

Les modulations OFDM ? ... C'est presque simple!

Emil Novakov, Jean-Yves Frau
IUT1 - Département Réseau et Télécommunications
Université Grenoble Alpes
emil.novakov@univ-grenoble-alpes.fr
Jean-Yves.Frau@univ-grenoble-alpes.fr

Abstract—L'objectif de ce papier est de présenter une approche simple et intuitive pour introduire les modulations OFDM à des étudiants qui ont seulement des connaissances de base sur les modulations numériques. Un autre but du travail est de montrer une voie pour la réalisation de travaux pratiques sur l'OFDM avec du matériel relativement simple et peu coûteux.

Keywords—modulation numérique, OFDM, haut débit

I. INTRODUCTION

Quel est le point commun entre ces systèmes de communications radio:

- la télévision numérique terrestre (TNT ou DVB)
- la télévision numérique par satellite
- la radio diffusion numérique terrestre (DAB)
- les réseaux sans fil WiFi (802.11a, g, n, ac)
- la téléphonie mobile de 4ème génération (LTE)
- les liaisons filaires du type ADSL ?

Tous ces systèmes sont basés sur le procédé de codage de l'information numérique OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Dans des conditions de propagation radio réelles les signaux radio transmis sont réfléchis par les immeubles, les obstacles naturels ou par le sol ce qui fait que le récepteur reçoit plusieurs « copies » du signal original. Les différents signaux se superposent au niveau de l'antenne de réception et en fonction des retards entre eux peuvent créer des évanouissements ou des augmentations de l'amplitude du signal radio reçu (phénomène d'interférence). En même temps la réception de plusieurs « copies » du signal décalées dans le temps introduit une interférence entre les données transmises (interférence inter symboles). Ces deux phénomènes limitent le débit maximal des données à transmettre. Les modulations OFDM apportent une solution efficace à ces problèmes et permettent de réaliser des communications radio numériques à haut débit dans des environnements à réflexions multiples. De plus ces modulations permettent une utilisation optimale du spectre radio. Ceci explique leur très large utilisation. En fait, il ne serait pas exagéré de dire, qu'actuellement la plupart des systèmes de communications radio numériques à haut débit destinés à travailler dans des environnements à propagation multiple utilisent l'OFDM.

La définition mathématique du signal OFDM classique est la suivante. On prend un ensemble de q bits à transmettre (une

trame) et on le divise en N bloc de p bit chacun ($N = q/p$). A chaque bloc de p bit on associe un nombre complexe $S_k = I_k + jQ_k$ ($k = 1 \dots N$). Si la durée du bit est T_B la durée de S_k est $T_S = qT_B$.

On prend ensuite l'ensemble des N nombres complexes S_k et on forme le signal OFDM complexe en bande de base:

$$S_{BB}(t) = \sum_{k=1}^N S_k e^{j2\pi kt/T_S} \quad 0 \leq t < T_S \quad (1)$$

$S_{BB}(t)$ s'appelle aussi symbole OFDM et encode en fait le bloc de q bits. Sa durée T_S est égale à la durée de la trame de q bits. Le terme $e^{j2\pi kt/T_S}$ représente un signal sinusoïdal (sous-porteuse) de fréquence k/T_S . Au total $S_{BB}(t)$ regroupe N sous-porteuses qui sont orthogonales entre elles.

La condition d'orthogonalité peut s'exprimer par l'expression:

$$I = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} e^{j2\pi(k_l - k_m)t/T_S} dt \quad (2)$$

$$I = 1 \text{ si } l = m \text{ et } I = 0 \text{ si } l \neq m.$$

Le signal réel OFDM en bande de base transposé sur une fréquence porteuse f_c , ou signal modulé, est :

$$S_{RF}(t) = \text{Re}\{S_{BB}(t)e^{j2\pi f_c t}\} \quad (3)$$

On peut remarquer aussi que l'équation (1) est en fait une transformée de Fourier inverse.

Les trois équations ci-dessus définissent la forme d'onde OFDM de base (ou classique). C'est aussi simple que ça, ou presque ...

Le problème c'est que cette façon rigoureuse d'exposer le principe de l'OFDM n'a aucune chance d'être comprise par des étudiants de deuxième année en IUT Réseaux et télécommunications ou par des étudiants en licence professionnelle (et même par des étudiants plus avancés ...). L'équation (1) est très riche en information (q bits), mais son sens physique n'est pas évident.

L'objectif de ce papier est d'essayer de trouver une approche relativement simple et intuitive pour introduire les modulations OFDM à des étudiants qui ont seulement des connaissances de base sur les modulations numériques. Un autre but du travail est de montrer une voie pour la réalisation de travaux pratiques sur l'OFDM avec du matériel relativement simple et peu coûteux.