

## Yardımcı Pilot Sembolleri ve Kodlama Tekniklerini Kullanan FBMC Dalga Formu Yapısı ile OFDM Sisteminin Kıyaslanması

Bircan KAMIŞLIOĞLU, Ayhan AKBAL

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ  
bkamislioglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 23.03.2018; Kabul/Accepted: 03.09.2018)

### Özet

Yeni nesil haberleşme sistemleri olarak bilinen 5G haberleşme sistemlerinde FBMC yapısı önemli bir gelişme göstermiş literatürde çoğunlukla tercih edilen OFDM yapısının aksine çok daha iyi spektral özellikler sağlamaktadır. Haberleşme sistemlerinde veri iletimi için önemli rol oynayan kanal durum bilgisi gereksiniminin giderilmesi nedeniyle kanal tahmini yöntemlerine başvurulmaktadır. FBMC yapısı için bu çalışmada pilot sembol destekli kanal tahmini, kodlama ve yardımcı pilot sembol yöntemleri kullanılmıştır. Literatürde büyük yer tutan OFDM ve FBMC yapıları kullanılarak yapılan modülasyon işlemlerinde bu iki tekniğin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları incelenmiş bit hata olasılığı, ortalama gücün tepe güce oranı, iletim güçleri, güç spektral yoğunluğu, kapasite artışı gibi parametreler bakımından karşılaştırmaları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uygulamalar farklı kanal modelleri için yenilenerek farklı kanalların etkisi de ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** OFDM, FBMC, Pilot sembol, Kanal tahmini.

## Comparing FBMC Waveform Structure Using Auxiliary Pilot Symbols and Coding Techniques and OFDM System

### Abstract

In the 5G communication systems known as new generation communication systems, the FBMC structure has shown a significant improvement in the literature and provides much better spectral characteristics in contrast to the most preferred OFDM structure. Channel estimation methods are used to eliminate the need for channel status information that plays an important role in data transmission in communication systems. For the FBMC structure, pilot symbol supported channel estimation, coding and auxiliary pilot symbol methods were used in this study. In the modulation processes using OFDM and FBMC structures, which have a large space in the literature, the advantages and disadvantages of these two techniques compared to each other were compared. In addition, applications for different channel models have been renewed and the effects of different channels have been put forward.

**Keywords :** OFDM; FBMC; Pilot symbol; Channel estimation.

### 1. Giriş

OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation-Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama) iyi spektral performansı, çok yollu kanallara ve gürültü dürtüsüne karşı düşük hassasiyet gösterdiğinden dolayı birçok uygulamada geniş bir şekilde yer bulmuştur. OFDM mevcut spektrumunu birbirine paralel birçok alt taşıyıcıya bölerek ve bu her alt taşıyıcıyı düşük veri yayılım hızı ve farklı frekanslarda modüle eden çok taşıyıcılı bir modülasyon tekniğidir. OFDM sağlamlık, çoklu yol gecikmesinde ve düşük semboller arası girişimde (ISI) yüksek spektral etki sağlar. OFDM kullanıcılara ton sayısına göre

verinin modüle edilmesini sağlayan bir modülasyon tekniğidir. Bilgi tonun fazını ve genliğini ayarlayarak modüle edilir. En temel yaklaşım olarak, bir ton devre dışı bırakılabilir ya da bilginin bir ya da sıfır bitini gösterebilir. Bu durumda faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) ya da karesel genlik modülasyonu (QAM) kullanılır. OFDM veri sembollerini N paralel veri akışına böler böylece her bir veri akışı orijinal hızın 1/N oranında hızda bölünmüş olur. Her bir akış kendine özgü bir frekansta bir tonla eşleştirilir ve ters hızlı Fourier dönüşümü (IFFT) kullanılarak bir araya getirildiğinde iletilecek zaman domeni

dalga formu elde edilir. OFDM blok sayısal iletişim tekniğidir. Kablosuz çoklu medya uygulamalarının giderek daha fazla popüler hale gelmesiyle birlikte OFDM'in çoklu taşıyıcılı iletimi sayesinde gereken bit hızına ulaşılmaktadır. Çok taşıyıcılı modülasyon kanal bozulmasıyla mücadele etmek ve spektral verimliliği arttırmak için yaygın bir şekilde kullanılır. Çoklu taşıyıcılı modülasyon giriş verisini modülasyonun yapıldığı bantlara böler, farklı taşıyıcı frekanslarında çoğaltır böylece bilgi alt taşıyıcıların her birinden iletilmiş olur. Geleneksel OFDM yapısında sinyalleri bir araya getirmek için IFFT ve OFDM'de semboller arası girişimi ve taşıyıcılar arası girişimi engellemek için her sembole ön ek (CP-Cyclic Prefix) eklenir. Ancak bu ekleme işlemi spektral etkiyi düşürerek OFDM'in dezavantajını oluşturmaktadır[1]. Çevrimsel ön ekli ortogonal frekans bölme çözümleri (CP-OFDM), LTE [2] ve Wi-Fi [3] gibi mevcut kablosuz iletişim standartlarında yaygın olarak benimsenen çok yönlü bir teknolojidir. Geniş bantlı çoklu modülasyondaki etkili alt kanallaşmaya, çok yönlü gecikme dayanıklılığına ve verimli ton denkleştirmeye rağmen, CP-OFDM sadece CP ve koruma bandı gibi dezavantajlar sağlamaz aynı zamanda mükemmel senkronizasyon güvenilirliği sağlar. Her alt taşıyıcı başına bir darbe şekillendirme filtresi seçilmesinden kaynaklanan iyi sınırlanmış zaman frekans özelliklerinden dolayı çok taşıyıcılı filtre bankası (FBMC-Filter Bank Multi Carrier), koruma bandı yükünü azaltır. Artan sembol süresi çok yönlü sönmülemeli kanalları CP olmaksızın işlemek için etkilidir. Hem CP hem de koruma bandı CP-OFDM ile kıyaslanarak azaltıldığından FBMC, temel olarak geliştirilmiş bir spektral verimliliğe sahiptir[4].

FBMC'de kanal tahmini imajiner girişimden dolayı OFDM'den çok daha zordur. OFDM'de olduğu gibi pilot sembol destekli kanal tahmini yapabilmek için yardımcı pilotlarla (auxiliary pilots) ya da kodlamayla (coding) imajiner girişimi önlememiz gerekmektedir[5,6]. Pilot sembolle destekli kanal tahmini yanında, başlangıç (preamble) tabanlı kanal tahmini [7] de olası bir yöntemdir. Bununla birlikte, kanalın basit bir şekilde tanımlanmasına izin verdikleri için LTE standardı pilot sembolleri kullanmaktadır.

modülasyonuna dayanan bir geniş bantlı kablosuz

FBMC yapısı OFDM ile çoğunlukla benzer davranış gösterse de kanal tahmininde ya da çok girişli çok çıkışlı sistemlerde (MIMO) imajiner girişimden dolayı zorluklar gösterir[8,9]. MIMO ile FBMC yapılarını birlikte kullanan birçok çalışma vardır ancak bunların çoğunun vericideki kanal bilgisine güven ve yüksek hesaplama karmaşası gerektirmesi gibi dezavantajları görülmektedir[10,11].

MIMO'yu FBMC ile birleştirmek için imajiner girişimi iptal etmemize izin veren daha iyi bir yöntem sembolleri zamanda (ya da frekansta) yaymak olarak görülmektedir. Yayılımda hızlı fourier dönüşümünün kullanıldığı durumlarda [9] ek FFT nedeniyle kalan girişim ve artan hesaplama karmaşası dezavantaj sağlamaktadır. Sembolleri yaymak için daha iyi bir yaklaşım olan Hadamard matrisi, çarpma gerektirmez böylece karmaşıklık çok düşük olur. Bu tip yaklaşımlar ilk olarak [12]'de önerilmiş, daha sonra bazı yazarlar tarafından FBMC'i Alamouti'nin uzay zaman blok kodlaması ile birleştirmek için kullanmıştır. Yayılma işleminin ardından MIMO tekniklerini bilinen OFDM'deki gibi uygulayabiliriz ve aynı MIMO karmaşıklığıyla sonuçlandığını görürüz [13]. Geleneksel FBMC sistemleri dikgenlik şartını sadece reel düzlemde sağladığından kaydırılmış QAM (Offset QAM) ile uyumlu çalışmaktadır [14]. Dahası, içsel girişim MIMO sistemleri bağlamında FBMC sistemlerinin ana engelidir. Bu nedenle geleneksel FBMC sistemleri maksimum olasılık tespiti (MLD-Maximum Likelihood) ya da Alamouti uzay zaman blok kodlaması (STBC) gibi geleneksel çok girişli çok çıkışlı MIMO teknikleriyle beraber kullanılamazlar[14,15]. MIMO FBMC-OQAM'de ML işlemi için girişim hesaplama ve iptal yöntemi [14] önerilmiştir. Ancak FBMC-OQAM sisteminin bit hata oranı (BER) performansı, MIMO kanallarındaki OFDM'den daha kötüdür. FBMC-OQAM sistemi için blok tabanlı bir Alamouti kodlama yöntemi [15] önerilmiştir. Ancak önerilen yöntem blokları ayırmak için ek sıfır semboller ve pilotlar spektral verimin kaybolmasına neden olmaktadır. Ek olarak, OFDM sistemlerinde kullanılan geleneksel kanal tahmin yöntemleri komşu alt taşıyıcılardan ve sembollerden kaynaklanan iç girişim nedeniyle FBMC-OQAM sistemlerine

doğrudan uygulanamaz [16-19]. Bu nedenle içsel girişimi yok etmek için [16] ile iteratif bir kanal tahmini yöntemi önerilmiştir. Ancak önerilen yöntemde girişimi engellemek için yapay (psuedo) pilotların eklenmesi gerektiğinden spektral etkinliğin ve ek karmaşıklığın kaybolmasına yol açmaktadır. [17]'de ön ek tabanlı kanal tahmini için girişim yaklaştırma yöntemi önerilmiştir. Ancak FBMC-OQAM sistemi için ön ekin uzunluğu OFDM'den daha uzun olduğu için, spektral etkinlik azalmaktadır. Yardımcı pilotlar içsel girişimi ortadan kaldırmak için önerilen bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır [18,19]. Ancak yine anten sayısı arttıkça, daha fazla AP'ye ihtiyaç duyulur ve bu da spektral verimliliğin kaybolmasına yol açar. İçsel girişimi azaltmak için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. İki boyutlu semboller arası girişimin bir boyutlu semboller arası girişime dönüştürülmesine dayanan bir MIMO-MLD yapısı [20] ile sunulmuştur. Fakat önerilen yapının içsel girişimi mükemmel bir şekilde yok etmediği görülmüştür. FFT-FBMC olarak adlandırılan yeni bir FBMC sistemi içsel girişimi yok etmek için [9]'de anlatılmıştır. Ancak FFT-FBMC yapısında CP eklenmesinden dolayı spektral verimlilikte kayıplar olmuş bu nedenle OFDM'e kıyasla BER performansı ve CP uzunluğu arasında bir değişim mevcuttur.

## 2. FBMC

FBMC-QAM yapısı iki prototip (prototype) filtre kullanır, bunlardan biri çift numaralı alt taşıyıcı semboller için diğeri tek numaralı alt taşıyıcı semboller için kullanılır. Bu özel filtreleme yöntemi FBMC sistemlerinin içsel girişim olmadan QAM sembollerini kullanmalarını sağlayabilir. İçsel girişim olmadan FBMC-QAM sistemi için dikgenlik şartlarını sağlanmasıyla tek sayılı alt taşıyıcı semboller için prototip filtre, çift sayılı alt taşıyıcı semboller için prototip filtrenin ters yönlü alt-blok yapıdaki hali olarak elde edilmiştir. FBMC-QAM sistemi, geleneksel CP-OFDM sistemlerine kıyasla CP uzunluğunun miktarıyla ilişkili olarak bir spektral verimlilik iyileştirmesine yol açmaktadır. Dahası FBMC-QAM yapısı geleneksel OFDM sistemlerinde olduğu gibi MLD ve STBC gibi klasik MIMO iletim sistemleri ve geleneksel kanal tahmin yöntemleri ile oldukça uyumludur[21].

Geleneksel FBMC sistemlerinde bitişik sembollerin prototip filtrelenmesi frekans düzleminde örtüşüğünde maksimum veri hızına ulaşılmış olunur. Bu nedenle, OQAM sembolleri geleneksel FBMC sistemlerinde içsel girişimi önlemek için kullanılır[22].

Ayrık zamanda FBMC-OQAM iletilen sinyali Denklem 1 ile tanımlanmıştır[9].

$$s[m] = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_{k,n} g[m - nM/2] e^{j\frac{2\pi}{M}k(m-\frac{D}{2})} e^{jQ_{k,n}} \quad (1)$$

Denklem 1'de  $m$  zaman indeksi,  $M$  alt taşıyıcı sayısı,  $n$  tamsayı,  $D = KM - 1$  prototip filtrenin uzunluğuna bağlı olan gecikme terimi,  $K$  örtüşme faktörü,  $Q_{k,n}$  ek faz terimi,  $a_{k,n}$  reel değerli semboller,  $k$ . alttaşıyıcı ve  $n$ . sembol süresince QAM sembollerinin reel ya da imajiner bir parçasını tanımlamaktadır.  $g(m)$  prototip filtreyi temsil etmek üzere Denklem 2 elde edilir.

$$s[m] = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_{k,n} g_{k,n}[m] \quad (2)$$

$G_{k,n}(m)$  Denklem 1'deki  $g(m)$ 'in  $n$  zamanında ve  $k$  frekansında kaydırılmış halidir. İdeal bir kanal ve gürültünün olmadığı durum düşünüldüğünde,  $n$  zamanında ve  $k$ . alt taşıyıcı sayısı için alıcıda demodüle edilmiş olan sinyal Denklem 3 ile ifade edilir.

$$\hat{a}_{k,n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} a_{k,n} g_{k,n}[m] g_{k,n}^*[m] \quad (3)$$

Denklem 3'te  $*$  kompleks eşleniği ifade etmektedir ayrıca prototip filtre reel dikgenliği Denklem 4 ile sağlamaktadır.

$$R\left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_{k,n}[m] g_{k,n}^*[m] \right\} = R\{g_{k,n}[m] * g_{k,n}^*[-m]\} \quad (4)$$

$$= \delta_{k,k'} \delta_{n,n'} \quad (5)$$

$R(\cdot)$  ifadesi reel kısmının alındığını gösterirken, demodüle edilmiş semboller yeniden Denklem 6'daki gibi elde edilir.

$$\hat{a}_{k,n} = a_{k,n} + I_{k,n} \quad (6)$$

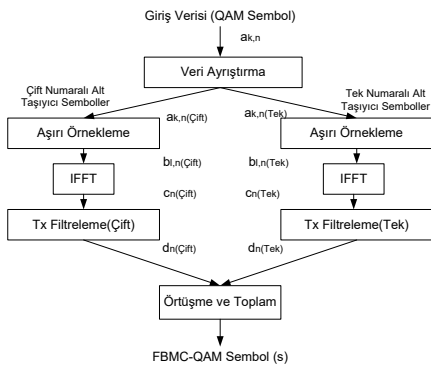
Denklem 6 ile verilen  $I_{k,n}$  içsel girişimi ifade etmektedir.

$$I_{k,n} = \sum \sum a_{m,k} \sum_{m=-\infty}^{\infty} g_{k,n}[m] g_{k,n}^*[m] \quad (7)$$

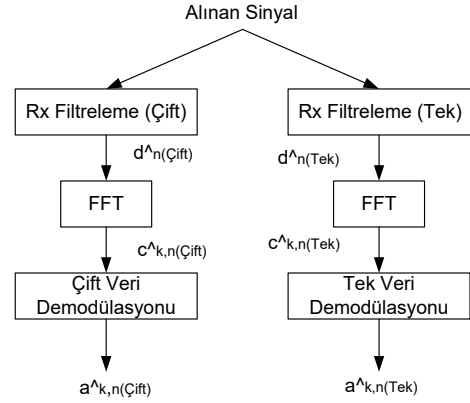
Denklem 4 ve Denklem 7’deki  $g_{k,n}$  ifadelerinden içsel girişimin imajiner olduğu görülmektedir. İçsel girişim nedeniyle FBMC-OQAM sistemlerde geleneksel kompleks değerli MIMO yapısını kullanmak oldukça zordur. Ayrıca geleneksel OFDM için kullanılan kanal tahmin yöntemleri FBMC’ye doğrudan uygulanamamaktadır[16-19].

FBMC-OQAM sistemlerde ardışık alt taşıyıcılar arasındaki örtüşme içsel girişime neden olur. İçsel girişimin meydana gelmemesi için iki filtre bankası kullanılır.

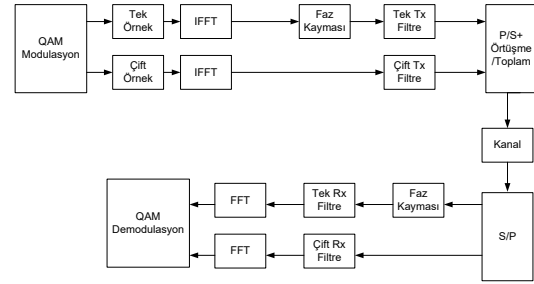
Şekil 1’de gösterildiği gibi çift numaralı alt taşıyıcı semboller için bir filtre bankası, tek numaralı alt taşıyıcılar için ise diğer filtre bankası kullanılır. Öncelikle içsel girişimden kurtulmak için QAM sembolleri, çift ve tek sayılı alt taşıyıcı sembolere bölünür. Ardından, sırasıyla çift ve tek numaralı alt taşıyıcı simgeler için her bir alt taşıyıcı simgesi üzerinde aşırı örnekleme, ters hızlı fourier dönüşümü (IFFT) ve prototip filtreleme işlemleri gerçekleştirilir. Son olarak, iletilen sembolleri çift ve tek sayılı alt taşıyıcı sembollerle örtüşme ve toplam işleminden elde ederiz. Şekil 2’de de iki prototip filtreyle FBMC-QAM alıcısına ait yapı gösterilmiştir. Genel olarak FBMC’nin verici ve alıcılarıyla kanal yapısını içeren diyagram Şekil 3 ile verilmiştir.



Şekil 1. İki prototip filtreyle FBMC-QAM vericisi



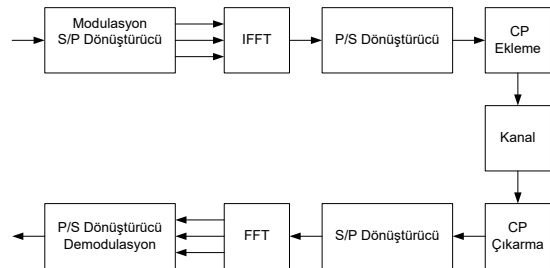
Şekil 2. İki prototip filtreyle FBMC-QAM alıcısı



Şekil 3. FBMC blok diyagramı

### 3. OFDM

OFDM, Dijital Ses yayıncılığı (DAB), Karasal dijital video yayını (DVB-T), HIPER LAN12, WLAN için IEEE802.11 standardı ve WiMAX için IEEE802.16 standardı gibi bazı kablosuz standartlarda benimsenmiştir. Dahası, OFDM, dördüncü nesil (4G) iletim tekniği olarak kabul edilmektedir [27]. OFDM mevcut spektrumu birden fazla paralel alt taşıyıcıya bölen ve her bir alt taşıyıcıyı farklı taşıyıcı frekansında modüle eden çok taşıyıcılı bir modülasyon tekniğidir.



Şekil 4. OFDM blok diyagramı

OFDM sistemin blok diyagramı Şekil 4 ile gösterilmektedir. Yüksek veri hızındaki giriş sembolleri düşük veri hızında birden fazla sembole dönüştürülür. Bu paralel semboller QPSK veya QAM modülasyon teknikleri kullanılarak modüle edilir ve OFDM örneklerini üreten IFFT bloğuna giriş olarak uygulanır. Bu örnekler daha sonra Paralel-Seri (P/S) dönüştürücü kullanarak OFDM sinyaline dönüştürülür. Daha sonra sinyal CP eklenerek kodlanır ve kanal üzerinden iletilir. Alıcı tarafta bu yapılan işlemlerin tam tersi yapılarak demodülasyon gerçekleştirilir.

Geleneksel OFDM için DFT tipi sinüzoidaller ortogonal (dikgenlik) temelde performansı etkilemektedir. DFT’de modelleme her eğrinin taban performansı ile ilişkilendirilir, burada dikey temel fonksiyonlar, OFDM’de kullanılan alt taşıyıcılardır.

Alıcıda bilginin iletilmesi için sinyaller bir araya getirilir, FFT ve IFFT’de daha az hesaplama yükü gerektiğinden OFDM’in uygulanabilmesi için FFT ve IFFT işlemleri uygulanır. Sinyalin çoklu replikaları alıcıda kanalın zamana bağlı dağılımına göre alınır. Bu nedenle frekans seçici sönmüleme sonuçları ve çevrimsel ön ek olarak adlandırılan bu girişim koruma aralığının geriye ölçeklenmesi için kullanılır[1].

OFDM spektral verimlilik, hızlı fourier dönüşümünün kolay uygulanması ve düşük alıcı karmaşıklığı gibi avantajlara sahip bir modülasyon ve çoğullama tekniğidir. Ancak yüksek PAPR, zaman ve frekans senkronizasyon hatalarına duyarlı olması gibi özellikler de dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. OFDM, mevcut tek taşıyıcı sistemler üzerinde arzu edilen çeşitli özelliklere sahiptir ana avantajı ise frekans seçici sönmülemeli kanallardan etkilenmemesidir. Tek taşıyıcılı sistemler sembol süresini kısaltarak veri hızını artırabilirler böylece kullanılan bant genişliği artırılabilir. Geniş bantlı kanallar orijinal sinyali elde edebilmek için alıcıda karmaşık denkleştiriciler gerektiren frekans seçici sönmülemeye karşı duyarlı davranmaktadırlar. OFDM geniş bantlı kanalı her dar bantta düz sönmülemeye sahip bir dizi dar bant kanala bölerek bu problemi ortadan kaldırmaktadır. Bununla birlikte sadece bir boyutlu bir denkleştirici gerektirmesi karmaşıklığı büyük ölçüde azaltmış olur.

OFDM sistemlerde semboller arası ve kanallar arası girişim koruma aralıkları eklenerek önlenilmektedir[23]. Yüksek PAPR’ye sahip olan OFDM sembollerinin karşılaştığı diğer bir problem doğrusal olmayan bozulmaların gelişimidir. Bu problemin üstesinden gelmek için literatürde üç farklı yöntem önerilmiştir. Bunlardan ilki OFDM’in tepe genliklerini doğrusal olmayan şekilde bozan sinyal bozma tekniğidir [24]. İkincisi büyük PAPR değerine sahip OFDM sinyallerini çıkararak yapılan kodlama tekniğidir. Son olarak ise her bir OFDM sembolünü bir başka diziyle karıştırarak en küçük PAPR’yi seçen karıştırma yöntemi olarak bilinir [25,26].

$0 \leq k \leq N-1$  için giriş veri sembolü  $X(k)$ ,  $N$  adet IFFT dik frekansı tarafından modüle edilir, daha sonra OFDM çıkış dizisi  $x(n)$   $0 \leq n \leq N-1$  aralığında Denklem 8’de verilmiştir.

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp\left\{j \frac{2\pi nk}{N}\right\} \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (8)$$

$x(n)$  OFDM sembolü karmaşık bir sayıdır ve  $x_{re}(n)$  gerçek,  $x_{im}(n)$  sanal bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır. Merkez limit teoremine göre  $N$  genişledikçe,  $x_{re}(n)$  ve  $x_{im}(n)$ ’in dağılımı normal dağılıma (Gauss) uyar. Bu  $x[n]$ ’in Rayleigh dağılımına sahip olduğunu ve olasılık yoğunluk fonksiyonu da Denklem 9 ile verilmektedir.

$$f_{x_n}(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

OFDM’in tepe ve ortalama gücü sırasıyla Denklem 10 ve 11 ile verilmiştir.

$$P_{peak} = \max_{0 \leq n \leq N-1} |x_n|^2 \quad (10)$$

$$P_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x_n|^2 \quad (11)$$

OFDM’in PAPR değeri Denklem 12’de tanımlanmıştır.

$$PAPR = \frac{\max |x[n]|^2}{E(|x[n]|^2)} \quad (12)$$

$X_{max}$ 'ın kümülatif dağılım fonksiyonu (Cumulative Distribution Function-CDF) Denklem 13 ile tanımlanmıştır.

$$CDF = 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

#### 4. Kanal Tahmini

Kanal tahmininin amacı alıcı ile verici arasındaki haberleşme kanalını tanımlamaktır. Çevresel bozucu etkiler ve çoklu yol gecikmeleri sebebiyle rasgele değişen bir kanalda iletim yapılırken alıcıda iletilen verilerin doğru bir şekilde geri elde edilebilmesi için bu kanalın bilinmesi gerekmektedir. Bu işlem için literatürde uygulanan farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Tekil değer ayrıştırması veya frekans bölgesi filtrelemesine dayalı kanal tahmin teknikleri ve zaman bölgesi filtreleme bunlara örnek olarak verilebilir. Son yıllarda kanal tahmininin performansını geliştirmek için zamanla değişen kanalın zaman frekans ilintisini en iyi kullanan en küçük ortalama karesel hata (MMSE) kanal kestirici önerilmektedir. Bu amaçla OFDM sistemleri için kanal tahmininde ortalama karesel hatayı minimize etmek amacıyla eğitim tonlarının en iyilenmesi amaçlanmaktadır. Bunu yapmak için OFDM sistemlerinin BER değerini minimize eden pilot tabanlı kanal tahmin algoritmaları sunulmuştur [28]. Pilot tabanlı kanal tahmininde iletilecek sembollerin arasına alıcıda alacağı değeri zaten bilinen semboller eklenir ancak bu işlem yapılırken kanalın evre uyumlu zaman aralığı dikkate alınarak pilot sembollerin aralığı belirlenir. İletilen pilot sembollerin değeri alıcıda bilindiği için kanalın etkisi bulunabilir ve bu etkinin tam tersini gerçekleştiren bir denkleştirici yapısı MMSE algoritması yardımıyla tasarlanır. Evre uyumlu zaman aralığında kanalın frekans cevabının değişmediği kabul edilerek pilot sembollerin yanında bilgi sembollerini de aynı denkleştirici yapısından geçirilerek kanalın etkisi kaldırılmış olur. Pilot sembollerin bilgi sembollerini arasına yerleşim şekline göre blok tipi ve tarak tipi olmak üzere farklı pilot ekleme yöntemleri vardır [29].

FBMC'de pilot sembollerle kanal tahmini gerçekleştirebilmek için pilot sembollerdeki imajiner girişimi yok etmek gerekmektedir.

#### 4.1. Kanal tahmin algoritmaları

Pilot sembollerle kanal tahmininde veri sembollerinden önce alıcı tarafta pilot semboller elde edilir. Semboller alıcıda en küçük kareler (Least Square error-LSE) tahmin tekniği ile tahmin edilerek elde edilir. LSE tahmin edici Denklem 14'te verildiği gibi pilot pozisyonlardaki verinin alıcıdaki değerini ve vericideki pilot sembollerini kullanarak kanalı tanımlamaktadır.

$$\hat{h}_P^{LS} = \text{diag}(x_P)^{-1} y_P \quad (14)$$

Veri pozisyonlarındaki geriye kalan kanal katsayılarını elde etmek için Denklem 15 kullanılmaktadır.

$$\hat{h} = A \hat{h}_P^{LS} \quad (15)$$

Ara değerlendirme yöntemlerinden doğrusal, en yakın komşu ve minimum ortalama karesel hata (MMSE-Mean Square Error) yöntemleri kanal tahmininde kullanılan önemli tekniklerdir.

$$\hat{h}_{l,k} = a_{l,k} \hat{h}_P^{LS} \quad (16)$$

Denklem 16'da  $a$  ara değerlendirme vektör dizisi,  $h_{l,k}$   $l$  pozisyonunda  $k$  zamanında tahmin edilen kanalı temsil etmektedir.

Yukarıda anlatılan kanal tahmin işlem adımları OFDM'de uygulanırken FBMC'de imajiner girişim nedeniyle aynen gerçekleştirilemez. Sembollerin reel kısmının alınmasıyla imajiner girişimi yok etmek için yapılacak işlem kanal denkleştirme sonrası gerçekleştirilir, bu durum kanal tahmininden önce mümkün değildir. Dolayısıyla işlem kompleks düzlemde yapılmalıdır. Ayrıca 0 dB sinyal girişim oranı, rasgele imajiner girişim sembolleri ve veri sembollerinin aynı güçte olması bize doğru kanal tahmini için çok düşük değerde olduğunu söylemektedir.

OFDM'deki adımları FBMC'de gerçekleştirebilmek için iletilen veri sembollerini Denklem 17'deki  $C$  matrisi ile değiştirerek imajiner girişimi yok etmemiz gerekmektedir.

$$\Im\{d_{l,k}\}C \begin{bmatrix} x_P \\ x_D \end{bmatrix} = 0 \quad (17)$$

Denklem 17’de  $d$  birim matrisi,  $x_P$  pilot sembolleri,  $x_D$  veri sembollerini temsil ederken kanal denkleştirme sonrası reel kısım alındığından imajiner girişim sadece pilot sembolde yok edilir. Ayrıca pilot sembolere ek olarak yardımcı semboller ve kodlama yöntemleri de imajiner girişimi yok etmek için önerilmektedir.

Ayrıca imajiner girişimi yok etmek için uygun pilot pozisyonlardaki her bir pilot sembol için bir yardımcı sembol kullanılır. Aslında pilot sembolere kapatılmış semboller imajiner girişime neden olur, bu yüzden diğer semboldeki girişimi yok etmek için bu sembollerden biri kullanılır. Girişim ağırlığı pilot sembol ve sembol arasında birin altındadır, bu nedenle yardımcı pilot sembollerin gücü artırılmalıdır bunun sonucunda mevcut veri ve pilot sembollerin gücü giderek azalacaktır. Yardımcı pilotların herhangi bir bilgi taşımadığını ve sadece alıcıda kanal tahminini kolaylaştırmak için kullanıldığını düşünerek yardımcı sembollerin ana dezavantajının boşa enerji harcaması olduğu sonucuna varılmaktadır. OFDM bir karmaşık semboldeki terim sayısına karşılık gelen iki gerçek sembol kullanır, bunun sonucu olarak OFDM ve FBMC’nin aynı spektral etkinlikte olduğu görülmektedir.

Denklem 17’de CCT matrisinin köşegen elemanları yardımcı pilotlar dışında birdir, bu durum yardımcı sembolden veri sembolüne olan güç kaymasını açıklamaktadır.

Pilot pozisyonlardaki imajiner girişim, yardımcı pilot sembollerin en büyük dezavantajı olarak bilinen iletim gücünde herhangi bir kayıp olmaksızın kodlama tekniği ile hem alıcıda hem vericide aynı zamanda yok edilebilir.  $N-1$  adet veri sembolü her pilot sembol için  $N$  adet zaman frekans pozisyonunda yayılır. Bu bize pilot pozisyonlardaki imajiner girişimi yok etmek için avantaj sağlar. Kanal tahmin işleminden sonra veri sembolleri yeniden oluşturulmalıdır, yediden oluşturulan semboller Denklem 8 ile verilmektedir.

$$\hat{y} = C_c^T y \quad (18)$$

Denklem 18’i dikkate aldığımızda  $C = C_c$  ifadesi için yarı dikgen olmalı diyebiliriz bunun sonucunda  $C_c^T C_c$  matrisi  $LK-P$  boyutunda birim matris olacaktır. Veri kodlama yardımcı pilot sembolde daha kompleks adımlardan oluşur. Aslında yardımcı semboller tekniği alıcıda daha fazla hesaplama ihtiyacı duymamaktadır. Dahası iki yardımcı pilot sembol bir yardımcı pilot sembolle neredeyse aynı karmaşıklıkta çalışmaktadır. OFDM ve FBMC’ye ait kapasite formülasyonu Denklem 19 ve 20 ile verilmiştir.

$$C_{OFDM} = \frac{|D| \log_2 \left( 1 + \frac{P_D}{P_n} \right)}{KT} \quad (19)$$

$$C_{FBMC} = \frac{|D| \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{P_D}{P_n/2} \right)}{KT} \quad (20)$$

Kompleks gürültü gücü iki kat azalırken FBMC gerçek düzlemde uygulandığı için FBMC’nin kapasite formülü  $\frac{1}{2}$  ile çarpılmalıdır. Aynı alt taşıyıcı sayısı ve aynı iletim gücü için Denklem 21, 22, 23 elde edilir.

$$P_D^{OFDM} = P_D^{OFDM, noCP} = 2P_D^{FBMC, Cod} \quad (21)$$

$$C^{OFDM, noCP} = C^{FBMC, Cod} \quad (22)$$

$$C^{OFDM, noCP} > C^{FBMC, Aux} \quad (23)$$

## 4.2. Denkleştirici

Verici tarafından iletilen sinyalde kanalın etkisiyle zayıflama, gecikme, frekans kayması ve gürültü gibi bozucu etkiler gözlenir. Bu bozucu etkilere maruz kalan bilginin alıcıda doğru bir şekilde elde edilebilmesi için denkleştiriciler kullanılmaktadır. Kanalın etkisini denkleştirmek için kullanılan temel yaklaşım kanalın frekans cevabının tersinin bulunarak gelen bilginin vericide çözülmeden önce elde edilen ters frekans cevabından geçirilerek işlenmesidir. Bu denkleştirici yapısı sıfır zorlamalı denkleştirici (zero forcing equalizer) olarak bilinmektedir. Vericide iletilen bilgi sembollerinin önüne değerleri bilinen bitler yerleştirilerek bu bitlerin alıcıya geldiğinde oluşan değişimleri karşılaştırılarak kanalın frekans cevabı bulunur ve

bu frekans cevabının tersi alınarak denkleştirici oluşturulur. Verici tarafından gönderilen bilgi bitlerinin de aynı kanal etkisinde kaldığını kabul ederek tasarlanan denkleştirici ile bilgi bitleri denkleştirilerek kanalın etkisi giderilmiş olur.

## 5. Bit Hata Olasılığı

Bit hata olasılığı (Bit Error Probability-BEP) kanal tahmininde performans değerlendirmesinde en çok kullanılan değerlendirme ölçütlerinden biridir. Kapalı form BEP Lemma formülasyonunu kullanmaktadır [30]. X ve Y sıfır ortalama değerli, karmaşık değerli rasgele Gauss değişkenleriyle ilişkili olduğunu ve X/Y karmaşık Gauss oranının tam bir ZR değerinde küçük olması varsayımıyla olasılık fonksiyonu Denklem 24 ile verilmiştir.

$$P_r\left(R\left\{\frac{X}{Y}\right\} < Z_R\right) \quad (24)$$

Özellikle düz sönümlmeli kanllar için komşu en yakın ara değerlendirme (Nearest Neighbour Interpolation) ve MMSE ara değerlendirme yöntemleri belirli zaman ve frekans konumlarına bağımlı olmadığı için BEP için bu yaklaşımlar büyük önem taşımaktadır. BEP değerini en aza indirgeyerek optimum güç dağılımını gerçekleştirmek amacıyla pilot sembollerin gücünü veri sembollerin gücüne oranını Denklem 25 ile ifade edebiliriz.

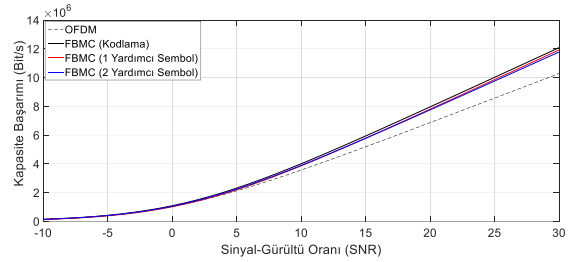
$$\kappa = \frac{P_p}{P_D} \quad (25)$$

FBMC'in pilot sembollerinin yoğunluğu OFDM'in yarısı kadardır. Kodlama tekniğinde güç kayması OFDM'den iki kat, yardımcı pilot sembol tekniğinden de oldukça fazladır. İmajiner terimler iptal edildiğinde FBMC'de gürültü gücü iki kat azalır. Aynı iletim gücünde OFDM ile aynı SNR değerini elde etmemize rağmen, sinyal gücü iki kat artar zaman düzleminde örtüşme meydana gelir.

FBMC'de kanal tahmini karmaşık düzlemde yapılır, bu yüzden sadece bir pilot ile veri arasındaki güç kayması pilot ve veri sembollerinde aynı SNR oranını sağlamaktadır.

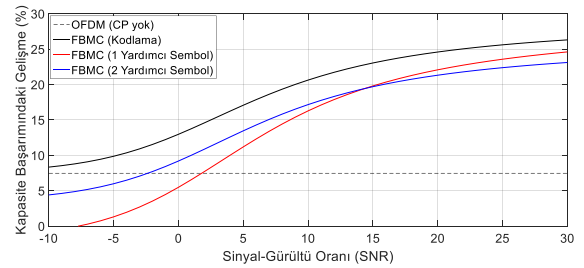
## 6. Uygulamalar

Uygulamalar OFDM, FBMC kodlama, FBMC bir yardımcı sembol ve FBMC iki yardımcı sembol durumları için gerçekleştirilmiştir. Her aşamada 1000 iterasyon çalıştırılan programda güç kayması OFDM için 1, FBMC için 2 olarak seçilmiştir. FBMC'de CP olmadığı için OFDM'e göre daha yüksek spektral verimlilik gösterdiği sonucuna varılmıştır. 1.4 MHz hızında yapılan karşılaştırmalarda alt taşıyıcı frekansı 15 kHz ön ek süresi 4.75 mikrosaniye olarak kullanılmıştır. OFDM sembol sayısı KOFDM =14, FBMC sembol sayısı KFBMC=30 olarak kullanılmıştır ancak bu değerler reel sembol sayısıdır, 15 karmaşık sembol de mevcuttur. CP olmaksızın OFDM sembol sayısı KOFDM =15'tir. Ayrıca kodlanmış pilot sayısı hem 16 hem de 8 için uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Kapasite başarımının SNR'e göre değişimi OFDM ve FBMC kodlama, bir yardımcı sembol, iki yardımcı sembol için Şekil 5'te verilmiştir. FBMC'nin OFDM'e göre daha yüksek başarımlar sağladığı açıkça görülmüştür.



Şekil 5. OFDM ve FBMC için kapasite başarımı

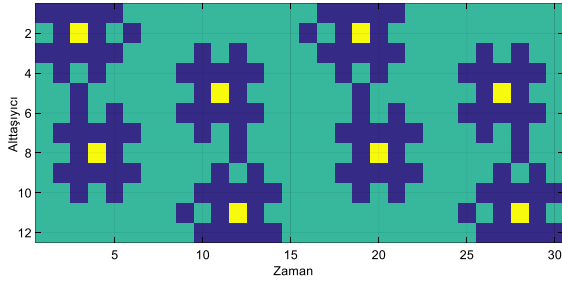
Kapasite başarımındaki gelişme yüzdesi Şekil 6 ile gösterilmiş olup OFDM'de gelişmenin sabit olduğu ancak FBMC kodlama tekniğinde iyileşmenin çok daha iyi olduğu gözlenmiştir.



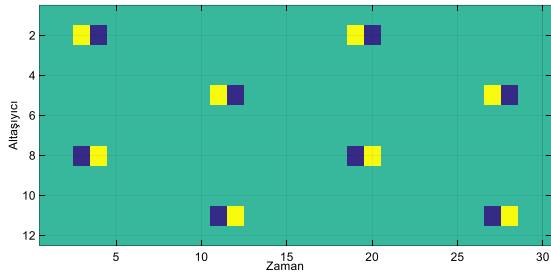
Şekil 6. Kapasite başarımındaki iyileşme



Kodlama ve yardımcı semboller ile yapılan uygulamalardan elde edilen pilotların zamana göre dağılımı Şekil 7 ve Şekil 8 ile gösterilmiştir. Kodlama tekniğinde işlem karmaşıklığı yardımcı sembolere göre daha fazla olduğu şekillerden anlaşılmaktadır.

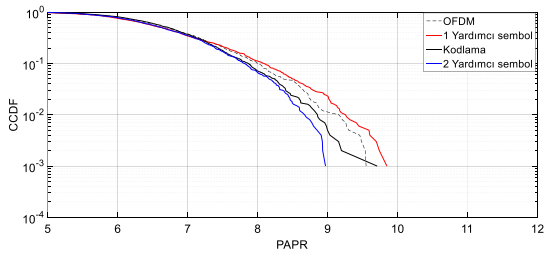


Şekil 7. Kodlama (16 bit) ile elde edilen pilot sembollerin dizilimi



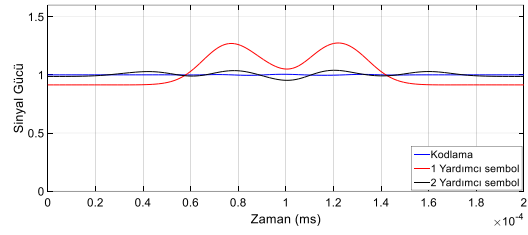
Şekil 8. Yardımcı sembollerle (16 bit) elde edilen pilot sembollerin dizilimi

CCDF ile PAPR arasındaki değişim grafiği Şekil 9'da verilmiştir. İki yardımcı sembol kullanıldığı durumda daha düşük PAPR değeri sağlandığı görülmektedir.



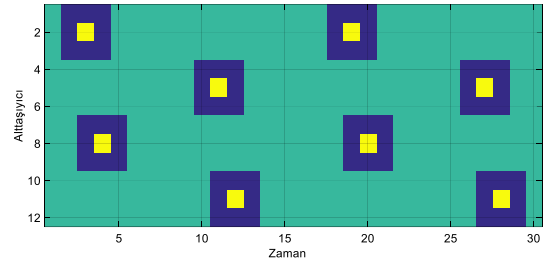
Şekil 9. CCDF-PAPR değişimi

Sinyal gücünün zamana bağlı değişimi hem kodlama hem de yardımcı semboller yöntemleriyle Şekil 10'da gösterilmiştir. Bir yardımcı sembol ile sinyal gücündeki dalgalanmaların çok daha fazla olduğu kodlama tekniğinde ise güçteki dalgalanmanın çok az olduğu görülmektedir.

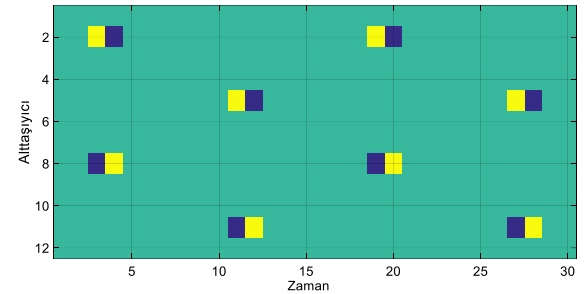


Şekil 10. Sinyal gücünün zamana göre değişimi

Kodlama ile elde edilen pilot sembollerin dizilimi Şekil 11'de, yardımcı sembollerle elde edilen pilot sembollerin dizilimi Şekil 12'de gösterilmiştir. Yardımcı sembollerde kodlama olmadığı için Şekil 12 ve Şekil 8 aynı dizilime sahiptir.

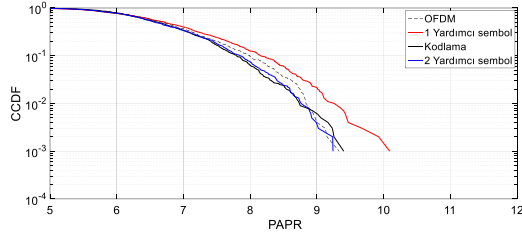


Şekil 11. Kodlama (8 bit) ile elde edilen pilot sembollerin dizilimi



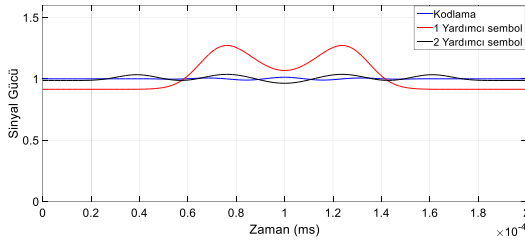
Şekil 12. Yardımcı sembollerle (8 bit) elde edilen pilot sembollerin dizilimi

CCDF ile PAPR arasındaki değişim grafiği Şekil 13'te verilmiştir.



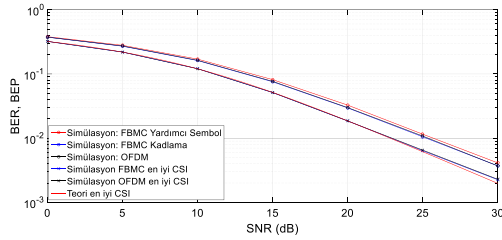
Şekil 13. CCDF-PAPR dağılımı (8 bit).

Şekil 9 ve Şekil 13 karşılaştırıldığında 8 bit için CCDF ile PAPR arasındaki değişimin çok az olduğu görülmüştür.



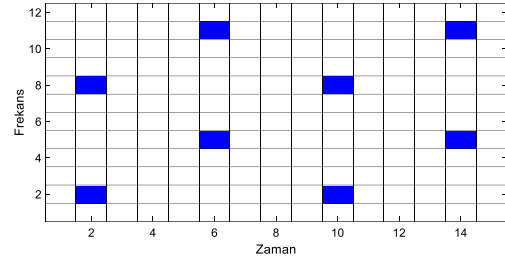
Şekil 14. Sinyal gücünün zamana göre değişimi

Sinyal gücünün zamana bağlı değişimi kodlama ve yardımcı semboller ve 8 bit için Şekil 14'te verilmiştir. Şekil 10 ile Şekil 14 kıyaslandığında 8 bit için güçteki dalgalanmanın daha fazla olduğu görülmektedir.



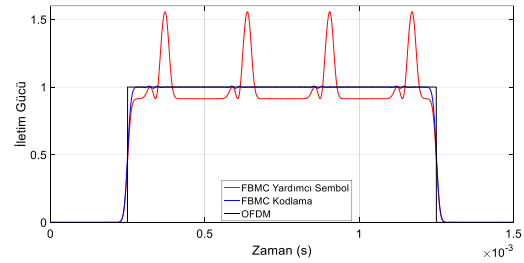
Şekil 15. BER ile SNR ilişkisi

Şekil 15 bit hata oranının SNR ile ilişkisini 16-QAM modülasyon derecesi için simülasyon sonuçları ve teorik olarak en iyi kanal durumu bilgisi (CSI) durumuna göre karşılaştırmıştır. Kanal durumu bilgisi bilindiğinde elde edilen BER değeri hem FBMC hem de OFDM için teorik değere çok daha yakın olarak elde edilmiştir.



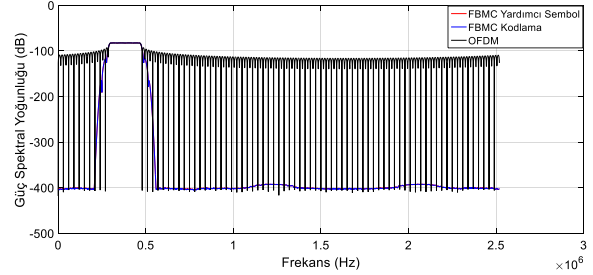
Şekil 16. OFDM pilot sembol dizilimi

Şekil 16'da OFDM pilot sembollerinin dizilimi gösterilmiştir. Dizilim FBMC yapısına göre çok daha sade ve kolaydır.



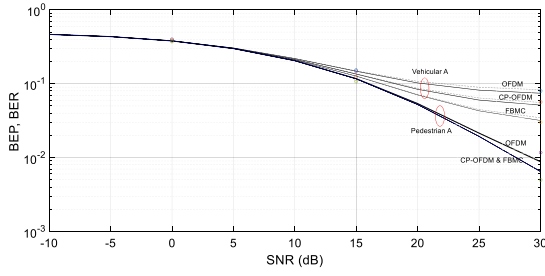
Şekil 17. İletim gücünün zamana göre değişimi

İletim gücünün zamana göre değişimi Şekil 17 ile gösterilmiştir. Yardımcı sembol kullanıldığında iletim gücündeki dalgalanmalar kodlama ve OFDM yapısına göre çok daha fazladır.



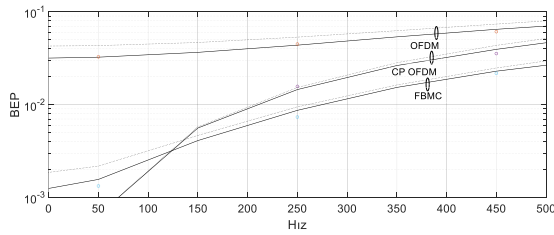
Şekil 18. Güç spektral yoğunluğu

FBMC kodlama ve yardımcı semboller ile OFDM'e ait güç spektral yoğunluğu Şekil 18'de verildiği gibidir. Şekilden OFDM'de güç dalgalanmasının FBMC'ye göre çok fazla olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 19. Vehicular A ve Pedestrian A kanalları için BER-SNR diyagramı

Şekil 19 ile Vehicular A ve Pedestrian A kanal yapıları için BEP-SNR diyagramı verilmiştir. Şekilden her iki kanalın aynı BER değeriyle -10 dB SNR değerinden başladığını ancak yüksek SNR değerlerinde Vehicular A kanal yapısının daha yüksek BER oranı sağladığı görülmüştür. Ayrıca Vehicular A kanal yapısında FBMC ile CP-OFDM arasında BER farkı gözlenirken Pedestrian A kanal yapısında bu fark görülmemektedir.



Şekil 20. Vehicular A kanalı için BEP-Hız diyagramı

BEP ile Vehicular A kanalının hızının değişimi Şekil 20 ile verilmiştir. CP olmadığı durumda OFDM en yüksek bit hata olasılığına sahipken, CP OFDM ve FBMC yapıları 250 km/h hıza kadar daha düşük BEP değeri alırlar. Hız arttıkça CP OFDM ve FBMC metotları OFDM yaklaşır ama ulaşamaz.

## 7. Sonuçlar

Bu çalışmada yeni nesil haberleşme sistemlerinde artan hız ve daha yüksek bant genişliği gereksinimi nedeniyle giderek ilgi çekmeye başlayan FBMC yapısı ve geçmişte sıklıkla kullanılmış olan OFDM yapısı birçok özellikleri bakımından kıyaslanmıştır. Çok daha iyi spektral özellikler sağlamasından dolayı FBMC tekniğinin

OFDM'e oranla daha çok gelecek vaat ettiği gerçeği simülasyon sonuçlarıyla da desteklenmiştir. Öncelikle kapasite başarımı açısından FBMC tekniği gücünü ortaya koyarken, hem yardımcı sembol hem de kodlama tekniği ile mevcut imajiner girişimi yok edebildiğini de göstermiştir. Haberleşme kanallarının kalitesini ortaya koyan en önemli parametrelerden biri olan BER (BEP) oranı bakımından hem FBMC'de kullanılan teknikler kendi arasında hem de OFDM ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı kanallar için de BER parametresi karşılaştırılmıştır. Son olarak ise farklı kanal hızları için yine BER oranı karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak FBMC'in gelecek nesil haberleşme sistemlerinde öncelikle yer bulacağını gösterirken özellikle kodlama tekniğindeki karmaşıklık problemi çözüm bekleyen konular arasında görülmektedir. Ayrıca gerçek zamanlı uygulamalarda CSI bilgisi tam olarak bilinmeyeceği için yapılan pilot sembol yaklaşımının deneysel sonuçları gelecek çalışmalarda değerlendirilecek konular arasında yer almaktadır.

## 8. Kaynaklar

1. Veerananarayanareddy, C., Prabhakar, K., (2015). A novel BER analytical performance of DWT based OFDM using various channel over DFT based OFDM. International Journal of Engineering and Computer Science, 4(9), 14313-14318.
2. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation, 3GPP Std. TS 36.211. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36211.htm>.
3. IEEE Approved Draft Standard for IT-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-LAN/MAN-Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specifications-Amd 4: Enhancements for Very High Throughput for operation in bands below 6GHz, IEEE Std. 802.11ac, Dec. 2013.
4. Ho, Z., Kim, K., Kim, C., Yun, Y.H., Cho, Y.H., Seoul, J.Y., (2015). A QAM-FBMC space-time block code system with linear equalizers. IEEE Conference Publications, 1-5.
5. Stitz, T.H., Ihalainen, T., Viholainen, A., Renfors, M., (2010). Pilot-based synchronization and equalization in filter bank multicarrier communications. EURASIP Journal Advances in Signal Processing, 1-9.

6. Lele, C., Legouable, R., Siohan, P., (2008). Channel estimation with scattered pilots in OFDM/OQAM. *IEEE 9th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 286–290.
7. Kofidis, E., Katselis, D., Rontogiannis, A., Theodoridis, S., (2013). Preamblebased channel estimation in OFDM/OQAM systems: a review. *Signal Processing*, **93**(7), 2038-2054.
8. Nissel, R., Rupp, M., (2016). Bit error probability for pilot-symbol aided channel estimation in FBMC-OQAM. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia.
9. Zakaria, R., Ruyet, D.L., (2012). A novel filter-bank multicarrier scheme to mitigate the intrinsic interference: application to MIMO systems. *IEEE Trans. Wireless Communications*, **11**(3), 1112–1123.
10. Payar, M., Pascual-Iserte, A., Najar, M., (2010). Performance comparison between FBMC and OFDM in MIMO systems under channel uncertainty. *IEEE European Wireless Conference (EW)*.
11. Chevalier, P., Ruyet, D.L., Chauvat, R.. (2016). Maximum likelihood alamouti receiver for filter bank based multicarrier transmissions". *International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA)*.
12. Lele, C., Siohan, P., Legouable, R., Bellanger, M., (2008). CDMA transmission with complex OFDM/OQAM. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2008(18).
13. Lele, C., Siohan, P., Legouable, R., (2010). The alamouti scheme with CDMA-OFDM/OQAM". *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010(1).
14. Zakaria, R., Ruyet, D.L., Bellanger, M., (2010). Maximum likelihood detection in spatial multiplexing with FBMC. *Processing Europa Wireless Conference*, 1038–1041.
15. Renfors, M., Ihalainen, T., Stitz, T.H., (2010). A block-Alamouti scheme for filter bank based multicarrier transmission. *Processing Europa Wireless Conference*, 1031–1037.
16. Lele, C., (2012). Iterative scattered-based channel estimation method for OFDM/OQAM. *EURASIP Journal Advanced Signal Processing*, 1–14.
17. Kofidis, E., Katselis, D., Rontogiannis, A., Theodoridis, S., (2013). Preamble-based channel estimation in OFDM/OQAM systems: A review. *Signal Processing*, **93**(7), 2038–2054.
18. He, X., Zhao, Z., Zhang, H., (2012). A pilot-aided channel estimation method for FBMC/OQAM communications system. *Processing International Symposium Communication Information Technology (ISCIT)*, 175–180.
19. Javaudin, J.P., Jiang, Y., (2008). Channel estimation in MIMOOFDM/OQAM. *Processing IEEE 9th Workshop Signal Processing Advanced Wireless Communication. (SPAWC)*, 266–270.
20. Zakaria, R., Ruyet, D.L., (2010). On maximum likelihood MIMO detection in QAM-FBMC systems. *Processing IEEE 21st International Symposium Pers. Indoor Mobile Radio Communication (PIMRC)*, 183–187.
21. Nam, H., Choi, M., Han, S., Kim, C., Choi, S., Hong, D., (2016). A new filter-bank multicarrier system with two prototype filters for QAM symbols transmission and reception. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 15(9).
22. Bellanger, M., (2010). FBMC physical layer: A primer. *PHYDYAS FP7 Project Document*.
23. Nee, R.V., Prasad, R., (2000). *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Artech House Publishers, Boston.
24. Li, X., Cimini, L.J., (1998). Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM. *IEEE Communication Letter*, **2**(5), 131-133.
25. Sakran, H., Shokair, M., Abou Elazm, A., (2008). PAPR reduction technique of OFDM signals using  $\mu$ -Law compander. *IEEE Symposium on Wireless Communication System, ISWCS08*, 386-390.
26. Wang, X., Tjhung, T.T., Ng, C.S., (1999). Reduction of peak to average power ratio of OFDM system using a companding technique. *IEEE Transactions on Broadcasting*.
27. Hara, S., Prasad, R., (2003). *Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications*. Norwood, MA: Artech House.
28. Acar, Y., Dogan, H., Panayirci, E., (2015). Spline based channel estimation for STBC-SM systems over fast-varying rician fading channels. *23th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 188-191.
29. Atila, O., (2016). Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim sistemlerinde kanal kestirimi ve performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Türkiye.
30. Nissel, R., Caban, S., Rupp, M., (2015). Closed form capacity expression for low complexity BICM with uniform inputs. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Hong Kong, China.