

Accès Multiple Avancé: OFDMA versus SC-FDMA

Couche PHY LTE

C. Poulliat

25 novembre 2020

Plan

- 1 OFDM et SC-FDE
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
 - FDMA : principe générale
 - OFDM-A
 - SC-FDMA
- 3 Spectral Shaping
- 4 Egalisation et analyse
 - Modélisation SC-FDMA
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - Références

Plan

- 1 **OFDM et SC-FDE**
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 **Accès multiple par répartition en fréquence**
 - FDMA : principe générale
 - OFDM-A
 - SC-FDMA
- 3 **Spectral Shaping**
- 4 **Egalisation et analyse**
 - Modélisation SC-FDMA
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - Références

Plan

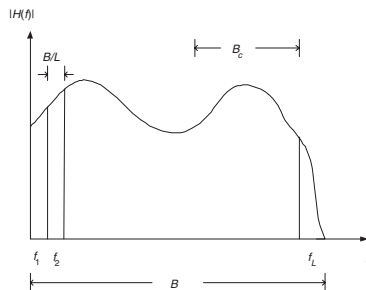
- 1 OFDM et SC-FDE
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
- 3 Spectral Shaping
- 4 Egalisation et analyse

Accès multiples par Répartition en fréquences : OFDMA et SC-FDMA

OFDM : principe de base

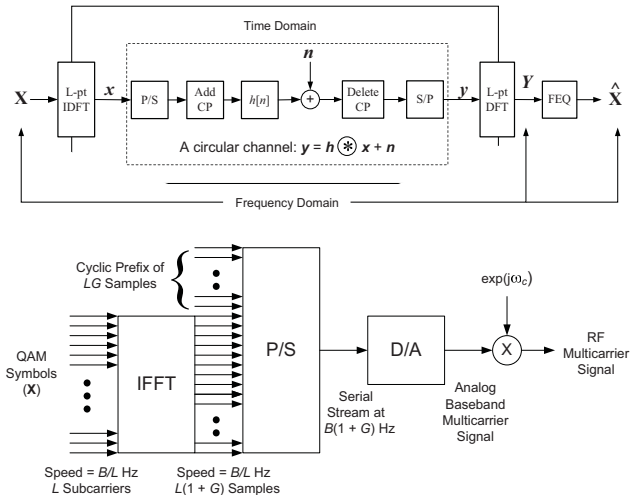
Orthogonal Frequency Division Multiplexing

- Introduit pour traiter efficacement les interférences entre symboles pour les canaux fortement dispersifs,
- Principe : transformer un canal large bande en un certains nombre de canaux bande étroite de largeur plus petite que la bande de cohérence du canal.
⇒ *flat fading* sur chaque canal



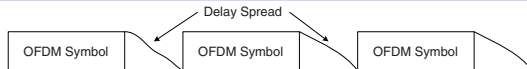
Accès multiples par Répartition en fréquences : OFDMA et SC-FDMA

OFDM : principe du préfixe cyclique

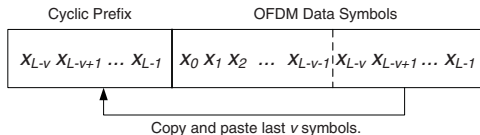


OFDMA et SC-FDMA

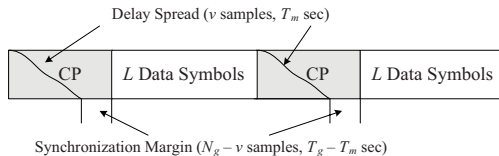
OFDM : structure émetteur-récepteur en mono-utilisateur



Intervales de garde \Rightarrow pas d'IES inter-symboles OFDM



Préfixe cyclique : rendre la convolution avec le canal circulaire



Ajout Préfixe cyclique : plus IES intra symbole OFDM

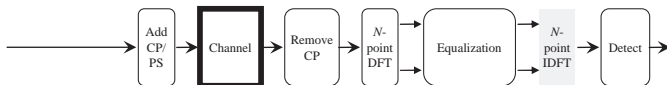
Plan

- 1 **OFDM et SC-FDE**
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
 - FDMA : principe générale
 - OFDM-A
 - SC-FDMA
- 3 Spectral Shaping
- 4 Egalisation et analyse
 - Modélisation SC-FDMA
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - Références

OFDMA et SC-FDMA

Egalisation Monoporteuse dans le domaine fréquentiel : SC-FDE vs OFDM

SC/FDE



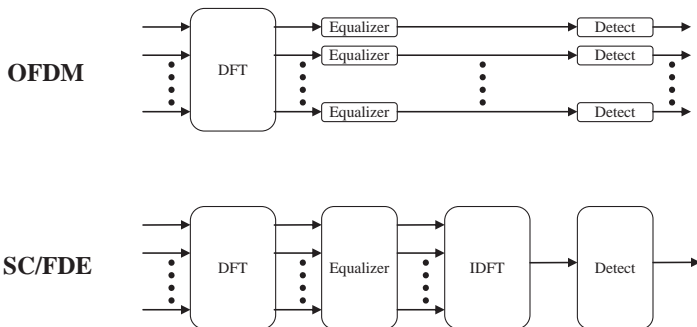
OFDM



* CP: Cyclic Prefix, PS: Pulse Shaping

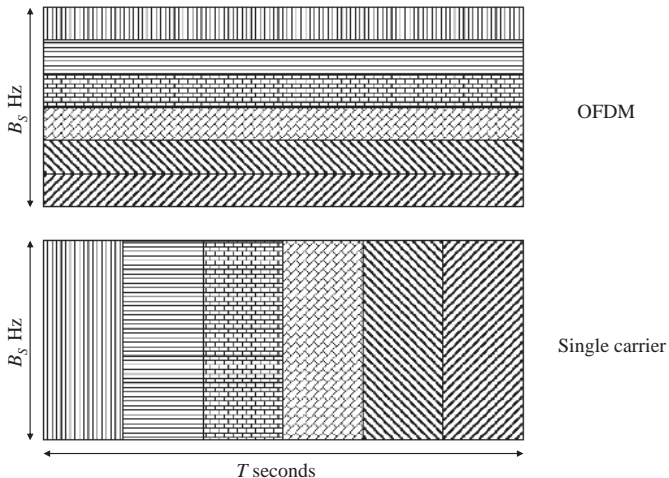
OFDMA et SC-FDE

SC-FDE vs OFDM : récepteurs



OFDMA et SC-FDE

SC-FDE vs OFDM : interprétation dans le plan temps-fréquence



Plan

- 1 OFDM et SC-FDE
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
 - FDMA : principe générale
 - OFDM-A
 - SC-FDMA
- 3 Spectral Shaping
- 4 Egalisation et analyse
 - Modélisation SC-FDMA
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - Références

Plan

2 Accès multiple par répartition en fréquence

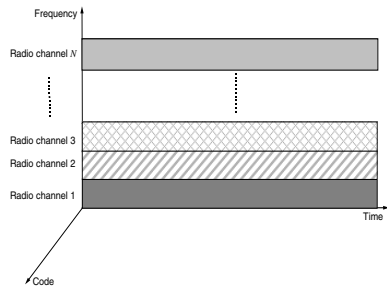
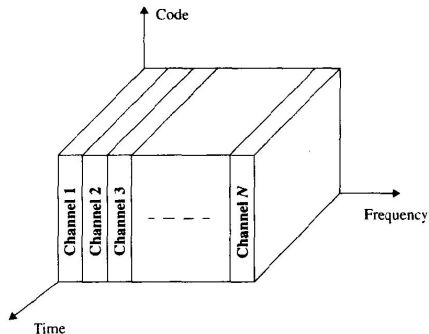
- FDMA : principe générale
- OFDM-A
- SC-FDMA

Accès Multiple Par Répartition en Fréquence

FDMA

Principe générale

- chaque utilisateur se voit assigner une fréquence ou bande de fréquences (généralement contigües) pour la durée de sa communication,



Principe générale du FDMA

Plan

- 1 OFDM et SC-FDE
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
 - FDMA : principe générale
 - **OFDM-A**
 - SC-FDMA
- 3 Spectral Shaping
- 4 Egalisation et analyse
 - Modélisation SC-FDMA
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - Références

Accès Multiple Par Répartition en Fréquence

Avantages

- Généralement, moins de traitement de signal requis (communications bandes étroites),
- synchronisation temporelle facilitée

Désavantages

- sensibilité au fading fréquentiel (pas de diversité fréquentielle),
- interférence des canaux adjacents (en part. VM), produits d'intermodulation (BS),
- nécessité éventuelle d'intervalle fréquentiel de garde

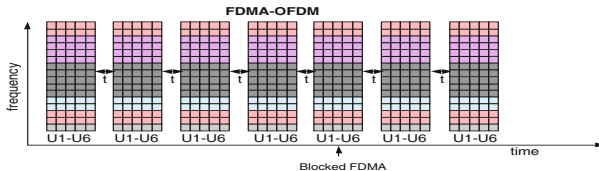
Type de systèmes utilisant le FDMA

- systèmes de communications analogiques,
- en combinaison avec d'autres méthodes d'accès (ex : GSM),
- systèmes à forts débits

OFDMA et SC-FDMA

OFDM-FDMA

- On assigne différentes sous-porteuses à chaque utilisateurs,
- La façon d'allouer varie suivant la stratégie d'optimisation mise en oeuvre :
 - *Localized FDMA/ Block FDMA (LFDMA)* : les sous-porteuses sont attribuées par sous-blocs,
 - *Interleaved FDMA (IFDMA)* : les sous-porteuses sont attribuées de manière entrelacée,
- Allocation dynamique des porteuses possible pour gain en diversité en utilisant des algorithmes de *scheduling*

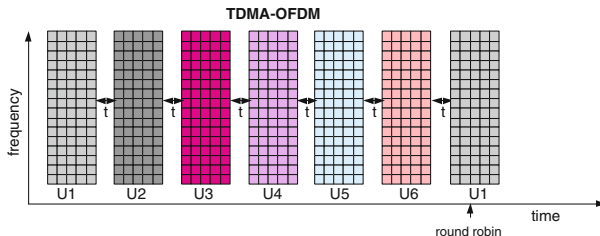


OFDMA et SC-FDMA

Accès multiples basés OFDM

OFDM-TDMA

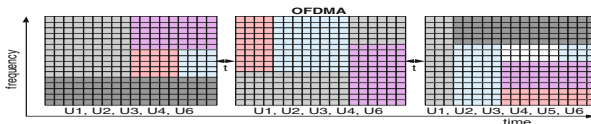
- Les utilisateurs sont slottés,
- Un utilisateur utilise toute la bande pendant un ou plusieurs symboles OFDM puis attend à nouveau son tour,
- Approprié pour des applications à débits constants,
- Allocation TDMA Statique : *Round Robin scheduling*



Accès multiples par Répartition en fréquences : OFDMA et SC-FDMA

OFDMA

- Combinaison d'un accès FDMA et TDMA,
- On alloue un "pavé" temps-fréquence (*slice, resource grids*) : N_{mc} sous porteuses sur N_s symboles OFDM consécutifs,
- Différents types d'allocation :
 - distribuée (*distributed/comb/diversity allocation*), type IFDMA,
 - localisée (*localized/block/grouped/band AMC cluster*), type LFDMA.
- utilisé pour WIMAX et 3GPP-LTE liaison descendante

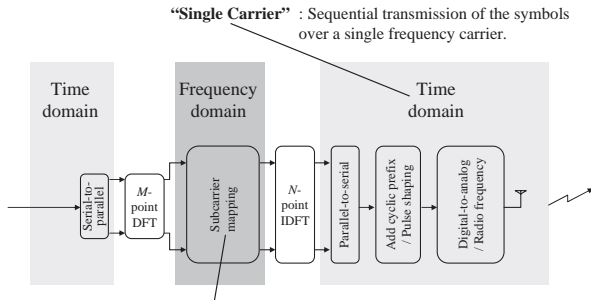


Plan

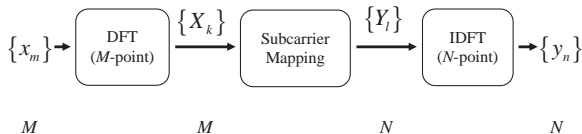
- 1 OFDM et SC-FDE
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
 - FDMA : principe générale
 - OFDM-A
 - **SC-FDMA**
- 3 Spectral Shaping
- 4 Egalisation et analyse
 - Modélisation SC-FDMA
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - Références

OFDMA et SC-FDMA

SC-FDMA : principe générale



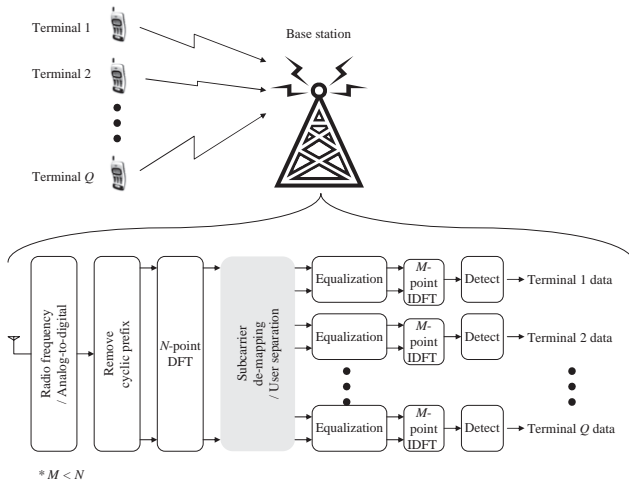
“FDMA” : User multiplexing in the frequency domain.



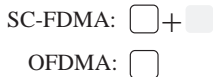
* M, N : number of data symbols

OFDMA et SC-FDMA

SC-FDMA : architecture récepteur

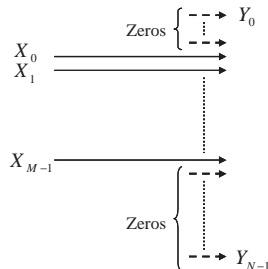
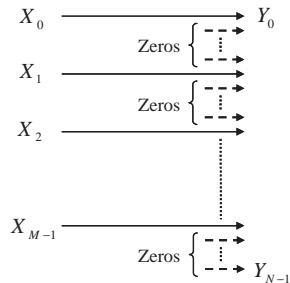


Comparaison OFDMA vs SC-FDMA : structure



OFDMA et SC-FDMA

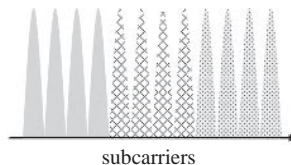
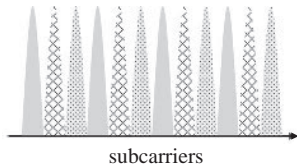
SC-FDMA : allocation de sous porteuses



Terminal 1

Terminal 2

Terminal 3

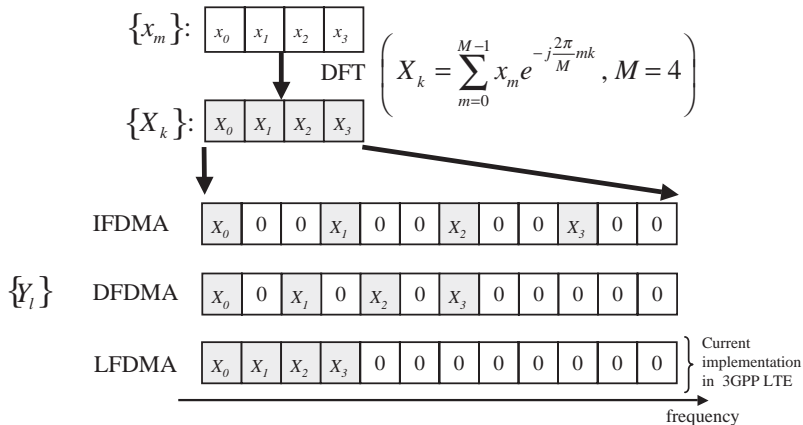


Interleaved (distributed) Mode

Localized Mode

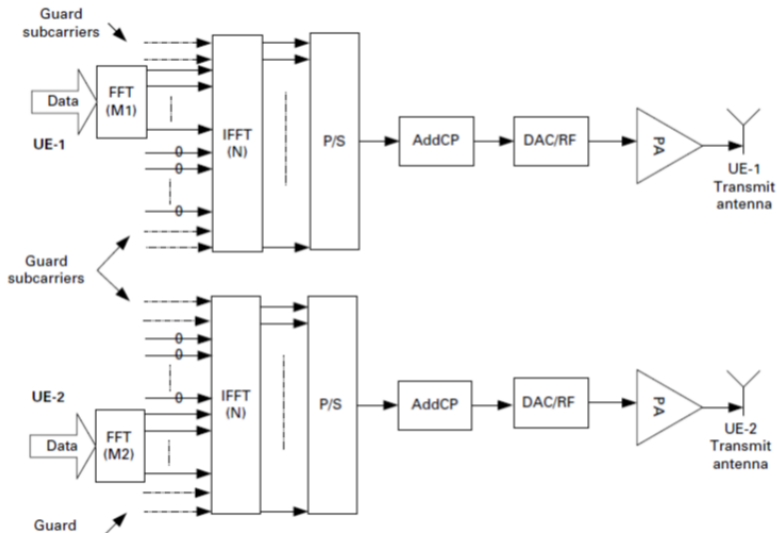
OFDMA et SC-FDMA

SC-FDMA : allocation de sous-porteuses



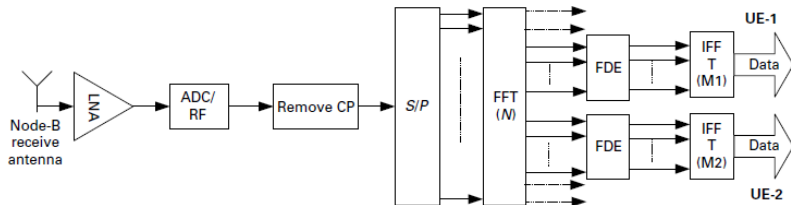
OFDMA et SC-FDMA

SC-FDMA : cas multi-utilisateurs - émetteurs



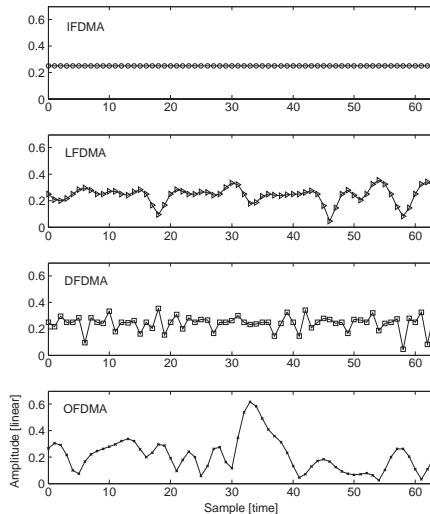
OFDMA et SC-FDMA

SC-FDMA : cas multi-utilisateurs - récepteurs



OFDMA et SC-FDMA

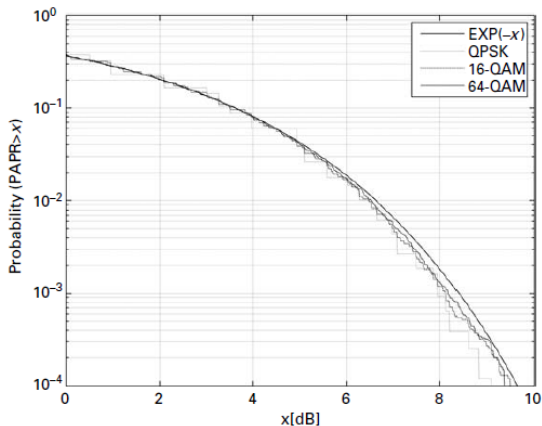
Dynamique des signaux : SC-FDMA vs OFDMA



OFDMA et SC-FDMA

Dynamique des signaux : SC-FDMA vs OFDMA

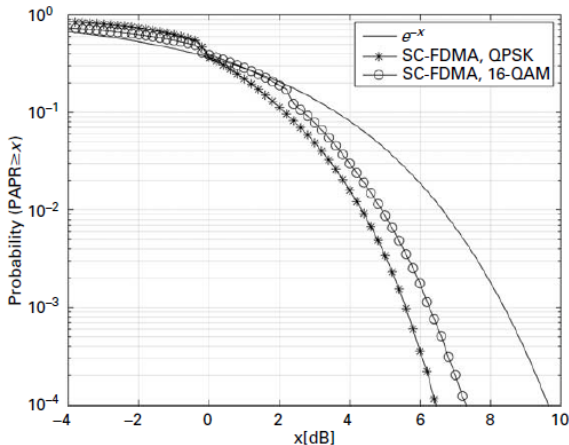
$$\text{PAPR} = \frac{|s(t)|^2}{\mathbb{E}(|s(t)|^2)}$$



PAPR pour OFDM avec 16 canaux

OFDMA et SC-FDMA

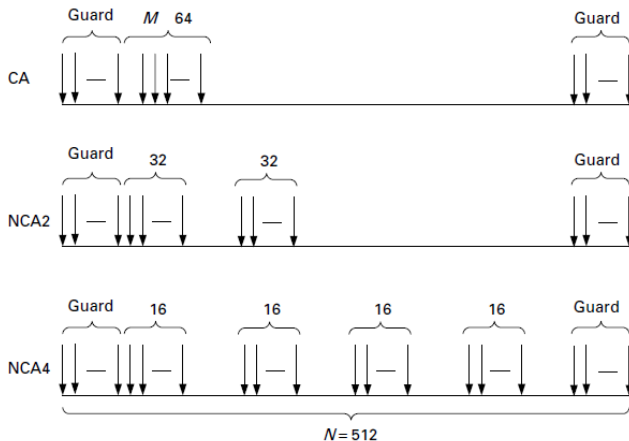
Dynamique des signaux : SC-FDMA vs OFDMA



PAPR pour SC-FDMA localisé $M = 64, N = 512$

OFDMA et SC-FDMA

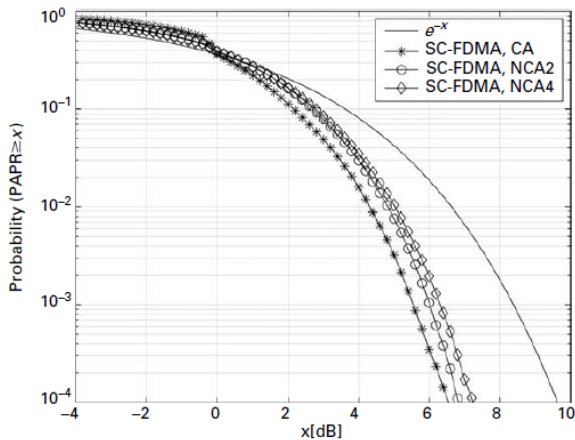
Dynamique des signaux : SC-FDMA vs OFDMA



PAPR pour SC-FDMAs

OFDMA et SC-FDMA

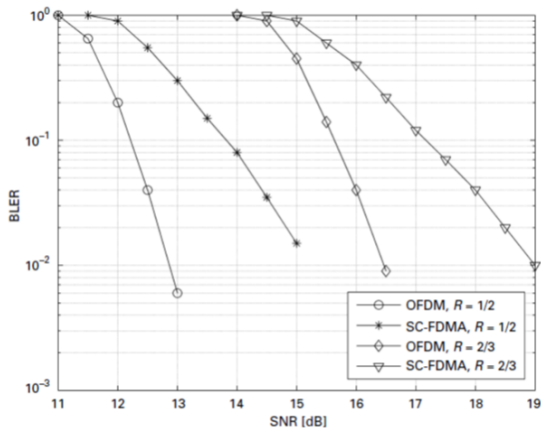
Dynamique des signaux : SC-FDMA vs OFDMA



PAPR pour SC-FDMAs

OFDMA et SC-FDMA

SC-FDMA vs OFDMA



OFDMA et SC-FDMA

SC-FDMA vs OFDMA

- SC-FDMA :

- PAPR faible,
- Moins sensible aux offsets de fréquence,
- Robustesse face aux évanouissements fréquentiels,
- bit-loading non possible,

- OFDMA :

- PAPR plus important,
- Plus sensible aux offsets de fréquence,
- Sensible face aux évanouissements fréquentiels,
- bit-loading possible

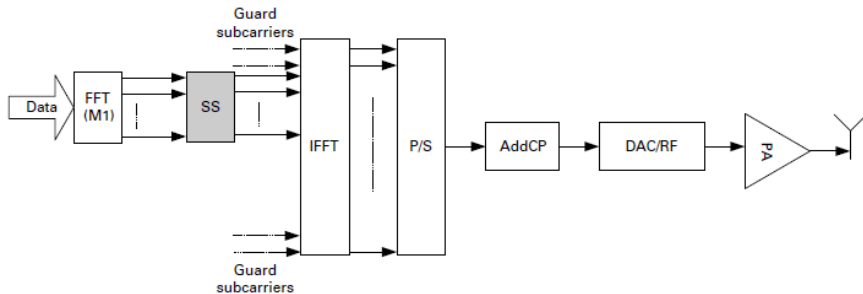
⇒ SC-FDMA plus adapté pour la liaison montante

Plan

3 Spectral Shaping

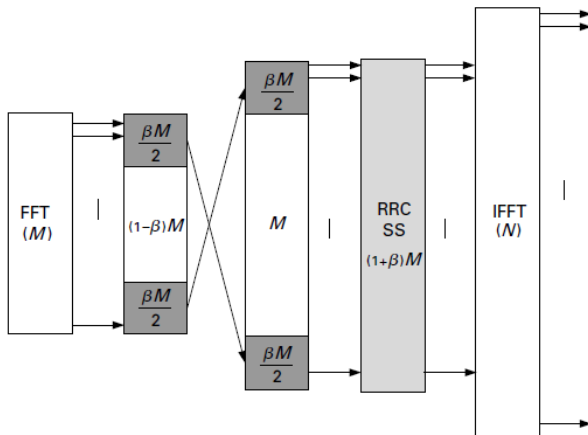
Spectral shaping

SC-FDMA shaping



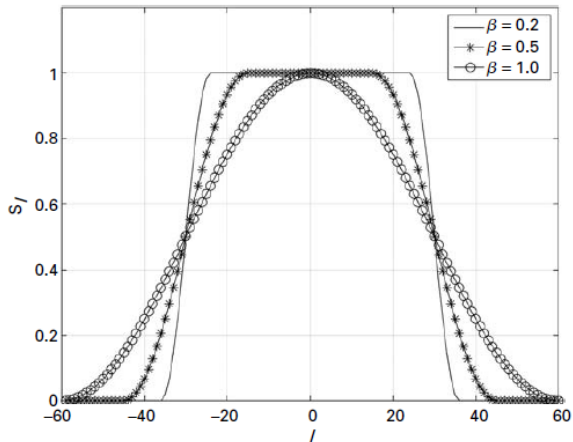
Spectral shaping

SC-FDMA shaping



Spectral shaping

SC-FDMA shaping



Spectral shaping

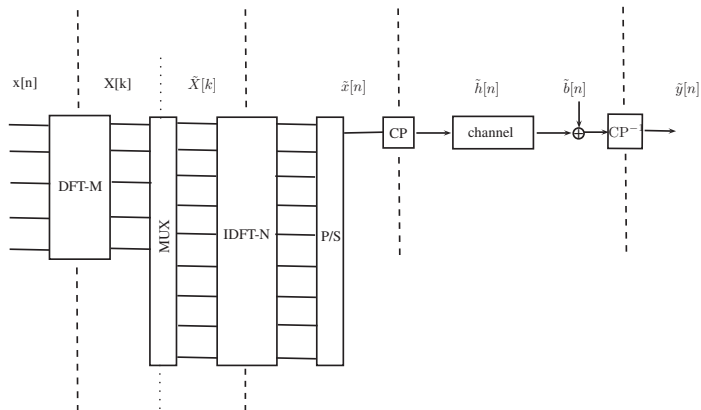
SC-FDMA shaping

- SC-FDMA shaping :
 - Pas implémenté finalement sur le standard actuel,
 - Utilisé dans le cadre du DVB-NGH sous l'acronyme SC-OFDM (),
 - Connu également sous le nom de Extended-Weighted SC-OFDM.

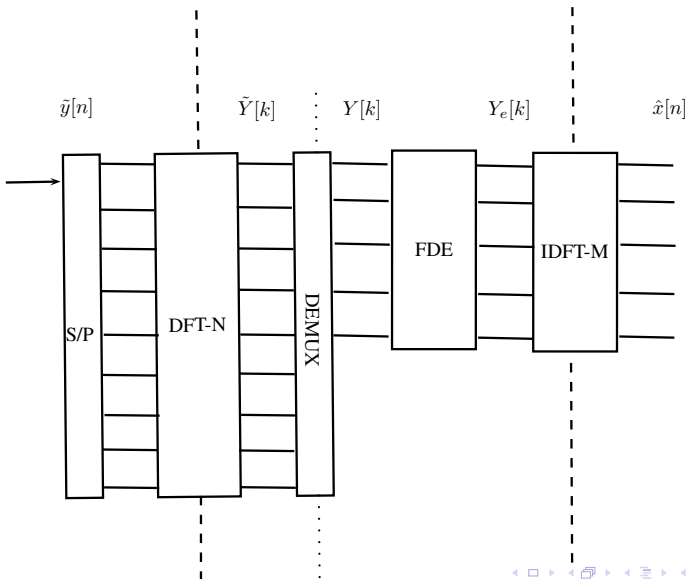
Plan

- 4 Egalisation et analyse
 - Modélisation SC-FDMA
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - Références

Emetteur



Récepteur



Principales notations et définitions

- TFD :

$$X[k] = TFD(x[n]) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-i \frac{2\pi}{N} kn}, \forall k = 1 : N-1$$

- TFD inverse :

$$x[n] = TFD^{-1}(X[k]) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{+i \frac{2\pi}{N} nk}, \forall k = 1 : N-1$$

- Convolution circulaire :

$$\begin{aligned} TD : y[n] &\triangleq h \circledast x[n] \\ &= \sum_{m=0}^{N-1} x[m] h[\langle n - m \rangle_N], \forall n = 0 : N-1 \end{aligned}$$

$$FD : Y[k] = H[k] X[k], \forall k = 0 : N-1$$

Plan

- 1 OFDM et SC-FDE
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
 - FDMA : principe générale
 - OFDM-A
 - SC-FDMA
- 3 Spectral Shaping
- 4 **Egalisation et analyse**
 - **Modélisation SC-FDMA**
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - Références

Modèle du signal en réception

- **Domaine fréquentiel :**

$$Y[k] = H[k]X[k] + B[k], \forall k = 1 : N - 1$$

$$\begin{aligned} Y_e[k] &= W[k] Y[k] \\ &= W[k] H[k] X[k] + W[k] B[k], \forall k = 1 : M - 1 \end{aligned}$$

- **Domaine temporel :**

$$\begin{aligned} \hat{x}[n] &= TFD^{-1}(Y_e[k]), \forall n = 1 : M - 1 \\ &= \underbrace{\tilde{w} \circledast x[n]}_{\substack{\text{signal utile} \\ + \\ \text{interference} \\ \text{entre symbole}}} + \underbrace{w \circledast x[n]}_{\text{bruit filtre}} = \underbrace{x_u[n] + x_i[n]}_{\hat{x}_i[n]} + \hat{b}[n] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{avec } \tilde{w} = TFD^{-1}(\tilde{W}[k]) = TFD^{-1}(W[k]H[k])$$

Puissance de bruit 1/3

- **Domaine temporel :**

$$\hat{b}[n] = TFD^{-1}(W[k]B[k]), \quad \forall n = 1 : M - 1 \quad (2)$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} W[k]B[k]e^{-i\frac{2\pi}{M}nk} \quad (3)$$

- **Variance du bruit, cas générale :**

$$\begin{aligned} \sigma_{\hat{b}}^2 &\triangleq \mathbb{E}(|\hat{b}[n]|^2) \\ &= \frac{\sigma_B^2}{M} \times \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |W[k]|^2 \\ &= \sigma_{\tilde{b}_M}^2 \sum_{n=0}^{M-1} |w[n]|^2 \end{aligned}$$

avec $\tilde{b}_M[n] = TFD^{-1}(B[k])$ et $w[n] = TFD^{-1}(W[k])$

Puissance de bruit 2/3

Cas MMSE

$$W[k] = \frac{\gamma H[k]^*}{\gamma |H[k]|^2 + 1} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_X^2}{\sigma_B^2} \quad (5)$$

$$\gamma_k = |H[k]|^2 \gamma \quad (6)$$

$$\sigma_{\hat{b}}^2 = \frac{\sigma_B^2}{M^2} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{\gamma^2 |H[k]|^2}{(\gamma |H[k]|^2 + 1)^2} \quad (7)$$

Puissance de bruit 3/3

Cas ZF :

$$W[k] = \frac{\gamma H[k]^*}{\gamma |H[k]|^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{\hat{b}}^2 = \frac{\sigma_B^2}{M^2} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{1}{\gamma |H[k]|^2} \quad (9)$$

Puissance terme utile

- Signal utile en sortie de IDFT :

$$\hat{x}_u[n] = \tilde{w}[0]x[n] = x[n] \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} W[k]H[k] \quad (10)$$

- Variance de $\hat{x}_u[n]$:

$$\sigma_{x_u}^2 = \sigma_x^2 \left| \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} W[k]H[k] \right|^2 \quad (11)$$

Puissance terme interférence entre symbole

- Variance de $\hat{x}_i[n]$:

$$\sigma_{x_i}^2 = \sigma_{x_t}^2 - \sigma_{x_u}^2 \quad (12)$$

avec

$$\begin{aligned} \sigma_{x_t}^2 &= \sigma_x^2 \sum_{m=0}^{M-1} |\tilde{w}[\langle n - m \rangle_M]|^2 \\ &= \sigma_x^2 \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |\tilde{W}[k]|^2 \\ &= \sigma_x^2 \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} |W[k]H[k]|^2 \end{aligned}$$

Rapport signal à bruit en sortie de DFT

- Cas général :

$$\begin{aligned}
 SNR &= \frac{\sigma_{x_u}^2}{\sigma_{x_t}^2 - \sigma_{x_u}^2 + \sigma_{\hat{b}}^2} \\
 &= \frac{|\alpha|^2}{\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (|H[k]|^2 + \gamma^{-1}) |W[k]|^2 - |\alpha|^2} \quad (13)
 \end{aligned}$$

avec

$$\alpha = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} W[k] H[k]$$

Rapport signal à bruit en sortie de DFT

- Cas MMSE :

$$SNR = \frac{\beta}{1 - \beta} \quad (14)$$

avec

$$\beta = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{\gamma_k}{\gamma_k + 1}$$

- Cas ZF :

$$SNR = \frac{1}{\beta} \quad (15)$$

avec

$$\beta = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \frac{1}{\gamma_k}$$

Plan

- 1 OFDM et SC-FDE
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
 - FDMA : principe générale
 - OFDM-A
 - SC-FDMA
- 3 Spectral Shaping
- 4 **Egalisation et analyse**
 - Modélisation SC-FDMA
 - **Modélisation EW-SC-FDMA**
 - Références

Modèle du signal en réception

Modèle domaine fréquentiel

- Domaine fréquentiel sans combinaison :

$$\begin{aligned} Y_e[k] &= W_0[k] Y[k] \\ &= W_0[k] \tilde{H}[k] X[k] + W_0[k] B[k], \quad \forall k \in I_1 \end{aligned}$$

- Domaine fréquentiel avec combinaison :

$$\begin{aligned} Y_e[k] &= W_1[k] Y_1[k] + W_2[k] Y_2[k], \quad \forall k \in I_2 \\ &= (W_1[k] \tilde{H}_1[k] + W_2[k] \tilde{H}_2[k]) X[k] + W_1[k] B_1[k] + W_2[k] B_2[k] \end{aligned}$$

avec $\tilde{H}[k]$ canal en réception + weighting

Modèle du signal en réception

Modèle équivalent

$$Y_e[k] = \begin{cases} \tilde{W}[k]X[k] + W_0[k]B[k] & , \forall k \in I_1 \\ \tilde{W}[k]X[k] + W_1[k]B_1[k] + W_2[k]B_2[k] & , \forall k \in I_2 \end{cases}$$

avec

$$\tilde{W}[k] = \begin{cases} W[k]\tilde{H}[k] & , \forall k \in I_1 \\ W_1[k]\tilde{H}_1[k] + W_2[k]\tilde{H}_2[k] & , \forall k \in I_2 \end{cases}$$

Rapport signal à bruit en sortie de DFT

- Cas général :

$$SNR = \frac{|\alpha|^2}{\frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} (|\tilde{W}[k]|^2 + \gamma^{-1} |W[k]|^2) - |\alpha|^2} \quad (16)$$

avec

$$\alpha = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \tilde{W}[k]$$

et

$$|W[k]|^2 = \begin{cases} |W_0[k]|^2 & , \forall k \in I_1 \\ |W_1[k]|^2 + |W_2[k]|^2 & , \forall k \in I_2 \end{cases}$$

⇒ valable pour tout type de combinaison

Plan

- 1 OFDM et SC-FDE
 - OFDM
 - Egalisation dans le domaine fréquentiel
- 2 Accès multiple par répartition en fréquence
 - FDMA : principe générale
 - OFDM-A
 - SC-FDMA
- 3 Spectral Shaping
- 4 **Egalisation et analyse**
 - Modélisation SC-FDMA
 - Modélisation EW-SC-FDMA
 - **Références**

Bibliographie

- [SESIA11] S Sesia et al., LTE – The UMTS Long Term Evolution, Wiley, 2011.
- [KHAN09] F. KHAN, *LTE for 4G Mobile Broadband Air Interface Technologies and Performance*, Cambridge University Press, 2009.
- [3GPP1] 3GPP R1-051335, “**Simulation Methodology of IFDMA and DFT DFT-Spread-OFDMA,**” Nov. 2005.
- [3GPP2] 3GPP R1-051352, “**Simulation methodology for EUTRA uplink : SC-FDMA and OFDMA,**” Nov. 2005.