

# WiMAX sisteminde OFDM iletimi

## OFDM transmission in WiMAX systems

Erkan Vural<sup>1</sup>, Hasan Dinçer<sup>2</sup>

Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme A.B.D.  
Kocaeli Üniversitesi

<sup>1</sup>erkan.vural@sapphire.com.tr, <sup>2</sup>hdincer@kou.edu.tr

### Özet

*Bu yazıda WiMAX teknolojisi kısaca anlatılmış ve bu teknolojinin temelini oluşturan dikgen frekans bölümlü çoğullama (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) yöntemi incelenmiştir. WiMAX geniş alan kablosuz veri ağlarını tanımlayan IEEE 802.16 standardına verilen eşanlamlı bir isimdir. OFDM, bilginin yüksek veri oranına sahip bir taşıyıcı yerine daha düşük veri oranlarına sahip çoklu taşıyıcılar üzerinde paralel olarak iletildiği çoklu taşıyıcılı bir iletim şeklidir. Ayrıca örnek bir uygulama olarak tek taşıyıcılı QAM ile OFDM karşılaştırılması verilmiştir.*

### Abstract

*WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) technology and its main method called OFDM is presented in this paper. WiMAX is the synonym given to the IEEE 802.16 standard defining wide area wireless data networking. OFDM is a multi-carrier modulation technique. It splits the transmitted data stream into several interleaved lower rate streams and transmits them in parallel by using several narrowband sub-carriers. As an exemplary application single-carrier QAM and multicarrier OFDM are compared to demonstrate the strength of OFDM in multipath channels.*

### 1. Giriş

WiMAX, yani dünya çevresinde mikrodalga erişimlerinin birlikte çalışabilme yeteneği, düşük maliyetle çok sayıda kullanıcıya hizmet veren geniş coğrafik bölgeleri kapsamak için tasarlanmış bir kablosuz internet servsidir. WiMAX üreticiler tarafından dünya çapında cihazların birlikte çalışabilmesini sağlamak için uyarlanmaya çalışılan bir standarttır. 802.16'ya dayalı sistemlerin çok sayıda avantajı vardır: erişim için kablolu ağların bile çok zor olduğu alanlarda servis sağlayıcılığı yeteneği, geleneksel kablolu yapıların fiziksel sınırlamalarının üstesinden gelme yeteneği gibi. Gezgin WiMAX, gezgin ve sabit genişband ağları esnek ağ mimarisi ve geniş alan genişband radyo erişim teknolojisi olarak birleştiren bir genişband kablosuz çözümdür. Gezgin WiMAX hava arayüzü NLOS ortamlardaki çoklu-yol performansını geliştirmek için OFDM erişim yöntemini kullanır.

Gezgin kablosuz iletişim sistemlerinin performansında sınırlayıcı etkenlerden biri çoklu yolun neden olduğu

semboller arası etkileşimdir (ISI, Inter Symbol Interference). Tek taşıyıcılı sistemlerde sembol süresi (daha uzun sistem kapasitesi için) çok küçüktür ve frekans domeninde geniş bir bant genişliğine sahiptir, ve farklı zamanlarda ulaşan çoklu-yollar ISI'yi arttırıp çoklu semboller üzerinden yayılmaktadır. Karmaşık çözüm kanalın etkisini azaltmak için alıcıda bir denkleştirici tasarlamaktır. Daha basit bir çözüm OFDM gibi çoklu taşıyıcılı sistem için karar vermektir. Burada daha düşük veri hızında daha uzun sembol zamanında birkaç dikgen alt taşıyıcı üzerinden iletim yapılmaktadır.

#### 1.1. Wimax teknolojisi

WiMAX teknolojisi bir teknoloji olarak kendisini çok hızlı geliştiren ve sabit genişband kablosuz kentsel alan ağlarında anahtar rolü oynayacak bir teknolojidir. WiMAX standardı çok sayıda düşünceyle birlikte geliştirilmiştir. Bunlar aşağıda özetlenmiştir.

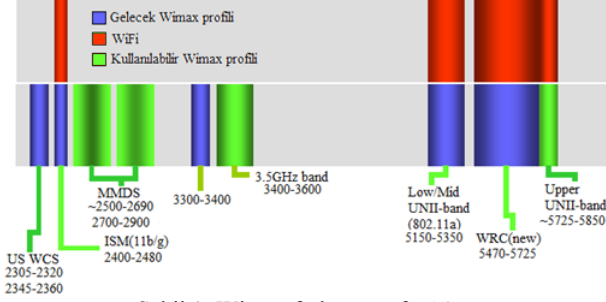
- Esnek mimari.
- Yüksek Güvenlik.
- WiMAX servis kalitesi.
- Kolay kurulum.
- Birlikte çalışabilme.
- Taşınabilirlik ve gezginlik.
- Görüş menzili olmaksızın çalışabilme ve Daha geniş kapsama alanı.
- Yüksek kapasite.

WiMAX teknolojisi haberleştiğimiz yöntemlerde devrim yapacaktır. Çok gezgin olan kişilere ses, veri ve video servislerine bağlı olacak şekilde toplam bir özgürlük sağlayacaktır. Kullanım senaryoları arasında hücresel servisler, kablosuz servis sağlayıcılar, banka ağları, eğitim ağları, halk güvenliği ağları gibi birçok uygulama yeralmaktadır.

WiMAX'ın amacı taşınabilir IP genişband uygulamaları gerçek yapmaktır. Dizüstü bilgisayarlara ve taşınabilir IP cihazlarına entegre edilen WiMAX entegreleri, günümüz WLAN kapsama alanını genişleterek kullanıcının evinin dışında da her yerde kullanıcı hareket halindeyken de yüksek hızlı IP servisleri sağlayacaktır. Kullanıcı en uygun ağ

üzerinden uygulamalarına her zaman en iyi bağlantı olanaklarıyla sahip olacaktır.

Şekil 1’de Wimax radyo frekans tayfı verilmiştir.



Şekil 1: Wimax frekans tayfı [14].

## 2. OFDM

Dikgen frekans bölmeli çoğullama sayısal kablosuz hatları, kablosuz LAN’ler (802.11a/g/n), sayısal görüntü yayını, Wimax ve diğer ortaya çıkan şirketlere tescil edilmiş olan (örneğin Flash OFDM-Qualcomm gibi) kablosuz yayını sistemlerini içeren yüksek oranlı veri haberleşme sistemlerinin yaygın olarak kullandığı bir çoklu taşıyıcı modülasyon tekniğidir.

Geleneksel seri veri iletim sisteminde semboller ardi ardına iletilmektedir. Bu iletimde her bir sembol frekans spektrumunun tamamını kullanmaktadır. Yüksek hızlı veri iletimi çok kısa sembol süresi gerektirmektedir. Frekans seçici kanalın cevabının veri sembolünün ayırt edilebilen farklı spektral bileşenlerini etkilemesi olasılığı yüksektir ve bu nedenle ISI ortaya çıkar [2]. Aynı durum zaman domeninde bilgi sembollerinin yayınımları ile birlikte alınması ile de oluşur. Bu nedenle alıcıda yanlış yorumlanabilmektedir. Bunun nedeni bir sembolün enerjisi komşu sembollerin enerjileriyle karışabilmektedir.

Sezgisel olarak kanalın frekans seçiciliği hafifletilebilir. Yüksek oranlı tek bir veri dizisini iletmek yerine, eş zamanlı olarak, her bir altkanala farklı bir taşıyıcıyı eşleştirerek birkaç darbant altkanal ile veriyi iletebiliriz. Bu durumda kanalın frekans cevabı düz olmaktadır.

Bu yüzden tüm veri iletim hızı boyunca, taşıyıcıların sayısını arttırmak, her bir taşıyıcının taşıdığı veri oranını azaltmakta ve

bu nedenle de her bir alttaşıyıcıdaki sembol süresini uzatmaktadır. Her bir altkanaldaki düşük veri hızı (ve uzun sembol süresi) ISI’yi oluşturan etkileri büyük oranda azaltmaktadır.

OFDM’in arkasında yatan temel fikir bu altkanal yöntemine dayanmaktadır. Veri birbirine çok yakın sırada dizilmiş çok sayıda alttaşıyıcı ile iletilmektedir. Klasik frekans bölmeli çoğullama tekniğinin tersine OFDM çok daha yüksek bant genişliği verimliliği sunar. Bunun nedeni de OFDM’de her bir alttaşıyıcının frekans tayfı komşu altkanalların frekans tayfı ile kısmen örtüşmektedir. Esasen alttaşıyıcılar biri diğerine dikgen olacak şekilde seçilmektedir. Bilindiği gibi birbirine dikgen (ortogonal) işaretler birbiri ile karışmaz ve alıcıda düzeltme/ayırma teknikleri ile ayrılabilir.

$$\varphi_k(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T_u}} e^{j2\pi f_k t} & (t \in [0, T_u]) \\ 0 & \text{diğer} \end{cases} \quad (1)$$

Şekil 2’de genel OFDM blok diyagramı, şekil 3 ve şekil 4’te sırasıyla OFDM vericisinin ve alıcısının blok diyagramını göstermektedir.

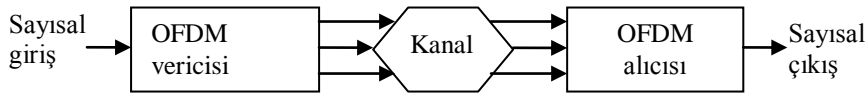
### 2.1. OFDM’in ilkeleri

Bu bölümde çoklu taşıyıcı paralel iletimin ilkeleri, IFFT kullanımı ve cyclic önekinin kullanımı verilmiştir.

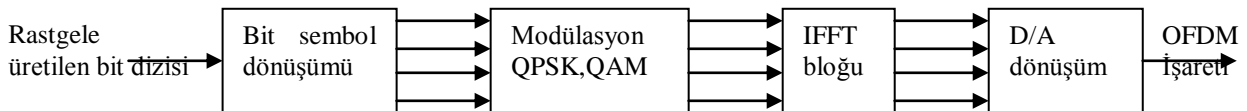
#### 2.1.1. Çoklu taşıyıcı paralel iletim düşüncesi

Gezgin bir radyo biriminde işaret çok sayıda farklı uzunluk ve gecikmelere sahip yansıma işaretleriyle taşınmaktadır. İşaretin bunun gibi çoklu yol ayrımları kanaldan dolayı oluşan ISI olarak isimlendirilmektedir. Çoklu yol ayrılması kanalın frekans seçiciliğinden sakınmak için alıcıda karmaşık uyarlamalı denkleştirici gereksinimine yol açmaktadır.

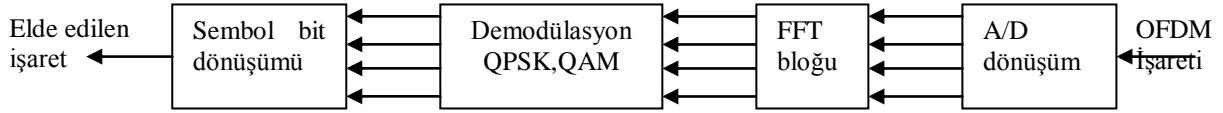
Kanalın doğal etkisi olan zaman-dağıtım etkisini azaltmak için yüksek hızlı tek taşıyıcı iletim yerine daha düşük hızlı çok sayıda çoklu taşıyıcı kullanılmaktadır. Her bir paralel veri dizisi daha sonra ardışık olarak farklı bir taşıyıcıyı modüle etmek için kullanılacaktır. N tane paralel alttaşıyıcı oluşturularak modülasyon sembolünün bant genişliğini N oranında azaltabilmekteyiz. Diğer bir deyişle, modüleli sembolün süresi aynı oranda artmaktadır.



Şekil 2: OFDM için genel blok diyagramı.



Şekil 3: Benzetimde oluşturulan OFDM işaretinin elde edilmesi.



Şekil 4: Benzetimde alıcıda alınan OFDM işaretinden gönderilen bit dizisinin elde edilmesi.

Ayrı ayrı altkanal veri oranlarının toplamı arzu edilen sembol oranıyla sonuçlanır, bu arada ISI bozulması etkileyici bir şekilde azalmaktadır.

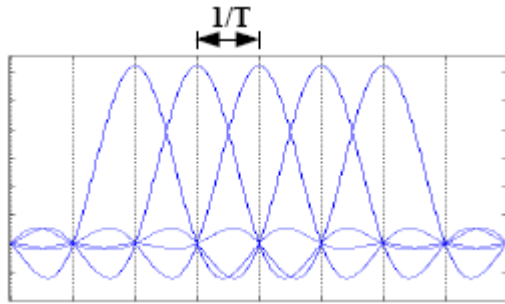
OFDM'de alttaşıyıcılar birbirine dikdir ve  $\Delta f = 1/T$  uzunluğunda aralıklara ayrılmıştır. Komşu altkanalların frekans spektrumları birbiri üzerine örtüşmektedir fakat alt taşıyıcılar arasındaki diklik üstesinden gelinmesi gereken kanallar arası etkileşimi ortadan kaldırmaktadır.

OFDM'in pratik kullanımlarında OFDM çerçeveleri için gerçek-zaman eşlemesini sağlamak zordur. Diğer bir deyişle OFDM taşıyıcılar arası etkileşime neden olabilen frekans kaymalarına karşı oldukça hassastır.

### 2.1.2. Ayrık-Fourier dönüşümü (DFT) ve taşıyıcıların dikkenliği

Daha önce ifade edildiği gibi OFDM çok sayıda darbant işareti kullanarak iletim yapmaktadır. Taşıyıcılar arasındaki frekans aralığı taşıyıcıları birbiri arasında dikgen yapacak şekilde seçilmektedir. Taşıyıcılar arasındaki mesafe, OFDM sembol oranı  $T$  ile gösterilirse,  $1/T$  şeklindedir, ya da paralel modülasyon sembolünün süresi kadardır. OFDM iletiminin frekans spektrumu şekil 5'te gösterilmiştir. Aşağıdaki her bir sinc fonksiyonunun frekans spektrumu bilgi sembolünü gösteren dikdörtgen dalga şekli ile modüle edilmiş bir sinüs taşıyıcısına karşılık gelmektedir. Kolayca fark edileceği gibi bir taşıyıcının frekans spektrumu, diğer taşıyıcılara karşılık gelen merkez frekanslarında (harmoniklerinde) sıfır geçişi olmaktadır. Bu frekanslarda, alt taşıyıcıların frekans spektrumları ayrı ayrı üst üste binmesine rağmen taşıyıcılar arası etkileşim yok edilmektedir. Dikgen bu işaretler alıcıda düzeltme teknikleri ile ayrılabilir.

IFFT, DFT yönteminin algoritma ile hızlandırılması sonucu elde edilen bir tekniktir.



Şekil 5: OFDM iletim spektrumu.

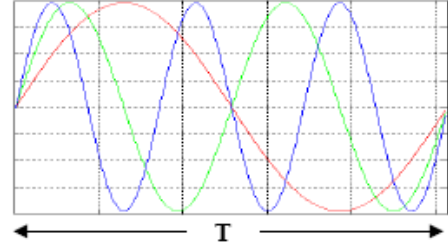
Dikgen bir dalga şekli eşitliği (1) eşitliğindeki gibi verilmektedir. Burada  $\varphi_k(t)$  k. dikgenlik fonksiyonu,  $T_s$  sembol süresidir.

Şekil 6'da da OFDM iletimindeki dalga şekillerinin yapısı verilmektedir.

İkincisi, cyclic öneki birim kanal cevabı ve iletilen işaret arasındaki doğrusal konvolüsyonu cyclic konvolüsyonuna da

### 2.1.3. Cyclic öneki

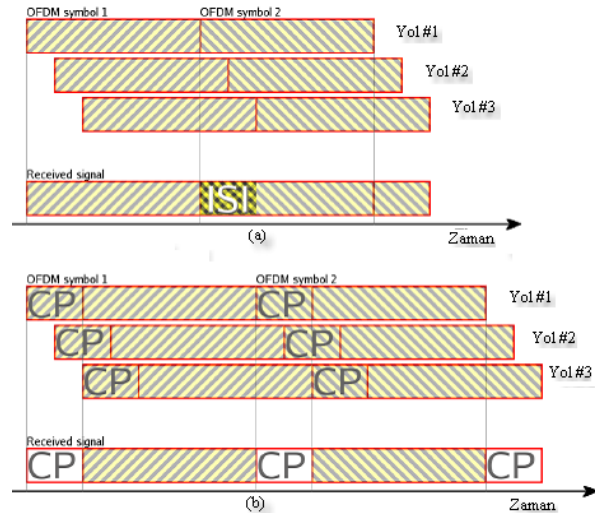
Bir OFDM sisteminde, alttaşıyıcılar zaman dağıtıcı (ayırıcı, dispersive) kanal içerisinde geçerken taşıyıcılar arası etkileşimden (ICI) ve semboller arası etkileşimden (ISI) ötürü dikgenliklerini kaybeder.



Şekil 6: OFDM iletimindeki taşıyıcıların dalgaşekli.

ISI problemi Şekil 7(a)'da grafiksel olarak verilmiştir.

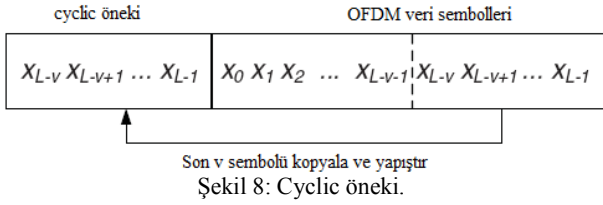
İletilen OFDM sembollerinin bölünmüş parçaları çoklu-yol nedeniyle üstüste binmektedir, bu da yapıcı veya bozucu etkileşime neden olmaktadır, bu nedenle alınan sembolün spektral içeriği değişmektedir. (ISI, olası ICI'nin nedenlerinden birisidir.) Sistem performansı etkileşim nedeniyle azalmaktadır. Şekil 7(b)'de ise önekin kullanılmasıyla ISI nedeniyle oluşan katlanmanın giderildiği gösterilmektedir.



Şekil 7: Semboller arası etkileşim ve cyclic öneki kullanımı[1]. (a) Cyclic önekinin kullanılmadığı (b) kullanıldığı durumlar

Cyclic önekinin yararı iki tanedir. Birincisi, semboller arasında güvenlik boşluğu gibi davranarak ISI'yi önler. Çeşirilmektedir. Zaman domeninde cyclic konvolüsyonu frekans domeninde matematiksel çarpıma karşılık

gelmektedir, bu nedenle alttaşıyıcılar dikgen kalmakta ve ICI olmamaktadır. BER (Bit hata oranı) performansı muhafaza edilmesine rağmen, tayf verimliliği genişletilmiş sembol zamanı nedeniyle azalmaktadır.



Şekil 8'den de görüleceği gibi cyclic öneki veri sembollerinin son örneklerinin kopyalanıp işaretin başına eklenmesiyle elde edilmektedir.

Eğer en büyük kanal gecikmesi  $v+1$  örnek süresi kadar olursa, OFDM sembollerini arasına en azından  $v$  örneklik güvenlik bandı eklenerek, OFDM sembolünün önce veya sonra

gelmesinden bağımsız olabilmektedir. Ve bu nedenle sadece tek bir OFDM sembolü düşünülebilmektedir.  $L$  uzunluklu OFDM sembolü zaman domeninde aşağıdaki gibi verilebilir.

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_L] \quad (2)$$

Cyclic öneki eklendikten sonra iletilen işaret (3) eşitliğinde verilmektedir.

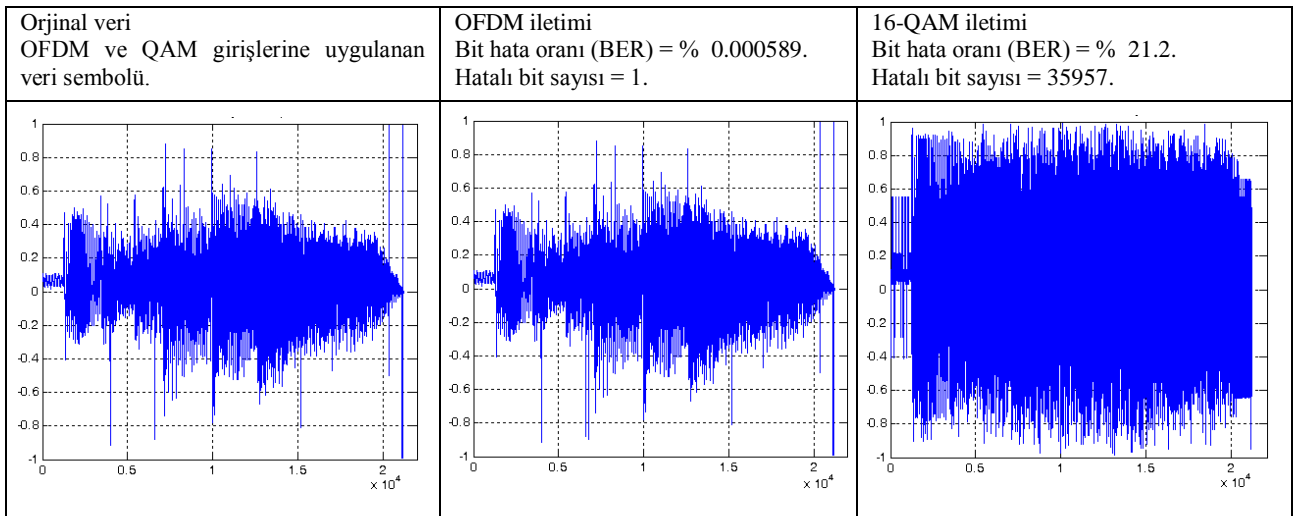
$$x_{cp} = [x_{L-v} \ x_{L-v+1} \ \dots \ x_{L-1} \ x_0 \ x_1 \ \dots \ x_{L-1}] \quad (3)$$

### 3. Bilgisayar ortamında yapılan uygulamalar

Bu bölümde QAM modülasyonunu kullanan OFDM çoğullama tekniğinin bilgisayar ortamındaki benzetimi yapılmış ve 16-QAM modülasyonu ile arasındaki farkı gösterilmiştir. İlk örnekte Şekil 9'da görüldüğü gibi orjinal bilgi yani gönderilmek istenen bir metin dosyasının OFDM ve tek başına 16-QAM ile elde edilen sonuçları ve BER bilgileri

Orjinal veri Metin * Bu metin kaynak [13]'ten alınmıştır.	OFDM iletimi Bit hata oranı (BER) = % 0.0213. İkili hata sayısı = 1.	16-QAM iletimi Bit hata oranı (BER) = % 21.3. İkili hata sayısı = 998.
ışın şekillendirme, istenen kullanıcının doğrultusu boyunca ışınımları toplarken eş zamanlı olarak diğer doğrultulardan kaynaklanan işaretleri bastıran bir işlemdir. Buradan ışın şekillendirme işaretlerinin uzamsal özelliklerini kullanarak işaretlerin uzamsal süzgeçlenmesi gibi de düşünülebilmektedir. Diğer bir deyişle ışın şekillendirme eleman dizilimi kullanarak işaretlerin uzamsal olarak ayırt edilmesine izin veren bir işaret işleme tekniğidir. Işın şekillendirme tekniğinin tipik kullanım alanları arasında radar, sonar, haberleşme, görüntü işleme ve biyomedikal bulunmaktadır[13].	ışın şekillendirme, istenen kullanıcının doğrultusu boyunca ışınımları toplarken eş zamanlı olarak diğer doğrultulardan kaynaklanan işaretleri bastıran bir işlemdir. Buradan ışın şekillendirme işaretlerinin uzamsal özelliklerini kullanarak işaretlerin uzamsal süzgeçlenmesi gibi de düşünülebilmektedir. Diğer bir deyişle ışın şekillendirme eleman dizilimi kullanarak işaretlerin uzamsal olarak ayırt edilmesine izin veren bir işaret işleme tekniğidir. Işın şekillendirme tekniğinin tipik kullanım alanları arasında radar, sonar, haberleşme, görüntü işleme ve biyomedikal bulunmaktadır[13].	Jü, .Sü%kYl<5n\$yq-%,4rœn%n\$»dl<1 @,#è,.\$'□±'l4urœ\$² (tn#'dù' .,1±œ\$'o -1±«Un\$µù\$'a-!®,'Sç1±j«'yğ¥qd'□±'1 4ul1±œq@»Q,n!«1®!®\$'ù!±¥tl5q©\$²²² çü1j®\$²©qd'ù,5m\$yqn\$“ qjœq@Sù¹, .Sü %kYl<5n\$yq-%\$'ù!±¥tl5q©n\$µya-2'⁻4 öyel<9k'5q©n\$»dl<1®!±j«'ù!±¥tl5q©n \$µya-2'⁻4²è9gUã'5n%or™\$-Yb©\$'u\$'ø¹ ,.,5b©l=‰kdedyqn\$yğ¥qd²©qd'uxiü,5 \$ù¹, .Sü%kYl<5n\$yq-%\$µl5m!®\$'yyil9 m)\$»dl<1®!±j«'ù!±¥tl5q©n\$µya-2'⁻4ç, 1±j«±,ø¹ '\$udyI=‰r™n%\$'yin\$µeq¥n\$² ©qd'ù!±¥t\$'ù,5m%\$'ek^'ğ©dyqn\$Sù, .S ü%kYl<5n\$yq-%\$'ek^'ğ©n)n\$'ip©k»dl <1®, \$±-1®, 1±œ\$±±j²è.\$qd±jœq±l4²Y'-! ±l4,qç¥q-5ü%,4'âqø.4ø\$'ù,5m%\$µe\$² ©xo%dykQ-4²'15n!«daçü1}\$v♦.U

Şekil 9: OFDM ve 16-QAM'i karşılaştıran metin örneği (FFT sayısı 128, alttaşıyıcı sayısı 32).



Şekil 10: OFDM ve 16-QAM'i karşılaştıran ses dosyası örneği (FFT sayısı 128, alttaşıyıcı sayısı 32).

verilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'te de gösterildiği gibi OFDM sisteminde modülasyon yöntemi olarak QAM, QPSK vb. modülasyon yöntemleri kullanılabilir. Bu yapılan çalışmada OFDM tekniğinde kullanılan modülasyon yöntemi QAM'dir.

Kanal gürültülü ve gürültüsüz olarak ele alınmış ve her iki sonuca ilişkin sonuçlar eklenmiştir. Çoklu yol benzetim parametreleri ise aşağıdaki gibidir.

- $d_1 = 6$  "1.çoklu yol birim gecikmesi  
 $a_1 = 0.30$  "1.yoldan kaynaklanan işaretin zayıflama faktörü.  
 $d_2 = 10$  "2.çoklu yol birim gecikmesi  
 $a_2 = 0.25$  "2.yoldan kaynaklanan işaretin zayıflama faktörü.

QAM modülasyonu kullanılan OFDM ile olan iletimde % 0.0213 gibi bir bit hata oranına karşılık yalnız 16-QAM yönteminin kullanılmasında % 21.3 bit hata oranı elde edilmiştir. Bu sonuca göre OFDM'in tek başına kullanılan 16-QAM'e göre başarısı çok açıktır. Ayrıca sisteme gürültü eklenmesiyle ilgili sonuçlar da aşağıda verilmiştir.

Girişin şekil 9'da verilen metin dosya yerine bir ses dosyası olması durumundaki elde edilen işaretler ve BER oranları da şekil 10'da bu bölüme eklenmiştir. Bu benzetimde ortamda gürültü olmadığı varsayılmıştır. Buradaki ses dosyası metin dosyasına göre çok daha uzun bir bit dizisine sahiptir. Girişe bir ses dosyası uygulandığında elde edilen sonuçlar ile giriş metin dosyası uygulandığında elde edilen sonuçlar birbirine çok benzemektedir.

Metin dosyası iletimi benzetiminde gürültü büyüklüğünün orijinal işaretin %10'u olduğu durumda OFDM için BER % 0.362 ve ikili hata sayısı 17 olarak, %15'i olduğu durumda ise BER % 1.04 ve ikili hata sayısı 49 olarak elde edilmiştir.

Bunlardan gürültünün orijinal işaretin %10'u olduğu durumda elde edilen sonuç şekil 11'de gösterilmiştir.

<p>OFDM iletimi          Bit hata oranı (BER) = % 0.362.          İkili hata sayısı = 17.          Gürültü büyüklüğü = %10.</p>
<p>İşin şekillendirme, istenen kullanıcının doerwtusu boyunca ışınlarını poplarken eş z`manlı olarak diğer doğrultulardan kaynaklanan işaretleri bastıran bir işlemdir. Buradan ışın şekillendirme işaretlerin uzamsal özelliklerini kullanarak işaretlerin 5zamsal süzgeçlenmesi gibi de düşü~ülebilmektedir. Diğer bir deyişle ışın şekillendirme eleman dizilimi kullanarak işaretlerin uzamsal olarak ayırt edilmesine izin veren bir işaret işleme tekniğidir. Işın şekillendirme tekniği~in tipik kullanım alanları arasında rAdAr, sonar, haberleşme, görüntü işleme ve biyomedikal bulunmaktadır[13].</p>

Şekil 11: OFDM için %10'luk gürültü ile elde edilen sonuç.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada WiMAX ve OFDM sistemleri hakkında temel bilgiler verilerek OFDM sisteminin ilkeleri verilmiştir. Bunun

yanında benzetimi yapılan örnek bir uygulamayla elde edilen sonuçlar da grafiksel olarak verilmiştir. Benzetim metin, ses ve ikili giriş dosyalarını kabul etmektedir. OFDM iletimi, kanal benzetimi, orijinal işareti elde etme girişi ve iletim hata oranını belirlemek için bir analiz gerçekleştirir.

OFDM ile metin içeren bir bilgi gönderildiğinde bit hata oranı % 0.0213 olarak elde edilmiştir. Bu bilgi 16-QAM sisteminde gönderildiğinde ise % 21.3'lük bir sonuç elde edilmiştir. Sisteme bilgi işaretinin %10'luk ve %15'lik bir bozulmayla ulaşan işaretler içinde OFDM ile elde edilen sonuçlar sırasıyla % 0.362 ve % 1.04 bit hata oranları şeklindedir.

Elde edilen bu sonuçlara göre OFDM tekniğinin kullanıldığı bir sistemin 16-QAM modülasyonu yöntemini kullanan bir sisteme göre oldukça iyi bir performans gösterdiği görülmüştür.

Neticede kullanılan OFDM tekniğiyle birlikte çok karmaşık dengeleyiciler kullanılmasına gerek kalmamaktadır. Ayrıca karmaşık dengeleyiciler tasarlamak yerine Fourier dönüşümleri ile yazılabilen ifadelerle tasarım yapmak kablosuz haberleşme sistemlerinin daha hızlı ve daha kolay geliştirilebilmesine olanak sağlayacaktır.

#### 5. Kaynaklar

- [1] Veiverys, A., Goluguri, V.P., June 2005, "Hardware/Software Co-Design of a Multipath Jakes' Channel Simulator for an OFDM System", Aalborg University.
- [2] M.Oltean, "An Introduction to Orthogonal Frequency Division Multiplexing" Universitatea Politehnica Timișoara.
- [3] Keller, Thomas, and Lajos Hanzo. "Adaptive Multicarrier Modulation: A Convenient Framework for Time-Frequency Processing in Wireless Communications." IEEE Proceedings of the IEEE 88 (May, 2000): 609-640
- [4] Wang, Zhengdao, and Georgios B. Giannakis. "Wireless Multicarrier Communications." IEEE Signal Processing Magazine (May, 2000): 29-48
- [5] Lawrey, Eric. OFDM Wireless Technology. 11 May 2000. <http://www.eng.jcu.edu.au/eric/thesis/Thesis.htm>
- [6] Jeffrey G. Andrews, A.Ghosh, "Fundamentals of WiMAX, Understanding Broadband Wireless Networking", Prentice Hall, Westford, Massachusetts, February 2007.
- [7] Bahai, Ahmad R. S., and Burton R. Saltzberg. Multi-Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM. New York: Kluwer Academic Plenum Publishers, 1999.
- [8] M. Saad Akram, "Pilot-based Channel Estimation in OFDM Systems", Nokia Mobile Phones, August 2007.
- [9] J.Proakis, "Digital Communications, Prentice Hall 3rd Edition", 1995.
- [10] Coleri, S., M. Ergen, A. Puri, A. Bahai, 2002: A Study of Channel Estimation in OFDM Systems. Proceedings Of IEEE Vehicular Technology conference, Fall 2002. pp. 894-898.
- [11] Sklar, B., "Digital Communications, Second Edition", Prentice Hall, 2001.
- [12] <http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2001/ofdmabsh/>
- [13] Vural, E., Dinçer H., "Kablosuz İletişimde Akıllı Anten Sistemleri ve Işın Şekillendirme Teknikleri", ELECO 2004, Bursa.
- [14] "WiMAX Deployment Fujitsu Perspective", George Wu, Fujitsu Microelectronics America.