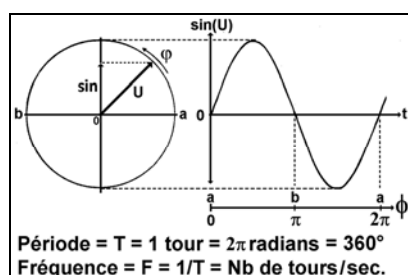


Figure 1 : Le signal sinusoïdal

L'angle total parcouru par le vecteur U en une seconde est la vitesse angulaire, notée (ω) et est égale à $\{2\pi F\}$ radians. Si nous augmentons la vitesse angulaire, soit la variation de phase par unité de temps, nous aurons augmenté la fréquence. Et inversement, nous diminuerons la fréquence si nous diminuons la vitesse angulaire. La relation entre les deux s'exprime par la formule mathématique suivante :

$$\Delta F = d\phi / dt$$

Nous pouvons alors envisager deux types de modulation :

- Modulation de fréquence :

Dans ce cas, ΔF est proportionnel à l'amplitude du signal de modulation. Pour un ΔF constant, $d\phi$ diminue avec la fréquence de modulation puisque dt diminue (proportionnel à la période du signal de modulation). Par ailleurs, l'indice de modulation m étant égal à $\Delta F / F_{\text{mod}}$ diminue également.

- Modulation de phase :

Dans ce cas, c'est $d\phi$ qui est proportionnel à l'amplitude du signal de modulation. Pour un $d\phi$ constant, ΔF est proportionnel à la fréquence de modulation, étant inversement proportionnel à dt ($F = 1/T$). Nous avons alors un indice de modulation constant.

En conséquence, pour générer du n FSK, avec une modulation de fréquence, le shift sera créé par n niveaux d'amplitude du signal de modulation. Et avec une modulation de phase, le shift sera créé par n fréquences de modulations.

La modulation numérique de la phase s'effectue par sauts en utilisant la totalité du cercle de phase ($\pm 180^\circ$). Suivant le nombre de possibilités de sauts nous pourrions coder un nombre plus ou moins important de bits par symbole.

2PSK ou BPSK

BPSK signifie "Binary Phase Shift Keying" (modulation par saut de phase à deux états). Examinons la figure 2.

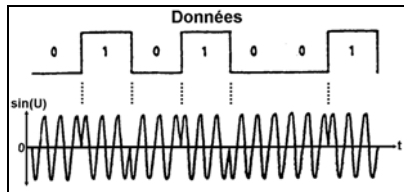


Figure 2 : Exemple de BPSK

Cette fonction de sin (U) est obtenue de la façon suivante (revoir figure 1) : Une transition de 0 à 1 est codée par un saut de phase de 180° de (b) à (a), et une transition de 1 à 0 est codée par un saut inverse de (a) à (b). Comme le 2FSK, le BPSK code un bit par baud.

Génération et démodulation du BPSK

Deux voies déphasées de 180° et un commutateur synchrone ⁽¹⁾ commandé par les données suffisent pour générer du BPSK. Un modulateur en anneau (mélangeur équilibré) fait l'affaire. On peut aussi utiliser un modulateur universel I-Q (décrit dans un prochain "Comment ça marche").

La démodulation peut se faire avec une PLL asservie sur le signal sous certaines conditions. Avec un récepteur FM et un discriminateur, le BPSK sera démodulé sous forme d'impulsions, positive pour une transition et négative pour l'autre. Une bascule R/S commandée par les impulsions suffit pour remettre en forme les données.

4PSK ou QPSK

QPSK signifie "Quaternary Phase Shift Keying" (modulation par saut de phase à quatre états). Intéressons nous à la figure 3.

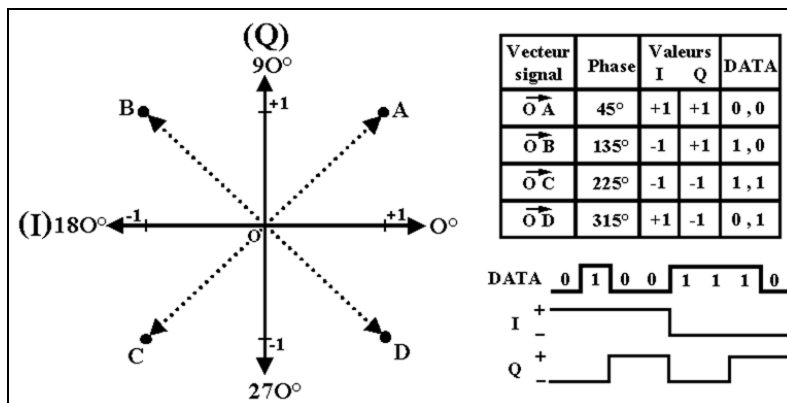


Figure 3 : Modulation QPSK

Sur la partie gauche nous avons reproduit le diagramme de la fig. 1 avec quatre points particuliers, A, B, C et D. Ceux-ci sont les extrémités d'un vecteur aux positions 45° , 135° , 225° et 315° . En partant d'un point, nous avons maintenant trois possibilités de sauts de phase au lieu d'une seule pour le BPSK. Comme pour le 4FSK, chaque saut (symbole) pourra coder deux bits. Nous avons la table de vérité à droite de la figure 3. En dessous, nous avons une manière de générer du QPSK en additionnant vectoriellement deux signaux bipolaires déphasés de 90° . Par convention, l'un est appelé I (In (en) phase) et l'autre Q (en Quadrature). Remarque : Le QPSK est obtenu en modulant en BPSK les signaux I et Q à $\frac{1}{2}$ Fbit (cf. fig. 3 en bas à droite).

Extension à nPSK

Si nous codons I et Q avec 2 niveaux d'amplitude (plus le signe), nous pourrions avoir du 8PSK, en conservant une amplitude constante du vecteur RF (points $22,5^\circ$, $67,5^\circ$, $112,5^\circ$...). Avec deux niveaux supplémentaires, nous aurions du 16PSK, etc.

L'encombrement spectral est identique, quel que soit le nombre possible de sauts de phase (il n'est lié qu'au nombre de bauds). Par contre, à chaque fois que l'on double le nombre de sauts, on perd 3 dB en sensibilité ⁽²⁾.

En théorie, l'amplitude d'un signal modulé PSK est constante et la largeur de bande est infinie si la commutation de phase a lieu dans un temps nul. Pour réduire la bande, il est nécessaire de filtrer la modulation en bande de base. Il s'en suit un passage progressif d'un point de phase à l'autre et une variation d'amplitude du signal. Pour vous en convaincre, tracez sur le diagramme de gauche de la figure 3, le trajet du signal pour les 8 bits de l'exemple. Vous verrez que le signal passe par un creux de -3dB pour les sauts de 90° et passe par zéro pour des sauts de 180° . Dans ce cas, pour éviter des distorsions, l'ampli de puissance doit être linéaire en amplitude, donc avec moins de rendement et plus coûteux. Le filtrage à la réception est moins critique et une largeur de bande de 1,4 fois le débit en bauds suffit pour un décodage correct.

Pour diminuer la modulation d'amplitude à l'émission, on peut retarder le signal I d'un demi symbole. Cela correspond à un offset de $\pi/4$. C'est pourquoi cette modulation est nommée **OQPSK** (Offset QPSK) ou **$\pi/4$ QPSK**. Faites l'opération sur le signal I de la figure 3 et suivez le nouveau trajet du signal de sortie, vous verrez qu'il ne passe plus par zéro. Ce système est peu employé, car on perd encore en sensibilité.

Génération et démodulation du QPSK

Elles se font uniquement par modulateur et démodulateur universels I/Q que nous verrons dans le prochain "Comment ça marche". Nous continuerons également les modulations avec le **nQAM**.

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) Le rapport entre la fréquence porteuse et la fréquence bit doit être impair, 1,3,5, etc...Si la commutation est asynchrone, il faut prendre un code de transitions au lieu d'un code d'états. C'est le cas du code "Manchester". Alors F_{bit} est égal à 0,5 bds (demi débit).*
- (2) De nos jours, les bandes de fréquence sont devenues rares et chères et l'on peut toujours augmenter la puissance d'émission en prenant quelques précautions. Donc, les modulations PSK ont la cote.*