Mise en place d'une chaîne de communication digitale – OFDM

[Python]

Encadré Par :

Pr. AYTOUNA Fouad

Realisé par :

BENARIF Redouane

Objectif

Dans ce projet, nous allons explorer les bases d'un système **OFDM** du côté émission et réception. L'OFDM (**multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence)** est un système multicarrier largement utilisé dans diverses transmissions sans fil comme **LTE**, **WiMAX, DVB-T** et **DAB**. Le principe clé d'un système multicarrier implique la division d'un flux de données à haut débit en plusieurs sous-porteuses étroites à débit réduit.

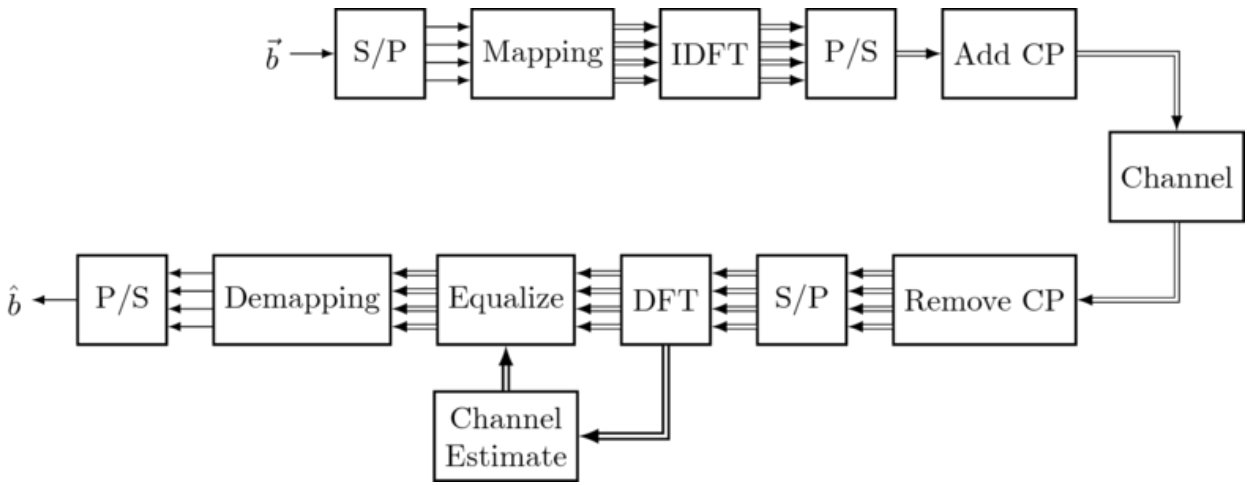
Cette approche présente plusieurs avantages :

1. La durée du symbole étant inversement proportionnelle au débit de symboles, chaque sous-porteuse présente des symboles relativement longs. Ces symboles prolongés sont résistants aux problèmes tels que l'affaiblissement par trajets multiples, courant dans les systèmes sans fil.

2. En cas d'atténuation sévère d'une porteuse spécifique due aux caractéristiques sélectives en fréquence du canal (entraînant une réception très faible sur cette porteuse), seules les données de cette sous-porteuse sont perdues, et non la totalité du flux de données.

3. Les systèmes multicarriers facilitent l'allocation efficace des ressources entre plusieurs utilisateurs en attribuant différentes sous-porteuses à différents utilisateurs.

Veuillez considérer le schéma en blocs suivant, qui englobe les blocs fondamentaux du système OFDM :



Aperçu

Ce cahier **Jupyter** offre une exploration approfondie du système de multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM), couvrant ses composants fondamentaux, ses opérations et ses avantages. Le cahier examine à la fois les aspects de l'émetteur et du récepteur d'OFDM, en mettant en lumière son application dans divers systèmes de communication sans fil tels que **LTE, WiMAX**, **DVB-T** et **DAB.**

Code Blocks :

Composants de l'émetteur :

- Génération des sous-porteuses
- Mappage des données aux sous-porteuses
- Insertion des porteuses pilotes
- Transformée de Fourier inverse rapide (IFFT)
- Ajout de préfixe cyclique
- Transmission du signal

Composants du récepteur :

- Réception du signal
- Suppression du préfixe cyclique
- Transformée de Fourier rapide (FFT)
- Démappage des sous-porteuses
- Estimation du canal à l'aide des porteuses pilotes
- Récupération des données

Bibliothèques utilisées :

- **NumPy**
- **Matplotlib**
- **Scipy**

Instructions d'exécution :

1. Assurez-vous que toutes les bibliothèques requises sont installées.

2. Exécutez les cellules dans l'ordre séquentiel.

3. Vérifiez les sorties et visualisations aux sections pertinentes.

Utilisation :

Ce cahier sert de ressource pédagogique pour comprendre les blocs de base d'un système OFDM. Il peut être utilisé à des fins d'apprentissage, d'expérimentation avec différents paramètres et pour acquérir des informations sur le fonctionnement d'OFDM.

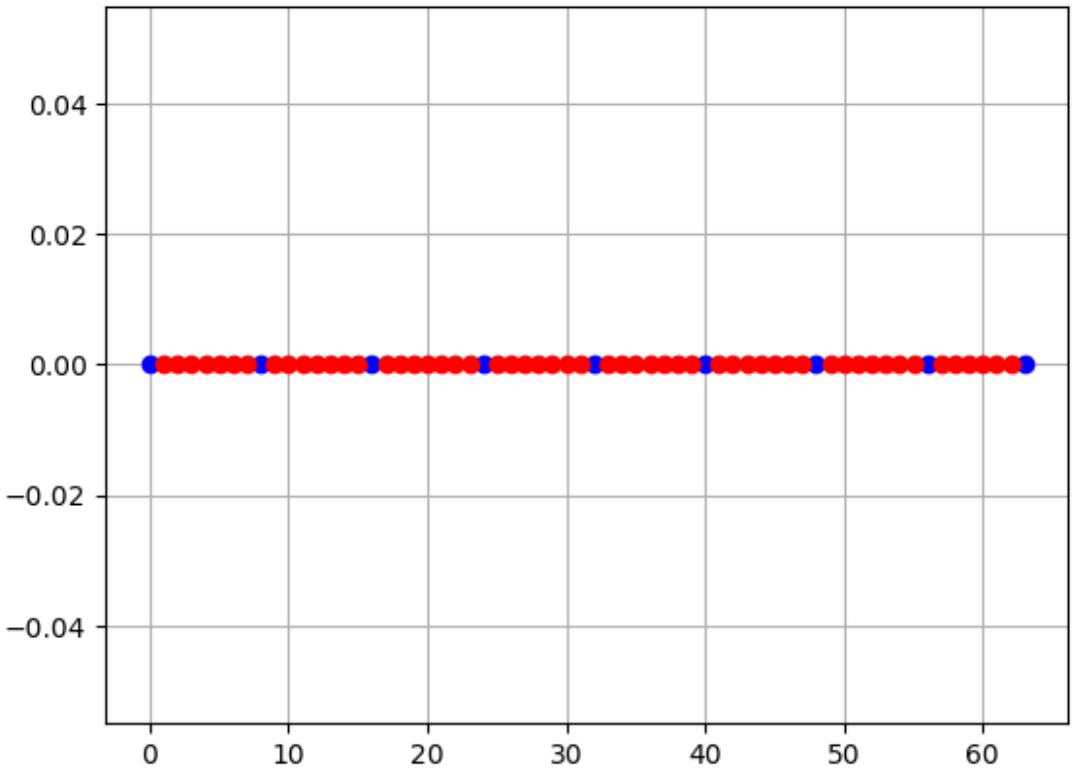
Remerciement

Un immense merci au Professeur Fouad Aytouna pour son enseignement remarquable. Votre passion et votre soutien ont été inestimables.

Implémentation

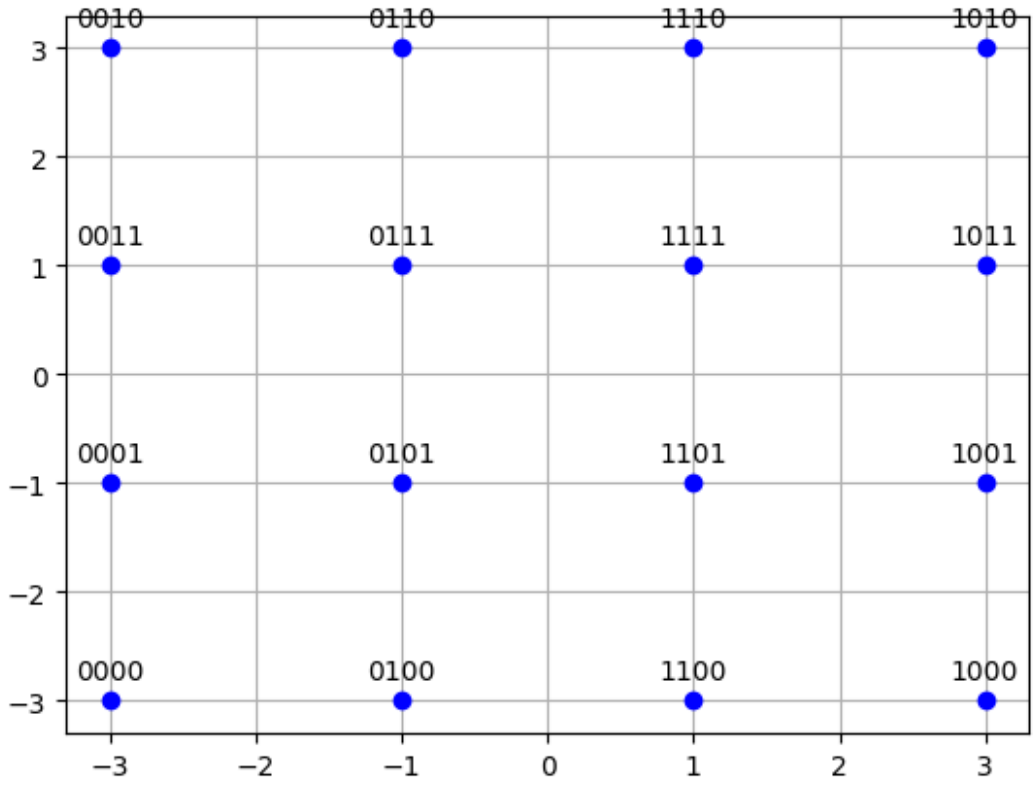
```
import numpy as np
import scipy.interpolate
import scipy
import matplotlib.pyplot as plt

K = 64 # number of OFDM subcarriers
CP = K//4  # length of the cyclic prefix: 25% of the block
P = 8 # number of pilot carriers per OFDM block
pilotValue = 3+3j # The known value each pilot transmits
allCarriers = np.arange(K)  # indices of all subcarriers ([0, 1, ...
K-1])

pilotCarriers = allCarriers[::K//P] # Pilots is every (K/P)th carrier.

# For convenience of channel estimation, let's make the last carriers
also be a pilot
pilotCarriers = np.hstack([pilotCarriers, np.array([allCarriers[-
1]])])
P = P+1

# data carriers are all remaining carriers
dataCarriers = np.delete(allCarriers, pilotCarriers)

print ("allCarriers:   %s" % allCarriers)
print ("pilotCarriers: %s" % pilotCarriers)
print ("dataCarriers:  %s" % dataCarriers)
plt.plot(pilotCarriers, np.zeros_like(pilotCarriers), 'bo',
label='pilot')
plt.plot(dataCarriers, np.zeros_like(dataCarriers), 'ro',
label='data')
plt.grid(True)
```

```
allCarriers:   [ 0  1  2  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15 16 17
18 19 20 21 22 23
 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46
47
 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63]
pilotCarriers: [ 0  8 16 24 32 40 48 56 63]
dataCarriers:  [ 1  2  3  4  5  6  7  9 10 11 12 13 14 15 17 18 19 20
21 22 23 25 26 27
 28 29 30 31 33 34 35 36 37 38 39 41 42 43 44 45 46 47 49 50 51 52 53
54
 55 57 58 59 60 61 62]
```

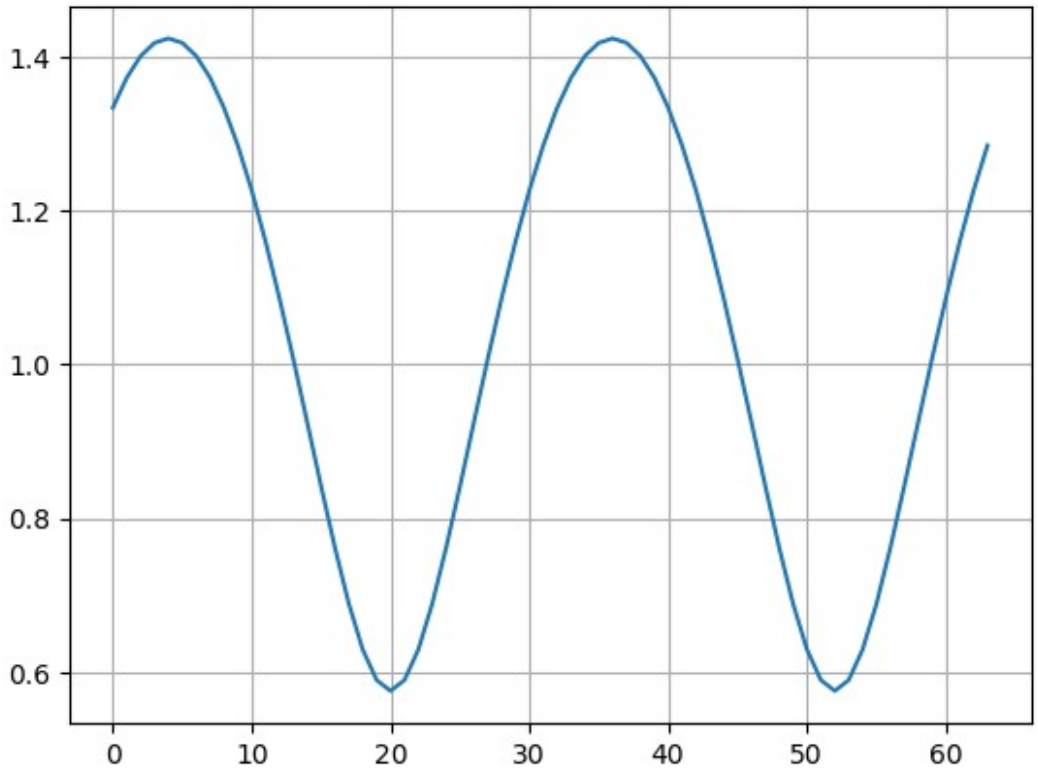



```
mu = 4 # bits per symbol (i.e. 16QAM)
payloadBits_per_OFDM = len(dataCarriers)*mu  # number of payload bits
per OFDM symbol

mapping_table = {
    (0,0,0,0) : -3-3j,
    (0,0,0,1) : -3-1j,
    (0,0,1,0) : -3+3j,
    (0,0,1,1) : -3+1j,
    (0,1,0,0) : -1-3j,
    (0,1,0,1) : -1-1j,
    (0,1,1,0) : -1+3j,
    (0,1,1,1) : -1+1j,
    (1,0,0,0) :  3-3j,
    (1,0,0,1) :  3-1j,
    (1,0,1,0) :  3+3j,
    (1,0,1,1) :  3+1j,
    (1,1,0,0) :  1-3j,
    (1,1,0,1) :  1-1j,
    (1,1,1,0) :  1+3j,
    (1,1,1,1) :  1+1j
}
for b3 in [0, 1]:
    for b2 in [0, 1]:
        for b1 in [0, 1]:
```

```
            for b0 in [0, 1]:
                B = (b3, b2, b1, b0)
                Q = mapping_table[B]
                plt.plot(Q.real, Q.imag, 'bo')
                plt.text(Q.real, Q.imag+0.2, "".join(str(x) for x in
B), ha='center')
plt.grid(True)
```




```
demapping_table = {v : k for k, v in mapping_table.items()}

channelResponse = np.array([1, 0, 0.3+0.3j])  # the impulse response
of the wireless channel
H_exact = np.fft.fft(channelResponse, K)
plt.plot(allCarriers, abs(H_exact))
plt.grid(True)

SNRdb = 9  # signal to noise-ratio in dB at the receiver
```




```
bits = np.random.binomial(n=1, p=0.5, size=(payloadBits_per_OFDM, ))
print ("Bits count: ", len(bits))
print ("First 20 bits: ", bits[:20])
print ("Mean of bits (should be around 0.5): ", np.mean(bits))
```

```
Bits count:  220
First 20 bits:  [0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0]
Mean of bits (should be around 0.5):  0.4909090909090909
```

```
def SP(bits):
    return bits.reshape((len(dataCarriers), mu))
bits_SP = SP(bits)
print ("First 5 bit groups")
print (bits_SP[:5,:])
```

```
First 5 bit groups
[[0 1 0 1]
 [0 0 1 0]
 [1 0 1 1]
 [0 1 1 1]
 [0 0 0 0]]
```

```
def Mapping(bits):
    return np.array([mapping_table[tuple(b)] for b in bits])
QAM = Mapping(bits_SP)
print ("First 5 QAM symbols and bits:")
```

```
print (bits_SP[:5,:])
print (QAM[:5])
```

```
First 5 QAM symbols and bits:
[[0 1 0 1]
 [0 0 1 0]
 [1 0 1 1]
 [0 1 1 1]
 [0 0 0 0]]
[-1.-1.j -3.+3.j  3.+1.j -1.+1.j -3.-3.j]
```

```
def OFDM_symbol(QAM_payload):
    symbol = np.zeros(K, dtype=complex) # the overall K subcarriers
    symbol[pilotCarriers] = pilotValue  # allocate the pilot
subcarriers
    symbol[dataCarriers] = QAM_payload  # allocate the pilot
subcarriers
    return symbol
OFDM_data = OFDM_symbol(QAM)
print ("Number of OFDM carriers in frequency domain: ",
len(OFDM_data))
```

```
Number of OFDM carriers in frequency domain:  64
```

```
def IDFT(OFDM_data):
    return np.fft.ifft(OFDM_data)
OFDM_time = IDFT(OFDM_data)
print ("Number of OFDM samples in time-domain before CP: ",
len(OFDM_time))
```

```
Number of OFDM samples in time-domain before CP:  64
```

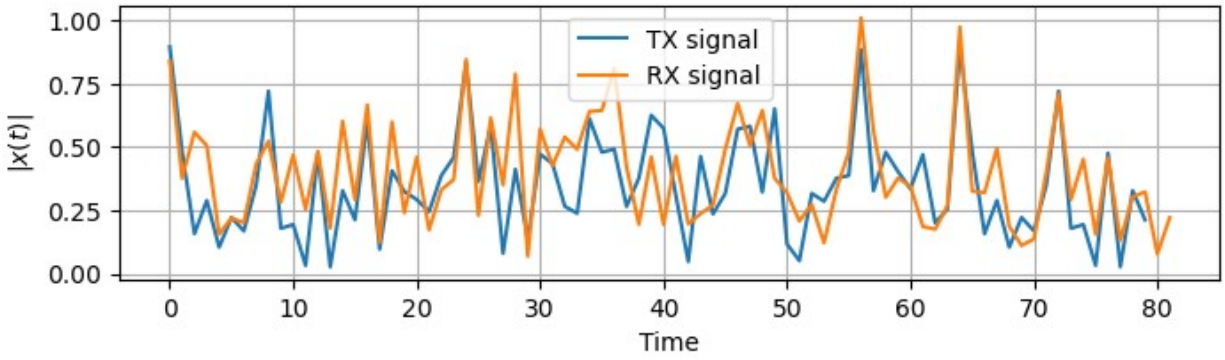
```
def addCP(OFDM_time):
    cp = OFDM_time[-CP:]               # take the last CP samples ...
    return np.hstack([cp, OFDM_time])  # ... and add them to the
beginning
OFDM_withCP = addCP(OFDM_time)
print ("Number of OFDM samples in time domain with CP: ",
len(OFDM_withCP))
```

```
Number of OFDM samples in time domain with CP:  80
```

```
def channel(signal):
    convolved = np.convolve(signal, channelResponse)
    signal_power = np.mean(abs(convolved**2))
    sigma2 = signal_power * 10**(-SNRdb/10)  # calculate noise power
based on signal power and SNR

    print ("RX Signal power: %.4f. Noise power: %.4f" % (signal_power,
sigma2))
```

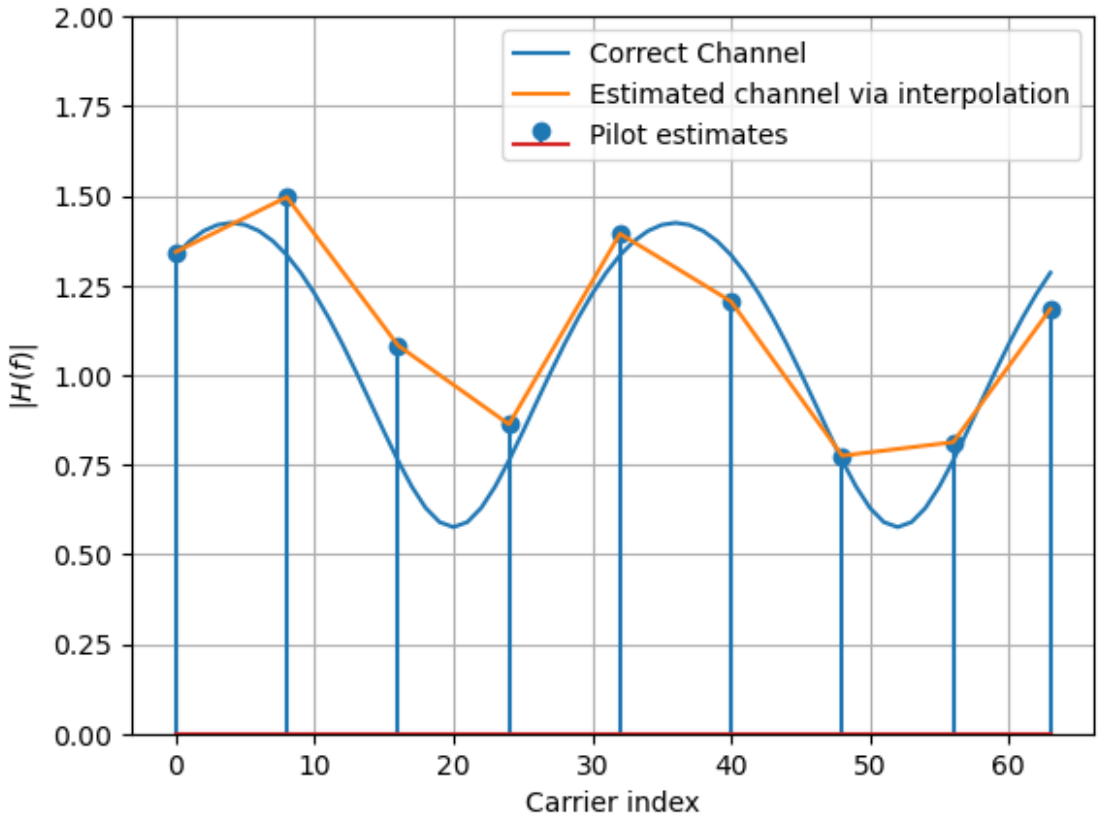
```
    # Generate complex noise with given variance
    noise = np.sqrt(sigma2/2) * (np.random.randn(*convolved.shape)
+1j*np.random.randn(*convolved.shape))
    return convolved + noise
OFDM_TX = OFDM_withCP
OFDM_RX = channel(OFDM_TX)
plt.figure(figsize=(8,2))
plt.plot(abs(OFDM_TX), label='TX signal')
plt.plot(abs(OFDM_RX), label='RX signal')
plt.legend(fontsize=10)
plt.xlabel('Time'); plt.ylabel('$|x(t)|$');
plt.grid(True);
```

```
RX Signal power: 0.1943. Noise power: 0.0245
```



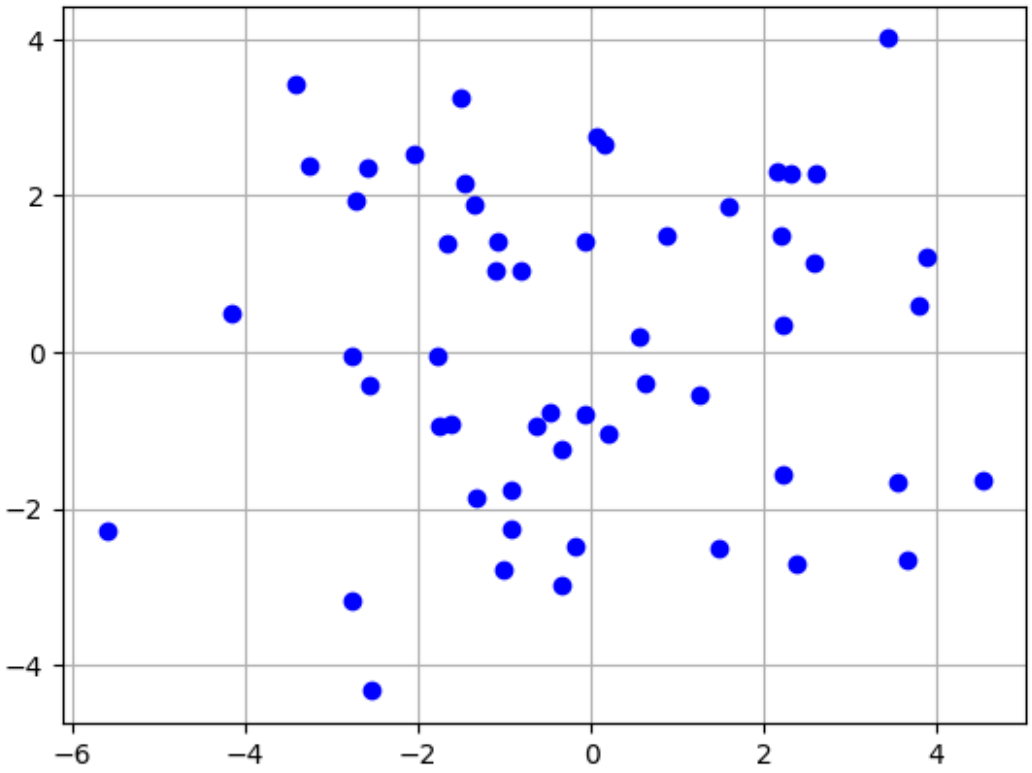

```
def removeCP(signal):
    return signal[CP:(CP+K)]
OFDM_RX_noCP = removeCP(OFDM_RX)

def DFT(OFDM_RX):
    return np.fft.fft(OFDM_RX)
OFDM_demod = DFT(OFDM_RX_noCP)

def channelEstimate(OFDM_demod):
    pilots = OFDM_demod[pilotCarriers]  # extract the pilot values
from the RX signal
    Hest_at_pilots = pilots / pilotValue # divide by the transmitted
pilot values

    # Perform interpolation between the pilot carriers to get an
estimate
    # of the channel in the data carriers. Here, we interpolate
absolute value and phase
    # separately
    Hest_abs = scipy.interpolate.interp1d(pilotCarriers,
abs(Hest_at_pilots), kind='linear')(allCarriers)
    Hest_phase = scipy.interpolate.interp1d(pilotCarriers,
```

```
np.angle(Hest_at_pilots), kind='linear')(allCarriers)
    Hest = Hest_abs * np.exp(1j*Hest_phase)

    plt.plot(allCarriers, abs(H_exact), label='Correct Channel')
    plt.stem(pilotCarriers, abs(Hest_at_pilots), label='Pilot
estimates')
    plt.plot(allCarriers, abs(Hest), label='Estimated channel via
interpolation')
    plt.grid(True); plt.xlabel('Carrier index'); plt.ylabel('$|H(f)|
$'); plt.legend(fontsize=10)
    plt.ylim(0,2)

    return Hest
Hest = channelEstimate(OFDM_demod)
```



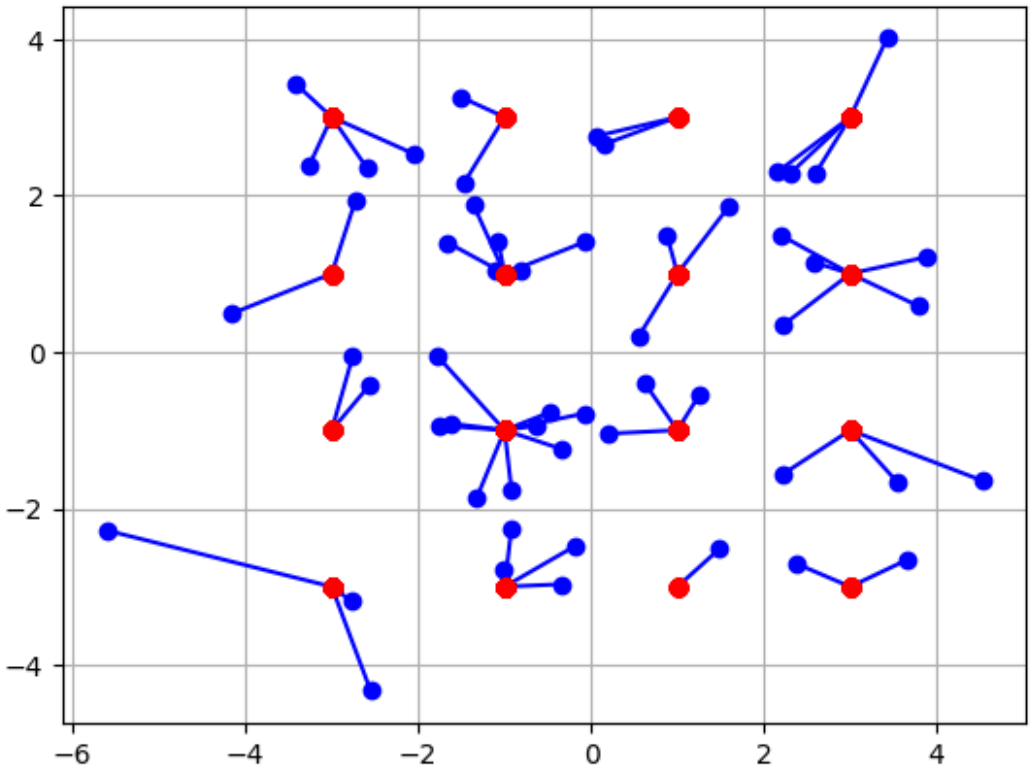

```
def equalize(OFDM_demod, Hest):
    return OFDM_demod / Hest
equalized_Hest = equalize(OFDM_demod, Hest)

def get_payload(equalized):
    return equalized[dataCarriers]
QAM_est = get_payload(equalized_Hest)
```

```
plt.plot(QAM_est.real, QAM_est.imag, 'bo');
plt.grid(True)
```




```
def Demapping(QAM):
    # array of possible constellation points
    constellation = np.array([x for x in demapping_table.keys()])

    # calculate distance of each RX point to each possible point
    dists = abs(QAM.reshape((-1,1)) - constellation.reshape((1,-1)))

    # for each element in QAM, choose the index in constellation
    # that belongs to the nearest constellation point
    const_index = dists.argmin(axis=1)

    # get back the real constellation point
    hardDecision = constellation[const_index]

    # transform the constellation point into the bit groups
    return np.vstack([demapping_table[C] for C in hardDecision]),
hardDecision

PS_est, hardDecision = Demapping(QAM_est)
for qam, hard in zip(QAM_est, hardDecision):
    plt.plot([qam.real, hard.real], [qam.imag, hard.imag], 'b-o');
```

```
    plt.plot(hardDecision.real, hardDecision.imag, 'ro')
    plt.grid(True)
```




```
def PS(bits):
    return bits.reshape((-1,))
bits_est = PS(PS_est)

print ("Obtained Bit error rate: ", np.sum(abs(bits-
bits_est))/len(bits))
```

```
Obtained Bit error rate:  0.12727272727272726
```