

Comment ça marche ?

Les transmissions radio-numériques

2 - Modulations d'amplitude et de fréquence

Par le radio-club F6KRRK

Après avoir vu un aperçu historique des transmissions numériques et leur différence avec les transmissions analogiques, nous allons maintenant décrire les modulations de base employées dans ces transmissions en commençant par les modulations d'amplitude et de fréquence.

Samuel Morse et le télégraphe.

Les premières transmissions numériques utilisant l'électricité, l'ont été par le télégraphe. L'information se faisait par le passage ou non d'un courant, et parmi les codages, l'un d'eux, devenu universel, a été inventé par Samuel Morse. Il est si performant qu'il est encore utilisé de nos jours.

Le code morse est totalement asynchrone et l'information élémentaire de temps est donnée par l'émetteur qui fixe la durée du « point ». Dans notre monde contemporain, nous appelons cette durée élémentaire « symbole » et le nombre de symboles par secondes, « Bauds ».

Le code Morse est "orienté caractère" et c'est un varicode, c'est-à-dire que les caractères n'ont pas tous la même longueur numérique. En effet, ils sont composés d'un nombre différent de symboles, les plus usités en ayant le moins (e, i, a, etc.) ⁽¹⁾. Cela permet d'optimiser le temps de transmission. Le code est composé de points d'une durée de 1 symbole à "1" et de traits d'une durée de 3 symboles à "1". L'espace entre points et traits est de 1 symbole à "0".

L'espace entre deux caractères est au minimum de 3 symboles à "0" (les caractères commencent et finissent tous par un symbole à "1"). Le rythme symbole est récupéré en faisant une analyse des données reçues (corrélation). Voir sur la figure 1 un exemple de lettre Morse (signal CW parfait).

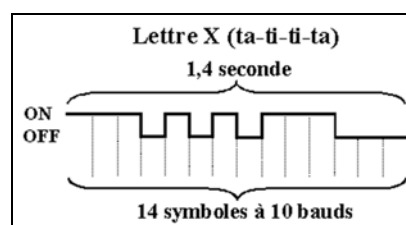


Figure 1 : Génération de la lettre Morse "X"

L'avantage du code morse est qu'il est parfaitement adapté à la transmission manuelle (manipulateur) et supporte (oh, oui !) l'imperfection, à condition d'être décodé « à l'oreille ». Le décodage à l'aide d'un automate ne fonctionne correctement que si l'émission est parfaite. L'inconvénient du code morse est sa lenteur. Même avec un automate (télégraphie rapide) le débit reste faible. Mais pour une liaison radioamateur il reste le système **le plus efficace**.

A titre d'information, pour une manipulation (rapide) à 20 mots/minute, le débit moyen est de 16 bauds (sans respirer).

Pour une utilisation radio du code morse (notre CW), un symbole actif correspond à l'émission d'une porteuse et un symbole inactif à l'absence d'émission. On peut aussi appliquer ce principe à une sous porteuse elle-même modulant la porteuse d'une manière quelconque (AM, FM, etc...). Bien sûr, l'efficacité sera moindre.

Modulation ASK

"ASK" signifie "Amplitude Shift Keying" ⁽²⁾. On distingue deux catégories :

- L'ASK à deux états ou "OOK" (On / Off Keying), telle la CW. Sa particularité est de ne pas nécessiter une modulation linéaire, puisqu'elle est "tout ou rien".
- L'ASK à plusieurs états ou "*n*ASK" qui nécessite une linéarité en amplitude d'autant plus élevée que *n* est élevé. En pratique on ne dépasse pas 16 niveaux (16 états). L'avantage de ce mode réside dans le fait que la bande passante requise est indépendante de *n*. Mais plus *n* augmente et plus le décodage demande un rapport S/B élevé (proportionnel à *n*).

En pratique, seul le 2ASK est utilisé, c'est-à-dire l'OOK (CW). Nous verrons par la suite que l'on retrouve du *n*ASK combiné avec du *m*PSK dans le (*n.m*)QAM.

La particularité de l'OOK, outre qu'il ne requiert pas un ampli linéaire, est d'avoir un rapport [puissance crête (PeP) / puissance moyenne] plus ou moins supérieur à 2. Ce rapport est appelé "facteur de crête". Pour la phonie, il est en pratique compris entre 2 et 5. Dans les deux cas, pour le dimensionnement des amplificateurs, on tient compte d'un facteur de crête de 2 en puissance ⁽³⁾.

Modulation FSK

C'est celle qui est employée par le radio-télétype des radioamateurs (RTTY). Nous allons commencer par décrire ce cas particulier.

Baudot et le télétype

A l'origine, le système Emile Baudot consistait à coder des caractères à l'aide d'un clavier à cinq touches. Les états des touches étaient ensuite transmis en série, précédés d'un état toujours à "1", le "Start" et suivis d'un ou plusieurs états à "0", le(s) "Stop". Il faut donc au minimum 7 symboles pour transmettre un caractère. Ceci, pour une transmission asynchrone (manuelle par clavier). Avec une transmission synchrone par trame de plusieurs caractères, après la synchronisation trame, cinq symboles suffisent par caractère. La transmission télégraphique du code Baudot se nomme "TéléTYpe" (TTY). Par radio, elle devient "RTTY", pour "Radio-TéléTYpe".

Comme pour le morse, le symbole peut avoir deux états. Pour l'un d'eux, le « space », la porteuse est à la fréquence F1. Pour l'autre, le « mark », la porteuse est à la fréquence F2. L'écart entre les deux fréquences est appelé « shift ». L'émission est permanente et à amplitude constante. Cette méthode de modulation est aussi appelée « modulation 2FSK » (Frequency Shift Keying). Le chiffre 2 est mis pour « deux états ». Comme pour le morse, on peut l'appliquer à une sous porteuse (modulation 2AFSK, pour « Audio Frequency Shift Keying »).

Avec le RTTY, pour transmettre un caractère en série, il faut *grosso modo* moitié moins de symboles qu'avec le morse. Par contre, l'émetteur consomme plus de deux fois plus de puissance et la largeur de bande est plus que doublée (on n'a rien sans rien). Si le RTTY mécanique est limité à 110 bauds à cause des machines d'encodage et de décodage, le débit

peut être très élevé avec un modem électronique. Par ailleurs, l'information transmise peut être de l'ASCII (code sur 7 bits) ou du numérique pur (transmission par octets) ⁽⁴⁾.

Modulation 2FSK

N-B : Ce que nous dirons du FSK sera valable pour l'AFSK.

La modulation 2FSK est très utilisée pour les transmissions numériques par radio. Son principal avantage est sa facilité de modulation et de démodulation. Son principal reproche est sa largeur de bande. Celle-ci peut être réduite en remplaçant la commutation entre F1 et F2 par un passage progressif de l'une à l'autre, sans rupture de phase (CPFSK, pour "Continuous Phase Frequency Shift Keying"). On peut aussi optimiser le rapport entre vitesse (en bauds) et le shift (en Hz). Avec un rapport de 0,25 (indice de modulation $m = \Delta F / F_{mod} = 0,5$), nous avons du MSK (décrit dans le prochain "comment ça marche").

Modulation nFSK ou bauds et bit/s

Nous avons vu qu'avec du 2FSK, chaque symbole correspondait à un bit. Si maintenant, nous élargissons le choix pour chaque symbole entre, non plus deux, mais quatre fréquences, nous pourrions transmettre deux bits à la fois. Cela est évident en regardant les tables de vérité de la figure 2.

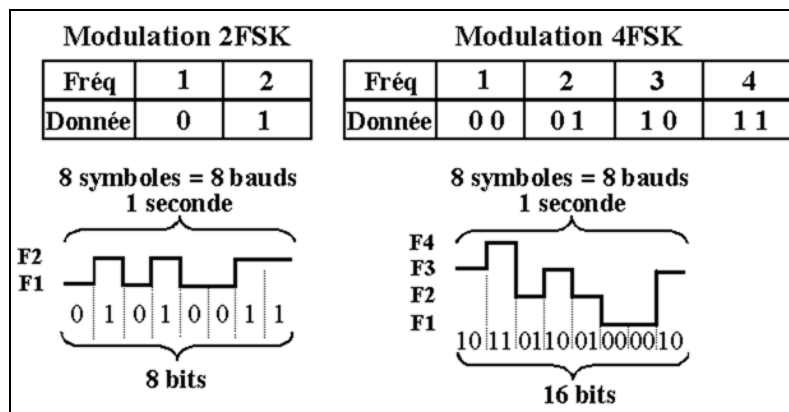


Figure 2 : Exemple de deux rapports bauds/bits_{sec}

Donc avec du 4FSK, pour un débit de n bauds, nous avons un débit de $2n$ bits par seconde. Si nous avons du 8FSK, pour chaque baud nous aurions trois bits, et quatre pour du 16FSK, etc. Il faut bien faire la différence entre le débit en bauds qui indique le nombre possible de changements d'états physiques de la modulation pendant une seconde, et le débit en bit/s qui indique la quantité d'information transmise en une seconde.

Modulation et démodulation du nFSK

A) Modulation avec un émetteur BLU.

Celui-ci étant en fait un translateur de fréquence, il suffit de générer les fréquences F1 à F_n en bande de base (ici, en BF) et de les appliquer à l'émetteur. La largeur de bande maxi sera celle du filtre BLU. C'est pourquoi ce système est réservé aux faibles débits.

B) Démodulation avec un récepteur BLU.

C'est l'opération exactement inverse de l'émission. La discrimination entre les fréquences devra se faire en bande de base (bande de fréquence du signal servant à moduler la radio).

N-B : Le "modem" utilisé en bande de base pour une modulation 2FSK avec la BLU est du même type que celui qui est nécessaire pour une modulation 2AFSK ⁽⁵⁾.

C) Modulation avec un émetteur à amplitude constante (genre émetteur FM).

Dans ce cas, il faut agir sur la fréquence de l'un des oscillateurs locaux. Si celui-ci est situé après le filtre de canal (ou, s'il n'y en a pas), il est nécessaire de filtrer les données en bande de base pour limiter la largeur de bande HF. Cela implique que la variation de fréquence de l'oscillateur soit analogique (proportionnelle).

Si l'oscillateur est libre, la modification de la fréquence pourra se faire avec une diode varicap commandée en tension.

Si l'oscillateur est verrouillé comme dans un synthétiseur, alors deux solutions possibles :

- Soit, limiter par codage des données, la fréquence minimum de la bande de modulation, pour la situer entièrement au dessus de la fréquence de coupure de la boucle de verrouillage, et l'on est ramené au cas de l'oscillateur libre.
- Soit faire une modulation de phase dans la boucle, après avoir fait subir une intégration aux données, ce qui implique là aussi une bande de fréquence limitée.

D) Démodulation par un récepteur avec ampli limité (genre récepteur FM).

Dans ce cas, il suffit de démoduler à l'aide d'un discriminateur de fréquence comme pour la FM analogique. Celui-ci passant le continu, il n'y a pas d'autre limitation de bande que celle du filtre de canal. Contrairement au récepteur BLU, il n'est pas nécessaire d'ajouter un discriminateur en bande de base.

Dans le prochain "Comment ça marche", nous poursuivrons avec les modulations de phase et mixtes (amplitude/phase).

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) *C'est le même principe qui est adopté par les compresseurs de données du type LZW dont WinZip est un exemple.*
- (2) *"ASK" peut se traduire par : "modulation par modification de l'amplitude", "keying" se réfère au Morse et signifie "manipulation". En français certains utilisent l'acronyme "MDA" qui signifie "Modulation par Déplacement d'Amplitude" (sic).*
- (3) *Pour tester les amplis, avec la CW, on utilise un roulement d'états ON/OFF et pour la phonie un signal deux tons sinusoïdaux qui permet par ailleurs de mesurer la linéarité.*
- (4) *Une application filaire bien connue de TTY rapide, concerne la liaison série RS232.*
- (5) *Ce qui nous arrange bien, nous les radioamateurs, car un seul modem simplifié suffit pour toutes nos modulations numériques, du Morse au Packet-300 (FSK) et Packet-1200 (AFSK en FM).*