

Comment ça marche ?

Les transmissions radio-numériques

9 - L'étalement de spectre (2)

Par le radio-club F6KRK

Après avoir vu l'étalement de spectre par sauts de fréquence, nous allons aborder l'étalement de spectre par séquençement direct (DSSS = "Direct Sequence Spread Spectrum"), puis nous terminerons avec l'OFDM (Orthogonal Frequencies Division Multiplexing).

Etalement de spectre par séquençement direct (DSSS)

Une traduction complète de "DSSS" en bon français pourrait être : "Etalement de spectre obtenu avec une multiplication des symboles par une séquence binaire de longueur et de codage connus". Prenons un exemple :

- Soit une transmission de données avec deux niveaux de codage d'un symbole d'une durée de 1 ms (débit de 1 kbit/s, soit $F_{bit} = 1$ kHz).
- Prenons une porteuse modulée BPSK par une séquence binaire de 1024 bits avec un débit de 1024 kbit/s, soit $F_{bit} = 1,024$ MHz.
- La durée de la séquence est exactement celle de la durée symbole de notre transmission de donnée (1 ms).
- Synchronisons les séquences sur les symboles (une par symbole).
- Pour la transmission d'une donnée "0", nous utiliserons une séquence avec un code particulier (mélange de zéros et de uns).
- Pour la transmission d'une donnée "1", nous utiliserons la même séquence avec un code complémentaire (les zéros remplacés par des uns, et inversement).

Voir tout cela résumé sur la figure 1.

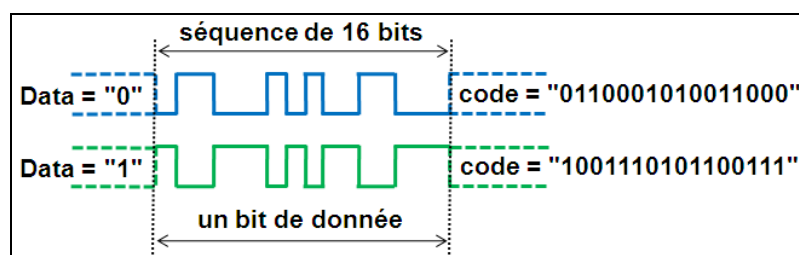


Figure 1 : Principe de l'étalement de spectre par séquence directe (DSSS)

Ce procédé a deux avantages principaux :

- d'un point de vue radio, l'émission est étalée sur une grande plage de fréquence, ici par une modulation BPSK avec un rythme de 1024 kBauds pour transmettre des données à 1 kbit/s ! La densité spectrale du signal émis est très faible (1024 fois plus faible qu'avec du BPSK à 1 kBaud) et ne perturbe quasiment pas les autres utilisateurs de la bande (elle apparaît comme une augmentation du bruit de fond).

- d'un point de vue système, elle permet de partager la même bande par un grand nombre de transmissions. Il suffit qu'elles utilisent des codes les plus orthogonaux possible entre eux ⁽¹⁾.

Ce dernier avantage est exploité par le mode de transmission "**CDMA**" (*Codage Division Multiple Access*). Il est utilisé, entre autres, par le radiotéléphone US de 2^{ème} génération et par notre radiotéléphone de 3^{ème} génération. C'est aussi le système utilisé par le GPS, où tous les satellites émettent dans le même canal large bande avec chacun un code différent. D'une manière générale, l'étalement de spectre par séquence directe est utilisé dans les bandes UHF et au dessus.

Procédés à multi porteuses simultanées.

En phonie analogique, nous connaissions un système multi-voies, où chacune utilisait une sous-porteuse modulant une porteuse unique. Si l'on remplace la modulation analogique par une modulation numérique, toutes les sous-porteuses peuvent être attribuées à une même voie. Nous aurons obtenu un étalement de spectre qui aura les mêmes propriétés que le saut de fréquence, sauf que tout le spectre sera occupé en permanence par la même voie, comme avec le séquençement direct ⁽²⁾.

Le problème avec le multi-voies standard réside dans la séparation des voies. Elles nécessitent un filtrage qui, n'étant pas parfait, consomme de la bande passante. La solution consiste à rendre les voies adjacentes orthogonales, ce qui supprime les filtres et la bande perdue qu'ils entraînent.

Les radioamateurs connaissent déjà un système à deux voies orthogonales : la BLU, avec la transmission simultanée de deux voies en BLU+ et BLU- en utilisant le principe du "phasing" pour séparer les voies ⁽³⁾.

En numérique, on peut utiliser les deux voies, aussi bien pour un seul canal que pour plusieurs canaux multiplexés. On peut aussi généraliser le système à un plus grand nombre de voies et on obtient l'**OFDM** (*Orthogonal Frequencies Division Multiplexing*).

L'OFDM

La réception d'un ensemble de signaux analogiques de provenances et de puissances inconnues, nous oblige à avoir pour le récepteur une réjection élevée des canaux adjacents, pouvant atteindre 60 dB en pratique. Mais avec des signaux provenant d'un même émetteur, la dynamique se ramène au SINAD nécessaire pour une bonne démodulation. Ce SINAD peut être relativement faible avec des modulations numériques (10 dB pour du QPSK, 23 dB pour du 64-QAM). En utilisant des porteuses (modulées) orthogonales entre deux canaux adjacents, la dynamique se trouve reportée sur le 2^{ème} canal adjacent. C'est le principe de l'**OFDM** (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

L'orthogonalité permet de gagner près de deux fois en occupation spectrale et donc de doubler le débit pour une même largeur de bande. Ainsi l'espacement en fréquence entre deux porteuses est égal au rythme symbole. Le système est généré à l'aide d'une **IFFT** complexe (*Inverse Fast Fourier Transform*) dont chaque point correspond à une porteuse. Nous avons sur la figure 2 le spectre d'un signal OFDM à trois porteuses (100, 400, 700 Hz) obtenues par IFFT.

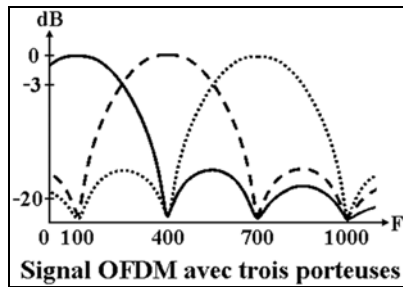


Figure 2 : Enveloppe spectrale d'un signal OFDM

En pratique, l'orthogonalité est dégradée par la chaîne de transmission (émetteur, propagation et récepteur), et l'on utilise divers moyens pour compenser cette dégradation, regroupés sous le vocable "égalisation". En réception on sépare les canaux grâce à une FFT complexe (**F**ast **F**ourier **T**ransform).

L'application la plus connue de l'OFDM est la TNT (**T**élévision **N**umérique **T**errestre).

Nous n'avons fait que survoler le principe de l'étalement de spectre car il n'est pas employé par les modes numériques radioamateurs. Il est surtout utilisé par les liaisons multiplex et la radio-télé diffusion, deux domaines absents du radioamateurisme.

Dans le prochain "Comment ça marche", nous aborderons le formatage des données numériques pour les modes "non conversationnels" ⁽⁴⁾.

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 "tri" à la réception s'effectue en faisant une corrélation entre les séquences reçues (superposées) et la séquence théorique attendue. Plus les codes seront orthogonaux et plus le pic de corrélation sera "pointu" rendant plus facile (et plus rapide) l'identification du correspondant.*
- 2) *Rappel : en dehors de la confidentialité, l'intérêt de l'étalement de spectre réside dans la diversification en fréquence et dans la diminution du rythme Bauds, pour contrer les effets des multitrajets.*
- 3) *Les transmissions téléphoniques intercontinentales par radio se faisaient initialement en modulation AM. Puis avec l'avènement de la BLU, les émetteur AM ont été transformés en émetteurs double BLU avec une porteuse réduite et deux voies, l'une en BLU+ et l'autre en BLU-. On a ainsi doublé la capacité des liaisons à peu de frais.*
- 4) *A contrario, nous rencontrons des modes conversationnels avec la CW, le RTTY, l'AMTOR, etc.). Ces modes ont la particularité d'être en "temps réel" (ou semblant être en temps réel par nos sens).*