

FBMC-QAM Yöntemiyle MIMO Alıcı Tasarımı

Bircan KAMIŞLIOĞLU, Ayhan AKBAL

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

(Geliş/Received: 20.07.2017; Kabul/Accepted: 24.10.2017)

Özet

Gelecek nesil haberleşme sistemlerinde yüksek veri hızı gereksinimi, haberleşme sisteminin kalitesi ve yüksek iletim kapasitesi temel problemler olarak görülmektedir. Filtre bankası tabanlı çok taşıyıcılı (FBMC) modülasyon kaydırılmış karesel modülasyon (QAM) ile birlikte uygulandığında literatürde sıklıkla kullanılan dikgen frekans bölmeli çoğullamaya (OFDM) göre daha yüksek avantajlar sağladığından araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Önerilen FBMC-QAM modülasyon yöntemi FBMC-OQAM ve OFDM ile bit hata oranı (BER) bakımından karşılaştırıldığında benzer davranış sergilerken sayısal sonuçlar performanslarının neredeyse aynı olduğunu göstermektedir. Bu çalışma OFDM, FBMC-QAM, çok girişli çok çıkışlı modülasyonun (MIMO) iletim yapısı ve kanal tahmin işlevinin aynı mantıkta olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca MIMO alıcı tasarımı sıfır zorlama (ZF), ortalama karesel hata (MMSE), maksimum benzerlik (ML) gibi tekniklerle gerçekleştirilmektedir. Sonuçta çeşitli algoritmalar kullanılarak MIMO alıcı metotları SER-SNR oranına ve hesaplama süresine göre değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler : OFDM; Modülasyon; Demodülasyon; FBMC; MIMO alıcı.

MIMO Receiver Design with FBMC-QAM

Abstract

High data rate, better quality of communication system and higher transmission capacity through wireless channel are general problem of next generation communication systems. Filter bank based multicarrier (FBMC) modulation with offset quadrature amplitude modulation (OQAM) makes researchers interested due to its advantages over orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). The proposed FBMC-QAM system matched to the FBMC-OQAM and OFDM system with regard to bit error rate (BER) performance and numerical results indicated their performance are almost the similar. The paper indicates that OFDM, FBMC-QAM, multiple-input multiple output (MIMO) transmission layouts and channel estimation layouts study same logic. Also MIMO receiver design is realized for FBMC such as ZF, MMSE, ML techniques. Finally, FBMC-QAM and OFDM is compared about magnitude response, amplitude of subcarriers in frequency and BER performance and MIMO receiver techniques are compared about SER to SNR.

Keywords : OFDM; Modulation; Demodulation; FBMC; MIMO receiver.

1. Giriş

Kablosuz haberleşme sistemleri birçok uygulamada popüler bir teknoloji olan OFDM'i (Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM) kullanmaktadırlar [1-7]. Son yıllarda filtre tabanlı çoklu taşıyıcılı yapılar geliştirilmiş ve OFDM'e alternatif olmuştur. Birçok uygulamada OFDM'i uygulayabilmek için ön ek (Cyclic Prefix-CP) pratik çok yollu gecikmeli bir kanal için gereklidir. OFDM'in aksine FBMC (Filter Bank Based Multicarrier-FBMC) CP'ye ihtiyaç duymaz. FBMC, geleneksel CP-OFDM yapısı ile karşılaştırıldığında FBMC

yapısındaki koruma bandının dar olması OFDM'e göre avantaj sağlamaktadır. Özellikle spektral performansta artış sağladığı görülmektedir [8]. Ayrıca darband iyi durdurma bandı zayıflaması girişim ve kanallar frekans uzayında ardışık darbeler arasında örtüşme olmasından dolayı FBMC girişim bozulması içermektedir. Ek olarak örtüşme etkisiyle iletilen sinyal zaman düzleminde çoklu FBMC semboller üretmektedir. Böylece iletilen sinyalde, literatürde gerçek girişim olarak bilinen semboller arası girişim gözlenir. Gerçek değerli sembollerini kullanarak demodülasyon yapan geleneksel FBMC yapısında OQAM (Offset

Quadrature Amplitude Modulation-OQAM) komşu darbelerin dikgenliğini sağlar [9]. Fakat OQAM tabanlı FBMC yapısı mevcut gerçek girişim nedeniyle geleneksel MIMO (Multiple-Input Multiple Output-MIMO) teknikleriyle birlikte çalışmaya uygun değildir [10-14]. Bu nedenle QAM tabanlı FBMC sistemi, OQAM yapısındaki sınırlamaları yok ettiği için ve QAM sembollerini kullanarak yeni bir prototip filtre tasarlandığı için araştırmacılara çekici gelmeye başlamıştır. QAM-FBMC yapısı OQAM-FBMC yapısının eksikliklerinin üstesinden gelmek için QAM sembollerinin iletiminde kullanılmaktadır. QAM sembollerini arasına yerleştirilmiş boş veriler FBMC sistemindeki sembol atama tasarımında gerçek girişimi artırır. Ancak alıcı yüksek karmaşıklıkta olur ve yüksek artık girişimden dolayı bit hata oranı (Bit Error Rate-BER) performansı düşmektedir [15].

Kompleks düzlemde iki farklı prototip filtreyle dikgenlik şartını sağlamak için tek ve çift alt taşıyıcılardan yararlanır. Bu metod yardımıyla herhangi bir zayıflama ve CP eklenmediğinden BER performansında azalma olmaksızın QAM semboller elde edilebilir. QAM sembol iletiminde iki farklı prototip filtre kullandığımızda geleneksel QAM-FBMC yapısındaki prototip filtrenin yan lob zayıflaması ve zaman düzlemindeki düzgün cevabından dolayı OFDM'den önemli ölçüde yüksektir. Bu nedenle QAM-FBMC için yan lob bakımından daha iyi şartlarda olan yeni bir prototip filtre sağlanmalı ve pratik çalışmalarda BER bakımından güvenli performans sağlanmalıdır [16]. Bu çalışmada OFDM ve FBMC için filtre tasarımı önerilmiştir. Bölüm 2'de OFDM tekniği tanıtılmış ve OQAM-FBMC yapısı ile QAM-FBMC yapısı Bölüm 3'de açıklanmıştır. OFDM ve FBMC için gerçekleştirilen Matlab uygulamaları Bölüm 4'de gösterilmiştir. Son olarak Bölüm 5'de elde edilen sonuçlar verilmiştir.

2. OFDM

2.1. OFDM ve Dikgenlik

OFDM modülasyon tekniğinde alt taşıyıcılar birbirlerine göre dikgen olarak kullanılırlar. Dikgenlik frekans düzleminde alt taşıyıcılar arasındaki örtüşmenin üstesinden gelir. Band

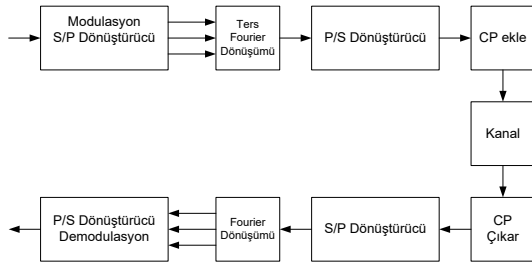
genişliği etkinliği modülasyonun doğruluğunu ortaya koyar ve bu işlem literatürde band genişliği etkinliği (spektral etki) olarak tanımlanmaktadır. Band genişliği etkinliğinin başarılması OFDM'in dikgenlik özelliğinin kullanılmasından dolayı taşıyıcılar arası girişimden bağımsızdır [17].

2.2. Temel OFDM Sistemi

Şekil 1'de OFDM blok yapısı gösterilmektedir. OFDM tekniğinde yüksek veri hızına sahip olan giriş sinyali düşük hızdaki veri sembollerine dönüştürülür. Düşük veri hızındaki semboller blok yapıda gösterildiği gibi paralel olarak OFDM modülasyon tekniği ile iletilir. Daha sonra ters fourier dönüşüm (Inverse Fast Fourier Transform-IFFT) bloğu bu paralel sinyali giriş olarak alır. Modülasyon bloğundaki veri kanal tarafından alınmadan önce veriyi frekanstan zamana dönüştürür. Veriyi kanaldan almadan önce koruma aralığı olarak bilinen CP araya yerleştirilir ve alıcıda modülasyonun tersi adımlar uygulanır [18].

İkili kaynak üretici sayısal giriş verisini, ikili veriyi modüle etmek için kullanılan BPSK, QPSK, QAM gibi birkaç farklı yöntemle üretir. Kanaldaki gecikme ile ilgili problemler IFFT blok diyagramında görüldüğü gibi frekanstan zaman düzlemine geçerken meydana gelir. Bu nedenle ISI/ICI gibi problemlerin üstesinden gelmek için sembole CP eklenir. Sembollerini kanala göndermeden önce ilk olarak zaman düzleminde belirlenen uzunlukta OFDM sembollerini hazır bulunacaktır. Daha sonra modülasyonda yapılan işlemlerin tersi uygulanır. Böylece alıcının çıkışından OFDM sinyali elde edilmiş olur. Bütün çok taşıyıcılı modülasyon teknikleri arasında, en yaygın modülasyon çeşidi çok yollu sönmlemeli kanalı basit ve durağan yapan CP eklenmiş OFDM'dir. Buna rağmen CP eklemek spektral etkinin azalmasına yol açacaktır. Ayrıca dikkörtgen darbeleri izleyen geniş yan lob seviyeleri nedeniyle OFDM'de yakınlık spektrumu görülmemektedir. Spektral etkinin aşırı azalmasını önlemek için frekans düzlemine komşu taşıyıcılarla örtüşmeyi yok edecek boş alt taşıyıcılar eklenir. Bu dezavantajlardan kurtulmak için ve OFDM'e alternatif bir yaklaşım olarak FBMC yapısı kullanılır [19]. Literatürde farklı birçok yapıya

dayandırılan FBMC yapısı gözlemlenebiliriz[20]. OFDM/OQAM yapısı Saltzberg tarafından QAM sembollerinin faz ve dördün bileşenlerinin periyodun yarısı sürede kaydırılmasıyla elde edilmiştir. Dolayısıyla komşu alt taşıyıcılar arasındaki bit hızında başarı sağlamak mümkün olup bilgi sembolü içermeyen taşıyıcılar arası girişim ve semboller arası girişim hala mevcuttur. Bu yüzden her kaydırılmış QAM (OQAM) alt taşıyıcı modüle edilir ve dikgenlik şartları reel düzlemde sağlanmış olur [21]. Aslında alıcı tarafta veri, sinyalin sadece reel ya da imajiner bileşenleri ile taşınır, bu reel veya imajiner bileşenleri girişim terimi olarak kabul edebiliriz. Hirosaki bu modülasyon tekniğinde etkili bir uygulamayı ayrık fourier dönüşümü (Discrete Fourier Transform-DFT) ile gerçekleştirmiştir [22].



Şekil 1. OFDM blok diyagram

3. FBMC-OQAM Yapısı

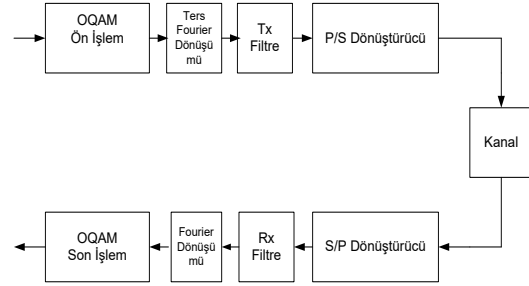
Son zamanlarda farklı senkronizasyon ve denkleştirme metotlarıyla geliştirilen FBMC modülasyon yapısına araştırmacıların yoğun ilgisi oluşmuştur. Fakat gelişmelerin çoğu tek taşıyıcılı (Single Input Single Output-SISO) uygulamaları içermektedir. Denklem 1, FBMC-OQAM yapısının ayrık zamanda iletilen sinyal formülasyonunu göstermektedir.

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

Denklem 1'de çift alt taşıyıcıların sayısı M , reel düzlemde prototip filtre $g[m]$ ile gösterilmiştir. $D/2$ gecikme terimi $g[m]$ prototip filtresinin L_g uzunluğuna ilave edilmiştir. Bu seçimden sonra örtüşme faktörü K için $D = KM - 1$ ve $L_g = KM$ eşitlikleri elde edilir. $a_{k,n}$ verinin reel ya da imajiner parçası olan QAM sembolleriyle iletilen sembolleri

tanımlamaktadır. $Q_{k,n} = \pi 2(n+k) - \pi nk$ ifadesinde faz kaymasını ifade eden terimler bulunmaktadır. Denklem 1 bu kabullerin ardından Denklem 2 şeklinde ifade edilebilir.

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



Şekil 2. OQAM FBMC blok diyagramı

OQAM-FBMC yapısı verici ve alıcı tarafta reel değerli sembollerin modülasyonunda çalıştığı için sonunda kompleks değerli sembolleri reel değere ve reel değerli sembolleri kompleks değerli sembollere dönüştürmek amacıyla OQAM ön işlem (pre-processing) ve son işlem (post-processing) olarak Şekil 2'de gösterilen adımları sırayla gerçekleştirir. OQAM-FBMC, prototip filtre darbe şekli ve OQAM sembollerin reel değerli olmasıyla dikgenliği garanti altına alır. Kanaldan ideal olduğu durumda, alıcıda m alt taşıyıcı sayısı, k zaman sabiti olmak üzere Denklem 3 ile demodüle edilen sinyalin formülü verilmiştir.

$$\begin{aligned} d_{m,k} &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=0}^{M-1} d_{m,k} \gamma_{m,k}[n] \gamma_{m,k}^*[n] \\ &= d_{m,k} + \underbrace{\sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{m,k} \gamma_{m,k}[n] \gamma_{m,k}^*[n]}_{\text{İntrinsic interferen ce}} \end{aligned} \quad (3)$$

Eşitlik 4'te verildiği gibi OQAM-FBMC yapısında gerçek değerli bir sembol iletimi için reel düzlemde ortogonallik şartı elde edilmelidir.

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

$$R \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \gamma_{m,k}[n] \gamma_{m,k}^*[n] \right\} = R \left\{ \gamma_{m,k}[n] * \gamma_{m,k}^*[-n] \right\} \quad (5)$$

$$= \delta_{m,m'} \delta_{k,k'} \quad (6)$$

Denklem 4 ve 5 $R\{\cdot\}$ ile kompleks değerli sembollerin reel terimlerini ve $*$ operatörü liner konvolüsyonu ifade etmektedir. Çok yollu sönümlmeli kanal $h[n]$ ve eklenmiş beyaz Gaussian gürültüsü (Additive White Gaussian Noise-AWGN) $w[n]$ olmak üzere alınan $y[n]$ sinyali Eşitlik 7 ile verilmiştir.

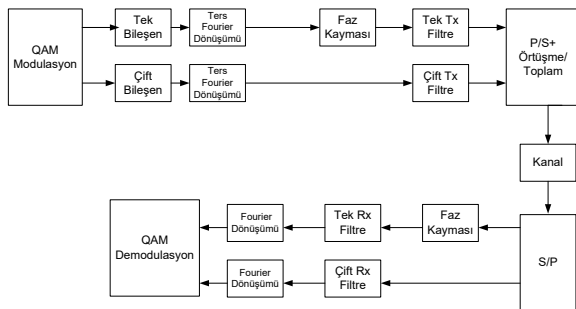
$$y[n] = h[n] * s[n] + w[n] \quad (7)$$

$$\sum_{u=0}^{T-1} h[\tau_u] s[n - \tau_u] + w[n] \quad (8)$$

Denklem 8'de çoklu yol gecikmesi τ_u ve çoklu yol gecikme sayısı T olarak tanımlanmıştır. m alt taşıyıcı k zaman sabiti olmak üzere ICI ve ISI demodüle edilmiş sinyalde mevcuttur. Eğer alıcıda kanal durum bilgisi (Channel State Information-CSI) iyi biliniyorsa sıfır zorlama denkleştirici (Zero Forcing (ZF) Equalizer) reel değerli sembol iletiminde kullanılır ve kullanılan semboller Denklem 9 ile gösterilir.

$$d_{m,k} = R \left\{ \begin{matrix} r_{m,k} \\ H_m \end{matrix} \right\} \quad (9)$$

Denklem 9'da H_m , $h[n]$ in kanal frekans yanıtını (Channel Frequency Response-CFR) göstermektedir.



Şekil 3. QAM FBMC blok diyagramı

QAM FBMC yapısına ait blok diyagram Şekil 3 ile gösterilmiştir. Tek ve çift filtre olarak adlandırılan iki farklı prototip filtre QAM FBMC'de kompleks sinyal iletiminde kullanılmaktadır. Şekil 2 ve Şekil 3 kıyaslandığında, OQAM-FBMC dikgenliği tek bir darbe şekillendirilmiş prototip filtreyle sağlamakta ve ön/son işlem reel değerlerle gerçekleştirilmektedir. QAM-FBMC ise dikgenliği darbe şekillendirilmiş iki prototip filtreyle sağlamaktadır.

3.1. ZF Denkleştirici

MIMO sistemler gelecek nesil haberleşme teknolojileri için popüler adaylardır. MIMO sistemde bağımsız veri iletimi uzaysal çoğullama tekniği ile sağlanır. Geleneksel sinyal işleme teknikleriyle veri iletiminde alıcıda en uygun performans sağlayan maksimum benzerlik (Maximum Likelihood-ML) tekniği ya da alt optimal performans sağlayan hesaplama karmaşasını kabul edilebilir performans düşmesiyle azaltmakta olan lineer alıcılar kullanır. Bu alıcı yapılarının düzgün çalışabilmesi için alıcı tarafından kanal durum bilgisinin bilinmesi gereklidir [23]. Ayrıca kanal frekans yanıtının tersinin hesaplanmasıyla elde edilen ZF (Zero Forcing) denkleştirici MIMO alıcılar için lineer denkleştirme algoritması olarak bilinir. Bu algoritma kanalda gürültü bulunmadığı durumda semboller arası girişimi (ISI) sıfıra indirmekte ve ağırlıklı olarak MIMO sistemlere uygulanmaktadır. Bu durumda ISI gürültüyle kıyaslandığında daha önemliyse avantaj sağlamış oluruz. Kanal matrisi H , gürültü vektörü n , alınan vektör y ve iletilen vektör x olmak üzere Denklem 10 ile alıcıda alınan sinyal formüle edilmiştir.

$$y = Hx + n \quad (10)$$

x vektörünü elde edebilmek için bir denkleştirme matrisi W Denklem 11 ile verildiği gibi geliştirilmelidir.

$$WH = I \quad (11)$$

ZF algılayıcı Denklem 12'deki bazı kısıtlamaları sağlamalıdır.

$$W = (H^H H)^{-1} H^H \quad (12)$$

ZF algılayıcı; düzenleme, girişim geçersizleştirme ve girişim iptali işlemlerini içeren ardışık girişim iptali (Successive Interference Cancellation-SIC) algoritmasıyla birleştirilebilir. SIC algoritması alınan sinyalden gelen girişim bozulmasının sinyalden çıkarılması için kullanılır.

3.2. Minimum Mean Square Error

Ortalama karesel hatayı küçültmek için minimum ortalama karesel hata (Minimum Mean Square Error-MMSE) algoritması kullanılır ve bu yöntem performans kalite ölçümü için yaygın olarak kullanılmaktadır. MMSE denkleştirici ISI bozulmasını tam olarak yok edemez ancak bu yöntem gürültü değerini ve alıcıdaki ISI gücünün etkisini minimuma düşürür. Bilinmeyen rasgele değişken x ve bilinen rasgele değişken y olmak üzere Denklem 13 ile MSE (Mean Square Error) değeri hesaplanmıştır.

$$MSE = E\{(X^{\wedge} - X^2)\} \quad (13)$$

Genellikle MMSE tahmin ediciyi kapalı çevrim formda elde etmek mümkün değildir. Bu yüzden lineer tahmin ediciler gibi MSE minimize edici teknikler bulmalıyız. Lineer MMSE tahmini diğer tüm tahmin edicilerle kıyaslandığında en başarılı tahmin edicidir ve Denklem 14 ile tanımlanmıştır.

$$AY + b \quad (14)$$

Denklem 14'de Y rasgele üretilmiş bir vektör, A bir matris, b bir vektörü sembolize etmektedir. MMSE yaklaşımında Denklem 15 ile verilen amaç fonksiyonunu optimize edecek W katsayılarını elde etmeliyiz.

$$E\{(W_{y-x})(W_{y-x})^H\} \quad (15)$$

W denkleştirme matrisini, H kanal matrisini, n kanal gürültüsünü, y alınan sinyali tanımlamak üzere x vektörünü çözebilmek için W 'yi bilmemiz gerekmektedir. MSE algılayıcı

Denklem 16 ile verilen eşitliği sağlamakta ve ZF'ye benzer şekilde $WH=I$ eşitliğini sağlamalıdır.

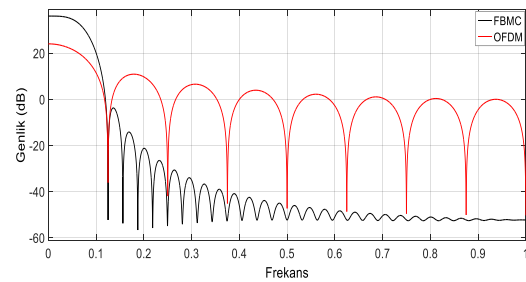
$$W = [H^H H + N_0 I]^{-1} H^H \quad (16)$$

İletilen semboller arasındaki MSE değerini minimuma düşüren MMSE alıcı bir lineer algılayıcı tekniğidir. MMSE algılayıcı hem girişimi hem de gürültüyü azaltmada kullanılır. Bu nedenle MMSE algılayıcı gürültü ve girişimin azaltılmasında kararlılığı başarmaya çalışır. Dolayısıyla kanalda gürültü olduğu durumda MMSE metodu ZF metodundan daha iyi performans gösterir.

MMSE algılayıcı ZF-SIC algoritmasında olduğu gibi üç aşamadan oluşan SIC algoritmasıyla birleştirilir. İlk adımda ağırlık matrisi W 'nin hesaplanması, ikinci adım s değerinin tahmini ve son olarak $N_t-1 > 0$ ise ilk aşamaya geri gidilmesini gerektiren bir akış şemasına sahiptir.

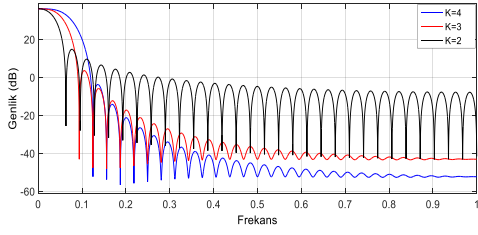
4. OFDM ve FBMC Uygulamaları

Bu bölümde MIMO sistemler için QAM FBMC ve OFDM uygulamalarının performans değerlendirmesi sunulmaktadır. Çalışmamızda veri alt taşıyıcı sayısı 16 ve tasarlanan prototip filtre katsayısı 4 olacak şekilde QAM FBMC ve OFDM için prototip filtre tasarımı önerilmiştir.



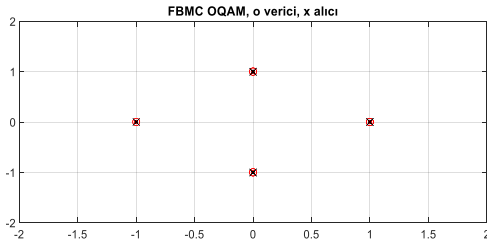
Şekil 4. FBMC ve OFDM genlik yanıtı

QAM FBMC ve OFDM sistemlerine ait genlik yanıtları Şekil 4'te gösterilmiştir. Şekilden FBMC'deki sönmüleme etkisinin OFDM'den daha fazla olduğu görülmektedir.



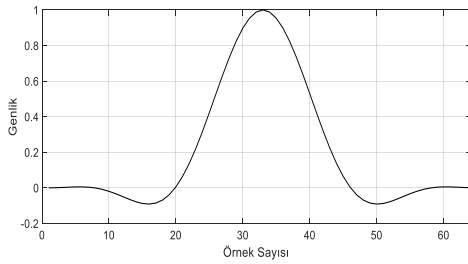
Şekil 5. FBMC genlik yanıtı K=2,3,4

Örtüşme faktörü $K=2,3,4$ için FBMC'in genlik yanıtı Şekil 5'de verilmiştir. $K=2$ için genlik dalgalanması $K=3$ ve $K=4$ ile kıyaslandığında daha yüksektir.



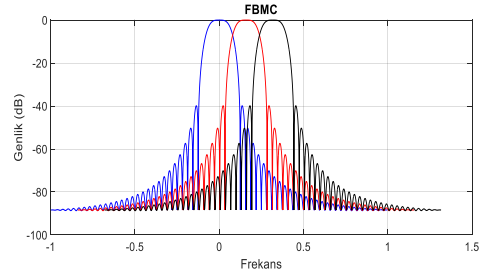
Şekil 6. OQAM FBMC yıldız diyagramı

Şekil 6'da QAM FBMC yapısına ait alıcıdaki ve vericideki sinyallere ait yıldız diyagramı gösterilmiştir.



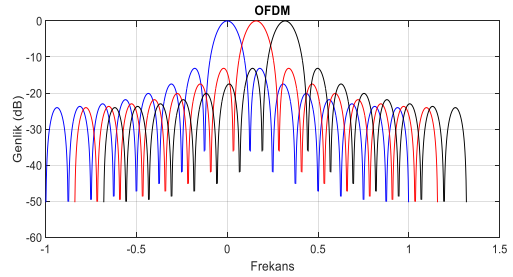
Şekil 7. Darbe yanıtı

FBMC tasarlanan filtrenin impulse yanıtı Şekil 7'de gösterilmiştir. Bu impuls yanıtı literatürde Phydas prototip filtre olarak bilinir.



Şekil 8. FBMC'in alt taşıyıcıları

Şekil 8, $K=4$ için FBMC'in alt taşıyıcılarını gösterir. Alt taşıyıcılar frekans ekseninde birbirinin kaydırılmış versiyonu olarak elde edilir. FBMC frekans düzleminde simetrik değerler alır ve yan lob zayıflaması OFDM'den daha küçüktür.



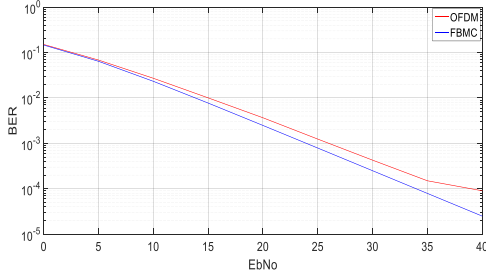
Şekil 9. OFDM'in alt taşıyıcıları

Şekil 9'da OFDM'in alt taşıyıcıları gösterilmiştir. OFDM ile QAM FBMC yapılarını karşılaştırdığımızda FBMC OFDM'e göre daha yüksek genlik kazancı sağlar ve yan lob zayıflaması OFDM'den daha azdır. Bu yüzden OFDM, FBMC yapısından daha karmaşıktır.

Tablo 1. Prototip filtre katsayıları

	h0	h1	h2	h3	h4	h5
K=4	-0.042	-0.414	2.042	4.828	2.042	-0.414
K=3	-0.289	0.177	2.289	3.645	2.289	0.177
K=2	-2,2e-16	1	2	2.414	2	1

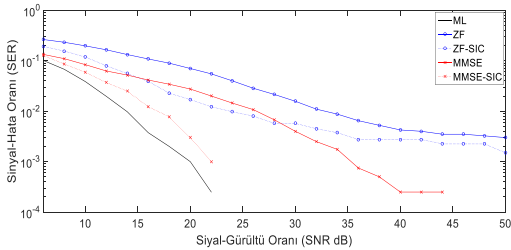
Tablo 1, elde edilen prototip filtrenin katsayılarını alt kanal sayısı $M=2$ ve örtüşme faktörü $K=4,3,2$ olduğu durumlarda göstermektedir. Filtrenin katsayıları $h_0, h_1, h_2, h_3, h_4, h_5$ Matlab ortamında elde edilmiştir.



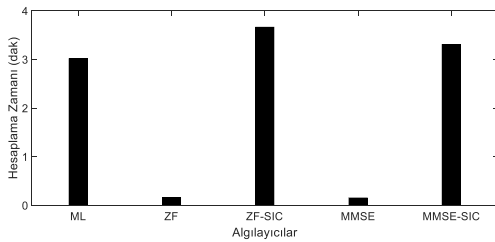
Şekil 10. OFDM ve FBMC performans karşılaştırması (BER/EbNo)

Şekil 10'da verilen OFDM ve FBMC yapılarının performans karşılaştırması, iki sistemin benzer performans sergilediklerini açıklamaktadır. Ancak FBMC'de kullanılan prototip filtre sınırlı frekans aralığı sağlamaktadır.

MIMO sistemler için FBMC ile çeşitli alıcı yöntemleri geliştirilmiştir. Geleneksel ML, ZF, MMSE algılayıcılar ve önerilen ZF-SIC ve MMSE-SIC algılayıcıları sinyal hata oranı (Signal to Error Ratio-SER) bakımından kıyaslanmıştır ve sonuçlar Şekil 11'de gösterilmiştir. Simülasyonlar 100 iterasyon sayısı, alıcı ve vericideki sembol sayısı 10 alınarak 4 antenle gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmalar ZF-SIC yönteminin geleneksel ZF'den daha iyi performans sağladığını göstermektedir.



Şekil 11. Değişik algılayıcılarla SER-SNR karşılaştırması (4x4 MIMO ve BPSK modülasyon)

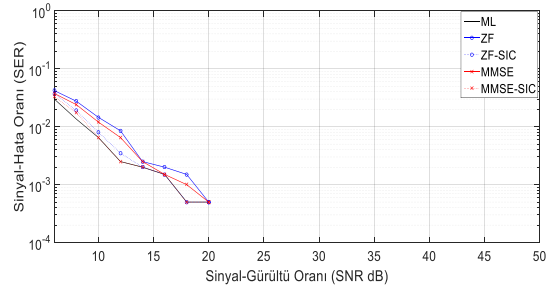


Şekil 12. 4x4 MIMO için değişik algılayıcılarla hesaplama süresi karşılaştırması

Hesaplama zamanı ZF ve MMSE yaklaşımlarında ML, ZF-SIC ve MMSE-SIC ile karşılaştırıldığında daha kısadır. Hesaplama zamanı önemli olduğunda azalan performans gücüyle ZF ve MMSE yaklaşımları tercih edilebilir. 100 iterasyonun sonunda 4x4 MIMO kanalın katsayıları Tablo 2'de verilmiştir.

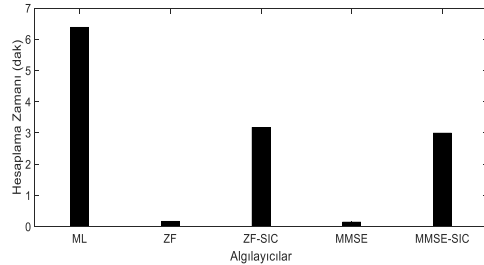
Tablo 2. 4x4 MIMO kanalın katsayıları

0.9071	0.0348	0.8309	-1.3949
-1.3790	0.0604	0.3206	0.6116
0.8541	-0.2833	1.2123	-0.5407
0.1307	-0.2099	-0.1279	-1.1962



Şekil 13. Değişik algılayıcılarla SER-SNR karşılaştırması (2x4 MIMO, BPSK modülasyon)

Şekil 13, verici anten sayısı 4'ten 2'ye düştüğünde MMSE-SIC yaklaşımının 4x4 MIMO'dan daha iyi performans sağladığını göstermektedir.



Şekil 14. 2x4 MIMO için değişik algılayıcılarla hesaplama süresi karşılaştırması

4x4 MIMO uygulamasına benzer şekilde 2x4 MIMO uygulamasında ML, ZF-SIC ve MMSE-SIC'nin ZF ve MMSE ile

kıyaslandığında daha yüksek hesaplama zamanı gerektirdiği Şekil 14’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2*4 MIMO kanalın katsayıları

0.8539	0.0290
2.0105	0.9949
-0.6791	0.1556
0.4497	2.0107

2x4 MIMO uygulaması için 100 iterasyon sonunda elde edilen kanalın katsayıları Tablo 3’de verilmiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada gelecek nesil haberleşme sistemlerinin temelini oluşturan ve onlara ışık tutacak olan QAM FBMC ve OFDM sistemleri için kullanılan algılayıcı algoritmalarının kıyaslanması gerçekleştirilmiştir. Alt taşıyıcılar modellenmiş frekans yanıtları şekillerle açıklanmıştır. OFDM’de eklenen CP ekinden dolayı karmaşıklık QAM FBMC’den daha fazladır. Son zamanlardaki gelişmeler MIMO FBMC OQAM yapısını, esnek ve kararlı yapısından dolayı gelecek nesil haberleşme sistemleri için en uygun aday olarak göstermektedir. Ayrıca FBMC yapıları için sunduğumuz MIMO alıcılar SER-SNR bakımından karşılaştırılırken prototip filtrenin katsayıları da farklı örtüşme faktörleri için karşılaştırılmıştır. Yan lob azalması bakımından K=4 için elde edilen sonuçların diğer durumlara göre en uygun olduğu simülasyon sonuçlarıyla sunulmaktadır. Bu çalışma özellikle QAM FBMC ve OFDM sistemlerini tek taşıyıcılı haberleşme sistemleri için önermekte ayrıca QAM FBMC yöntemiyle MIMO alıcı tasarımı yapmaktadır. Gelecekteki çalışmalarda mevcut metotlar çok taşıyıcılı haberleşme sistemleri için geliştirilebilir. Ayrıca çeşitli optimizasyon algoritmalarıyla modülasyonun başarımını artıracak uygulamalar gerçekleştirilebilir.

6. Kaynaklar

1. Lee, S., Gil, G., (2009). Inter-cell resource coordination utilizing macroscopic diversity for an

uplink OFDMA system. IEICE Trans. Commun, 92 (10): 3256–3259.

2. Son, H., Lee, S., (2009). Multi-cell communications for OFDM-based asynchronous networks over multi-cell environments. Wirel. Netw, 15 (7): 917–930.

3. Lee, H., Son, H., Lee, S., (2009). Semi-soft handover gain analysis over OFDM-based broadband systems. IEEE Trans. Veh. Technol, 58 (3): 1443–1453.

4. Jang, U., Lee, H., Lee, S., (2008). Optimal carrier loading control for the enhancement of visual quality over OFDMA cellular networks. IEEE Trans. Multimed, 10 (6): 1181–1196.

5. Oh, T., Lee, S., (2014). Cooperative and joint video multicast over MIMO-OFDM networks Digit. Signal Process, 33, 98–115.

6. Son, H., Lee, S., (2013). Hierarchical modulation based cooperative relaying over a multicell OFDMA network. Wirel. Netw. 19(5), 577–590.

7. Farhang-Boroujeny, B., (2011). OFDM versus filter bank multicarrier. IEEE Signal Process, Mag. 8 (3): 92–112.

8. Bellanger, M., (2010). Physical layer for future broadband radio systems. Proc. Radio and Wireless Symp., 436–439.

9. Bolcskei, H., (2003). Orthogonal frequency division multiplexing based on offset QAM. Advances in Gabor Analysis, Birkhauser, Cambridge, MA, 321–352.

10. Kim, S., Lee, S., (2016). Coordinated multicast based on MIMO relay station in a single frequency network. IEEE Trans. Veh. Technol, 65 (2): 685–698.

11. Kwon, B., Park, J., Lee, S., (2015). Virtual MIMO broadcasting transceiver design for multi-hop relay networks. Digit. Signal Process, 46, 97–107.

12. Kwon, B., Park, J., Lee, S., (2015). A target position decision algorithm based on analysis of path departure for an autonomous path keeping system. Wirel. Pers. Commun, 83(3): 1843–1865.

13. Kim, S., Son, H., Lee, S., (2012). Receiver design for MIMO relay stations in multi-cell downlink system. IEEE Trans. Wirel. Commun, 11 (7): 2446–2456.

14. Zakaria, R., Ruyet, D.L., (2012). Medjahdi Y., On ISI cancellation in MIMO-ML detection using FBMC-QAM modulation. Proc. Int. Symp. on Wireless Comm. Syst.

15. Zakaria, R., Ruyet, D. L., (2010). On maximum likelihood MIMO detection in QAM-FBMC systems. Proc. IEEE 21st Int. Symp. Pers. Indoor and Mobile Radio Commun (PIMRC), 183–187.

17. Nam, H., Choi, M., Kim, C., Hong, D., Choi, S., (2014). A new filter-bank multicarrier system for QAM signal transmission and reception. IEEE International Conference on Communication.
18. Hasan, K., Waleed, M., Saad, N., (2010). The performance of multiwavelets based OFDM system under different channel conditions. Digital signal processing Elsevier, 20, 472- 482.
19. Veerananareddy, 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, 14313-14318.
20. Le Floch, B., Alard, M., Berrou, C., (1995). Coded orthogonal frequency division multiplex. Proc. IEEE, 83, 982–996.
21. Farhang-Boroujeny, B., Yuen, C. H., (2010). Cosine modulated and offset QAM filter bank multicarrier techniques: a continuous-time prospect. EURASIP J. Advances in Signal Process.
22. Saltzberg, B.R., (1967). Performance of an efficient parallel data transmission system. IEEE Trans. Commun. Technol., 15, 805–811.
23. Hirosaki, B., (1981). An orthogonally multiplexed QAM system using the discrete Fourier transform. IEEE Trans. Commun., 29, 982–989.
24. Wang, C., Murch, R. D., Mow, W. H., Cheng, R. S., Lau, V., (2007). On the Performance of the MIMO Zero-Forcing Receiver in the Presence of Channel Estimation Error. IEEE Trans. Wirel. Commun, 6(3): 805–810.