

**TC
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİKGEN FREKANS BÖLMELİ ÇOKLU ERİŞİM
SİSTEMLERİNDE KANAL KESTİRİMİ VE
PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Orhan ATİLA

131113102

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı: Telekomünikasyon

Danışman: Doç. Dr. Melih Cevdet İNCE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 05 Ocak 2016

OCAK-2016

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DİKGEN FREKANS BÖLMELİ ÇOKLU ERİŞİM SİSTEMLERİNDE KANAL KESTİRİMİ VE
PERFORMANS ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Orhan ATİLA

131113102

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Ocak 2016

Tezin Savunulduğu Tarih : 19 Ocak 2016

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Melih Cevdet İNCE (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Turgay KAYA (F.Ü)
Yrd. Doç. Dr. Ömer Faruk ALÇİN(B.Ü)



OCAK-2016

ÖNSÖZ

Bu çalışmada çok taşıyıcılı modülasyon sistemlerinde OFDM tekniğinin gerçekleştirilmesi amaçlanmış ve tek taşıyıcılı modülasyon sistemlerinden güçlü olduğu benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Yüksek lisans tezi olarak hazırladığım bu çalışmanın yeni nesil haberleşme sistemlerinde kullanılan standartların ve modülasyon metotlarının anlaşılmasına katkı sağlayacağını temenni ederim.

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında benden bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Melih Cevdet İNCE' ye ayrıca bu çalışma esnasında bilgi ve fikirlerinden yararlandığım Prof. Dr. Abdulkadir ŞENGÜR' e teşekkür ederim.

Orhan ATİLA
ELAZIĞ-2016

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	IX
KISALTMA LİSTESİ	X
ÖZET	XII
SUMMARY	XIII
1.GİRİŞ	1
1.1 Tezin Organizasyonu	5
2.KABLOSUZ HABERLEŞME KANAL MODELLERİ ve KARAKTERİSTİKLERİ	7
2.1 Kablosuz Haberleşme Kanallarında Bozucu Etkiler	7
2.1.1 Büyük Ölçekli Sönümlleme (Yol Kaybı)	9
2.1.2 Orta Ölçekli Sönümlleme (Gölgeleme)	10
2.1.3 Küçük Ölçekli Sönümlleme (Çok Yolluluk)	11
2.1.4 Çok Yollu Sönümlleme Karakteristikleri	12
2.1.5 Hızlı ve Yavaş Sönümlleme (Fast and Slow Fading)	13
2.1.6 Düz Sönümlleme (Flat Fading)	13
2.1.7 Frekans Seçici Sönümlleme (Frequency Selective Fading)	14
2.2 İstatistiksel Kanal Modelleri	14
2.2.1 AWGN Kanal Modeli ve Güç Spektral Yoğunluğu	14
2.2.2 Rayleigh Kanal Modeli ve Güç Spektral Yoğunluğu	15
2.2.3 Rician Kanal Modeli ve Güç Spektral Yoğunluğu	16
2.2.4 Zamanda Gecikme	16
2.2.5 Frekansta Kayma (Doppler Kayması)	17
3. OFDM YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ	20
3.1 OFDM Sisteminin Çalışma Prensibi	20
3.2 Dikgenlik (Orthogonality)	21
3.3 Döngüsel Önek Ekleme (Cycle Prefix)	24
4. KANAL KESTİRİMİ	26
4.1 Kanal Kestirim Algoritmaları	27
4.2 Denkleştirici	29
4.3 Kanal Kodlaması	29

4.3.1 Katlamalı Kodlama	30
4.3.2 Katlamalı Kodların Çözülmesi ve Viterbi Kod Çözücü.....	31
4.3.3 Sert Kararlı ve Yumuşak Kararlı Çözümleme.....	32
4.4 Serpiştirme (İnterleaving) ve Geri-Serpiştirme (Deinterleaving).....	32
4.5 EVM(Error Vector Meassurement).....	35
4.6 MATLAB/SIMULINK IEEE 802.11a WLAN Fiziksel Katmanı.....	36
4.6.1 Değişken Hızlı Veri Üretici	39
4.6.2 Modülatör Bank	40
4.6.3 Katlamalı Kodlayıcı	41
4.6.4 Dikdörtgensel QAM Bloğu	41
4.6.5 OFDM Modülatör ve Pilot Taşıyıcıların Yerleştirilmesi	43
4.6.6 OFDM Demodülasyon Bloğu	44
4.6.7 Denkleştirici (Equalizer)	44
4.6.8 Demodülatör Bankası.....	45
4.6.9 Kanal Yapısı.....	46
4.7 Benzetim Sonuçları	47
5. SONUÇLAR	56
6. ÖNERİLER	57
REFERANSLAR	58
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Kablosuz haberleşme standartları ve özellikleri	1
Şekil 1.2. OFDM tekniğinin haberleşme standartlarındaki yeri.....	2
Şekil 2.1. Kablosuz haberleşmedeki bozucu etkiler.....	8
Şekil 2.2. Sönümleme modelleri ve etkilerinin gösterimi.....	9
Şekil 2.3. Elektromanyetik dalgaların boş uzayda yayılımı	9
Şekil 2.4. Orta ölçekli sönümleme karakteristiği	11
Şekil 2.5. Doğrudan ve doğrudan olmayan görüş senaryosu	12
Şekil 2.6. Yavaş ve hızlı sönümleme karakteristikleri.....	13
Şekil 2.7. AWGN kanal güç spektral yoğunluğu.....	15
Şekil 2.8. Rayleigh kanal güç spektral yoğunluğu	15
Şekil 2.9. Zamanda yayılma senaryosu.....	16
Şekil 2.10. Doppler kayması.....	17
Şekil 2.11. Frekansta yayılma senaryosu	18
Şekil 2.12. Doppler frekans spektrumu.....	18
Şekil 2.13. Tüm etkilerin beraber olduğu senaryo	19
Şekil 3.1. OFDM çok taşıyıcılı modülasyon yapısı	20
Şekil 3.2. OFDM blok diyagramı.....	21
Şekil 3.3. OFDM taşıyıcılarının zaman düzlemi görüntüsü.....	22
Şekil 3.4. Dikgen taşıyıcılar ve frekans spektrumları	22
Şekil 3.5. FDM ve OFDM bant genişlikleri.....	23
Şekil 3.6. OFDM sisteminde taşıyıcıların frekans düzlemi görüntüsü	23
Şekil 3.7. OFDM döngüsel önek ekleme	24
Şekil 3.8. Döngüsel önekin ısı üzerindeki etkisi.....	25
Şekil 4.1. Blok tipi ve tarak tipi pilot yerleşim planı	27
Şekil 4.2. Katlamalı kodlama bağlantı gösterimi	30
Şekil 4.3. Viterbi kod çözücü kafes gösterimi	31
Şekil 4.4. Burst hatası oluşumu.....	33
Şekil 4.5. Serpiştirme ve geri-serpiştirme işlemi	33
Şekil 4.6. I/Q fazör düzlemi ve EVM hesaplanması	35
Şekil 4.7. IEEE 802.11a için oluşturulan Simulink modeli	36
Şekil 4.8. Protokol çerçeve birimi.....	38
Şekil 4.9. Veri üretici bloğu	39
Şekil 4.10. Modülatör bank alt bloğu.....	40

Şekil 4.11. Modülatör bank bloğu.....	40
Şekil 4.12. BPSK QPSK ve 16QAM diyagramları.....	42
Şekil 4.13. 64QAM diyagramı	42
Şekil 4.14. Pilot sembol yerleşim planı.....	43
Şekil 4.15. OFDM modülatör bloğu	44
Şekil 4.16. OFDM demodülasyon bloğu	44
Şekil 4.17. Denkleştirici alt bloğu.....	45
Şekil 4.18. Demodülatör bank alt bloğu	45
Şekil 4.19. Demodülatör bloğu	46
Şekil 4.20. Kanal yapısı bloğu	46
Şekil 4.21. SNR kestirimi Bloğu.....	47
Şekil 4.22. OFDM sembolü üzerindeki Rayleigh kanalının bozucu etkisi	48
Şekil 4.23. OFDM sembolü üzerindeki AWGN kanalının bozucu etkisi	48
Şekil 4.24. BPSK için AWGN kanalında kestirim algoritmalarının performansı	49
Şekil 4.25. BPSK için Rayleigh kanalında kestirim algoritmalarının performansı.....	49
Şekil 4.26. QPSK için AWGN kanalında kestirim algoritmalarının performansı	50
Şekil 4.27. QPSK için Rayleigh kanalında kestirim algoritmalarının performansı	50
Şekil 4.28. 16QAM için AWGN kanalında kestirim algoritmalarının performansı	51
Şekil 4.29. 16QAM için Rayleigh kanalında kestirim algoritmalarının performansı	51
Şekil 4.30. 64QAM için AWGN kanalında kestirim algoritmalarının performansı	52
Şekil 4.31. 64QAM için Rayleigh kanalında kestirim algoritmalarının performansı	52
Şekil 4.32. BPSK için çok yollu kanal yapısında denkleştirici yapısının etkisi.....	53
Şekil 4.33. QPSK için çok yollu kanal yapısında denkleştirici yapısının etkisi	53
Şekil 4.34. 16QAM için çok yollu kanal yapısında denkleştirici yapısının etkisi	54
Şekil 4.35. 64QAM için çok yollu kanal yapısında denkleştirici yapısının etkisi	54

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 4.1. IEEE 802.11a standardının zaman parametreleri	37
Tablo 4.2. Veri hızları ve gönderilen bitler	38
Tablo 4.3. Veri hızlarına göre kodlama ve modülasyon yapıları.....	39
Tablo 4.4. Modülasyon türlerine göre normalizasyon katsayıları	41
Tablo 4.5. Kanal Kestirimi İçin Benzetim Parametreleri	47
Tablo 4.6. WiFi Bağlantı İçin Gerekli Minimum SNR Değerleri	55

SEMBOLLER LİSTESİ

T_C : Evre Uyumlu Periyot Zamanı

W_C : Evre Uyumlu Band Genişliği

F_D : Maksimum Doppler Frekansı

P_n : Zayıflama Katsayısı

τ_n : Gecikme Zamanı

KISALTMA LİSTESİ

1G	: Birinci Nesil İletişim Sistemleri
2G	: İkinci Nesil İletişim Sistemleri
3G	: Üçüncü Nesil İletişim Sistemleri
4G	: Dördüncü Nesil İletişim Sistemleri
5G	: Beşinci Nesil İletişim Sistemleri
16QAM	: 16 Genlik Modülasyonu
64QAM	: 64 Genlik Modülasyonu
802.11	: IEEE Wİ-Fİ Kablosuz Haberleşme Standardı.
802.16	: IEEE Wİ-MAX Kablosuz Haberleşme Standardı.
ARQ	: Otomatik Tekrar İstemi
AWGN	: Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü
BER	: Bit Hata Oranı
BPSK	: İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
CDMA	: Kod Bölmeli Çoklu Erişim
CP	: Çevrimsel(Döngüsel) Önek
DFT	: Ayrık Fourier Dönüşümü
DSL	: Sayısal Abone Hattı
DVB	: Sayısal Video Yayını
FDM	: Frekans Bölmeli Çoğullama
FDMA	: Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
FEC	: İleri Hata Düzeltme
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
FIR	: Sonlu Dürtü Cevabı
ICI	: Taşıyıcılar Arası Girişim
IDFT	: Ters Ayrık Fourier Dönüşümü
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri
IFFT	: Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
ISI	: Semboller Arası Girişim
LAN	: Yerel Alan Ağları
LMMSE	: Lineer En Küçük Ortalamalı Karesel Hata
LRMMSE	: Düşük Seviyeli En Küçük Ortalamalı Karesel Hata

LOS	: Direk Görüş
MMSE	: En Küçük Ortalamalı Karesel Hata
MIMO	: Çoklu Giriş Çoklu Çıkış
NLOS	: Direk Olmayan Görüş
OFDM	: Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
RMS	: Ortalama Karekök
SER	: Sembol Hata Oranı
SNR	: Sembol Gürültü Oranı
SVD	: Tekil Değer Ayrıştırması
QPSK	: Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
WiFi	: Kablosuz Bağlantı
WIMAX	: Mikrodalga Erişim İçin Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik
WLAN	: Kablosuz Yerel Alan Ağları

ÖZET

Teknolojinin hızla gelişmesine paralel olarak bilgiye her an her yerden ulaşabilme ihtiyacı her geçen gün önem kazanmakta, bununla beraber kablosuz haberleşmede ki veri iletim oranı ve veri iletim hızı talebi de günden güne artış göstermektedir. Bu ihtiyaçları karşılayabilmek için haberleşme sistemlerinde kullanılan tek taşıyıcılı modülasyon sistemleri yerini günümüzde artık çok taşıyıcılı modülasyon sistemlerine bırakmıştır. OFDM (Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) mevcut frekans spektrumunu alt kanallara bölerek paralel iletim sağlamak ve veri hızını önemli ölçüde arttırmaktadır. Ayrıca alt kanalların birbirine dikgen olması %50'ye varan bir bant genişliği tasarrufu sağlamaktadır. OFDM' in bu olumlu özellikleri 802.11 (WiFi) ve 802.16 (WiMAX) gibi yeni nesil haberleşme standartlarında yerini almasını sağlamıştır. Dolayısıyla son zamanlarda OFDM sisteminin çoklu yol zayıflamalı frekans seçici kanallarda performansını değerlendiren çalışmalar ağırlık kazanmıştır. Kanal yapılarının zamanla rasgele değişen frekans cevabının kestirilerek tasarlandığı denkleştirici yapıları da bu konuda araştırma konusu olan diğer önemli bir bölümü oluşturmaktadır. Özellikle kanalların semboller arası girişime (ISI) neden olan etkilerine karşı dayanıklılık kazandırmak için yeni yöntemler araştırılmaktadır. Bu yöntemleri değerlendirirken direk görüşlü (LOS) ve direk görüşü olmayan (NLOS) istatistiksel farklı kanal modelleri kullanılarak, kanal parametrelerine göre bit hata oranları (BER) incelenmektedir. Bu çalışmada OFDM tekniğinin kullanımında örnek bir sistem olması ve uygulama alanı bulması nedeniyle 802.11 kablosuz haberleşme standartları incelenmiş, serpiştirici ve kanal kodlama yapıları ele alınmıştır. Rayleigh, Rician, AWGN kanal modelleri üzerinde OFDM sistem yapısı benzetimi gerçekleştirilmiş ve performansı değerlendirilmiştir. Kanal kestirimi için kullanılan LS, MMSE, LRMMSE algoritmaları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: OFDM, WiFi, WiMAX, ISI, LOS, NLOS, BER, MMSE, LS, LRMMSE

SUMMARY

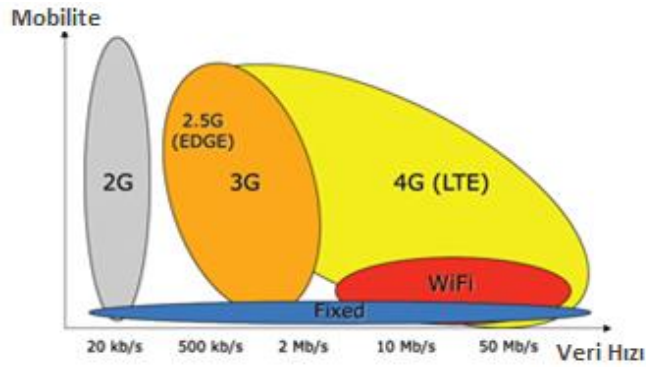
CHANNEL ESTIMATION AND PERFORMANCE ANALYSIS IN ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS SYSTEM

Parallel to the rapid growth of technology the need for reaching information in anywhere or at any moment is gaining importance day by day, and with this situation the rate of transmitting data and the speed demand of transmitting data in wireless communication are growing day by day too. In order to provide these needs, single carrier modulation systems used in communication systems give their place to the multi carrier modulation systems. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Acces) provides parallel transmission and increases the data speed significantly by dividing the available frequency spectrum into the sub-channels. Furthermore, sub-channels orthogonality provides a bandwidth saving up to fifty percent. These positive features of OFDM provide it to have a place in new generation communication standarts such as 802.11 (WiFi) and 802.16 (WIMAX). Therefore the studies which evaluate the performance in inter-symbol frequency selective channels of OFDM system have gained importance recently. Equalizer structures which are designed by estimating the frequency response of channel structures changing randomly in time is an important research subject in this section. Particularly, the new methods are searched in order to provide resistance against the effects causing the inter-symbol interference (ISI) of channels. When evaluating these methods, bit error rates (BER) are examined according to the channel parametres by using the statistical different models of line of sight (LOS) and no line of sight (NLOS) channels. For being a model system in the use of OFDM technique and finding usage in implementation fields, 802.11 and 802.16 wireless communication systems are analyzed, interleaver and channel coding structures are detailed in this study. OFDM system structure is simulated on the Rarleigh, Rician, AWGN channel models and its performance is evaluated. The LS, MMSE and LRMMSE algorithms used for channel estimation are compared.

Key Words: OFDM, WiFi, WIMAX, ISI, LOS, NLOS, BER, LS, MMSE, LRMMSE

1.GİRİŞ

Son yıllarda gerek ses ve görüntü iletiminde gerekse internet uygulamalarında yüksek veri hızlarında iletme ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle gezgin haberleşme sistemlerinde bilgiye her yerden ve anında ulaşma talepleri doğrultusunda yeni nesil haberleşme standartları ve protokolleri geliştirilmektedir. Geliştirilen bu standartlar ve protokoller ile günümüzde mobil şebekelerin abonelerine sağladığı veri hızları da her geçen gün artmaktadır. Tarih içinde haberleşme sistemlerinin gelişimine bakıldığında birinci nesil (1G, First Generation) haberleşme standardı analog telefon ağı trafiğini kontrol için kullanılan ve sadece sesli iletişime imkân tanıyan bir sistemken, 2G 3G diye devam eden ve neredeyse her on yılda bir değişen standartlarla birlikte, kullanıcı talepleri artık sadece sesli konuşmayla sınırlı kalmamış, yüksek hızlı internet erişimleri, yüksek hızlı indirme (download) ve yükleme (upload) talepleri ortaya çıkmıştır. Günümüzde ise ülkemizde güncelliğini koruyan 4G ile birlikte artık bu talepler de bir ihtiyaç haline gelmiştir. Dahası Avrupa ve Çin gibi gelişmiş ülkelerde 5G sistemlerinin standartları da gündeme getirilmiş ve alt yapı çalışmaları başlatılmış durumdadır. Veri hızındaki artışın standartlara göre gelişimi Şekil 1.1’de verilmiştir [1-3].



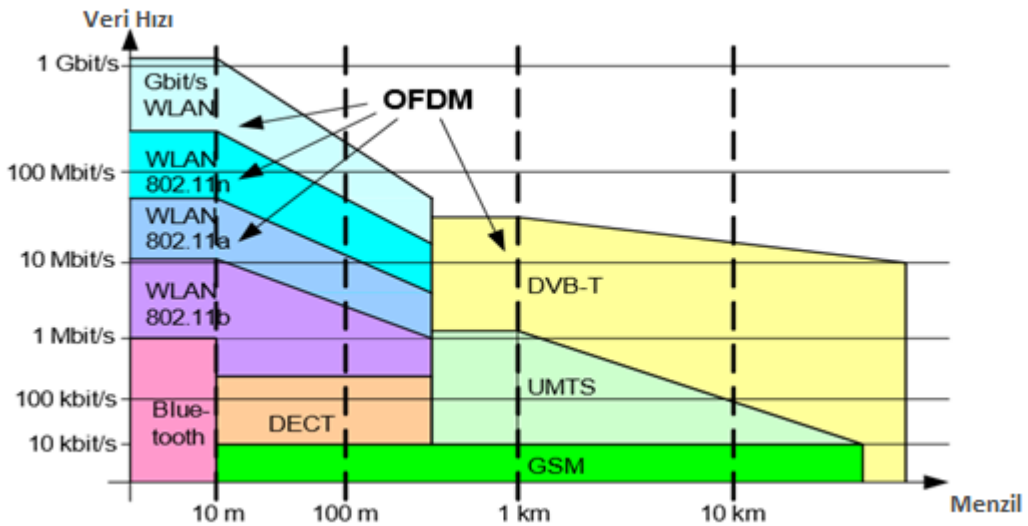
Şekil 1.1. Kablosuz haberleşme standartları ve özellikleri

Yeni nesil haberleşme sistemlerinin sunduğu bant genişliği verimliliği ve katlanarak artan iletim hızlarının gelişimi, bu sistemlerde kullanılan çoğullama ve modülasyon teknikleri, anten yapıları ve alıcı-verici tasarımlarıyla mümkün hale gelmiştir.

Bunun yanında kablosuz haberleşmede kullanılan kanal yapılarını istatistiksel olarak modelleme çalışmaları, farklı kanal kodlama ve hata kontrol kodlama yapıları ile denkleştirici tasarımları da bu gelişime katkıda bulunmaktadır.

Ayrıca OFDM sistemlere çok girişli çok çıkışlı (MIMO, multi-input multi-output) sistemlerin dâhil edilmesi de yeni nesil haberleşme sistemlerindeki performansı dolayısıyla iletim hızı ve bant genişliği verimliliğini ciddi oranda arttıran bir diğer önemli gelişim olarak karşımıza çıkmaktadır.

IEEE 802.11 Kablosuz Yerel Alan Ağları (WLAN, Wireless Local Area Networks) standardıyla birlikte başlayan daha sonra Mikrodalga Erişim için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (WIMAX, Worldwide Interoperability for Microwave Access) olarak adlandırılan 4G geniş bant kablosuz iletişim teknolojisi IEEE 802.16 standardıyla, devam eden kablosuz haberleşme standartlarında Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiple Acces) tekniği kullanılmaya başlanmıştır [4-5]. Aynı zamanda bir modülasyon tekniği olarak da kabul edilen OFDM tekniği [6] hem yüksek hızlı iletme cevap vermesi, hem de iletim hattını verimli bir şekilde kullanarak haberleşme kanalında meydana gelebilecek girişimlere ve çoklu yol kayıplarına karşı olan direncinden dolayı yeni nesil haberleşme standartlarının gövdesini oluşturmuş durumdadır.



Şekil 1.2. OFDM tekniğinin haberleşme standartlarındaki yeri [7]

Şekil 1.2’ de görüldüğü üzere OFDM tekniği gerek yüksek veri hızı için gerekse uzak mesafeler için haberleşme standartlarında kullanılan bir yöntem olarak önemini her geçen gün arttırmaktadır. OFDM tekniğinin kullanımının yaygınlaşmasına paralel olarak bu konuda yapılan çalışmalar da giderek hız kazanmıştır.

Bu çalışmaları OFDM sisteminin farklı kanal yapılarındaki performansını inceleyen çalışmalar, hata oranını azaltmak için kullanılan kodlama ve serpiştirici yapılarını inceleyen çalışmalar, kanal kestirimi ve denkleştirici yapılarını inceleyen çalışmalar, standartlarda belirlenen iletim ve kanal parametrelerini en iyi performansı verecek şekilde belirleyebilmek için deneysel ve istatistiksel çalışmalar olmak üzere dört ana başlık altında toplamak mümkündür.

Fazel ve Kaiser [8] OFDM tekniğinde pilot taşıyıcılar arasındaki mesafeyi, kanalın evre uyumlu zaman aralığı, bant genişliği ve alt taşıyıcı sayısı ile ilişkilendirerek bu parametrelerin sistem performansındaki etkilerini incelemiştir. Karabacak vd. [9] OFDM sisteminin düz ve hızlı sönmülemeli kanallardaki performansını incelemiş ve sistem performansının ICI’ya neden olan zaman seçici sönmülemeye karşı son derece duyarlı olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde Seyman N.M ve Taşpınar N. [10] çevrimsel ön ek tabanlı senkronizasyon tekniğinin AWGN kanalı ve Rayleigh sönmülemeli kanaldaki performansı, Bit Hata Oranı (BER) ve Ortalama Karesel Hata (MSE) kriterlerine göre bilgisayar benzetimi ile gerçekleştirmiş, BPSK modülasyon türünün AWGN kanal ve Rayleigh sönmülemeli kanal için diğer modülasyon türlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği, Ortalama Karesel Hata (MSE) kriteri dikkate alındığında AWGN kanalı için elde edilen sonuçların Rayleigh sönmülemeli kanal için elde edilen sonuçlardan daha iyi olduğu görülmüştür.

Diğer yandan kanal kestirim algoritmaları ile ilgili olarak Ohno ve Giannakis [11] eşit aralıklı ve eşit güçlü pilot sembollerinin kullanımının Ortalama Karesel Hata (MSE) kriterine göre kanal kestirimi hatasını en aza indirdiğini göstermiştir. Choi ve Lee [12] bant genişliğini kanalın frekans cevabına göre ayarlayan 2 boyutlu FIR filtreleri, lineer interpolasyon filtreler ile beraber kullanarak karmaşık olmayan bir kanal kestirimi algoritması sunmuş ve benzetimini gerçekleştirmiştir.

Farklı bir çalışma olarak Gupta. D., vd. [13] AWGN kanallarda OFDM sisteminde kullanılan Ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) yerine Ayırık Dalgacık Dönüşümü (DWT) ve ayırık kosinüs dönüşümünü (DCT) kullanmış ve bu dönüşümlerin BER performansına etkilerini karşılaştırmıştır.

Joshi, A. ve Saini, D. S. [14] blok serpiştirici yapısı ve Red Solomon kodlama tekniğinin OFDM sisteminin performansı üzerindeki etkilerini kodlama ve serpiştirici yapısı kullanılmayan OFDM sistemler ile karşılaştırmış, özellikle 16 QAM 64 QAM modülasyon tekniklerinin kullanıldığı yüksek veri hızlarında kanal kodlamanın performansı arttırdığını göstermişlerdir. Engiz, B.K vd. [15] ise pilot tabanlı kanal kestiriminde pilot bit yerleşiminin farklı kanal yapılarındaki OFDM sistem performansına etkisini incelemiş ve pilotlar arası mesafe ile kanalın evre uyumlu bant genişliği arasındaki ilişkiyi belirlemiştir.

Aida, Z., ve Ridha, B. [16] OFDM sistemde kanal kestirimi için Lineer En Küçük Ortalama Karesel Hata (LMMSE), En küçük Karesel Hata (LSE), Minimum En küçük Ortalama Karesel Hata (MMSE),Düşük Seviyeli Minimum En Küçük Ortalama Karesel Hata (LRMMSE) algoritmalarını kullanarak zamanla değişen kanallardaki performanslarını karşılaştırmıştır. 16 QAM modülasyon yapısı ve blok tipi pilot yerleşim planını kullandığında LMMSE algoritmasının en iyi performansı verdiğini görmüş fakat düşük SNR değerlerinde tüm algoritma çeşitlerinin de benzer performanslar gösterdiğini tespit etmiştir. Sharma ve Srivastava [17] çok yollu kanallarda tek taşıyıcılı modülasyon sistemleri ile çok taşıyıcılı OFDM sistemlerinin Benzetimlerini gerçekleştirerek karşılaştırmış ve çok taşıyıcılı sistemlerin üstünlüğünü göstermiştir. Savaux. V. vd. [18] frekans seçici kanal yapılarında SNR kestirimi için iteratif bir yöntem sunmuş, OFDM sisteminde kullanılan pilot bitleri de kestirim için kullanılan veriler olarak alınmıştır. Kanal kestirimi için MMSE algoritması kullanılmış ve yöntemin maksimum 0.5 dB hatayla çalıştığı gösterilmiştir.

Son zamanlarda OFDM sistemlerine Çok Girişli Çok Çıkışlı (MIMO) sistemlerin dâhil edilmesiyle birlikte yeni çalışmalar gündeme gelmiştir. Bu konuda Faezah. J., ve Sabira. K. [19] OFDM sisteminin kullanıldığı 4G standartlarında, kestirilen SNR değerine göre modülasyon türünü belirleyerek optimum iletim hızı sunan adaptif modülasyon tekniğini incelemiş, kanal kodlamasının performanstaki etkisini karşılaştırmışlardır. Benzer şekilde Sastry. K. S. vd. [20] SNR kestirimi için bulanık mantık yöntemi kullanmışlardır. Nassar, M vd. [21] çok girişli çok çıkışlı MIMO sistemler için çoklu yol gecikmelerini yüksek çözünürlükle tahmin eden bir kanal kestirim algoritması sunmuştur. Shah, S.K vd. [22] LTE sistemler için Yapay Sinir Ağı tabanlı kanal Geri Yayılım Algoritması (BPA) ve Genetik Algoritmasını (GA) kullanarak kanal kestirimi performanslarını karşılaştırmıştır.

Bu tez çalışmasının esas amacı; ilgili literatür ışığında, yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılan OFDM tekniğini incelemek, kablosuz haberleşme kanalları için oluşturulan istatistiksel kanal yapılarını kullanarak sistemin benzetimini gerçekleştirmek ve performansını değerlendirmektir. Bu amaçla sistem performansını etkileyen en önemli kısım olan kanal kestirimi ve denkleştirici yapıları ele alınarak sistemin performansına olan katkıları gözlemlenecek, farklı kanal yapıları kullanılarak OFDM tekniğinin performansı üzerindeki etkileri incelenecektir.

Ayrıca OFDM tekniğinin gövdesini oluşturduğu IEEE 802.11 WLAN kablosuz haberleşme standartları da bir iletişim sisteminin tüm yönleriyle ele alınması ve çalışmaya örneklik teşkil etmesi bakımından incelenerek OFDM tekniğinin kullanım alanları gösterilecektir. Bu doğrultuda ilgili standartların parametreleri verilecek, kanal kodlama ve hata kontrol kodlaması gibi alt yapılar da sırayla ele alınarak sistem performansı üzerindeki etkileri incelenecektir.

1.1 Tezin Organizasyonu

Tezin organizasyonu ve bölümleri ile ilgili kısa açıklamalar şu şekildedir;

Tezin ikinci bölümünde kablosuz haberleşme kanalındaki bozucu etkiler ele alınmış ve matematiksel olarak haberleşmedeki etkileri gösterilmiştir. Daha sonra benzetim için kullanılacak olan istatistiksel kanal modelleri ele alınarak bu kanal modellerinin parametreleri incelenmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde OFDM sisteminin çalışma prensibi anlatılarak, blok diyagramı verilmiş ve her bir alt bloğun sistemdeki görevi ele alınarak açıklanmıştır. Sistemin kullanılma sebepleri ve avantajlarına değinilmiştir.

Dördüncü bölümde OFDM tekniğinin kullanıldığı haberleşme sistemlerinde performansı en çok etkileyen faktör olan kanal kestirimi ve denkleştirici yapıları anlatılarak farklı kanal kestirim algoritmaları verilmiştir. Katlamalı kanal kodlama ve serpiştirici yapıları incelenerek sistem performansına olan katkıları açıklanmıştır. OFDM yapısı Matlab Simulink platformunda Communication Toolbox blok yapıları kullanılarak oluşturulmuştur. LS, MMSE, LMMSE kanal kestirim algoritmaları kullanılarak benzetim sonuçları elde edilmiştir.

Ayrıca OFDM tekniğinin kullanım alanlarından biri olan 802.11a WiFi kablosuz haberleşme standardının fiziksel katmanı verilerek, farklı modülasyon türlerine göre denkleştirici yapısının, alıcıda elde edilen sinyaldeki etkisini gösteren yıldız kümesi diyagramları verilmiştir.

Beşinci bölümünde farklı kanal yapıları kullanılarak elde edilen benzetim sonuçları yorumlanarak sonuçlar çıkartılmıştır.

Tezin son bölümünde ise bu konuda yapılacak diğer çalışmalara katkı sunması ön görülerek önerilerde bulunulmuştur.

2.KABLOSUZ HABERLEŞME KANAL MODELLERİ ve KARAKTERİSTİKLERİ

Kablosuz haberleşme sistemlerinin incelenmesi düşünüldüğünde, ilk ele alınması gereken konu kanal modelinin tasarımıdır. Vericiden gönderilen işaret, alıcıya ulaşmaya kadar farklı çevresel etkiler ve şartlara maruz kalmaktadır. Bu etkiler, kablosuz haberleşme teknolojisinde çok önemli rol oynadığından kanal modelinin tasarımı da önemli hale gelmektedir.

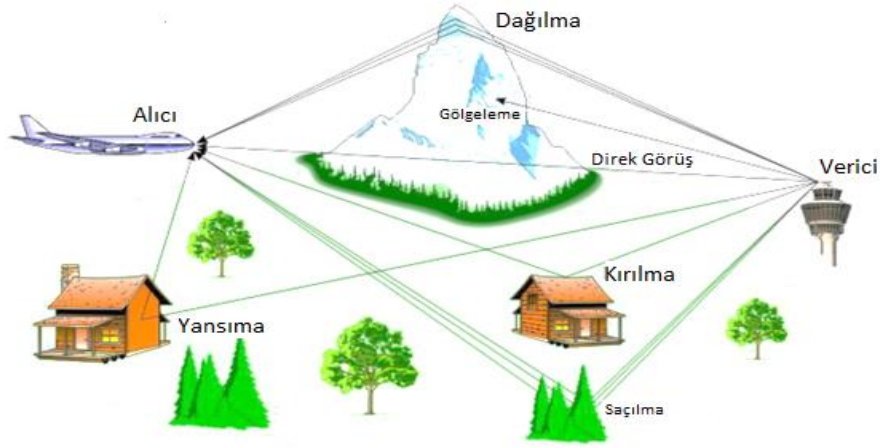
Kablolu ve kablosuz haberleşme ağlarının her ikisi de iletişim için alıcı ve verici çiftlerine sahiptir. Fakat bu iki ağ arasında, iletişim sisteminde ilerleyen sinyallerin karşılaştığı durumlar göz önüne alındığında oldukça büyük farklılıklar bulunmaktadır. Kablosuz haberleşme ağları, sinyal yayılımının yönüne karar verecek kablo gibi bir kılavuza sahip değildir, hâlbuki kablolu ağlarda işaret sadece kablo tarafından kılavuzlanarak gitmektedir. Bu durumda kablo kesilmedikçe veya zarar görmedikçe, haberleşme kanalı genel olarak her noktada aynı karakteristikleri sergiler. Dolayısıyla, herhangi biri, mesafeye bağlı olarak alınacak güç gibi, gönderilen sinyallerin davranışlarına hesapsal olarak karar verebilir. Kablosuz haberleşme için ise bu durum sadece alıcı ile verici arasında herhangi bir engel olmadığı ideal durum olan boş uzay ortamında geçerlidir [23].

Kablosuz haberleşme kanallarının matematiksel olarak kesin bir şekilde açıklanması pek mümkün olmamakla birlikte istatistiksel modelleme ile kanal yapılarının davranışlarının parametrik olarak tahmin edilmesi mümkün olabilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar daha çok istatistiksel modelleme üzerinde yoğunlaşmaktadır ve bu çalışmalar sonucunda temel kablosuz haberleşme senaryolarına ve belirgin dalga yayılım kanunlarına bağlı kalmak şartıyla basit ve doğruya çok yakın istatistiksel modeller oluşturulabilmektedir [24].

2.1 Kablosuz Haberleşme Kanallarında Bozucu Etkiler

Kablosuz haberleşmede verici anten tarafından gönderilen sinyaller, doğrudan görüşü engelleyen nesnelerin araya girmesiyle alıcı antene direk olarak ulaşamazlar. Alıcıya gelen sinyal, bu nesnelere çarparak yansıyan, kırılan veya saçılan sinyallerin toplamı şeklinde ulaşmasıyla oluşur. Bu durumda çoklu yol (multipath) veya çok yollu etkisi oluşur. Çok yollu yayılma yüzünden alıcıda oluşan sinyal çoklu yol sayısınca sönümlenmiş, gecikmiş, frekansı ve fazı kaymış olarak gelen sinyallerin toplamı olarak oluşmaktadır.

Bu durumda sinyaller birbirine girişim yaparak bozulmalara sebep olmaktadır. Alıcıya gelen farklı genlikli, frekanslı ve fazlı gecikmiş bu sinyaller bazen yararlı olabileceği gibi çoğu zaman bozucu etki göstermektedir [25]. Bu bozucu etkileri ele alacak olursak, elektromanyetik dalgalar enerjilerinin bir kısmını nesnelerin içerisinde geçmek için harcarken diğer kısmı bu nesnelere çarparak geri döner. Bu durum yansıma(reflecting) olarak tanımlanır. Diğer taraftan elektromanyetik dalgaların özellikle keskin ve küçük boyutlu engellere çarparak dağılması sonucu kırılma (diffraction) meydana gelir. Gölgeleme (shadowing) gönderilen sinyalin genellikle büyük bir engel tarafından tamamının engellenerek vericiye ulaşamaması iken saçılma (scattering) ise elektromanyetik dalganın özellikle bozuk ve pürüzlü yüzeye sahip nesnelere çarparak dağılması olarak ifade edilmektedir. Şekil 2.1’de bu etkileri birlikte resmeden bir senaryo verilmiştir.

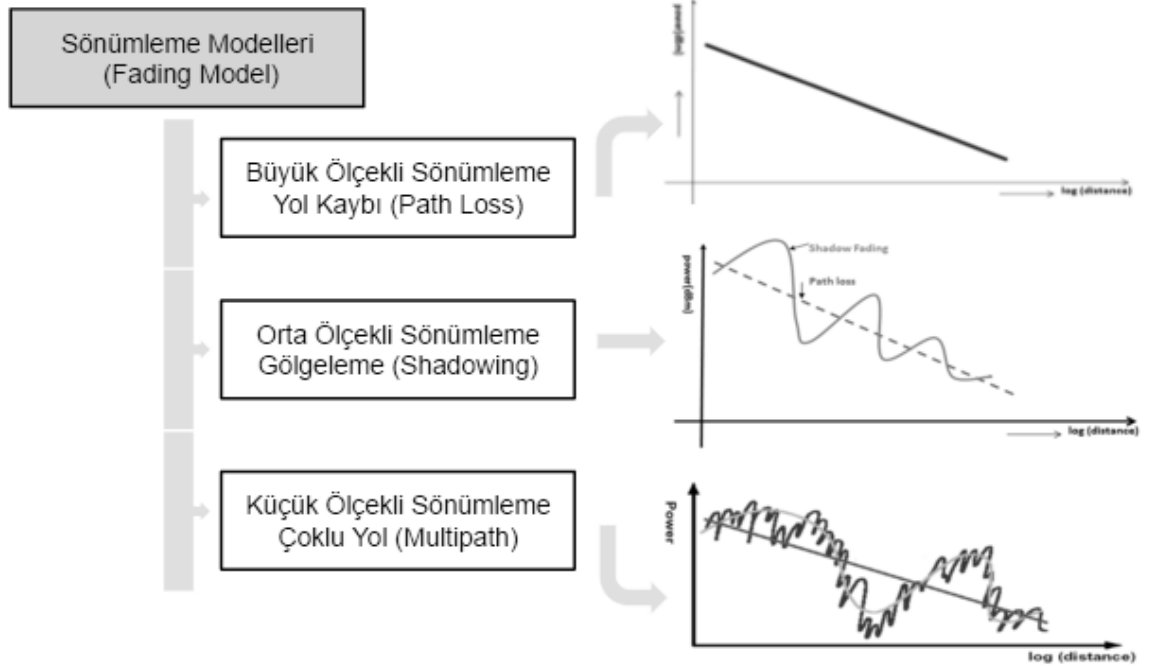


Şekil 2.1. Kablosuz haberleşmedeki bozucu etkiler

Bu bozucu etkilerin alıcı verici arasındaki uzaklığa bağlı olarak oluşturduğu sönümlenme karakteristikleri farklı olmaktadır. Kablosuz haberleşmede elektromanyetik dalgaların yayılım karakteristikleri genel olarak;

- Büyük Ölçekli Sönümlenme Modeli (Large Scale Model)→ Yol Kaybı
- Orta Ölçekli Sönümlenme Modeli (Medium Scale Model)→ Gölgeleme
- Küçük Ölçekli Sönümlenme Modeli (Small-Scale Model)→ Çoklu Yol Sönümlenmesi

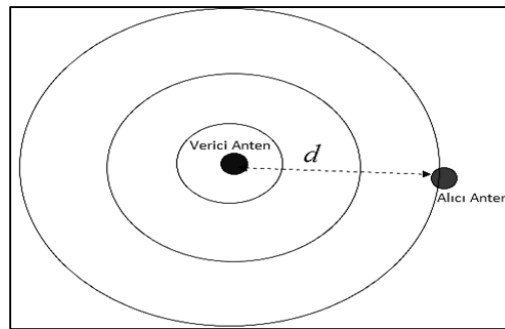
Şeklinde üç seviyede tanımlanır. Bu üç etki ve toplam karakteristikleri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Sönümlenme modelleri ve etkilerinin gösterimi

2.1.1 Büyük Ölçekli Sönümlenme (Yol Kaybı)

Elektromanyetik dalga, boş uzayda yayılırken dalgaının güç yoğunluğunda bir azalma olur ve bu, yol kaybı veya sinyal zayıflamasına sebep olur. Arazi şekilleri, farklı çevreler, yayılım ortamı, alıcı ve verici arasındaki mesafe, antenlerin yüksekliği ve yerleşimi gibi bazı faktörler yol kaybını etkiler.



Şekil 2.3. Elektromanyetik dalgaların boş uzayda yayılımı

Boşluk uzayında radyo sinyalleri ışık gibi frekanstan bağımsız olarak, yerçekimiyle ilgili etkilerin yanında doğru bir çizgi takip ederler. Eğer alıcı ile verici arasında bu şekilde bir doğru çizgi var ise buna görüş hattı (nişan çizgisi) denir. Eğer alıcı ile verici arasında herhangi bir engel yoksa (örneğin boşluk varsa) işaret hala boşluk uzay kaybına maruz kalır.

Alınan güç, alıcı ile verici arasındaki mesafenin karesiyle doğru orantılı olarak azalır. Bu olayın sebebi gayet basittir. Göndericiyi uzayda bir nokta olarak düşünürsek, işaret belli bir enerji ile yayılacaktır. Bu işaret, göndericiden ışık hızıyla küresel şekilli dalga olarak uzaklaşır. Şekil 2.3’ de bu durum gösterilmiştir. Eğer, herhangi bir engel yoksa bu küre sürekli büyür ve gönderilen enerji kürenin yüzeyinde eşit olarak dağılır. F, iletişim yapılan frekansı belirtmek üzere Denklem (1), Denklem (2) ve Denklem (3) de yol kaybını dB cinsinden veren ifadeler elde edilmiştir.

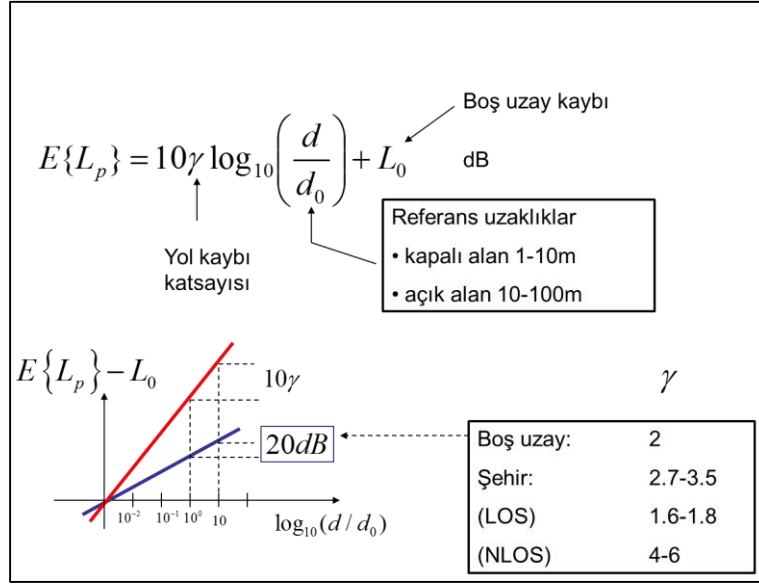
$$\text{Alıcıda gözlenen güç } P_R = \frac{P_T}{L_P} = \frac{\text{Verici Gücü}}{\text{Yol Kaybı}}; P_R(dB) = P_T(dB) - L_P(dB) \quad (1)$$

$$P_{receiver} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 P_{transmitter} \quad (2)$$

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{transm}}{P_{rec}} \right) = 20 \log_{10}(F(Mhz)) + 20 \log_{10}(d(km)) + 32.45 \quad (3)$$

2.1.2 Orta Ölçekli Sönümlleme (Gölgeleme)

Gerçek hayatta boşluk bulunmamaktadır. Kablosuz iletim atmosfer, dağlar, binalar veya hareket eden alıcı ve verici gibi zayıflatıcı unsurların neden olduğu bozucu etkilerin üstesinden gelmek zorundadır. Alınan güç, alıcı-verici antenlerinin kazancı, iletişim frekansı ve uzaklığa bağlıdır. Fakat alıcı -verici arasında herhangi bir nesne bulunduğu zaman, durum çok karmaşık olmaktadır. Orta ölçekli sönümlleme için Hata, Okumura, Cost 231 gibi farklı kanal yapıları bulunmaktadır. Bu modellerde kullanılan referans değerler ve denklemler Şekil 2.4’te ve Denklem (4) Denklem (5) de verilmiştir [23,26].



Şekil 2.4. Orta ölçekli sönümlleme karakteristiği[27]

$$L_p = E\{L_p\} + \sigma; \quad \sigma = 6 - 12 \text{ dB} \quad (4)$$

Yol kaybı için ortak bir deneysel (empirical) modeldir. Ortalama alınan sinyal gücünün logaritmik olarak zayıfladığı ölçümler ile görülmüştür. Bu modelde ortam şekline göre yol kaybı bileşeni değerleri Şekil 2.4'te verilmiştir.

$$P_L(d)_{dB} = P_L(d_0)_{dB} + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (5)$$

Burada, $P_L(d_0)$: dB cinsinden referans mesafedeki (d_0) ortalama yol kaybıdır, n : yayılım ortamına bağlı bir katsayı/değerdir, d : alıcı ile verici arasındaki metre cinsinden mesafedir.

2.1.3 Küçük Ölçekli Sönümlleme (Çok Yolluluk)

Çoklu yol sönümllemede, gönderilen işaret çoklu yol yayılım ortamı içinde genliğinde, fazında ve frekansında değişimlerle karşılaşmaktadır. Sonuç olarak, bunlar karmaşık zarf oluşumuna olumlu ya da olumsuz etki yaparlar. Eğer hiç direk görüş bileşeni yok ve fazla miktarda çoklu yansıtıcı yollar varsa NLOS (No Loss of Sight), bu küçük ölçekli sönümlleme Rayleigh kanal yapısıyla modellenir.

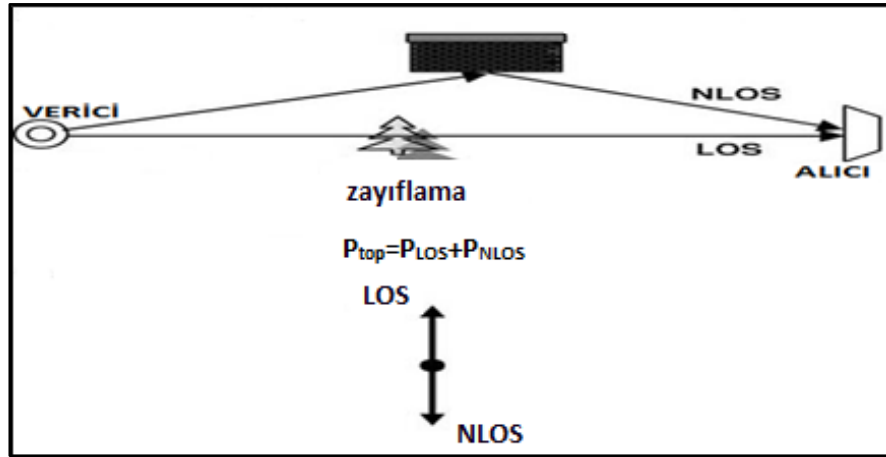
Eğer direk görüş bileşeni ile birlikte çoklu yansıtıcı yollar var ise LOS (Loss of Sight), bu tip sönümlenme de Rician kanal yapısıyla modellenir.

Bu dağılımın anahtar elemanı, direk bileşenin gücünün saçılmış bileşenin gücüne oranını gösteren K faktörüdür.

$$P_{Los} = \frac{K}{1+K} P_{Toplam} \quad (6)$$

$$P_{NLos} = \frac{1}{1+K} P_{Toplam} \quad (7)$$

LOS ve NLOS yapısı Şekil 2.5’de verilmiştir. Haberleşme kanalındaki bu yollardan alıcıya gelen güç formülleri K faktörünün etkisine göre Denklem (6) ve Denklem (7) da verilmiştir.



Şekil 2.5. Doğrudan ve doğrudan olmayan görüş senaryosu

2.1.4 Çok Yollu Sönümlenme Karakteristikleri

Çoklu yol sönümlemesinden kaynaklı sönümlenme çeşitleri aslında kanalın iki parametresine bağlı olarak tanımlanmaktadır. Bu parametreler;

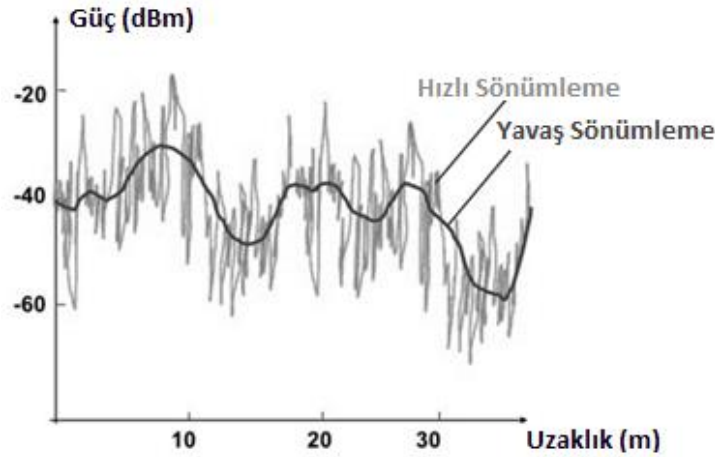
- Evre uyumlu periyot süresi (coherence time) T_c kanal tepkisinin değişmeden kaldığı yaklaşık zaman aralığı
- Evre uyumlu bant genişliği (coherence bandwidth) W_c kanal tepkisinin değişmeden kaldığı yaklaşık frekans aralığı

olarak adlandırılmaktadır.

Bu parametrelerden evre uyumlu periyot süresine bağlı olarak hızlı sönmleme ve yavaş sönmleme karakteristikleri oluşurken, evre uyumlu bant genişliğine bağlı olarak düz sönmleme ve frekans seçici sönmleme karakteristikleri oluşur.

2.1.5 Hızlı ve Yavaş Sönmleme (Fast and Slow Fading)

Sönmlemenin hızlı veya yavaş olması T_c evre uyumlu periyot süresine bağlıdır. Evre uyumlu periyot süresi aynı zamanda kanalın Doppler yayılımına da bağlıdır. Doppler yayılımına F_D dersek T_c yaklaşık olarak $1/F_D$ olur. T_s sembol süresi eğer T_c evre uyumlu periyot süresinden kısa ise yavaş sönmleme karakteristiği oluşur [28]. Bu durumun tersi olduğunda ise hızlı sönmleme karakteristiği oluşur. Şekil 2.6'da yavaş ve hızlı sönmleme karakteristikleri bir arada verilmiştir.



Şekil 2.6. Yavaş ve hızlı sönmleme karakteristikleri

2.1.6 Düz Sönmleme (Flat Fading)

Eğer kanal kazancı sabit ve kanalın evre uyumlu bant genişliği işaretin bant genişliğinden daha büyük bir bant genişliğine sahipse, kanal yapısı düz sönmlemeli kanal olarak tanımlanır. Haberleşme kanalında iletilen sinyalin bant genişliğinin kanalın evre uyumlu bant genişliğinden küçük olduğu durumlarda iletilen sinyalin frekans spektrumu kanal tarafından sınırlandırılmış olur. Bu durum zaman düzleminde yayılmaya neden olduğundan simgeler arası girişime neden olmaktadır. Bu kanallara aynı zamanda genlik değiştiren ya da dar bantlı kanallar da denmektedir [28].

2.1.7 Frekans Seçici Sönümlleme (Frequency Selective Fading)

İşaretin band genişliğinin, kanalın evre uyumlu bant genişliğinden çok küçük olduğu durumlarda meydana gelir. Daha açık ifade edilecek olursa kanal farklı frekanslardaki spektral bileşenlere farklı genlikte kazançla ve farklı frekansta ötelemeyle etki ediyorsa bu frekans seçici sönümlmeli kanal olarak tanımlanır. Bu kanallara aynı zamanda faz değiştiren ya da geniş bantlı kanallar da denmektedir [28].

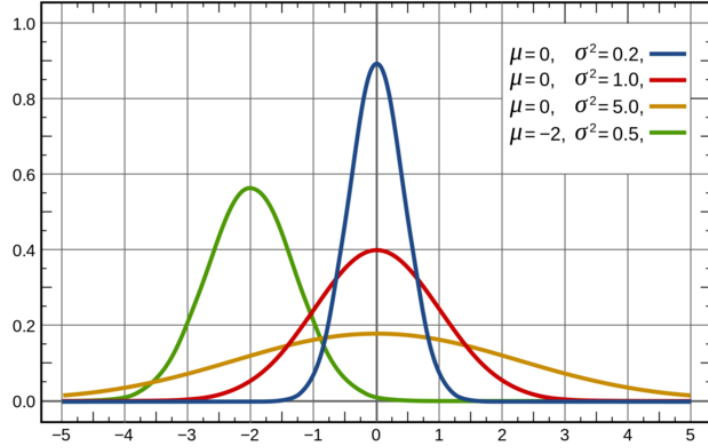
2.2 İstatistiksel Kanal Modelleri

Kablosuz haberleşme sistemlerinin tasarım ve analizini yapmak için, kanal modelleri onların zaman, frekans ve boşluktaki değişimlerini de içerecek şekilde geliştirilmelidir. Modeller ya istatistiksel ya da deneysel olarak sınıflandırılır. İstatistiksel modeller, analiz ve benzetimler için, genellikle kanalın özel durumlarını daha yüksek doğrulukta temsil eden ve daha karmaşık olan deneysel modellerle karşılaştırıldığında, daha basit ve kullanışlıdır. Yukarıdaki şartlar düşünülerek kanal modeli tasarlandığında ve doğal şartlar altında, bu çevresel parametrelerin kanal benzetimlerinde istatistiksel olarak hesaplaması mümkündür. Bunun için her bir parametre ayrı ayrı değerlendirilerek incelenmelidir [29,30].

2.2.1 AWGN Kanal Modeli ve Güç Spektral Yoğunluğu

Sadece Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültüsünün (AWGN) etkin olduğu kanal modelidir. Bu modeldeki gürültünün gücünün olasılık yoğunluk fonksiyonu Gauss yapısında olduğundan bu şekilde isimlendirilir. Denklem (8) de bu kanal yapısının güç spektral yoğunluğu fonksiyonu verilmiş ve Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

$$p(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(r-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad -\infty < r < \infty \quad (8)$$

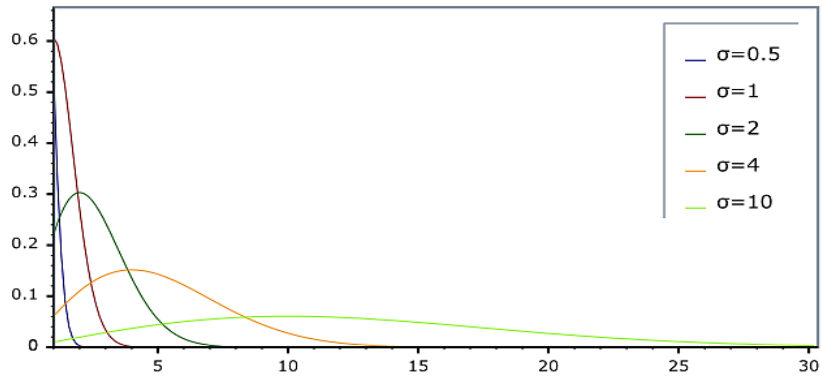


Şekil 2.7. AWGN kanal güç spektral yoğunluğu

2.2.2 Rayleigh Kanal Modeli ve Güç Spektral Yoğunluğu

Verici ile alıcının birbirini görmediği durumlarda, alınan işaretin genlik ve fazında büyük değişimler meydana gelebilir. Alınan işaretin zarfındaki değişimler Rayleigh dağılım fonksiyonu ile modellenenir. Denklem (9) da bu kanal yapısının güç spektral yoğunluğu dağılımı verilmiş ve Şekil 2.8’de gösterilmiştir.

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp(-r^2 / 2\sigma^2), & 0 \leq r \leq \infty \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (9)$$



Şekil 2.8. Rayleigh kanal güç spektral yoğunluğu

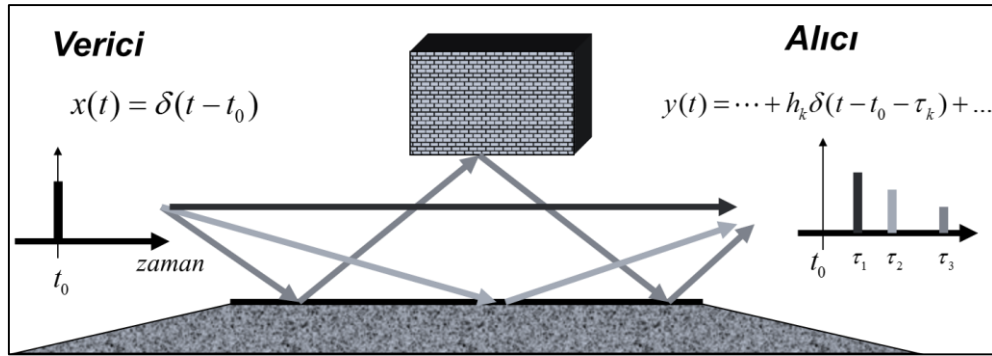
2.2.3 Rician Kanal Modeli ve Güç Spektral Yoğunluğu

Verici ile alıcının birbirini görebildiği durumlarda, alınan işaretin genlik ve fazında büyük değişimler meydana gelmez. Direkt görüş bileşeninin genliği diğerlerine göre oldukça büyüktür. Alınan işaretin zarfındaki değişimler Rician dağılım fonksiyonu ile modellenebilir. Denklem (10) da bu kanal yapısının güç spektral yoğunluğu dağılımı verilmiştir.

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-(r^2 + B^2)/2\sigma^2\right] I_0\left(\frac{Br}{\sigma^2}\right), & B \geq 0 \text{ ve } r \geq 0 \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (10)$$

2.2.4 Zamanda Gecikme

Zamanda gecikme, aynı işaretin farklı yollar izleyerek alıcıya ulaşması sonucunda oluşmaktadır. Bu durum Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



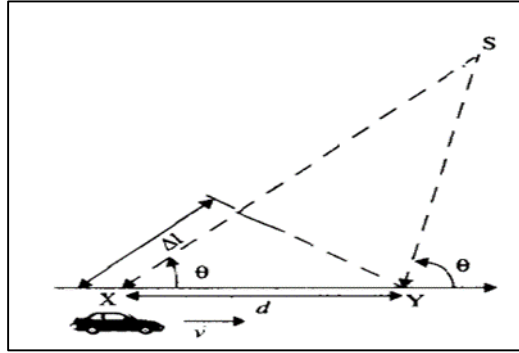
Şekil 2.9. Zamanda yayılma senaryosu [27]

Kanal modellerinde gecikmeler referans olarak aşağıdaki gibi alınmaktadır.

- Kapalı Alan: 10-50 nano saniye.
- Şehir: 1-3 mikro saniye.
- Dağlık Alan: 10-30 mikro saniye.

2.2.5 Frekansta Kayma (Doppler Kayması)

Haberleşme sistemindeki alıcı-verici yapılarının veya çevre içinde bulunan nesnelerin göreceli hareketi alınan sinyallerde frekans kaymalarına neden olur. Dolayısıyla vericinin, alıcının veya çevredeki yansıtıcı unsurların hareketleri Doppler etkisi meydana getirir ve Doppler frekans kayması oluşur. Şekil 2.10'da bu durum gösterilmiştir. Denklem (11) ve Denklem (12)'de Doppler kayması ifadesi verilmiştir.



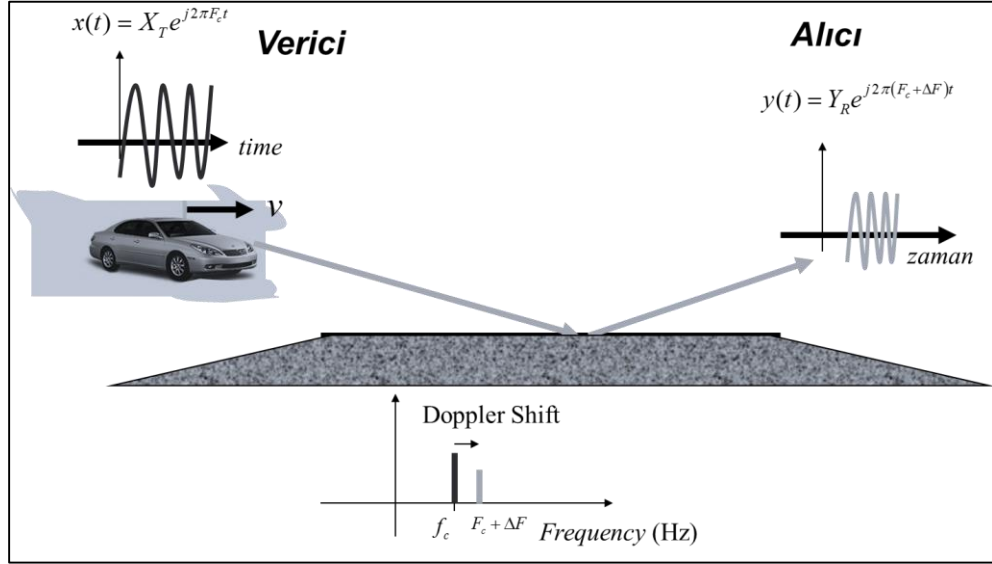
Şekil 2.10. Doppler kayması

$$\Delta\theta = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v\Delta t}{\lambda} \cos(\theta) \quad (11)$$

$$F_D = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos(\theta) \quad (12)$$

Doppler etkisi çoklu yol oluşumunun yanı sıra mobil haberleşme sistemlerinin karakteristiğine de negatif etki yapmaktadır. Mobil ünitenin hareket etmesinden dolayı her bir dalganın hareket yönüne mobil ünitenin de hareketi eklenince frekansta bir kayma meydana gelecektir. Doppler etkisine bağlı olarak, iletilen işaretin spektrumunda iletim boyunca genişleme olacaktır. Bu genişlemeye frekans dispersiyonu denir. Frekans dispersiyonunun değeri maksimum Doppler frekansına ve gelen dalgaların genliğine bağlıdır. Doppler etkisi, zaman düzleminde kanalın darbe cevabını zamanla değişen yapmaktadır. Mobil radyo kanalları lineer sistemlerdir. Darbe cevabının zamana bağlı olması sonucunda mobil radyo kanalları lineer zamanla değişen kanallar olmaktadır. Çoklu yol oluşumu, mobil birimin hareketi ile birlikte alıcıdaki sinyalde ani ve rasgele değişimlere neden olur. 3-4 dB mertebelerinde veya daha aşağı değerlerde sönümlenme gerçekleşebilir ve bu değer mobil ünitenin hareket hızına ve taşıyıcı frekansa bağlıdır.

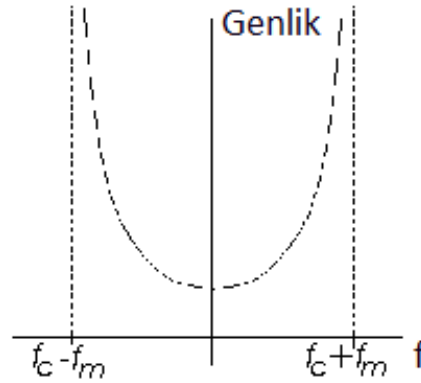
Doppler etkisi sonucunda iletilen işaret alıcıdan alınırken bir frekans kaymasıyla beraber alınır. Bu durumu gösteren yapı Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Frekansta yayılma senaryosu [27]

Rasgele dağılan Doppler kaymasının frekans spektrumu $(0-2\pi)$ aralığında tanımlanmaktadır. Bu durumda Frekans spektrumunun ifadesi Denklem (13)’ de Doppler frekans spektrumunun yapısı Şekil 2.12’de verilmiştir.

$$S(f) = \frac{1}{2\pi F_D \sqrt{1 - \left(\frac{f}{F_D}\right)^2}} \quad (13)$$

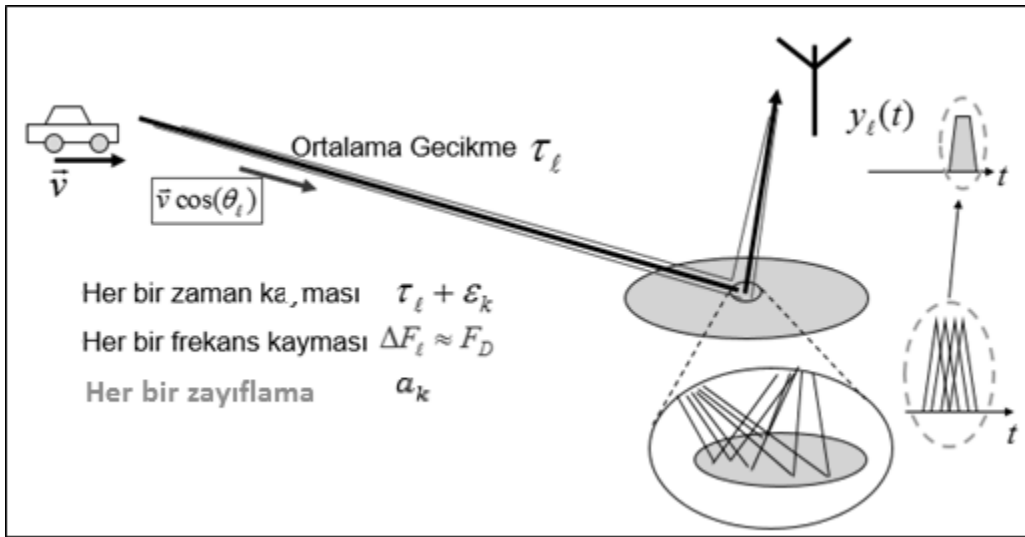


Şekil 2.12. Doppler frekans spektrumu

Haberleşme kanallarının tüm bozucu etkileri bir arada değerlendirilebilir. Böyle bir model Şekil 2.13'te verilmiştir. Bu yapıya göre her bir yolun zayıflaması, ortalama zaman kayması ve frekans kayması (maksimum Doppler kayması) belirlenecek olursa kanal çıkışında oluşacak sinyalin matematiksel ifadesi Denklem (14) de verildiği gibi olmaktadır.

- Zaman Gecikmeleri; $T = [\tau_1 \tau_2 \dots \tau_N]$
- Zayıflamalar; $P = [P_1 P_2 \dots P_N]$
- Maksimum Doppler Kayması; F_D

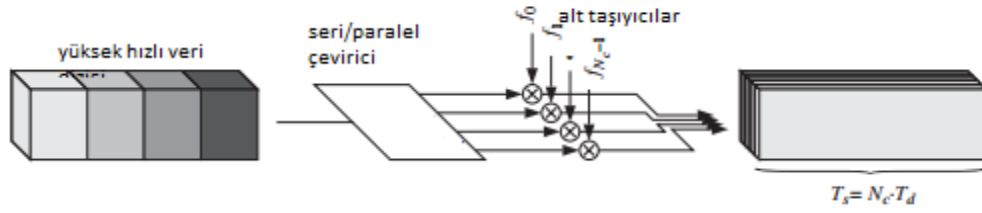
$$y_\ell(t) = \left\{ \left(\sum_k a_k e^{j2\pi(F_c + \Delta F_\ell)(t - t_\ell - \varepsilon_k)} x(t - \tau_\ell - \varepsilon_k) \right) \right\} \quad (14)$$



Şekil 2.13. Tüm etkilerin beraber olduğu senaryo [27]

3. OFDM YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Günümüzde tek taşıyıcılı modülasyon sistemleri yerini, haberleşme kanallarındaki bozucu etkilere olan dayanıklılığı, sağladığı yüksek veri hızı ve bant genişliğinin verimli kullanılması gibi avantajlardan ötürü çok taşıyıcılı modülasyon sistemlerine bırakmıştır. OFDM, sinyallerin çok taşıyıcılı iletimi için tek bir veri akışının daha düşük hızlı alt taşıyıcılar üzerinden aktarıldığı popüler bir modülasyon tekniğidir. Şekil 3.1’de iletilen verinin alt taşıyıcı sayısınca bölünerek farklı frekanslardaki taşıyıcılarla iletildiği gösterilmiştir. OFDM, çok yollu kanallarda bile sayısal veriyi etkili ve güvenli olarak radyo kanalından aktarmaya izin veren modülasyon(mapping) planı olarak da tanımlandığından dolayı modülasyon tekniği veya çoğullama tekniği olarak görülmektedir [31].

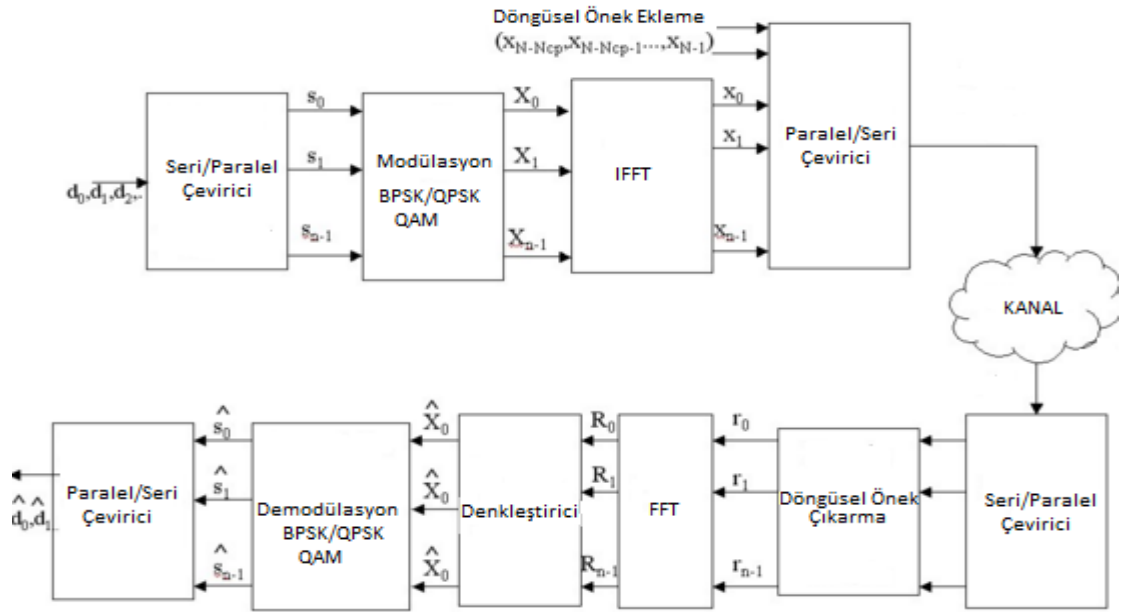


Şekil 3.1. OFDM çok taşıyıcılı modülasyon yapısı

3.1 OFDM Sisteminin Çalışma Prensibi

OFDM aslında teknik olarak, Frekans Bölmeli Çoğullamaya (Frequency Division Multiplexing, FDM) benzemektedir. FDM tekniği ile aynı haberleşme kanalında her bir alıcı için farklı frekanslar kullanılır. Bu frekanslar, birbirlerinden güvenlik aralığı bırakılmış şekilde uzak ve iletilen sinyaller frekans bölgesinde birbiriyle çakışmayacak bir şekilde yerleştirilmiştir. Alıcıda, her bir işaret, ayarlanabilir bant geçiren filtreler yardımıyla, alıcıya tahsis edilmiş frekans bandı dışındaki bütün frekans bileşenleri bastırılır ve demodülasyon ile tekrar elde edilir. OFDM tekniğinde ise FDM de kullanılan farklı frekans bölüştürme işleminde dikgen taşıyıcılar kullanılarak bant genişliği önemli ölçüde düşürülmektedir. Şekil 3.2’de OFDM sisteminin blok diyagramı verilmiştir. Yüksek hızlı veri katarı önce seri/paralel çevirici yardımıyla düşük hızlı N adet alt kanala bölünür. Bölünen her bir yeni veri dizisi bir birine dikgen alt taşıyıcılar ile iletilir. İletilen sinyallere göre taşıyıcı BPSK, QPSK veya QAM modülasyonuna göre kiplenir.

Daha sonra Ters Fourier Dönüşümü (IFFT, Inverse Fast Fourier Transform) alınarak frekans bölgesindeki sinyaller zaman bölgesine çevrilir. Son olarak simgeler arası girişimi önlemek için çevrimsel önek ekleme işlemi gerçekleştirildikten sonra alt taşıyıcılarla taşınan her bir veri dizisi paralel/seri çeviriciyle birleştirilerek iletim ortamına aktarılır.



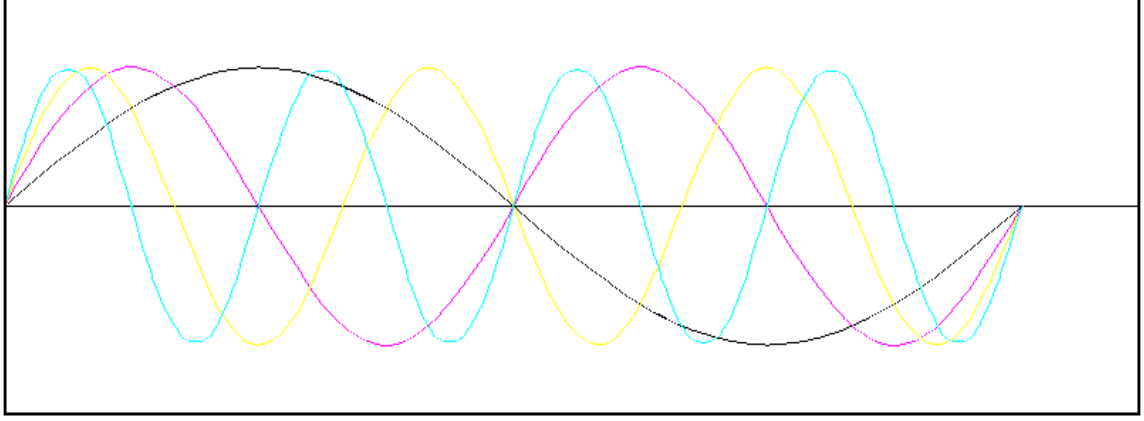
Şekil 3.2. OFDM blok diyagramı

3.2 Dikgenlik (Orthogonality)

OFDM, veriyi çok sayıda dar bant genişliğine sahip (düşük veri hızlı) taşıyıcılar kullanarak iletir. Bu taşıyıcılar, frekans düzleminde birbirine karışmayacak şekilde seçilmiştir. Zaman düzleminde üst üste gelen sinyaller dikgen olduğu takdirde frekans düzleminde birbirlerine girişim yapmamaktadır. İletilen işaretlerin dikgen olması için gereken matematiksel şart Denklem(15) de verilmiştir. Böylece dikgen (orthogonal) işaretler birbiri ile karışmaz ve alıcıda düzeltme/ayırma teknikleri ile ayrılabilirler. Bu prensip dikgen taşıyıcıların haberleşme sistemlerinin bant genişliğini düşürmede kullanılmaya başlanmasına neden olmuştur.

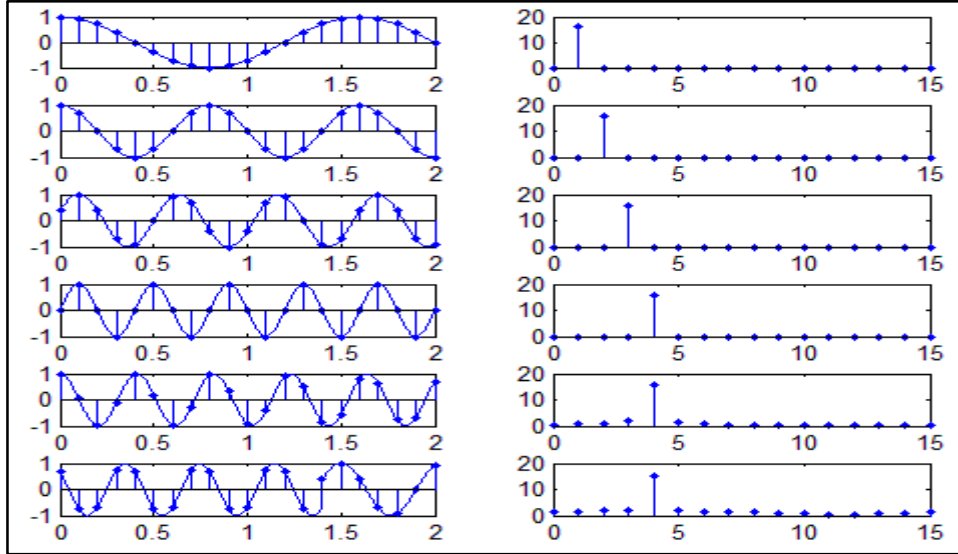
$$\int_b^a \varphi_n \cdot \varphi_m = 0, \quad n \neq m \quad (15)$$

Örnek olarak OFDM ile iletilecek olan her bir sembol dizi $(s_0, s_1, \dots, s_n)$ için kullanılacak alt taşıyıcılar c_n ; $f_0, f_1, \dots, f_n$ ardışık tam katlar olmak üzere Denklem (16)'daki gibi seçilebilir. Bu durumda zaman düzleminde gönderilen işaret Şekil 3.3'deki gibi olmaktadır. Aynı fazda seçilen bu taşıyıcıların her birinin hızlı Fourier (FFT) dönüşümü alınınca oluşan frekans spektrumları Şekil 3.4'de verilmiştir.



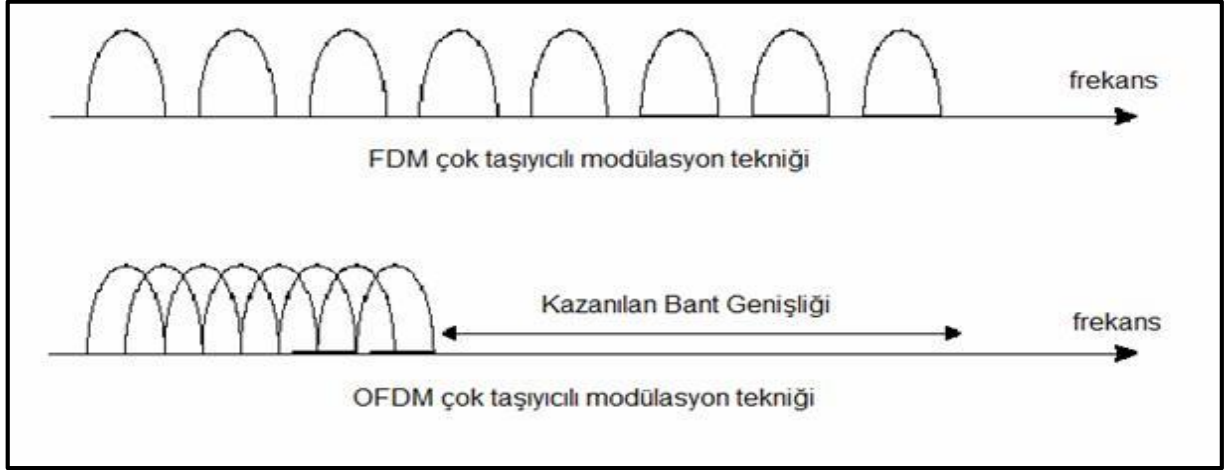
Şekil 3.3. OFDM taşıyıcılarının zaman düzlemi görüntüsü

$$c_n(t) = \begin{cases} A_0 * \cos(2\pi f_0 t + \theta_0), & s_0 \\ A_1 * \cos(2\pi f_1 t + \theta_1), & s_1 \\ \vdots & \vdots \\ A_n * \cos(2\pi f_n t + \theta_n), & s_n \end{cases} \quad (16)$$



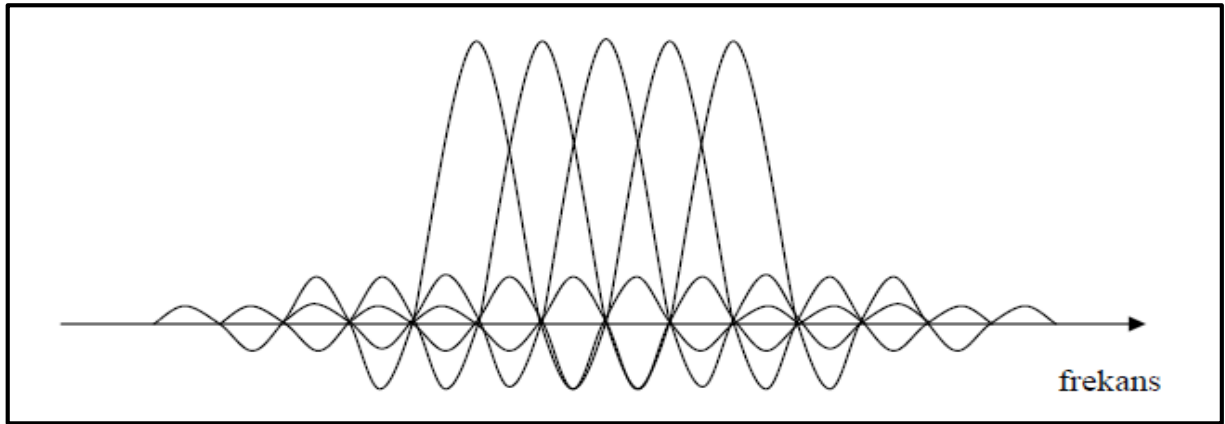
Şekil 3.4. Dikgen taşıyıcılar ve frekans spektrumları

Şekil 3.5’de birbiriyle çakışmayan çok taşıyıcılı teknik ile birbiriyle çakışan çok taşıyıcılı modülasyon tekniği arasındaki fark gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bu teknik kullanılarak %50 civarında bir bant genişliği kazanılabilir [33].



Şekil 3.5. FDM ve OFDM bant genişlikleri

Bant genişliği verimliliğini garanti etmek için, alt kanal, dalga formları çakışan iletim spektrumuna sahip olmalıdır. Frekans bölgesinde, her bir OFDM alt taşıyıcısı sinc fonksiyonudur ve frekans cevabı Şekil 3.6’da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi frekans spektrumunun sıfır geçişlerinde sadece bir taşıyıcı etkindir[32,33].



Şekil 3.6. OFDM sisteminde taşıyıcıların frekans düzlemi görüntüsü

OFDM iletiminde, alt taşıyıcı darbesi dikdörtgensel seçilir, çünkü darbe formunun görevi ve modülasyon, IFFT ile çok etkili bir şekilde gerçekleştirilen, basit ters ayrık Fourier dönüşümü (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT) ile yerine getirilir[12,13]. Alıcıda bu işlemi tersine çevirmek için ise FFT kullanılır. Denklem(17) ve Denklem(18)’de verilmiştir.

$$IFFT: \quad x(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j2\pi k \frac{n}{N}} \quad n = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (17)$$

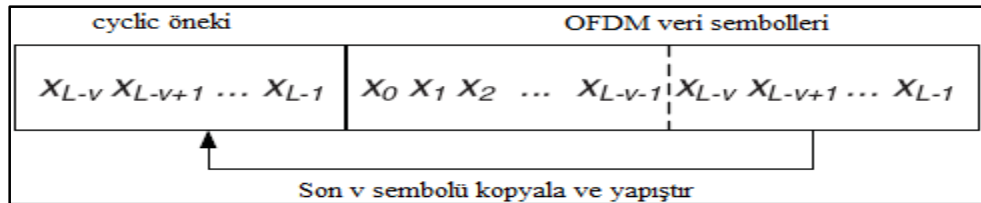
$$FFT: \quad Y(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} X(n) e^{-j2\pi k \frac{n}{N}} \quad k = 0, 1, \dots, (N-1) \quad (18)$$

Diğer yandan her bir alt taşıyıcı için diğer alt taşıyıcıyla eş fazlı ve hassas bir osilatör gereksinimi düşünüldüğünde verici ve alıcı yapılarının karmaşıklıkları ve boyutları artmaktadır. Bu durumdan etkilenmemek için IFFT ve FFT kullanılmaktadır.

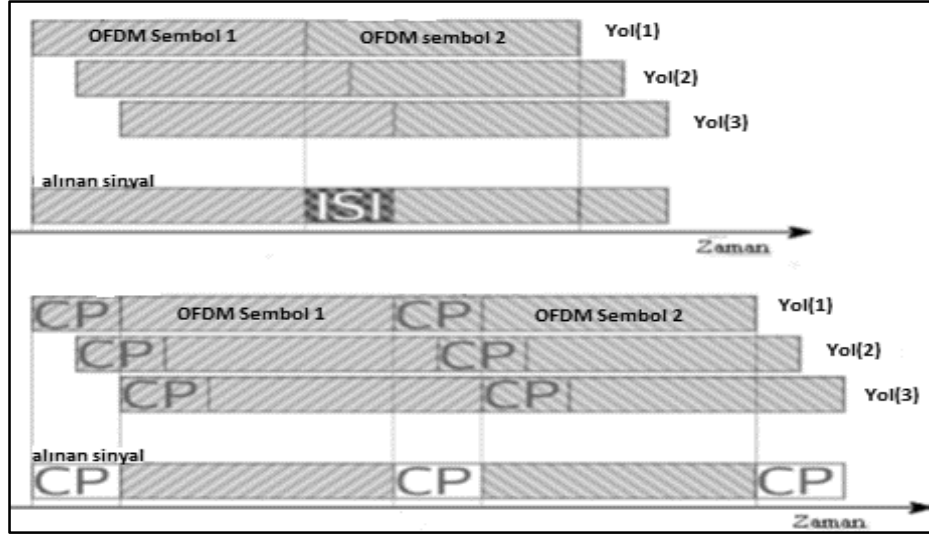
3.3 Döngüsel Önek Ekleme (Cycle Prefix)

Alt taşıyıcılar arasındaki dikliği devam ettirebilmek için, ortamda çoklu yol kanalı bulunmamalıdır. Ortamda bulunan duvar, bina ve dağ gibi nesnelerden dolayı yayılım ortamında yansıyan radyo iletim sinyali, çoklu yol yayılımına neden olmakta ve bu çoklu sinyaller, alıcıya farklı iletim mesafelerinden dolayı farklı zamanlarda varmaktadır. Bu olay, alt taşıyıcılar arasında enerji sızıntısına sebep olmakta ve sembol arası girişime neden olmaktadır [34].

OFDM, bu çoklu yol etkisi, taşıyıcılar arası girişim ve semboller arası girişim ile baş edebilmek için, ardışık semboller arasında koruma aralığı oluşturan döngüsel önek (Cyclic Prefix, CP) koyar. Bu döngüsel önek, kanal matrisinin döngüsel olmasını sağlar, böylece FFT ile sadece köşegen elemanlarından oluşan bir matris elde edilir[34]. Döngüsel önek iletilen her bir sembol dizisinin en sonundaki veya başındaki sembollerin belli oranda alınarak baş veya son kısmına eklenmesiyle gerçekleştirilir. Diğer taraftan bu işlem iletilen sinyaller arasında bir koruma aralığı oluşturmuş olmaktadır. Bu koruma aralığının uzunluğu, maksimum kanal gecikmesinden büyük olduğu sürece, semboller arası girişim engellenmiş ve taşıyıcılar arasındaki diklik korunmuş olur. Şekil 3.7’de döngüsel önek ekleme işlemi ve Şekil 3.8’de ISI üzerindeki etkisi verilmiştir. Alıcı kısmında ise bu kısım atılarak esas veri dizisi elde edilir.



Şekil 3.7. OFDM döngüsel önek ekleme

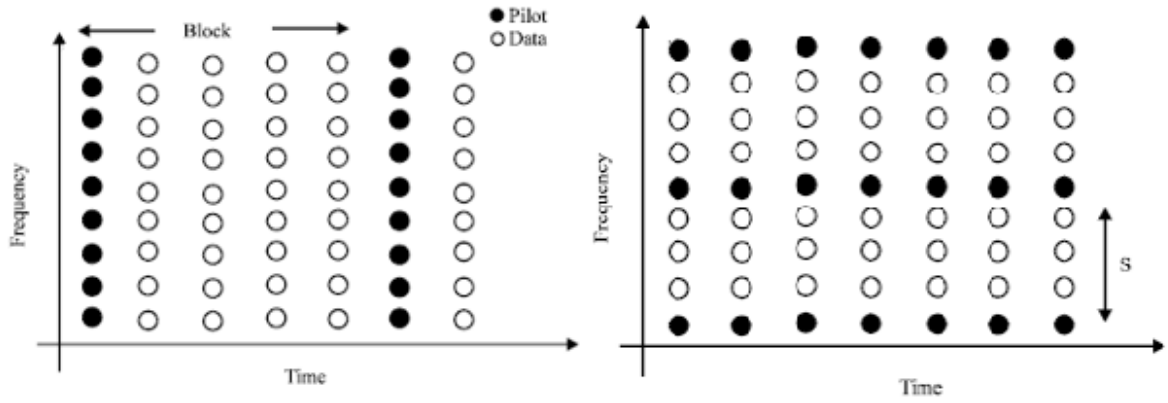


Şekil 3.8. Döngüsel önekin ısı üzerindeki etkisi

4. KANAL KESTİRİMİ

Kanal kestiriminin esas amacı alıcı ile verici arasındaki haberleşme kanalını tanımlamaktır. Frekans cevabı, çevresel bozucu etkiler ve çoklu yol gecikmeleri sebebiyle rasgele değişen bir kanalda iletim yapılırken, alıcıda iletilen verilerin doğru bir şekilde geri elde edilebilmesi için bu kanalın kestirilmesi gerekmektedir. OFDM tekniğinin performansını etkileyen en önemli kısmı da bu bölüm oluşturmaktadır. Bu işlem için farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Tekil değer ayrıştırması veya frekans bölgesi filtrelemesine dayalı kanal kestirim teknikleri ve zaman bölgesi filtreleme bunlara örnek olarak verilebilir. Son yıllarda kanal kestiricinin performansını daha iyiye götürmek için, zamanla değişen kanalın zaman frekans ilintisini en iyi kullanan en küçük ortalama karesel hata (MMSE) kanal kestirici önerilmiştir. Bu amaçla OFDM sistemleri için, kanal kestiriminde ortalama karesel hatayı minimize etmek amacıyla eğitim tonlarının en iyilenmesi de önerilmektedir. Bunu yapmak için OFDM sistemlerinin bit hata oranını (BER) minimize eden pilot tabanlı kanal kestirim algoritmaları sunulmuştur [35]. Bunun yanında MMSE algoritmasının kompleksliğini azaltmak için Lineer MMSE algoritması da başka bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Pilot tabanlı kanal kestirimi metodunda iletilecek bilgi sembollerinin arasına değeri bilinen semboller eklenir. Bu ekleme işlemi yapılırken pilot sembollerin aralığı kanalın evre uyumlu zamanı dikkate alınarak yapılmaktadır. İletilen bu pilot semboller alıcıda bilindiği için kanalın bu sembollere etkisi bulunabilmekte ve bu etkinin tersi etkisini gerçekleştiren bir denkleştirici MMSE kanal kestirimi algoritmasıyla tasarlanabilmektedir. Kanalın evre uyumlu zaman aralığı içinde frekans cevabının sabit kaldığı kabul edildiğinden, pilot semboller arasındaki bilgi sembollerini aynı denkleştirici ile kanalın bozucu etkilerinden temizlenmiş olmaktadır. Bu işlem için kullanılan pilot sembollerinin bilgi sembollerinde yerleştirilme şekline göre farklı türleri bulunmaktadır. Bunlar genel olarak blok tipi pilot ekleme ve tarak tipi pilot ekleme olarak önümüze çıkmaktadır. Bu yapılarda pilot sembollerin bilgi sembollerindeki dağılımları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Blok tipi ve tarak tipi pilot yerleşim planı

4.1 Kanal Kestirim Algoritmaları

Kanal kestirim algoritması olarak LS, MMSE ve LRMMSE olmak üzere üç algoritma incelenmiştir. Bu algoritmalarda kestirilen kanal aşağıdaki denklemler kullanılarak bulunmaktadır.

Gönderilen pilot sembolleri X olmak üzere alınan pilot sembolleri Y

$$Y = \text{FFT}(\text{IFFT}(X) * g + n) = XFg + N = XH + N \quad (19)$$

olarak alıcıda oluşur. Burada ki g kanalın dürtü yanıtı n gürültü bileşeni olarak verilmiştir. N boyutlu bir FFT alıcı matrisi olan F

$$F = \begin{bmatrix} W_N^{00} & \dots & \dots & W_N^{0(N-1)} \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ W_N^{(N-1)0} & \dots & \dots & W_N^{(N-1)N-1} \end{bmatrix}$$

Şeklinde tanımlanır ve bu matrisin elemanları,

$$W_N^{nk} = \frac{1}{\sqrt{N}} e^{-j2\pi \frac{nk}{N}} \quad (20)$$

Denklemiyle hesaplanır.

LS kestirici algoritmasında amaç; $(Y - XFh)^H(Y - XFh)$ eşitliğini minimum yapmaktır. Bu durumda kestirilen kanal cevabı

$$H_{LS} = X^{-1}Y \quad (21)$$

şeklinde bulunmaktadır.

MMSE kestirici ise ortalama kare hatayı en aza indirmek için kanal durumunun ikinci dereceden istatistiğini kullanır. R_{gg} , R_{HH} ve R_{YY} sırasıyla g , H ve Y 'nin otokovaryans matrisini, R_{gY} g ile Y arasındaki kovaryans matrisini, σ_N^2 gürültünün değişimini ($[N]^2$) göstermek üzere

$$R_{HH} = E\{HH^H\} = E\{(Fg)(Fg)^H\} = FR_{gg}F^H$$

$$R_{gY} = E\{gY^H\} = E\{g(XFg + N)\} = R_{gg}F^HX^H$$

$$R_{YY} = E\{YY^H\} = XFR_{gg}F^HX^H + \sigma_N^2 I_N$$

Kanal cevabı ile gürültünün birbirinden ilintisiz olduğu varsayılırsa,

$$H_{MMSE} = R_{HH}(R_{HH} + \sigma_N^2(XX^H)^{-1})^{-1}H_{LS}$$

$$H_{MMSE} = R_{HH} \left(R_{HH} + \frac{\beta}{SNR} I \right)^{-1} H_{LS} \quad (22)$$

Olarak bulunur. Buradaki β değeri modülasyon şekline göre $E\{x^2\}$ şeklinde hesaplanır. Örneğin 16QAM için bu değer 17/9 olarak bulunur.

LRMMSE düşük seviyeli (Low Rank) kanal kestirme algoritması MMSE algoritmasındaki kompleks işlem yükünü düşürmek için önerilmiştir. Burada yüksek boyutlu R_{HH} otokovaryans matrisine SVD tekil değer ayrıştırma işlemi uygulanarak işlem yükü düşürülmektedir.

$$R_{HH} = U \Lambda U^H$$

$$H_{LRMMSE} = U \Lambda^H H_{LS} \quad (23)$$

4.2 Denkleştirici

Verici tarafından gönderilen sinyal kanalın etkisiyle zayıflama, gecikme, frekans kayması ve gürültü gibi bozucu etkilere uğrar. Bu bozucu etkilere maruz kalan bilginin alıcıda doğru bir şekilde algılanabilmesi için denkleştiriciler kullanılmaktadır. Kanalın etkisini denkleştirmek için kullanılan temel yaklaşım kanalın frekans cevabının tersinin elde edilerek, gelen bilginin vericide çözülmeden önce bu ters frekans cevabından geçirilerek işlenmesidir. Bu denkleştirici yapısı sıfır zorlamalı denkleştirici (zero-forcing equalizer) olarak bilinmektedir. Vericide gönderilen çerçevenin önüne değerleri bilinen bitler yerleştirilerek bu bitlerin alıcıya geldiğinde oluşan değişimleri karşılaştırılarak kanalın frekans cevabı bulunur ve bu frekans cevabının tersi alınarak denkleştirici oluşturulur. Verici tarafından gönderilen bilgi bitlerinin de aynı kanal etkisine mazur kaldığını kabul ederek öngörülen denkleştirici ile bilgi bitleri denkleştirilerek kanalın etkisi giderilmiş olur.

4.3 Kanal Kodlaması

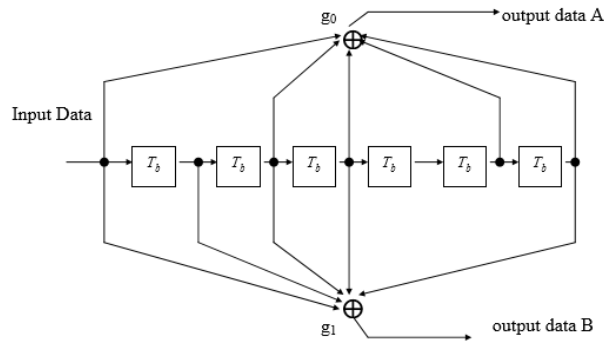
Kanal kodlamanın temel amacı, kanalın bozucu etkilerine maruz kalarak oluşan veri hatalarını azaltmaktır. Bu amaçla yapılan kodlamalar hata kontrol kodlaması olarak adlandırılmaktadır. Haberleşme sisteminde hata kontrolü sağlamak için tipik olarak veri dizisine, bilgi içermeyen ve sadece hata kontrolü sağlayan kontrol bitleri eklenmektedir. Eklenen kontrol bitleri bilgi içermediğinden işaret verisinde artıklık (redundancy) olarak adlandırılmaktadır.

Hata kontrolü için hata algılama ve hata düzeltme kodlaması olmak üzere iki farklı yaklaşım mevcuttur. Hata algılama kodlaması ile alıcı sadece hatanın meydana geldiğini algılayabilmektedir. Bu durumda alıcı çoğunlukla, vericiye bilginin hatalı olarak alındığını bildirmekte ve hatalı alınan bilginin tekrar iletilmesini istemektedir. Bu şekilde çalışan hata kontrol kodlaması, otomatik tekrar istemi (ARQ) olarak adlandırılmaktadır. Bu tür sistemlerde, alıcının vericiye alındı (ACK) veya olumsuz alındı (NACK) bilgilerini iletmesi gerektiğinden mutlaka çift yönlü bir haberleşme sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Hata düzeltme kodlaması ise sadece hatayı algılamakla kalmayıp aynı zamanda hatayı düzeltebilmektedir. Daha karmaşık bir kodlama yapısı gerektiren hata düzeltme kodlaması, genelde ileri hata düzeltimi (FEC) olarak adlandırılmaktadır.

Hata düzeltme kullanıldığı takdirde alıcının tekrar iletim istemi yapmasına gerek kalmadığından bu kodlama şekli tek yönlü haberleşme sistemlerinde de kullanılabilir. Hata kontrol kodlaması belirli sayıda bit hatasının algılanabilmesi veya düzeltilebilmesine olanak sağlamaktadır. Doğal olarak algılanabilecek ve düzeltilebilecek hata miktarı sınırlıdır.

4.3.1 Katlamalı Kodlama

Katlamalı kodlama, kanal kodlama çeşitleri içinde haberleşme alanında en çok uygulama alanı bulan kodlama çeşitlerinden biridir. Özellikle SNR değeri düşük olan dijital iletişim sistemlerinde sık sık kullanılmaktadır. Bir katlamalı kod kaynak ikili bitlerin sınırlı lineer kaydırmalı yazmaçtan geçirilmesi ile elde edilir. Genellikle katlamalı bir kod gösterilirken (n,k,K) olarak ifade edilmektedir. Bu ifade k -bit giriş verisi K uzunluğundaki hafıza elemanından geçirilerek n -bir çıkış verisinin elde edilmesi olarak anlaşılmaktadır. K katlamalı kodun kısıt uzunluğu olarak tanımlanmaktadır. $R=k/n$ ise kodlama oranını vermektedir. Katlamalı kodların bağlantı gösterimi, polinom gösterimi, durum gösterimi, ağaç gösterimi ve kafes gösterimi gibi farklı gösterim şekilleri mevcuttur. Her gösterim şeklinin katlamalı kodların anlaşılması için önemli bir yeri olmakla beraber bağlantı gösterimi ve kafes gösterimi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan blok gösterimi kodlayıcı yapısını görsel olarak gösterirken kafes gösterimi olası tüm kod sözcüklerinin oluşumunu gösterdiği için kod çözücünde de kullanılmaktadır [36]. Şekil 4.2’de katlamalı kodlar için kullanılan blok gösterimi gösterilmiştir.

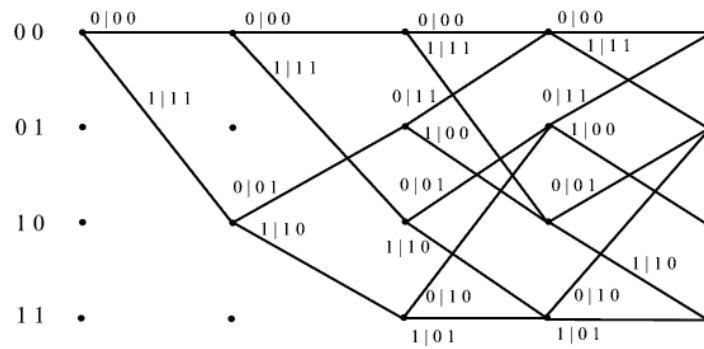


Şekil 4.2. Katlamalı kodlama bağlantı gösterimi

4.3.2 Katlamalı Kodların Çözülmesi ve Viterbi Kod Çözücü

Katlamalı kodların çözülmesi için farklı yöntemler mevcut olmakla birlikte Viterbi Çözücü en çok bilinen ve uygulanan yöntemdir. Bu çözücü yapısı maksimum benzerlik prensibini temel alarak çalışmaktadır. Vericiye gelen kod viterbi çözücünde kafes yapısı taranıp, olası en iyi yol belirlenerek çözülür. Viterbi çözücünde sert kararlı veya yumuşak kararlı algoritma yapıları kullanılabilir. Sert kararlı algoritma kullanıldığında önce sembollerin kararı verilmekte daha sonra bu sembole kafes yapısındaki hamming mesafesi en küçük olan kod olarak çözümleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Yumuşak kararlı kod algoritma kullanıldığında ise en küçük Öklid yapısını veren kod olarak çözümleme yapılmaktadır.

Viterbi algoritması baştan itibaren olası her yolun benzerlik ölçüsünü Öklid veya hamming mesafesi olarak hesaplayarak kafes yapısı içinde ilerlemektedir. Kafes içerisinde olası birden fazla yol olduğu takdirde, bu yollardan sadece en olası yol tutulmakta ve diğer yollar atılmaktadır. Eğer olası yolların benzerlik ölçüleri aynı olursa bu durumda rastgele olarak bir seçim yapılmaktadır. Şekil 4.3’de kod çözücü için kullanılan kafes gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.3. Viterbi kod çözücü kafes gösterimi

4.3.3 Sert Kararlı ve Yumuşak Kararlı Çözümleme

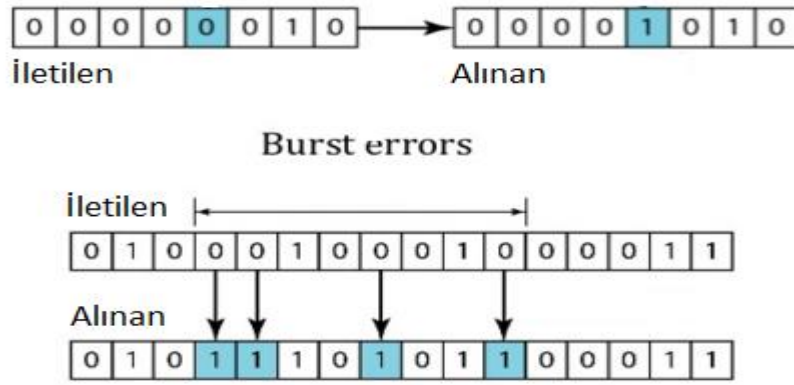
Katlamalı kodlar sert kararlı (hard decision) veya yumuşak kararlı (soft decision) çözümlenebilir. Sert kararlı çözümlemede kod sözcüğünün her sembolüne ayrı olarak karar verilmekte ve sonra kanal kodunun çözümlenmesi gerçekleştirilmektedir.

Yumuşak kararlı çözümlemede ise alınan kod doğrudan Öklid mesafesi en düşük olan kod sözcüğü olarak da çözümlenmektedir. Viterbi kod çözücü gibi bazı kod çözücüler Öklid mesafesi yerine hamming mesafesini kullanabilmektedir. Öklid mesafesi k elemana sahip c_1 ve c_2 kodları için Denklem (24)' teki gibi tanımlanır. Hamming uzaklığını ise iki kodun farklı elemanlarının sayısı olarak belirtmek mümkündür [36].

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^k (c_1(i) - c_2(i))^2} \quad (24)$$

4.4 Serpiştirme (İnterleaving) ve Geri-Serpiştirme (Deinterleaving)

Birçok kodlama tekniği AWGN kanallar üzerinden yapılan iletim hatalarını düzeltmek için tasarlanmıştır. Gönderilen bitler rastgele gürültüden etkilenir bu yüzden de bit hataları bit pozisyonlarından bağımsız bir şekilde meydana gelir. Ama bu durumun patlama hatasına (burst error) sebep olabileceği birçok durum mevcuttur. Işığın bozucu etkisi (stroke of lighting) ya da insan yapımı elektriksel girişimler (human-made electrical disturbance) bu duruma örnek teşkil etmektedir. Bunun başka bir örneği çok yollu sönümlemeli kanallar gibi iletim esnasında patlama hatasına sebep olabilecek iletişim kanallarıdır. Zamanla değişen çok yollu kanal sebebiyle oluşmuş sönümleme, çok sayıda alt taşıyıcıya zayıflatıcı etki yaparak, alınan sinyalin sinyal gürültü oranının düşmesine sebep olur. Bu sönümleme nedeniyle alıcıdaki hatalı bit blokları oluşur. İstatistik olarak bağımsız bit hatalarını düzeltmek için tasarlanmış kodlamalar, patlama hatalarını düzeltmek için çok da etkili değildir. Şekil-4.4'de iki farklı hata yapısı verilmiştir.



Şekil 4.4. Burst hatası oluşumu

Serpiştirme tekniği patlama hatalarıyla başa çıkmak için oldukça etkilidir. Kodlanmış veri bitleri, serpiştirme modeline göre vericide serpiştirilir. Alıcıda ise veri bitlerini orijinal hallerine çevirmek için bir araya getirme işlemi (deinterleaving) uygulanır. Serpiştirme ile patlama hatalarına maruz kalan bitler rastgele pozisyonlara dağıtılır ve rastgele hatalara dönüştürülmüş olur. Böylece bu rastgele hatalar istatistik olarak bağımsız hatalar için tasarlanmış kodlama teknikleri tarafından etkili bir şekilde düzeltilebilir hale getirilmiş olur Şekil 4.5’de bu işlem gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Serpiştirme ve geri-serpiştirme işlemi

OFDM yöntemi bilgiyi alt taşıyıcılara bölerek taşır. Bu sayede elde ettiği faydalardan biri ise kanalda meydana gelebilecek rastlantısal derin çentik sönmömlerine karşı sistemi dirençli kılmaktadır. Bu işlevin faydalı olması için serpiştirme işlemi kullanılır. Serpiştiricinin iki farklı işlevi sayesinde göndermede hata düzeltme bloğunun ikinci elemanı olarak görev yapar. İlk işlevi, iletilecek olan bilginin belirli bir kurala göre serpiştirilerek ardışık bilgilerin farklı frekanslardaki alt taşıyıcılarda taşınmasıdır. Böylece kanaldaki belli frekanslarda meydana gelen sönmöme etkilerinde ardışık bilgiler etkilenmediği için kanal kodlama tekniği ile hatalı bitlerin düzeltilmesi yapılabilir.

İkinci işlevi ise sembol içerisindeki komşu olarak kodlanmış bilgi bitlerinin modülasyon derecesine göre sembol arasında serpiştirme uygulamasıdır. Sembol içerisinde yer alan bitleri MSB veya en düşük anlamlı (LSB) olarak serpiştirir. Modülasyon derecesi 16QAM ve 64QAM için önemli bir katkısı vardır. 16QAM ve 64 QAM sembol haritasındaki tüm bitlerin hata oranı aynı değildir. MSB bitlerin hata olasılığı daha düşüktür. Bu sebeple yapılan serpiştirme sonucu hata oranı daha az olacak şekilde bilgi sembolleri oluşturulabilir.

Serpiştiricinin iki yapısı vardır: Blok serpiştirici ve katlamalı serpiştirici. IEEE 802.11a standardında, kodlanmış veri bitleri, tek bir OFDM sembolünde bulunan kodlanmış bitlerin sayısına (N_c) karşılık gelecek şekilde bir blok boyutu kullanılarak blok serpiştiriciler tarafından serpiştirilir. (N_c) değeri QPSK, 16 QAM ve 64 QAM için sıra ile 2,4 veya 6 olarak, s değeri ise değerinin yarısı olarak belirtilmiştir. Serpiştirme öncesi alt taşıyıcı i indeksi ile serpiştirme sonrasında alt taşıyıcının yerini belirten indeks ise j ile belirtilmiştir. İlk serpiştirme işlevinin sonucu ara indeks i ile gösterilir ve işlevler arasındaki geçiş için kullanılır. Denklem (25) ve Denklem (26) da bu işlemleri gerçekleştiren fonksiyonlar verilmiştir.

Serpiştirme

$$i = \left(\frac{N_{CBPS}}{16} \right) \cdot \text{mod}(k, 16) + \text{floor} \left(\frac{k}{16} \right); k = 0, 1, \dots, (N_{CBPS} - 1) \quad (25)$$

$$j = s \cdot \text{floor} \left(\frac{i}{s} \right) + \text{mod} \left(\left(i + N_{CBPS} - \text{floor} \left(\frac{16 \cdot i}{N_{CBPS}} \right) \right), s \right); s = \max \left(\frac{N_{BPSC}}{2}, 1 \right)$$

Geri-Serpiştirme

$$i = s \cdot \text{floor} \left(\frac{j}{s} \right) + \text{mod} \left(j + \text{floor} \left(\frac{16 \cdot j}{N_{CBPS}} \right), s \right) \quad (26)$$

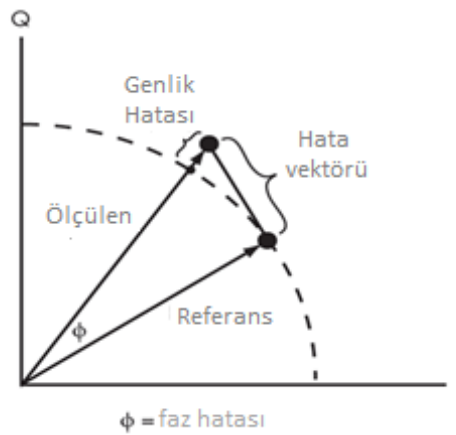
$$k = 16 \cdot i - (N_{CBPS} - 1) \cdot \text{floor} \left(\frac{16 \cdot i}{N_{CBPS}} \right)$$

Serpiştirme bir sonucu olarak, alıcıda işlemi geri almak için tüm sembol bloğunun alındıktan sonra geri serpiştirme fonksiyonunu yürütmek gerektiğinden alıcıda bir gecikme meydana gelir. Serpiştirici yapısı, kanal yapısı ve kodlama tekniklerine göre farklı fonksiyonlar seçilmektedir. AWGN kanal yapısında hata tüm veriye blok olarak tek kanal üzerinden etki ettiğinden dolayı bitlerdeki hataların bit pozisyonundan bağımsız olarak oluşmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu durumda AWGN kanal yapısından serpiştirme işleminin bit hatalarına önemli bir katkısı olmamaktadır.

4.5 EVM(Error Vector Measurement)

EVM modülasyon doğruluğunun ölçüsünü gösterir. Gürültünün yanı sıra potansiyel tüm faz ve genlik bozulmalarını ele alır ve böylece model kalitesi için kapsamlı bir ölçüm sağlanmış olur. EVM referans sembol vektörü ile ölçülen sembol vektörünün yerini I/Q fazör düzleminde karşılaştırarak modülatör ile demodülatör arasındaki ölçüm farkını gösterir. Şekil 4.6’da bu durum gösterilmiştir. EVM alıcıda alınan vektörün ortalama gücünün P_{err} referans vektörün gücüne P_{ref} desibel olarak oranını verir. Denklem (27)’de EVM hesaplama ifadesi verilmiştir. EVM 802.11a WiFi standardında SNR kestirimi için kullanılmaktadır.

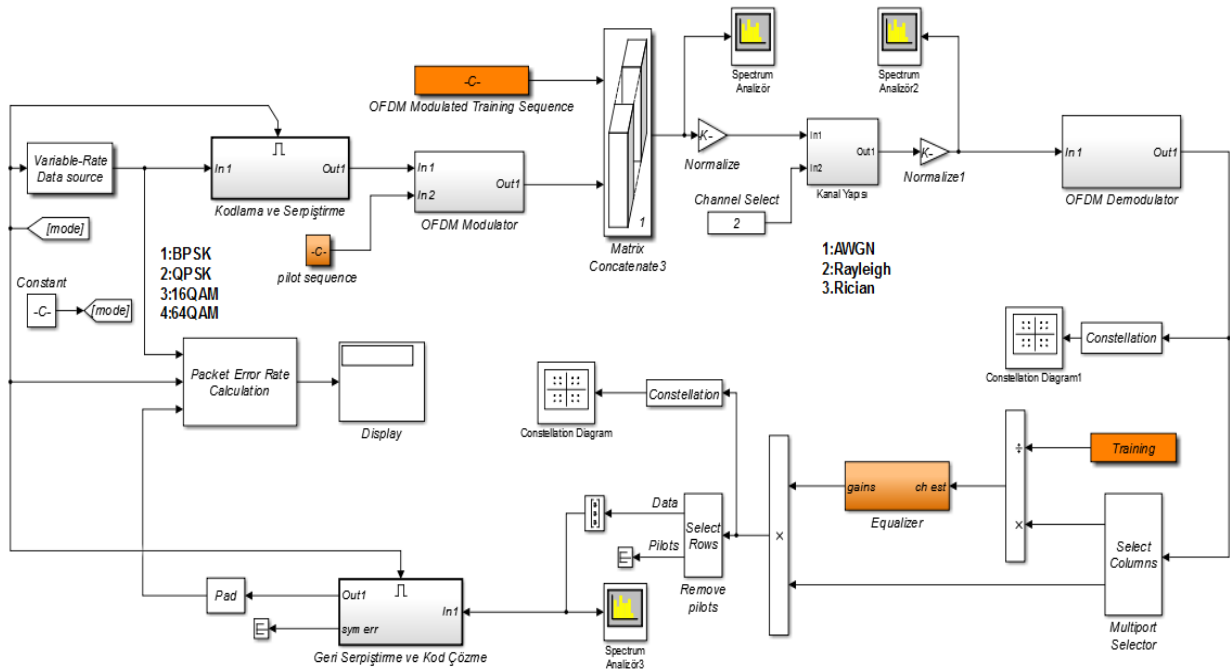
$$EVM(dB) = 10 \log\left(\frac{P_{err}}{P_{ref}}\right) \quad (27)$$



Şekil 4.6. I/Q fazör düzlemi ve EVM hesaplanması

4.6 MATLAB/SIMULINK IEEE 802.11a WLAN Fiziksel Katmanı

MATLAB haberleşme alanında geniş bir kütüphane ve gerçek zamanlı benzetim platformuna sahiptir. Platform ayrıca 802.11 WiFi ve 802.16 WIMAX gibi kablosuz haberleşme standartlarının istatistiksel olarak gerçekleştirilebilir fiziksel katmanlarını içeren model yapılarına da sahiptir. Bu standartların hepsinde OFDM modülasyon yapısı standart olarak kullanıldığı için tez çalışmamızın uygulama alanlarının görülmesi ve anlaşılması için örnek teşkil etmektedir. Ayrıca bu modeller ile bir haberleşme standardı, farklı kodlayıcı, serpiştirici, kanal yapısı ve modülasyon çeşidi gibi alt yapılarıyla birlikte bütün olarak anlaşılabilir. Dolayısıyla parametrelerde ve alt yapılarda yapılan değişiklikler ile farklı uygulamalar geliştirilebilir. Şekil 4.7’de 802.11a WLAN standardının fiziksel katman model yapısı verilmiştir.



Şekil 4.7. IEEE 802.11a için oluşturulan Simulink modeli

EEE 802.11a standardına göre, OFDM fiziksel katmanının temel fonksiyonu 802.11 MAC katmanınca yönlendirilen medya erişim kontrolü (MAC) ile protokol bilgi birimlerini (MPDUs) iletmektir. OFDM fiziksel katmanı iki protokol fonksiyonu içerir.

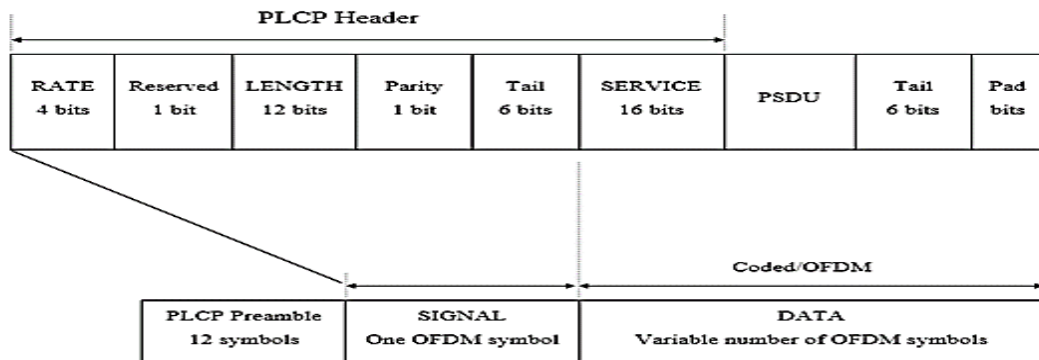
1-Fiziksel ortama bağlantı sistemini (PMD) fiziksel katman hizmetlerine uyarlayan fiziksel katman fonksiyonu(PHY).

2- Kablosuz ortamdaki veri alışverişi metotlarının özelliklerini belirleyen fiziksel ortama bağlantı sistemi (PMD).

İletim sırasında, fiziksel alt katman veri birimi (PSDU) fiziksel katman birleştirme süreci (PLCP) ve protokol veri birimi (PPDU) başlık bağlantısıyla elde edilir. PPDU çerçeve formatı Şekil-4.8’ de gösterilmiştir. IEEE 802.11a standardının zaman parametreleri Tablo-4.1’ de verilmiştir.

Tablo 4.1. IEEE 802.11a standardının zaman parametreleri

Parametre	Değer
Veri Alt Taşıyıcı Sayısı N_{SD}	48
Pilot Alt Taşıyıcı Sayısı N_{SP}	4
Toplam Alt Taşıyıcı Sayısı N_{ST}	52
Alt Taşıyıcı Frekans Aralığı F_{SP}	312.5 KHz (20 MHz/64)
Sembol Zaman Aralığı T_{SYM}	4 μ s ($T_{GI}+T_{FFT}$)
Veri Zaman Aralığı T_{DATA}	3.2 μ s ($1/F_{SP}$)
Koruma Zaman Aralığı T_{GI}	0.8 μ s ($T_{FFT}/4$)
IFFT/FFT Periyot Zamanı T_{FFT}	3.2 μ s ($1/F_{SP}$)
Sinyal Periyot Zamanı T_{SIGNAL}	4 μ s ($T_{GI}+T_{FFT}$)
Kısa Eğitim Seti Süresi T_{SHORT}	8 μ s
Uzun Eğitim Seti Süresi T_{LONG}	8 μ s
Başlangıç Süresi $T_{PREAMBLE}$	16 μ s ($T_{SHORT} + T_{LONG}$)



Şekil 4.8. Protokol çerçeve birimi

PPDU çerçevesi, 12 sembollük PLCP başlığı, PSDU, Kuyruk bitleri ve Pad bitlerinin birleşiminden oluşur. Veri hızı bitleri, koruma bit, çerçeve uzunluğu bitleri, pariti biti ve kuyruk bitleri tek başına bir OFDM sembolünü meydana getirir. PLCP başlığında altı tane kuyruk biti, veri hızını ve uzunluğunu gösteren bitlerin güvenilir ve senkron bir şekilde belirlenmesine imkan sağlamak için eklenir. Hizmet bitleri, PSDU bitleri, kuyruk bitleri ve pad bitleri ayrıca katlamalı olarak da kodlanır ve kod oranı Tablo 4.3’ de gösterilen veri hızına bağlı olarak değişir. Bu veri hızı bilgisi alıcıda ilk dört bitin durumuna göre algılanmaktadır.

Standartta PPDU çerçevesindeki ilk dört bit veri hızı bilgisini barındırır bu durumlara karşılık gelen veri hızları Tablo 4.2’ de verilmiştir. Veri iletim hızı 54Mbps olduğunda iki tür kodlama oranı görülür, sinyal bitleri $\frac{1}{2}$ oranında kodlanırken veri bitleri $\frac{3}{4}$ oranında kodlanarak iletilir.

Tablo 4.2. Veri hızları ve gönderilen bitler

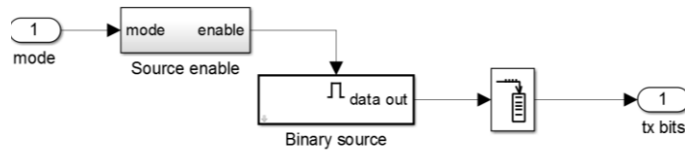
Veri Hızı (Mbits/s)	R1–R4 Bitleri
6	1101
9	1111
12	0101
18	0111
24	1001
36	1011
48	0001
54	0011

Tablo 4.3. Veri hızlarına göre kodlama ve modülasyon yapıları

Veri Hızı (Mbits/s)	Modülasyon Türü	Kodlama Oranı (R)	Taşıyıcı Kod Bit Sayısı (N_{BPSC})	OFDM Sembol Kod Bit Sayısı (N_{CBPS})	OFDM sembol Veri Bit Sayısı (N_{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16QAM	1/2	4	192	96
36	16QAM	3/4	4	192	144
48	64QAM	2/3	6	288	192
54	64QAM	3/4	6	288	216

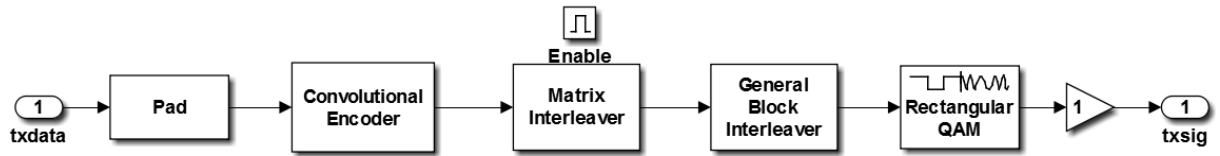
4.6.1 Değişken Hızlı Veri Üretici

İkili bilgi önceden tanımlanmış kademeye göre oluşturulur. Hangi kademeye göre bilgi üretileceği adaptif modülasyon kontrol biriminin alıcıda yapılan SNR kestirimi sayesinde belirlenir. Bu kademede ikili veri oluşturmak için veri kaynağına girilmelidir. Değişken hızlı veri üreticinin altyapısında, bir buffer bulunmaktadır. Bu buffer yapısının görevi benzetim parametrelerinde belirtilen, blok başına düşen maksimum bit sayısına göre çıkış üretmektir. Blok yapısı Şekil 4.9’ de gösterilmiştir.

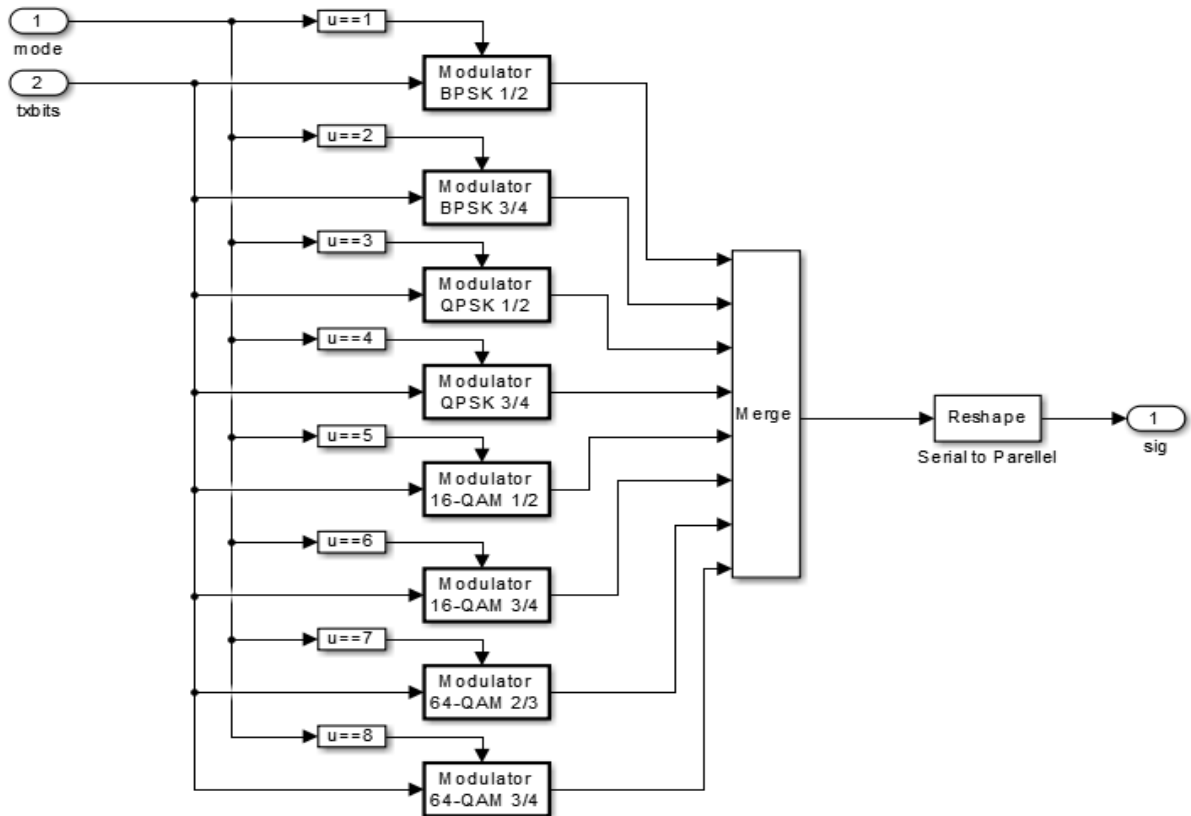
**Şekil 4.9.** Veri üretici bloğu

4.6.2 Modölatör Bank

802.11a standart modeli adaptif modölatasyon yapısı sayesinde iletişim kalitesini korumak amacıyla farklı veri hızlarında farklı modölatasyon, kodlama ve serpiştirme yapıları kullanılmaktadır. şekil 4.10 ve şekil 4.11’de de modölatör altyapısı ve kademeye göre tüm yapıların birleştirilmiş modeli verilmiştir.



şekil 4.10. Modölatör bank alt bloğu



şekil 4.11. Modölatör bank bloğu

Veri dizisi modüle edilirken, sembollerin seçilen modülasyon türüne göre bir normalizasyon kazancı ile çarpılması gerekmektedir. Bu katsayılar Tablo 4.4’ de gösterilmektedir.

Tablo 4.4. Modülasyon türlerine göre normalizasyon katsayıları

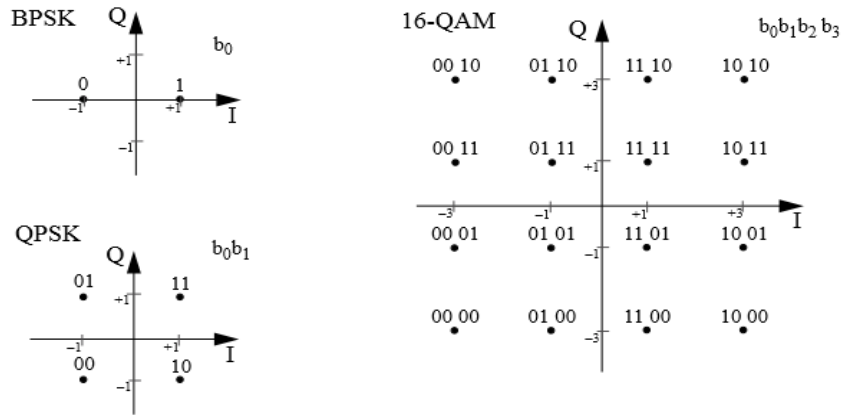
Modülasyon Türü	Normalizasyon Katsayısı(K_{MOD})
BPSK	1
QPSK	$1/\sqrt{2}$
16-QAM	$1/\sqrt{10}$
64-QAM	$1/\sqrt{42}$

4.6.3 Katlamalı Kodlayıcı

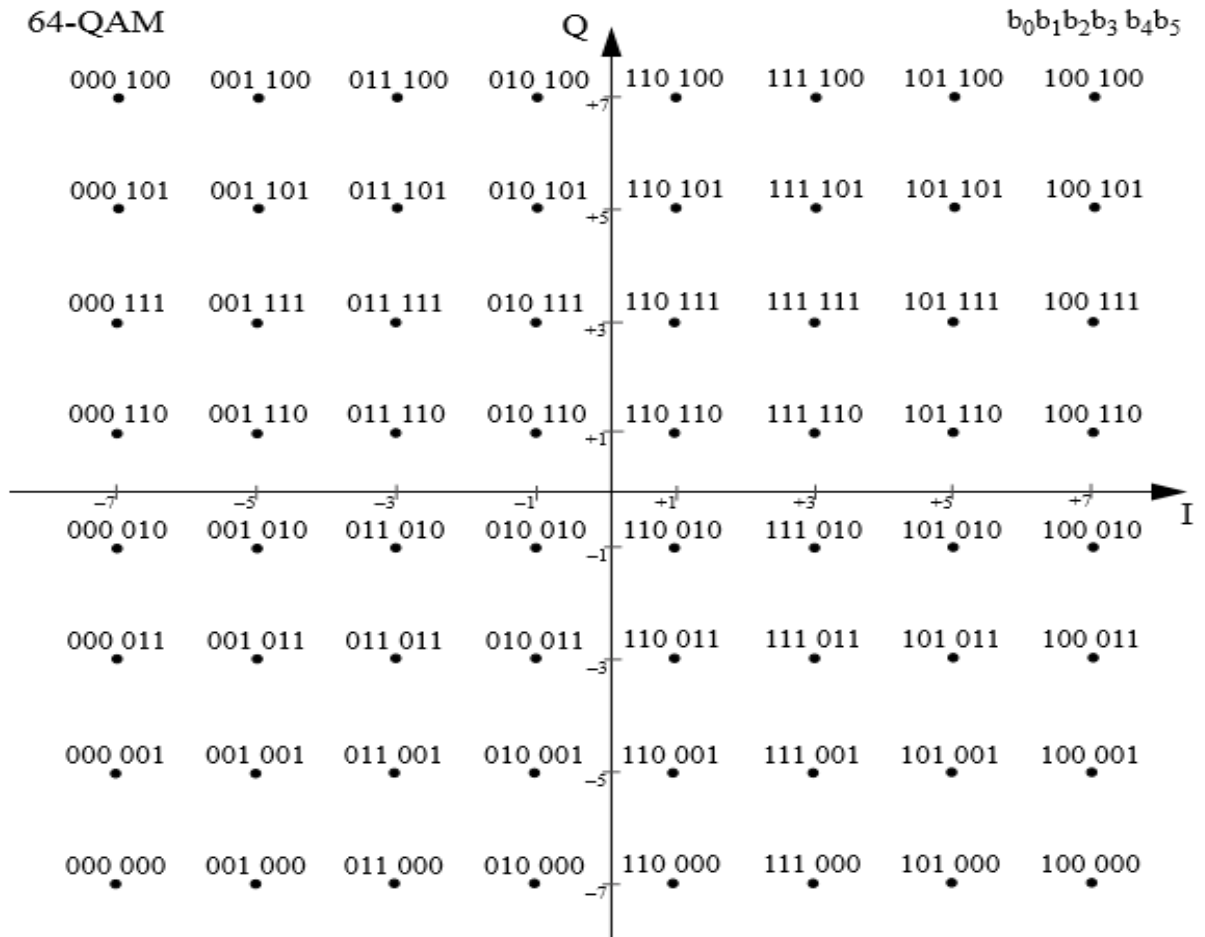
IEEE 802.11a WLAN fiziksel katmanında kodlayıcı olarak katlamalı kodlayıcı yapısı kullanılır. Katlamalı kodlayıcı yapısı k giriş bit sayısı n çıkış bit sayısı ve K hafıza kaydedici sayısı (register memory) olmak üzere üç parametre ile ifade edilmektedir. Bu standartta kullanılan katlamalı kodlayıcı parametreleri Tablo 4.3’ de verilmiştir. 802.11 standardında kullanılan katlamalı kodlayıcı yapısı `poly2trellis(7, [133 171])` matlab kodu ile oluşturulur.

4.6.4 Dikdörtgensel QAM Bloğu

Dikdörtgensel QAM bloğu giriş olarak gelen bitlerin her birini Gray kodlamaya uygun olacak şekilde bir atama işlemi gerçekleştirir. 802.11a standardında dört farklı modülasyon çeşidi kullanılmaktadır. Modülatörde semboller yıldız diyagramlarındaki yerlerine atanırken gray kodlama yapısına göre yerleştirilmiştir. Kullanılan Modülasyon çeşitleri ve yıldız kümesi diyagramları Şekil 4.12 ve 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.12. BPSK QPSK ve 16QAM diyagramları



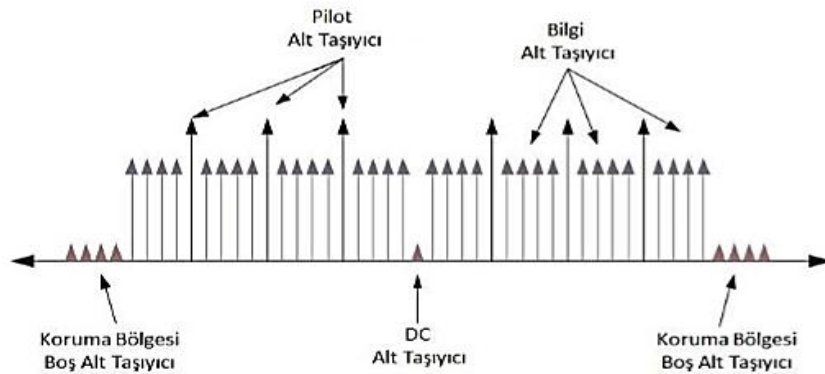
Şekil 4.13. 64QAM diyagramı

4.6.5 OFDM Modülatör ve Pilot Taşıyıcıların Yerleştirilmesi

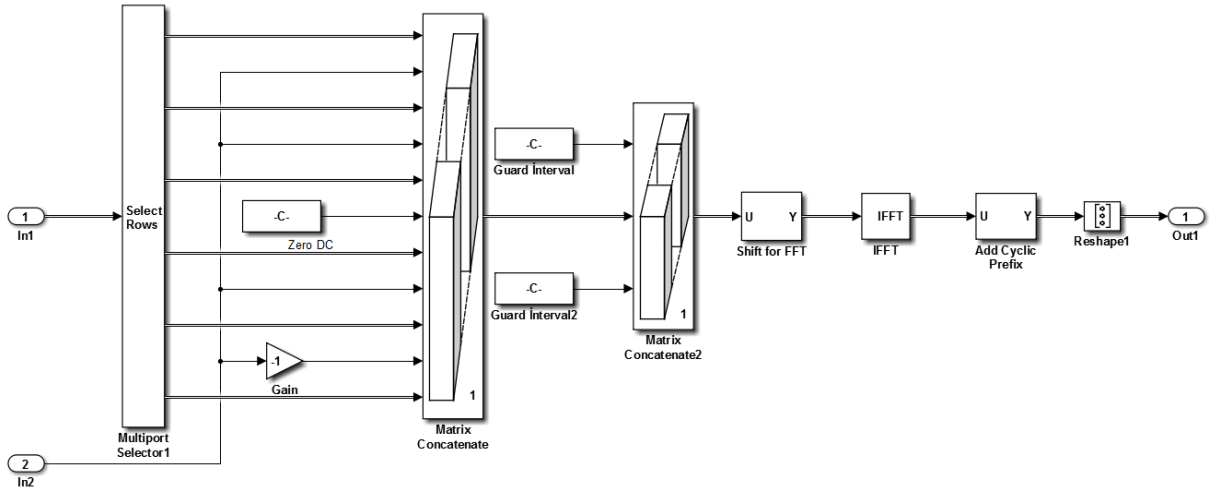
Kablosuz haberleşme sistemlerinde vericiden iletilen bilgi kanalda bozucu etkilere maruz kalır. OFDM tekniğinde kanal kestiriminin yapılması için pilot işaretler kullanılır. Her bir alt taşıyıcıda bilgi taşınmaz. Bazı alt taşıyıcılarda hem verici hem de alıcıda ortak olarak bilinen pilot işaretler taşınır. Bu işaretlerin alıcıda ne olması gerektiği bilindiğinden bilgi işaretlerine etki eden kanal etkisi bu şekilde hesaplanabilmektedir. Bu yöntemle pilot tabanlı kanal kestirimi denilir.

Pilot alt taşıyıcıların sembolleri BPSK modülasyon yöntemi ile oluşturulur. BPSK modülasyonu ile üretilen pilot verileri $\{1, -1\}$ değerlerini alır. Kompleks bileşenleri bulunmaz. Üretilen OFDM sinyalinin frekans bölgesindeki diğer bantlara zarar vermesini engellemek için koruma bantları bırakılır.

Bu değerler standartta belirlendiği şekilde sol tarafta 6 adet, sağ tarafta ise 5 adet boş alt taşıyıcılar bırakılarak oluşturulur. Bunların haricinde DC alt taşıyıcıda bilgi taşınmaz. Böylece toplamda 12 adet kullanılmayan alt taşıyıcıımız bulunmaktadır. 64 adet olan toplam alt taşıyıcı sayımızdan geriye bilgi ve pilot işaretlerin taşınması için elimizde kalan 52 adet alt taşıyıcı bulunmaktadır. Pilot alt taşıyıcıların gücünün bilgi alt taşıyıcılarının gücüne göre fazla olması kestirimin performansını da arttırmaktadır. Şekil 4.14’de bu yerleşim planı ve Şekil 4.15’de blok diyagramı verilmiştir.



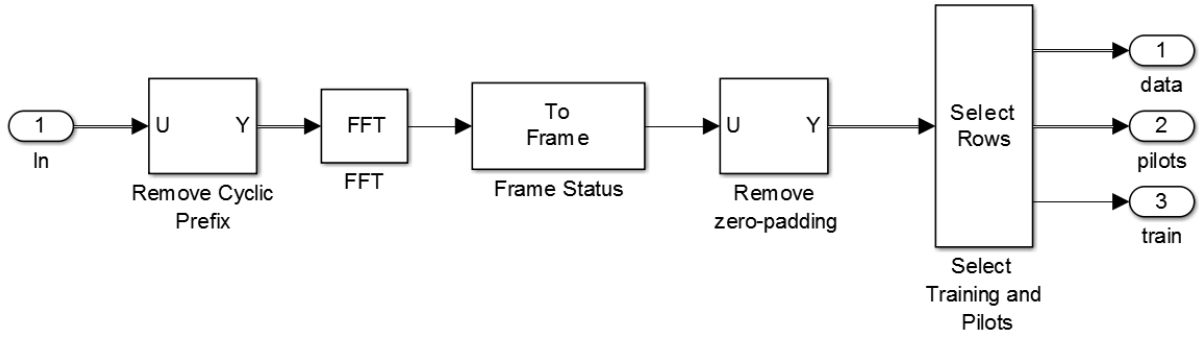
Şekil 4.14. Pilot sembol yerleşim planı



Şekil 4.15. OFDM modulator bloğu

4.6.6 OFDM Demodülasyon Bloğu

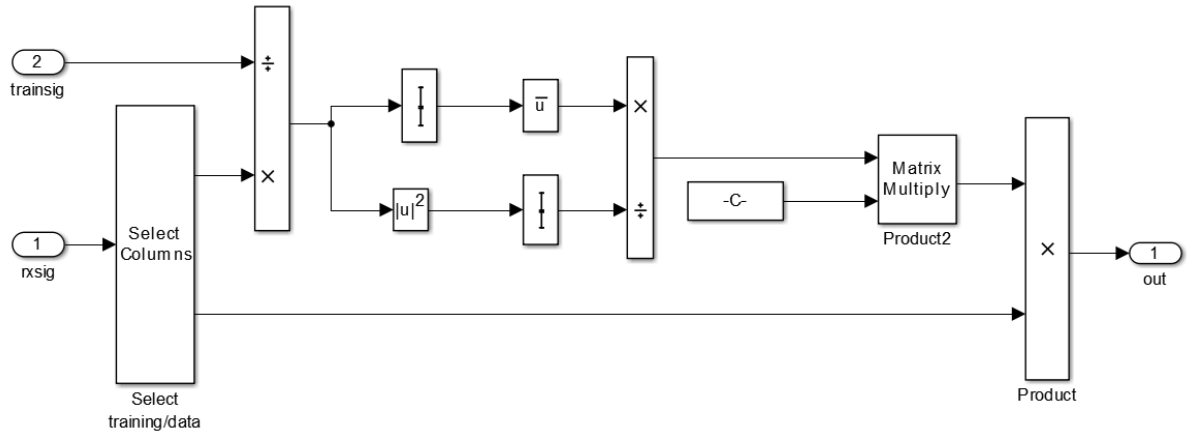
OFDM Demodülasyonu için önce döngüsel örnek sembolleri çıkartılıp FFT bloğundan geçirilir daha sonra güvenlik bandı için yerleştirilen sıfır sembolleri ayıklanarak veri katarından data sembolleri, pilot sembolleri ve eğitim sembolleri birbirinden ayrılır. Şekil 4.16' da ilgili blok verilmiştir.



Şekil 4.16. OFDM demodülasyon bloğu

4.6.7 Denkleştirici (Equalizer)

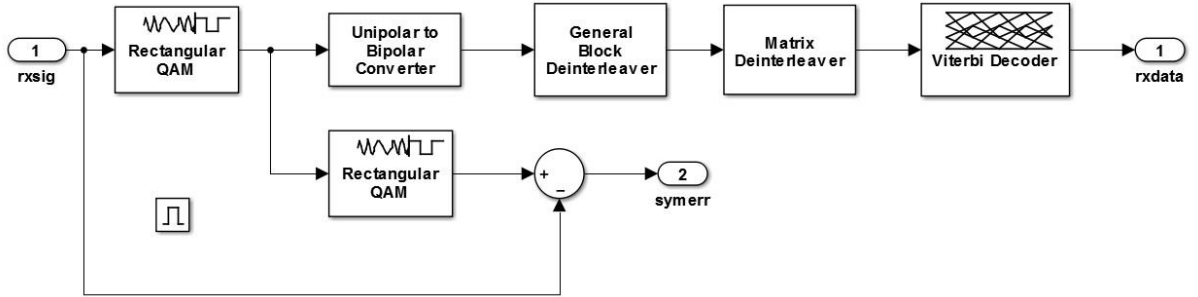
Alıcıda data sembolleri ve pilot sembolleri ayrıldıktan sonra, değerleri bilinen eğitim sembolleri ile verici tarafından gönderilerek kanal tarafından değişime uğrayan eğitim sembolleri elde edilmiş olur. Dolayısıyla gönderilen sinyal ile alınan sinyal bilindiğinden kanalın yapısı kestrilir bu kanal cevabının tersi alınarak denkleştirme işlemi gerçekleştirilir. Şekil 4.17' de denkleştirici blok yapısı verilmiştir.



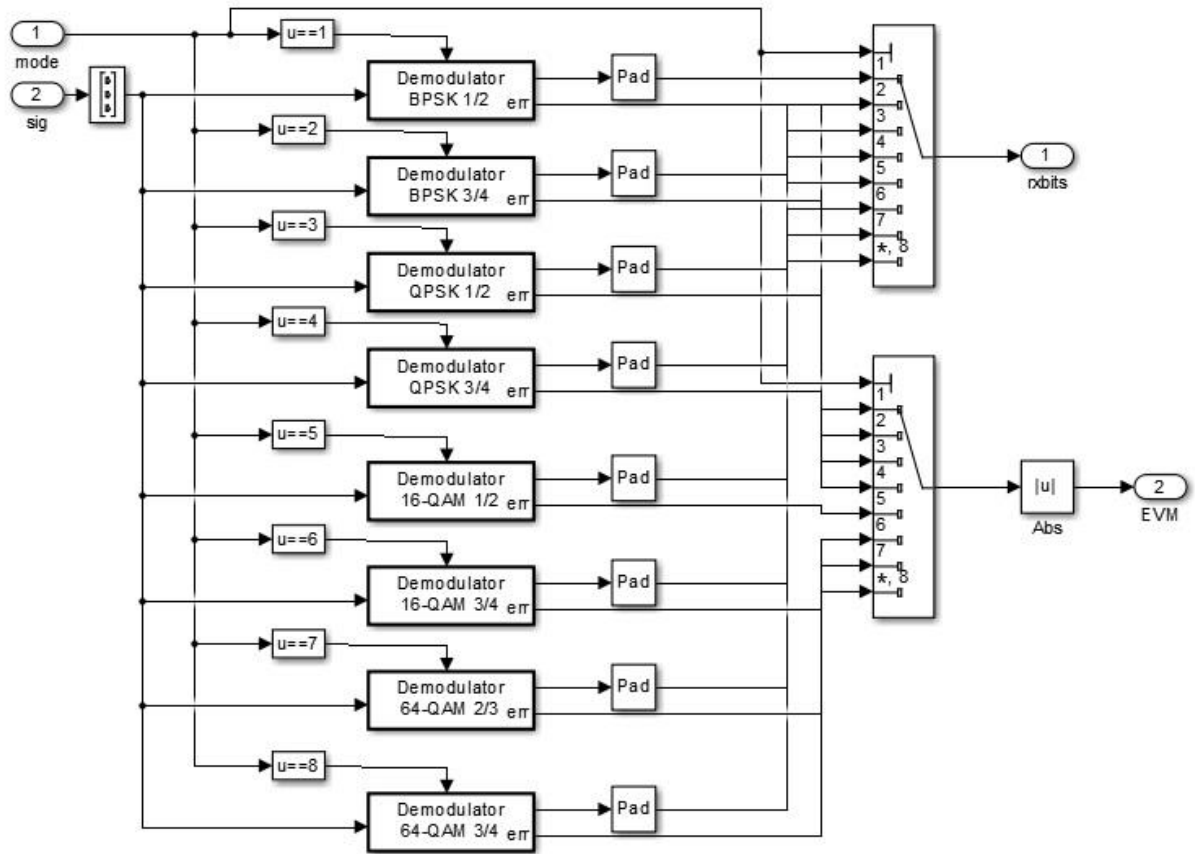
Şekil 4.17. Denkleştirici alt bloğu

4.6.8 Demodülatör Bankası

Demodülatör Bank adaptif modülasyon tekniğinin belirlediği kademeye göre modülatör bankasındaki işlemlerin tersini yapmaktadır. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’de demodülatör altyapısı ve kademeye göre tüm yapıların birleştirilmiş modeli verilmiştir.



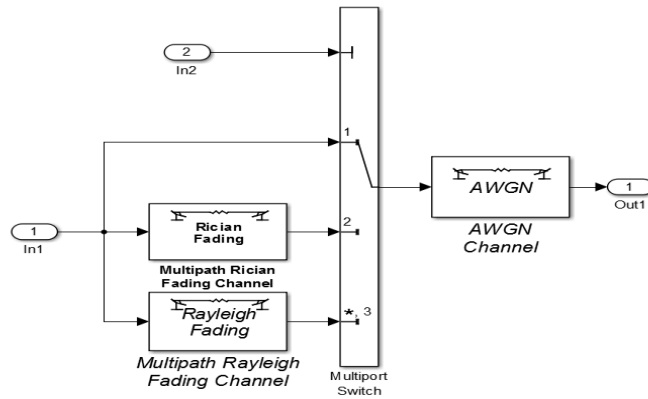
Şekil 4.18. Demodülatör bank alt bloğu



Şekil 4.19. Demodulator bloğu

4.6.9 Kanal Yapısı

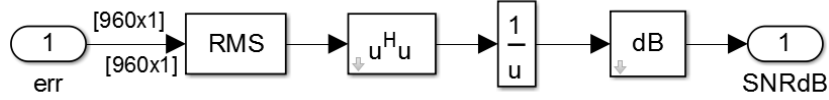
Haberleşme kanal yapısı olarak Rayleigh, Rician ve AWGN kanal yapıları kullanılmıştır. Rayleigh ve Rician Kanal yapıları kullanılırken AWGN kanal yapısıyla beraber kullanılmıştır. Şekil 4.20’de kullanılan kanal yapıları blok olarak verilmiştir.



Şekil 4.20. Kanal yapısı bloğu

4.6.10 SNR Kestirimi

EVM den gelen hatalı çevrilen bit dizinin önce RMS (root mean square) değeri alınır daha sonra hermitianı ile çarpılarak dB dönüştürücü bloğu ile SNR kestirimi yapılmış olur. Şekil 4.21’de kullanılan dB dönüştürü bloğu verilmiştir.



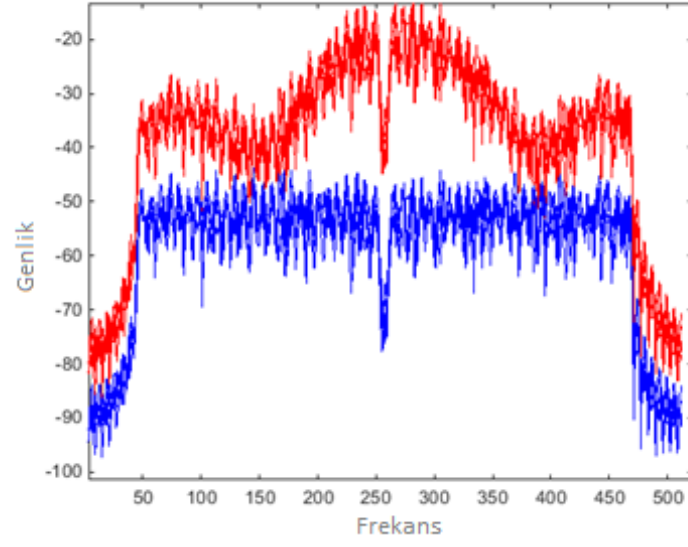
Şekil 4.21. SNR kestirimi Bloğu

4.7 Benzetim Sonuçları

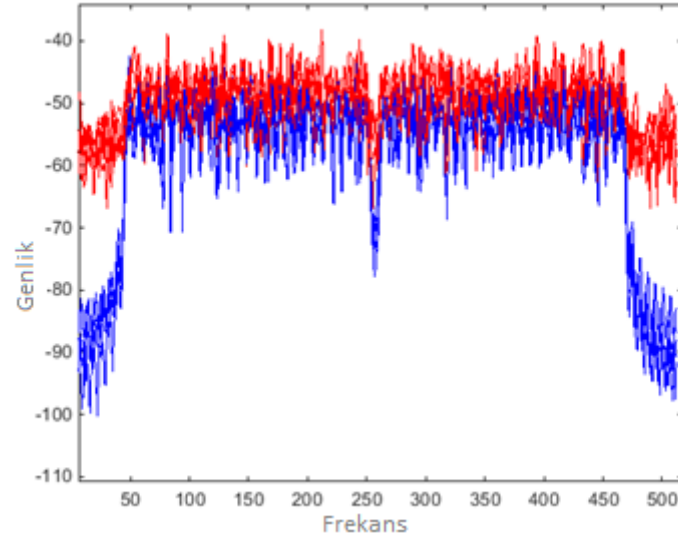
Elde edilen benzetim sonuçları Matlab platformunda gerçekleştirilmiştir. OFDM sisteminde kullanılan kanal kestirimi algoritmaları karşılaştırılırken kullanılan benzetim parametreleri Tablo 4.5’te verilmiştir. Benzetim için AWGN ve Rayleigh kanal yapıları kullanılmıştır. Sırasıyla Şekil 4.24, Şekil 4.26 Şekil 4.28 ve Şekil 4.30 BPSK, QPSK, 16QAM ve 64 QAM modülasyon çeşitlerine göre kanal kestirim algoritmalarının performansları karşılaştırılmıştır. Kanal yapısı olarak kullanılan Rayleigh sönümlmeli kanalın ve AWGN kanalın OFDM sembolü üzerindeki örnek etkisi Şekil 4.22 ve 4.23’de verilmiştir. Kodlayıcı yapısı olarak 1/2 kodlama oranı kullanılmıştır.

Tablo 4.5. Kanal Kestirimi İçin Benzetim Parametreleri

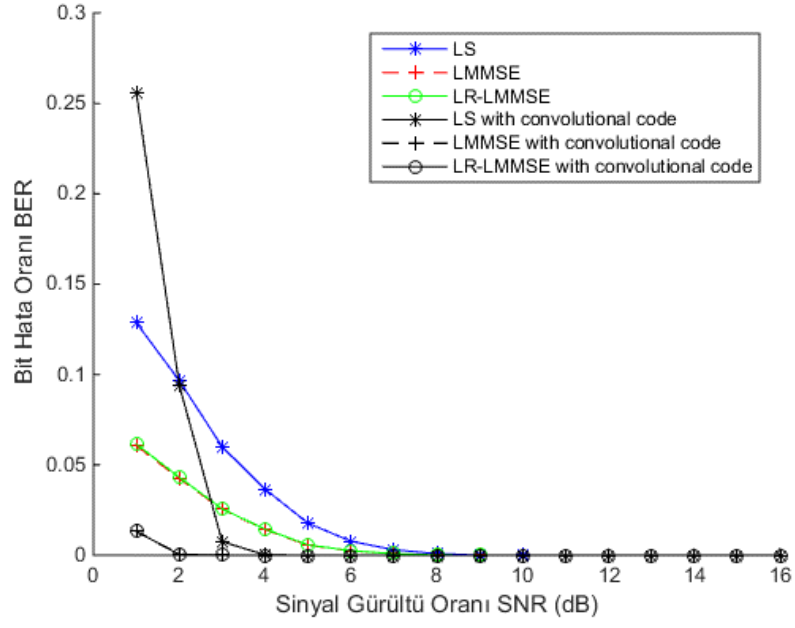
Parametreler	
N_{FFT}	64
N_{CP}	16
N_P	6
N_{SYM}	(153600) 64*24*100
F_D	50
P	[0 -5 -3 -2 -1] (dB)
T	[0 2 4 8 12] us
Modülasyon Türü	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Code Rate (R)	1/2



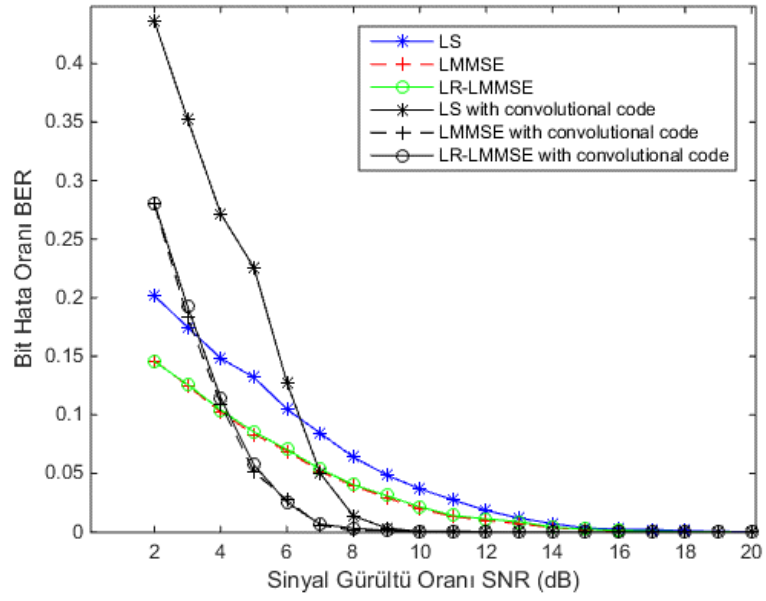
Şekil 4.22. OFDM sembolü üzerindeki Rayleigh kanalının bozucu etkisi



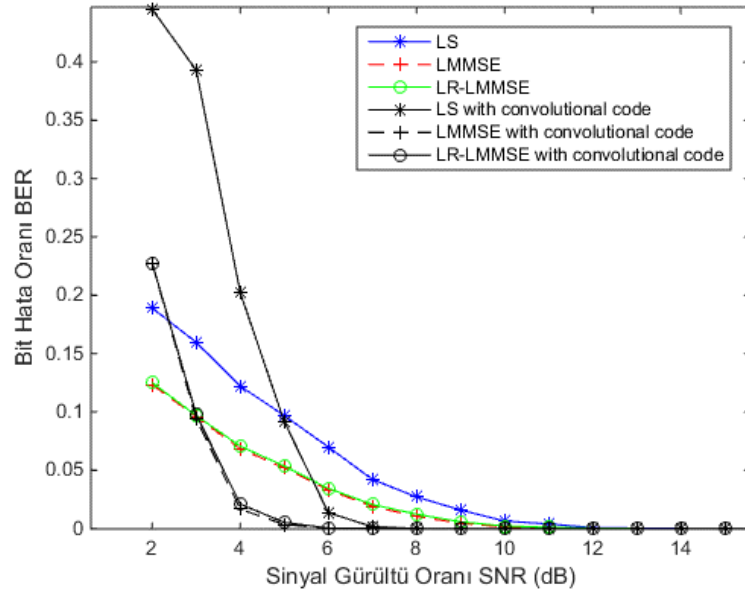
Şekil 4.23. OFDM sembolü üzerindeki AWGN kanalının bozucu etkisi



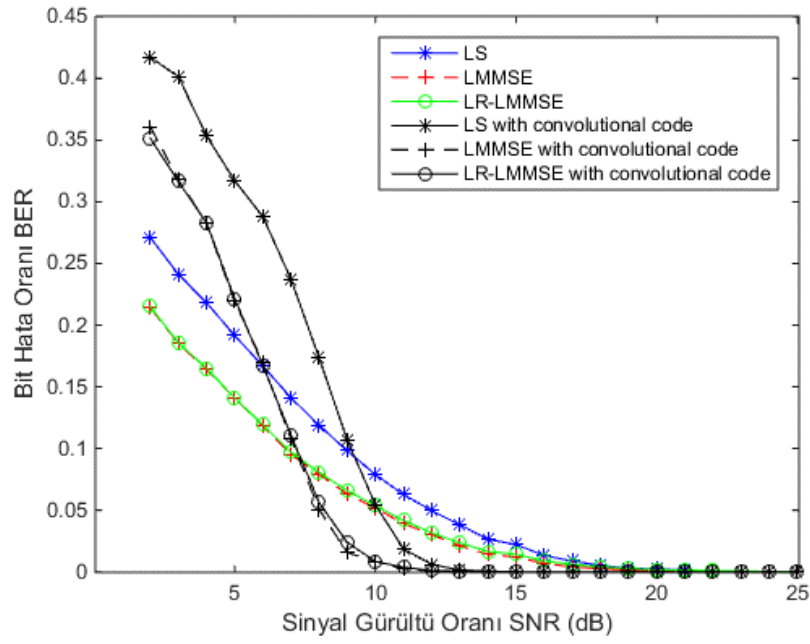
Şekil 4.24. BPSK için AWGN kanalında kestirim algoritmalarının performansı



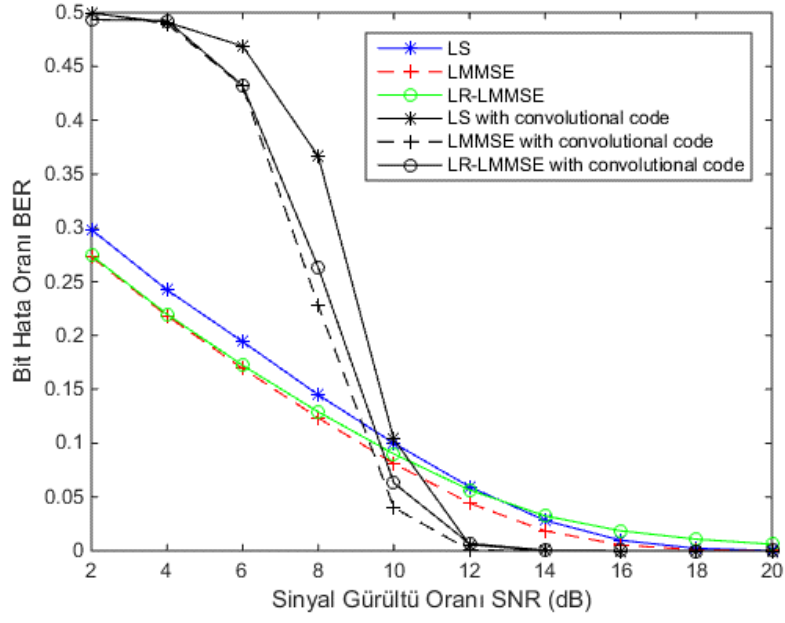
Şekil 4.25. BPSK için Rayleigh kanalında kestirim algoritmalarının performansı



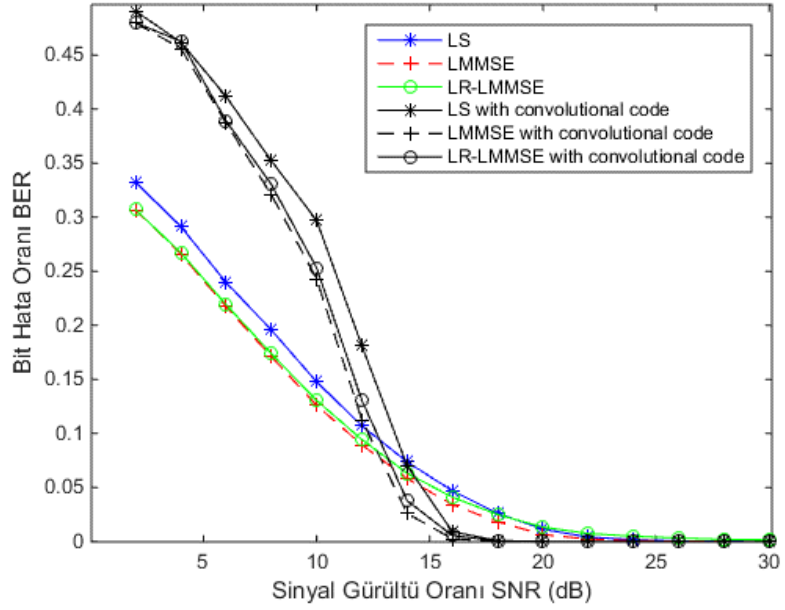
Şekil 4.26. QPSK için AWGN kanalında kestirim algoritmalarının performansı



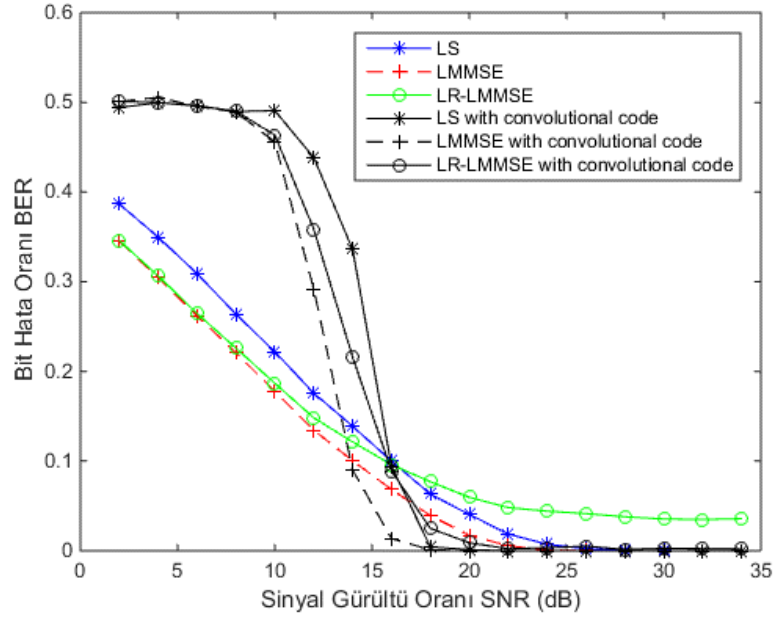
Şekil 4.27. QPSK için Rayleigh kanalında kestirim algoritmalarının performansı



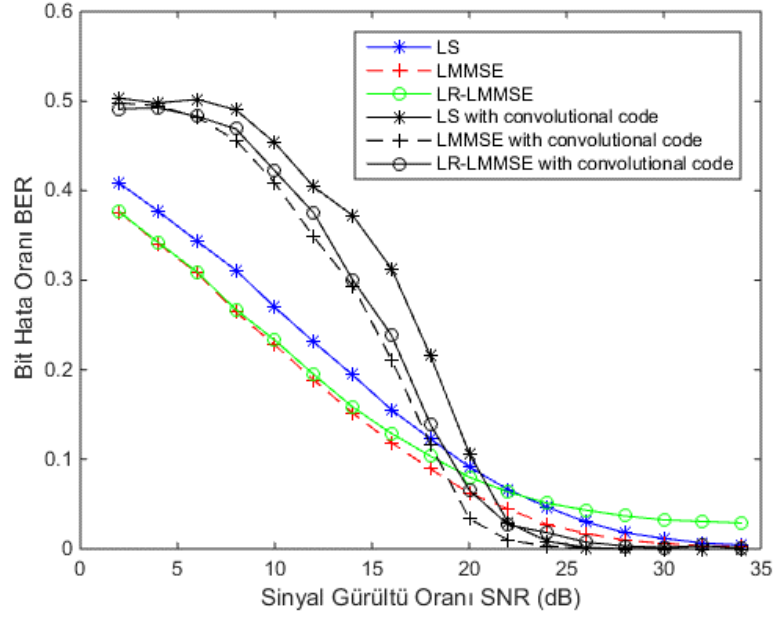
Şekil 4.28. 16QAM için AWGN kanalında kestirim algoritmalarının performansı



Şekil 4.29. 16QAM için Rayleigh kanalında kestirim algoritmalarının performansı

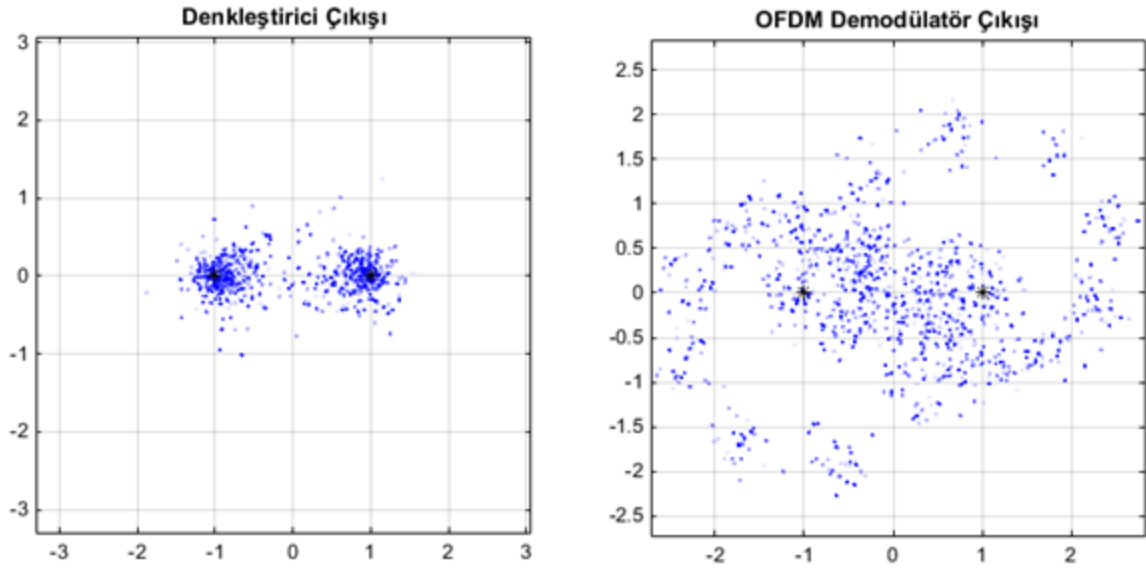


Şekil 4.30. 64QAM için AWGN kanalında kestirim algoritmalarının performansı

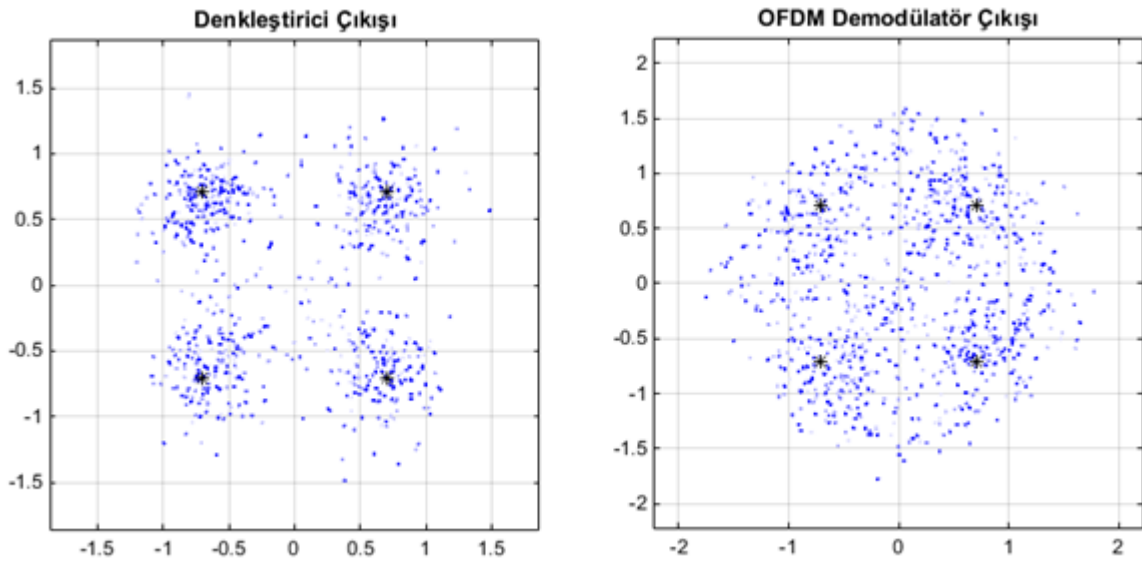


Şekil 4.31. 64QAM için Rayleigh kanalında kestirim algoritmalarının performansı

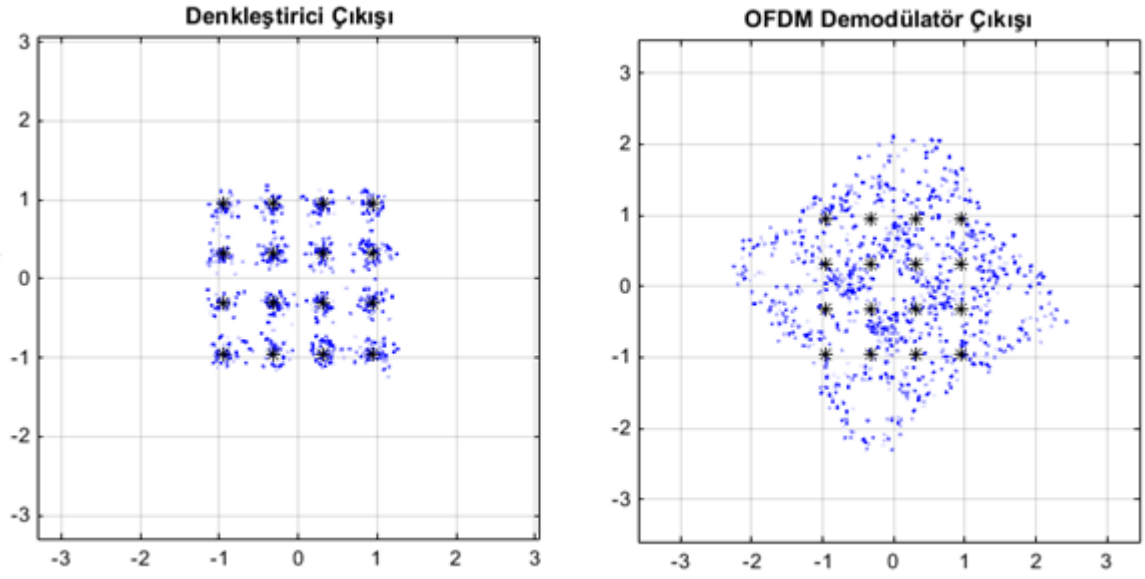
802.11a WiFi standardında LS algoritması kullanılarak oluşturulan denkleştiricinin BPSK, QPSK, 16QAM ve 64QAM modülasyon türlerine göre çok yollu kanal yapısından dolayı bozulan sinyali düzeltmedeki başarısı sırasıyla Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de verilen yıldız kümesi diyagramlarıyla karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Denkleştirici yapısının OFDM tekniğinin performansındaki önemi elde edilen bu sonuçlarla gösterilmiştir.



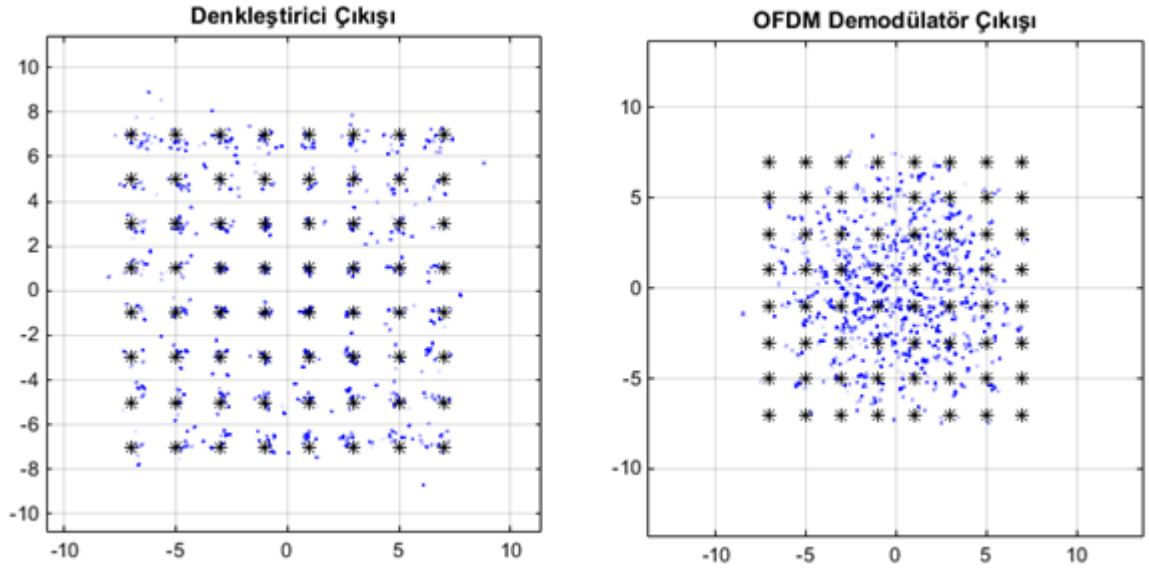
Şekil 4.32. BPSK için çok yollu kanal yapısında denkleştirici yapısının etkisi



Şekil 4.33. QPSK için çok yollu kanal yapısında denkleştirici yapısının etkisi



Şekil 4.34. 16QAM için çok yollu kanal yapısında denkleştirici yapısının etkisi



Şekil 4.35. 64QAM için çok yollu kanal yapısında denkleştirici yapısının etkisi

Tablo 4.7’ de 802.11a WiFi standardı için gerekli minimum SNR değerleri referans olarak alındığında kanal kestirim algoritmaları kullanılarak oluşturulan denkleştirici yapılarının sistem performansını gerekli değerlerde başarılı bir şekilde sağladığını görmek mümkündür. Ayrıca hata kontrol kodlaması kullanılarak elde edilen sonuçların yüksek SNR seviyelerinde çok daha iyi performans gösterdiği görülmektedir.

Tablo 4.6. WiFi Bağlantı İçin Gerekli Minimum SNR Değerleri[38]

802.11a Veri Hızı (R Mbps)	İletişim için Gerekli Minimum SNR
54	31
48	29
36	26
24	22
18	18
12	16
9	15
6	14

5. SONUÇLAR

Kablosuz haberleşme sistemlerinde gerek haberleşme ortamında bulunan engellerin neden olduğu yansıma, saçılma kırılma ve sönümlleme etkileri, gerekse alıcı verici arasındaki göreceli hareket nedeniyle oluşan frekans kaymaları çoklu yol sönümllemelerine yol açmaktadır. İletilen sinyallerin kanal boyunca farklı zayıflama, gecikme ve frekans kaymalarına maruz kalması sonucu oluşan bu sönümlleme karakteristiği kablosuz haberleşme sistemlerinde ISI'ya neden olmakta ve bu durum sistem performansını düşürerek hatalı alınan bit sayısını arttırmaktadır.

AWGN kanal yapısı kullanılarak gerçekleştirilen benzetim sonuçlarında hata oranını yalnızca sinyal/gürültü oranı belirlerken, Rayleigh çoklu yol kanal yapısı kullanılarak gerçekleştirilen benzetim sonuçlarında bit hata oranını etkileyen parametrelerin sinyal gürültü oranının yanı sıra kanalın evre uyumlu bant genişliği ve evre uyumlu periyot zamanı olduğu görülmüştür. İletilen sinyalin alt taşıyıcı frekansı Doppler frekansına yaklaştıkça kanal yapısının yavaş sönümlmeli kanal yapısından hızlı sönümlmeli kanal yapısına dönüşmekte ve ISI artışı olmaktadır. Diğer yandan kanaldaki evre uyumlu periyot süresinin sembol süresinden büyük olduğu durumlarda da kanalın frekans seçici kanal yapısı gibi davrandığı, küçük olduğunda ise düz sönümlmeli kanal yapısı gibi davrandığı gözlemlenmiştir. Kanaldaki her bir yolun gecikmesi çevrimsel önek süresinden büyük olduğunda da benzer şekilde ISI oluşmaktadır.

Kanal kestirim algoritmalarının sonuçları incelendiğinde ise MMSE ve LRMMSE algoritmalarının düşük SNR seviyelerinde etkili olduğu yalnız yüksek SNR seviyelerinde LS algoritmasıyla benzer performans sergilediği sonucu çıkartılmıştır. LRMMSE algoritması MMSE algoritmasıyla birlikte, düşük SNR değerlerinde benzer sonuçlar vermesine rağmen işlem yükü ve kompleksliliğinin daha az olması nedeniyle LRMMSE tercih edilme sebebi olmaktadır. Diğer yandan LS algoritmasının avantajı ise kanal kestirimi için pilot sembollerden başka veriye ihtiyaç duymamasıdır. Örnek sistemler açısından bakıldığında 802.11a WiFi standardında bağlantı için gerekli olan minimum SNR seviyeleri için LS kanal kestirim algoritmasının yeterli olduğu görülmüştür. Ayrıca komplekslik ve işlem yükü açısından bakıldığında da LS algoritması tercih edilmektedir. Sisteme kodlama ve serpiştirici yapılarının dâhil edilmesiyle birlikte yüksek SNR seviyelerinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

6. ÖNERİLER

Yapılan literatür araştırması ve bu tez kapsamında elde edilen bulgular ışığında, bu çalışmanın geliştirilmesi veya daha sonra bu alanda yapılacak çalışmalar için aşağıdaki öneriler verilebilir.

- Benzetim sonuçlarında alıcı verici arasındaki mobilitenin artması sistem performansını düşürmektedir. Yüksek mobiliteli haberleşmede Doppler kaymasının ayrıca kestirilmesi durumunda performans artacaktır.
- İletim sırasında veri setine eklenen pilot sembollerinin sıklığı arttıkça sistem performansı artmakla beraber gönderilen veri iletim oranı düşmektedir. Pilot semboller eklenirken veri iletim oranını koruyan bir yapı oluşturulabilirse yüksek iletim hızlarında daha iyi sonuçlar alınabilir.
- Ayrıca kullanılan kanal kodlama ve kod çözücü yapılarının geliştirilmesi de benzer şekilde sisteme katkı sağlayacaktır.

REFERANSLAR

- [1] **Ilyas M., Ahson. S.**, 2007 WiMAX Standards and Security, CRC Press,
- [2] **Küçükünsal, J., Baysal, Y.**,2005. Kablosuz Haberleşme Teknolojisi WiMAX'de Dünyadaki Durum.
- [3] **Kavas,A.**, 2005 WiMAX Geniş Bantta Telsiz Erişim: Elektrik Mühendisliği Dergisi.
- [4] **Abdi.V.A.**, 2004 WiMAX-The Future Of Broadband, Secretary, Internet Service Providers Association of Pakistan.
- [5] Microwave Access Forum, 2006 “IEEE 802.16a Standard and WiMAX Igniting Broadband Wireless Access” .
- [6] **Hara S., Prasad R.**, 2003 “Multicarrier Techniques for 4G Mobile Communications”, Artech House.
- [7] **Harmon. J.**, 2014 Understanding IEEE 802.11ad Physical Layer and Measurement Challenges Wireless Application Marketing Microwave Communications Division.
- [8] **Fazel,K. and Kaiser,S.** (2003). Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems,Jhon Wiley & Sons Ltd, England.
- [9] **Karabacak, Ö. ve Şafak, M.** (2004) Dikgen Frekans Bölüşümlü Çoğullama (OFDM) Sisteminin Düz ve Hızlı Sönümlemeli Kanallarda Başarım Analizi, URSl.
- [10] **Seyman, N. M. ve Taşpınar, N.** (2006). Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama Sistemlerinde Çevrimsel Ön Takı Tabanlı Senkronizasyon Tekniğinin AWGN ve Rayleigh Sönümlü Kanallardaki Başarımının İncelenmesi. URSl.
- [11] **Ohno, S. and Giannakis, G.B.** (2004) Capacity Maximizing MMSE-Optimal Pilots for Wireless OFDM Over Frequency Selective Block Rayleigh Fading Channels, IEEE Transactions on Information Theory, Vol.50, no.9, (pp. 2138-2145)
- [12] **Choi, J. W., & Lee, Y. H.** (2005, May). Design of 2-D channel estimation filters for OFDM systems. In *Communications, IEEE International Conference on* Vol. 4, (pp. 2568-2572).
- [13] **Gupta, D., Vats, V. B., & Garg, K. K.** (2008, July). Performance Analysis of DFT-OFDM, DCT-OFDM, and DWT-OFDM Systems in AWGN Channel. In *Wireless and Mobile Communications, ICWMC'08. The Fourth International Conference on* (pp. 214-216). IEEE.
- [14] **Joshi, A., & Saini, D. S.** (2010). Performance analysis of coded OFDM for various modulation schemes in 802.11 a based digital broadcast applications. In *Information Processing and Management* (pp. 60-64). Springer Berlin Heidelberg.
- [15] **Engiz, B:K., Kurnaz, Ç. ve Sezgin, H., Gökalp, H.** (2011) Pilot Bit Yerleşiminin DFBC Sistem Başarımına Etkisinin İncelenmesi, IEEE 19. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı SİU (714-717)

- [16] **Aida, Z., & Ridha, B.** (2011). LMMSE channel estimation for block-pilot insertion in OFDM systems under time varying conditions. In *Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 2011 11th* (pp. 223-228). IEEE.
- [17] **Sharma, D. and Srivastava, P.** (2013) International Journal of Emerging Thecnology and Advanced Engineering Vol.3, no 9, pp. 2250-2459
- [18] **Savaux, V., Louët, Y., Djoko-Kouam, M., Djoko-Kouam, M., & Skrzypczak, A.** (2012, April). An iterative and joint estimation of SNR and frequency selective channel for OFDM systems. In *European Wireless, 2012. EW. 18th European Wireless Conference* (pp. 1-7). VDE.
- [19] **Faezah, J., & Sabira, K.** (2009). Adaptive modulation for OFDM systems. *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, 1(2).
- [20] **Sastry, K. S., & Babu, D. M. P.** (2010). Fuzzy logic based adaptive modulation using non data aided SNR estimation for OFDM system. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(6), 2384-2392.
- [21] **Nassar, M., Schniter, P., & Evans, B. L.** (2014). A factor graph approach to joint OFDM channel estimation and decoding in impulsive noise environments. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 62(6), 1576-1589.
- [22] **Shah, S. K., Suratia, P. S., & Reshamwala, N. S.** Comparative Performance Analysis of ANN Based MIMO Channel Estimation for downlink LTE-Advanced System employing Genetic Algorithm. In proceeding of International Conference On Soft Computing and Software Engineering [SCSE'13].
- [23] **Simon. H.**, 2009 Communication Systems. Wiley Publishing.
- [24] **Simon, M.K. and Alouini M.**, 2005. "Digital Communication over Fading Channels", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [25] **Rappaport, Theodore S.**, 2001, "Wireless Communications: Principles and Practice", Prentice Hall.
- [26] **Cho, Yong S., et al.** ,2009 Matlab/Simulink for digital communication. The MathWorks
- [27] **Roberto Cristi**, 2009 Wireless Communications with Matlab and Simulink: IEEE802.16 (WiMax) Physical Layer Dept of Electrical and Computer Engineering Naval Postgraduate School Monterey, CA 93943
- [28] **Belloni, F.**, 2004, "Fading Models", IEEE, S-72.333, 1 – 4
- [29] <http://wirelessman.org> 2011 IEEE 802.16.3c-01/29r4, "Channel Models for Wireless
- [30] **Erceg. V. et al**, 1999 "An Empirical Based Path Loss Model for Wireless Channels in Suburban Environments," IEEE Selected Areas in Communications, Vol 17, no 7, July
- [31] **Yalçın. M.**, 2011 Kablosuz iletişim sistemlerinde zaman-frekans yaklaşımı ile kanal modelleme ve kestirimi doktora tezi

- [32] **Heiskala, J., Terry, J.**, 2001 OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide, Sams Publishing.
- [33] **Morelli M.**, 2004 Timing and Frequency Synchronization for the Uplink of an OFDMA Systems, IEEE Transactions on Communications, 52(2), 296-306.
- [34] **Yalcin. M., Aydin A., and Doğan. H.** , 2009 "Channel estimation for OFDM systems with high mobility fading channels." Ultra Modern Telecommunications & Workshops, ICUMT'09. International Conference on. IEEE
- [35] **Acar, Y., Dogan, H., & Panayirci, E.** (2015, May). Spline based channel estimation for STBC-SM systems over fast-varying rician fading channels. In Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2015 23th (pp. 188-191). IEEE.
- [36] **Ertürk. S.**, 2005 Sayısal Haberleşme, Birsen Yayınevi s:330-333.
- [37] <http://www.mathworks.com/>
- [38] Cisco Wireless Mesh Access Points, Design and Deployment Guide, Release 7.

ÖZGEÇMİŞ

ORHAN ATİLA

Fırat Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
Elektrik-Elektrik Mühendisliği Bölümü
Elazığ
oatila@firat.edu.tr

- 1987** Elazığ'da doğdu.
- 2005-2011** Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik-Haberleşme Mühendisliğinden mezun oldu.
- 2012-** Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmekte.