



# **Modulation multi-porteuses : Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**

Réalisé par les élèves ingénieurs

**AHOUANDJINOUE Bill Dieumène Michaël & ALONOUMI Cédric Bosco**

Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi – Université d'Abomey-Calavi

**EPAC – UAC**

**Département de Génie Informatique et Télécommunications**

07/06/2022

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>1</b>
A    Stratégies de transmission . . . . .	2
B    Principes généraux . . . . .	4
C    Aspect pratique . . . . .	6
C.1    Avantages . . . . .	6
C.2    Inconvénients et approches de solutions . . . . .	7
C.3    Variantes de l’OFDM . . . . .	9
C.4    Domaines d’application de l’OFDM . . . . .	11
C.5    Simulation . . . . .	12
<b>Conclusion</b>	<b>18</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>19</b>
<b>Liste des équations</b>	<b>20</b>
<b>Annexe</b>	<b>21</b>
<b>Références</b>	<b>21</b>

# Introduction

Au fur et à mesure que nous évoluons, les besoins en améliorations technologiques augmentent. Nous avons besoin de débits plus élevés, d'une meilleure qualité de service, etc. Pour rendre cela réel, il est donc utile d'améliorer les différentes techniques utilisées pour la transmission de données. De ce fait, ce document résumera l'essentiel à connaître sur la technique de multiplexage OFDM.

## A Stratégies de transmission

La modulation **OFDM** (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ou encore DMT (Discrete MultiTone modulation) repose sur le principe du multiplexage fréquentiel. Le canal de transmission est découpé en sous-canaux, chaque sous-porteuse transporte  $N$  bits ou symboles. L'OFDM en répartissant le flux binaire sur  $N$  porteuses (figure 1), divise par  $N$  la rapidité de modulation de chaque porteuse réduisant ainsi les effets de l'interférence de symboles et optimisant l'utilisation du spectre radio-fréquence.

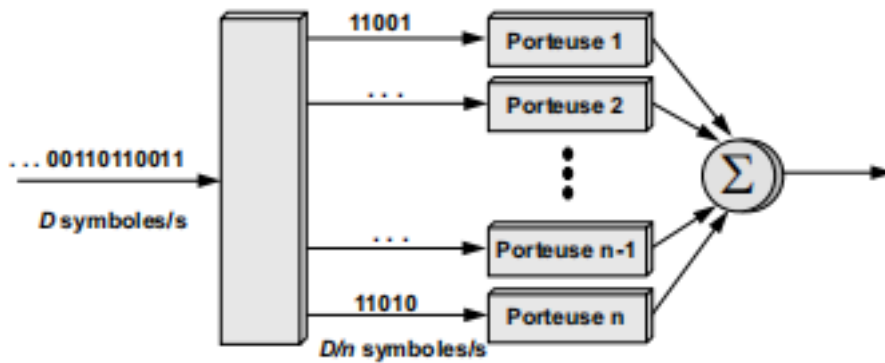


FIGURE 1 : Principe de la modulation OFDM [1]

L'optimisation de l'occupation de l'espace fréquentiel conduit à définir des porteuses proches les une des autres, engendrant ainsi un risque d'interférence entre porteuses adjacentes<sup>1</sup>. Aussi, pour minimiser ce risque, les sous-porteuses sont définies de telle manière que le maximum de puissance de leur spectre corresponde au minimum de puissance des porteuses voisines : on parle de porteuses dites **orthogonales**.

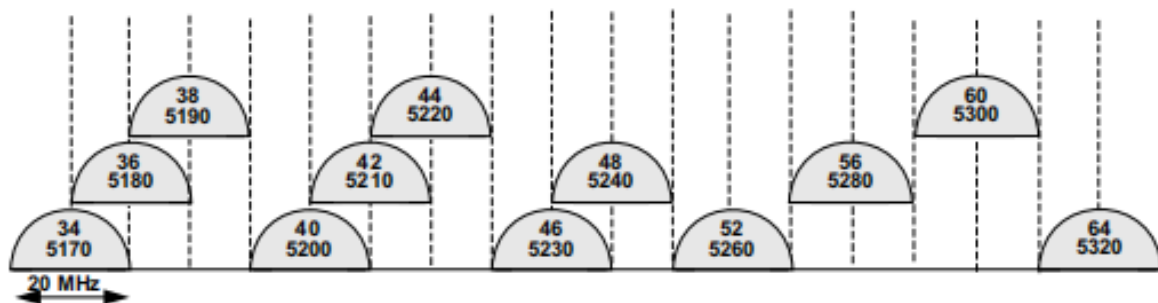
En codage orthogonal, l'espacement entre chaque sous-porteuse doit être égal à  $\Delta f = \frac{k}{T}$ , où  $T$  secondes est la durée utile d'un symbole (c'est-à-dire la taille de la fenêtre de capture du récepteur), et  $k$  est un entier positif, généralement égal à 1. Par conséquent, avec  $N$  sous-porteuses, la largeur totale de la bande passante sera de  $B = N \times \Delta f$  [2].

L'utilisation de multiporteuses permet aussi d'adapter le débit aux conditions de propagation. En fonction des conditions de transmission (distance, perturbations, ...) le débit peut être réduit de 54 Mbit/s à 48, 36, 24, 12 et enfin 6 Mbit/s [1]. Dans la bande des 5 GHz, selon la norme **IEEE 802.11a**, les canaux d'une largeur de 20 MHz sont espacés de 5 MHz,

1. ICI, Inter Carrier Interférence

allant de 5170 GHz pour le canal 34 à 5320 GHz pour le canal 64 (figure 2). Chaque canal comporte 52 sous-canaux de 300 kHz, dont quatre sont utilisés pour la correction d'erreur.

De même que pour le **DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum<sup>2</sup>)**, le schéma montre qu'il est nécessaire d'avoir un écartement d'au moins quatre canaux pour éviter tout recouvrement de spectre. La publication 802.11a implémente deux mécanismes destinés à choisir le meilleur canal de transmission et éviter les interférences : le *DCS* (Dynamic Channel Selection) et le *TPC* (Transmit Power Control).



**FIGURE 2** : Canaux disponibles et fréquences dans la bande des 5 GHz [1]

L'orthogonalité permet une haute efficacité spectrale, le débit total s'approchant du débit de Nyquist<sup>3</sup>, la bande passante étant quasiment utilisée dans son intégralité. Le multiplexage orthogonal produit un spectre de fréquence presque plat (typique du bruit blanc), ce qui entraîne un minimum d'interférences avec les canaux adjacents. Un filtrage séparé de chaque sous-porteuse n'est pas nécessaire pour le décodage, une Transformée de Fourier rapide FFT étant suffisante pour séparer les porteuses entre elles.

Le signal à transmettre est généralement répété sur différentes sous-porteuses. Ainsi dans un canal de transmission avec des chemins multiples où certaines fréquences seront détruites à cause de la combinaison destructive de chemins, le système sera tout de même capable de récupérer l'information perdue sur d'autres fréquences porteuses qui n'auront pas été détruites. Chaque sous-porteuse est modulée indépendamment en utilisant des modulations numériques : BPSK, QPSK, QAM-16, QAM-64, ...

Ce principe permet de limiter l'interférence entre symboles. Pour l'éliminer, on peut ajouter un **intervalle de garde** (c'est-à-dire une période pendant laquelle il n'y a aucune

2. Etalement de spectre à séquence directe

3.  $D_{max} = 2B \times \log_2(V)$  avec  $B$  la bande passante et  $V$ , la valence.

transmission) après chaque symbole émis, très grand devant le délai de transmission (la distance séparant l'émetteur du récepteur divisée par la vitesse de la lumière).

Le décodage OFDM nécessite une synchronisation très précise de la fréquence du récepteur avec celle de l'émetteur. Toute déviation en fréquence entraîne la perte de l'orthogonalité des sous-porteuses et crée par conséquent des interférences entre celles-ci. Cette synchronisation devient difficile à réaliser dès lors que le récepteur est en mouvement, en particulier en cas de variation de vitesse, de direction ou si de nombreux échos parasites sont présents. [2]

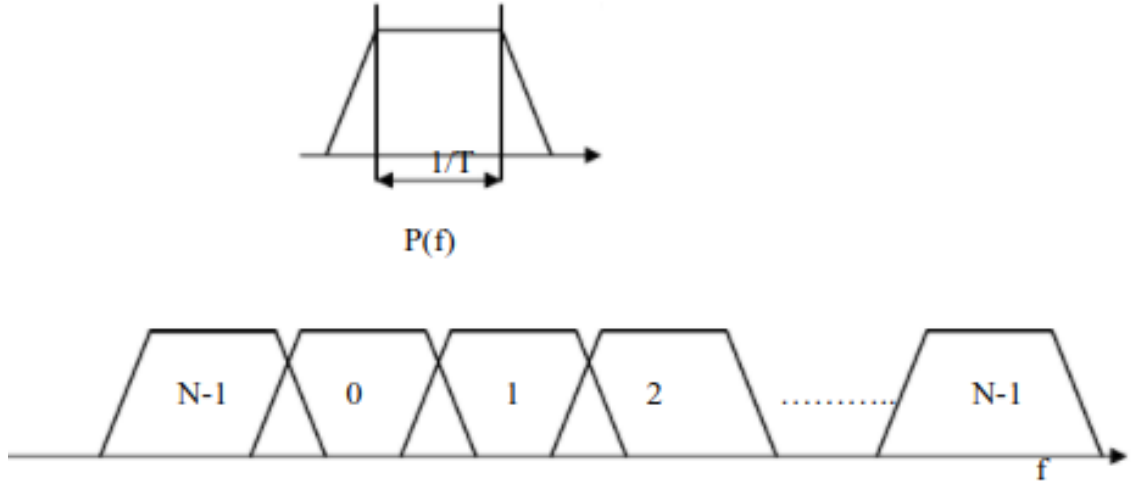
## B Principes généraux [3]

Les systèmes OFDM subdivisent le canal en  $N$  sous canaux dont les fréquences centrales sont espacées d'un multiple de l'inverse de la période symbole  $\frac{1}{T}$ . Contrairement aux modulations mono-porteuses où les données sont émises en série, ces systèmes reposent sur le principe de transmission par bloc. La modulation d'un bloc de symboles (ce bloc constituant un symbole OFDM) est réalisée par une transformée de Fourier inverse.

Soit  $s(k) = s_l(k)$ ,  $1 \leq l \leq N$  le vecteur (symbole OFDM) de taille  $N$  transmis. Chaque composante  $s_l(k)$  est transmise à l'instant  $(kN + l)T$ , où  $k$  et  $l$  sont des entiers positifs;  $l$  désigne le numéro de la porteuse sur laquelle est transmise la composante  $s_l(k)$  du symbole OFDM. Le modulateur FFT génère au rythme  $\frac{N}{T}$  le signal discret transmis à l'instant  $iT$ ,  $i \geq 0$  :

$$x_i = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{l=0}^{N-1} \sum_k p_{i-kN} \exp(j \frac{2\pi l i}{N}) \quad (1)$$

Les fonctions  $p_i, i \geq 0$ , sont des fonctions temporelles de mise en forme ayant un spectre de bande de base  $P(f)$ . On pourra remarquer que la séquence  $x_i$  possède un spectre  $\frac{N}{T}$  périodique et comporte des sous-canaux dont les fréquences sont localisées à des multiples de  $\frac{1}{T}$  (voir figure 3).



**FIGURE 3 :** Spectre d'une modulation multi-porteuse à base de transformée de Fourier [3]

Si on pose  $i = mN + n$ , avec  $m$  le numéro du bloc OFDM tel que  $m \in \mathbb{Z}$  et  $n$  le numéro de la porteuse tel que  $0 \leq n \leq N-1$ , alors le système peut se réécrire sous la forme :

$$x_{mN+n} = x_n(m) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_k p_{(m-k)N+n} \sum_{l=0}^{N-1} s_l(k) \exp(j \frac{2\pi l n}{N}) \quad (2)$$

En posant  $p_{(m-k)N+n} = g_{m-k}(n)$  et  $\tilde{s}_n(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{l=0}^{N-1} s_l(k) \exp(j \frac{2\pi l n}{N})$ , on obtient :

$$x_n(m) = \sum_k g_{m-k}(n) \tilde{s}_n(k) \quad (3)$$

Où  $\tilde{s}_l(k)$ ,  $0 \leq l \leq N-1$ , est la transformée de Fourier inverse discrète de  $s(k) = s_l(k)$ ,  $0 \leq l \leq N-1$ . La figure 4 nous résume le synoptique d'une émission OFDM en bande de base.

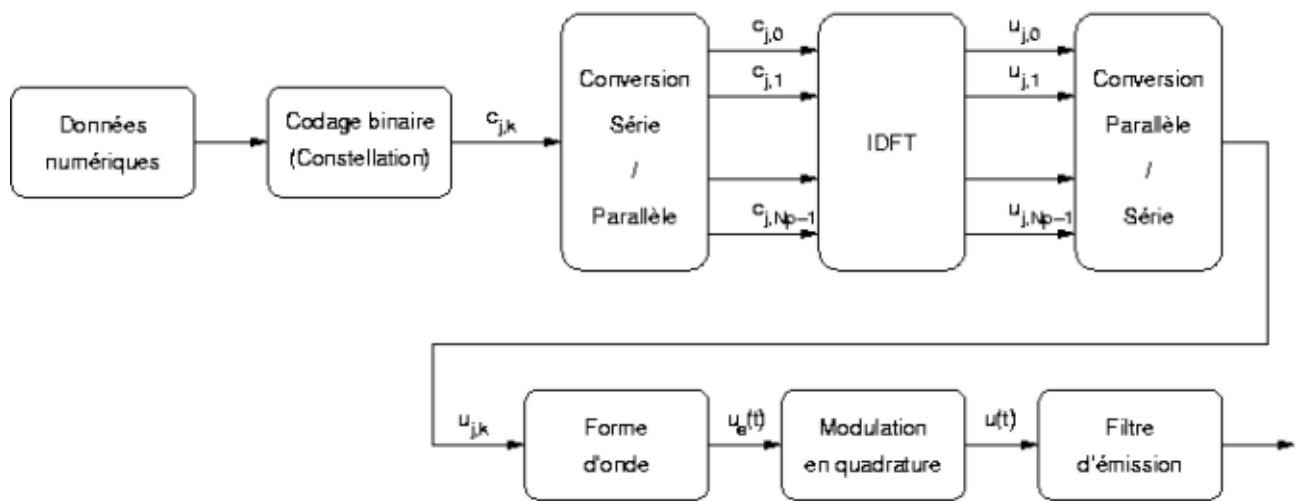


FIGURE 4 : Synoptique d'un émetteur OFDM [4]

A la réception, nous avons la configuration suivante :

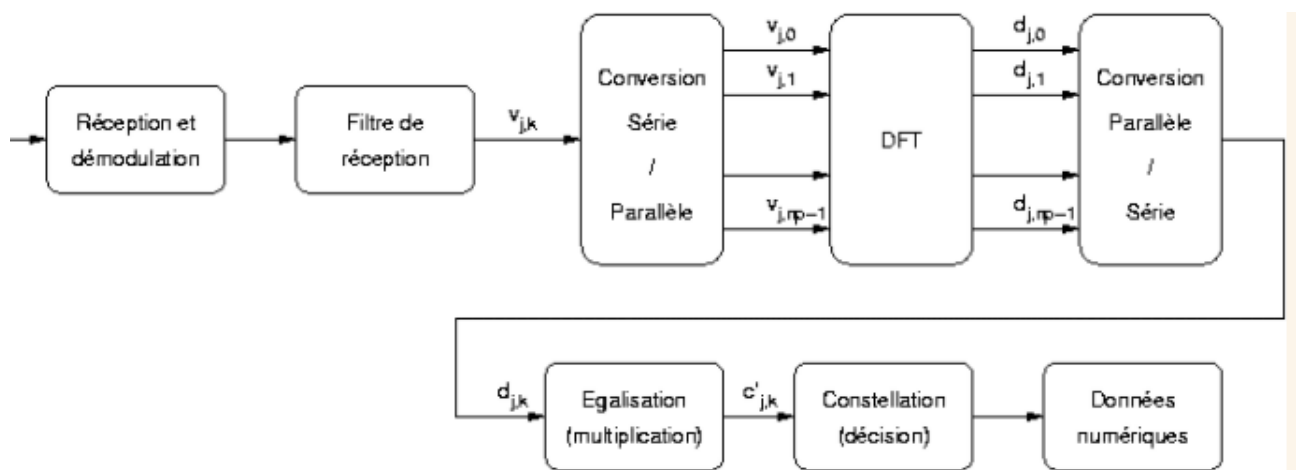


FIGURE 5 : Synoptique d'un récepteur OFDM [4]

## C Aspect pratique

### C.1 Avantages

L'OFDM est un schéma largement adopté et utilisé dans de nombreuses normes de communication (surtout sans fil) car il confère plusieurs avantages que nous énumérons ci-



dessous.

- Une utilisation efficace des ressources fréquentielles en comparaison avec les solutions classiques de multiplexage fréquentiel. Ceci est dû au fait que dans l'OFDM, les canaux se chevauchent tout en gardant une orthogonalité parfaite ;
- Une égalisation numérique et un décodage simple et optimal grâce à l'utilisation de l'intervalle de garde (au prix d'une diminution du débit) et de l'algorithme de Viterbi. De plus, l'utilisation de différents systèmes de codage comme les codes convolutifs et les codes en blocs (*Reed-Salomon*) s'avère très efficace ;
- Les techniques multi-porteuses sont robustes au bruit impulsif puisque chaque porteuse est affectée d'un bruit indépendant des autres porteuses. Contrairement aux modulations mono porteuses où le bruit peut affecter un certain nombre de symboles transmis, la perte d'un symbole dû à un bruit important n'affectent pas les autres symboles ;
- Les techniques OFDM ont également une très grande flexibilité dans l'allocation de bit/débit dans des contextes multi-utilisateurs. En effet, en fonction de la valeur du gain instantané du canal, chaque porteuse peut-être codée indépendamment des autres porteuses.

Par ailleurs, l'OFDM permet :

- De Surmonter les évanouissements<sup>4</sup> sélectifs en fréquence et les distorsions par trajets multiples trouvés dans les canaux à large bande ;
- A l'estimation et à l'égalisation du canal de se produire indépendamment sur chaque sous-porteuse ;
- De Faciliter le partage des ressources sur plusieurs flux de données ;
- De bien s'adapter aux systèmes MIMO<sup>5</sup> et Massive MIMO car chaque sous-porteuse subit un évanouissement plat, de sorte que l'égalisation comprend une seule prise par sous-porteuse.

## C.2 Inconvénients et approches de solutions

Cependant, une telle mise en œuvre comporte également des inconvénients.

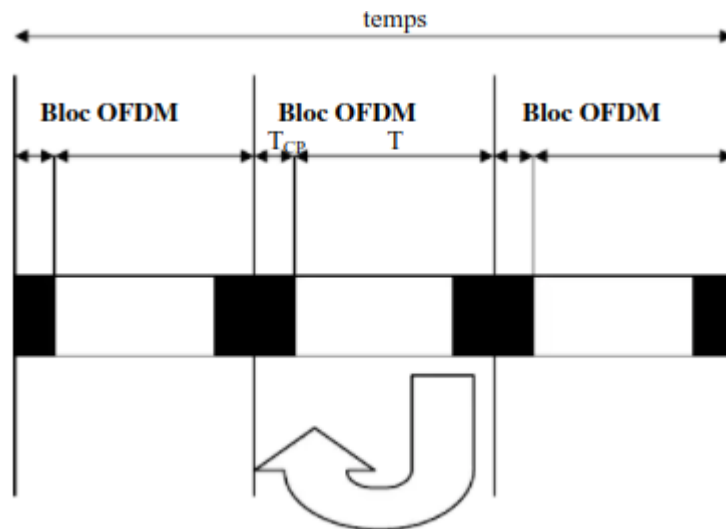
- Lorsque le canal de propagation a une longueur  $L$  donnée, les  $L$  dernières composantes du bloc  $x(k - 1)$  transmis interfèrent avec les  $L$  premières composantes du bloc  $x(k)$  en

---

4. Atténuations sévères sur une partie de la bande de fréquence.

5. Multiple Input, Multiple Output

raison de la mémoire du canal. Des techniques de pré et post-égalisation peuvent être mises en œuvre pour remédier à ce problème mais au prix d'une complexité accrue. Par ailleurs, afin de préserver une égalisation simplifiée, les systèmes OFDM actuelles emploient une astuce appelée **préfixe cyclique** et a pour but d'introduire de la redondance dans chaque bloc transmis (figure 6) ;



**FIGURE 6 :** Symbolisme du préfixe cyclique [3]

$T_{cp}$  représente la durée du cyclique préfixe et  $T$ , la durée du bloc de données utiles.

- La condition d'orthogonalité peut être assurée si les fonctions de mise en forme sont des portes rectangulaires de durée  $T$ . Cependant, en raison du recouvrement spectral des sous-porteuses selon la forme  $\text{sinc}(x)$ , une légère distorsion peut être suffisante pour détruire l'orthogonalité et engendrer des interférences (ICI). Pour certaines applications, une localisation spectrale plus fine peut être préférable mais aboutit dès lors à un système de filtre plus complexe à mettre en œuvre ;
- Après transformée de Fourier inverse discrète du bloc de symbole fréquentiel, l'OFDM peut engendrer des symboles temporels à forte amplitude en comparaison avec des techniques mono-porteuses (pour lesquelles les constellations sont émises directement). Ceci crée des contraintes énormes sur les amplificateurs et conduit à une consommation de puissance importante. A titre d'exemple, si le vecteur de symboles fréquentiel  $[1, 1, 1, \dots, 1]$  est émis, le signal temporel  $[N, 0, 0, \dots, 0]$  est alors obtenu. La première composante du bloc de symbole temporel émis possède alors une très forte amplitude.

Actuellement, les techniques de transmission s'attachent plus à la réduction de l'amplitude du signal appelé également *PAPR* (Peak to Average Power Ratio). En pratique, la plupart des méthodes de réduction du *PAPR* sont basées sur des modifications du signal émis à l'aide d'un vecteur de correction. Le vecteur de correction est ajouté aux symboles fréquentiels créant une nouvelle constellation avec de meilleures propriétés. Ceci induit un accroissement de complexité non négligeable au niveau de l'émetteur ;

- L'OFDM est également très vulnérable aux problèmes de décalage en fréquence (*frequency offset*) et de synchronisation. Dans le premier cas, le décalage engendre de l'interférence entre porteuses qui peut détruire l'orthogonalité des porteuses. Dans le second cas, les erreurs de synchronisation induisent un déphasage sur les symboles reçus. Les techniques mono-porteuses de compensations sont mal adaptées aux techniques multi-porteuses et de nouvelles approches sont en étude [3]. Dans les nouveaux standards, les débits plus élevés accentuent ces difficultés.

### C.3 Variantes de l'OFDM [5]

Plusieurs variantes de l'OFDM existent.

- **COFDM (Coded OFDM)** : Dans ce type OFDM, un codage de correction d'erreur est ajouté dans le signal OFDM lui-même. Il utilise FEC (Forward Error Correction) pour transformer des bits de données en un plus grand nombre de bits qui utilise la redondance pour résoudre le problème d'évanouissement sélectif en fréquence observé dans OFDM. Il est utilisé en DVB-T.
- **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)** : C'est la forme abrégée de l'accès multiple par répartition orthogonale de la fréquence. Dans OFDM, toute la bande passante des sous-porteuses OFDM est utilisée par un seul utilisateur. Dans OFDMA, toute la bande passante est partagée par plusieurs utilisateurs en fonction des allocations de sous-canaux qui leur sont attribuées. Un sous-canal se compose de plusieurs sous-porteuses. Ces sous-porteuses sont contiguës ou réparties selon une permutation.
- **f-OFDM (filtered OFDM)** : Dans ce type, f-OFDM, le module de filtrage est appliqué après le module d'insertion IFFT/CP. Il aide à améliorer le rayonnement hors bande du signal de sous-bande. Des filtres tels que les filtres *Sinc* tronqués souples utilisant la fenêtre de Hann ou la fenêtre RRC et le filtre d'équi-ondulation utilisant l'algorithme

d'échange Remez sont utilisés.

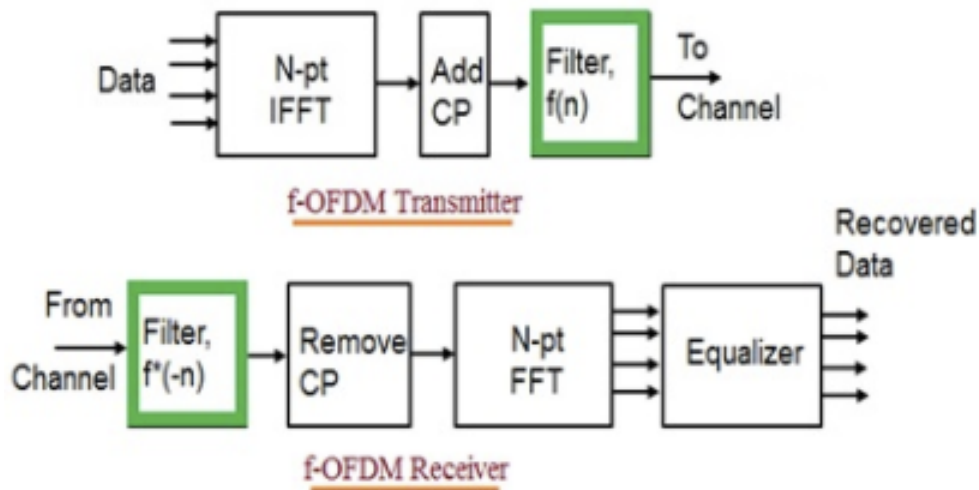
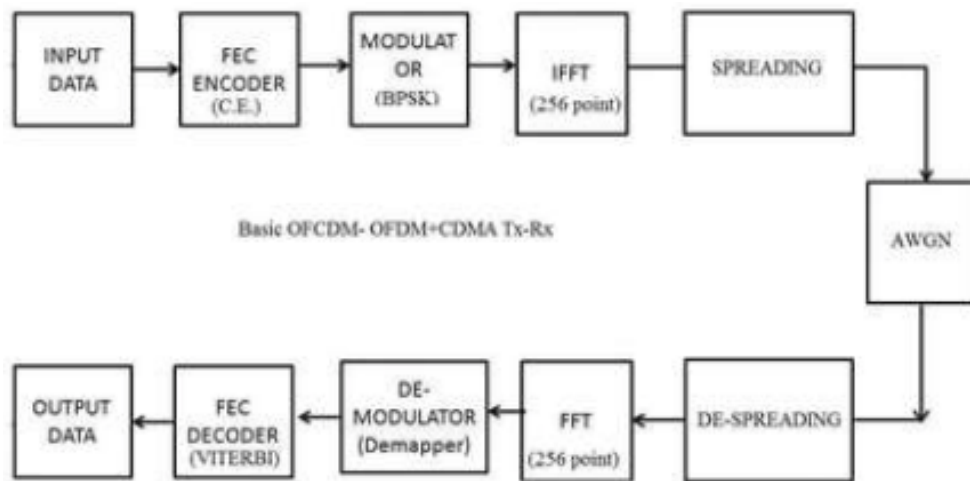


FIGURE 7 : Synoptique émetteur et récepteur f-OFDM [5]

- **VOFDM (Vector OFDM)** : Ce type OFDM utilise MIMO pour tirer parti de ses avantages. Il est développé par Cisco Systems. MIMO aide à atteindre un débit de données plus élevé pendant la transmission. De plus, plusieurs antennes au niveau de l'émetteur et du récepteur utilisent des effets de trajets multiples et contribuent à améliorer la réception du signal.
- **WOFDM (Wideband OFDM)** : Dans cette variante OFDM, l'espacement entre les canaux est maintenu plus grand. Par conséquent, le décalage de fréquence entre l'émetteur et le récepteur n'affecte pas les performances du système. Il est appliqué dans les systèmes WiFi.
- **OFCDM (Orthogonal Frequency Code Division Multiplexing)** : C'est une combinaison des techniques OFDM et CDMA. Dans cette variante OFDM, des modules d'étalement et de désétalement sont respectivement appliqués à l'émetteur et au récepteur OFDM. Il est également connu sous le nom d'hybride-OFDM.



**FIGURE 8 :** Synoptique d’une transmission OFCDM [5]

- **Flash OFDM :** Cette variante OFDM utilise plusieurs porteuses ou tonalités et une technique de saut rapide pour étaler le signal sur la bande.

## C.4 Domaines d’application de l’OFDM [2]

L’OFDM (ou une technique proche) est utilisé dans :

- la télédiffusion numérique terrestre (DVB-T, DVB-H) ;
- la radiodiffusion numérique terrestre DAB ;
- la radiodiffusion numérique terrestre T-DMB ;
- la radiodiffusion numérique DRM ;
- les liaisons filaires telles que l’ADSL, le VDSL, les modems sur courant porteur (home-plug), les modems câble (standard Docsis) et certains réseaux électriques intelligents se basant sur du CPL (G3-PLC [archive], PRIME [archive]) ;
- les réseaux sans-fils basé sur les normes 802.11a, 802.11g, 802.11n, 802.11ac et 802.11ax (Wi-Fi), 802.16 (WiMAX) et HiperLAN ;
- les réseaux mobiles de nouvelles générations (LTE, 4G, 5G) qui utilisent une technique d’accès multiple basée sur l’OFDM appelée OFDMA : Orthogonal Frequency-Division Multiple Access.

## C.5 Simulation [6]

Cette sous-section présente une transmission/réception basée sur le synoptique basique d'une modulation OFDM.

```
clc;
clear all;
close all;
% .....
% Initialization
% .....
no_of_data_bits = 64 %Number of bits per channel extended to 128
M=4 %Number of subcarrier channel
n=256;% Total number of bits to be transmitted at the transmitter
block_size = 16; %Size of each OFDM block to add cyclic prefix
cp_len = floor(0.1 * block_size); %Length of the cyclic prefix
% .....
% Transmitter
% Source generation and modulation
% Generate random data source to be transmitted of length 64
data = randsrc(1, no_of_data_bits, 0:M-1);
figure(1),stem(data); grid on; xlabel('Data Points '); ylabel('Amplitude ')
title('Original Data ')
% Perform QPSK modulation on the input source data
qpsk_modulated_data = pskmod(data, M);
figure(2),stem(qpsk_modulated_data);title('QPSK Modulation '), grid on;
% Converting the series data stream into four parallel data stream
% to form four sub carriers
S2P = reshape(qpsk_modulated_data, no_of_data_bits/M,M)
Sub_carrier1 = S2P(:,1)
Sub_carrier2 = S2P(:,2)
Sub_carrier3 = S2P(:,3)
Sub_carrier4 = S2P(:,4)
figure(3), subplot(4,1,1),grid on,
```

```

stem(Sub_carrier1), title('Subcarrier1 ');
subplot(4,1,2), stem(Sub_carrier2), title('Subcarrier2 '), grid on;
subplot(4,1,3), stem(Sub_carrier3), title('Subcarrier3 '), grid on;
subplot(4,1,4), stem(Sub_carrier4), title('Subcarrier4 '), grid on;
% IFFT OF FOUR SUB_CARRIERS
number_of_subcarriers=4;
cp_start=block_size-cp_len;
ifft_Subcarrier1 = ifft(Sub_carrier1)
ifft_Subcarrier2 = ifft(Sub_carrier2)
ifft_Subcarrier3 = ifft(Sub_carrier3)
ifft_Subcarrier4 = ifft(Sub_carrier4)
figure(4), subplot(4,1,1), plot(real(ifft_Subcarrier1), 'r'), grid on
title('IFFT on all the sub-carriers ')
subplot(4,1,2), plot(real(ifft_Subcarrier2), 'c'), grid on
subplot(4,1,3), plot(real(ifft_Subcarrier3), 'b'), grid on
subplot(4,1,4), plot(real(ifft_Subcarrier4), 'g'), grid on
% ADD-CYCLIC PREFIX
for i=1:number_of_subcarriers
    ifft_Subcarrier(:,i) = ifft((S2P(:,i)),16) % 16 is the ifft point
    for j=1:cp_len
        cyclic_prefix(j,i) = ifft_Subcarrier(j+cp_start,i)
    end
    Append_prefix(:,i) = vertcat( cyclic_prefix(:,i), ...
        ifft_Subcarrier(:,i))
% Appends prefix to each subcarriers
end
A1=Append_prefix(:,1);
A2=Append_prefix(:,2);
A3=Append_prefix(:,3);
A4=Append_prefix(:,4);
figure(5), subplot(4,1,1), plot(real(A1), 'r'), grid on,
title('Cyclic prefix added to all the sub-carriers ')
subplot(4,1,2), plot(real(A2), 'c'), grid on

```

```

subplot(4,1,3),plot(real(A3),'b'),grid on
subplot(4,1,4),plot(real(A4),'g'),grid on,
figure(11),plot((real(A1)),'r'),grid on,
title('Orthogonality'),hold on,
plot((real(A2)),'c'),hold on ,grid on,
plot((real(A3)),'b'),hold on ,grid on,
plot((real(A4)),'g'),hold on ,grid on
%Convert to serial stream for transmission
[rows_Append_prefix cols_Append_prefix]=size(Append_prefix)
len_ofdm_data = rows_Append_prefix*cols_Append_prefix
% OFDM signal to be transmitted
ofdm_signal = reshape(Append_prefix , 1, len_ofdm_data);
figure(6),plot(real(ofdm_signal)); xlabel('Time'); ylabel('Amplitude ');
title('OFDM Signal ');grid on;
% .....
%Passing time domain data through channel and AWGN
channel = randn(1,2) + sqrt(-1)*randn(1,2);
after_channel = filter(channel , 1, ofdm_signal);
awgn_noise = awgn(zeros(1,length(after_channel)),0);
recvd_signal = awgn_noise+after_channel; % With AWGN noise
figure(7),plot(real(recvd_signal)),xlabel('Time'); ylabel('Amplitude ');
title('OFDM Signal after passing through channel');grid on;
% .....
% OFDM receiver part
recvd_signal_paralleled = reshape(recvd_signal ,rows_Append_prefix ,...
    cols_Append_prefix );
% Remove cyclic Prefix
recvd_signal_paralleled(1:cp_len,:)=[];
R1=recvd_signal_paralleled(:,1);
R2=recvd_signal_paralleled(:,2);
R3=recvd_signal_paralleled(:,3);
R4=recvd_signal_paralleled(:,4);
figure(8),plot((imag(R1)),'r'),subplot(4,1,1),plot(real(R1),'r'),

```

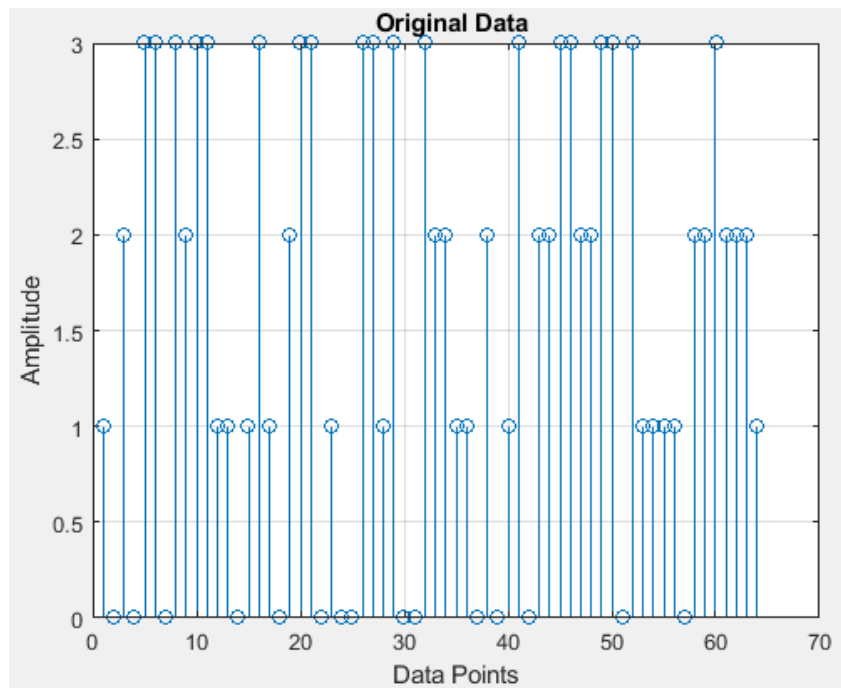


```

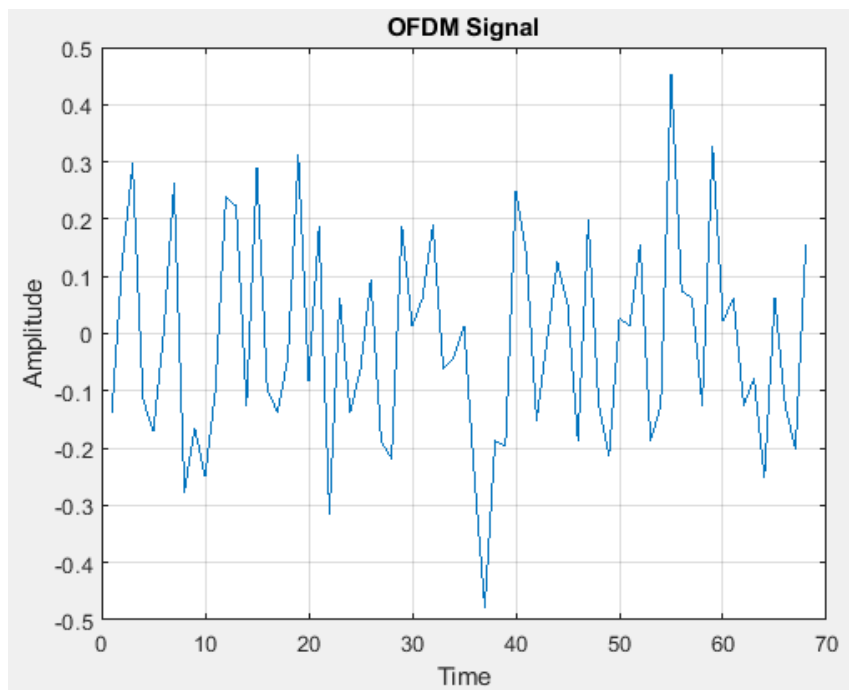
grid on,title('Cyclic prefix removed from the four sub-carriers ')
subplot(4,1,2),plot(real(R2),'c'),grid on
subplot(4,1,3),plot(real(R3),'b'),grid on
subplot(4,1,4),plot(real(R4),'g'),grid on
% FFT Of recieved signal
for i=1:number_of_subcarriers
    % FFT
    fft_data(:,i) = fft(recvd_signal_paralleled(:,i),16);
end
F1=fft_data(:,1);
F2=fft_data(:,2);
F3=fft_data(:,3);
F4=fft_data(:,4);
figure(9), subplot(4,1,1),plot(real(F1),'r'),grid on,
title('FFT of all the four sub-carriers ')
subplot(4,1,2),plot(real(F2),'c'),grid on
subplot(4,1,3),plot(real(F3),'b'),grid on
subplot(4,1,4),plot(real(F4),'g'),grid on
% Signal Reconstructed
% Conversion to serial and demodulationa
recvd_serial_data = reshape(fft_data, 1,(16*4));
qpsk_demodulated_data = pskdemod(recvd_serial_data,4);
figure(10)
stem(data)
hold on
stem(qpsk_demodulated_data,'rx');
grid on;xlabel('Data Points');ylabel('Amplitude');
title('Recieved Signal with error')

```

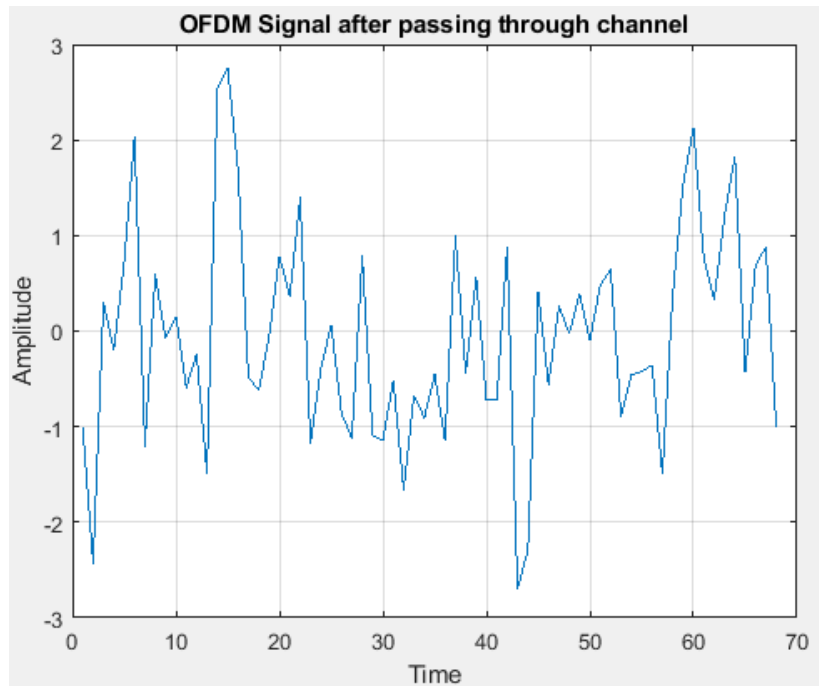
Les captures ci dessous présentes les résultats de simulation.



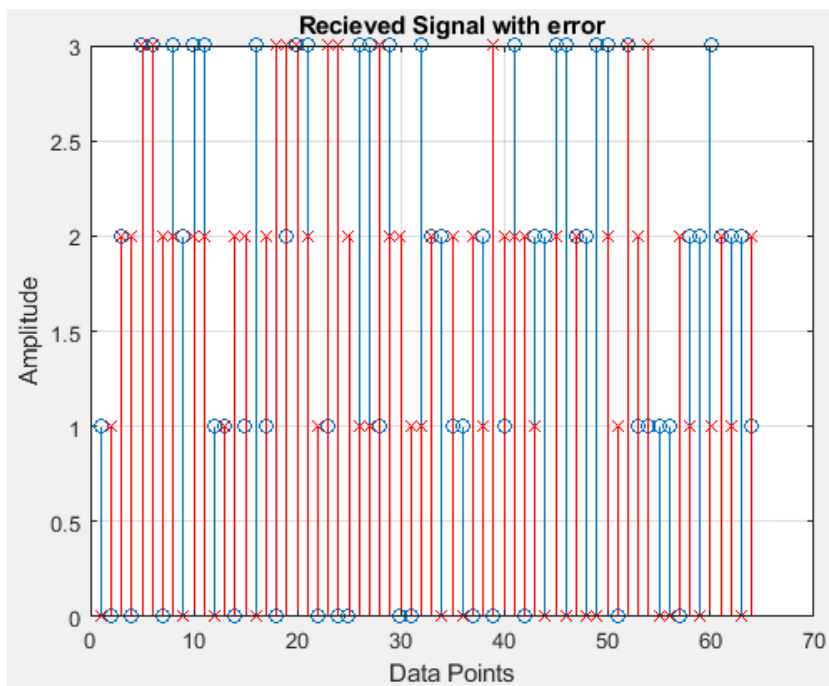
**FIGURE 9 :** Données binaires à transmettre



**FIGURE 10 :** Signal OFDM transmis



**FIGURE 11 :** Signal bruité OFDM reçu



**FIGURE 12 :** Données binaires reçues

# Conclusion

Nous retenons que l'OFDM est une technique de multiplexage qui a permis de corriger plusieurs aspects des techniques qui la précèdent dans le but global d'améliorer la qualité de service. Elle présente donc de nombreux avantages mais aussi des inconvénients qui sont au fil du temps corrigés. Ainsi, il existe plusieurs variantes : le DMT (discrete multitone modulation) fait référence à un système de transmission OFDM en bande de base. Le COFDM (Coded orthogonal frequency-division multiplexing) introduit un code correcteur d'erreurs qui permettra de pallier les évanouissements au prix d'une diminution de l'efficacité spectrale. Le WCP-OFDM (weighted cyclic prefix orthogonal frequency-division multiplexing) prévoit l'ajout d'un préfixe cyclique et la pondération du signal en sortie de l'émetteur afin de s'adapter aux canaux mobiles à trajets multiples.

# Table des figures

1	Principe de la modulation OFDM [1] . . . . .	2
2	Canaux disponibles et fréquences dans la bande des 5 GHz [1] . . . . .	3
3	Spectre d'une modulation multi-porteuse à base de transformée de Fourier [3] . . . . .	5
4	Synoptique d'un émetteur OFDM [4] . . . . .	6
5	Synoptique d'un récepteur OFDM [4] . . . . .	6
6	Symbolisme du préfixe cyclique [3] . . . . .	8
7	Synoptique émetteur et récepteur f-OFDM [5] . . . . .	10
8	Synoptique d'une transmission OFCDM [5] . . . . .	11
9	Données binaires à transmettre . . . . .	16
10	Signal OFDM transmis . . . . .	16
11	Signal bruité OFDM reçu . . . . .	17
12	Données binaires reçues . . . . .	17

# Listes des équations

1. Expression mathématique du signal discret transmis . . . . .	4
2. Expression mathématique du signal discret transmis en fonction du numéro du bloc et celui de la porteuse . . . . .	5
3. Expression mathématique générale du signal discret transmis . . . . .	5

# Annexe

**802.11a** - Norme IEEE définissant un réseau local sans fil qui utilise la bande des 5 GHz, doté de 8 canaux de transmission (en France) - Taux de transfert jusqu'à 54 Mbps. Autorise les architectures Infrastructure uniquement. Supporte l'encryptage WEP. Il existe des solutions bi bandes intégrant le 802.11b & a. Opérant dans la bande des 5 à 5.8 GHz, la norme 802.11a met l'accent sur l'utilisation de la technologie OFDM au niveau physique pour atteindre des débits de 54 Mbps. OFDM est également la technologie préconisée par la norme HiperLAN/2. La norme prévoit grâce à cette technologie une meilleure immunité aux interférences.

OFDM divise les canaux de 20 MHz en 52 sous-canaux de 0,3125 MHz (sur 64 sous-canaux possibles) pour obtenir au choix des débits de 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 ou 54 Mbps. Seuls les débits de 6, 12 et 24 Mbps doivent être impérativement implémentés sur tous les produits.

**DSSS** - Technologie à étalement du spectre en séquence directe - Transmission radio au sein de la bande de fréquence des 2,4 GHz sans licence. La technologie DSSS est une technique de modulation développée dans les années 1940 pour étaler un signal de transmission sur une large bande de fréquence radio. Cette technique est idéale pour la transmission de données car elle est moins sensible au bruit radioélectrique et ne crée que peu d'interférences.

**TPC** - Le contrôle de la puissance de transmission est un mécanisme technique utilisé dans certains dispositifs de mise en réseau afin d'éviter trop d'interférences indésirables entre différents réseaux sans fil.

# Bibliographie

- [1] Claude SERVIN. Réseaux & Télécoms, volume 962 pages. DUNOD, 2e ed., 2017.
- [2] [www.wikipedia.fr. Orthogonal Frequency Division Multiplexing.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing#:~:text=4.1%20Liens%20externes-,Principe,et%20%C3%A0%20des%20fr%C3%A9quences%20diff%C3%A9rentes.)  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency-division\\_multiplexing#:~:text=4.1%20Liens%20externes-,Principe,et%20%C3%A0%20des%20fr%C3%A9quences%20diff%C3%A9rentes.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing#:~:text=4.1%20Liens%20externes-,Principe,et%20%C3%A0%20des%20fr%C3%A9quences%20diff%C3%A9rentes.)
- [3] Mérouane Debbah. OFDM.  
[https://www.academia.edu/29617851/OFDM\\_Ce\\_document\\_est\\_une\\_br%C3%A8ve\\_introduction\\_aux\\_principes\\_de\\_lOFDM\\_Orthogonal\\_Frequency\\_Division\\_Multiplexing.](https://www.academia.edu/29617851/OFDM_Ce_document_est_une_br%C3%A8ve_introduction_aux_principes_de_lOFDM_Orthogonal_Frequency_Division_Multiplexing.)
- [4] RÉDUCTION DES EFFETS DES NON-LINÉARITÉS DANS UNE MODULATION MULTIPORTEUSE A L'AIDE DE RÉSEAUX DE NEURONES.  
<https://www.becoz.org/these/memoirehtml/ch05s03.html>.
- [5] OFDM Variants.  
<https://www.rfwireless-world.com/Terminology/OFDM-Variants.html>.
- [6] OFDM MATLAB Code.  
<https://www.rfwireless-world.com/source-code/MATLAB/OFDM-matlab-code.html>.