
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohammed Boudiaf à M'sila

Faculté de Technologie

Département d'Électronique



Mémoire de Master

Domaine : Systèmes des Télécommunications

Spécialité : Télécommunications

Thème

Les modulations multi-porteuses à base de bancs
de filtres (FBMC)

Présenté par :

- DILMI Zakarya

Sujet proposé et dirigé par :

- Mr. BENMAHMOUD Slimane

Devant le jury composé de :

Nom et prénom

Président

Nom et prénom

Rapporteur

Nom et prénom

Examineur

Projet N..... /2020

DÉDICACES

Je ne trouve pas les mots qui peuvent exprimer la gratitude, l'amour, le respect et la reconnaissance. Ils sont simplement : je dédie ce travail à : tous les membres de ma famille qui se sont sacrifiés pour ma localisation réussie et m'ont informé sur la route de leurs bons conseils, j'espère qu'un jour je pourrai leur rendre un peu plus sur ce qu'ils ont fait pour moi, Mes meilleurs vœux de santé, de bien-être . À tous ceux qui m'ont poussé à viser toujours plus loin.

D. Z

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant pour ces bénédictions et cette gentillesse, et me donnons le courage, la volonté et la patience d'achever cette humble œuvre. Je tiens à remercier chaleureusement M. Bin Mahmoud Suleiman qui m'a permis de bénéficier de son encadrement. Sa disponibilité, son soutien, ses précieux conseils et observations pertinentes ainsi que ses explications ont été essentiels à la réalisation de cet humble travail. Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements aux membres du jury. Veuillez accepter mon sincère respect et ma profonde appréciation pour ce travail. Je profite de cette occasion pour remercier tous les enseignants de notre service Communication pour toutes les connaissances acquises dans le domaine de la communication grâce à leur aide. Puisqu'il est impossible de nommer tous les noms, mes sincères remerciements à vous tous, directement ou indirectement, ont permis, grâce à leurs conseils et compétences, de produire ce message.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
1 Introduction aux communications mobiles cellulaires	2
Introduction	3
Les communications mobiles cellulaires : un guide	4
L'évolution des technologies mobiles	4
La 5G : Technologie, spectre et facteurs conducteurs.....	11
Les facteurs conducteurs	12
Les technologies 5G.....	13
Le spectre 5G et la bande des ondes millimétriques	18
La conception des formes d'ondes pour la 5G.....	19
Les techniques d'accès multiple : de la 1G à la 5G.....	20
Conclusion	22
2 Amélioration de l'OFDM pour la 5G : Filtrage et fenêtrage	23
Introduction	24
Les modulations multi-porteuses.....	24
Les formes d'ondes pour la 5G : exigences et scénarios	26
La numérologie mixte.....	26
La transmission Uplink asynchrone	27
Les formes d'ondes candidates pour la 5G	27
La WOLA (Weighted Overlap and Add)	28
La UF-OFDM (Universal Filtered OFDM)	28

La F-OFDM (Filtered OFDM).....	29
Conclusion	29
3 La modulation multi-porteuse à base de bancs de filtres (FBMC)	30
Introduction.....	31
Principe de la modulation FBMC.....	31
Les différentes variantes de la modulation FBMC.....	31
La FMT-FBMC (filtered multitone-based FBMC)	32
La CMT-FBMC (co-sine modulated multitone-based FBMC)	32
La OQAM-FBMC (offset quadrature amplitude modulation- based FBMC) ou la SMT-FBMC	33
La chaîne de transmission à base de la modulation OQAM-FBMC	34
Système OQAM.....	36
L'analyse et la synthèse par les bancs de filtres	39
Conclusion	39
4 Simulations et Résultats	40
Méthodologie.....	41
Comparaison de l'OFDM, la FBMC, et la CMFB	41
L'effet du nombre des canaux (M).....	42
Les effets des paramètres des filtres pour CMFB.....	44
L'effet du paramètre α du filtre prototype Kaiser.....	44
L'effet de l'ordre m du filtre prototype Kaiser.....	44
L'effet du paramètre r du filtre prototype Kaiser	45
L'effet des fonctions de fenêtrage.....	45
Conclusion générale	47

TABLE DES FIGURES

1G network architecture block diagram.	6
Communications downlink (DL) et uplink (UL).	21
une chaine de transmission à base de la modulation FMT-FBMC.	32
une chaine de transmission à base de la modulation CMT-FBMC.	33
Schéma fonctionnel d'un système OQAM-FBMC en (a) émetteur et (b) récepteur	35
Pré-traitement OQAM pour deux sous-canaux adjacents, avec $\mu =$ $1 \dots \frac{M}{2}$	37
Post-traitement OQAM pour deux sous-canaux adjacents, avec $\mu =$ $1 \dots \frac{M}{2}$	38
Comparaison de la PSD des trois techniques : OFDM, FBMC et CMFB.	42
BER vs SNR pour les trois techniques : OFDM, FBMC et CMFB.	43
L'effet du nombre des canaux (M)	43
L'effet du paramètre α du filtre prototype Kaiser	44
L'effet de l'ordre m du filtre prototype Kaiser	45
L'effet du paramètre r du filtre prototype Kaiser	46
L'effet des fonctions de fenêtrage.	46

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les technologies de l'information sont devenues une partie intégrante de notre société, Ceci dans le but de la demande de transmission à débit de plus en plus élevés, s'accroît d'avantage avec l'essor de nouveaux services dans les réseaux de communication sans fils. La technique de transmission multi porteuses de banc de filtres (FBMC) conduit à une couche physique améliorée pour les réseaux de communications classiques. Le système multi porteuses à base de banc de filtre (FBMC) est une technique alternative pour surmonter les limites de l'OFDM. Les principales caractéristiques du système FBMC se distinguent par la fourniture d'une meilleure mise en forme spectrale des sous-bandes.

Dans le I chapitre, nous avons passé en revue l'évolution des réseaux cellulaires 1G vers 5G, Un accent particulier a été mis sur les techniques d'accès multiple et les architectures de réseau dans différentes générations de technologies cellulaires.

II chapitre nous a permis de présenter l'évolution de la modulation multi porteuse OFDM, les besoins qui ont menés à l'apparition de cette technologie.

Dans le III chapitre nous allons décrire la Modulation FBMC, leur définition, leur architecture proposée, ainsi une comparaison entre l'OFDM et FBMC.

dans le IV chapitre, nous comparons les performances de ces bancs de filtres et analysons divers compromis de conception. Ces bancs de filtres ont généralement une complexité plus élevée que l'OFDM, mais ont une meilleure efficacité spectrale qui est requise pour de nombreuses applications telles que les radios cognitives et le système d'accès multiple basé sur OFDMA.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION AUX COMMUNICATIONS MOBILES CELLULAIRES

Introduction

En 3 avril 1973, Martin Cooper ¹ a effectué la première conversation au monde sur un téléphone cellulaire portatif [1] :

I'm calling you from a cell phone, a real handheld portable cell phone.

L'appareil mobile utilisé lors de cette conversation était un Motorola DynaTAC pesant environ 2.5 livres (c-à-d., 1.34 kgs) et coûtant 9000 dollars américains. Cet événement historique a déclenché un mouvement qui allait changer la vie de tant de gens. Ce changement de vie va bien au-delà de la prise en charge des utilisateurs mobiles, il a fait boule de neige ² pour créer des appareils très complexes (actuellement appelés *smart phones*) qui nous aident à rester connectés au monde. Ces appareils répondent non seulement à nos besoins de communication vocale et de données, mais ils prennent également en charge un très large éventail d'applications telles que la tenue de nos amis informés sur les réseaux sociaux, la concurrence avec les jeux en ligne, la consommation et la production de contenu vidéo, la réalisation de mesures médicales. , en utilisant des services géo-localisés, etc.

Les technologies mobiles cellulaires ont pu rester un point focal pour introduire des fonctionnalités et des avantages nouveaux et passionnants pour l'utilisateur final.

On aborde ici les technologies conductrices derrière la conception des systèmes *new radio* (NR) 5G, qui se concentre sur des solutions pour prendre en charge les nouveaux services 5G dans les transmissions de liaison montante (uplink (UL), *en Anglais*) avec des exigences telles que la faible latence, la haute fiabilité, et l'économie d'énergie.

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Martin_Cooper_\(inventor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Martin_Cooper_(inventor))

2. Faire boule de neige = provoquer la croissance exponentielle d'un événement, d'un phénomène.

Les communications mobiles cellulaires : un guide

1.2.1 L'évolution des technologies mobiles

Dans cette section, nous allons présenter les technologies d'accès radio mobile (mobile radio access technologies (MRAT), *en Anglais*) et comprendre leurs avantages évolutifs.

Le spectre est très précieux pour les opérateurs et reste nécessaire pour augmenter le débit du système et des utilisateurs. Il existe une tendance à l'échelle de l'industrie non seulement pour utiliser le spectre sous licence, mais aussi pour embrasser le spectre sans licence (traditionnellement utilisé par les appareils WiFi) et le spectre partagé chaque fois que cela est possible.

A. Les systèmes cellulaires de la 1G :

Le système cellulaire mobile de la première génération (1G) a été créé pour permettre les communications vocales et prendre en charge les utilisateurs mobiles lorsqu'un appel vocal se transfère vers une autre station de base (base station (BS), *en Anglais*) lorsque l'utilisateur mobile traverse physiquement l'environnement cellulaire. La technologie utilisée était la modulation de fréquence analogique (FM) et le spectre était divisé en segments de 30 kHz, appelés canaux. Un seul utilisateur a utilisé l'intégralité du canal pendant la durée de son appel. Ce système est appelé services de téléphonie mobile avancés (advanced mobile phone services, (AMPS), *en Anglais*) et est appelé le système cellulaire de la 1G [2].

Afin de prendre en charge une large zone de couverture, une technique de réutilisation des fréquences a été introduite où les mêmes canaux de fréquence pouvaient être réutilisés par d'autres utilisateurs, en même temps, tant que la distance était suffisamment grande pour causer des interférences minimales. Cette interférence est appelée interférence co-canal.

Afin d'augmenter la capacité globale du système, une nouvelle technologie appelée AMPS à bande étroite (narrowband (N)-AMPS, *en Anglais*) a été introduite où l'espacement des canaux a été réduit à 10 kHz. De même, dans le but d'introduire des services de données (qui n'étaient pas pris en charge dans la AMPS), la tech-

nique des données de paquets numériques cellulaires (cellular digital packet data (CDPD), *en Anglais*) ont été proposées qui utilisaient des canaux de fréquence lorsque les utilisateurs vocaux n'étaient pas présents. Cependant, il a été rapidement déterminé qu'un réseau sans fil intégré (voix et données) était nécessaire pour fournir efficacement ces services. Des détecteurs discriminatoires simples et robustes ont été utilisés qui étaient réalisables, mais sensibles aux ondes FM aléatoires et aux évanouissements profonds dus aux trajets multiples observés dans l'environnement radio [3],[4].

Le modèle de base d'un réseau cellulaire de la 1G est représenté sur la figure

Afin d'augmenter la capacité du réseau, les cellules peuvent être divisées en cellules plus petites appelées des secteurs. Le bureau de commutation de télé-phonie mobile (the mobile telephone switching office (MTSO), *en Anglais*) se connecte aux stations d'émetteur-récepteur de base (the base transceiver stations (BTS), *en Anglais*) et au réseau téléphonique public commuté (the public switched telephone network (PSTN), *en Anglais*). Il contrôle également les transferts intercellulaires, l'acheminement, l'enregistrement, l'authentification des appels, etc. Il s'agit d'un réseau à commutation de circuits (a circuit switched (CS)-based network, *en Anglais*). Le réseau utilise un spectre sous licence pour fournir les services vocaux.

Les normes cellulaires analogiques 1G déployées à l'échelle mondiale sont répertoriées ci-dessous [5]. Notez qu'il n'existait pas de norme globale unique.

- *Advanced mobile phone services (AMPS)*- Les Etats Unis.
- *Nordic mobile telephone (NMT)*-Les pays nordiques.
- *Total access communication system (TACS)*- La Grande-Bretagne.

B. Les systèmes cellulaires de la 2G :

Les systèmes cellulaires mobiles de la deuxième génération (2G) ont été créés pour étendre la capacité vocale de l'utilisateur et offrir une capacité de service de données intégrée. La technologie est passée de la modulation analogique à la modulation numérique. Ce passage aux techniques numériques a permis :

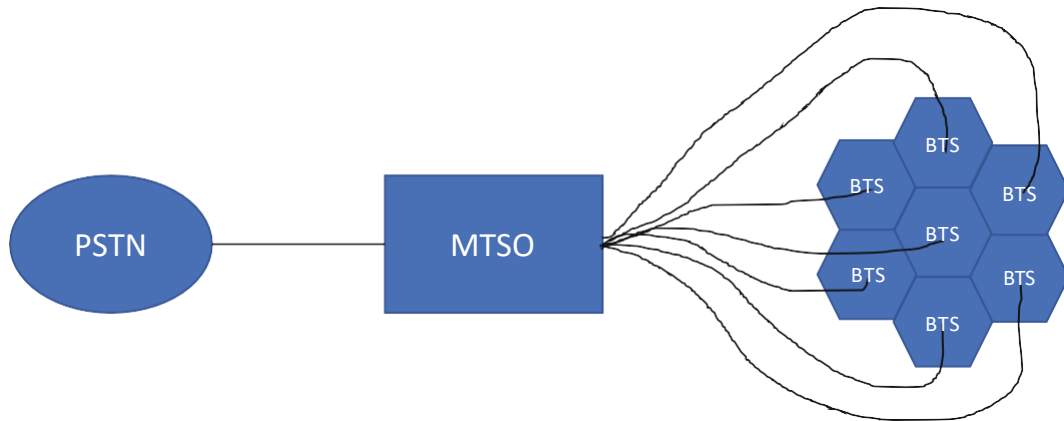


FIGURE 1.1 – 1G network architecture block diagram.

- d'avoir des communications vocales de meilleure qualité via l'utilisation de codeurs vocaux (vocodeurs).
- de supporter des services de données, initialement par l'utilisation des services de messagerie courts (SMS).
- de soutenir la sécurité via le cryptage.
- et d'augmenter la capacité du système.

Cette génération a créé un passage du FDMA au TDMA et au CDMA. La communauté européenne soutenait le système mondial de communications mobiles (global system for mobile communications (GSM), *en Anglais*), tandis que les États-Unis étaient aux prises avec deux normes concurrentes : IS-54 (renommé plus tard IS-135) basé sur TDMA et IS-95 (rebaptisé plus tard CDMA-One) basé sur CDMA. Ces trois normes cellulaires avaient toutes un mérite technique.

Afin d'augmenter la capacité du système, non seulement la bande de fréquences a été divisée en canaux, mais le temps a également été divisé en tranches de temps pour TDMA. Dans le cas de CDMA, les informations de chaque utilisateur ont été mélangées et étalées par une séquence pseudo-aléatoire (PN); et tous les utilisateurs pouvaient transmettre leurs informations en même temps sur l'ensemble du canal.

Ces normes utilisaient le spectre sous licence acheté par les opérateurs de réseau auprès de l'organe directeur du spectre local. La complexité du récepteur augmentait de façon exponentielle, surtout si l'on considère les débits de données, le schéma de modulation et le nombre accru d'antennes impliquées.

Les normes cellulaires numériques 2G déployées à l'échelle mondiale sont répertoriées ci-dessous [6]. Notez qu'il n'existait pas de norme globale unique.

- *GSM*- une norme unique en Europe.
- *IS-54 (also called IS-136)*- une norme aux États-Unis.
- *IS-95 (also called CDMA-One)*-une norme aux États-Unis et en Corée.

Ces normes étaient toutes des réseaux à commutation de circuits (CS), qui avec le temps, ont eu des extensions (par exemple, l'évolution de 2G → 2,5G → 2,75G) qui ont permis l'interfaçage avec des réseaux à commutation de paquets (PS). En raison des économies d'échelle, des coûts de déploiement, des politiques en matière de brevets et du soutien mondial, le GSM détenait la plus grande part de marché cellulaire. L'appétit des utilisateurs a augmenté, forçant ainsi la 2G à prendre des mesures évolutives incrémentielles telles que 2,5G (GPRS) et 2,75 (EDGE). Les deux ont été créés pour augmenter le débit de données des utilisateurs au-delà de la capacité GSM de base ainsi que pour ajouter des capacités de services par paquets. Ces systèmes sont très utilisés aujourd'hui [7].

C. Les systèmes cellulaires de la 3G :

Le système cellulaire numérique de troisième génération (3G) a été créé pour augmenter la capacité des utilisateurs et satisfaire l'appétit croissant du débit de données.

Cette génération a permis aux utilisateurs de surfer sur Internet et de bénéficier simultanément de services voix et données. Il a également été le catalyseur de l'écosystème pour introduire des applications vidéo sur les appareils des utilisateurs cellulaires. À ce stade, dans l'évolution cellulaire, l'accès mobile à Inter-

net devenait de plus en plus important. La technique d'accès multiple (MA) est passée de l'utilisation à la fois du TDMA et du CDMA à la normalisation du CDMA. CDMA-One a évolué en CDMA2000, et GSM/IS-136 évolué en CDMA large bande (WCDMA).

CDMA est une technique d'accès multiple où plusieurs utilisateurs sont séparés par des codes PN et transmettent en même temps sur toute la bande passante allouée. Il est bien connu que plus d'utilisateurs transmettent, les interférences intra-cellulaires se multiplient, appelées interférences d'accès multiples. Un mécanisme de contrôle de puissance était utilisé dans le système non seulement pour améliorer les performances dans un environnement à évanouissements par trajets multiples, mais également pour contrôler les interférences introduites par chaque utilisateur supplémentaire dans le système.

Les normes cellulaires 3G déployées dans le monde sont énumérées ci-dessous. Notez qu'il n'existe pas de norme cellulaire mondiale unique.

- *WCDMA (également appelé UMTS) :*
 - Modulation numérique (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, etc.), FDD / TDD duplex.
 - Bande passante du canal = 5 MHz (avec un débit de puce = 3,84 Mcps).
 - Durée de la trame = 10 ms.
 - Durée du créneau horaire = 0,667 ms (15 créneaux horaires / trame).
 - Débits de données jusqu'à 1 Mbps.
 - Défini par l'organisme de normalisation 3GPP.
- *CDMA2000 :*
 - Modulation numérique (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), duplex FDD.
 - Bande passante du canal = 1.25 MHz x 3.
 - Durée de la trame = 10 ms.
 - Durée du créneau horaire = 0,667 ms (15 créneaux horaires / trame).
 - Débits de données jusqu'à 1 Mbps.
 - Défini par les normes 3GPP2.

D. Les systèmes cellulaires de la 4G :

Ce système cellulaire numérique de quatrième génération (4G) a été créé pour prendre en charge la capacité exponentielle du système et l'appétit du débit de données. Des débits de données beaucoup plus élevés étaient nécessaires pour permettre l'accès mobile à Internet et les applications vidéo. L'évolution à long terme (LTE) est également connue sous le nom de 4G et prend uniquement en charge les réseaux PS. La norme évolue également pour utiliser des options de spectre sous licence, sans licence et partagées, le tout dans le but commun d'augmenter le débit de données utilisateur, d'augmenter la capacité du système, de réduire la latence et d'améliorer l'expérience utilisateur. L'UIT a fourni des objectifs 4G sous la forme d'exigences IMT-2010.

À ce stade de l'évolution cellulaire, l'industrie a convergé vers un seul standard, le LTE. Le système cellulaire LTE est basé sur l'OFDMA où le TTI a été réduit de 2 ms (utilisé dans le système cellulaire 3G) à 1 ms. Cette réduction TTI a amélioré les performances en étant capable de réagir plus rapidement aux conditions changeantes des canaux, ce qui permet d'utiliser des algorithmes de planification plus efficaces. Le TTI réduit a également permis de réduire la latence de bout en bout. Les options de bande passante de fréquence ont également augmenté : 1,4, 3, 5, 10, 15 et 20 MHz pour fournir des déploiements de bande passante flexibles. Pour prendre en charge efficacement l'accès multiple FDMA, l'OFDMA (via la transformation de Fourier rapide inverse (iFFT) et les opérations FFT) a été choisi, ce qui a divisé la bande de fréquences en sous-canaux (ou sous-porteuses) d'espacement de 15 kHz. Pour réduire au minimum la complexité du traitement du signal du récepteur, il était souhaitable que l'espacement des sous-porteuses soit inférieur à la largeur de bande de cohérence du canal sans fil. Pour fournir des services à un débit de données plus élevé, la prise en charge MIMO est obligatoire pour accueillir plusieurs couches via le multiplexage spatial [?].

Rappelons qu'avec un système TDMA, l'augmentation du débit de données (ou la diminution de la durée du temps de symbole) a amené le récepteur à utiliser un égaliseur pour lutter contre les interférences entre symboles (ISI). Les débits de données plus élevés, la modulation d'ordre supérieur et les étalages de retard plus longs ont entraîné une augmentation significative de la complexité de l'égaliseur. Avec un système WCDMA, l'augmentation du débit de données (ou

la diminution de la durée de temps de la puce) obligeait le récepteur à utiliser la diversité temporelle du canal sans fil, mais nécessitait un gain de traitement important pour lutter de manière adéquate contre l'ISI. Avec WCDMA, la motivation était d'avoir une bande passante de transmission plus grande que la bande passante de cohérence du canal sans fil; cependant, pour l'OFDM, le contraire est vrai. L'OFDM répond à la demande de débit de données plus élevé en générant de nombreux canaux à bande étroite, où chaque canal à bande étroite peut être vu comme subissant une perturbation plate en fréquence. Cette observation, couplée au fait que le traitement du signal dans le domaine fréquentiel est possible, a fait de l'OFDM une technique multi-porteuse très intéressante pour atténuer un environnement d'évanouissement sélectif en fréquence.

L'OFDM présente certains inconvénients qui devraient être traités dans les futurs systèmes, tels que :

- **CP overhead** : la nécessité d'ajouter le CP introduit une redondance dans le transmise et entraîne ainsi une perte d'efficacité spectrale. Cette perte est plus importante lorsque le CP long est utilisé ou lorsque l'espacement des sous-porteuses (SCS) est petit.
- **Sensibilité aux décalages de fréquence et de synchronisation** : Afin de conserver l'orthogonalité en OFDM, l'émetteur et le récepteur doivent avoir exactement la même fréquence de référence. Tout décalage de fréquence ruinerait l'orthogonalité, provoquant une fuite de sous-porteuse connue sous le nom d'interférence inter-porteuse (ICI).
- **Émission hors bande (OOB) élevée** : l'OFDM suppose une impulsion rectangulaire dans le domaine temporel qui équivaut à sinc dans le domaine fréquentiel qui a une largeur de bande infinie théoriquement et qui provoque des émissions relativement élevées (OOB). L'absence de mise en forme spectrale (filtrage ou fenêtrage) crée de grands lobes latéraux spectraux dans le spectre d'émission.

En termes de bande passante occupée, le 3GPP n'a spécifié aucune technique de mise en forme spectrale en LTE et chaque fournisseur d'équipement et de dispositif met en œuvre sa propre solution. Les sous-porteuses OFDM sont traitées comme $\sin(x)/x$, donc l'application de la mise en forme spectrale aidera à produire une forme d'onde plus efficace spectralement avec un impact minimal ou

nul sur les performances d'orthogonalité. Ces lobes latéraux spectraux ont une puissance relativement élevée en raison de la forme rectangulaire supposée. Ces lobes latéraux hauts nécessitent une large bande de garde pour réduire les interférences hors bande. L'application de techniques de mise en forme spectrale, telles que les bancs de filtres multi-porteuses, les multi-porteuses filtrées universelles, etc., aidera à réduire les lobes latéraux. L'autre composant peut être trouvé lors de la visualisation de symboles OFDM transmis adjacents dans le domaine temporel ; il y aura des discontinuités de phase qui provoquent également des émissions spectrales.

Le problème de puissance de crête à moyenne de l'OFDM peut être considéré comme une somme pondérée de sinusoides, ce qui aide à expliquer le grand PAPR du symbole OFDM généré (aussi élevé que 12 dB). Un PAPR élevé peut être problématique si la forme d'onde rencontre des non linéaires. La réduction du facteur de crête est une technique utilisée pour réduire le PAPR et une technique utilisée pour compenser la distorsion non linéaire est la pré-distorsion numérique. La forme d'onde de liaison montante LTE utilise la méthode FDMA à porteuse unique (SC-FDMA) pour réduire l'impact du PAPR sur les appareils portables.

La 5G : Technologie, spectre et facteurs conducteurs

Les éléments de base de la 5G comprennent les éléments suivants :

- Fonction de gestion des accès et de la mobilité (AMF) : assure le chiffrement et la protection de l'intégrité, la gestion de la mobilité, l'authentification et l'autorisation, etc.
- Fonction de gestion de session (SMF) : effectue l'attribution et la gestion d'adresses IP UE, la sélection et le contrôle de l'UPF, l'itinérance, etc.
- Gestion unifiée des données (UDM) : effectue la gestion des abonnements, des données utilisateur, des inscriptions et de la gestion de la mobilité, etc.

- Fonction de contrôle de politique (PCF) : exécute des règles de politique pour les fonctions du CP, etc.
- Fonction de plan utilisateur (UPF) : effectue le point d'interconnexion externe au réseau de données, la gestion de la qualité de service de UP, etc.
- Fonction d'application (AF) : interagit avec le cadre politique pour le contrôle politique, etc.

Les facteurs conducteurs

Les systèmes cellulaires 5G doivent faire un bond significatif en termes de fonctionnalités et de performances par rapport à LTE, car des améliorations incrémentielles ne sont pas souhaitées et ne justifient pas les investissements en capital importants dont les opérateurs doivent s'engager pour déployer les services 5G. Il est important de noter que nous avons maintenu une seule norme cellulaire mondiale. Les facteurs moteurs de la 5G sont [8] :

- Augmentation du débit de données utilisateur
- Augmentation de la capacité du système
- Nombre massif de connexions
- Réduction de la latence de bout en bout
- Mélange hétérogène de services
- Déploiements flexibles de la bande passante
- Flexibilité du réseau
- Passer à des communications plus écoénergétiques.

La 5G NR prendra en charge les modes de déploiement non autonomes et autonomes. Le déploiement de la NSA utilisera LTE pour fournir une couverture étendue, des plans de contrôle et de données et une connexion à un EPC en évolution. Les services 5G fourniront des données à haut débit via un scénario de double connectivité. Le déploiement autonome fournira des plans de contrôle et de données ainsi qu'une connexion à un CN 5G.

L'UIT a publié un diagramme pour identifier les services 5G. Les trois cas d'utilisation significatifs (coins du triangle) sont destinés à encapsuler les usages attendus de la 5G à l'avenir :

- Haut débit mobile amélioré (eMBB)
- Communication massive de machine à machine (mMTC)
- Communications ultra-fiables à faible latence (URLLC).

Ces cas d'utilisation de la 5G vont de la maison intelligente, des drones connectés, de la cybersanté, de l'énergie connectée, des voitures autonomes, des jeux de réalité virtuelle/réalité augmentée en temps réel, etc. dans la préparation des services 5G très variés [8].

Le système cellulaire 5G devrait prendre en charge ces scénarios d'utilisation en utilisant les technologies suivantes :

- **Déploiements de spectre flexibles** : spectre sous licence, sans licence et partagé, bande passante plus grande et contiguë, multi-RAT, etc.
- **Architecture réseau améliorée** : prise en charge de la tendance cloud de l'industrie des TIC, SDN / NFV, découpage de réseau, informatique de périphérie multi-accès, latence plus faible, etc.
- **Numérologie flexible** : prend en charge une grande variété de cas d'utilisation et de déploiements spectraux (bandes inférieures et supérieures à 6 GHz), intervalles de temps flexibles et bandes passantes de transmission, etc.
- **Modulation et codage** : la modulation QAM continue de fournir un compromis raisonnable entre le spectre et l'efficacité énergétique, les codes de correction d'erreurs polaires et autres.
- **Techniques avancées** : NOMA, full-duplex, mise en forme spectrale, etc.

Les technologies 5G

Devant être commercialisés vers 2021, les réseaux mobiles 5G font l'objet d'intenses activités de portée et de développement. Par rapport aux réseaux mobiles 4G actuels, les réseaux 5G devraient prendre en charge une énorme capacité système, beaucoup moins de latence et environ 1000 fois plus d'appareils par kilomètre carré, entre autres exigences. Pour répondre à ces exigences, plusieurs nouvelles technologies ont été proposées et sont en cours de développement pour les

réseaux 5G. Ces technologies incluent, mais sans s'y limiter : MIMO massif, mise en réseau définie par logiciel (software-defined networking), mm-Wave, réseau d'accès radio cloud (cloud-RAN), accès multiple non orthogonal, communications M2M, informatique de périphérie mobile (mobile edge computing), mise en cache sans fil, réseaux ultra-denses et communication full-duplex. Dans ce qui suit, nous décrivons brièvement certaines de ces technologies.

A. Les MIMO Massifs :

En discutant le MIMO massif, abordons d'abord le terme «massif». Il est utilisé pour désigner le grand nombre d'éléments d'antenne qui sont utilisés dans le traitement du signal reçu. Le nombre d'antennes à considérer comme massives doit être supérieur à 64 éléments. Massive MIMO s'appuie sur la loi des grands nombres pour s'assurer que les imperfections du canal et du matériel (par exemple, le bruit, les évanouissements et le matériel) sont en moyenne lorsque les signaux d'un grand nombre d'antennes sont combinés dans l'air ensemble [9].

Les antennes multiples offrent deux options dans lesquelles les antennes peuvent être utilisées : La première consiste à fournir un gain de réseau en focalisant l'énergie dans les directions souhaitées et en annulant les directions de signal non souhaitées (formant un faisceau). Deuxièmement, il s'agit de fournir un gain de multiplexage spatial en envoyant des flux de données indépendants sur chaque antenne. L'une ou l'autre technique peut être utilisée pour augmenter le débit de données global de l'utilisateur ou du système.

Tout d'abord, envisagez d'utiliser le MIMO massif pour la formation de faisceaux ; ici, les réseaux d'antennes peuvent être disposés en réseaux linéaires, rectangulaires ou circulaires qui peuvent également être empilés. Massive MIMO sera déployé pour la 4G et la 5G ; en fait, les bandes haute fréquence conduisent à des réseaux d'antennes plus compacts et à grande échelle en raison de la plus petite longueur d'onde. Massive MIMO peut être déployé dans les méthodes duplex FDD ou TDD, les systèmes TDD permettent aux utilisateurs d'invoquer le théorème de réciprocité pour appliquer ce qui est observé sur l'UL au DL.

Ensuite, envisagez d'utiliser le MIMO massif pour le multiplexage spatial, qui a été largement utilisé pour la 4G et se poursuivra dans les déploiements 5G. Le multiplexage spatial peut être réalisé à condition que le rang de la matrice de canal entre les antennes d'émission et de réception soit supérieur à 1. En fait, pour un système MIMO 4×4 , la pleine capacité n'est observée que si le rang de la matrice de canal est plein (dans ce cas, une valeur de 4).

En raison du succès du multiplexage spatial en LTE, il serait logique de supposer que cela continue pour la 5G et à plus grande échelle. Ceci est vrai; cependant, il devrait venir avec un avertissement. Plus la dimension MIMO est grande, moins il y a de chances que la personne obtienne un rang complet. Cela signifie concevoir un tableau MIMO 256×256 et s'attendre à envoyer 256 couches à un seul utilisateur, tout le temps est une hypothèse difficile à faire. C'est l'une des raisons pour lesquelles la 5G va limiter le nombre de couches DL par utilisateur à 8. La complexité de mise en oeuvre impliquée dans la mise en oeuvre du MIMO massif dans le domaine numérique est importante. La formation de faisceaux hybride a été proposée pour fournir un compromis entre performance/capacité et complexité.

Cela soulève une question intéressante : en supposant un nombre maximum de couches de 8, que peut-on faire avec les degrés de liberté restants ? Certains peuvent être utilisés pour créer (ou former) des faisceaux et certains peuvent être utilisés pour multiplexer d'autres utilisateurs sur le réseau d'antennes. Ce dernier est connu sous le nom de MIMO multi-utilisateurs (MU-MIMO). Ici, plusieurs utilisateurs émettent et leurs transmissions collectives sont traitées comme si elles provenaient d'une seule source de multiplexage. Les poids de formation de faisceaux peuvent créer une poutre dans les directions azimutale et d'élévation.

Lors de l'examen de la formation de faisceaux, le gain du réseau peut être utilisé de différentes manières. Il peut être utilisé pour étendre la zone de couverture, réduire la puissance de transmission des appareils sur l'UL, améliorer le rapport signal sur interférence plus bruit (SINR) résultant en un débit utilisateur élevé et réduire la puissance d'émission sur le DL, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale.

Le nombre d'éléments d'antenne nécessaires dépend de quelques éléments :

- Gain de matrice (zone de couverture, décharge de puissance, etc.)
- Couches de multiplexage nécessaires
- Les multi-utilisateurs devraient être servis
- Bande de fréquence utilisée (facteur de forme, etc.)
- Complexité du traitement du signal (estimation CSI, domaine analogique vs numérique, etc.)
- Gains de performance du système (SINR, capacité, débit de données, etc.).

L'un des avantages de l'utilisation de techniques d'antennes multiples, pour l'émission ou la réception, est la réduction significative de la variation de canal. Cette réduction est essentielle pour lutter contre les évanouissements par trajets multiples, et avoir au moins 64 antennes dans le réseau d'antennes réduit considérablement les variations de canal. Plusieurs scénarios de déploiement 5G proposés par 3GPP ont des cas d'utilisation variés pour les services eMBB, URLLC et mMTC. Dans ces scénarios de déploiement, le nombre maximum d'antennes DL est de 256 et le nombre maximum d'antennes UL est de 32.

B. Le software-defined networking :

La virtualisation des fonctions réseau (Network functions virtualization (NFV)) et la mise en réseau définie par logiciel (software-defined networking (SDN)) soutiennent le passage à un réseau centré sur le logiciel (a software-centric network). Ces capacités offrent de grandes améliorations techniques (sous la forme de performances système) et financières aux opérateurs de réseau. Cette approche apporte aux opérateurs de réseaux d'énormes avantages tels que : un moyen plus gérable de surveiller le réseau, une meilleure prise en charge des déploiements de nouvelles fonctionnalités, la délocalisation du réseau, etc. Cependant, il ouvre également les portes à de nouveaux acteurs du marché (comme les géants des services Internet, les fournisseurs de services de câbles, etc.) qui souhaitent établir une présence sur le réseau sans fil. L'adoption a consisté à virtualiser initialement les fonctions les moins critiques en matière de synchronisation, comme dans l'EPC (également appelé vEPC), puis à effectuer une transition vers le bas de la pile logicielle de protocole vers la couche physique [10].

Le passage à un réseau SDN permet aux opérateurs de réseau de devenir agiles dans les déploiements de divers cas d'utilisation. L'un des avantages est le découpage du réseau. Ici, le réseau sera capable de rassembler dynamiquement les fonctions d'accès et de cœur de réseau nécessaires pour répondre aux exigences d'un cas d'utilisation spécifique (latence, bande passante, etc.). Nous avons vu une tendance qui a commencé dans la 4G où un ensemble diversifié de services ont émergé, et le 3GPP répond à cette demande dans le cadre de l'évolution du LTE. Nous nous attendons à ce que cette demande augmente et continue de créer des exigences diverses. L'architecture du réseau LTE (à sa conception) a été qualifiée de monolithique et doit être plus flexible et évolutive à mesure que nous introduisons les services 5G. Le découpage de réseau est une technique proposée pour prendre en charge cette grande variété de cas d'utilisation.

Le découpage de réseau crée des architectures de réseau virtuel basées sur les principes SDN et NFV. Ces réseaux virtuels (ou tranches) sont créés au-dessus d'une infrastructure physique partagée commune et peuvent être «optimisés» pour répondre aux besoins des applications, des services ou des opérateurs. Les réseaux virtuels sont constitués d'un ensemble de fonctions réseau instancié pour fournir un réseau logique (ou virtuel) de bout en bout complet pour répondre aux exigences de performances ciblées. Par exemple, les communications mMTC reposent sur la capacité de l'utilisateur et pas nécessairement sur une faible latence, tandis que les voitures autonomes reposent sur une faible latence et pas nécessairement sur les services eMBB à débit le plus élevé.

C. La norme MEC (Multi-access Edge Computing) :

Pour prendre en charge les demandes de latence plus faible, les optimisations de l'interface aérienne de la 5G à elles seules ne sont pas suffisantes, nous devons également optimiser le réseau. Le Multi-access edge computing (MEC) est une méthode permettant de rapprocher les fonctions centrées du réseau central ou du centre de données du bord du réseau (vers l'antenne) où les données seront exploitées. Il a été démontré en utilisant ce principe de réinstallation ; la latence de bout en bout de l'utilisateur peut être considérablement réduite. De plus, le trafic de liaison peut également être réduit puisque le trafic «aller-retour» a été considérablement minimisé par cette approche [11].

D. L'architecture RAN (Radio Access Network) split) :

La technologie fronthaul traditionnelle et la plus couramment déployée est basée sur la fibre en utilisant le protocole CPRI (Common Public Radio Interface). CPRI transporte les échantillons IQ entre le RAN et RRHs [12]. Les capacités du CPRI sont mises en avant pour prendre en charge l'évolution du LTE, en particulier lorsque des déploiements de CA et de MIMO massifs sont nécessaires. Ce stress est dû à la plus grande bande passante requise pour transporter les échantillons de forme d'onde IQ vers le RRH, et ne devient plus problématique que lorsque la 5G entre dans l'image. Par conséquent, une technologie de transport frontal de nouvelle génération est nécessaire pour prendre en charge les services 5G attendus [13].

Le spectre 5G et la bande des ondes millimétriques

Le LTE a une largeur de bande maximale de 20 MHz, comme indiqué précédemment, les débits de données utilisateur ont augmenté en raison de l'utilisation de HOM, de couches spatiales MIMO et de techniques CA. Bien que les solutions actuelles prennent en charge jusqu'à 5 CA, il convient de mentionner que les spécifications 3GPP LTE peuvent prendre en charge jusqu'à 32 opérateurs. Cela signifie que si nous sacrifions la complexité afin de prendre en charge de nombreux transporteurs, on peut augmenter encore les débits de données. Dans de nombreux cas, les opérateurs doivent regrouper le spectre sous licence et sans licence (via un accès assisté par licence) pour atteindre les débits de données de Gbit/s. En fait, la bande numéro 46 (B46), dont la gamme spectrale est comprise entre 5,15 et 5,925 GHz. est défini pour cette intention [14].

La 5G va avoir une bande passante maximale de 100 MHz pour les bandes de fréquences inférieures à 6 GHz. Notez qu'une large bande passante offre des débits de données élevés, mais qu'une bande passante plus faible peut également fournir des services 5G. Ceci, couplé avec les attributions de bandes spectrales fragmentées, est une raison pour soutenir le besoin de flexibilité dans les paramètres OFDMA. Outre l'utilisation traditionnelle du spectre sous licence et sans licence (5-5,9, 64-71 GHz), il est également possible d'utiliser le spectre du service radio à large bande (CBRS) des citoyens. La gamme de fréquences CBRS

s'étend de 3,55 à 3,7 GHz (pour une largeur de bande totale de 150 MHz) et elle est régie par un cadre d'autorisation de spectre à trois niveaux pour accueillir les utilisateurs sur une base partagée avec les utilisateurs fédéraux et non fédéraux titulaires de cette bande.

Un point qui mérite d'être mentionné, dans ces nouvelles bandes de fréquences, est que la disponibilité du spectre apparié pour prendre en charge le mode FDD est minime, ce qui obligera l'industrie à se concentrer davantage sur les déploiements TDD. Par conséquent, non seulement nous nous attendons à ce que la disponibilité de la bande passante varie dans les bandes de fréquences basses (<1 GHz), moyennes (<6 GHz) et élevées (> 6 GHz), mais nous devons également nous attendre à ce que la méthode duplex varie également.

Certains opérateurs se concentrent sur l'accès sans fil fixe pour fournir des services 5G haut débit (environ 1 Gbit / s) à la place des déploiements câble / fibre en tant que déploiements 5G initiaux dans les bandes mm-Wave au lieu de, et en plus, prendre en charge les applications haut débit mobiles. Cette approche contribuera à développer un écosystème basé sur des ondes millimétriques qui rendra possible les technologies 5G qui doivent être utilisées pour les appareils fonctionnant sur batterie.

Les utilisations hétérogènes du spectre discutées jusqu'à présent supposent que le spectre sous licence est toujours utilisé ; il existe une initiative pour soutenir les services qui n'utilisent que le spectre sans licence (comme le WiFi aujourd'hui). L'alliance MulteFire permet à la technologie LTE (et 5G) d'être exclusivement utilisée (de manière autonome) dans un spectre partagé et sans licence pour permettre des services privés, une architecture de réseau hôte neutre, des réseaux industriels, etc.

La conception des formes d'ondes pour la 5G

Le CP-OFDM a certaines limitations qui en font pas la forme d'onde la plus appropriée pour toutes les applications 5G. Cependant, en raison de ses avantages et pour des raisons de rétrocompatibilité, l'OFDM restera la forme d'onde principale des systèmes 5G. En revanche, en raison de ses limites, certaines modifi-

cations ont été proposées dans la littérature pour la rendre adaptée à une application 5G. Parmi ces limitations, le SCS fixe (en 4G LTE), le surcoût du CP et les émissions OOB élevées sont les plus importants. Avant d'énumérer ces nouvelles formes d'onde, dans ce qui suit, nous discutons ces limitations une par une.

L'Internet des objets (IoT) est l'un des principaux contributeurs à la croissance exponentielle des utilisateurs de la 5G. Les appareils IoT, par exemple les capteurs, envoient généralement de courts paquets de données sporadiques et ont une puissance limitée. D'autre part, pour eMBB, un grand volume de données doit être transmis dans un court laps de temps. Ces caractéristiques variables des burst à être transporté fait du CP-OFDM avec un SCS fixe une forme d'onde inefficace. Pour les applications IoT, la forme d'onde 5G est nécessaire pour prendre en charge un mode de transmission avec une latence d'interface radio très faible activée par des trames très courtes [15]. Pour permettre des transmissions à faible latence, des TTI très courts sont nécessaires, pour des communications écoénergétiques en minimisant les temps de dispositifs à faible coût. L'émission OOB peut être réduite en appliquant un fenêtrage dans le domaine temporel qui lisse la transition d'un symbole à un autre.

Pour réduire les émissions OOB, diverses solutions de filtrage et de fenêtrage sont appliquées à l'OFDM [23]. OFDM filtré (Filtered OFDM (F-OFDM)), OFDM fenêtré (également appelé chevauchement et ajout pondéré ou WOLA-OFDM), OFDM filtré universel (universal filtered OFDM (UF-OFDM)), banque de filtres multi-porteuse (filter bank multi-carrier (FBMC)) et d'autres candidats ont été suggérés pour de nouvelles forme d'onde en 5G et au-delà.

Les techniques d'accès multiple : de la 1G à la 5G

Rappelons les techniques d'accès multiple déployées jusqu'à présent dans les systèmes cellulaires. Dans la première génération, les systèmes cellulaires utilisaient le FDMA où la bande de fréquences était divisée en canaux de fréquence et les utilisateurs se voyaient attribuer des canaux. Dans la deuxième génération, TDMA et CDMA ont été utilisés et dans les deux cas, la bande de fréquences a été divisée en canaux de fréquences plus petits. En TDMA, la nouvelle dimension du temps a été utilisée comme ressource (intervalle de temps), et en CDMA,

la nouvelle dimension dans le domaine de code (séquence PN) a été utilisée. La complexité du récepteur TDMA a augmenté de façon exponentielle à mesure que le débit de données augmentait, l'ordre de modulation augmentait et le nombre d'antennes augmentait. Dans la troisième génération, CDMA a été déployé qui utilisait une plus grande bande passante et, plus important encore, a introduit le concept d'un canal partagé. Ici, les ressources physiques allouées aux utilisateurs sont : les plages horaires et les codes PN. La complexité de la technologie CDMA augmentait à mesure que le débit de données augmentait. La largeur de bande étalée résultante de la WCDMA nécessitait un gain de traitement plus important pour avoir des capacités raisonnables de suppression des interférences entre les trajets.

La quatrième génération de systèmes cellulaires a déployé l'OFDMA et a conservé le concept de canal partagé. Ici, les ressources physiques étaient des tranches de temps et des sous-porteuses de fréquence. La technologie OFDMA a maintenu la flexibilité des ressources et maintenu la bande passante d'information disponible à la valeur souhaitée. En raison de l'utilisation du préfixe cyclique et du traitement du signal dans le domaine fréquentiel, la complexité du récepteur est gérable. C'est aussi une des raisons pour lesquelles la cinquième génération a décidé de continuer avec l'OFDMA.

Nous aimerions discuter brièvement les différences entre les liaisons de communication downlink (DL) et uplink (UL); ceci est illustré à la Fig.1.2 Le DL com-

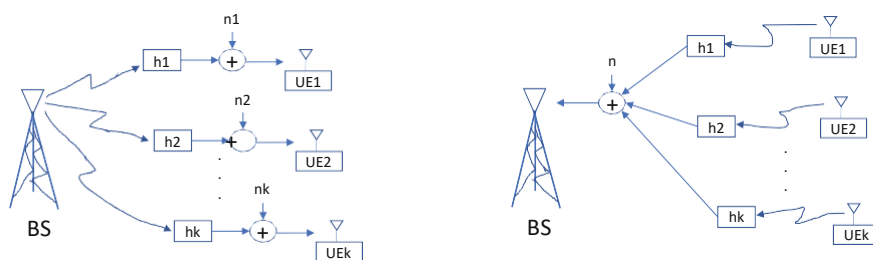


FIGURE 1.2 – Communications downlink (DL) et uplink (UL).

mence par un signal commun transmis qui se compose de la somme agrégée de tous les UE dans cette cellule. Chaque UE est physiquement situé dans une position de cellule différente et subit ainsi différents évanouissements par trajets multiples, désignés par h_i . Chaque UE a son propre bruit additif, noté n_i . La liai-

son montante commence par des transmissions de signaux individuelles qui rencontrent des évanouissements différents, en raison des emplacements physiques dans la cellule. Ces signaux individuels sont additionnés au niveau de l'antenne de réception de la station de base, où la station de base ajoute son bruit additif.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue l'évolution des réseaux cellulaires 1G vers 5G. Un accent particulier a été mis sur les techniques d'accès multiple et les architectures de réseau dans différentes générations de technologies cellulaires. Les exigences IMT-2020 pour la 5G, y compris le haut débit mobile amélioré. Les communications ultra-fiables et à faible latence ont été discutées et les modifications possibles telles que l'OFDM flexible, nécessaires pour répondre à ces exigences, ont été brièvement examinées. Quelques composants techniques clés du réseau sans fil 5G, notamment le MIMO massif, le cloud-RAN et le SDN, ont été traités. Les avantages et les problèmes du CP-OFDM ont été répertoriés et les orientations possibles pour la nouvelle conception de formes d'onde ont été décrites. On a aussi parlé des techniques d'accès multiple.

CHAPITRE 2

AMÉLIORATION DE L'OFDM POUR LA 5G : FILTRAGE ET FENÊTRAGE

Introduction

Le multiplexage orthogonal par répartition en fréquence (OFDM) est la technique clé utilisée dans les systèmes 4G LTE, La forme d'onde sous-jacente a toujours été un facteur de mise en forme pour chaque génération de réseaux cellulaires, comme le multiplexage par répartition orthogonale de fréquence (OFDM) pour les réseaux cellulaires de 4e génération (4G). Pour répondre aux attentes diversifiées et prononcées sur les prochains réseaux cellulaires 5G, nous présentons ici un catalyseur pour la configuration de forme d'onde flexible, appelé OFDM filtré (f-OFDM). Avec l'OFDM conventionnel, une numérogie unifiée est appliquée sur toute la bande passante fournie, en équilibrant les caractéristiques du canal et les exigences du service, L'objectif de cette partie est de présenter les principes et quelques notions relatives aux systèmes de communication numériques par une description des systèmes de transmission numériques et décrire le fonctionnement d'une chaîne de transmission, de la source au destinataire.

Les modulations multi-porteuses

La sélection de la forme d'onde à appliquer est l'une des décisions de conception les plus fondamentales à prendre. Il définit les caractéristiques temporelles et spectrales du signal émis. Le rapport de puissance crête / puissance moyen qui en résulte dans le domaine temporel aura un impact sur la conception de l'amplificateur de puissance et est donc responsable de l'efficacité énergétique de la communication. Le spectre du signal de transmission résultant a un impact sur l'efficacité spectrale et la coexistence avec d'autres systèmes de communication. Les formes d'ondes porteront des symboles modulés, de sorte que leur conception aura un impact sur les multiples possibilités d'accès et la conception de la structure de trame pour le multiplexage des symboles de données, des symboles pilotes et des blocs de symboles de contrôle.

Avec une transmission conventionnelle à porteuse unique, chaque symbole transmis occupe toute la bande passante de transmission. Au fur et à mesure que la bande passante de transmission augmente, et donc la longueur de symbole T_s devient plus courte, l'étalement de retard de canal τ_{max} devient plus significatif. Cela conduit à une distorsion provoquée par l'interférence entre symboles (inter-symbol interference (ISI)), où la somme de plusieurs répliques retardées du

symbole transmis est reçue. Pour compenser cet effet, des égaliseurs multi-prises (multi-tap equalizers) doivent être utilisés du côté du récepteur, par exemple un égaliseur à rétroaction de décision non linéaire (decision feedback equalizer (DFE)) [16].

L'idée de transmission multi-porteuse est apparue il y a longtemps. Cependant, il n'a été envisagé pour une mise en œuvre pratique que lorsqu'une mise en œuvre efficace utilisant la transformée de Fourier rapide (FFT) [17] a été proposée.

La modulation multi-porteuse est donc un choix favorable dans les canaux à longue propagation de retard (channels with long delay spread), car elle évite la grande complexité de calcul nécessaire avec l'égalisation à une seule porteuse. La conversion série-parallèle inhérente de la modulation multi-porteuse offre naturellement une protection de base d'étalement de retard, qui peut être étendue en utilisant un préfixe cyclique ou un suffixe nul.

En outre, la modulation multi-porteuse permet un accès aux canaux sélectif en fréquence, qui exploite des liaisons à gain élevé. Le découplage en sous-canaux à bande étroite est très attrayant pour les techniques de traitement d'antenne à entrées multiples et sorties multiples (MIMO). La flexibilité multi-porteuse du multiplexage temps-fréquence permet de bonnes propriétés de conception pour les structures de trame, y compris le multiplexage des symboles pilotes et des informations de commande. La conception des symboles pilotes peut être adaptée de manière flexible à la largeur de bande de cohérence et au temps de cohérence du canal de propagation radio.

Tous ces avantages ont fait de la modulation multi-porteuse la technique de choix en 4G LTE, qui utilise le multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)) dans la liaison descendante (DL). Les avantages de l'OFDM, cependant, se font au prix d'un rapport de puissance crête / moyenne (peak-to-average power ratio) accru, par rapport à la transmission à porteuse unique. En fait, à mesure que le nombre de sous-porteuses augmente, le PAPR augmente également. C'est pourquoi l'accès multiple par répartition en fréquence à porteuse unique (single carrier frequency division multiple access (SC-FDMA)) est utilisé dans la transmission de liaison mon-

tante (UL) de LTE, au lieu de l'OFDM. Notez, cependant, que via un précodage de transformée de Fourier discrète (discrete Fourier transform (DFT)), OFDM peut être transformé en SC-FDMA, de sorte que les techniques de traitement multi-porteuses établies peuvent être réappliquées à la modulation à porteuse unique.

Les formes d'ondes pour la 5G : exigences et scénarios

Le NR cible un ensemble diversifié de cas d'utilisation. Il est prévu que NR devra prendre en charge un large éventail d'exigences de vitesse d'utilisation, de débits de données, de fiabilité et d'efficacité énergétique. Afin de pouvoir configurer les paramètres de forme d'onde pour répondre aux exigences de chaque cas d'utilisation, NR est censé prendre en charge le principe de mise à l'échelle de l'espacement des sous-porteuses de $\Delta f = 15 \times 2S \text{kHz}$, où S est un entier, contrairement à LTE qui ne prend en charge que $\Delta f = 15 \text{kHz}$.

La coexistence de tous ces services (configurations de forme d'onde) ensemble est essentielle pour une utilisation efficace des ressources et pour pouvoir s'adapter aux changements de charge de trafic. Puisque la forme d'onde est un composant fondamental dans la conception de l'interface air, la forme d'onde NR devrait être conçue pour faciliter cette coexistence. En d'autres termes, la forme d'onde NR doit être suffisamment robuste contre les éventuelles distorsions d'interférences inter-porteuses (inter-carrier interference (ICI)) causées par la prise en charge de différents services.

La numérologie mixte

En LTE, les paramètres OFDM, à savoir la longueur de préfixe cyclique et l'espacement des sous-porteuses, sont sélectionnés comme compromis raisonnable pour différents scénarios de transmission (par exemple, étalement Doppler vs étalement de retard de canal). Dans NR, en raison des cas d'utilisation extrêmes, plus d'options de configuration sont disponibles pour servir chaque cas d'utilisation le plus efficacement [18]. Par exemple, d'une part avec des cas d'utilisation nécessitant communication ultra-fiable à faible latence (Ultra-Reliable Low-

Latency Communication (URLLC)), afin d'économiser sur la partie latence, une option est de réduire les longueurs de symboles. Cela correspond à un espacement de sous-porteuses plus large. De même, les utilisateurs qui voyagent à une vitesse très élevée (par exemple, les trains à grande vitesse) peuvent bénéficier d'un grand espacement de sous-porteuses, ce qui réduit les interférences résultant de la propagation Doppler. D'autre part, pour les dispositifs bas de gamme, pour améliorer la couverture, ou pour les utilisateurs dans des environnements à répartition de canal élevée, des durées de symbole plus longues (par conséquent un CP plus long) et des espacements de sous-porteuses plus petits sont plus favorisés.

La transmission Uplink asynchrone

L'orthogonalité OFDM dans LTE UL nécessite que les transmissions de liaison montante de divers utilisateurs soient synchronisées au niveau de la BS ; c'est-à-dire que les différents symboles des UE arrivent à la BS dans une certaine fenêtre de temps qui ne dépasse pas la longueur CP. Pour compenser les différents délais de propagation, un équipement utilisateur (UE) appliquerait une avance de synchronisation en fonction de sa distance par rapport à la BS, ce qui signifie que les équipements UE éloignés de la BS envoient leurs signaux UL plus tôt que ceux proches. à la BS. Par conséquent, tout appareil souhaitant transmettre quelques bits de données doit entrer dans le réseau via la procédure d'accès aléatoire.

Les formes d'ondes candidates pour la 5G

Comme indiqué précédemment, il existe un besoin important pour une conception de forme d'onde en NR, qui soit robuste contre les désalignements temps-fréquence. NR a sélectionné CP-OFDM / DFT-s-OFDM comme forme d'onde de base, y compris l'ajout facultatif d'une fonctionnalité de fenêtrage ou de filtrage [19]. Cependant, ces améliorations devraient être indépendantes de l'UE/BS dans [20], ce qui signifie qu'un récepteur de base CP-OFDM/DFT-s-OFDM devrait fonctionner de manière transparente sans connaissance préalable de la méthode utilisée à l'émetteur pour réduire fuite de bande (out-of-band leakage (OOB)).

La WOLA (Weighted Overlap and Add)

Dans CP-OFDM avec WOLA, la fonction de fenêtrage $w(n)$ est remplacée par une fonction d'impulsion avec des bords doux des deux côtés, la longueur de la fenêtrage est étendue à $[-L_{wt}, N + L_{wt}]$ [21] où L_{wt} est la longueur de l'extension au-delà de la longueur CP²-OFDM. Les bords doux au début et à la fin de la fonction de fenêtrage se traduisent par une meilleure localisation de la forme d'onde WOLA dans le domaine fréquentiel. Dans [21], le symbole CP-OFDM est d'abord prolongé par une extension cyclique dans le domaine temporel, et les deux arêtes sont mises en forme par une fonction de pondération. Le symbole résultant est superposé et ajouté au symbole suivant, et donc le surdébit reste le même que dans CP-OFDM.

Il convient de noter que, bien que les symboles WOLA se chevauchent dans une rafale, lorsque l'on considère TDD, les queues de la fin du dernier symbole WOLA d'une rafale et du premier symbole WOLA de la rafale suivante s'étendent déjà dans la période de garde (guard period (GP)). Dans TDD, le GP est placé entre deux salves successives lors de la commutation DL/UL. Par conséquent, la longueur de la fenêtrage doit être choisie avec soin afin de ne pas gêner la transmission TDD.

La UF-OFDM (Universal Filtered OFDM)

La UF-OFDM est une forme d'onde candidate de la 5G, également connue sous le nom de multi-porteuse filtrée universelle (universal filtered multi-carrier (UFMC)), où des blocs de sous-porteuses (sous-bandes) sont filtrés. Ceci est réalisé en faisant passer le signal OFDM de sortie pour l'utilisateur k à travers un filtre de sous-bande $f_k(n)$ avec un ordre de filtre L_f . $f_k(n)$ est construit en déplaçant un filtre prototype $f(n)$ vers le centre de la sous-bande de l'utilisateur k . Le signal OFDM filtré en sous-bande modifié pour l'utilisateur k peut être écrit comme

$$x_k(n) = \sum_i f_k(n) * \sum_{q=0}^{Q-1} s_{k,q,i} \left(\frac{n-iN}{s} \right) e^{j2\pi f_c (n-iN)} \quad (2.1)$$

L'entrée du filtre de sous-bande UF-OFDM peut être soit un signal ZP-OFDM, soit un signal CP-OFDM (selon la valeur de N_c dans l'équation 2.1). L'avantage de l'application du filtre de sous-bande sur un signal ZP-OFDM est que le symbole global résultant peut être limité dans le domaine temporel, de sorte qu'aucun chevauchement entre les symboles successifs ne se produit dans un environnement sans interférence entre-symboles (Intersymbol interference (ISI)) (si le filtre de sous-bande l'ordre est plus petit que l'intervalle de garde $L_f < \text{NGI}$). Le filtre prototype de choix dans UF-OFDM est le filtre Dolph - Chebychev, mais il n'est pas limité à cette sélection.

La F-OFDM (Filtered OFDM)

L'OFDM filtré (F-OFDM) est une forme d'onde candidate pour la 5G. Elle est basée sur le filtrage en sous-bande d'un signal CP-OFDM [22, 23].

Par conséquent, le signal f-OFDM peut également être construit selon (2.4). Par rapport à l'UF-OFDM, la propriété clé de la F-OFDM est que la longueur du filtre, L_f , peut bien dépasser la longueur de l'intervalle de garde, ce qui lui permet de fournir une très bonne localisation en fréquence. Comme le montre [30], une troncature douce d'un filtre prototype est utilisée, qui dans ce cas est une réponse impulsionnelle $\text{sinc } p_B(n)$. La réponse impulsionnelle sinc doit avoir une largeur de bande B dans le domaine fréquentiel égale à la taille d'allocation de sous-bande.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter l'évolution de la modulation multi porteuse OFDM, les besoins qui ont menés à l'apparition de cette technologie. Cette technique apporte une solution efficace au problème due à la transmission a haute débit et ceci en divisant la bande de transmission en N sous bande orthogonale.

On fera dans le chapitre suivant, une généralisation sur la technique de modulation FBMC.

CHAPITRE 3

LA MODULATION MULTI-PORTEUSE À BASE DE BANCS DE FILTRES (FBMC)

Introduction

Dans les communications sans fil le spectre de fréquence est une ressource essentielle. Les systèmes basés sur la modulation FBMC sont complexes par rapport à l'OFDM. La technique OFDM va, alors, être moins utilisée au profit des techniques multi-porteuses à base de banc de filtres appelées FBMC fait partie des candidats les plus prometteurs pour la futur 5G. Pour garantir une communication sans interférence, il est également conserve les avantages de l'OFDM., Dans ce chapitre on va parler de la modulation FBMC en commençant par présenter les notions de base, puis en passant par décrire le signal et , finalement, on s'intéresse la modulation FBMC/OQAM.

- FBMC permet une excellente occupation spectrale mais superposition des symboles temporels

Principe de la modulation FBMC

La techniques de modulation Filter Bank Multi-Carrier (FBMC) est une modulation multi-porteuse à base de bancs de filtres. Elle est considérée parmi les forme d'ondes candidates pour les futures communications sans fil 5G. Elle utilise des bancs des filtre à réponse impulsionnelle finie (Finite Impulse Response filter (FIR)) bien localisé en fréquence et en temps avec des lobes secondaires réduits, ce qui la rend moins sensible aux erreurs. La combinaison FBMC/OQAM a réussi à conserver les avantages et améliorer les points faibles de l'OFDM.

Les différentes variantes de la modulation FBMC

Trois variantes de la modulation FBMC existent ; la modulation FBMC filtré basé sur plusieurs tons (filtered multitone-based (FM-FBMC)). La modulation FBMC modulé en co-sinusoïdal multitone (co-sine modulated multitone-based FBMC (CMT-FBMC)) et la modulation FBMC modulé en SMT (staggered multitone (SMT-FBMC)) [24].

La FMT-FBMC (filtered multitone-based FBMC)

Contrairement à l'OFDM, la modulation FMT-FBMC ne permet pas le chevauchement spectral entre les porteuses. Les interférences inter-porteuses (Inter Carrier Interferences (ICI)) deviennent ainsi négligeables. Elle n'utilise aucun intervalle de garde (Guard Interval (GI)). Elle a alors besoin d'un égaliseur pour combattre les interférences inter-symboles (intersymbol interference (ISI)). Elle est moins sensible au décalage fréquentiel en comparaison avec l'OFDM. Elle a été proposée pour la transmission des données dans le standard des Lignes d'abonné numériques à très haut débit (Very high-speed Digital Subscriber Line (VDSL)) [25].

La figure 3.1 présente une chaîne de transmission à base de la modulation FMT-FBMC.

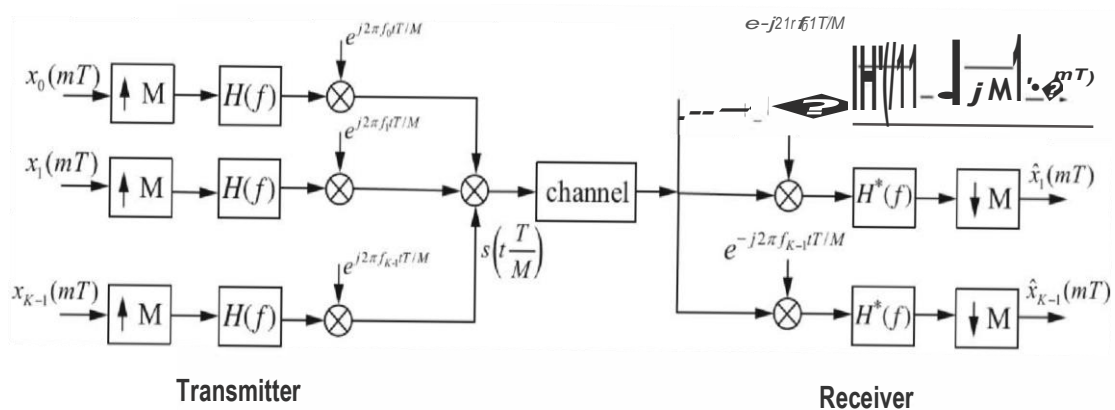


FIGURE 3.1 - une chaîne de transmission à base de la modulation FMT-FBMC.

Les symboles de modulation à valeurs complexes $x_k(mT)$, $k = 0, 1, \dots, K - 1$ sont obtenus directement à partir d'une constellation d'une modulation d'amplitude en quadrature de phase (quadrature amplitude modulation (QAM)). $1/T$ est le débit de symboles.

La CMT-FBMC (co-sine modulated multitone-based FBMC)

La modulation CMT-FBMC transmet directement des symboles PAM (Pulse-amplitude modulation (PAM)).

Elle est fondamentalement la même que la modulation multi-tons à ondelettes discrètes (discrete wavelet multitone (DWMT) modulation) où les flux parallèles des symboles des données PAM sont transmis en utilisant un ensemble des sous-porteuses à bande latérale résiduelle (vestigial sideband (VSB) sub-carriers). La figure 3.2 présente une chaîne de transmission à base de la modulation CMT-FBMC.

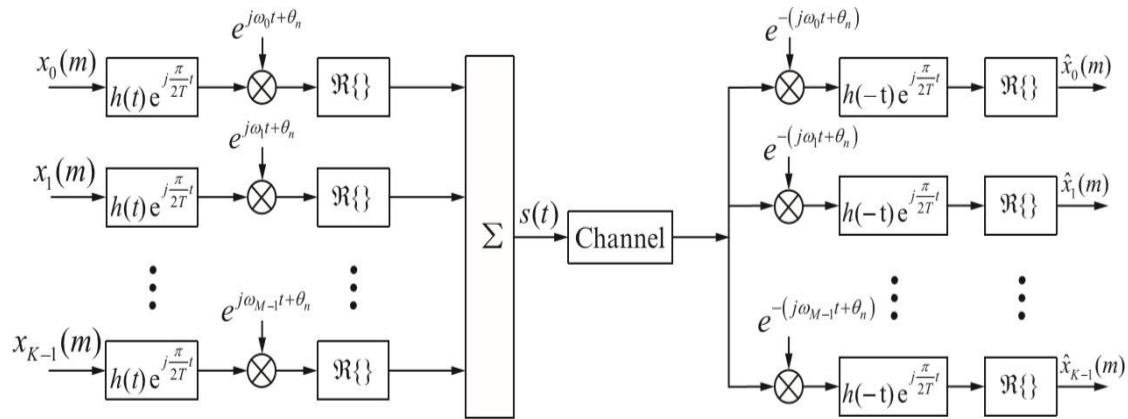


FIGURE 3.2 – une chaîne de transmission à base de la modulation CMT-FBMC.

La OQAM-FBMC (offset quadrature amplitude modulation-based FBMC) ou la SMT-FBMC

La OQAM-FBMC, également appelé OFDM/OQAM ou SMT-FBMC est une approche intéressante de la modulation multiporteuse (MCM), qui a été développée au cours de plusieurs projets de recherche parrainés par la Commission européenne tels que PHYDYAS I et II (voir par exemple [26, 27]). Le choix de la modulation OQAM-FBMC à étudier dans ce travail de recherche repose sur plusieurs avantages qui en font une technique de modulation multi-porteuse plus attrayante pour les futures communications sans fil par rapport à l'OFDM conventionnel avec CP et à d'autres variantes FBMC.

Principalement, OQAM-FBMC atteint une efficacité spectrale maximale car il évite toute forme de redondance par ex. bandes de garde ou périodes de garde par rapport au CP-OFDM ou FMT. De plus, l'OQAM-FBMC utilise des filtres hautement sélectifs en fréquence, et par conséquent présente moins d'émission hors bande par rapport à l'OFDM qui utilise un filtre prototype avec une caractéristique sinc périodique dans le domaine fréquentiel.

La chaîne de transmission à base de la modulation OQAM-FBMC

Le système OQAM-FBMC est classé comme une modulation multi-porteuse échantillonné de manière critique qui fonctionne dans la configuration du transmultiplexeur en tant qu'entrée du banc de filtres d'analyse (analysis filter bank (AFB)) au niveau du récepteur, qui est alimentée par la sortie de la banque de filtres de synthèse (synthesis filter bank (SFB)) au niveau de l'émetteur [28].

Le schéma fonctionnel du système OQAM-FBMC est illustré à la Fig.3.3.

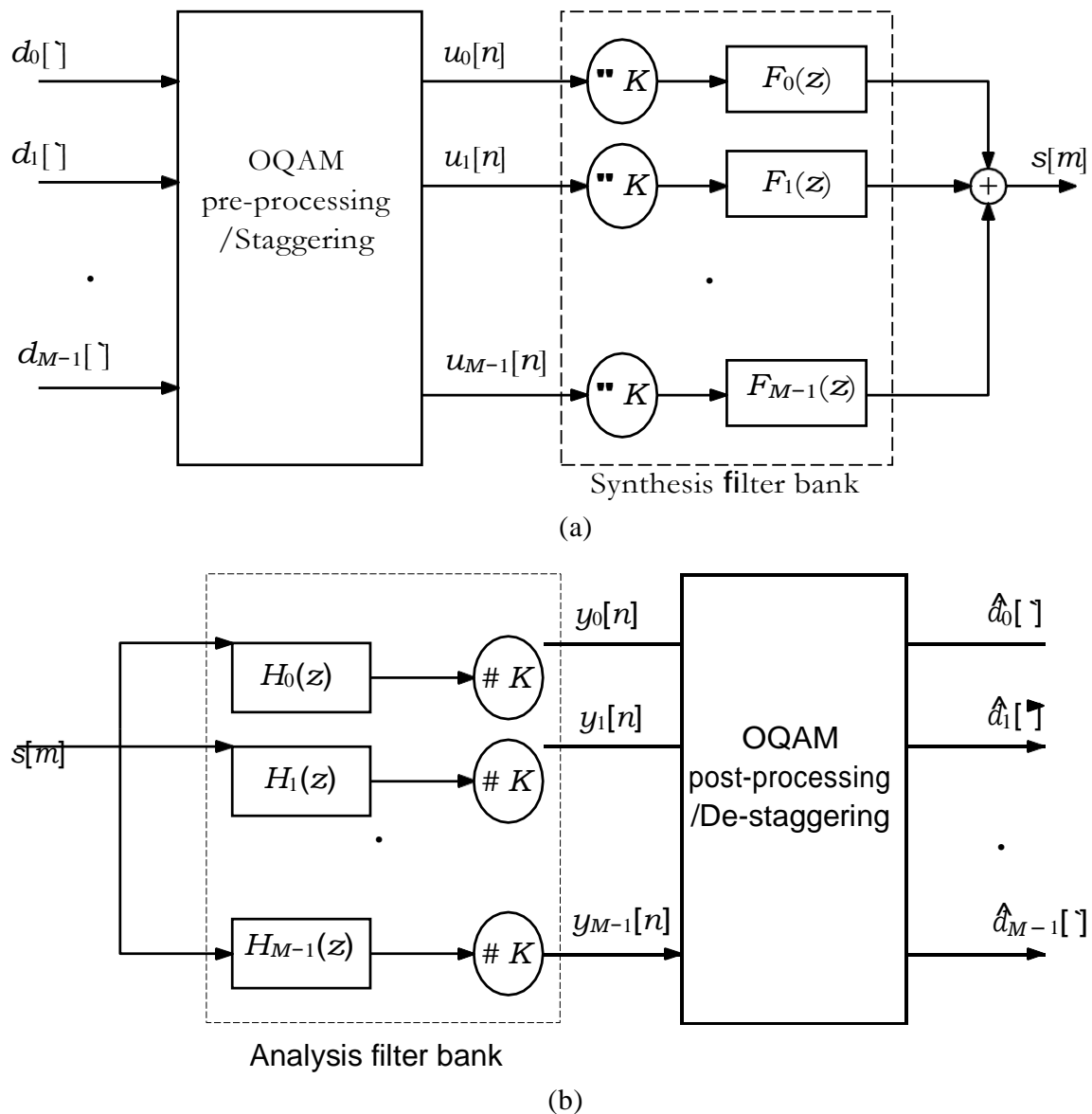


FIGURE 3.3 – Schéma fonctionnel d’un système OQAM-FBMC en (a) émetteur et (b) récepteur.

On peut voir que OQAM-FBMC fonctionne à travers deux sous-systèmes principaux : un système de bancs de filtres et un système de pré- et post-traitement OQAM. Chaque sous-système (banc de filtres et OQAM) est représenté par un bloc au côté émetteur (pré-traitement OQAM et SFB), comme indiqué sur la figure 3.3 (a), et un autre bloc correspondant au côté récepteur (post-traitement OQAM et AFB), comme illustré à la Fig.3.3 (b).

Le signal QAM à faible débit $d_i[\mathbf{C}] \in \mathbb{C}, i = 0 \dots M - 1$ avec l'indice de temps \mathbf{C} est mappé sur $u_i[n] \in \mathbb{C}$ par le bloc de prétraitement OQAM, où M est le nombre de sous-canaux. Ensuite, le signal OQAM $u_i[n]$ est multiplexé par SFB pour générer un signal à haut débit $s[m] \in \mathbb{C}$, avec un indice de temps m fonctionnant $2K$ fois plus vite que l'indice \mathbf{C} , où $K = \frac{M}{2}$ est le facteur de suréchantillonnage et de sous-échantillonnage utilisé respectivement dans SFB et AFB. La valeur de K reflète que OQAM-FBMC est un système échantillonné de manière critique. Par contre, en l'absence du système OQAM et en utilisant $K > M$, le système FBMC devient un système suréchantillonné avec des bandes de garde conduisant à une perte d'efficacité spectrale.

Système OQAM

Le système OQAM représente les processus initiaux et terminaux du système OQAM-FBMC comme le montre la Fig.3.3, et joue un rôle crucial dans le système OQAM-FBMC, où il établit l'orthogonalité dans le domaine réel entre les sous-canaux adjacents qui se chevauchent.

Au côté de l'émetteur, le bloc de pré-traitement OQAM alterne entre les composantes en phase (réelle) et en quadrature (imaginaire) de chaque symbole QAM à valeurs complexes dans $d_i[\mathbf{C}]$ pour générer deux nouveaux symboles. Par conséquent, la sortie du prétraitement OQAM $u_i[n]$ fonctionne à une vitesse qui est deux fois plus rapide que celle des signaux QAM d'entrée $d_i[\mathbf{C}]$ i.e. ($n = 2\mathbf{C}$). Comme le montre la figure 3.4, la séquence des symboles OQAM de sortie repose sur l'indice de sous-canal.

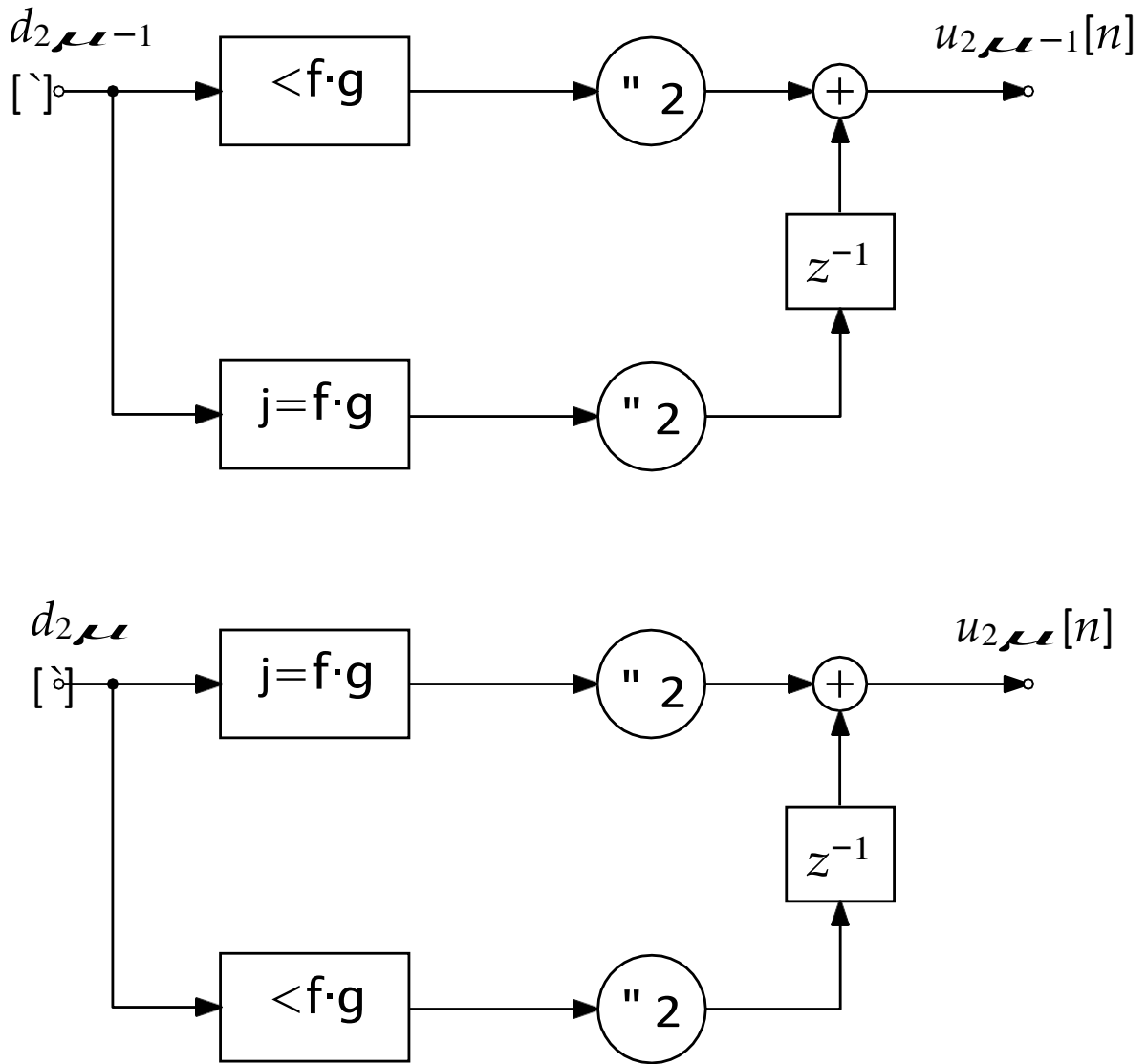


FIGURE 3.4 - Pré-traitement OQAM pour deux sous-canaux adjacents, avec $\mu = 1 \dots \frac{M}{2}$.

Pour les sous-canaux impairs d'indice $2\mu - 1$, $\mu = 1 \dots \frac{M}{2}$, le signal de sortie peut être formulé comme

$$\begin{aligned} u_{2\mu-1}[2C] &= \Re\{d_{2\mu-1}[C]\} \\ u_{2\mu-1}[2C+1] &= j \Im\{d_{2\mu-1}[C]\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

où $\Re\{\cdot\}$ et $\Im\{\cdot\}$ désignent respectivement les parties réelle et imaginaire d'un symbole à valeurs complexes.

En revanche, dans les sous-canaux pairs d'index 2μ , $\mu = 1 \dots \frac{M}{2}$, la sortie OQAM est donnée par

$$\begin{aligned} u_{2\mu}[2C] &= j \Im\{d_{2\mu}[C]\} \\ u_{2\mu}[2C+1] &= \Re\{d_{2\mu}[C]\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Le post-traitement OQAM est représenté sur la fig. 3.5, où les composantes réelle et imaginaire de la sortie AFB $y_i[n]$ sont combinées en alternance pour former le signal de sortie estimé $\hat{d}_i[C]$. Similaire au pré-traitement OQAM, l'opération de décalage est effectuée sur la base de l'indice de sous-canal comme suit

$$\begin{aligned} \hat{d}_{2\mu-1}[C] &= \Re \{ y_{2\mu-1}[2C] + j y_{2\mu-1}[2C+1] \} \\ \hat{d}_{2\mu}[C] &= \Re \{ y_{2\mu}[2C+1] + j y_{2\mu}[2C] \} \end{aligned} \quad (3.3)$$

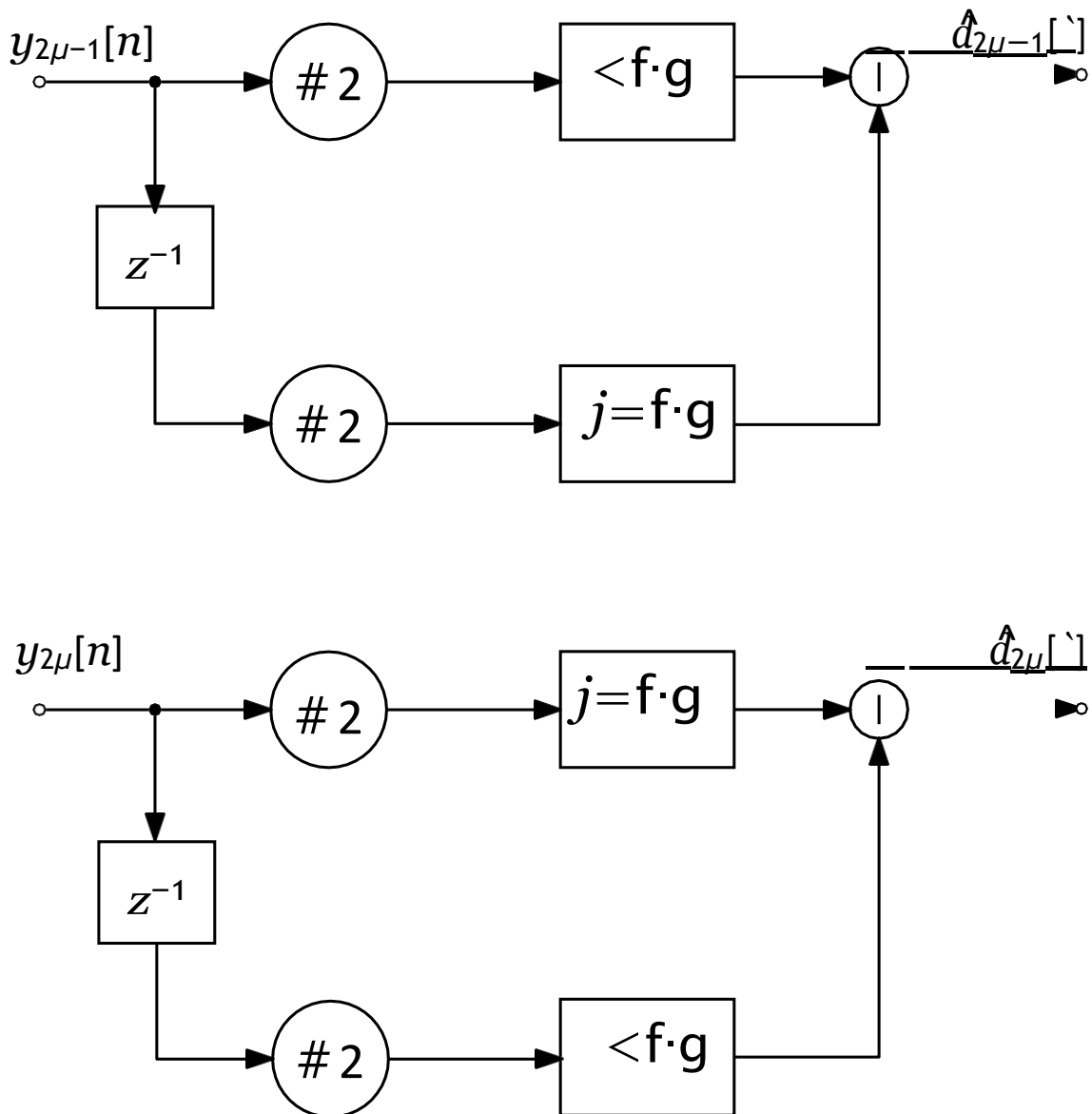


FIGURE 3.5 – Post-traitement OQAM pour deux sous-canaux adjacents, avec $\mu = 1 \dots \frac{M}{2}$.

Le but de cet échelonnement et déséchelonnement est de permettre une reconstruction parfaite - en l'absence d'un canal dispersif et de toute erreur de synchronisation - du système de banc de filtres interne, qui est par ailleurs fondamentalement limité par le théorème de Balian-Low [29]. Ce théorème indique que la densité parfaite des symboles, la localisation temporelle et fréquentielle (c'est-à-dire l'échantillonnage critique) ainsi que l'orthogonalité ne peuvent pas être satisfaites simultanément. Avec l'affectation de symboles ci-dessus, la condition d'orthogonalité pour les symboles à valeurs complexes est remplacée par la condition d'orthogonalité moins stricte pour les parties réelles uniquement.

L'analyse et la synthèse par les bancs de filtres

Comme le montre la figure 3.3, le banc de filtres de synthèse est constitué de M branches parallèles pour multiplexer les signaux OQAM dans $u_i[n]$ sur le i ème sous-canal correspondant. Chaque succursale du SFB est équipée d'un sur-échantillonneur et d'un filtre $F_i(z)$. Le signal émis $s[m]$ est composé en ajoutant les signaux de sortie SFB. Du côté récepteur, la banque de filtres d'analyse est constituée de M branches parallèles pour effectuer les opérations nécessaires vers le SFB. Le signal reçu $s[m]$ est d'abord dé-multiplexé aux sous-bandes correspondantes, puis sous-échantillonné avec un facteur K pour générer les signaux de sortie $y_i[n]$. Les facteurs de sur-échantillonnage et de sous-échantillonnage sont définis pour avoir la même valeur de $K = M/2$ dans toutes les branches. Le système de banc de filtres divise la bande passante de canal disponible de manière égale pour tous les signaux sur toutes les branches du SFB et de l'AFB, afin de mettre en œuvre un système FBMC uniforme. Par conséquent, les filtres du SFB, $F_i(z)$, $i = 0 \dots (M - 1)$, peuvent être générés en modulant l'exponentielle complexe avec un filtre prototype bien conçu.

Conclusion

Dans ce chapitre, le banc de filtre et son fonctionnement étaient expliqués, nous avons effectué une étude sur la modulation FBMC-OQAM, elle offre une précision spectrale supérieure ainsi qu'une efficacité améliorée, mais la modulation FBMC- OQAM est soumise à une complexité informatique accrue. Il convient également de noter que la modulation FBMC / OQAM possède les fonctionnalités clés nécessaires pour envoyer des symboles dans un spectre fragmenté ou dans des réseaux où une synchronisation rapprochée n'est pas possible.. La technologie FBMC est le plus souvent utilisée car elle réduit les pertes d'informations lors de la transmission par rapport à d'autres techniques telles que l'OFDM. Cette technologie a les inconvénients d'être plus complexe que d'autres technologies et de coûts élevés

CHAPITRE 4

SIMULATIONS ET RÉSULTATS

La modulation multiporteuse avec multiplexage par répartition orthogonale de la fréquence (OFDM) est utilisée dans le système cellulaire 4G et offre des débits de données plus élevés que les systèmes monoporteurs précédents. Cependant, l'OFDM souffre d'une fuite de lobe latéral plus élevée qui limite l'efficacité spectrale. Divers bancs de filtres basés sur la modulation DFT et DCT ont été étudiés pour résoudre cette limitation. Les bancs de filtres basés sur la DFT (communément appelés bancs de filtres pour modulation multi-porteuse ou FBMC) et les bancs de filtres basés sur la DCT (banc de filtres modulés en cosinus ou CMFB) sont les exemples les plus courants qui ont été largement explorés au cours des dernières décennies. Dans ce chapitre, nous comparons les performances de ces bancs de filtres et analysons divers compromis de conception. Ces bancs de filtres ont généralement une complexité plus élevée que l'OFDM, mais ont une meilleure efficacité spectrale qui est requise pour de nombreuses applications telles que les radios cognitives et le système d'accès multiple basé sur OFDMA.

Méthodologie

Dans les sections suivantes, nous analysons les performances d'une chaîne de communication multi-porteuses basé sur FBMC/CMFB/OFDM en termes de densité spectrale de puissance (power spectral density (PSD), *en Anglais*) et de taux d'erreur sur les bits (bit error rate (BER), *en Anglais*). La PSD nous donnera une idée de l'importance de la fuite des lobes latéraux (the side-lobe leakage, *en Anglais*), qui affecte les symboles voisins dans le domaine fréquentiel. Le BER nous indique si les bits chargés dans les sous-porteuses peuvent être décodés correctement et vérifie qu'une reconstruction presque parfaite est possible sous l'impact du bruit.

Pour effectuer la simulation, on génère des bits aléatoires au niveau de l'émetteur, on les module avec une modulation 64-QAM et puis on les passe à l'entrée du banc de filtres synthétiseur. On traite également les symboles modulés complexes et les rend réels par traitement OQAM. Le symbole à transmettre passe ensuite par le canal sans fil. Le canal sans fil est modélisé comme un canal AWGN avec une puissance de bruit qui dépend du SNR cible. Enfin, le récepteur implémente le *channelizer* (le filtre analyseur) et le traitement inverse pour récupérer les bits transmis. On trace la courbe BER-SNR pour analyser la performance de la chaîne de transmission en question.

Comparison de l'OFDM, la FBMC, et la CMFB

D'abord, nous traçons la PSD du système OFDM, FBMC et CMFB sur la figure 4.1. La puissance moyenne est normalisée pour les trois systèmes. Nous observons que l'OFDM souffre d'une fuite de lobes secondaires pire d'environ -30 dBW/Hz, suivie par le CMFB (-100 dBW/Hz). Le FBMC offre les meilleures performances avec une fuite des lobes secondaires inférieure à -150 dBW/Hz. Cela fait cependant du FBMC le meilleur choix pour la communication multi-porteuse, avec un compromis de complexité plus élevée que l'OFDM. Ensuite, sur la figure 4.2, nous montrons les courbes BER vs SNR. Nous observons que les performances des systèmes OFDM, FBMC et CMFB sont presque identiques. Nous notons ici que les performances des trois systèmes diffèrent du point de vue de la fuite des lobes

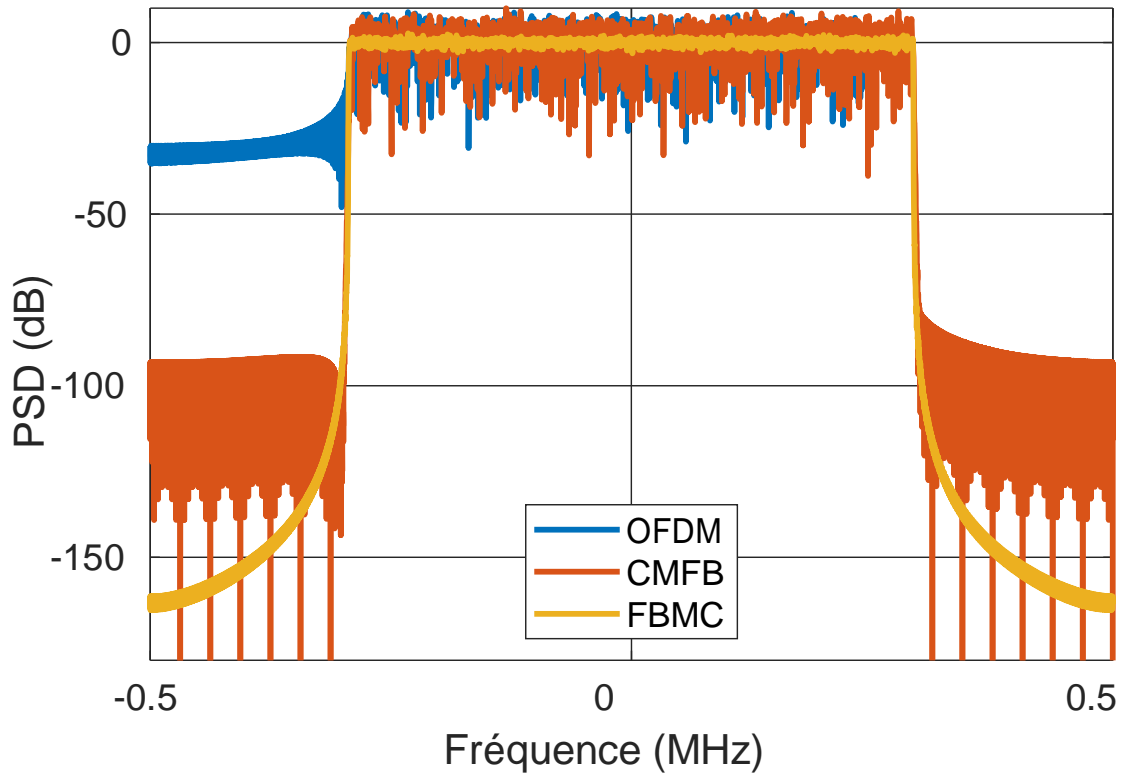


FIGURE 4.1 - Comparaison de la PSD des trois techniques : OFDM, FBMC et CMFB.

latéraux qui affecte le système lorsque plusieurs utilisateurs utilisent des bandes de fréquences adjacentes pour la communication. Cependant, pour un système mono-utilisateur que nous avons implémenté, les performances BER ne sont pas affectées.

L'effet du nombre des canaux (M)

Nous voyons sur la figure 4.3 que la PSD a une fuite de bande latérale beaucoup plus faible pour les M les plus grands. Ainsi, un M plus grand est préféré. Cependant, un grand M entraînera un retard plus long dans l'obtention du symbole car le récepteur doit recevoir tous les M points de données avant de commencer à traiter ce symbole.

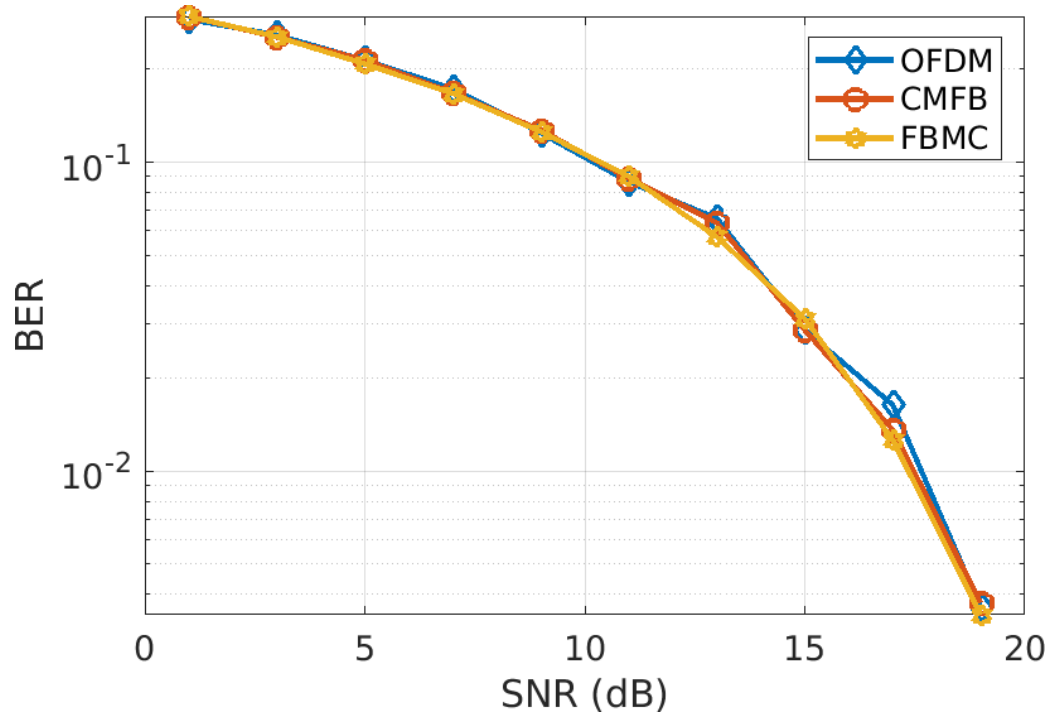


FIGURE 4.2 – BER vs SNR pour les trois techniques : OFDM, FBMC et CMFB.

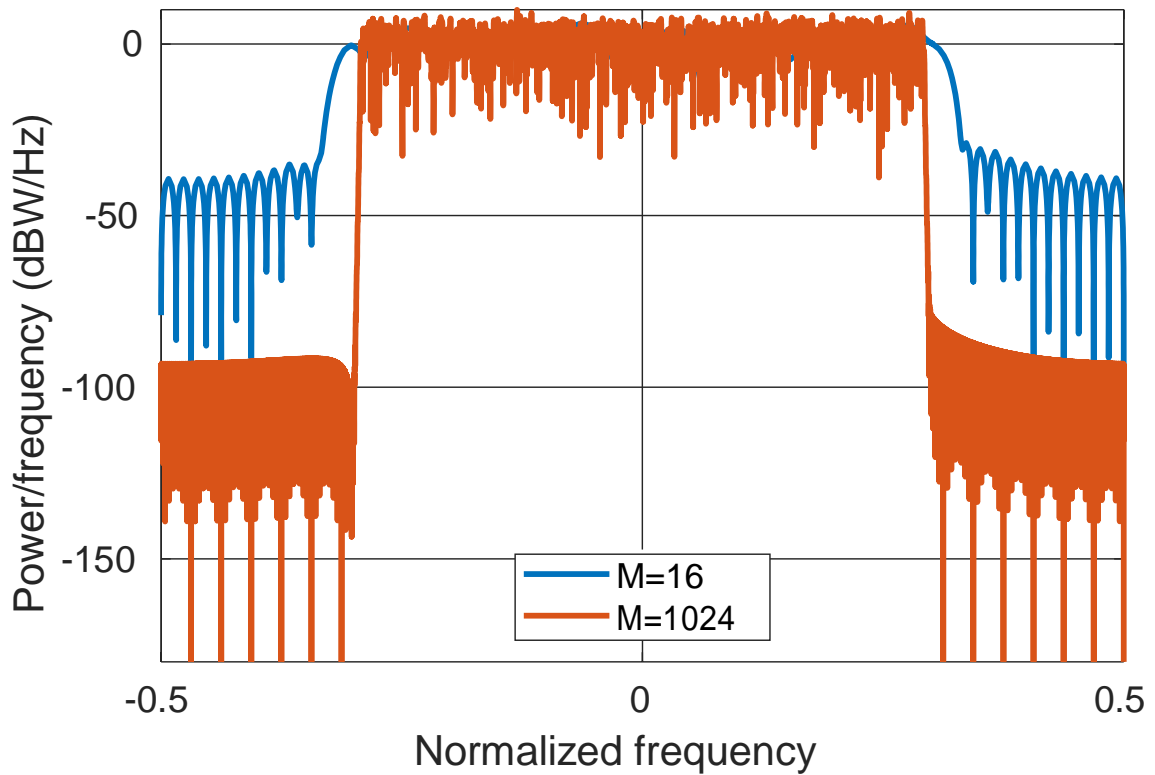


FIGURE 4.3 – L'effet du nombre des canaux (M).

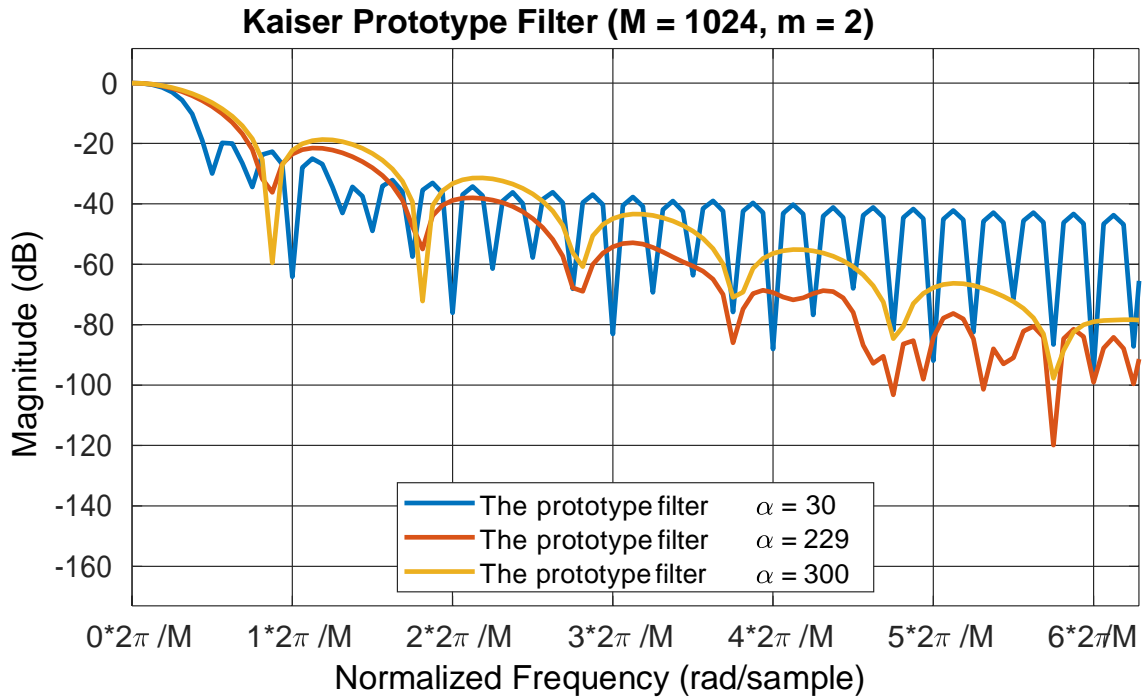


FIGURE 4.4 - L'effet du paramètre α du filtre prototype Kaiser.

Les effets des paramètres des filtres pour CMFB

L'effet du paramètre α du filtre prototype Kaiser

Comme nous le voyons dans la figure 4.4, un grand *alpha* conduit à une atténuation de bande latérale plus faible pour les bandes éloignées, mais au détriment d'une atténuation plus élevée dans les bandes adjacentes.

L'effet de l'ordre m du filtre prototype Kaiser

Le filtre prototype Kaiser d'ordre $m = 1$ ne donne pas beaucoup d'avantages sur la fenêtre rectangulaire comme le montre la figure 4.5. L'utilisation d'un filtre d'ordre supérieur ($m = 2$ sur la figure 4.5) donne cependant de meilleures performances en termes de réduction des fuites des lobes latéraux, avec un compromis de complexité de mise en œuvre plus élevée.

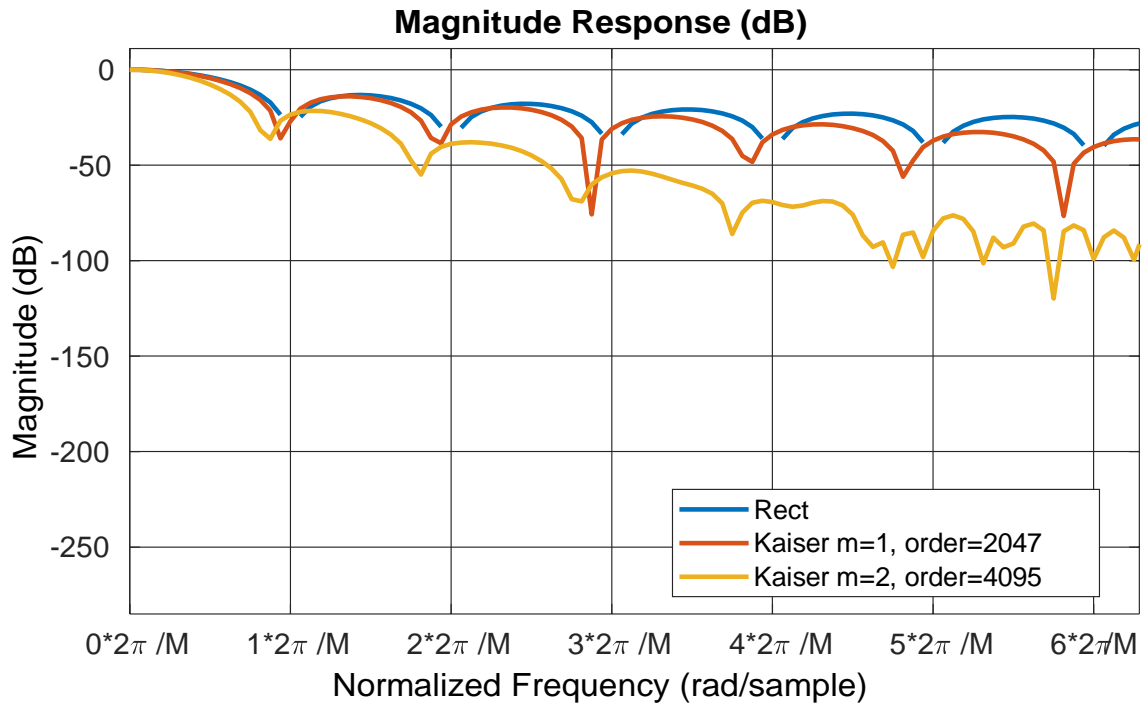


FIGURE 4.5 – L'effet de l'ordre m du filtre prototype Kaiser.

L'effet du paramètre r du filtre prototype Kaiser

Nous observons sur la figure 4.6 que le filtre de Chebyshev avec $r = 100$ donne la fuite minimale des lobes latéraux.

L'effet des fonctions de fenêtrage

Nous comparons ici les amplitudes de plusieurs filtres pour le système CMFB comme le montre la figure 4.7. On observe ici est que la fenêtre de Kaiser est la plus appropriée pour minimiser les fuites des lobes latéraux. D'autres filtres tels que la fenêtre Blackman ou la fenêtre Blackman Harris ont des amplitudes meilleures que celle de la fenêtre rectangulaire, mais pire par rapport à la fenêtre Kaiser.

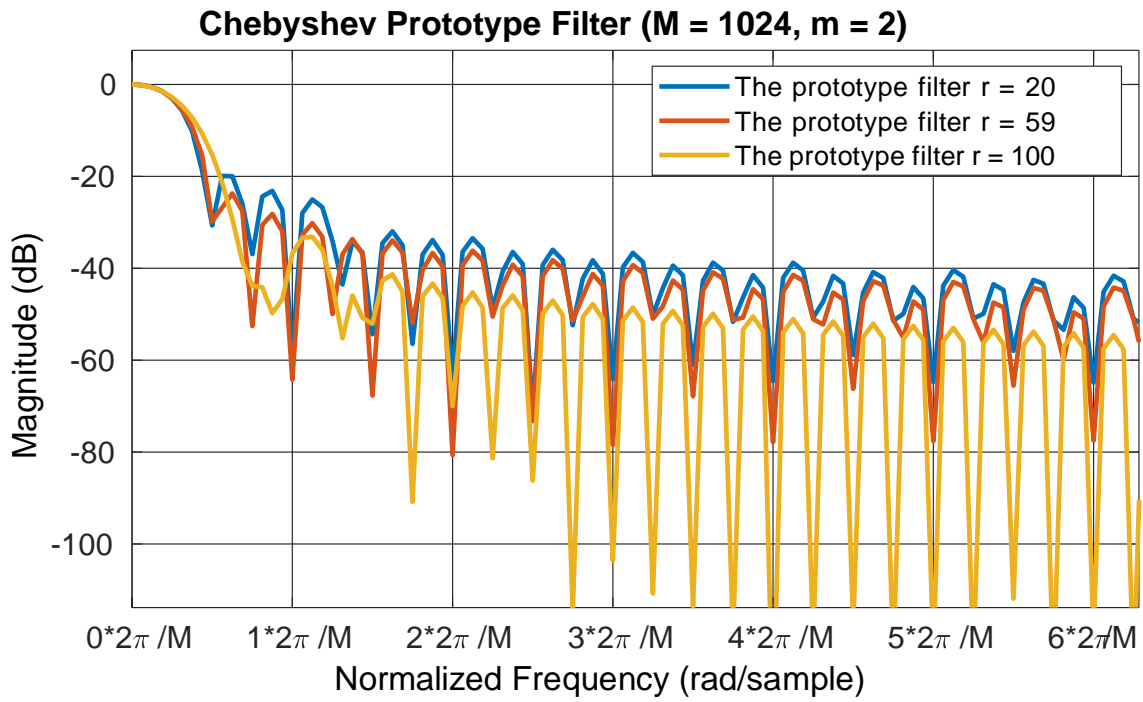


FIGURE 4.6 - L'effet du paramètre r du filtre prototype Kaiser.

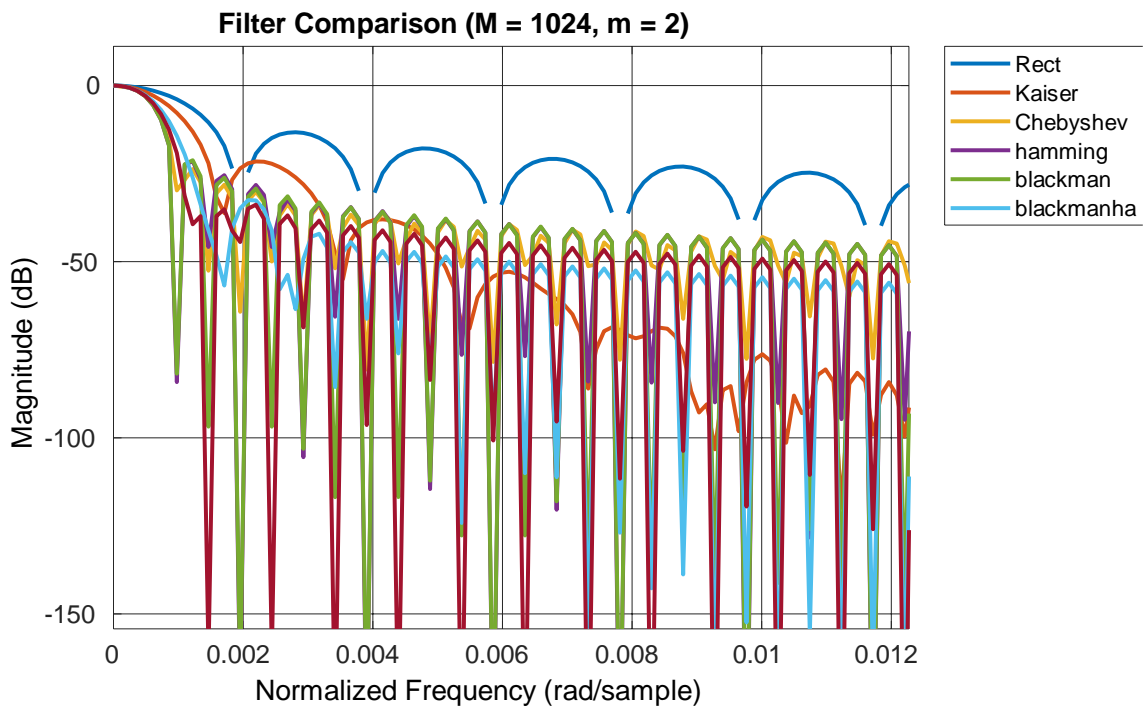


FIGURE 4.7 - L'effet des fonctions de fenêtrage.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La demande des nouveaux services et applications sans fil ainsi que le nombre d'utilisateurs augmentent rapidement, ce qui impose des contraintes de débit. Parmi les solutions étudiées pour répondre à ces contraintes de débit, on trouve les modulations multi porteuses: la modulation OFDM et FBMC.

Dans ce mémoire, nous avons étudié une problématique en communications numériques basée sur le traitement du signal, et le principal objectif de ce projet est d'élaborer la simulation comparative des techniques FBMC et OFDM pour des canaux sans fils

La simulation que nous avons réalisé a permis de montrer les intérêts d'une modulation et démodulation FBMC d'un point de vue de taux d'erreurs binaires (BER) et le profil de puissance (PSD), ainsi que le type de filtre Prototype et le genre du canal.

Les résultats de simulation montrent que le FBMC donne une amélioration globale de la performance par rapport à OFDM classique en termes de sortie hors bande et réduction de lobe latéraux par rapport au modulation OFDM. Mais la technique FBMC demande une puissance élevée pour la transmission .

La modulation multi porteuses FBMC fait partie des candidats les plus prometteurs pour la 5G.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] The story behind the first cell phone call ever made (online). <https://www.bloomberg.com/news/articles/2015-04-24/the-story-behind-the-first-cell-phone-call-ever-made>.
- [2] V.H. McDonald. The cellular concept. 1979.
- [3] W. Lee. *Mobile Communications Engineering*. (McGraw-Hill), 1982.
- [4] J.G. Proakis. *Digital Communications*. (McGraw-Hill), 2001.
- [5] Ref5. *Ref5*. (Ref5), 2001.
- [6] Ref6. *Ref6*. (Ref6), 2001.
- [7] J. Melero J. Romero, T. Halonen. *GSM, BPRS and EDGE Performance : Evolution Towards 3G/UMTS*. (Wiley), 2002.
- [8] Imt vision – framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond m series mobile , radiodetermination , amateur and related satellite services. 2015.
- [9] Thomas L. Marzetta, Erik G. Larsson, Hong Yang, and Hien Quoc Ngo. *Fundamentals of Massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.
- [10] Mojtaba Vaezi and Ying Zhang. *Cloud Mobile Networks : From RAN to EPC*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition, 2017.

- [11] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A. Aghvami, and V. C. M. Leung. Network slicing based 5g and future mobile networks : Mobility, resource management, and challenges. *IEEE Communications Magazine*, 55(8) :138–145, 2017.
- [12] Zhang Y. Vaezi M. *Radio Access Network Evolution. In : Cloud Mobile Networks. (Wireless Networks. Springer), 2017.*
- [13] (Online). The 38 series of technical specification (ts) for 5g-nr.
- [14] H. Sarkissian B.Ayvazian. Spectrum strategies for 5g. wireless 20/20 report (online). 2017.
- [15] F. Schaich and T. Wild. Waveform contenders for 5g – ofdm vs. fbmc vs. ufmc. In *2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, pages 457–460, 2014.
- [16] J. Proakis. *Digital communications, fourth edition.* 2001.
- [17] Nickolas J. LaSorte, W. Barnes, and H. Refai. The history of orthogonal frequency division multiplexing. *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, pages 1–5, 2008.
- [18] Frank Schaich and Thorsten Wild. Subcarrier spacing - a neglected degree of freedom? *2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, pages 56–60, 2015.
- [19] R1-167963 way forward on waveform ran1 86. (2016).
- [20] Ran1 86bis chairmans notes.
- [21] Qualcomm. 5g waveform & multiple access techniques. 2015.
- [22] Mohammad Javad Abdoli, M. Jia, and Jianglei Ma. Filtered ofdm : A new waveform for future wireless systems. *2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, pages 66–70, 2015.
- [23] X. Zhang, M. Jia, L. Chen, Jianglei Ma, and J. Qiu. Filtered-ofdm - enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks. In *GLOBECOM 2014*, 2014.

- [24] Tobias Hidalgo Stitz. Filter bank techniques for the physical layer in wireless communications. 2010.
- [25] G. Cherubini, E. Eleftheriou, and S. Olcer. Filtered multitone modulation for vdsl. *Seamless Interconnection for Universal Services. Global Telecommunications Conference. GLOBECOM'99. (Cat. No.99CH37042)*, 2 :1139–1144 vol.2, 1999.
- [26] G. Wunder, Martin Kasparick, T. Wild, F. Schaich, Yejian Chen, Marcin Dryjanski, M. Buczkowski, S. Pietrzyk, Nicola Michailow, Maximilian Matthe, I. Gaspar, L. Mendes, A. Festag, G. Fettweis, J. Doré, N. Cassiau, D. Ktenas, V. Berg, B. Eged, and P. Vago. 5gnow : Intermediate frame structure and transceiver concepts. *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 565–570, 2014.
- [27] Peng Li. Enhanced multicarrier techniques for professional ad-hoc and cell-based communications (emphatic) document number d 6 . 1 cooperative communications and synchronization. 2013.
- [28] A. Viholainen, T. Ihalainen, T. H. Stitz, M. Renfors, and M. Bellanger. Prototype filter design for filter bank based multicarrier transmission. In *2009 17th European Signal Processing Conference*, pages 1359–1363, 2009.
- [29] H. Feichtinger and T. Strohmer. Gabor analysis and algorithms : Theory and applications. 1997.

Résumé

La nouvelle génération des réseaux mobiles (5G) devrait répondre à des nombreuses exigences, y compris un débit des données élevées, la communication sans fil est l'un des sujets les plus importants de la recherche scientifique. Ceci afin d'obtenir une communication sans fil de bonne qualité tout en réduisant les coûts et les risques pour la santé. Les modulations multi porteuses à base de bancs de filtres (FBMC) se présentent comme des prétendants potentiels pour les futures générations des systèmes de communication 5G grâce à leurs avantages par rapport à l'OFDM. La technique de transmission multi porteuses OFDM utilisée dans la 4G souffre de plusieurs inconvénients qui empêchent son utilisation dans un contexte de réseaux mobiles 5G. Dans cette note, nous présentons une étude de cette technique, de ses caractéristiques et de ses problèmes les plus importants, par rapport à d'autres techniques. Dans ce mémoire, trois points importants ont été soulevés. Premièrement Les principes des modulations OFDM et FBMC et leurs avantages ; deuxièmement, la comparaison entre l'OFDM et le FBMC du point de vue du taux d'erreur binaire est discutée. Et enfin, nous avons fait des différentes simulations avec l'outil MATLAB pour le choix de la meilleure modulation.

Mots clés : 5G,4G,FBMC,OFDM..

Abstract

The next generation of mobile networks (5G) is expected to meet many requirements, including high data throughput, Wireless communication is one of the most important topics in scientific research. In order to achieve good quality wireless connectivity while minimizing health costs and risks, FBMCs are potential candidates for future generations of 5G communication systems because of their advantages over OFDM. The OFDM multi-carrier transmission technique used in 4G suffers from several disadvantages that prevent its use in a context of 5G mobile networks. In this note, we present a study of this technique, its characteristics and its most important problems, compared to other techniques. In this brief, three important points were raised. First the principles of OFDM and FBMC modulations and their advantages; secondly, the comparison between the OFDM and the FBMC from the point of view of the bit error rate is discussed, and finally, we made different simulations with the MATLAB tool for the choice of the best modulation.