

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**5G İÇİN UYGULAMALARIYLA
ESNEK OFDM TEKNİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tolga YAZ

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Şuayb Çağrı YENER

Haziran 2018

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

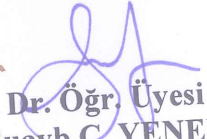
5G İÇİN UYGULAMALARIYLA
ESNEK OFDM TEKNİĞİ

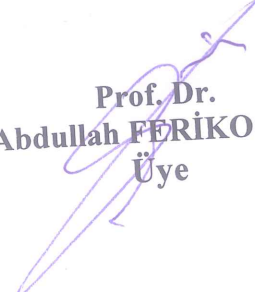
YÜKSEK LİSANS TEZİ


Tolga YAZ

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 29.06.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oycokluğu ile kabul edilmiştir.


Dr. Öğr. Üyesi
Şuayb Ç. YENER
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Abdullah FERİKOĞLU
Üye


Prof. Dr.
Osman ÇEREZCİ
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Tolga YAZ

29.06.2018

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım başta danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Şuayb Çağrı YENER olmak üzere tüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLOLAR LİSTESİ	vi
ÖZET	vii
SUMMARY	viii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

TEMELLERİYLE ESNEK OFDM Tekniği	4
2.1. OFDM Tekniği	4
2.1.1. Tek-tap denkleştirme	9
2.1.2. OFDM tekniğinin avantajları ve dezavantajları	11
2.1.2.1. PAPR	11
2.1.2.2. Faz gürültüsü	12
2.1.3. OFDM verici ve alıcı blok diyagramı	13
2.2. Esnek OFDM Tekniği	13

BÖLÜM 3.

ÇİFT SAÇILIMLI KANAL ÜZERİNDE ESNEK OFDM BENZETİMİ	17
3.1. Çift Saçılımlı Kanal Matematiği	17

3.2.Çift Saçılımlı Kanal Üzerinde Esnek OFDM Parametrelerinin Optimizasyonu için Benzetim	20
3.2.1. Benzetimden sonuçlar	21
3.2.1.2. Zamanda gecikmenin ve frekansta kaymanın olmadığı durum ($\sigma_{\tau} = 10^{-6}$ s)	21
3.2.1.2. Zamanda gecikmenin olduğu ve frekansta kaymanın olmadığı durum ($\sigma_{\tau} = 10^{-6}$ s)	21
3.2.1.3. Zamanda gecikmenin ve frekansta kaymanın olduğu durum ($\sigma_{\tau} = 50*10^{-9}$ s, $v_{\max} \approx 222$ Hz, Döngüsel önek uzunluğu = Maksimum gecikme)	25

BÖLÜM 4.

5G VE ÖTESİ HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF DALGA ŞEKLİ TEKNOLOJİLERİ	33
4.1. Alternatif Dalga Şekli Teknolojileri	33
4.1.1. FBMC (Filtre grubu ile çoklu taşıyıcı)	33
4.1.2. UFMC (Genel filtrelemeli çoklu taşıyıcı)	33
4.1.3. GFDM (Genelleştirilmiş frekans bölmeli çoğullama)	34
4.2. 5G Uygulama Sınıfları ve Farklı Dalga Şekli Teknolojilerinin Birlikte Kullanımı	34

BÖLÜM 5.

SONUÇLAR	37
KAYNAKLAR	38
ÖZGEÇMİŞ	41

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AMC	: Adaptif modülasyon ve kodlama
BER	: Bit hata oranı
bkz	: Bakınız
CP	: Döngüsel önek
CPE	: Ortak faz hatası
DD Kanal	: Çift saçılımlı kanal
DFT	: Ayrık fourier dönüşümü
DP	: Doppler yayılım profili
EPA	: Genişletilmiş yaya A
FBMC	: Filtre grubu ile çoklu taşıyıcı
GFDM	: Genelleştirilmiş frekans bölmeli çoğullama
ICI	: Taşıyıcılar arası girişim
ISI	: Semboller arası girişim
OFDM	: Dikgen frekans bölmeli çoğullama
PAPR	: Tepe güç/ortalama güç oranı
PDP	: Güç gecikme profili
QPSK	: Dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama
RMS	: Karekök ortalama
SIR	: Sinyal-girişim oranı
SNR	: Sinyal-gürültü oranı
SQNR	: Sinyal-nicemleme gürültüsü oranı
TB	: Tarih bilinmiyor
UFMC	: Genel filtrelemeli çoklu taşıyıcı
4G	: 4. nesil
5G	: 5. nesil

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 5G kablosuz haberleşme sistemleri'nin gereksinimleri için bazı çözümler	1
Şekil 1.2. Basitleştirilmiş şekliyle OFDM tekniği	2
Şekil 2.1. Çok-yollu ilettime neden olan bazı etkiler: Saçılım, yansıma, kırınım ...	4
Şekil 2.2. OFDM sembolleri ve alt-taşıyıcılar	5
Şekil 2.3. Vericide alt-taşıyıcı modülasyonu	6
Şekil 2.4. Alıcıda alt-taşıyıcı demodülasyonu	7
Şekil 2.5. Birden fazla yoldan gelen sinyalde ISI etkisi	7
Şekil 2.6. Sembollerin başına döngüsel önek eklenmesi	8
Şekil 2.7. Döngüsel önekin ISI'yı önlemesi	8
Şekil 2.8. Frekans düzleminde OFDM sembollerinin iletimi	9
Şekil 2.9. Tabanbantta OFDM verici ve alıcı blok diyagramı	13
Şekil 2.10. Farklı doppler kaymaları için alt-taşıyıcı frekans farkı (x-ekseni) ve veri sembolü sayısına (y-ekseni) göre etkin kapasite değişimi grafiği ..	16
Şekil 3.1. Güç gecikme profili	18
Şekil 3.2. Doppler yayılım profili	19
Şekil 3.3. SIR'a göre BER grafiği 1	22
Şekil 3.4. SIR'a göre BER grafiği 2	23
Şekil 3.5. SIR'a göre BER grafiği 3	24
Şekil 3.6. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR grafiği 1	27
Şekil 3.7. SIR'a göre BER grafiği 4	27
Şekil 3.8. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR grafiği 2	29
Şekil 3.9. SIR'a göre BER grafiği 5	29
Şekil 3.10. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR grafiği 3	31
Şekil 3.11. SIR'a göre BER grafiği 6	31
Şekil 4.1. 5G uygulama sınıfları ve farklı dalga şekli teknolojilerinin birlikteliği ..	35

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. OFDM tekniğinin avantajları ve dezavantajları	11
Tablo 2.2. OFDM parametreleri ve değişimlerinin bazı etkileri	14
Tablo 3.1. Örneklerdeki temel benzetim parametreleri	20
Tablo 3.2. Sinyal bileşenlerinin gecikme ve normalize edilmiş güç değerleri 1	21
Tablo 3.3. Temel parametre değerleri ve karşılık gelen SIR değerleri 1	21
Tablo 3.4. Sinyal bileşenlerinin gecikme ve normalize edilmiş güç değerleri 2	22
Tablo 3.5. Temel parametre değerleri ve karşılık gelen SIR değerleri 2	23
Tablo 3.6. Sinyal bileşenlerinin gecikme ve normalize edilmiş güç değerleri 3	23
Tablo 3.7. Temel parametre değerleri ve karşılık gelen SIR değerleri 3	24
Tablo 3.8. Sinyal bileşenlerinin gecikme, doppler kayma ve normalize edilmiş güç değerleri 1	26
Tablo 3.9. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR değerleri 1	26
Tablo 3.10. Sinyal bileşenlerinin gecikme doppler kayma ve normalize edilmiş güç değerleri 2	28
Tablo 3.11. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR değerleri 2	28
Tablo 3.12. Sinyal bileşenlerinin gecikme doppler kayma ve normalize edilmiş güç değerleri 3	30
Tablo 3.13. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR değerleri 3	30
Tablo 4.1. 5G uygulama sınıfları ve örnek uygulamalar	34

ÖZET

Anahtar kelimeler: 5G, esnek OFDM, filtreli-OFDM, F-OFDM, dikgen frekans bölmeli çoğullama, uyarlanabilir dalga şekli tasarımı, çift saçılımlı kanal, FBMC, UFMC, GFDM

Uyarlanabilir (adaptif) teknolojiler, ilk ticari ürünlerinin 2020 yılında piyasaya çıkması beklenen 5G (5. Nesil) Kablosuz Haberleşme Sistemleri'nin yapıtaşlarından biri olma yolundadır. Önceki mobil kablosuz haberleşme sistemlerinde de az miktarda bulunan uyarlanabilir çözümler, çok çeşitli uygulamaları ve gereksinimleri içinde barındıran 5G için çok daha büyük bir öneme sahiptir. Tüm haberleşme katmanlarında etkisi olan dalga şekli tasarımı da bu eğilime uygun olarak uyarlanabilir haliyle 5G Sistemleri'nde yerini almaya hazırlanmaktadır. Şu ana kadar, 5G standardizasyon tartışmalarında düşük frekans bantları için (<6 GHz) literatürde Esnek Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Esnek OFDM) veya Filtreli-OFDM (F-OFDM) olarak adlandırılan teknik temel dalga şekli teknolojisi olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada temelleriyle birlikte Esnek OFDM Tekniği örneklerle anlatılmış ve tekniğin çift saçılımlı kanal üzerindeki bir uygulaması simülasyon yoluyla gösterilmiştir. Analizi zor bir kanal çeşidi olan çift saçılımlı kanalın bulunduğu haberleşme sisteminde, temel OFDM parametrelerinin optimizasyonu yoluyla elde edilen sonuçlar kullanılarak Esnek OFDM Tekniği'nin bu kanalın zorluklarıyla mücadele etmedeki başarısı gösterilmiştir.

Çalışmada ayrıca, 5G ve Ötesi Haberleşme Sistemleri'nde düşük frekans bantlarında kullanılabilecek birkaç alternatif dalga şekli teknolojisi tanıtılmış ve farklı dalga şekillerinin çeşitli uygulamaların gereksinimlerini karşılayabilmek için birlikte kullanılabileceği bir şema sunulmuştur.

FLEXIBLE OFDM TECHNIQUE WITH APPLICATIONS FOR 5G

SUMMARY

Keywords: 5G, flexible OFDM, filtered-OFDM, F-OFDM, adaptive waveform design, doubly dispersive channel, FBMC, UFMC, GFDM

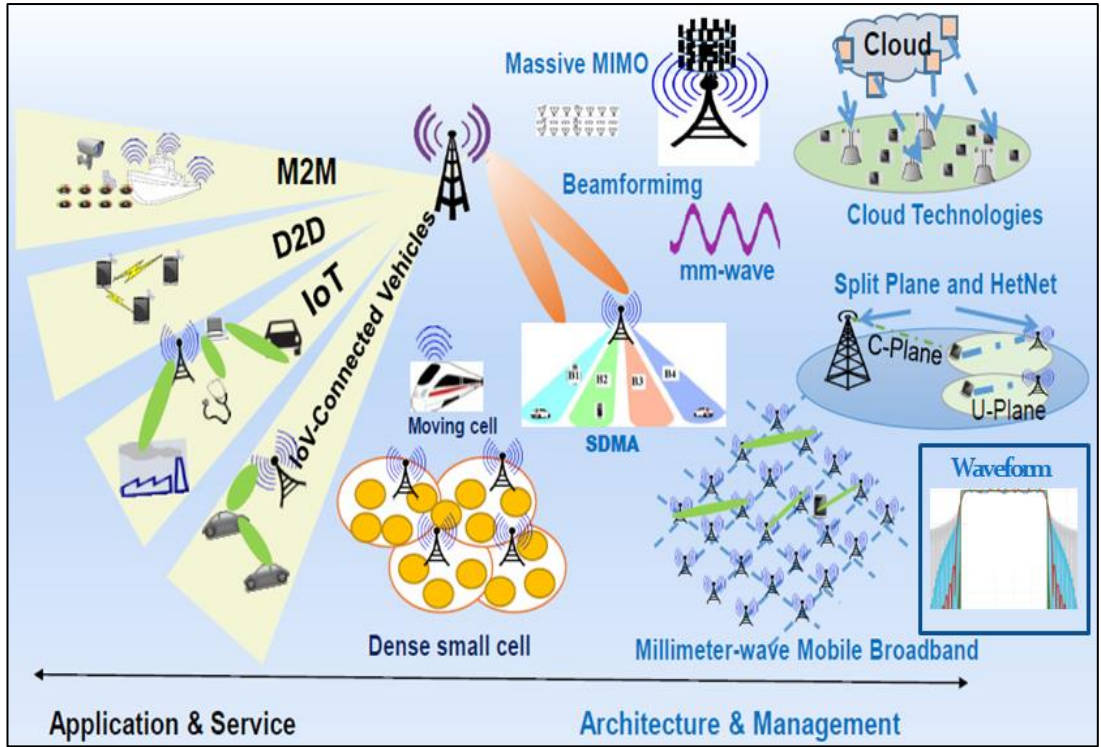
Adaptive technologies are in the way of being one of the building stones of 5G Wireless Communication Systems. Although there were examples of adaptive solutions in the older mobile wireless technologies, the importance of those become much greater for 5G with diverse applications and requirements. With its important effects on all of the communication layers, waveform design also adapts to this trend of adaptive design schemes. Until now, for lower frequency bands (< 6 GHz), a technique named in the literature as Flexible Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Flexible OFDM) or Filtered-OFDM (F-OFDM) is well accepted as basic waveform technology in the 5G standardization discussions.

In this study, Flexible OFDM Technique with its basics is presented with examples and an application of it over doubly dispersive channel is shown via simulation. Results from the communication system with hard-to-analyze doubly dispersive channel model are received and via the results, the success of Flexible OFDM Technique in overcoming the challenges of communication medium is denoted.

In addition to Flexible OFDM Technique, a few alternative waveform technologies which could be used at lower frequency bands in 5G and Beyond Communication Systems are presented and a scheme in which different waveform technologies are used together to cover various needs of different applications is presented.

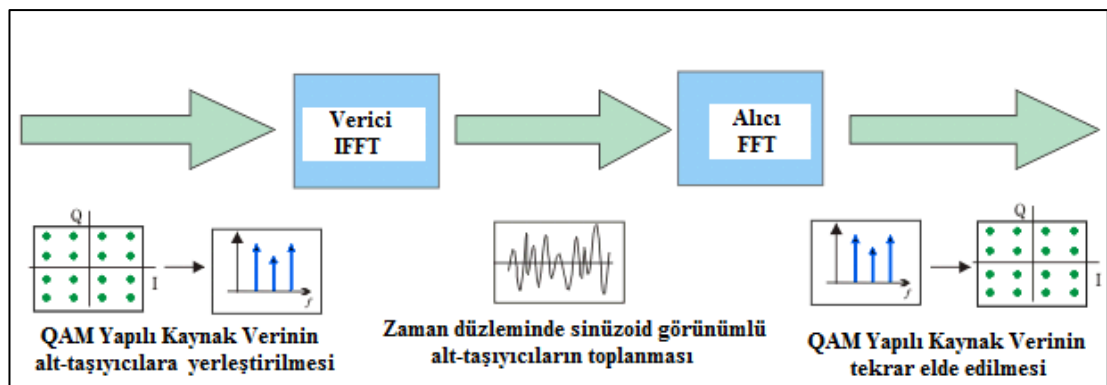
BÖLÜM 1. GİRİŞ

2020 yılında ilk ürünleriyle piyasada yerini alması beklenen 5G (5. Nesil) Kablosuz Haberleşme Sistemleri'nin en önemli özelliklerinden biri kullanıcılara çok çeşitli servisler sunma çabasıdır (Agiwal ve ark., 2016; 3GPP, 2016). Bu çaba beraberinde çeşit çeşit gereksinimlerin karşılanmasını gerektirmiş ve bunun için Şekil 1.1.'de görüldüğü gibi birçok çözüm düşünülmüştür. 5G standardizasyonu tartışmalarının bir konusu olan bu çözüm arayışları içerisinde, bir haberleşme sisteminin başarısında büyük etkisi olan, Şekil 1.1.'de sağ alt köşede, dikdörtgen içinde görülen dalga şekli tasarımı önemli bir yer edinmiştir.



Şekil 1.1. 5G kablosuz haberleşme sistemlerinin gereksinimleri için bazı çözümler (Agiwal ve ark., 2016; Benjebbour ve ark., 2016).

Basitleştirilmiş olarak Şekil 1.2.'de tanıtılan OFDM Tekniği, 4G Kablosuz Haberleşme Sistemleri'nde kullanılan ve düşük frekans bantlarında (< 6 GHz) yüksek hızlı veri iletimi için uygunluğu ortaya konan bir dalga şekli teknolojisidir. Bu uygunluk, OFDM'in literatürde Esnek OFDM veya Filtreli-OFDM (F-OFDM) olarak adlandırılan (Agilent Technologies, 2011; Zhang ve ark., 2015) geliştirilmiş bir biçiminin 5G standardizasyon tartışmalarında düşük frekanslarda temel dalga şekli teknolojisi olarak yer almasında etkili olmuştur (Ankaralı ve ark., 2017). Haberleşme sistemlerindeki esnek çözümlere örnek olarak 2G'de kullanılmaya başlanan, sinyal-gürültü oranına (SNR) göre modülasyon derecesini ve kodlama oranını değiştirmekten ibaret olan Adaptif Modülasyon ve Kodlama'yı (AMC); 4G'de baz istasyonundan kullanıcıya (downlink) ve kullanıcıdan baz istasyonuna (uplink) yönlerindeki gereksinim farklılıklarından dolayı kullanılan iki farklı dalga şekli teknolojisini (OFDM ve SC-FDMA) ve 4G LTE-A'da kullanılan hücre boyutuna göre 2 farklı uzunlukta döngüsel önekle (CP) iletilebilen OFDM Sembolleri gösterilebilir (Dahlman ve ark., 2014). Bu çalışmada işlenecek temel teknik olan Esnek OFDM, son örneğin daha da geliştirilmiş şeklidir: Sadece döngüsel önek uzunluğu gibi tek parametrenin değil bütün dalga şekli parametrelerinin (alt-taşıyıcı sayısı, alt-taşıyıcı frekans farkı, önek oranı, filtreleme/pencereleme vs) ortam şartlarına ve uygulama gereksinimlerine göre belirlendiği bir çözümdür. Bu parametrelerin değerlerinin belirlenmesiyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Steendam ve Moeneclaey, 1999; Wang ve ark., 2014; Renfors ve ark., 2015; Elkourdi ve ark., 2016; Ibrahim ve Xu, 2016; Zaidi ve ark., 2016a; Ankaralı ve ark., 2017; Nissel ve ark., 2017; Yazar ve Arslan, 2017).



Şekil 1.2. Basitleştirilmiş şekliyle OFDM tekniği (Keysight Technologies, TB).

Bu çalışmada Esnek OFDM Tekniği temelleriyle tanıtılacak ve zaman ve frekans düzleminde saçılımın mevcut olduğu çift saçılımlı kanal üzerinde SIR'ı maksimize etmek için dalga şeklinin temel parametrelerinin optimizasyonuna yer verilecektir. Çift saçılımlı kanal üzerinde dalga şekli optimizasyonu, üzerine birkaç çalışma yapılmış olan (Debbabi ve ark., 2005; Ayadi ve ark., 2007; Ayadi ve ark., 2013; Siala ve ark., 2014) araştırılmaya açık bir konudur ve bu çalışmanın bir amacı da bu konuda katkıda bulunmaktır.

Çalışmada Esnek OFDM Tekniği'ne ek olarak, 5G ve Ötesi Haberleşme Sistemleri'nde kullanılabilir alternatif dalga şekli teknolojileri ve farklı dalga şekillerinin birlikte kullanıldığı bir şema tanıtılacaktır.

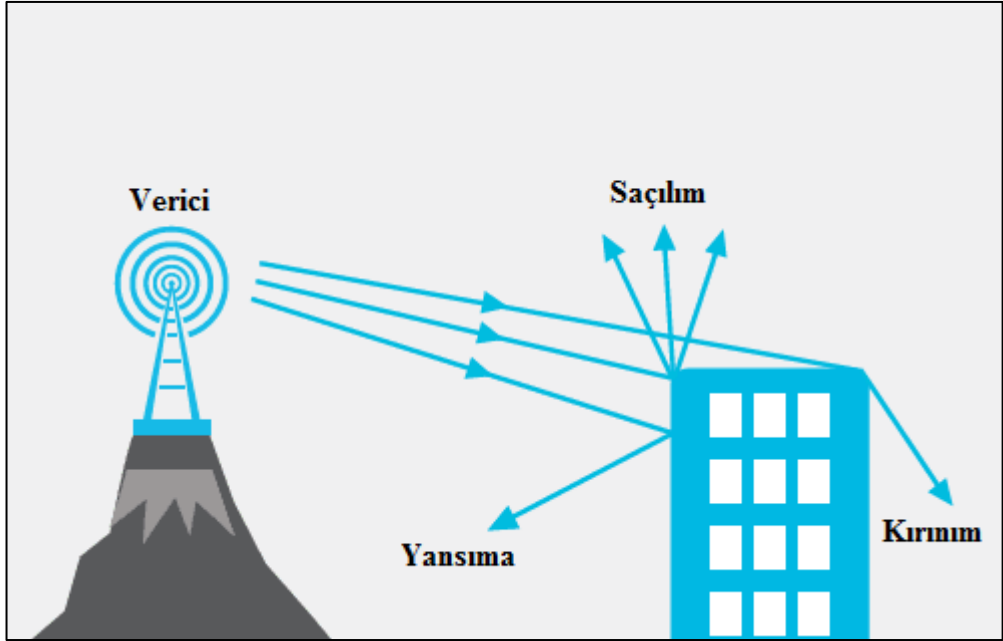
Tezde konular şu planla işlenecektir:

2. bölümde, Esnek OFDM Tekniği ve temeli olan OFDM Tekniği detaylarıyla anlatılacaktır. 3. bölümde, Esnek OFDM Tekniği'nin çift saçılımlı kanal üzerindeki MATLAB benzetimine detayları ve sonuçlarıyla yer verilecektir. 4. bölümde, 5G ve Ötesi Haberleşme Sistemleri için önemli görülen birkaç dalga şekli teknolojisi tanıtılacak ve farklı dalga şekillerinin 5G ve Ötesi Haberleşme Sistemleri'nde karşılaşılabilecek farklı gereksinimlerin karşılanabilmesi için birlikte kullanılabilirliği vurgulanacaktır. Çalışma, çeşitli çıkarımların bulunduğu Sonuç bölümüyle son bulacaktır.

BÖLÜM 2. TEMELLERİYLE ESNEK OFDM TEKNİĞİ

2.1. OFDM Tekniği

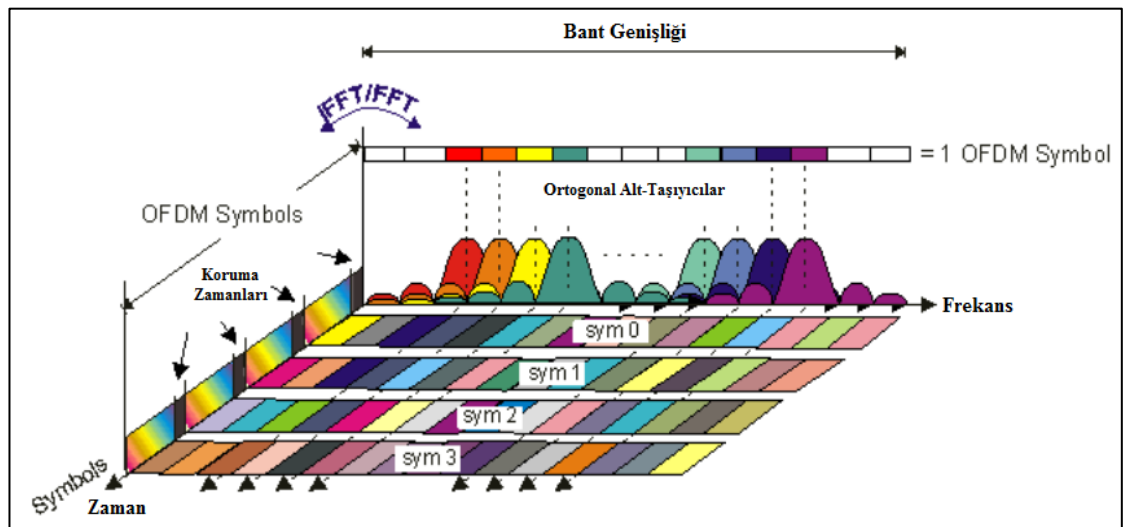
Bir kablosuz haberleşme sisteminde kanal, gönderilen sinyali birçok şekilde etkiler ve bu etkilerin bir sonucu da çok-yollu iletimdir. Çok-yollu iletim, gönderilen bir sinyalin kanal boyunca birçok etkiye uğrayıp alıcıya birden çok yoldan gecikmelerle ulaşmasıyla meydana gelir. Çok-yollu iletime neden olan kanal etkilerinden bazıları Şekil 2.1.'de görülebilir.



Şekil 2.1. Çok-yollu iletime neden olan bazı etkiler: Saçılım, yansıma, kırınım (3.bp.blogspot, TB).

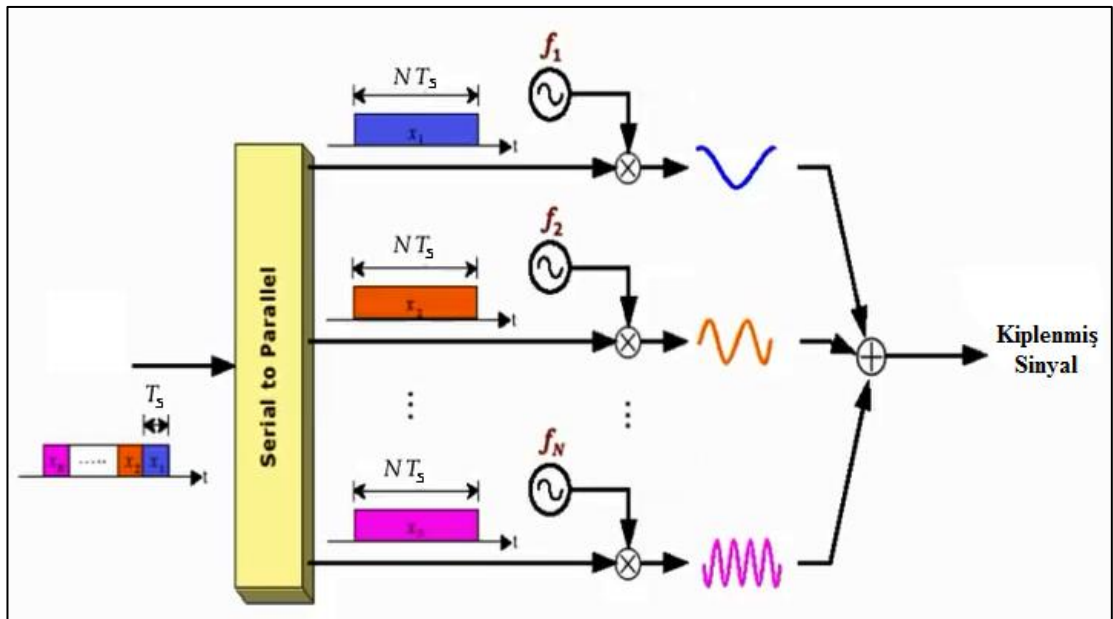
OFDM Tekniği'ni gönderilen sinyali, genişbantlı bir taşıyıcıda göndermek yerine darbantlı, birbirine ortogonal birçok taşıyıcıda göndermek olarak tanımlayabiliriz (Keysight Technologies, TB). Bunun öncelikli nedeni haberleşme kanalının frekans seçiciliği nedeniyle ortaya çıkabilecek verimsiz iletimin önüne geçebilmektir. Şöyle ki, yukarıda geçtiği gibi Şekil 2.1.'de görülen kanal etkileri gönderilen sinyalin

alıcıya birçok yoldan gecikmelerle ulaşmasına neden olur ve bu gecikmeler tedbir alınmadığı takdirde semboller arası girişime neden olur (Şekil 2.5.). Bu girişim de gönderilen sinyalin alıcıya doğru şekilde ulaşmaması anlamına gelir. Bu girişimin önüne geçebilmek için kanalda görülen sinyali etkileyebilecek maksimum gecikme ölçülüp, bu gecikme değeri kadar koruma zamanı (guard time) gönderilen sembollerin arasına eklenir ve gecikmenin ISI'ya neden olmasının önüne geçilir. Tek taşıyıcılı genişbant bir sistemde sembol süreleri koruma zamanına göre küçük olacağından verimsiz bir sistem meydana çıkar. Örneğin, 3,84 MHz bant genişliği olan bir taşıyıcıyla gönderilen sinyalin süresi yaklaşık 0,26 us'dir. Kanal etkileri sonucu ortaya çıkan gecikme yayılımı 4,7 us olarak ölçülürse, gönderilen toplam sinyalin yaklaşık %5'i asıl gönderilmek istenen anlamlı semboller olacaktır ki bu verimsiz bir sistem anlamına gelir. Bu verimsizliğin önüne geçmek çok taşıyıcılı bir sistemle mümkündür. Eğer 3,84 MHz'lik bant genişliğini tek taşıyıcı olarak kullanmak yerine her biri 15 kHz olan 256 adet alt-taşıyıcıyla gönderirsek, her bir sembol yaklaşık 66,7 us olacak ve gönderilen toplam sinyalin yaklaşık %93'ü anlamlı sembollerden oluşacaktır ki bu da tek taşıyıcı kullanımından meydana gelen verimsizliğin aşılması demektir. Frekans düzlemindeki spektral verimliliği sağlamak için ise birbirine ortogonal olan alt-taşıyıcılar seçilir. Böylece, merkezleri arasında bir alt-taşıyıcı genişliği kadar frekans farkı bulunan sinc şeklindeki alt-taşıyıcıların bant-dışı sızıntıları birbirini bastırır ve alt-taşıyıcılar arası girişimin olumsuz etkileri önlenmiş olur. OFDM Sembolleri ve alt-taşıyıcılar Şekil 2.2.'de görülebilir.

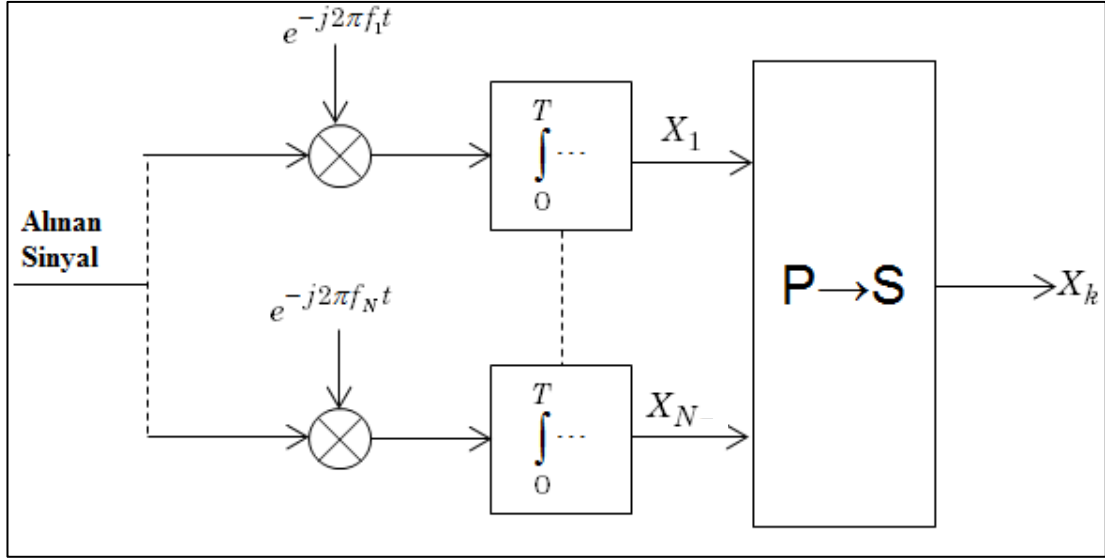


Şekil 2.2. OFDM sembolleri ve alt-taşıyıcılar (Keysight Technologies, TB).

Şekil 2.2.'deki en önemli unsurlardan biri IFFT/FFT ifadesidir. Bilindiği gibi FFT, hızlı Fourier dönüşümü algoritmasını; IFFT de, ters hızlı Fourier dönüşümü algoritmasını temsil eder. Bu sinyal işleme algoritmaları OFDM Tekniği'nin gerçek hayatta kullanımının pratik olmasını sağlamıştır. Eğer bu algoritmalar kullanılmasaydı her bir alt-taşıyıcı için bir osilatör gerekecekti ve bu hem sistem karmaşıklığının hem güç tüketiminin yüksek olması anlamına geleceğinden OFDM Tekniği pratik olmayacaktı. FFT ve IFFT algoritmaları, OFDM Tekniği'nin hızlı bir şekilde uygulanabilmesine vesile olmuştur. Şekil 2.3.'te görülen ve çok taşıyıcı bir haberleşme sisteminin vericisinde gerçekleşen alt-taşıyıcı modülasyonu işlemi, OFDM Tekniği'nin kullanıldığı bir sistemde IFFT yardımıyla gerçekleşir. Şekil 2.4.'te görülen ve çok taşıyıcı bir haberleşme sisteminin alıcısında gerçekleşen alt-taşıyıcı demodülasyonu işlemi, OFDM Tekniği'nin kullanıldığı bir sistemde FFT yardımıyla gerçekleşir.

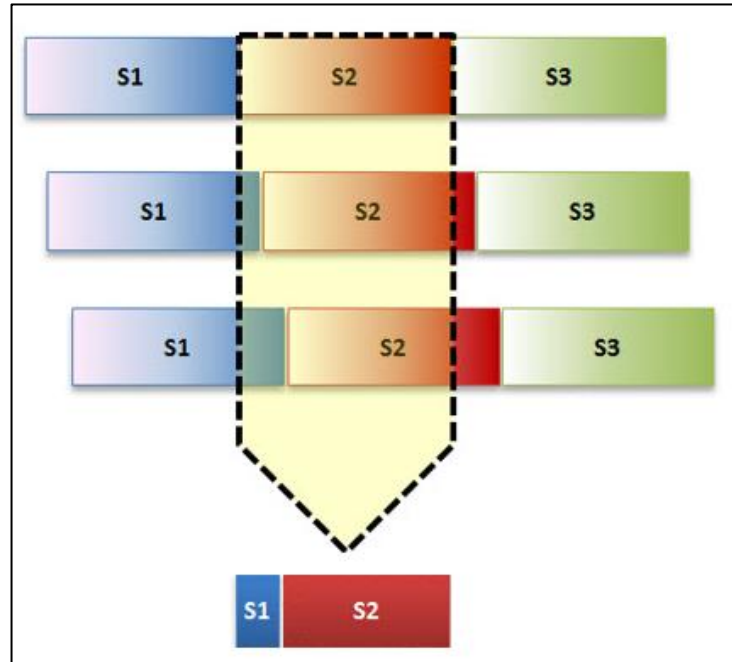


Şekil 2.3. Vericide alt-taşıyıcı modülasyonu (Khattab, 2014).

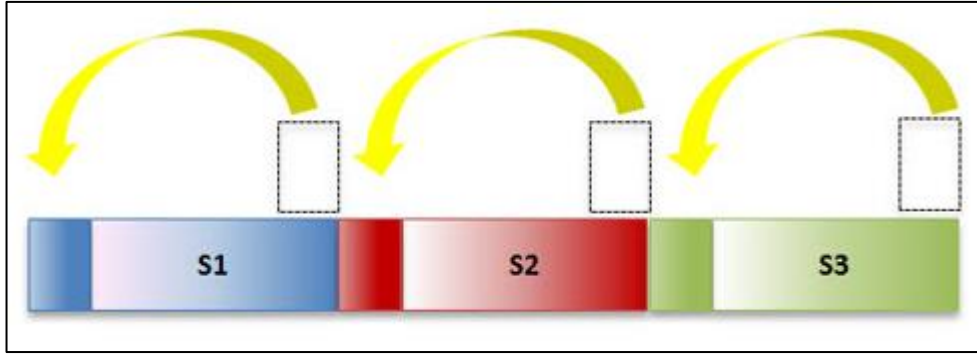


Şekil 2.4. Alıcıda alt-taşıyıcı demodülasyonu (MathWorks, TB).

OFDM Tekniği'nin önemli unsurlarından biri de koruma zamanları olarak kullanılan döngüsel öneklerdir (cyclic prefix). Daha önce de bahsedildiği gibi ISI'yı önlemek için koruma zamanları kullanılır ve döngüsel önekler bu koruma zamanlarını daha anlamlı hale getirir. Şekil 2.6.'da görüldüğü gibi döngüsel önek, gönderilen sembollerin son kısımlarından bir parçanın baş kısımlarına eklenmesiyle oluşur.



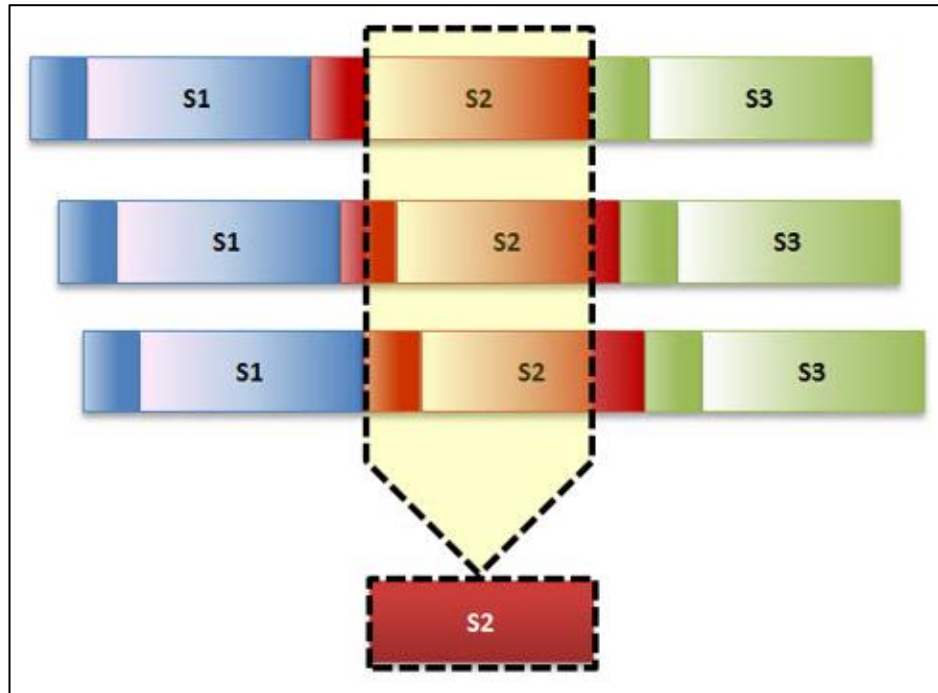
Şekil 2.5. Birden fazla yoldan gelen sinyalde ISI etkisi (telecomHall, 2014).



Şekil 2.6. Sembollerin başına döngüsel önek eklenmesi (telecomHall, 2014).

Döngüsel önekin aynı zaman aralığında daha az sembol gönderme dezavantajının yanında 2 çok önemli faydası vardır (Teletopix.org, 2012; telecomHall, 2014; DSP Illustrations, TB):

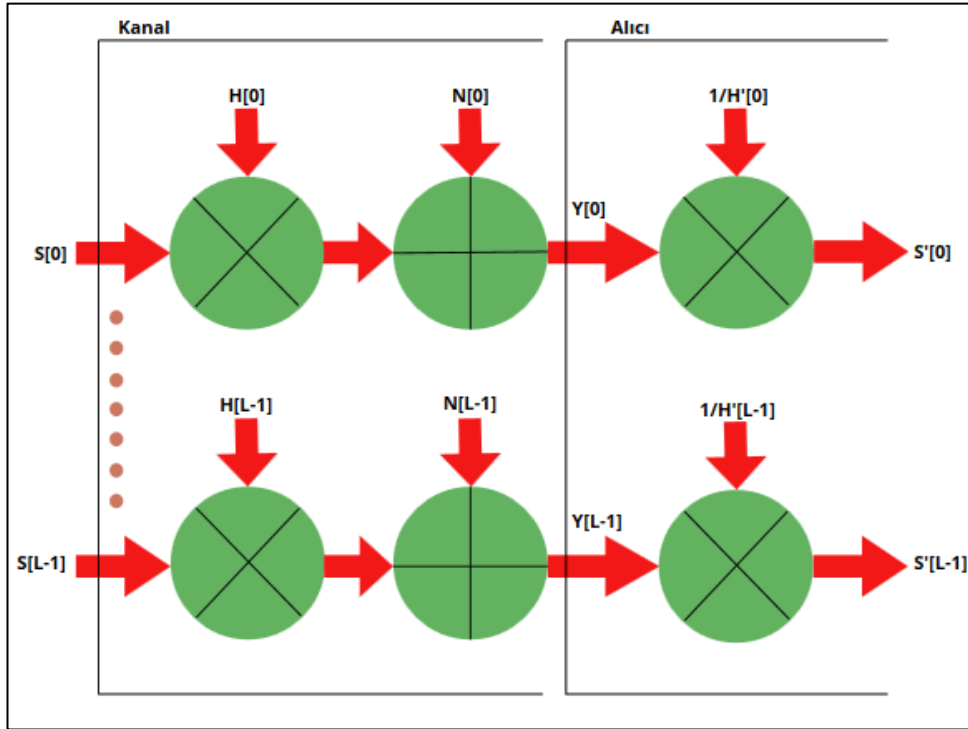
1. Koruma zamanı görevi görerek Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi ISI'nın önüne geçmesi.
2. Doğrusal konvolüsyonu dairesel konvolüsyona çevirmesi ve böylece tek-tap denkleştirmenin (single-tap equalization) mümkün hale gelmesi. (Bu faydanın detayları bölüm 2.1.1.'de anlatılmıştır.)



Şekil 2.7. Döngüsel önekin ISI'yı önlemesi (telecomHall, 2014).

2.1.1. Tek-tap denkleştirme

Önceki bölümde, döngüsel öneğin 2 önemli faydasından birinin, doğrusal konvolüsyonu dairesel konvolüsyona çevirmesi ve böylece tek-tap denkleştirmenin mümkün hale gelmesi olduğu söylenmişti. Bu faydayı anlamının doğru yöntemi Şekil 2.8.'deki OFDM iletiminin frekans düzlemindeki görüntüsüne bakmaktır (Dahlman ve ark., 2014).



Şekil 2.8. Frekans düzleminde OFDM sembollerinin iletimi

Şekil 2.8.'de, ayrık zaman uzayında, L alt-taşıyıcıya sahip bir OFDM dalga şekli (döngüsel önek dışındaki OFDM Sembölü) üzerindeki kanal etkisi ve alıcıda gerçekleştirilen tek-tap denkleştirme görülmektedir. Şekil, toplanır gürültü (N) ihmal edilerek matematiksel olarak anlatılırsa (DSP Illustrations, TB):

Öncelikle zaman düzleminde, alınan OFDM dalga şekli ile gönderilen OFDM dalga şekli arasındaki denklem yazılacak olursa (Yeterli miktarda döngüsel önek olduğu için dairesel konvolüsyon söz konusudur):

$$y[n] = h[n] * s[n] = \sum_{n'=0}^{L-1} h[n'] s[(n - n')_L] \quad (2.1)$$

Bu denklemde: $y[n]$ = alınan dalga şekli, $h[n]$ = kanal impuls cevabı, $s[n]$ = gönderilen dalga şekli, L = alt-taşıyıcı sayısı ($s[(n - n')_L]$ ifadesi, dalga şeklinin periyodik ve konvolüsyonun dairesel olduğunu belirtmek için kullanılır).

Bilindiği gibi Konvolüsyon Teoremi, Ayrık Fourier Dönüşümü (DFT) söz konusu olduğunda yalnızca dairesel konvolüsyon mevcutsa doğru olur (DSP Illustrations, TB) ve bu yüzden döngüsel önekin daha önce bahsi geçen 2. faydası çok önemlidir. Denklem 2.1'de DFT alındığında, Denklem 2.3'e ulaşılır:

$$DFT\{y[n]\} = DFT\{h[n] * s[n]\} \quad (2.2)$$

$$Y[k] = H[k]S[k] \quad (2.3)$$

Gönderilen sinyale ulaşmak için öncelikle her bir alt-taşıyıcıya etki eden kanal taplerinin ($H[k]$) kestirimi yapılması gerekir. (Bu gönderilen sinyalin içine eklenen referans semboller yardımıyla yapılabilir (Dahlman ve ark., 2014)). Daha sonra gönderilen OFDM dalga şeklinin frekans düzlemindeki haline ulaşmak için basit bir bölme işlemiyle denkleştirme yapılabilir. İşlemler sonucunda elde edilen dalga şeklinin gönderilen şekle olabildiğince yakın olması kanal kestiriminin başarısına bağlıdır. Denklem 2.4'te tek-tap denkleştirme işlemi görülmektedir:

$$S'[k] = Y[k]/H'[k] \quad (2.4)$$

$H'[k]$ = kestirilen kanal tapleri, $S'[k]$ = denkleştirme sonucu ulaşılan, frekans düzlemindeki dalga şekli.

Tek-tap denkleştirme işlemi basitliğiyle, OFDM Tekniği'nin pratik olmasını sağlayan en önemli sebeplerden biridir.

2.1.2. OFDM tekniğinin avantajları ve dezavantajları

OFDM Tekniği'nin avantajları ve dezavantajları Tablo 2.1.'de görülebilir:

Tablo 2.1. OFDM tekniğinin avantajları ve dezavantajları	
Avantajlar	Dezavantajlar
+ Uygulamada kolaylık (IFFT/FFT ve Tek Tap Denkleştirme katkısı)	- Yüksek Tepe Güç/Ortalama Güç Oranı (PAPR)
+ Gecikme Yayılımı'na karşı yüksek direnç (Döngüsel önek katkısı)	- Doppler Kaymaları'na karşı yüksek hassasiyet (Sinc şeklindeki alt-taşıyıcılardan dolayı yüksek band-dışı sızıntı olasılığının meydan getirdiği önemli girişim tehdidi ve katı ortogonalite şartı)
+ Görece yüksek spektral verimlilik (Örtüşen alt-taşıyıcıların katkısı)	- Faz Gürültüsü'ne (Phase Noise) karşı düşük direnç (Zaidi ve ark., 2016b)
+ Önceki sistemlerle uyumluluk (4G'de de kullanılmış olması)	- Katı senkronizasyon ihtiyacından dolayı ek sinyal kullanımı (Zhang ve ark., 2015)
+ Esneklik olanakları (bkz. Bölüm 2.2.)	

2.1.2.1. PAPR

PAPR bir OFDM Sembolünde, maksimum güce sahip olan örneğin gücünün sembolün ortalama gücüne oranı olarak tanımlanır ve matematiksel gösterimi şu şekildedir:

$$PAPR = \frac{\max[x(t)\text{conj}[x(t)]]}{E[x(t)\text{conj}[x(t)]]} \quad (2.1)$$

Bu formülde: $x(t)$ gönderilen sinyali, $\max[]$ maksimum değer operatörünü, $\text{conj}[]$ karmaşık eşlenik operatörünü, $E[]$ beklenen değer operatörünü temsil eder.

Bir OFDM Sistemi'nde bağımsız olarak modüle edilen çok sayıda alt-taşıyıcı olması ve faz farklarından dolayı bu alt-taşıyıcıların maksimum değerlerinin birbirine eklenip yüksek bir örnek gücü oluşturabilmesi yüksek PAPR tehdidi oluşturur. Eğer önlem alınmazsa, bu yüksek PAPR ortaya çıkar ve bu durum sistemdeki güç

yükselteçlerinin lineer olmayan bölgelerde çalışmasına neden olabilir. Böylece, sinyalde bozulmalar meydana gelir ve sistem verimliliği düşer. Bu durumu önlemek için PAPR azaltma yöntemleri geliştirilmiştir.

PAPR ve azaltma yöntemleri konusunda daha detaylı bilgi için Gangwar ve Bhardwaj'ın makalesi (2012) incelenebilir.

2.1.2.2. Faz gürültüsü

Faz gürültüsü, yerel osilatörlerin kararsızlığı nedeniyle ortaya çıkan, bir sinyalin fazındaki, kısa süreli, hızlı, rastgele dalgalanmaların frekans düzlemindeki görüntüsüdür (Zou ve ark., 2007; Bliley Technologies, 2016).

Faz gürültüsünün ortaya çıkardığı bozulmalar iki başlıkta incelenir (Zou ve ark., 2007):

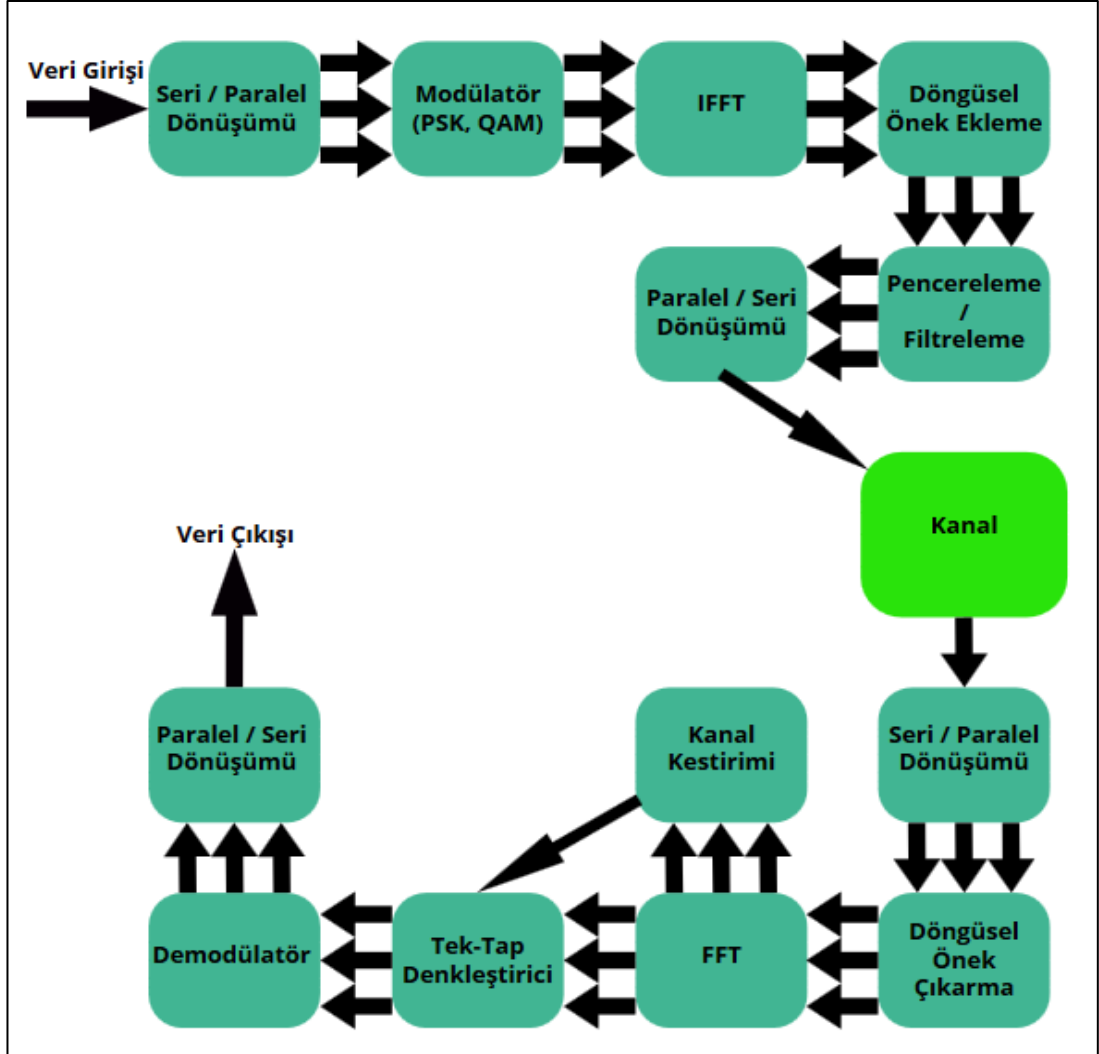
1. CPE (Ortak Faz Hatası): Kompleks düzlemdeki bütün konstelasyon noktalarının ortak kaymalarını ifade eder.
2. ICI (Taşıyıcılar Arası Girişim): Alt-taşıyıcılar üzerinde toplanır Gauss Gürültüsü gibi bir etkiye sahiptir.

OFDM Tekniği'nde iletim birçok alt-taşıyıcıyla gerçekleştiği için faz gürültüsü önemli bir sorundur ve bu sorunun oluşturduğu etkileri bulup düzeltmek için özel yöntemler geliştirilmiştir.

Faz Gürültüsü ve dengeleme yöntemleri konusunda daha detaylı bilgi için Zou ve ark.'ın makalesi (2007) incelenebilir.

2.1.3. OFDM verici ve alıcı blok diyagramı

Tabanbantta, temel unsurlarıyla OFDM verici ve alıcı blok diyagramı Şekil 2.9.'da görülebilir.



Şekil 2.9 Tabanbantta OFDM verici ve alıcı blok diyagramı

2.2. Esnek OFDM Tekniği

5G Haberleşme Sistemleri'nde, düşük frekans bantlarında temel dalga şekli teknolojisi olması planlanan Esnek OFDM Tekniği, OFDM Tekniği'nin üzerine bina edilmiştir. Bu yeni teknik, OFDM dalga şekli parametrelerinin belirli zaman

aralıklarında ortam şartlarına ve uygulama gereksinimlerine göre değiştirildiği bir şema sunar. Bilindiği gibi, OFDM dalga şeklinin değiştirilebilecek 4 temel parametresi vardır:

1. Alt-taşıyıcı sayısı
2. Alt-taşıyıcı frekans farkı
3. Döngüsel önek oranı
4. Filtreleme/pencereleme

Bu parametrelerin değişiminin bazı etkileri Tablo 2.2.'de verilmiştir:

Tablo 2.2. OFDM parametreleri ve değişimlerinin bazı etkileri	
OFDM parametreleri	Bazı değişim etkileri (+ işareti pozitif etkiyi, – işareti negatif etkiyi, * işareti duruma göre değişen etkiyi temsil eder.)
Alt-taşıyıcı sayısı (artarsa)	+ Sabit alt-taşıyıcı frekans farkı kabul edilirse, bant genişliği dolayısıyla veri hızı artar. - Tepe Güç/Ortalama Güç Oranı (PAPR) artar. Bu da güç yükseltecinin veriminin, ADC ve DAC'nin Sinyalin Nicemleme Gürültüsüne Oranı'nın (SQNR) düşmesine neden olur. (Nutaq, TB)
Alt-taşıyıcı frekans farkı (artarsa)	* OFDM Sembol süresi azalır. + Doppler Yayılımı'na (Doppler Spread) karşı direnç artar. + İletim gecikmesi azalır. + Faz Gürültüsü azalır. (Ankaralı ve ark., 2017) - Gecikme Yayılımı'na (Delay Spread) karşı direnç azalır. - Sabit önek uzunluğu için, spektral verim azalır.
Döngüsel önek oranı (artarsa)	+ Gecikme Yayılımı'na karşı direnç artar. + Bit Hata Oranı (BER) azalır. - Spektral verim düşer. - İletim gecikmesi artar. - Sinyal güvenliği azalır. + Not: Uzun önekten senkronizasyon, kanal kestirimi gibi bazı alıcı işlemleri için faydalanılabilir.
Filtreleme/Pencereleme	* Çok çeşitli türleri ve etkileri vardır. Örnek olarak: + Komşu Kanal Girişimi'ni (Adjacent Channel Interference) azaltmak için vericide pencereleme uygulanabilir. (Elkourdi ve ark., 2016) + Numerolojiler arası girişimi (INI) azaltmak için vericide veya alıcıda pencereleme kullanılabilir. (Zaidi ve ark., 2016a)

Bu parametrelerin esnek olarak kullanımının çok faydalı olacağını düşünüldüğü, 5G Haberleşme Sistemleri'yle daha fazla gündeme gelen birkaç gereksinim ve durum örneği şunlardır (ITU-R, 2015; Agiwal ve ark., 2016):

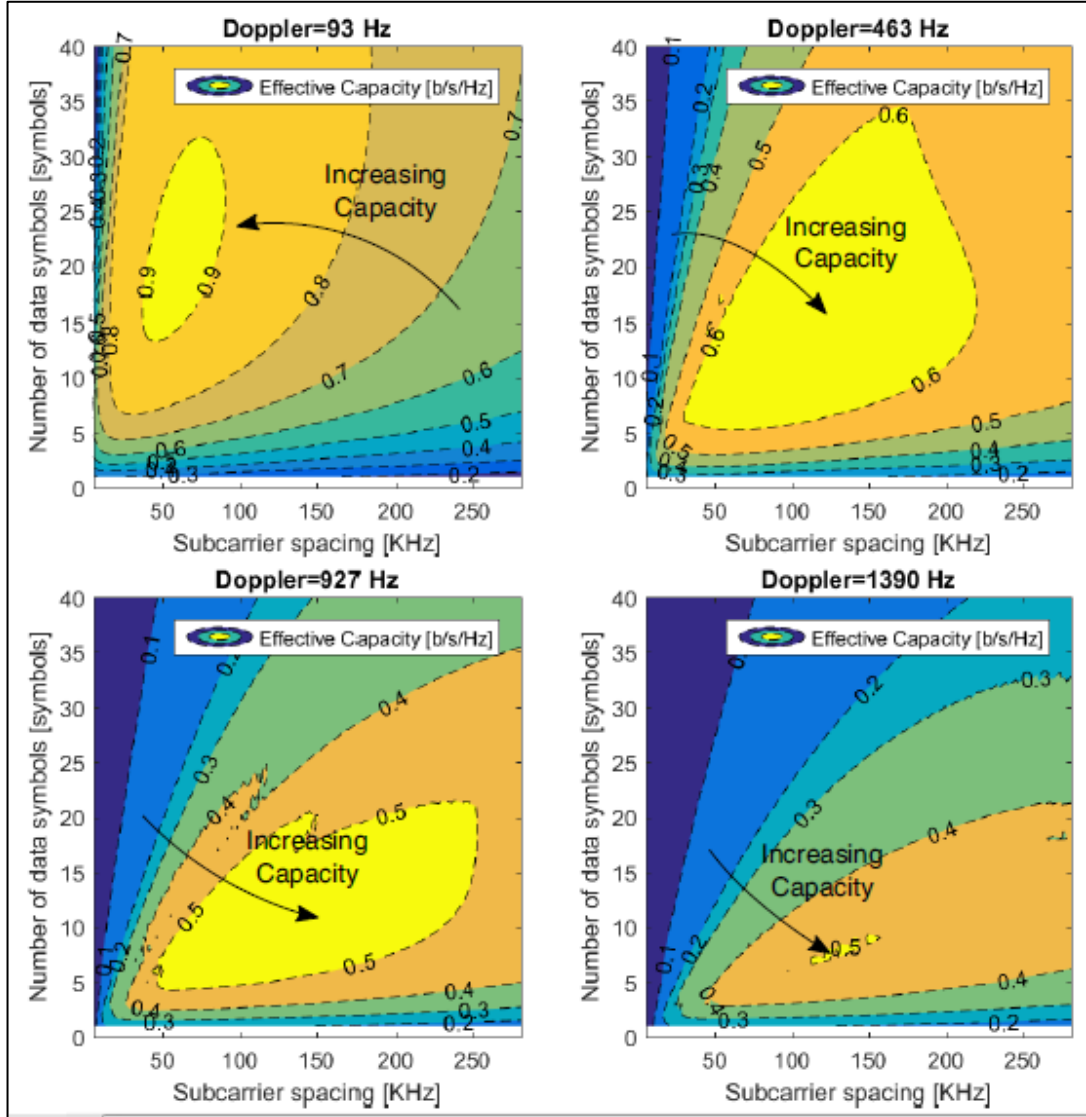
1. Çok yüksek tepe veri hızı gereksinimi (ör. 10 Gbps)
2. Çok fazla sayıda bağlantıdaki kullanıcı ekipmanı durumu (ör. km başına 10^6 cihaz)
3. Çok düşük iletim gecikmesi gereksinimi (1 ms'nin altında)
4. Çok yüksek alan trafik kapasitesi gereksinimi (10 Mbit/s/m²)
5. Çok yüksek mobilite durumu (500 km/h)
6. Çok yüksek güvenilirlik gereksinimi (%99.999 başarılı paket iletimi)
7. Çok daha yüksek enerji verimliliği ve spektral verim gereksinimi

Bu parametlerin nasıl kullanılabilceğine iki örnek verelim:

1. Yüksek mobilitenin (dolayısıyla yüksek Doppler Yayılımı'nın) olduğu ve yüksek güvenliğin istendiği bir durum için alt-taşıyıcı frekans farkı olabildiğince büyük, başka tedbirlerin alınmadığı varsayımıyla önek oranı da olabildiğince küçük olmalıdır.
2. Yüksek Gecikme Yayılımı'nın olduğu ve yüksek spektral verimin istendiği bir durum için alt-taşıyıcı frekans farkı olabildiğince küçük (bir başka deyişle OFDM Sembol süresi olabildiğince büyük) olmalı, önek oranı da Yüksek Gecikme Yayılımı'na karşı direnci arttırdığı ama spektral verimi azalttığı için iki etki de gözetilerek optimize edilmelidir.

Verilen örneklerdeki gibi OFDM parametrelerinin belirli hedef(ler) için optimizasyonu Esnek OFDM Tekniği'nin temel yöntemidir. Bu konuda çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin, Ibrahim ve Xu (2016) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek Etkin Kapasite değerlerine (birim: b/s/Hz) ulaşmak hedefiyle farklı Doppler Kaymaları'nın (frekansta kaymaların) olduğu durumlarda Veri Sembolü Sayısı (dolayısıyla alt-taşıyıcı sayısı) ve Alt-Taşıyıcı Frekans Farkı'nın birlikte optimizasyonu için yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Bu sonuçları Şekil

2.1.'de görebiliriz. Tablo 2.1.'de verilen bilgilere uygun olarak Şekil 2.1.'deki grafiklerde de Doppler Kayması arttıkça yüksek Etkin Kapasite değerlerine ulaşmak için Alt-Taşıyıcı Frekans Farkı'nın artırılması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2.10. Farklı doppler kaymaları için alt-taşıyıcı frekans farkı (x-ekseni) ve veri sembolü sayısına (y-ekseni) göre etkin kapasite değişimi grafiği (İbrahim ve Xu, 2016).

Yukarıdaki gibi çalışmalarla birçok kanal durumu ve gereksinim için OFDM dalga şekli parametrelerinin optimizasyonu yapılmaktadır. Bu parametrelerin sağladığı esneklik 5G ve Ötesi Haberleşme Sistemleri için çok önemlidir çünkü zaman geçtikçe artan uygulamalarla ortaya çıkan yeni gereksinimlerin karşılanması Esnek OFDM Tekniği gibi esnek tekniklerle mümkün görünmektedir.

BÖLÜM 3. ÇİFT SAÇILIMLI KANAL ÜZERİNDE ESNEK OFDM BENZETİMİ

3.1. Çift Saçılımlı Kanal Matematiği

Kablosuz haberleşme kanallarının birçok çeşidi vardır ve bu kanalların modellenmesi için çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu kanallardan biri de çift saçılımlı kanal (doubly dispersive channel) olarak adlandırılır. Bu kanalda hem zaman düzleminde hem de frekans düzleminde saçılım söz konusudur ve matematiksel açıdan analizi diğer kanallara göre daha zordur.

DD Kanalin analizini yaparken zamandaki saçılım olan gecikmelerin sinyal bileşenlerinin gücüne etkisi Güç Gecikme Profili (Power Delay Profile) ile tanımlanır. Bu çalışmada kullanılan kanalın PDP denklemi konuyla ilgili yapılan birçok çalışmada kullanılan (Ayadi ve ark., 2007; Ayadi ve ark., 2013) şu denklemdir (Denklem 3.1):

$$S_H(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_\tau} \exp\left(-\frac{\tau}{\sigma_\tau}\right), & \tau \geq 0 \\ 0, & \tau < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

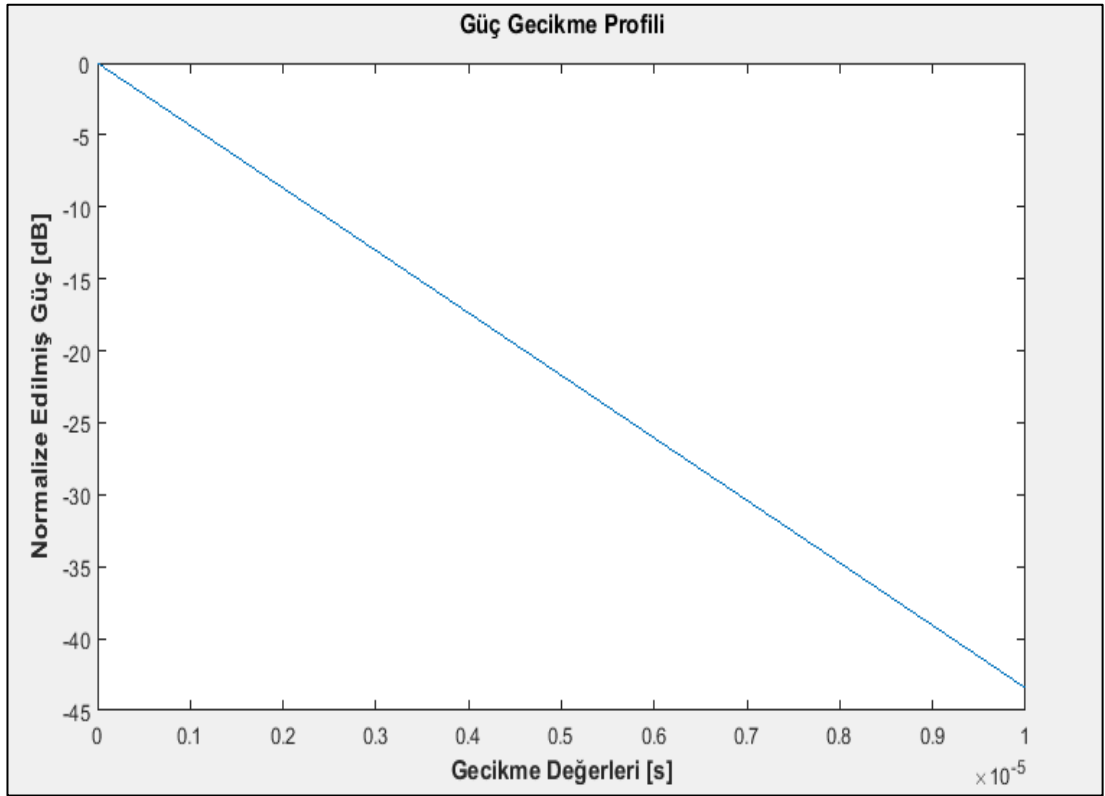
Bu denklemde σ_τ ifadesi karekök ortalama (root mean square) gecikme yayılımını ve τ 'da geciken sinyal bileşenlerinin gecikme değerlerini ifade eder. PDP her bir geciken sinyal bileşeninin gecikme değerine göre sahip olduğu gücü verir. Bu denklemde gecikmenin, gücü üssel şekilde azalttığı görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan PDP grafiği için Şekil 3.1.'e bakılabilir.

PDP'ye benzer olarak, DD Kanalin analizinde kullanılan bir diğer denklem olan Doppler Yayılım Profili (DP), Doppler Kaymaları'nın sinyal bileşenlerinin gücüne

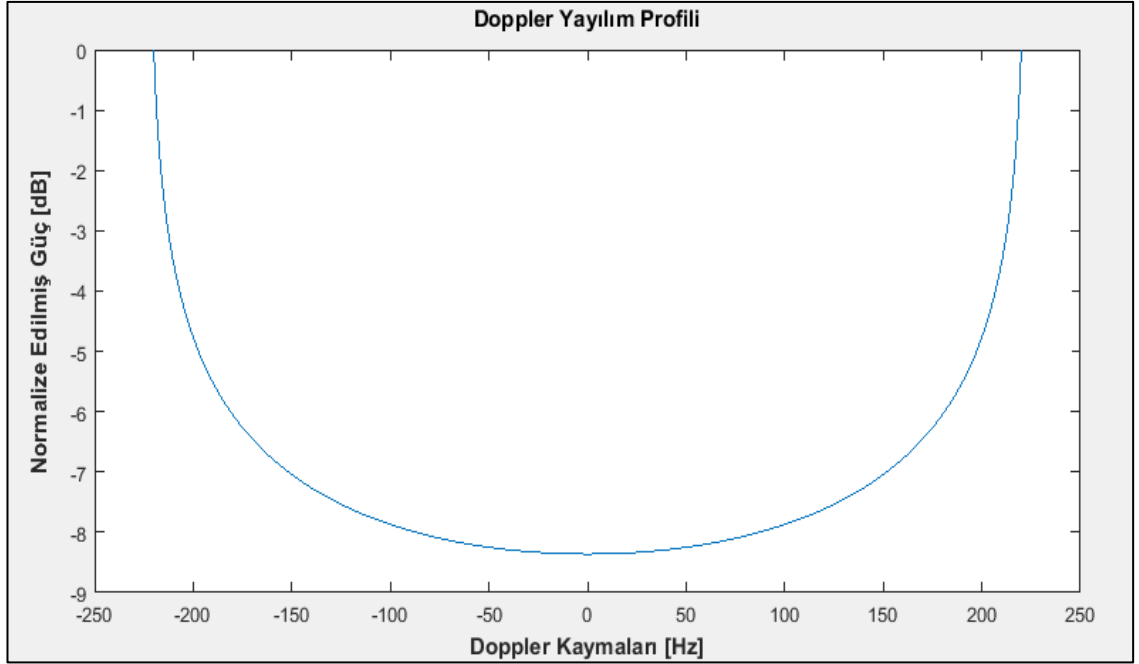
etkisini verir. Bu çalışmada kullanılan kanalın DP denklemini Klasik Doppler Spektrumu olarak bilinen modeldir (Denklem 3.2):

$$S_H(v) = \begin{cases} \frac{1}{\pi v_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{v}{v_{\max}}\right)^2}}, & -v_{\max} \leq v \leq v_{\max} \\ 0, & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (3.2)$$

Bu denklemde v_{\max} ifadesi maksimum Doppler Kayması'nı, v ifadesi ise sinyal bileşenlerinin Doppler Kaymaları'nı ifade eder. Bu çalışmada kullanılan DP grafiği için Şekil 3.2.'ye bakılabilir.



Şekil 3.1. Güç gecikme profili ($\sigma_{\tau} = 10^{-6}$ s için)



Şekil 3.2. Doppler yayılım profili ($v_{\max} \approx 222$ Hz için)

DD Kanalın modellenmesi için Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'nin birlikte ifade edildiği, kanal saçılım denklemi olarak adlandırılan 3. bir denklem devreye girer ve kanaldan geçtikten sonra elde edilen sinyaller toplamının matematiksel gösteriminde (Denklem 3.4) bu denklem kullanılır:

$$S_H(\tau, \nu) = \begin{cases} \frac{\exp\left(-\frac{\tau}{\sigma_\tau}\right)}{\sigma_\tau \pi \nu_{\max} \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_{\max}}\right)^2}}, & 0 \leq \tau \text{ ve } -\nu_{\max} \leq \nu \leq \nu_{\max} \\ 0, & \text{diğer yerlerde} \end{cases} \quad (3.3)$$

Alınan sinyalin matematiksel gösterimi şöyledir (Denklem 3.4) (Matz, 2006):

$$y(t) = \iint S_H(\tau, \nu) x_{\tau, \nu}(t) d\tau d\nu \quad (3.4)$$

Bu denklemdeki $x_{\tau, \nu}(t) = x(t - \tau)e^{j2\pi\nu t}$ ifadesi gönderilen sinyalin zamanda gecikmeye uğramış, frekansta kaymış bir bileşenini temsil etmektedir.

3.2. Çift Saçılımlı Kanal Üzerinde Esnek OFDM Parametrelerinin Optimizasyonu için Benzetim

Bir önceki bölümde matematiği aktarılan çift saçılımlı kanal üzerinde Esnek OFDM Tekniği'nin nasıl kullanılabileceği, bu bölümde benzetim yardımıyla gösterilmeye çalışıldı. Benzetim MATLAB programıyla gerçekleştirildi.

Bu benzetimde amaç, farklı çift saçılımlı kanal şartlarına (farklı gecikme yayılımı, farklı Doppler Yayılımı) göre temel OFDM parametrelerini Sinyal-Girişim Oranı'nı (SIR) maksimize etmek için optimize etmektir. Bu çalışmada optimize edilen parametreler alt-taşıyıcı frekans farkı ve döngüsel önek uzunluğudur.

Tablo 3.1. Örneklerdeki temel benzetim parametreleri

Parametre ismi	Parametre değeri
FFT uzunluğu	256
İletilen bit sayısı	256000
Modülasyon	QPSK
Temel örnekleme frekansı	3.84 MHz

Temel parametreleri Tablo 3.1.'da verilen benzetimde, Şekil 2.9.'daki temel OFDM verici ve alıcı blokları mevcuttur. Benzetimde, QPSK tekniği ile modüle edilip gönderilen veri bitlerinin farklı kanallar üzerinden geçmesi sonucu oluşan girişimin haberleşme üzerindeki etkisi SIR değeri üzerinden verilmiş ve bu SIR'ın Esnek OFDM Tekniği'nden yararlanılarak nasıl maksimize edilebileceği gösterilmiştir. Benzetimde amaç SIR değerini maksimize etmek olduğu için kanal gürültüsü ihmal edilmiştir. DD Kanal kullanılarak elde edilen sonuçlardan önce, benzetimin daha iyi anlaşılabilmesi için Doppler kaymasının olmadığı, analizi daha kolay olan kanallar kullanılarak elde edilen sonuçlara da yer verilmiştir.

3.2.1. Benzetimden sonuçlar

3.2.1.1. Zamanda gecikmenin ve frekansta kaymanın olmadığı durum:

Benzetimde kanal gürültüsü ihmal edildiğinden ve bu durumda girişim olmayacağından SIR değeri pratik olmayan bir şekilde sonsuza gider ve sinyal hatasız olarak iletilmiş olur:

$$\text{SIR} \rightarrow \infty$$

$$\text{BER} = 0$$

3.2.1.2. Zamanda gecikmenin olduğu ve frekansta kaymanın olmadığı durum

$$(\sigma_{\tau} = 10^{-6} \text{ s}):$$

1. Zamanda gecikmenin EPA (Genişletilmiş Yaya A) Gecikme Profili'ndeki (3GPP, 2017) gibi (7 sinyal bileşeninden 6'sı alıcıya gecikmeli ulaşır) olduğu durum:

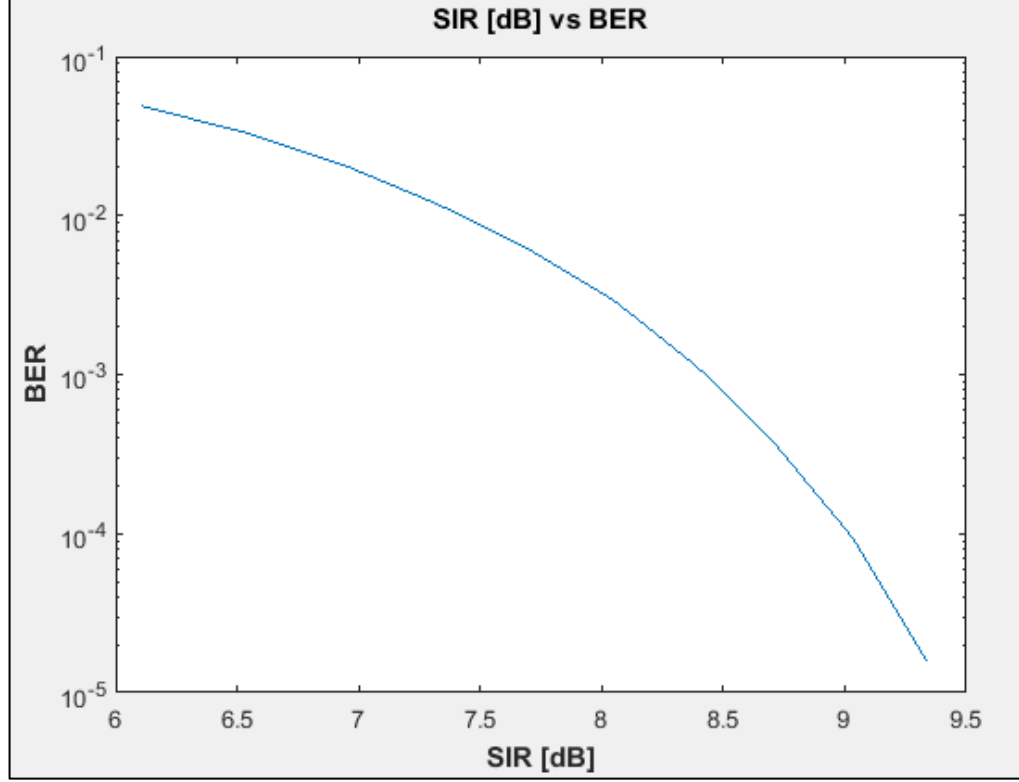
Tablo 3.2. Sinyal bileşenlerinin gecikme ve normalize edilmiş güç değerleri 1

Gecikme değerleri	\approx Normalize edilmiş güç değerleri
[us]	[dB]
0	0
1,80	-7,82
1,90	-8,25
2,00	-8,69
2,10	-9,12
2,20	-9,55
2,30	-9,99

Tablo 3.3. Temel parametre değerleri ve karşılık gelen SIR değerleri 1

Alt-taşıyıcı frekans farkı [kHz]	Döngüsel önek uzunluğu [us]	\approx SIR [dB]
15	0	6,111
15	1	6,117
15	2	8,946
15	2,3	9,122

Bilindiği gibi SIR'ı arttırmak için çeşitli teknikler uygulanabilir. Bu durumda SIR'a göre BER grafiği çıkarılabilir. Bu grafik farklı kanal durumları için farklı olur. Örneğin, bu örnekteki kanal durumu için SIR'a göre BER grafiği Şekil 3.1.'daki gibidir:



Şekil 3.3. SIR'a göre BER grafiği 1 (Döngüsel önek uzunluğu = 0)

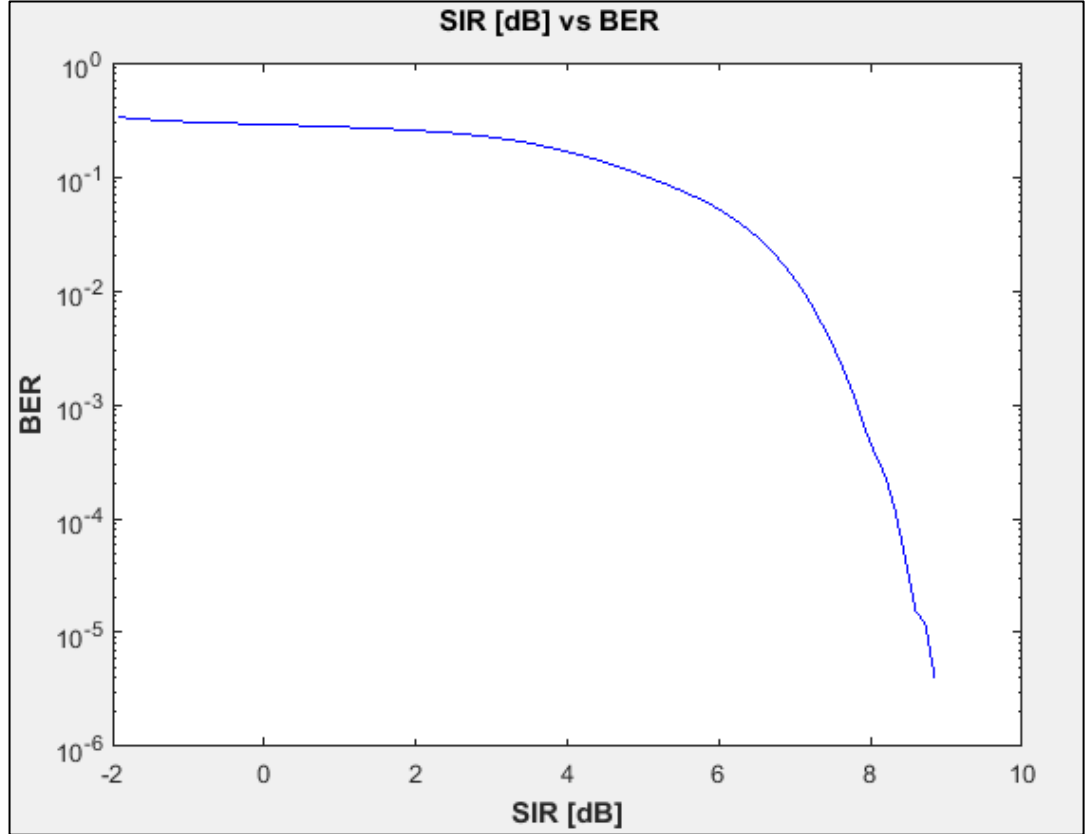
2. Bir önceki durumda gecikme değerleri azaltılırsa (Bileşenlerin güç değerleri arttırılırsa):

Tablo 3.4. Sinyal bileşenlerinin gecikme ve normalize edilmiş güç değerleri 2

Gecikme değerleri [us]	≈ Normalize edilmiş güç değerleri [dB]
0	0
0,80	-3,47
0,90	-3,91
1,00	-4,34
1,10	-4,78
1,20	-5,21
1,30	-5,65

Tablo 3.5. Temel parametre değerleri ve karşılık gelen SIR değerleri 2

Alt-taşıyıcı frekans farkı [kHz]	Döngüsel önek uzunluğu [us]	≈ SIR [dB]
15	0	-1,907
15	1	0,259
15	1,3	1,096



Şekil 3.4. SIR'a göre BER grafiği 2 (Döngüsel önek uzunluğu = 0)

3. Zamanda gecikmenin ETU (Genişletilmiş Tipik Kentsel) Gecikme Profili'ndeki (3GPP, 2017) gibi (10 sinyal bileşeninden 9'u alıcıya gecikmeli ulaşır) olduğu durum:

Tablo 3.6. Sinyal bileşenlerinin gecikme ve normalize edilmiş güç değerleri 3

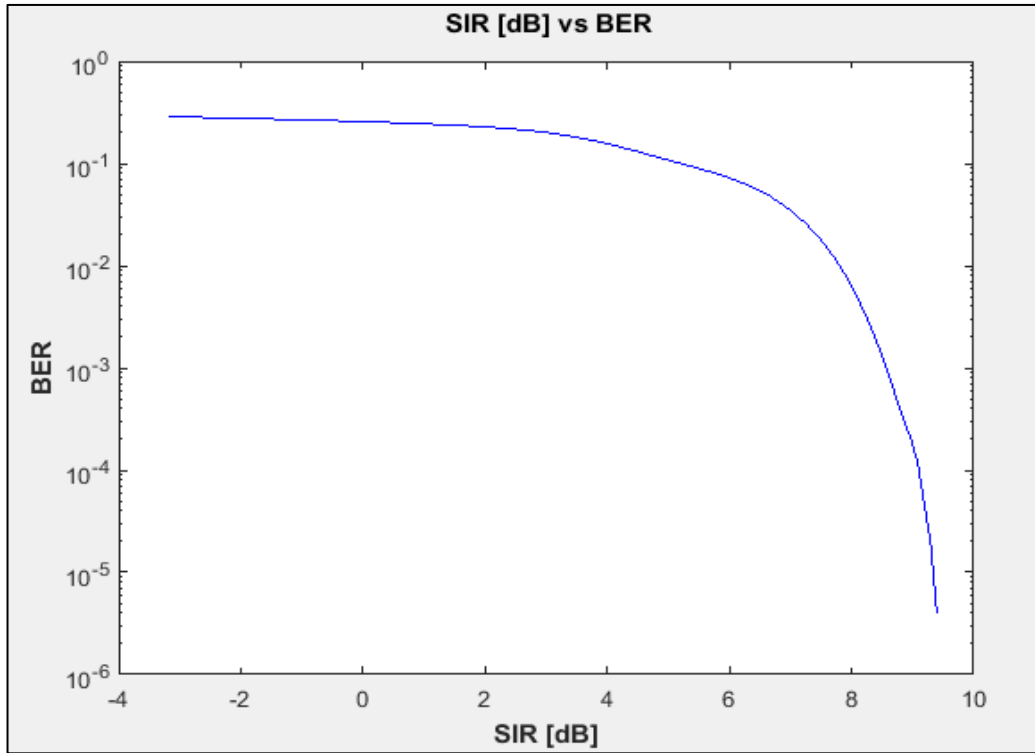
Gecikme değerleri [us]	≈ Normalize edilmiş güç değerleri [dB]
0	0
0,80	-3,47

Tablo 3.6. (devamı)

Gecikme değerleri [us]	≈ Normalize edilmiş güç değerleri [dB]
0,90	-3,91
1,00	-4,34
1,10	-4,78
1,20	-5,21
1,30	-5,65
1,40	-6,08
1,50	-6,51
1,60	-6,95

Tablo 3.7. Temel parametre değerleri ve karşılık gelen SIR değerleri 3

Alt-taşıyıcı frekans farkı [kHz]	Döngüsel önek uzunluğu [us]	≈ SIR [dB]
15	0	-3,171
15	1	-1,663
15	1,3	-0,532
15	1,6	-0,168



Şekil 3.5. SIR'a göre BER grafiği 3 (Döngüsel Önek Uzunluğu = 0)

Verilen 3 durumla (1., 2., 3.) ile ilgili değerlendirme:

1. Döngüsel önek uzunluğunun maksimum gecikme kadar olduğu durumda SIR maksimize edildi (bkz. Tablo 3.3., 3.5., 3.7.).
2. 2. durumda 1. durumuna göre geciken bileşenlerin gücü arttı ve bu girişimin çoğalmasına, SIR değerinin azalmasına neden oldu (bkz. Tablo 3.2. ve 3.4.).
3. 3. durumda bileşen sayısı arttı ve bu girişim çoğalıp SIR değerinin azalmasına neden oldu (bkz. Tablo 3.4. ve 3.6.)

3.2.1.3. Zamanda gecikmenin ve frekansta kaymanın olduğu durum ($\sigma_\tau = 50 \cdot 10^{-9}$ s, $v_{\max} \approx 222$ Hz, Döngüsel önek uzunluğu = Maksimum gecikme):

Bu durumla ilgili sonuçları vermeden önce Doppler Kayması'yla ilgili biraz bilgi vermek yerinde olacaktır:

Bilindiği gibi Doppler Kayması, alıcı ve vericinin birbirine göre hareketli olduğu durumda ortaya çıkar ve formülü şöyledir (Doğan, 2009):

$$f_D = f_0 \frac{v_k}{c} \cos \theta \quad (3.5)$$

Bu formülde f_D frekans kaymasını, f_0 taşıyıcı frekansını, v_k alıcı ve vericinin birbirine göre hızını (yaklaşıyorlarsa pozitif, uzaklaşıyorlarsa negatif), c ışık hızını ve θ iletilen sinyalin alıcıya geliş açısını gösterir.

İletilen sinyalin Doppler Kayması'na uğradığı durumlarda, Uyumluluk Zamanı (Coherence Time) kavramı ortaya çıkar. Bu kavram, kanal impuls cevabının sabit kaldığı veya yüksek ilişkiye sahip olduğu süreyi tanımlar (Doğan, 2009). Uyumluluk Zamanı için farklı tanımlamalar mevcuttur (National Instruments, 2013): $0,179/v_{\max}$, $0,250/v_{\max}$, $0,423/v_{\max}$, $1/v_{\max}$. Burada v_{\max} ifadesi maksimum Doppler Kayması'nı temsil eder.

Bundan sonra verilecek olan simülasyon sonuçlarında SIR maksimizasyonu için dögüsel önek uzunluğu ve alt-taşıyıcı frekans farkı 2 koşula göre optimize edilmiştir. Bunlar:

1. Dögüsel önek uzunluğu, gecikme yayılımı kadar olmalıdır.
2. Alt-taşıyıcı frekans farkı, sembol süresi Uyumluluk Zamanı'ndan küçük olacak şekilde seçilmelidir. (Alt-taşıyıcı frekans farkı geçmişte kullanılan sistemlerle uyumluluğu sağlamak için bu çalışmada 15 kHz ve katları olarak seçilmiştir.)

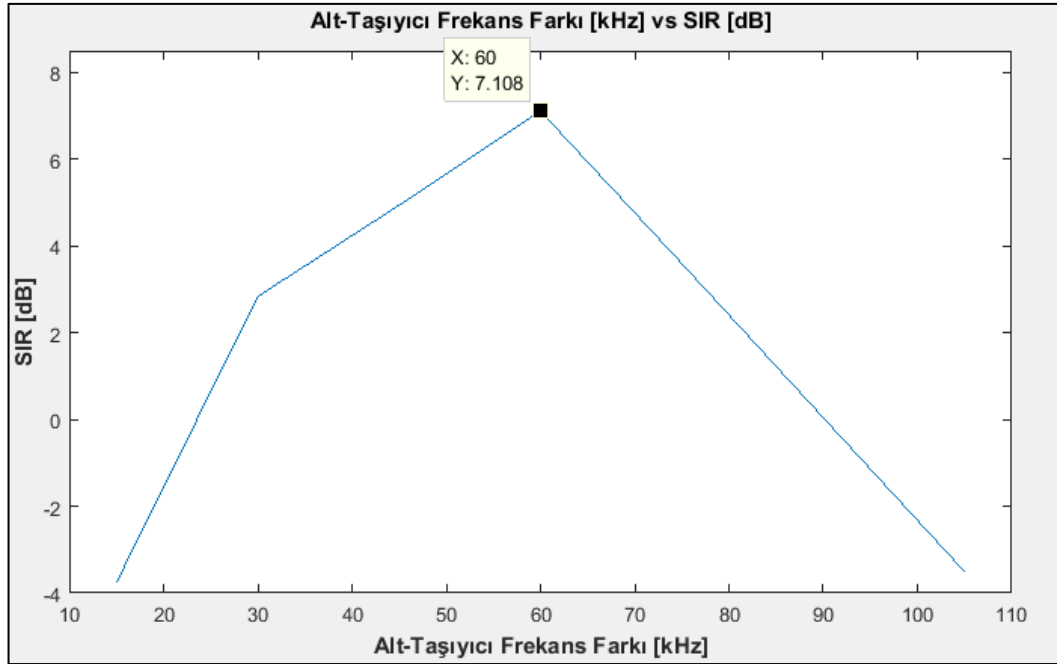
1. Geciken 7 sinyal bileşeninin ve 0-20 Hz arası doppler kaymalarının olduğu durum:

Tablo 3.8. Sinyal bileşenlerinin gecikme, doppler kayma ve normalize edilmiş güç değerleri 1

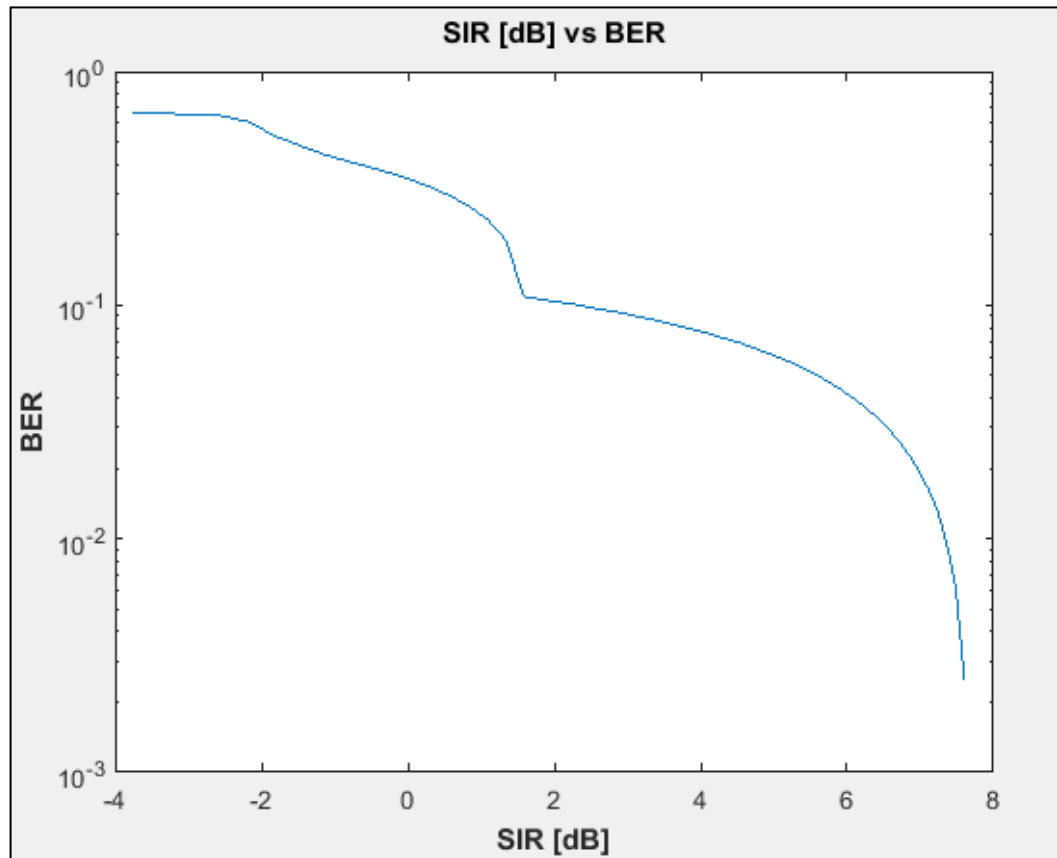
Gecikme değerleri [ns]	≈ Doppler kaymaları [Hz]	≈ Normalize edilmiş güç değerleri [dB]
10	16	-0,86
20	8	-1,73
30	8	-2,60
50	8	-4,34
70	19	-6,06
90	19	-7,80
110	16	-9,54

Tablo 3.9. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR değerleri 1

Alt-taşıyıcı frekans farkı [kHz]	≈ SIR [dB]
15	-3,760
30	2,837
45	4,942
60	7,108
75	3,594
105	-3,509



Şekil 3.6. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR grafiği 1



Şekil 3.7. SIR'a göre BER grafiği 4 (Alt-taşıyıcı frekans farkı = 15 kHz)

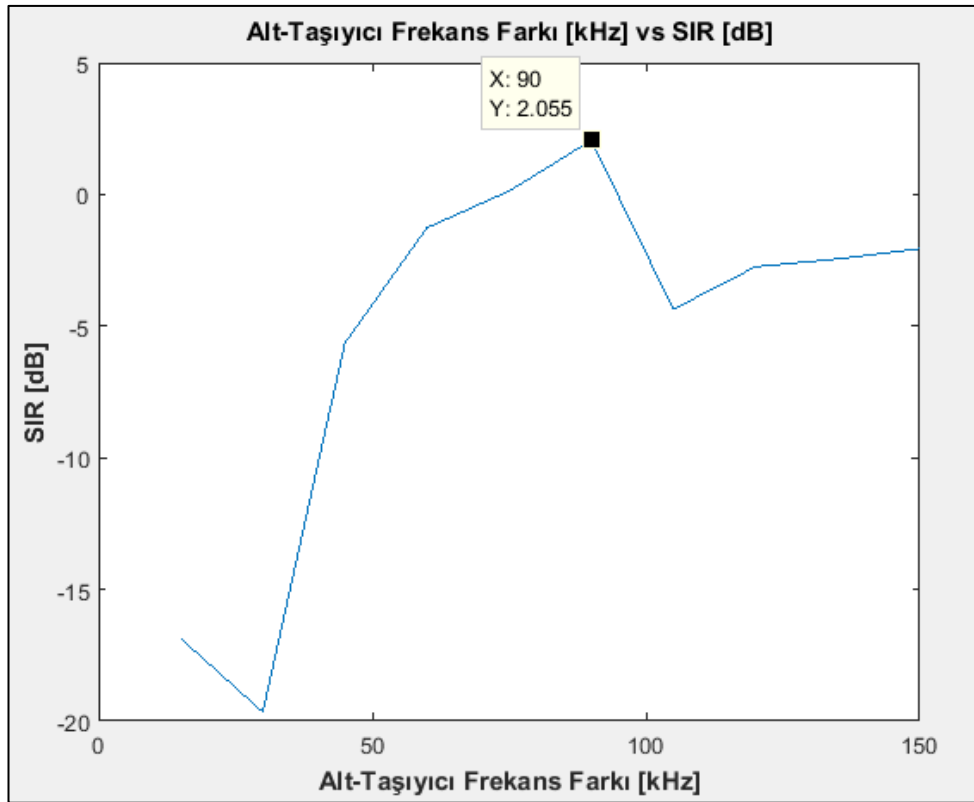
2. Geciken 7 sinyal bileşeninin ve 20-40 Hz arası doppler kaymalarının olduğu durum:

Tablo 3.10. Sinyal bileşenlerinin gecikme, doppler kayma ve normalize edilmiş güç değerleri 2

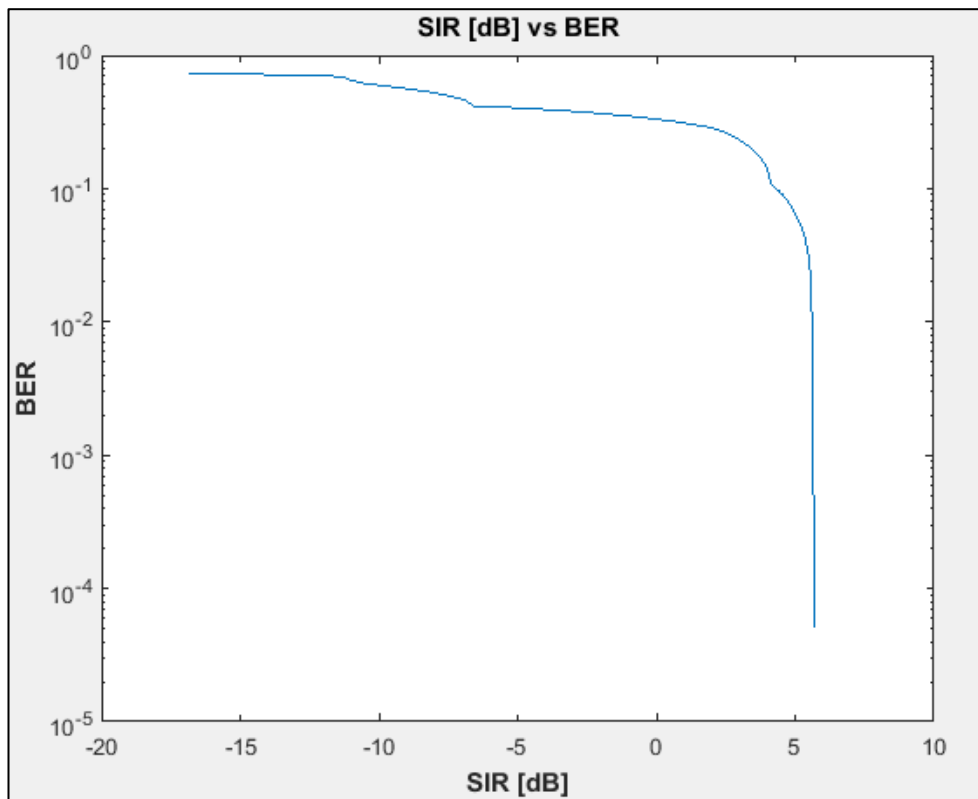
Gecikme değerleri [ns]	\approx Doppler kaymaları [Hz]	\approx Normalize edilmiş güç değerleri [dB]
10	27	-0,84
20	23	-1,71
30	35	-2,55
50	31	-4,30
70	31	-6,04
90	35	-7,76
110	23	-9,53

Tablo 3.11. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR değerleri 2

Alt-taşıyıcı frekans farkı [kHz]	\approx SIR [dB]
15	-16,863
30	-19,658
45	-5,644
60	-1,261
75	0,129
90	2,055
105	-4,360
120	-2,744
135	-2,449
150	-2,057



Şekil 3.8. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR grafiği 2



Şekil 3.9. SIR'a göre BER grafiği 5 (Alt-taşıyıcı frekans farkı = 15 kHz)

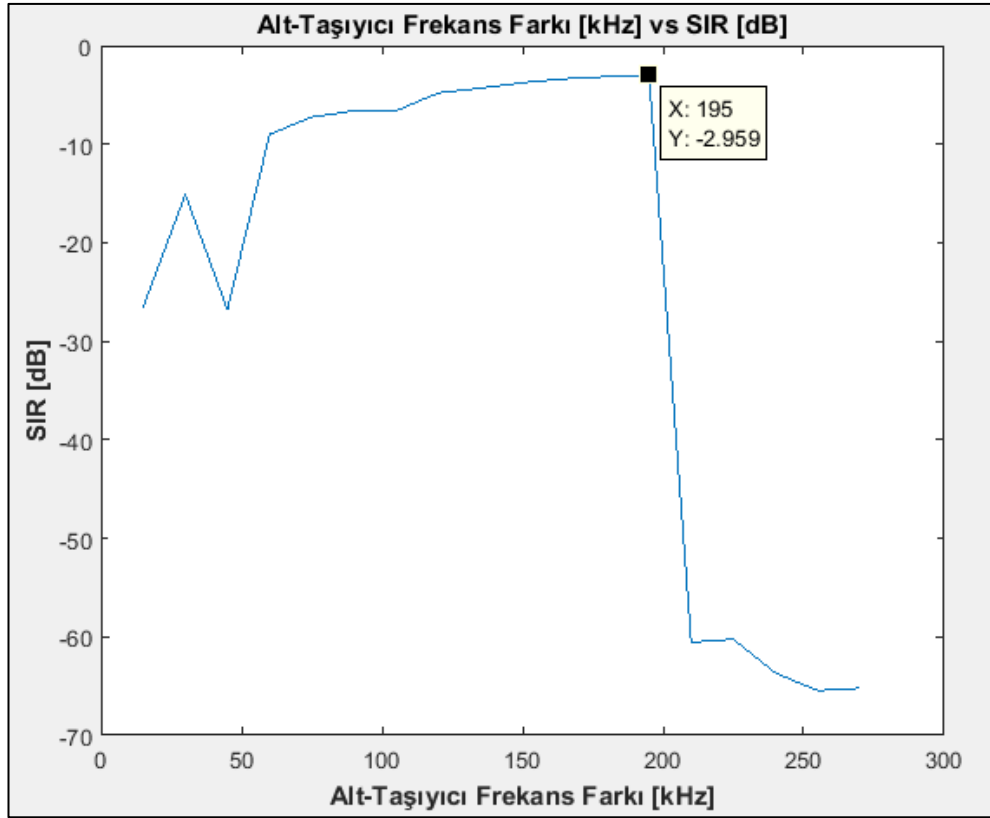
3. Geciken 7 sinyal bileşeninin ve 40-130 Hz arası doppler kaymalarının olduğu durum:

Tablo 3.12. Sinyal bileşenlerinin gecikme, doppler kayma ve normalize edilmiş güç değerleri 3

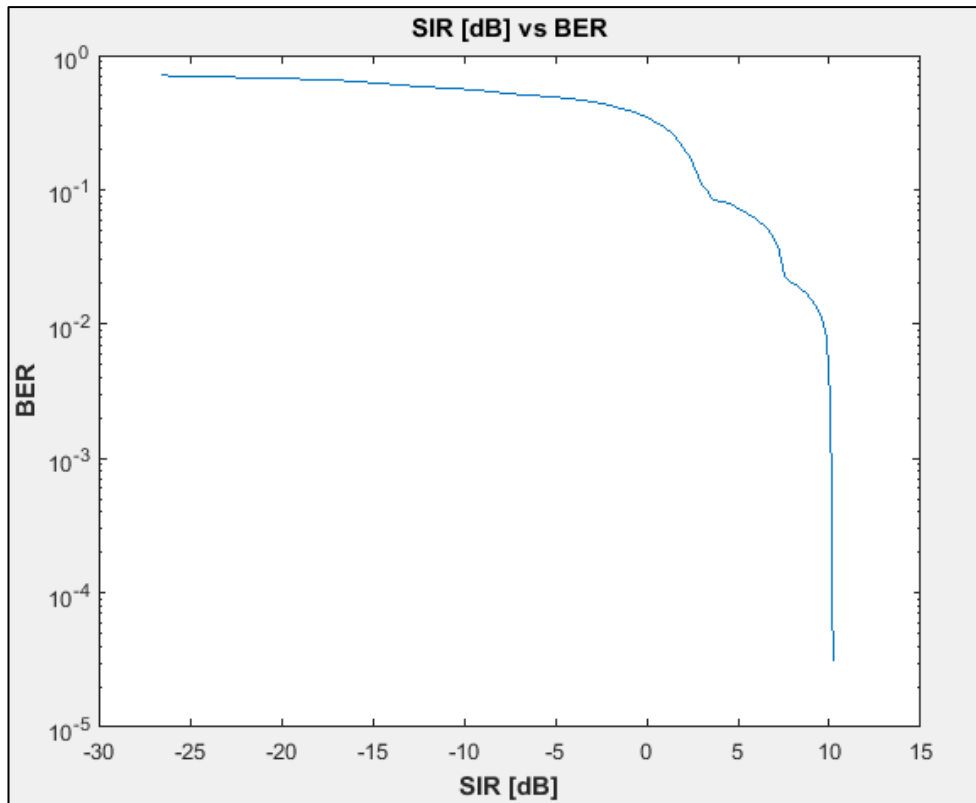
Gecikme değerleri [ns]	\approx Doppler kaymaları [Hz]	\approx Normalize edilmiş güç değerleri [dB]
10	42	-0,79
20	90	-1,34
30	104	-2,07
50	118	-3,63
70	87	-5,72
90	128	-6,95
110	61	-9,38

Tablo 3.13. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR değerleri 3

Alt-taşıyıcı frekans farkı [kHz]	\approx SIR [dB]
15	-26,576
30	-15,094
45	-26,806
60	-9,002
75	-7,231
90	-6,616
105	-6,621
120	-4,797
135	-4,311
150	-3,753
165	-3,367
180	-3,138
195	-2,959
210	-60,544
225	-60,249
240	-63,692
255	-65,459
270	-65,217



Şekil 3.10. Alt-taşıyıcı frekans farkına göre SIR grafiği 3



Şekil 3.11. SIR'a göre BER grafiği 6 (Alt-taşıyıcı frekans farkı = 15 kHz)

Verilen 3 durumla (1., 2., 3.) ile ilgili değerlendirme:

Doppler Kaymaları 3. durumda 2. durumdan, 2. durumda 1. durumdan yüksekti ve bu SIR'ı maksimize eden alt-taşıyıcı frekansının $3. > 2. > 1.$ şeklinde sıralanmasına neden oldu (bkz. Tablo 3.8.-3.13. ve Şekil 3.6., 3.8., 3.10.) çünkü Doppler Kaymaları'nın fazla olması Uyumluluk Zamanı'nın az olmasına ve kullandığımız DP'de görüldüğü gibi girişime neden olan sinyal bileşenlerinin gücünün fazla olmasına neden oldu ve bu etkilerin bir kısmı OFDM Sembol süresinin belirli bir seviyeye kadar azaltılmasıyla minimize edildi ancak belirli bir seviyeden sonra gecikmelerin sinyale olan etkisi artarak SIR tekrar azalmaya başladı.

Bu örneklerde, Esnek OFDM Tekniği'nin bir haberleşme sisteminde kanal sebebiyle ortaya çıkan zorluklara karşı olumlu etkisi görülmüş oldu.

BÖLÜM 4. 5G VE ÖTESİ HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN ALTERNATİF DALGA ŞEKLİ TEKNOLOJİLERİ

4.1. Alternatif Dalga Şekli Teknolojileri

Bu bölümde, 5G ve Ötesi Haberleşme Sistemleri için düşük frekans bantlarında Esnek OFDM'e alternatif olabilecek veya Esnek OFDM ile birlikte kullanılacak dalga şekli teknolojileri kısaca tanıtılacaktır.

4.1.1. FBMC (Filtre grubu ile çoklu taşıyıcı)

FBMC Tekniği'nde, seçilen bir filtre OFDM Tekniği'ndeki gibi bütün banda değil her bir alt-taşıyıcıya uygulanır ve böylelikle frekans düzlemindeki sorunlar konusunda OFDM'e göre daha fazla kontrol sağlanır (Radio-Electronics, TB; sharetechnote, TB). Bu teknikte CP de kullanılmaz ve bu yüzden Spektral Verimlilik OFDM'e göre daha fazladır (Radio-Electronics, TB). Pratikte uygulanmasının OFDM Tekniği'ne göre daha karmaşık olması ve MIMO ile uyumunun daha az olması tekniğin dezavantajlarından (sharetechnote, TB).

4.1.2. UFMC (Genel filtrelemeli çoklu taşıyıcı)

OFDM Tekniği'nde bütün banda, FBMC Tekniği'nde her bir alt-taşıyıcıya filtreleme uygulanır. UFMC Tekniği'nde ise tüm band alt-bandlara bölünür ve bu alt-bandlara filtreleme uygulanır (MathWorks, TB). Bu uygulama ile hem FBMC Tekniği'nde kullanılan, zaman düzleminde uzun olan filtreler kısaltılmış olur hem de MIMO ile daha uyumlu bir yapı elde edilmiş olur (MathWorks, TB). Önemli bir dezavantajı ise band-dışı sızıntı kontrolünün kullanılan filtreden dolayı zorluğudur (Zhang ve ark., 2015).

4.1.3. GFDM (Genelleştirilmiş frekans bölmeli çoğullama)

GFDM Tekniği'nin diğer tekniklerden temel farkı, alt-taşıyıcılar arasında hiçbir boyutta dikgenlik şartının olmamasıdır (Radio-Electronics, TB). Bundan dolayı oluşan alt-taşıyıcılar arasındaki girişimi bastırmak için çeşitli filtreleme tekniklerinin yanı sıra Ardışık Girişim İptali (SIC) gibi teknikler de kullanılmalıdır (Zhang ve ark., 2015). Band-dışı sızıntı kontrolü iyi, PAPR değerleri düşük olsa da pratikte uygulanması karmaşık olan bir tekniktir (Zhang ve ark., 2015; Radio-Electronics, TB).

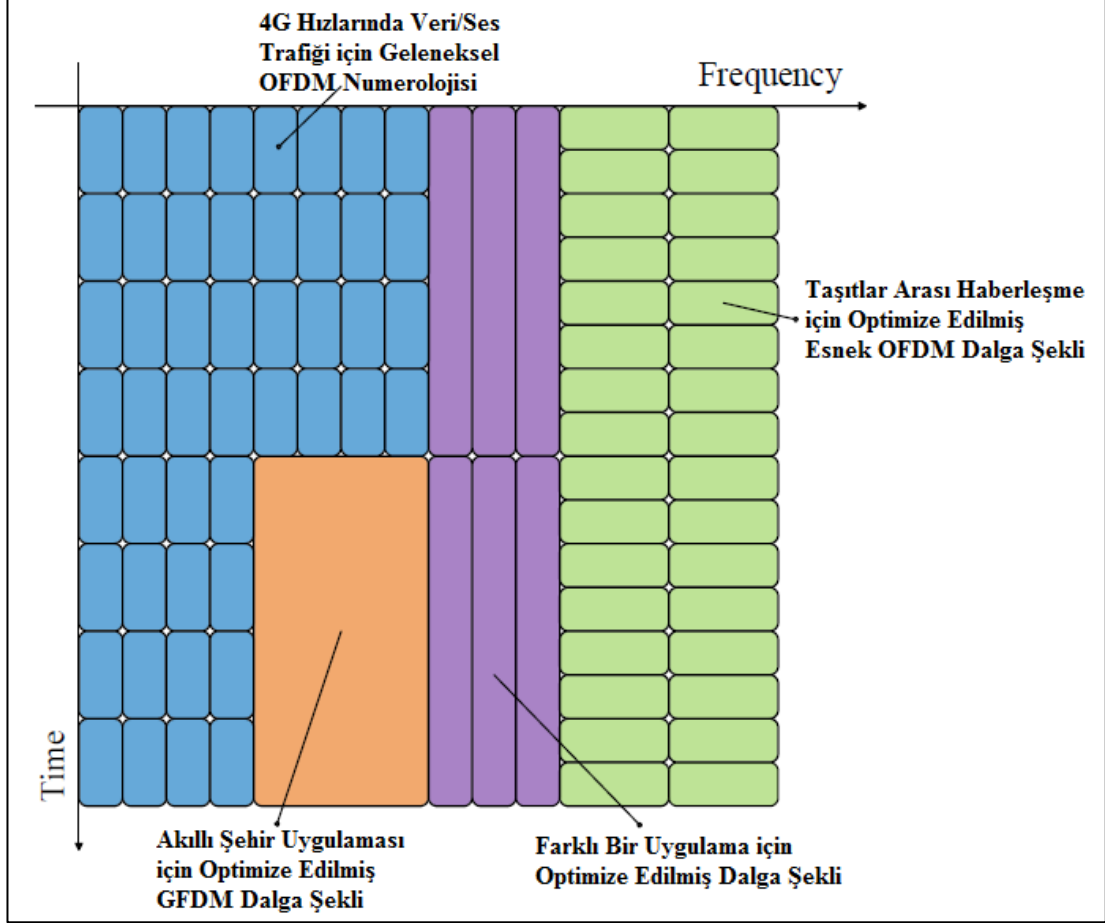
4.2. 5G Uygulama Sınıfları ve Farklı Dalga Şekli Teknolojilerinin Birlikte Kullanımı

5G için uygulama sınıfları 4 ana başlıkta toplanmıştır. Bu başlıklar ve içeriklerinden örnekler (3GPP, 2016) Tablo 4.1.'de görülebilir:

Tablo 4.1. 5G uygulama sınıfları ve örnek uygulamalar

Uygulama sınıfı	Büyük çaplı nesnelerin interneti	Geliştirilmiş mobil genişbant	Kritik haberleşme	Ağ işlemleri
Bazı özellikler ve gereksinimler	+ Çok fazla cihazın birbiriyle haberleştiği durumlar	+ Çok yüksek veri hızları + Çok geniş kapsama alanı	+ Çok düşük gecikme süreleri + Çok yüksek güvenilirlik	+ Çok yüksek verimlilik + Çok yüksek işlevsellik
Örnek uygulamalar	+ Akıllı evler + Akıllı şehirler + e-Sağlık + e-Çiftlik	+ Artırılmış gerçeklik + Ultra yüksek çözünürlük + Çok yüksek hıza ulaşılan durumlarda (hızlı tren, uçak vs.) kaliteli deneyim için uygulamalar	+ Endüstriyel kontrol + Robotik	+ Ağlar arası geçişler + Ağlar arası haberleşme + Ağ dilimleme (Belirli görevler için optimize edilmiş ağ bölümleri)

Tablo 4.1.'de bir kısmı görülen uygulamaların özellikleri dikkate alındığında birçok uygulama için özel olarak optimize edilmiş dalga şekli kullanılabileceği anlaşılır. Bu dalga şekillerinin aynı sistem içinde birlikte kullanıldığı bir şema Şekil 4.1.'de görülmektedir:



Şekil 4.1. Farklı uygulamalar için optimize edilmiş dalga şekillerinin birlikteliği (Zhang ve ark., 2015).

Bu şekilde:

1. Taşıtlar arası haberleşme sisteminde kullanılmak üzere optimize edilen dalga şeklinde gerekli olan çok düşük gecikme süresini sağlamak için sembol süresi kısa tutulmuştur.
2. Akıllı şehir uygulamasında kullanılmak üzere zaman ve frekans düzleminde dikgenlik şartı olmayan GFDM dalga şekli seçilmiştir. Böylece, aynı kaynaklar (zaman, frekans bandı vs.) farklı sistem elemanları tarafından

kullanılabilir ve ana sisteme çok daha fazla sayıda bağlantı mümkün olur. Bu tekniğin uygulanması Esnek OFDM Tekniği'ne göre daha karmaşık olsa da genel performansı bu gibi durumlarda daha başarılı olabilir.

Şekil 4.1.'deki gibi, birden fazla dalga şekli teknolojisinin çeşitli uygulamaların farklı gereksinimlerini karşılamak için aynı sistemde kullanıldığı şemaların 5G ve Ötesi Haberleşme Sistemleri'nde önemli bir yerinin olacağı varsayılmaktadır.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, öncelikle Esnek OFDM Tekniği temelleriyle birlikte tanıtılmış ve bu tekniğin 5G Kablosuz Haberleşme Sistemleri için önemi örneklerle açıklanmıştır. Daha sonra, Esnek OFDM Tekniği'nin çift saçılımlı kanalın getirdiği zorluklara karşı nasıl kullanılabileceği benzetim yoluyla gösterilmiş ve elde edilen sonuçlarla ilgili değerlendirmeler yapılp tekniğin faydası ortaya konulmuştur. Bir sonraki bölümde, 5G ve Ötesi Haberleşme Sistemleri'nde kullanılması gündemde olan belli başlı dalga şekli teknolojileri kısaca tanıtılmış ve farklı teknolojilerin çeşitli uygulamaların farklı gereksinimlerini karşılayabilmek için aynı sistem içinde birlikte kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Bu çalışmanın, 5G ve Ötesi Kablosuz Haberleşme Sistemleri'nde kullanılabilecek dalga şekli teknolojileri ve özellikle Esnek OFDM konusunda temel bir Türkçe kaynak olması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Agilent Technologies. 2011. Flexible OFDM Signal Generation, Analysis and Troubleshooting Presentation. Erişim Adresi: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/2_Flexible_OFDM_Signal_Generation_Analysis_and_Troubleshooting.pdf., Erişim Tarihi: 14.03.2018.
- Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N. 2016. Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18 (3): 1617-1655.
- Ankaralı, Z. E., Peköz, B., Arslan, H. 2017. Flexible Radio Access Beyond 5G: A Future Projection on Waveform, Numerology & Frame Design Principles. IEEE Access, PP (99): 1-16.
- Ayadi, R., Kammoun, I., Siala, M. 2007. Optimization of the pulse shape of OFDM systems Using the Arrow-Hurwicz Algorithm. International Symposium on Wireless Communication Systems, Trondheim, Norway, 91-95.
- Ayadi, R., Kammoun, I., Siala, M. 2013. Optimal OFDM pulse design, analysis and implementation over doubly dispersive channel. Proceedings of the 21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013), Marrakech, Morocco, 1-5.
- Benjebbour, A., Saito, K., Saito, Y., Kishiyama, Y. 2016. 5G Radio Access Technology. NTT DOCOMO Technical Journal, 17 (4): 16-28.
- Bliley Technologies. 2016. Ultimate Guide to Understanding Phase Noise. Erişim Adresi: <http://blog.bliley.com/ultimate-guide-to-phase-noise>., Erişim Tarihi: 07.02.2018.
- Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J. 2014. 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband. Academic Press, Oxford.
- Debbabi, N., Siala, M., Boujemaa, H. 2005. Optimization of the OFDM prototype waveform for highly time and frequency dispersive channels through a maximization of the SIR. IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Gammarth, Tunisia, 1-4.
- Doğan, H. 2009. FSK/PSK Modülasyonlu Röleli ve İşbirlikli Sistemler. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- DSP Illustrations. TB. The Cyclic Prefix for OFDM. Erişim Adresi: <http://dspillustrations.com/pages/posts/misc/the-cyclic-prefix-cp-in-ofdm.html>., Erişim Tarihi: 10.12.2017.

- Elkourdi, M., Peköz, B., Güvenkaya, E., Arslan, H. 2016. Waveform Design Principles for 5G and Beyond. IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), Clearwater, FL, USA, 1-6.
- Gangwar, A., Bhardwaj, M. 2012. An Overview: Peak to Average Power Ratio in OFDM system & its Effect. International Journal of Communication and Computer Technologies, 1(2): 22-25.
- Ibrahim, M., Xu, W. 2016. On Numerology and Capacity of the Self-Contained Frame Structure. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Washington, DC, USA, 1-6.
- ITU-R. 2015. ITU-R M.2083-0: IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Erişim Adresi: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf, Erişim Tarihi: 04.11.2017.
- Keysight Technologies. TB. Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN. Erişim Adresi: http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm., Erişim Tarihi: 29.11.2017.
- Khattab, T. 2014. ELEC 447 Fall 2014 - L10: OFDM System. Erişim Adresi: <https://www.youtube.com/watch?v=jDDTXWgp11k>., Erişim Tarihi: 10.12.2017.
- Matz, G. 2006. Characterization and Analysis of Doubly Dispersive MIMO Channels. IEEE Fortieth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC '06), Pacific Grove, CA, USA, 946-950.
- MathWorks. TB. comm.OFDMDemodulator System object. Erişim Adresi: <https://www.mathworks.com/help/comm/ref/comm.ofdm-demodulator-system-object.html>., Erişim Tarihi: 08.12.2017.
- MathWorks. TB. UFMC vs. OFDM Modulation. Erişim Adresi: <https://www.mathworks.com/help/comm/examples/ufmc-vs-ofdm-modulation.html>., Erişim Tarihi: 18.02.2018.
- National Instruments. 2013. Doppler Spread and Coherence Time. Erişim Adresi: <http://www.ni.com/white-paper/14911/en/>., Erişim Tarihi: 01.02.2018.
- Nissel, R., Rupp, M. 2017. OFDM and FBMC-OQAM in Doubly-Selective Channels: Calculating the Bit Error Probability. IEEE Communication Letters, 21 (6): 1297-1300.
- Nutaq. TB. Understanding PAPR in OFDM systems. Erişim Adresi: <https://www.nutaq.com/blog/understanding-papr-ofdm-systems>., Erişim Tarihi: 30.10.2017.
- Radio-Electronics. TB. 5G Waveforms. Erişim Adresi: <http://www.radio-electronics.com/info/cellular-telecomms/5g-mobile-cellular/modulation-waveforms.php>., Erişim Tarihi: 18.02.2018.

- Renfors, M., Yli-Kaakinen, J., Levanen, T., Valkama, M., Ihalainen, T., Vihriala, J. 2015. Efficient Fast-Convolution Implementation of Filtered CP-OFDM Waveform Processing for 5G. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), San Diego, CA, USA, 1-7.
- sharetechnote. TB. 5G - PHY Candidate. Erişim Adresi: http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Phy_Candidate_FBMC.html., Erişim Tarihi: 18.02.2018.
- Siala, M., Abdelkefi, F., Hraiech, Z. 2014. Novel Algorithms for Optimal Waveforms Design in Multicarrier Systems. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Istanbul, Turkey, 1270-1275.
- Steendam, H., Moeneclaey, M. 1999. Analysis and Optimization of the Performance of OFDM on Frequency-Selective Time-Selective Fading Channels. IEEE Transactions on Communications, 47(12): 1811-1819.
- telecomHall. 2014. What is CP (Cyclic Prefix) in LTE?. Erişim Adresi: <http://www.telecomhall.com/what-is-cp-cyclic-prefix-in-lte.aspx>., Erişim Tarihi: 10.12.2017.
- Teletopix.org. 2012. What Is Cyclic Prefix In LTE ?. Erişim Adresi: <http://www.teletopix.org/4g-lte/what-is-cyclic-prefix-in-lte/>., Erişim Tarihi: 10.12.2017.
- Wang, H., Ni, J., Pan, Z., Sun, J., Pan, C., Chih-Lin, I. 2014. Perspectives on New Waveform Design for 5G Small Cell. General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), Beijing, China, 1-4.
- Yazar, A., Arslan, H. 2017. Waveform design priorities in different wireless communications systems for 5G beyond. Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Antalya, Turkey, 1-4.
- Zaidi, A., Baldemair, R., Tullberg, H., Björkegren, H., Sundström, L., Medbo, J., Silva, I., Kilinc, C. 2016a. Waveform and Numerology to Support 5G Services and Requirements. IEEE Communications Magazine, 54(11): 90-98.
- Zaidi, A., Luo, J., Gerzaguet, R., Wolfgang, A., Weiler, R., Vihriala, J., Svensson, T., Qi, Y., Halbauer, H., Zhao, Z., Zetterberg, P., Miao, H. 2016b. A Preliminary Study on Waveform Candidates for 5G Mobile Radio Communications Above 6 GHz. IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, China, 1-6.
- Zhang, X., Jia, M., Chen, L., Ma, J., Qiu, J. 2015. Filtered-OFDM - Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks. Global Communications Conference (GLOBECOM), San Diego, CA, USA, 1-6.
- Zou, Q., Tarighat, A., Sayed, A. H. 2007. Compensation of Phase Noise in OFDM Wireless Systems. IEEE Transactions On Signal Processing, 55 (11): 5407-5424.
- http://3.bp.blogspot.com/-pHYV6n2l7g4/V2toTLr18-I/AAAAAAAAACC4/5jIKDR8zV_UFhUsVuDk6p13GkTY_cw2oACK4B/s1600/ReflectionDiffractionScattering.png., Erişim Tarihi: 03.12.2017

3GPP. 2016. SA1 completes its study into 5G requirements. Erişim Adresi: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1786-5g_reqs_sa1., Erişim Tarihi: 16.09.2017.

3GPP. 2017. 3GPP TS 36.104 V15.1.0. 3GPP, Valbonne, 243.

ÖZGEÇMİŞ

Tolga Yaz, 05.03.1991'de Sakarya'da doğdu. İlk ve orta eğitimini Sakarya'da, lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. Sabancı Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2015 yılında bitirdi. Aynı yıl, Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Bilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı ve bugüne kadar çeşitli kurumlarda çeşitli projelerde görev aldı.