



**OFDM-RoF İLETİM SİSTEMİNİN FARKLI MODÜLASYON
TEKNİKLERİ VE FARKLI KANAL KOŞULLARI İÇİN PERFORMANS
ANALİZİ**

Muharrem AÇIKGÖZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2019

Muharrem AÇIKGÖZ tarafından hazırlanan “OFDM-RoF İLETİM SİSTEMİNİN FARKLI MODÜLASYON TEKNİKLERİ VE FARKLI KANAL KOŞULLARI İÇİN PERFORMANS ANALİZİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Erdem YAZGAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TED Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Özgül SALOR DURNA

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 10/07/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muharrem AÇIKGÖZ

10/07/2019

OFDM-RoF İLETİM SİSTEMİNİN FARKLI MODÜLASYON TEKNİKLERİ VE FARKLI KANAL KOŞULLARI İÇİN PERFORMANS ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muharrem AÇIKGÖZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Günümüz kablosuz haberleşme sistemleri, kısa mesafedeki son kullanıcılar için uygun bir erişim sağlamakla birlikte, uzun mesafeli hatlarda hızla artan kapasite ve hız ihtiyacı nedeniyle kullanışlı olmamaktadır. Bu durumda fiber optik kullanan ve merkezileştirilmiş servis sağlayan baz istasyonlarının yer aldığı Fiber üzerinden Radyo Frekans iletimi (RoF) uygun bir çözüm olmaktadır. Bu çalışmada RoF, milimetre-dalga (mm-wave) ve dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) teknolojilerinin çalışma prensipleri tanımlanarak, fiber ve kablosuz ağlara uygulanması tanıtılmaktadır. Ayrıca, mevcut geniş bantlı kablosuz erişim alt yapısında kullanılan OFDM-RoF teknolojisinin sistem yapısı ve gelecek nesil haberleşme için gerekliliği ele alınmaktadır. Yapılan benzetim çalışmalarında, farklı modülasyon teknikleri kullanılarak OFDM-RoF transmisyon sistemi üzerinden iletilen verinin iletimi süresince hat etkileri nedeniyle yaşanan bozulmalar BER/SNR grafikleri ve kümelenme diyagramları ile incelenmiştir. Buna ilave olarak hızlı hareketli kullanıcıların veri iletiminde farklı hızlar ve taşıyıcı frekanslarda belirlenen doppler frekans etkisi, farklı fiber uzunluklarındaki zayıflama etkisi ile değişen BER oranları ve veri iletim oranları analiz edilmiştir. Benzetim modelleri Matlab/Simulink yazılım ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre, modülasyon tekniklerinin seviyesinin artmasıyla birlikte OFDM-RoF sistem performansının önemli oranda etkilendiği ve düşük BER değeri elde etmek için gereken SNR değerinin aynı oranda arttığı görülmüştür. Diğer taraftan hızın ve taşıyıcı frekansın artmasıyla birlikte artan doppler etkisinin alınan verinin genlik ve fazını değiştirdiği ve düşük BER değeri için gerekli olan SNR değerini arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, kullanıcı hızının ve fiber mesafesine bağlı zayıflama etkisinin artmasıyla birlikte BER değerinin arttığı ve veri iletim oranının düştüğü görülmüştür.

Bilim Kodu : 90523
Anahtar Kelimeler : RoF, OFDM, Mm-dalga, Doppler, Simulink
Sayfa Adedi : 113
Danışman : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

PERFORMANCE ANALYSIS OF OFDM-RoF TRANSMISSION SYSTEM
FOR DIFFERENT MODULATION METHODS AND CHANNEL CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Muharrem AÇIKGÖZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

Although today's wireless communication systems provide accessibility for short-range end users, it is getting less suitable for long-haul lines with the increase in data rate and capacity. In this situation, Radio over Fiber (RoF) system using fiber optics and base stations that provide centralized service is a suitable solution. In this study, the operating principles of RoF, millimeter-wave (mm-wave) and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technologies are described and introduced to the application on fiber and wireless networks. In addition, the system structure of OFDM-RoF technology used in the existing broadband wireless access infrastructure and the necessity for next generation communication are discussed. In the simulation studies, the distortions due to the line effects during the transmission of data through the OFDM-RoF transmission system using different modulation techniques were investigated with BER/SNR graphs and constellation diagrams. In addition, for data transfer of fast moving users, the effects of Doppler frequency at different speeds and carrier frequencies, the effects of attenuation for different fiber lengths on the BER rate and transferred data rate are also analyzed. Simulation models are realized in Matlab/Simulink software environment. According to the simulation results, as the level of modulation techniques increased, the performance of the OFDM-RoF is significantly affected and the SNR required to get a low BER value increased at the same rate. On the other hand, with increasing speed and carrier frequency, increased Doppler Effect is found to be changing the amplitude and phase of the received data and increase the SNR required for the low BER value. In addition, with the increase in user speed and attenuation effect due to fiber distance, BER value increased and data transmission rate decreased.

Science Code : 90523

Key Words : RoF, OFDM, Mm-wave, Doppler, Simulink

Page Number : 113

Supervisor : Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam süresince bana yol gösteren ve rehberlik sağlayan değerli hocam ve tez danıőmanım Prof. Dr. Müzeyyen SARITAŞ'a, manevi desteklerini esirgemeyen değerli arkadaşlarıma, eőime ve biricik kızıma teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. OPTİK VE KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ	5
2.1. Optik Haberleşme ve Fiber Optik	5
2.2. Kablosuz Haberleşme Sistemleri.....	9
3. OFDM-RoF İLETİM SİSTEMİ	13
3.1. OFDM-RoF Sistemi ve Çalışma Prensibi	13
3.2. RoF (Fiber üzerinden Radyo) İletim Teknolojisi ve Sistem Mimarisi	14
3.2.1. RoF kategorileri ve sistem elemanları	18
3.2.2. Optik modülasyon ve çoğullama teknikleri	23
3.2.3. RoF uygulama alanları	27
3.2.4. RoF kullanım avantajları	29
3.2.5. RoF kısıtlamaları	32
3.2.6. Milimetre dalga teknolojisi	33
3.2.7. Mm-dalga üretim teknikleri	34
3.3. OFDM Teknolojisi ve Sistem Mimarisi	38
3.3.1. OFDM parametreleri ve özellikleri	46

	Sayfa
3.3.2. OFDM çeşitleri ve uygulama alanları	55
3.3.3. OFDM sisteminde kullanılan modülasyon teknikleri	59
4. OFDM-RoF İLETİM SİSTEMİ BENZETİM ÇALIŞMASI	65
4.1. OFDM-RoF-PSK Benzetimi ve Performans Analizi	71
4.2. OFDM-RoF-QAM Benzetimi ve Performans Analizi	76
4.3. OFDM-RoF Hattının Farklı Kanal Koşulları için Benzetimi	81
4.3.1. Farklı taşıyıcı frekanslar için performans analizi	84
4.3.2. Farklı veri modülasyonları ve mesafeler için performans analizi	92
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	113

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kablosuz haberleşme teknolojileri	12
Çizelge 4.1. Benzetim çalışmalarına ait ortak parametreler	66
Çizelge 4.2. BPSK ve QPSK ile elde edilen BER/SNR değerleri	72
Çizelge 4.3. 4, 16 ve 64-QAM modülasyonu için elde edilen BER/SNR değerleri	76
Çizelge 4.4. Farklı efektif hızlar ve taşıyıcı frekansları için elde edilen f_D değerleri....	84
Çizelge 4.5. 4-QAM veri modülasyonu ve farklı efektif hızlarda 900 MHz taşıyıcı frekans için elde edilen BER/SNR değerleri	85
Çizelge 4.6. 4-QAM veri modülasyonu ve farklı efektif hızlarda 2,5 GHz taşıyıcı frekans için elde edilen BER/SNR değerleri	85
Çizelge 4.7. 4-QAM veri modülasyonu ve farklı efektif hızlarda 60 GHz taşıyıcı frekans için elde edilen BER/SNR değerleri	86
Çizelge 4.8. 4-QAM, 10 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri	93
Çizelge 4.9. 4-QAM, 40 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri	94
Çizelge 4.10. 4-QAM, 90 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri	94
Çizelge 4.11. BPSK, 10 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri.....	97
Çizelge 4.12. BPSK, 40 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri.....	98
Çizelge 4.13. BPSK, 90 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri.....	98

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Optik iletim (transmisyon) hattı	5
Şekil 2.2. Fiber optik çalışma bölgeleri	6
Şekil 2.3. MMF ve SMF çekirdek çapları	6
Şekil 2.4. Optik darbelerin (palslerin) dispersiyon etkisiyle genişlemesi	8
Şekil 2.5. Sabit ve mobil servis aboneliklerinin yıllara göre değişimi	9
Şekil 2.6. Kablosuz standartların son yirmi yıldaki değişimi	11
Şekil 3.1. OFDM-RoF sisteminin genel blok şeması	13
Şekil 3.2. RoF sisteminin genel şeması	15
Şekil 3.3. RoF sisteminin temel devre yapısı.....	17
Şekil 3.4. RoF sisteminin tipik yükleme ve indirme hattı konfigürasyonları	17
Şekil 3.5. Fiber üzerinden radyo frekansı (RF-over-Fiber) iletim şeması	19
Şekil 3.6. Fiber üzerinden ara frekans (IF-over-fiber) konfigürasyonu	20
Şekil 3.7. Fiber üzerinden temel frekans (BB-over-Fiber) iletim şeması	21
Şekil 3.8. Temel analog fiber hattı.....	23
Şekil 3.9. Doğrudan modülasyon.....	24
Şekil 3.10. Harici modülasyon.....	25
Şekil 3.11. Alt taşıyıcı çoğullama (SCM) yapısı	26
Şekil 3.12. Dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) tekniği.....	27
Şekil 3.13. Mm-dalga RoF haberleşme sisteminin temel yapısı.....	34
Şekil 3.14. İki bağımsız lazer kaynağı kullanılarak mm-dalga üretimi	35
Şekil 3.15. Lazerin optik yoğunluğunun (a) Doğrudan (b) Harici modülasyonu	36
Şekil 3.16. Harici modülasyon kullanılan RF verici.....	37
Şekil 3.17. OFDM sisteminin temel iletim yapısı.....	38

Şekil	Sayfa
Şekil 3.18. Bant genişliğinin verimli kullanımı (a) FDM (b) OFDM.....	39
Şekil 3.19. OFDM sistemindeki tekil alt taşıyıcıların sembolik gösterimi.....	40
Şekil 3.20. OFDM sembolünün spektrumu (a) Zaman alanında (b) Frekans alanında ..	41
Şekil 3.21. Tipik bir OFDM gönderici tarafı blok diyagramı.....	42
Şekil 3.22. Tipik bir OFDM alıcı tarafı blok diyagramı	43
Şekil 3.23. Paralel sütunlar: Alt taşıyıcılar (SC), Satırlar: OFDM sembolleri	44
Şekil 3.24. OFDM sisteminin basit çalışma prensibi.....	44
Şekil 3.25. Koruma aralığı ve periyot içerisinde uzatılmış kopyası	47
Şekil 3.26. Koruma aralığı ve periyodu aşan uzatılmış kopyası ile uzatılmış olan OFDM sembolü	48
Şekil 3.27. Döngüsel önek uygulamasının etkisi	49
Şekil 3.28. OFDM sinyalinde PAPR oluşumu	50
Şekil 3.29. OFDM sistemindeki dikgen alt taşıyıcılar.....	51
Şekil 3.30. Frekans alanındaki OFDM alt taşıyıcıları.....	52
Şekil 3.31. Alt taşıyıcıların kanallara gruplanması.....	56
Şekil 3.32. Her kullanıcıya ait veri alt taşıyıcıları	56
Şekil 3.33. VOFDM ile kullanılan MIMO.....	57
Şekil 3.34. OFDM ve kablosuz haberleşme standartları.....	58
Şekil 3.35. (a) BPSK ve (b) QPSK Konstelasyon (kümelenme) diyagramları.....	62
Şekil 3.36. 16-QAM Konstelasyon (kümelenme) diyagramı	64
Şekil 4.1. MATLAB/Simulink benzetim çalışmaları için oluşturulan OFDM-RoF devre şeması	65
Şekil 4.2. Lazer modülasyon modeli (a) Doğrusal olmayan devre şeması (b) Doğrusal devre şeması	68
Şekil 4.3. Fiber zayıflama modeli devre şeması	69
Şekil 4.4. Fotodedektör modeli devre şeması	70

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. BPSK ve QPSK için BER/SNR grafiği	73
Şekil 4.6. BPSK ve QPSK giriş verisi kümelenme diyagramları	73
Şekil 4.7. Farklı SNR değerleri için BPSK kümelenme çıkış diyagramları	74
Şekil 4.8. Farklı SNR değerleri için QPSK kümelenme çıkış diyagramları	75
Şekil 4.9. 4, 16 ve 64-QAM modülasyonu için BER/SNR grafiği	77
Şekil 4.10. 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM giriş verisi kümelenme diyagramları	78
Şekil 4.11. Farklı SNR değerleri için 4-QAM kümelenme çıkış diyagramları	78
Şekil 4.12. Farklı SNR değerleri için 16-QAM kümelenme çıkış diyagramları	79
Şekil 4.13. Farklı SNR değerleri için 64-QAM kümelenme çıkış diyagramları	80
Şekil 4.14. OFDM-RoF farklı kanal koşulları için kullanılan devre modeli	81
Şekil 4.15. Açık görüş (LOS) ve açık olmayan görüş (NLOS) hatları	83
Şekil 4.16. 900 MHz ve 4-QAM için farklı hızlardaki BER/SNR grafiği	87
Şekil 4.17. 2,5 GHz ve 4-QAM için farklı hızlardaki BER/SNR grafiği	88
Şekil 4.18. 60 GHz ve 4-QAM için farklı hızlardaki BER/SNR grafiği	88
Şekil 4.19. 900 MHz ve 4-QAM için farklı SNR ve hızlardaki kümelenme çıkış diyagramları	89
Şekil 4.20. 2,5 GHz ve 4-QAM için farklı SNR ve hızlardaki kümelenme çıkış diyagramları	90
Şekil 4.21. 60 GHz ve 4-QAM için farklı SNR ve hızlardaki kümelenme çıkış diyagramları	91
Şekil 4.22. 4-QAM, 10 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği ...	95
Şekil 4.23. 4-QAM, 40 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği ...	95
Şekil 4.24. 4-QAM, 90 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği ...	96
Şekil 4.25. 4-QAM, farklı hızlar ve SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği.....	97
Şekil 4.26. BPSK, 10 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği	99
Şekil 4.27. BPSK, 40 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği	100

Şekil	Sayfa
Şekil 4.28. BPSK, 90 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği	100
Şekil 4.29. BPSK, farklı hızlar ve SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği	101
Şekil 4.30. BPSK ve 4-QAM için 30 dB SNR ve farklı hızlardaki Mesafe/BER grafiği	101
Şekil 4.31. 4-QAM için farklı SNR ve farklı hızlardaki Mesafe/Veri iletim oranı grafiği	103
Şekil 4.32. BPSK için farklı SNR ve farklı hızlardaki Mesafe/Veri iletim oranı grafiği	103



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
dB	Desibel
GHz	Giga Hertz
kHz	Kilo Hertz
MHz	Mega Hertz
mm	Milimetre
THz	Tera Hertz
Kısaltmalar	Açıklamalar
BER	Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BS	Baz İstasyonu (Base Station)
CDMA	Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)
CS	Merkez İstasyon (Central Station)
FDM	Frekans Bölmeli Çoğullama (Frequency Division Multiplexing)
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
FTTH	Eve Kadar Fiber (Fiber-to-the-Home)
IFFT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform)
GPRS	Genel Paket Radyo Servisi (General Packet Radio Service)
GSM	Mobil Haberleşme için Global Sistem (Global System for Mobile Communication)
ICI	Taşıyıcılar Arası Girişim (Inter Carrier Interference)
IM-DD	Yoğunluk Modülasyonlu Doğrudan Algılama (Intensity Modulated - Direct Detection)
ISI	Semboller Arası Girişim (Inter Symbol Interference)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

LTE	Uzun Dönemli Evrilme (Long Term Evolution)
MIMO	Çoklu Giriş ve Çoklu Çıkış (Multiple Input and Multiple Output)
MMF	Çok Modlu Fiber (Multi Mode Fiber)
OFDM	Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)
PAPR	Tepe-Ortalama Güç Oranı Değeri (Peak-to-Average Power Ratio)
PSK	Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying)
QAM	Dörtlü Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
RAU	Uzak Anten Birimi (Remote Antenna Unit)
RF	Radyo Frekansı (Radio Frequency)
RoF	Fiber üzerinden Radyo (Radio-over-Fiber)
SCM	Alt Taşıyıcı Çoğullaması (Sub-Carrier Multiplexing)
SIM	Abone Kimlik Modülü (Subscriber Identity Module)
SMF	Tek Modlu Fiber (Single Mode Fiber)
SNR	Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
UMTS	Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi (Universal Mobile Telecommunications System)
WDM	Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama (Wavelength Division Multiplexing)
WiMAX	Mikrodalga Erişim için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (Worldwide Interoperability for Microwave Access)

1. GİRİŞ

Kablosuz ve optik haberleşme alanlarında son dönemde yaşanan önemli gelişmelerin arkasındaki temel etken son kullanıcıların çoklu ortam servislerine ve buna bağlı olarak da geniş bant erişimine olan talebinin artmış olmasıdır. Bilgi servisleri ve görsel iletişim servislerinin hızlı gelişimiyle birlikte yüksek kapasiteli ve yüksek hızlı iletim sistemlerine olan ihtiyaç da artış göstermiştir. Klasik kablosuz haberleşme sistemlerinin bu ihtiyaç karşısında yetersiz kalması nedeniyle günümüz haberleşme sistemlerinde geniş bantlı radyo hatlarının kullanımı daha yaygın bir hale gelmektedir. Ayrıca, radyo spektrumunun kısıtlı olması nedeniyle de mevcut spektrumda yetersizlik ortaya çıkmaktadır.

Bunun yanında mevcut kablosuz haberleşme sistemleri, kısa mesafedeki son kullanıcılar için uygun bir erişim sağlamakla birlikte, uzun mesafeli hatlarda hızla artan kapasite ve hız ihtiyacı nedeniyle kullanışlı olmamaktadır. Bundan dolayı yüksek hızlı verinin, uzak mesafelere erişimi için bozulma etkisi azaltılmış ve güç tüketimi düşük fiber optik iletim hattına ihtiyaç duyulmaktadır. Optik şebekelerin yüksek kapasitesi ile radyo şebekelerinin esnek yapısının entegre edilmesi sayesinde artan kapasite ihtiyacı ve uzak mesafe haberleşmesi sağlanabilmektedir. Bu durumda, RoF (Fiber üzerinden Radyo) teknolojisi kullanan fiber temelli kablosuz erişim konfigürasyonları uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Esnek bir yapısı olan RoF sistemi, gelecek nesil kablosuz veri şebekelerinin mikro ve piko hücre bağlantıları için uygun bir tekniktir. RoF sisteminin bağlantı yapısı, mikrodalga ve optik şebekelerin entegrasyonu ile oluşturulmaktadır. Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) ile birlikte kullanılan RoF iletim sistemi, hızlı veri trafiği ihtiyacına ve yüksek kapasiteli gelecek nesil kablosuz haberleşme altyapısına önemli bir çözüm sunmaktadır.

Literatürde, RoF ve OFDM-RoF iletim sistemlerinin genel yapısı [1-4], RoF sistemi ile çalışan mikrodalga/mm-dalga teknolojisi [3, 4], OFDM sisteminin tasarım parametreleri [5], RoF sisteminde kullanılan yeni optoelektronik cihazlar [6], RoF sisteminin çalışma yapısı, çoğullama ve modülasyon teknikleri ile RoF taşıma yöntemleri [7-10] hakkında detaylı çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Ayrıca, mikrodalga/mm-dalga üretim ve iletim teknikleri [11, 12], OFDM sisteminin yapısı, avantajları çeşitleri ve uygulama alanları [13-15], Wimax ve LTE sistemlerinin uygulamasında WDM, CWDM-GPON ve RoF iletim

sisteminin kullanımı [16], mm-dalga-RoF-OFDM sisteminin çalışma yapısı [17], RoF teknolojisinin temelleri, avantajları, uygulamaları ile analog ve sayısal RoF karşılaştırması [18-20] hakkında detaylı çalışmalar yapılmıştır.

Literatürde, OFDM-RoF iletim sisteminin farklı teknikler kullanılarak ve bu tekniklerin farklı parametrelere göre incelenmesi yoluyla sistem performans analizi çalışmaları yapılmıştır. Kullanılan tekniklere bakıldığında M-PSK ve M-QAM gibi farklı veri modülasyon teknikleri [19, 21-23], uyarılmış Brillouin saçılımı (SBS) tekniği [24], QAM ve PSK ile AWGN kanalı [22, 25] kullanılarak Bit-hata-oranı (BER)/Sinyal gürültü-oranı (SNR) analizi [19, 22, 23, 25-27], OFDM-RoF-WDM sistemi için OptiSystem simülasyonu [28], RoF-WCDMA ve sönmüleme kanalları [29] ile QAM, PSK teknikleri için OFDM ve RoF-OFDM Matlab ve Simulink benzetim ortamı analizleri [30, 31] yapıldığı görülmektedir.

Ayrıca literatürde kablosuz haberleşme nesilleri ve OFDM ilişkisinin incelenmesi [32], farklı kanal denkleştirme yöntemleri kullanılarak OFDM performans analizi [33], Matlab ve Simulink programları kullanılarak OFDM-RoF [34], OFDM-WDM [35], LTE-RoF [36] ve LTE sistem analizi [37] ile Simulink benzetim ortamı veya farklı formüller kullanılarak araç haberleşmesi ve Doppler etkisi ile OFDM incelemesi [38] ve RoF sistemlerinde kullanılan lazer, fiber ortamı ve modülatörlerin modellenmesi [39-41] yapılmıştır. İlave olarak, OFDM-RoF sisteminin WDM ve SCM çoğullama teknikleri [42] ile birlikte, OFDM ve CDMA sistemlerinin ise sönmüleme etkisi [43] ile birlikte performans analizi farklı simülasyon ortamları kullanılarak gerçekleştirilmiş ve diğer taraftan, OFDM temel çalışma prensipleri ve avantajları konusunda da çalışmalar yapılmıştır [44-47].

İncelenen çalışmalarda performans değerlendirmesi amacıyla kullanılan farklı benzetim ortamları, OptiSystem® [16, 21, 24, 28, 42], Matlab/Simulink® [19, 22, 25-27, 29-31, 33-37, 40, 41, 43] ve OptSim® [23] gibi benzetim ortamlarıdır.

Bu tezde, OFDM-RoF iletim sisteminin çalışma yapısı incelenerek farklı modülasyon teknikleri ile farklı kanal koşulları altındaki performansı değerlendirilmektedir. Tez çalışması kapsamında, OFDM-RoF iletim sisteminin performans analizi; i) farklı modülasyon teknikleri (BPSK, QPSK, 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM) kullanılarak elde edilen kümelenme diyagramlarına göre ve BER/SNR sonuçlarına göre, ii) oluşturulan

sisteme, doppler frekans etkisi de eklenerek ve 4-QAM veri modülasyonu kullanılarak üç farklı hareketli kullanıcı hızı ve üç farklı taşıyıcı frekansı için elde edilen kümelenme diyagramlarına göre ve BER/SNR sonuçlarına göre ve iii) bir taşıyıcı frekans için üç farklı hareketli kullanıcı hızı ve sekiz farklı fiber mesafesinde 4-QAM ve BPSK veri modülasyonları için elde edilen BER/SNR, BER/Mesafe ve veri iletimi oranlarına göre yapılmıştır. Benzetim ortamı olarak Matlab/Simulink® yazılımı kullanılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde optik ve kablosuz haberleşme sistemlerinin temel çalışma prensipleri ve fiber optik hakkında genel bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümünde OFDM-RoF iletim sisteminin temel çalışma yapısı ile RoF ve OFDM sistemlerinin mimarileri, çalışma prensipleri, uygulama alanları, çeşitleri ve avantajları; OFDM sistemi ile birlikte kullanılan modülasyon teknikleri, mm-dalga teknolojisi ve üretim teknikleri ele alınmıştır.

Dördüncü bölümde, OFDM-RoF iletim sistemi, farklı modülasyon teknikleri kullanılarak ve farklı kanal koşullarının etkisi altında benzetim programında modellenmiş ve benzetim çalışmaları yapılmıştır. Modülasyon tekniklerinin seviyesinin OFDM-RoF sistem performansına etkisini incelemek için BER-SNR grafikleri elde edilmiştir. Diğer taraftan hızın ve taşıyıcı frekansının artmasıyla birlikte artan doppler etkisinin alınan verinin genliğine, fazına ve BER-SNR değerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca, kullanıcı hızının ve fiber mesafesinin BER-SNR değerlerine etkisi incelenmiştir.

Beşinci bölümde ise, OFDM-RoF iletim sisteminin benzetim modellerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve ileriye yönelik çalışmalara yer verilmiştir.

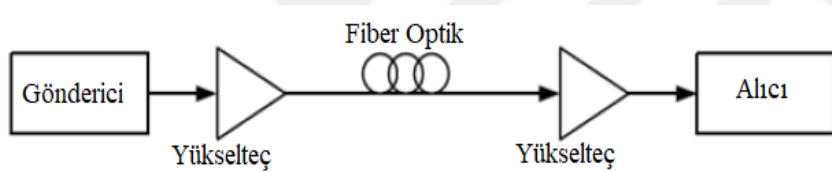


2. OPTİK VE KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Bu bölümde optik ve kablosuz haberleşme sistemlerinin temel prensipleri açıklanmaktadır. Ayrıca, fiber optik kabloların yapısı, çeşitleri, çalışma prensipleri, avantajları ve iletim sırasında fiber üzerinde oluşan etkiler ile kablosuz haberleşme sistemlerinin son yıllardaki gelişimi ve kullanılan teknolojiler hakkında genel bilgilere yer verilmektedir.

2.1. Optik Haberleşme ve Fiber Optik

Optik haberleşme kısaca, iletim ortamı olarak ışığı kullanan bir haberleşme türü şeklinde tanımlanmaktadır. Temel olarak, sayısal darbe (pals) sinyalinin optik fiber üzerinden iletilmesi olan genel bir optik iletim (transmisyon) hattı Şekil 2.1’de görülmektedir. Optik bir hat temel olarak fiber optik, verici (gönderici), alıcı ve yükselteçlerden oluşmaktadır.

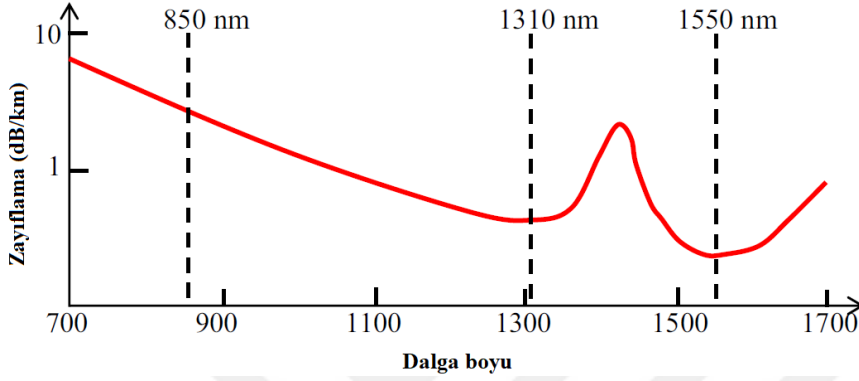


Şekil 2.1. Optik iletim (transmisyon) hattı [24]

Fiber optik haberleşmesinin temeli, cam ortamdaki bir ışığın yüksek miktardaki veriyi uzun mesafeler boyunca taşıyabilmesi prensibine dayanmaktadır. Bilginin elektrik sinyalleri olarak bakır ve koaksiyel kablolarla taşınması veya radyo frekansı ile kablosuz bir ortamda taşınması tekniğinin fiber optik kablolarla taşımaya göre çok verimli olmadığı görülmektedir. Bugün, cam fiberin saflığı sayısallaştırılmış ışık sinyallerinin yüzlerce kilometre mesafelerde yükseltme işlemi gerekmeksizin iletimini olanaklı hale getirmektedir. Fiber optik, düşük girişim (enterferans) olasılığı, minimum düzeyde iletim kaybı ve yüksek bant genişliği kapasitesi gibi nedenlerle ideal bir iletim ortamı olarak görülmektedir.

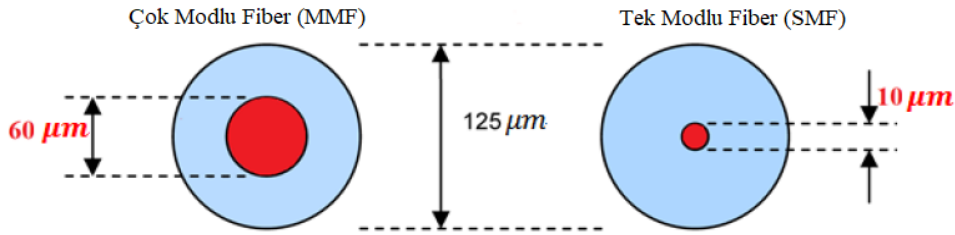
Bir iletim ortamı için en önemli iletim özellikleri zayıflama ve bant genişliği olmaktadır. Düzlemsel bir elektromanyetik dalga, örneğin bir ışık demeti (ışın), bir vakum içerisinde $c=3 \times 10^8$ m/s hızla hareket eder ve farklı ışık frekansları ise farklı renklere karşılık gelmektedir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi optik fiber haberleşmesi alanında kullanılan ve kızılötesi bölgede yer alan iki önemli frekans bulunmaktadır. Bu frekanslar, $f = 231$ THz

(vakum dalga boyu $\lambda = c/f = 1310$ nm) ve $f = 194$ THz (vakum dalga boyu $\lambda = c/f = 1550$ nm)'dir. 231 THz standart bir tek modlu fiber kabloda minimum dispersiyon frekansı, 194 THz ise minimum zayıflama frekansıdır. Fiber optik kablo içerisinde kullanılan cam malzemeden kaynaklanan bir zayıflama bulunur ve fiber kablolar 1550 nm dalga boyu için 0,2 dB/km zayıflama olacak şekilde üretilmektedir [23].



Şekil 2.2. Fiber optik çalışma bölgeleri [28]

Fiber optik kabloların genel olarak 2 alt kategorisi bulunmaktadır: Tek Modlu Fiber (SMF) ve Çok Modlu Fiber (MMF). Şekil 2.3'te gösterildiği gibi MMF'nin çekirdek çapı, SMF'nin çapına göre 6 kat daha büyüktür.



Şekil 2.3. MMF ve SMF çekirdek çapları [16]

MMF, 50 mm ile 100 mm arasında değişebilen geniş bir çekirdek çapına sahiptir. Işık dalgaları tipik olarak 850 veya 1300 nm dalga boyu ile kablonun çekirdeğinde ilerlerken çok sayıda yola dağılmaktadır. Işığın çoklu yollara dağılması özellikle 900 m'den daha fazla kablo uzunluklarında eksik veya bozuk veri iletimine neden olan sinyal bozulmasına yol açar. Bununla birlikte MMF orta mesafeli bağlantılarda ve yüksek hızlarda yüksek bant genişliği (2 km'ye kadar 100 Mb/s; 220-550 m için 1 Gb/s ve 300 m için 10 Gb/s) olanağı

sunar ve örneğin bina içi veya okul kampüsleri gibi kısa mesafeli bağlantılar için düşük maliyet sağlamaktadır.

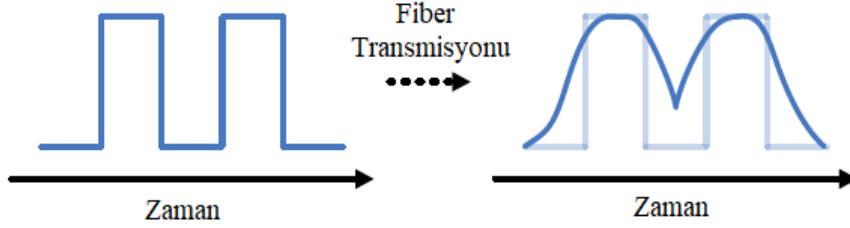
SMF ise daha çok uzun mesafeli şebekelerin taşıma ve erişim kısımlarında kullanılan, daha küçük çaplı (1-16 mm) bir fiber optiktir. Bu fiber uzun mesafeler için düşük zayıflama oranı, geniş dalga boyu alanı ve yüksek bant genişlikleri gibi faydalı özelliklere sahiptir. MMF ile karşılaştırıldığında, yüksek bükülme kaybı ve kurulum maliyeti gibi nedenlerle FTTH (Fiber-to-the-Home / Eve Kadar Fiber) gibi bina içi kısa mesafeli hatlar için çok uygun değildir. SMF içerisindeki ışık ışınları, tek bir modda veya fiziksel yolda yayılım yapmaktadır. Çekirdek ve kılıf arasındaki kırılma indisi % 0,6 civarındadır ve bu fiberler dar bir sayısal açıklığa sahip olduğundan, kullanılan ışık kaynağı bir lazerdir [16].

RoF hatlarının uygulamalarında SMF ve MMF'nin her ikisi de olmak üzere fiber optik etkisi oldukça önemlidir. Silisyum dioksit (SiO_2) temelli tek modlu fiber (SMF) en ideal performansı sağlar ve darbe yayılımını da azaltır. SMF'deki dispersiyon dalga boyuna bağlı kırılma indisinden kaynaklanır ve tipik RoF sistemlerinde de olduğu gibi darbe genişlemesi göreceli olarak daha kısa olan fiberlerde daha azdır. MMF'deki en önemli bozulma faktörü modal dispersiyon olmakla birlikte, optik frekans modülasyonu tekniği bu bozulmaya karşı önemli bir direnç gösterebilmektedir [20].

Ticari olarak kullanılan yüksek kaliteli SMF'lerdeki optik kayıp fiber uzunluğu boyunca oluşan ışık saçılımından kaynaklanır ve buna Rayleigh Saçılımı denilmektedir. Bu saçılmanın nedeni, ışığın fiber dalga kılavuzu dışına çıkmasına veya kaynağa doğru geri yansımaya neden olan, ışık dalgalarının ve fiber moleküllerinin arasındaki çarpışmalardır. Işığın daha kısa dalga boyları, dalga boyu hassasiyeti özelliğinden dolayı uzun dalga boylarına göre daha fazla saçılım yapar. Bundan dolayı, fiberdeki saçılım kaybı iletim dalga boyunun artırılması ile azaltılabilir. Uzak mesafe iletim şebekeleri bu sebepten kaynaklı olarak 1310 nm yerine 1550 nm dalga boyunda çalışmaktadır.

Dispersiyon (dağılma) iletim sinyal ışığı darbelerinin fiber boyunca hareket ederken maruz kaldığı zaman alanı yayılması veya genişlemesi olarak tanımlanmaktadır. Sonuç olarak, sinyal Şekil 2.4'de görüldüğü gibi bir genişlemeye uğrar. Bu durum, semboller arası girişim (Inter-Symbol Interference (ISI)) artışı ve sinyal gürültü oranının (Signal to noise ratio (SNR)) düşmesi gibi durumlara yol açarak, komşu darbelerle veya bitlerle girişim

oluşmasına neden olabilmektedir. Çok yüksek dispersiyona maruz kalan sinyaller alıcı tarafında önemli problemlere neden olabilir ve bu durum iletilecek bilginin tam olarak iletilememesine yol açmaktadır.



Şekil 2.4. Optik darbelerin (palslerin) dispersiyon etkisiyle genişlemesi [17]

En önemli dispersiyon türü olan kromatik dispersiyon (Grup hız dispersiyonu), fiber üretiminde kullanılan silikonun, dalga boyuna bağlı kırılma indisinden ve çekirdek ile kılıf arasındaki güç dağılımından kaynaklı olarak oluşmaktadır. Her iki bileşen de, bir kanaldaki dalga boyu spektrumunun farklı kısımlarının değişik hızlarda hareket etmesine ve darbelerin fiber boyunca ilerlediği her kilometrede genişlemesine neden olmaktadır. Belirli bir mesafe sonrasında darbeler daha geniş bir hale gelir ve yanındaki komşu darbelerle üst üste gelmeye başlar, bu durum da iletilen veri içerisindeki sıfır seviyesi oranında artışa neden olmaktadır. Bu durum da verinin alıcı tarafında tekrar elde edilememesine ve sistemin Bit-Hata-Oranının (BER) da artmasına neden olmaktadır.

Dispersiyon birimi ps/nm.km (darbe yayılımı/darbe spektral genişliği.iletim hat uzunluğu) olarak ölçülür. Bu değer tek modlu fiber için 17 ps/nm.km'dir.

Kromatik dispersiyondan kaynaklanan darbe genişlemesi aşağıdaki şekilde bulunur [17]:

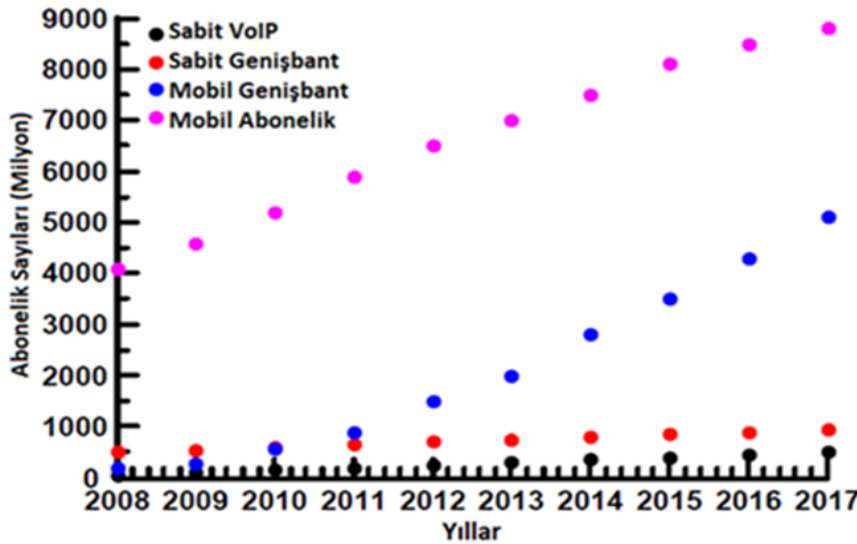
$$\Delta T = D(\lambda) \cdot \Delta \lambda \cdot L \quad (2.1)$$

Burada, $D(\lambda)$ ps/nm.km cinsinden dispersiyon parametresidir. Bu parametre, darbenin her bir kilometrede ve darbe spektralının her bir nanometresi için kaç piko saniye genişlediğini belirtmektedir. $\Delta \lambda$, ışık kaynağının spektral genişliği ve L ise fiber uzunluğudur. Dolayısıyla, daha geniş spektrum daha yüksek dispersiyon anlamına gelir [19].

2.2. Kablosuz Haberleşme Sistemleri

Hemen herkesin mobil cihazlar ve bununla birlikte kablosuz yerel ağlar ve mobil internet kullanmasıyla birlikte kablosuz haberleşme son dönemde günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Yüksek kapasiteli akıllı cihazların bağlantılarının çoğalması ve aynı zamanda geniş bantlı çoklu ortam servislerinin sayısının artması, yüksek hızlı veri haberleşmesi için kablosuz erişim talebinde büyük bir artışa neden olmuştur [8, 9].

Şekil 2.5'te 2008-2017 yılları arasında dünyadaki sabit ve mobil abonelik sayısındaki artış gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü üzere sabit hat servisleri çok az bir gelişme göstermiş ve doyuma ulaşmıştır. Buna karşın toplam mobil abonelik sayısı 7 milyara, mobil geniş bant hizmetleri ise neredeyse 2 milyar kullanıcı sayısına ulaşmıştır [36].



Şekil 2.5. Sabit ve mobil servis aboneliklerinin yıllara göre değişimi [36]

Kablosuz haberleşme sistemlerinin ilk aşaması olan 1G (Birinci Nesil) haberleşme sistemi analog telefonlar için tasarlanmış ve 1980'lerin ilk döneminde ortaya çıkmış olan ilk temel mobil haberleşme sistem yapısını oluşturan sistemdir. Sonraki aşama olan 2G (İkinci Nesil) haberleşme sistemi ise analog sistem yapısından sayısal bir yapıya geçiş amacıyla ortaya çıkmıştır. 1992 yılında tanıtılmış ve sayısal sinyal işleme tekniklerini kullanmaya başlamıştır. Abone Kimlik Kartı (SIM) da bu nesil ile birlikte ortaya çıkmıştır. 2G erişim yöntemleri CDMA (Kod Bölmeli Çoklu Erişim) ve TDMA (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) teknolojileridir ve özellikle TDMA kullanımı 2G ile oldukça artmıştır. 2.5G şebekeleri ise

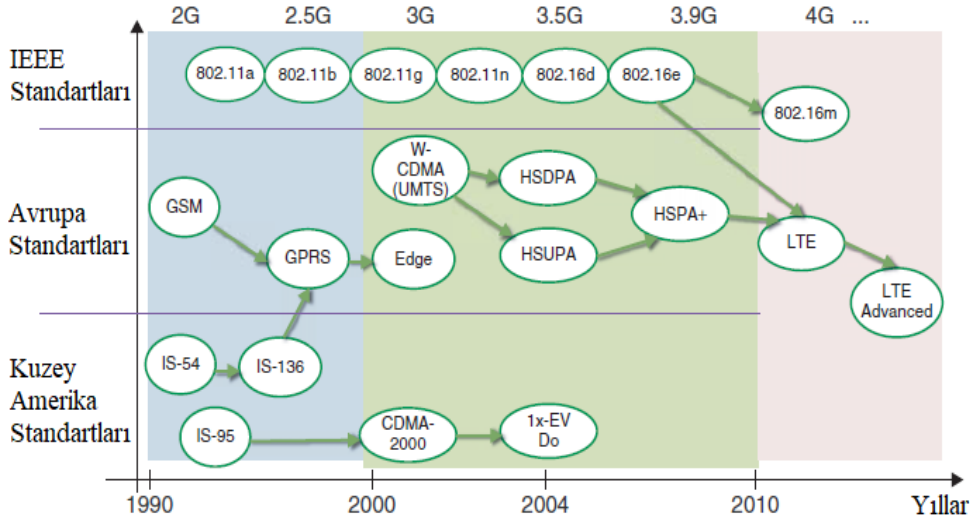
1995 yılından sonra uygulamaya girmiş ve 2G servislerinin paket anahtarlamalı olarak genişletilmesini sağlamıştır [32].

1G ve 2G teknolojilerinin her ikisi de ses haberleşmesi için tasarlanmıştır. GPRS (Genel paket radyo servisi) ise GSM (Mobil Haberleşme için Küresel Sistem) içerisinde uzak mesafeli haberleşme için veri iletimi veya mobil geniş bant hizmet sağlanması amacıyla eklenmiş bir teknolojidir. Başlangıçta GSM standardında ses iletimi için 13 Kb/s, veri iletimi için ise 9,6 Kb/s hızlarını belirlemiştir. Bu hızlar GPRS kullanımı için revize edilmiş ve veri iletimi için 160 Kb/s hıza kadar iletim sağlanmıştır [17, 36].

UMTS (Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi) olarak bilinen üçüncü nesil haberleşme sistemi (3G) altyapısı, 2G sistemi temel alınarak geliştirilmiş ve 2003 yılından itibaren de Avrupa'da kullanılmaya başlanmıştır. 3G haberleşme sistemi veri alt sistemlerindeki santral şebekesinin yapısı nedeniyle internet protokolü (IP) ile adapte olmuş bir şekilde video ve resim paylaşımı için uygun bir şekilde tasarlanmıştır. Bunun yanında, kablolu haberleşme ile karşılaştırıldığında hala dar bantlı bir haberleşme sistemi olarak kalmıştır [8].

Dördüncü Nesil (4G) ifadesi birçok tipte geniş bantlı kablosuz haberleşme sistemini içeren bir terim olarak kullanılmaktadır. 4G genişletilmiş mobil servislerin yanında birçok farklı kablosuz şebekeyi de desteklemektedir.

4G haberleşme daha yüksek veri hızları ve kullanılan Uzun Dönemli Evrilme (LTE) ve Mikrodalga Erişim için Dünya Çapında Birlikte Çalışabilirlik (WiMax) gibi teknolojiler sayesinde daha fazla mobilite olanakları sunmaktadır. Uluslararası Mobil Telekomünikasyon – İleri Düzey Standardına (IMT-ad) göre en yüksek indirme hızı, hareket halindeki bir aracın içinde yüksek mobiliteye sahip haberleşme için 100 Mb/s ve duran veya düşük mobiliteye sahip haberleşme için (yayalar ve hareketsiz kullanıcılar) ise 1 Gb/s hıza erişmektedir [17]. Kablosuz haberleşme standartlarındaki son yirmi yılda meydana gelen değişim Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.6. Kablosuz standartların son yirmi yıldaki değişimi [37]

4G sonrası kablosuz haberleşme (5G) için birçok yaklaşım bulunmaktadır. Bir yaklaşıma göre dağıtılmış MIMO (Çok giriş çoklu çıkış) anten yapısı ile küçük hücelere hizmet veren büyük ve yoğun şebekeler yer alacaktır. Üst üste gelen kapsama alanlarına sahip farklı transmision noktaları sayesinde ileri düzeyde girişim ve mobilite yönetimi sağlanması hedeflenmektedir. İndirme ve yükleme hatları için bant genişliği kaynaklarının esnek bir şekilde kullanılabilmesi sağlanacak ve kullanıcı aynı anda bağlı olabileceği farklı kablosuz erişim teknolojileri arasında hızlı bir şekilde yer değiştirebilecektir.

Dar bantlı kablosuz erişim sistemlerinin sınırlı kapasitesi, düşük bant genişliği sunabilen düşük taşıyıcı frekanslarından kaynaklanmaktadır. Örneğin GSM, 900 veya 1800 MHz frekansları civarında çalışır ve ayrılmış frekans spektrumu 200 kHz'dir. UMTS 2 GHz frekansı civarında çalışmaktadır ve ayrılmış frekans spektrumu ise 4 Mhz'dir (Çizelge 2.1). Büyük çaplı hücrelerle çalışan kablosuz sistemler, yüksek mobilite (hareket kabiliyeti) sağlayabilirler; fakat zayıf spektrum verimliliği ve yüksek güç tüketimi gibi maliyetleri olmaktadır [16].

Birleştirilmiş geniş bant hizmetlerinin sunulabilmesi için mevcut kablosuz sistemlerin standartlarının üzerinde veri transfer kapasitesi sağlanması gereklidir. IEEE 802.11x, GSM, UMTS ve LTE gibi mevcut kablosuz servisler ve standartlar 700 MHz ile 6 GHz arası düşük mikrodalga frekans bantlarında yoğunlaşmış durumdadır (Çizelge 2.1). Daha düşük mikrodalga frekanslar mevcut olmadığından ve düşük frekansların yetersiz bant genişliğinden kaynaklı olarak, gelecek nesil mobil ve sabit kablosuz erişim sistemleri

milimetre dalga frekanslarını (30-300 GHz) kullanmak zorunda kalacaktır. Bununla birlikte, yüksek frekansın bir sonucu olarak kısıtlı gecikme özellikleri (gecikme kayıpları frekansın karesiyle orantılı olarak artmaktadır) ve sisteme bağlı parametrelerin de daha küçük olması gibi nedenlerle çok daha fazla anten ihtiyacı oluşmaktadır. Gelecek nesil mobil haberleşme sistemleri hücresel şebekelerde antenlere kadar fiber optik hatlarının kullanılması ile birlikte geniş bantlı erişim sağlayabilecektir. Ayrıca, bu tür sistemlerin bakım ve kurulum maliyetlerinin azaltılabilmesi için radyo anten birimlerinin basitleştirilmiş şekilde olması gerekmektedir. [8, 9, 42].

Bu tez çalışması kapsamında hızlı hareketli kullanıcılar için tasarımı yapılan devrede, Çizelge 2.1'de yer alan GSM (900 MHz), LTE (2,5 GHz) ve mm-dalga (60 GHz) teknolojileri için ayrılmış olan frekans alanları kullanılarak performans analizi yapılmıştır.

Çizelge 2.1. Kablosuz haberleşme teknolojileri [36]

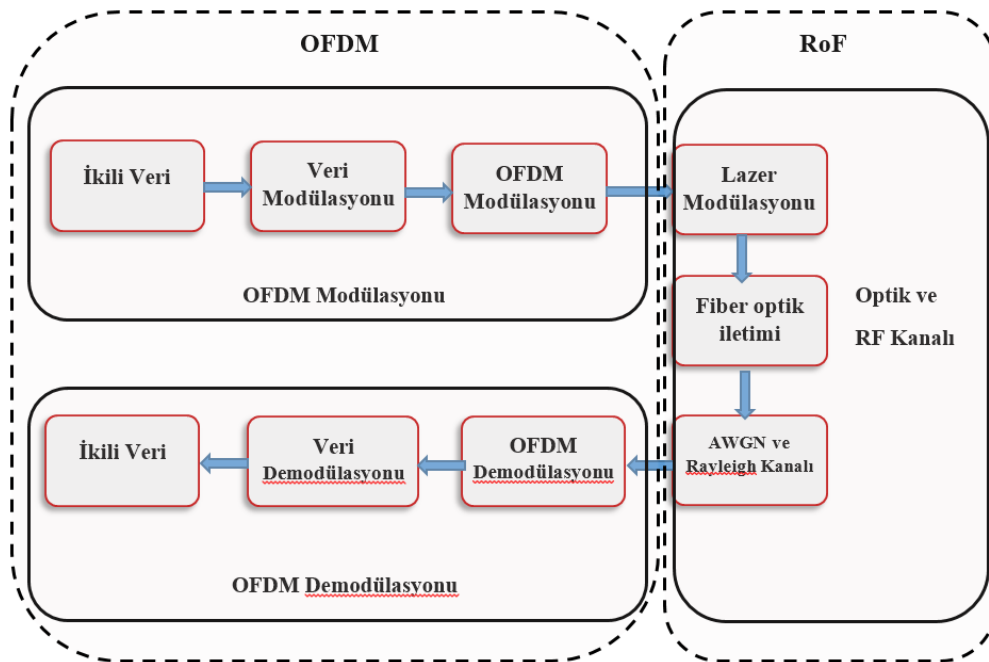
Teknoloji	Kullanılan Spektrum	Veri Hızı	Sinyal Mesafesi	Kullanım Alanı
GSM	900 / 1800 MHz	9,6 Kb/s	35 km	Ses
GPRS	900 / 1800 MHz	160 Kb/s	35 km	Veri
UMTS	873 / 1900 MHz	2 Mb/s	2 km	Ses, Veri, Çoklu Ortam
802.11 a	5 GHz	54 Mb/s	100 / 30 m	WLAN
802.11 b	2,4 GHz	11 Mb/s	110 / 35 m	WLAN
802.11 g	2,4 GHz	54 Mb/s	110 / 35 m	WLAN
802.11 n	2,4 / 5 GHz	150 Mb/s	250 / 70 m	WLAN
ZigBee	2,4 GHz	250 Kb/s	10 m	WPAN
Bluetooth	2,4 GHz	2,1 Mb/s	10 m	WPAN
LTE	1,8 / 2,6 GHz	100 Mb/s	1 km	Yüksek Hızlı Veri
LTE-A	1,8 / 2,6 GHz	1 Gb/s	1 km	Yüksek Hızlı Veri
UWB	3,1 – 10,6 GHz	> 100 Mb/s	10 m	WPAN
Mm-Dalga	57 – 64 GHz	> 1 Gb/s	10 m	WPAN

3. OFDM-RoF İLETİM SİSTEMİ

Yeni kablosuz teknolojilerin ortaya çıkması şebeke kapsama alanının genişletilmesini ve aynı zamanda maliyet açısından da etkin bir çözüm bulunmasını sağlamaktadır. Dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) ve Fiber üzerinden Radyo (RoF) sistemlerinin birleşimi olan OFDM-RoF sistemi gelecek nesil gigabit geniş bantlı kablosuz haberleşme sistemleri için dikkate değer bir ilgi görmektedir [31].

3.1. OFDM-RoF İletim Sistemi ve Çalışma Prensibi

RoF sistemi, hem fiber optik hat, hem de serbest uzay radyo hattına sahiptir. RoF sisteminde, mikrodalga veri sinyalleri CS içerisinde optik taşıyıcı ile modüle edilir ve sonrasında, bir fiber optik hat üzerinden uzak birime (BS) taşınır. RF sinyalleri daha sonra, mikrodalga antenleri kullanılarak küçük alanlı bölgelere iletilir. OFDM sisteminde ise veri her biri birbirinden belirli frekans aralıkları ile ayrılmış ve üst üste örtüşen bantlardaki çok sayıda taşıyıcı üzerine bölünür ve alt taşıyıcıların modülasyonu için de, alıcı tarafında kendisine ait olmayan bir frekansın algılanmasını engelleyen dikgenliği sağlayan FFT kullanılır [3]. Tezde yapılan benzetim çalışmalarında da kullanılan OFDM-RoF sisteminin genel blok şeması Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. OFDM-RoF sisteminin genel blok şeması

OFDM-RoF sisteminde kısaca, modüle edilmiş olan seri veri dizisi, M-QAM ve M-PSK modülasyonları ile sembollere dönüştürülerek paralel şekilde iletimi sağlanmaktadır. OFDM tekniği bu verileri, IFFT kullanarak dikgen taşıyıcıların üzerine modüle etmektedir. Veri ve pilot sembollerinin alt taşıyıcıların üzerinde taşınması için OFDM sembolleri IFFT uygulanarak frekans alanından zaman alanına dönüştürülmektedir [5].

OFDM-RoF iletim sisteminin blok şemasında görülen benzetim devrenin gönderici tarafında ilk işlemler konvolüsyon kodlama ve veri aralıklandırma işlemleridir. OFDM modülasyonu için ise benzetim çalışmasında, 420 veri alt taşıyıcısı, boş taşıyıcılar ve döngüsel önek eklenerek oluşturulan toplam 640 alt taşıyıcılı bir sistem kullanılmaktadır. Devrenin optik ve kablosuz iletim hattı kısmında ise lazer devresi modeli, fiber optik hattın zayıflama modeli, AWGN modeli ve farklı kanal koşulların modellenmesi için Rayleigh kanalı, foto diyot alıcı devresi modellenmesi kullanılmaktadır. Alıcı tarafında ise gönderici kısmında uygulanan modülasyon ve diğer işlemlerin tersi olan işlemler uygulanmaktadır. Şekil 3.1’de yer alan genel devre şemasında uygulanan işlemler 4. bölümde yer alan benzetim çalışmasında detaylı olarak açıklanacaktır.

Tezin 3.2. ve 3.3. bölümlerinde OFDM-RoF sisteminin temel bileşenleri olan RoF iletim sistemi ve OFDM teknolojisi ile ilgili olarak detaylı bilgiler yer almaktadır.

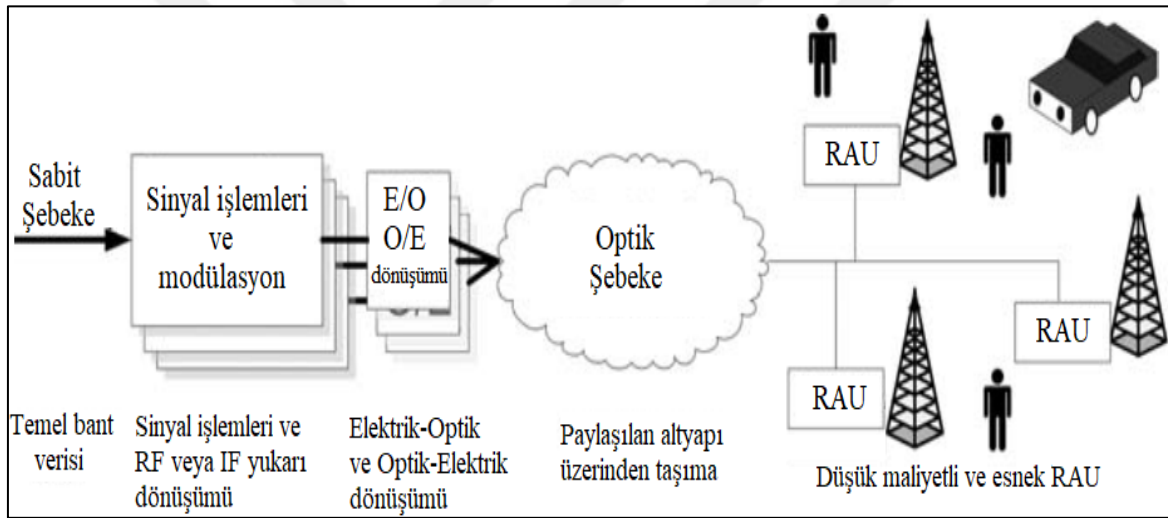
3.2. RoF (Fiber üzerinden Radyo) İletim Teknolojisi ve Sistem Mimarisi

Fiber üzerinden Radyo (RoF) iletim (transmisyon) sistemi, ışığın radyo frekansıyla modüle edildiği ve sonrasında fiber optik üzerinden iletildiği bir işlem kullanılmaktadır. Kısaca RoF teknolojisi, elektrik sinyallerinin optik sinyale dönüştürüldüğü ve sonrasında optik bileşenler ve teknikler kullanılarak dağıtımının yapıldığı ve ayrıca yüksek frekanslı, geniş bantlı milimetre dalga erişim sistemlerinde uygulanabilen iletişim ağı için gelişmekte olan bir teknolojidir.

RoF sistemi, mikrodalga ve milimetre dalga sinyallerini fiber optik kablolar üzerinden uzun veya kısa mesafelerde taşıyabilmesi nedeniyle kablosuz erişim şebekeleri için önemli bir teknik durumundadır. Ayrıca, WLAN (Kablosuz yerel alan şebekesi) ve 4G şebekesini de destekleyen bir yapıdadır. RoF sistemi, RF (Radyo frekansı) ile optik şebekelerin

birleşimidir ve mobil sistemlerin kanal kapasitelerinin artırılmasını sağlamakla birlikte, maliyeti ve güç tüketimini de önemli oranda azaltmaktadır. Bu sistem, mevcut ve gelecek nesil mobil haberleşme sistemlerinin kapsamında yer alan birçok uygulama için altyapı oluşturmaktadır [2].

RoF sistemi, fiber optik hat veya şebeke ile birbirine bağlı olan bir Merkez İstasyon (CS), Baz İstasyonu (BS) / Uzak Anten Birimlerinden (RAU) oluşmaktadır (Şekil 3.2). Kablosuz RF sinyalleri optik alana dönüştürüldükten sonra fiber optik üzerinden dağıtılır. Mevcut kurulu olan sistemlerde yarı iletken lazer kaynak kullanılarak analog yoğunluk modülasyonu uygulanır ve bu sinyalin demodülasyonu ise doğrudan algılamalı PIN diyot tarafından gerçekleştirilir.



Şekil 3.2. RoF sisteminin genel şeması [7]

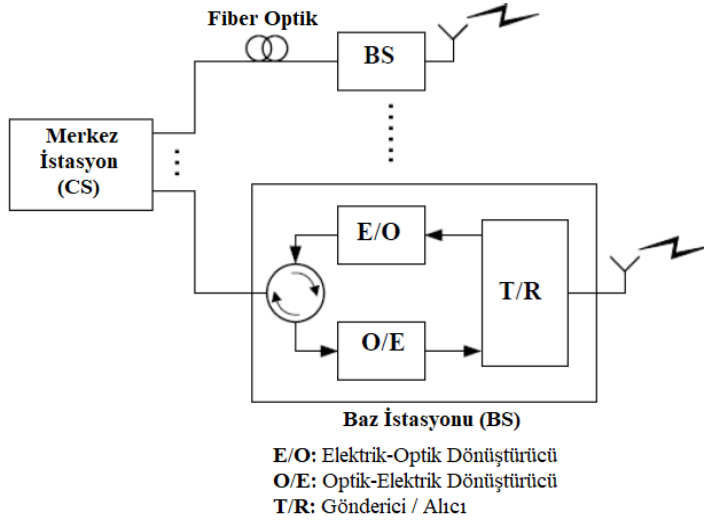
Bu sistemde, kodlama, çoğullama, RF üretimi ve modülasyonu gibi sinyal işlemlerinin çoğu merkezi istasyonlarda gerçekleşir. RF sinyalleri, temel bant verisi, modüle edilmiş ara frekans (IF) veya gerçek modüle edilmiş RF sinyali olabilmektedir. Bunlar analog veya çoğu durumda PSK (Faz kaydırmalı anahtarlama) veya QAM (Dörtlü genlik modülasyonu) gibi sayısal modülasyon teknikleri ile modüle edilir. Sonrasında ortaya çıkan optik sinyaller fiber içerisinde taşınır. RoF mimarisi, RF sinyallerini indirme (download) ve yükleme (upload) hattına, diğer bir deyişle merkezi istasyonlardan baz istasyonlarına (BS) (Uzak anten birimlerine) ve tam tersi olacak şekilde iletmek için çalışır.

Radyo sinyalleri fiber optik hücrel ve mikro hücrel radyo şebekelerinde dağıtılmış anten sistemleri kullanılarak fiber üzerinden taşınır. Hücreler, frekansın tekrar kullanımını ve artan sayıda mobil kullanıcıyı desteklemek için mikro hücrelere ayrılmıştır. Mikro hücrelerin ortaya çıkması artan bant genişliği taleplerinin karşılanabilmesi ve kullanılan mobil cihaz boyutlarının ve ayrıca güç tüketiminin de azaltılması gibi faydalar sağlamaktadır. Yüksek güçlü yayın yapan baz istasyonu anteni, fiber optik aracılığıyla baz istasyonuna bağlanmış bölünmüş bir anten sistemi ile değiştirilmektedir. Geniş bir servis alanını desteklemek için çeşitli BS'leri gerektiren 2,4 veya 5 GHz gibi mikrodalga bantlarına kıyasla, milimetre dalga (mm-dalga) bandının, bu frekanslardaki kablosuz sinyallerde yapısı gereği oluşan yüksek gecikme kayıp özelliği nedeniyle, verimli coğrafi kapsama sağlanması için daha küçük hücrelere ihtiyacı vardır. Bundan dolayı da BS ve anten sayılarının artışı ortaya çıkmaktadır. Bu tür sistemlerde BS sayısının dramatik olarak artması ile birlikte BS ve antenler ile CS'ler arasında geniş bantlı bir bağlantı sağlanabilmesi için fiber optik omurga gerekmektedir. Bu gereklilik neticesinde, optik ve kablosuz geniş bant yapısının ortak bir iletim yapısında birleşmesi, önemli avantajlar sağlamakla birlikte aynı zamanda kablolu ve kablosuz bağlantıları da desteklemiş olmaktadır [4, 16].

RoF sistemi gelecekteki şebeke teknolojisi olarak kabul edildiğinden; bir taraftan elektromanyetik yayılım, kablosuz trafik, güç, gürültü, maliyet ve anten boyutunu azaltma ve diğer taraftan ise frekans bant genişliğini, veri hızını ve kapasitesini ve sonuçta spektral verimliliği artırma taleplerini karşılama kapasitesine sahiptir. RoF'in yayılmasıyla birlikte km başına yüksek güç zayıflaması ve bir baz istasyonunun kurulum maliyeti azalacak, açık olmayan görüş hattı (Non Line of Sight-NLOS) kapsamı ve sinyal iletim alanının kısıtlanması gibi hava yoluyla iletim bozulmalarının önlenmesi mümkün olacaktır.

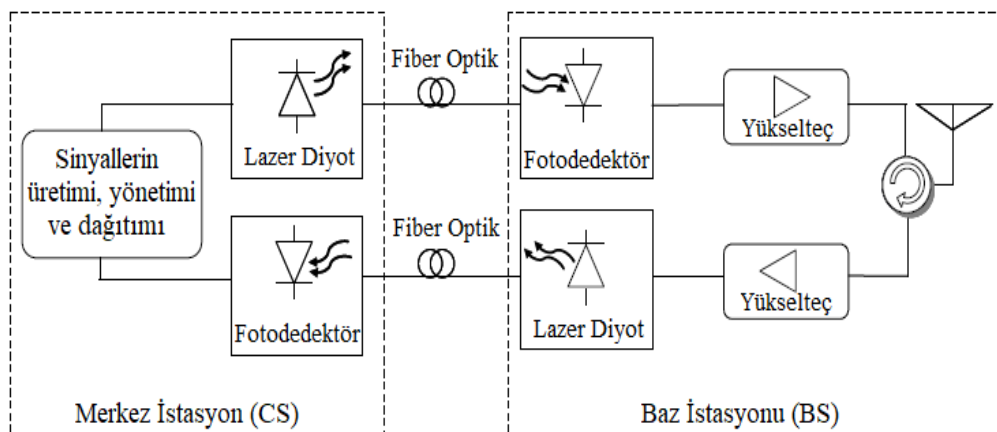
RoF sistem mimarisi

RoF, optik sinyallerin RF ile modüle edildiği ve alıcı tarafında fiber optik üzerinden iletildiği optik hattı ifade etmektedir. Alıcı tarafında ise RF sinyali demodüle edilerek Şekil 3.3'te görüldüğü üzere kablosuz son kullanıcılara iletilmektedir.



Şekil 3.3. RoF sisteminin temel devre yapısı [24]

RoF sisteminde yer alan CS, sinyalin üretilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Uygun bir iletim sağlayabilmek amacıyla, temel bant sinyalinin oluşturulabilmesi için modülasyon ve aynı zamanda sinyal işleme gibi işlemler CS'de uygulanır. Sonrasında RF sinyali fiber optik hat yardımıyla iletilir. Aktarılan sinyaldeki zayıflama önemsenmeyecek kadar azdır. Sonrasında ise sinyal BS tarafından algılanır. BS'de Elektrik/Optik (E/O) ve Optik/Elektrik (O/E) dönüşümü işlemlerinin her ikisi de gerçekleştirilir. Sinyalin kullanıcı ve BS arasındaki iletimi ise BS yapısı içerisinde yer alan anten birimi yardımıyla gerçekleştirilir. Ayrıca BS, optik sinyal kullanarak CS ile de haberleşir [18].



Şekil 3.4. RoF sisteminin tipik yüklem ve indirme hattı konfigürasyonları [20]

RoF sisteminin mimari yapısı Şekil 3.4'te gösterilmektedir. CS, RF veya mm-dalga sinyallerinin yönetimi, üretilmesi ve fiber optik kablolar yardımıyla birçok BS'ye

dağıtılması görevlerinden sorumludur. Diğer taraftan BS ise, bu sinyalleri tekrar elektriksel sinyale dönüştürür ve kullanıcılara iletilmesini sağlar. Bu işlem, elektriksel sinyallerin optiğe dönüşümünü ve fiber optik ile CS'ye iletilmesini de içermektedir. Bir BS'nin temel yapısı, optik/elektrik dönüşümü ve elektrik/optik dönüşümünün yanında yükseltme ve anten ekipmanını da içermektedir. Böylece, BS yapısı mümkün olduğu kadar basit olmaktadır. Bu yapı aynı zamanda Fiber üzerinden Radyo Frekansı (RF-over-Fiber) olarak da bilinir. Çünkü, RF veya mm-dalga sinyali CS tarafından dağıtılmaktadır. Bu konfigürasyon maliyeti düşük bir yapı olmakla birlikte, fiber dispersiyonuna ve faz gürültüsüne daha yatkındır. Alternatif olarak, Fiber üzerinden Ara Frekans (IF-over-Fiber) ve Fiber üzerinden Temel Bant (BB-over-Fiber) konfigürasyonları da kullanılabilir [20].

Sonuçta elde edilen modüle edilmiş optik sinyal fiber optik hat üzerinden hedeflenen istasyona taşınır. Burada ise sinyal fotodetektör tarafından tekrar elektriksel sinyale dönüştürülür. Doğrudan modülasyon işlemi kullanan RoF hatları, örneğin kablosuz yerel alan şebekeleri (WLAN), akıllı ulaşım sistemleri (ITS) ve 4G hücresel haberleşme sistemleri gibi mevcut ve gelecek nesil kablosuz sistemlerin alt yapısını oluşturmak amacıyla tasarlanmaktadır. Üretilen elektriksel sinyallerin ayrıca GSM, UMTS ve diğer kablosuz uygulamaların özelliklerini de karşılaması gerekmektedir.

Geleneksel bir mobil haberleşme sisteminde BS veriyi belirlenmiş olan frekans bandında modüle ederek yüksek frekanslı sinyallerin gücünü yükseltmektedir. Bu sinyaller antene koaksiyel kablolar kullanılarak aktarılmaktadır. Kablonun maksimum uzunluğu 50 metreden daha az olacak şekilde sınırlandırılması gerekmektedir. 30 metrelik tipik bir koaksiyel kabloda sinyal gücünde %35'lik bir kayıp yaşanmaktadır. Ayrıca, bu kayıplardan dolayı sinyaldeki gürültü oranı artmakta ve alınan sinyal kalitesi de bu oranda düşmektedir. Fiber optik hatlar ile yapılan iletimde yaşanan kayıplar, koaksiyel kablo iletimine göre oldukça düşüktür ve iletilmekte olan sinyalin frekansından bağımsızdır [7, 8].

3.2.1. RoF kategorileri ve sistem elemanları

Yukarıda da bahsedildiği üzere RoF iletim sistemi, iletilecek olan radyo sinyalinin frekans aralığına göre üç ana kategoriye ayrılmaktadır:

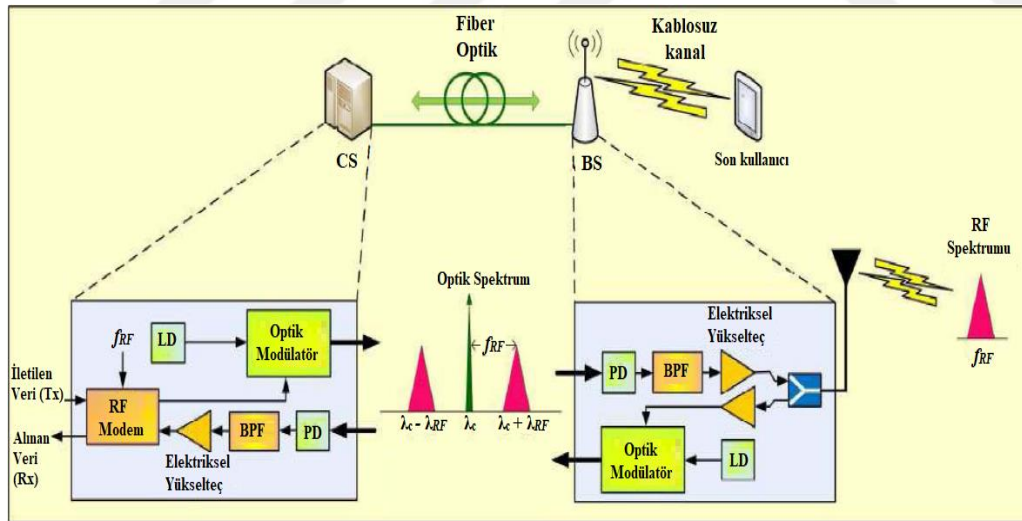
- Fiber üzerinden radyo frekansı (RF-over-Fiber)

- Fiber üzerinden ara frekans (IF-over-Fiber)
- Fiber üzerinden temel band frekans (Baseband-over-Fiber)

Fiber üzerinden radyo frekansı (RF-over-Fiber)

Milimetre dalga kablosuz sinyallerin fiber optik şebekesi ile taşınması için en basit yapı milimetre dalga sinyallerinin uzak BS içerisinde herhangi bir frekans dönüşümüne ihtiyaç duymadan doğrudan fiber üzerinden taşınmasıdır.

Bu mimaride, veri taşıyan yüksek frekanslı (10 GHz'den daha büyük) bir RF sinyali optik bağlantı üzerinden iletilmeden önce ışık dalgası sinyali üzerine eklenmektedir. Dolayısıyla, kablosuz sinyaller baz istasyonuna doğrudan yüksek frekanslarda optik olarak dağıtılmakta ve baz istasyonunda yükseltilmeden ve anten tarafından yayımlanmadan önce optik sinyalden elektriksel sinyale dönüştürülmektedir. Sonuç olarak, birçok baz istasyonunun mevcut olduğu düşünülürse bu istasyonlarında bir yukarı veya aşağı dönüşüm (up-down conversion) gerekmediğinden basit ve maliyet etkin bir şebeke yapısı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.5. Fiber üzerinden radyo frekansı (RF-over-Fiber) iletim şeması (LD=Lazer diyot, BPF=Bant geçiren filtre, PD=Fotodiyot) [10]

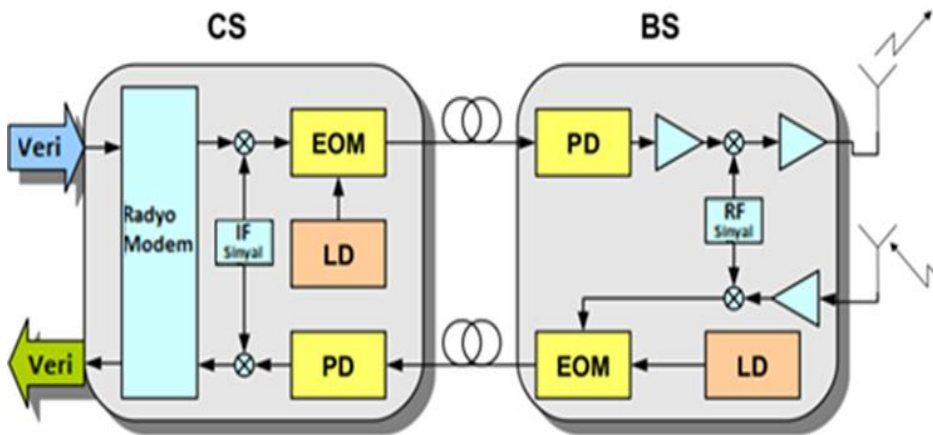
Şekil 3.5'te görülen bu konfigürasyonda milimetre dalga kablosuz sinyalleri optik iki yan bantlı (ODSB) sinyal oluşacak şekilde optik taşıyıcı üzerinde harici olarak modüle edilmektedir. İki yan bant, optik taşıyıcı frekansından kablosuz taşıyıcı frekansı kadar uzakta

olacak şekilde yerleşmektedir. Sinyalin BS’de algılanması ile milimetre dalga sinyali yüksek hızlı bir fotodedektör tarafından doğrudan algılanarak tekrar elde edilebilmektedir [4].

Fiber üzerinden ara frekans (IF-over-Fiber)

Fiber üzerinden ara frekans mimarisinde, daha düşük frekanslı (10 GHz’den daha küçük) bir IF radyo sinyali optik bağlantı üzerinden iletilmeden önce ışık dalgası sinyali üzerine eklenmektedir. Dolayısıyla, sinyal iletilmeden önce RF sinyali elde edilebilmesi için baz istasyonunda yukarı-dönüşüm (up conversion) yapılması gerekmektedir.

Bu konfigürasyonlarda CS, sinyalin frekansını modülasyon ve iletimden önce ara frekansa dönüştürür. Fakat BS tarafında RF dönüşümü de yapılmak zorundadır. Basit bir optik modülasyon kullanılır (doğrudan modülasyon) ve kromatik dispersiyon güç kaybına neden olmaz. Şekil 3.6 EOM’lerin kullanıldığı fiber üzerinden IF konfigürasyonunu göstermektedir. İlk frekans dönüşümü CS’de, ikinci dönüşüm ise BS’de yapılmaktadır.



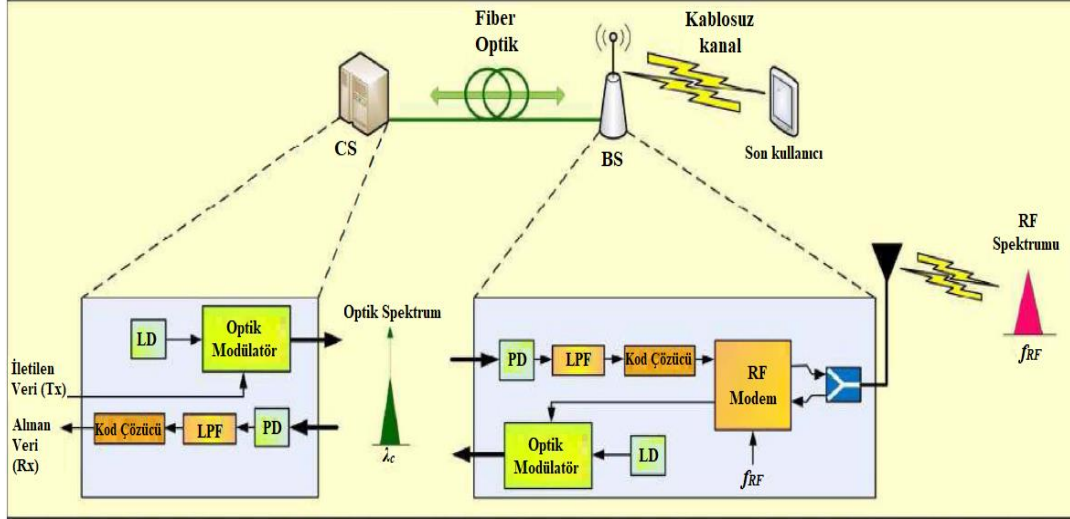
Şekil 3.6. Fiber üzerinden ara frekans (IF-over-fiber) konfigürasyonu (LD=Lazer diyot, EOM=Elektro-optik Modülatör, PD=Fotodiyot) [8]

Fiber üzerinden IF mimarisi genel olarak CS’de yer alan opto-elektronik cihazların yüksek frekanslara sahip sinyalleri desteklemediği durumlarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, BS yapısı da karmaşık bir hale gelmektedir [36].

IF frekansı ortalama 1 GHz (bu frekanslarda dispersiyon etkileri minimum ve doğrudan lazer modülasyonu mümkün olmaktadır), RF frekansı ise 40 veya 60 GHz civarında olmaktadır.

Bu teknik kablosuz sistemlerin bazı ticari uygulamalarında çok modlu fiberlerden kaynaklanan bant genişliği sınırlamalarının çözülmesi amacıyla da kullanılmaktadır [7].

Fiber üzerinden temel frekans (Baseband-over-Fiber)



Şekil 3.7. Fiber üzerinden temel frekans (BB-over-Fiber) iletim şeması (LD=Lazer diyot, LPF=Alçak geçiren filtre, PD=Fotodiyot) [10]

Fiber üzerinden temel bant frekans (BBOF) iletim sistemi, RF kablosuz sinyallerinin fiber üzerinden temel bant sinyali olarak iletilmesini sağlamaktadır. Sistem daha sonra kodlanmış olan temel bant sinyalini gerekli olan RF sinyaline sadece erişim noktasında (BS) modüle etmektedir (Şekil 3.7).

Fiber üzerinden temel bant iletim sistemi RoF'e alternatif olarak kullanılmaktadır. BS'nin karmaşık olması nedeniyle RoF sistemi ile uygulanan dağıtım sistemleri temel bant iletim yapısı için uygun değildir. Bu nedenle de radyo kapsama alanı genişletme veya ölü alanlarda haberleşme açısından RoF sistemi en uygun çözüm olmaktadır.

Yukarıda bahsedilen RoF konfigürasyonlarından en fazla uygulama alanı olan sistem tasarım basitliği ve uygulanma maliyetinin düşük olması gibi nedenlerle tek modlu fiber üzerinden RF sinyali iletimidir. Bununla birlikte, optik bileşenler açısından yüksek frekanslarda düşük gürültü ve düşük bozulma gereklilikleri de RoF için geçerlidir. Lazer genellikle RoF hattı için en fazla gürültü ve bozulma kaynağıdır ve tasarım aşamasında performans ve düşük maliyet açısından en çok dikkat edilmesi gereken elemandır [24].

RoF sisteminin temel devre elemanları

RoF sistemlerinde kullanılan temel devre elemanları; lazer verici, fotodedektörler ve fiber optik kablolardır.

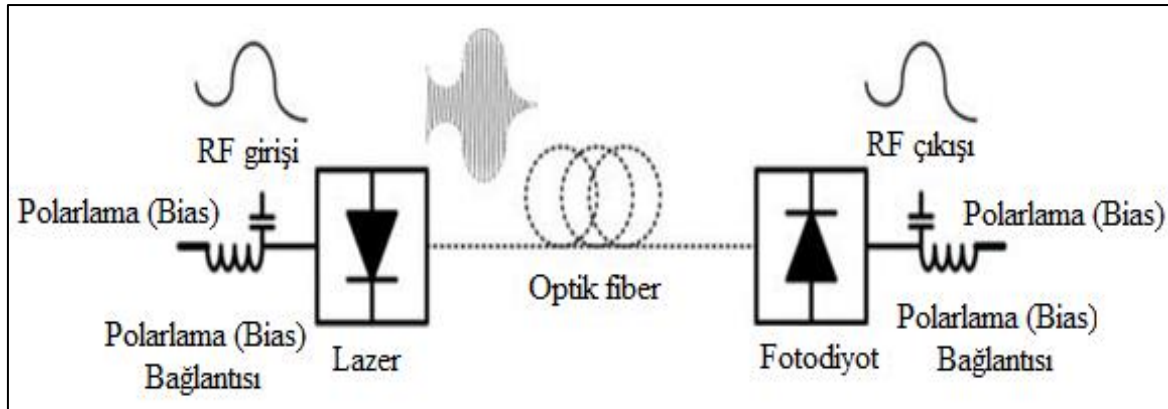
Sinyalin taşınmasını sağlayan sürekli optik dalgayı ürettiği için lazer, fiber optik bağlantılardaki en önemli unsurdur. Lazer diyot için en uygun çalışma dalga boyları düşük dispersiyon ve düşük zayıflama etkisinden dolayı sırasıyla 1300 nm ve 1550 nm civarında olmaktadır ve lazer frekansı 200 THz civarındadır.

“Lazer” kelimesi (light amplification by stimulated emission of radiation) “uyarılmış ışın emisyonu tarafından ışığın yükseltilmesi” anlamına gelmektedir. Buradaki anahtar kelime “uyarılmış emisyon” işlemidir. Bu işlem lazerin, yoğun ve yüksek güç seviyesinde eş evreli (koherent) ışık (bir veya daha fazla ayrık frekanslar içeren ışık) ışınları üretmesini sağlamaktadır. Bir lazer sürekli ışık demeti veya kısa darbeler şeklinde ışınlar oluşturmak üzere tasarlanmaktadır. Bu durum yapısal açıdan, kullanılabilir lazer ortamı ve uygulamaları bakımından farklılıklar ortaya çıkartmaktadır. Sürekli dalga (CW) lazer çalışma modunda lazerin çıkışı zamana göre tutarlılık göstermektedir.

Bir RoF sisteminde optik alıcı kısmı optik RF sinyalini tekrar elektriksel sinyale dönüştürmek için yeterli oranda bant genişliğine sahip bir fotodedektör (PD) içerir. Alıcı tarafta doğrudan algılama yapılması durumunda fotodedektörler gelen fotonik akıyı elektron akımına dönüştürürler. Elektron akısı ise yükseltilecek eşik cihazından geçirilir. Gelen sinyaldeki bir bitin mantıksal olarak bir veya sıfır olması bit süresince akımın eşik değeri üzerinde veya altında olmasına bağlı olarak değişir. Diğer bir deyişle bit süresinde ışık olup olmamasına bağlı olarak karar verilir. Doğrudan algılama için temel optik şebeke karar cihazları PN (pn bağlantılı) ve PIN (p tipi ve n tipi maddelerin arasına saf bir madde koyulması) fotodiyotlardır. En basit şekilde bir fotodiyot ters bias edilmiş (kutuplanmış) p-n bağlantısı olarak tanımlanabilir. Fotoelektrik etki boyunca bağlantı üzerinde düşen ışık fotodiyotun n ve p bölgelerinde elektron-boşluk çiftleri oluşturur. P bölgesinden ayrılan elektronlar n bölgesinden geçer ve n bölgesinde oluşan boşluklar da aynı şekilde p bölgesi boyunca geçer. Böylece bir akım oluşmuş olur. Gelen optik sinyale bağlı olarak üretilen çıkış akımı oranı duyarlılık olarak bilinir ve PIN için bu oran 0,5-0,7 A/W şeklindedir [24, 36].

Mevcut fotodedektörler, tipik lazer diyotlara göre çok daha doğrusal olmaktadır. Bundan dolayı da RoF sisteminde bozulmanın çok küçük bir kısmı fotodiyotlardan kaynaklanmaktadır. Doğrusal olmama durumu sadece çok yüksek alıcı gücü mevcutsa problem oluşturabilir. Bir fotodedektörün bant genişliği tipik olarak 25 GHz seviyelerinde veya daha yüksek olabilir [20].

Radyo sinyallerinin taşınması amacıyla kullanılan en temel optik hat Şekil 3.8’de görülmektedir. Lazer transfer özellikleri doğrusal alanda bias edilir ve radyo sinyalleriyle doğrudan modüle edilir. Bu sinyal daha sonra iletim yapılması amacıyla optik fiber üzerine aktarılır ve yine bias edilmiş bir foto diyot yardımıyla algılanır. Tipik olarak doğrudan modülasyon 10 GHz’den düşük frekanslar için uygundur (bu frekansın üzerinde çalışabilen cihazlar da vardır). Elektro-optik etki temelli modülatörler (örneğin Mach-Zender Modülatörü gibi) veya elektro soğurma temelli modülatörler gibi harici modülatörelere bu frekansın (10 GHz) üzerindeki frekanslarda kullanılabilir ve ayrıca tipik olarak çok üstün hat performansı gösterirler fakat ilave maliyet gerektirirler. Eğer lazerde doğrusal alanda çalışmayı sürdürebilmek için önemli oranda düşük bir modülasyon derinliği kullanılıyorsa sinyal bozulması bakımından da önemli oranda bir performans artışı yakalanabilir. İyi bir RF-RF hat performansı için lazer ve fotodiyot arasında uygun empedans eşleşmesi gerekli olmaktadır [7].



Şekil 3.8. Temel analog fiber hattı [7]

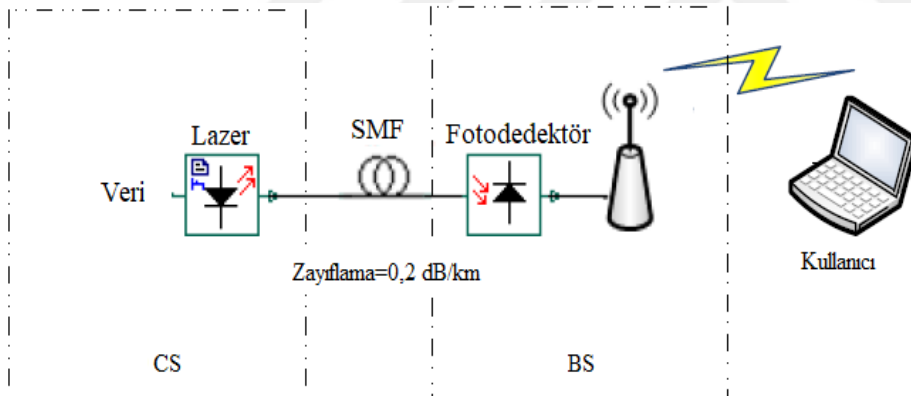
3.2.2. Optik modülasyon ve çoğullama teknikleri

Telekomünikasyon sistemlerinde ışığın modüle edilmesi için doğrudan ve harici modülasyon olmak üzere iki temel yöntem kullanılmaktadır. Doğrudan modülasyon

kaynağın modüle edilmesini kapsamaktadır; örneğin bir lazerin açık ve kapalı konuma getirilmesi bir darbe üretilmesini sağlar. Harici modülasyonda ise ışığın modüle edilmesi amacıyla harici bir devre elemanı kullanılmaktadır. Harici modülasyon yüksek hızlı ve uzak mesafeli haberleşme sistemleri için daha yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Doğrudan modülasyon

RF sinyallerinin optik olarak dağıtılması için kullanılan doğrudan modülasyon yöntemiyle, ışık kaynağının yoğunluğu, Şekil 3.9’da gösterildiği gibi direkt olarak RF sinyaliyle modüle edilmektedir. Lazer öngerilim (bias-polarlama) akımı, 1 ve 0 biti üretmek amacıyla lazeri açıp kapatmak için eşik değerinin üstünde ve altında değiştirilir. Ardından alınan optik sinyal, uzak anten biriminde, fotodetektör ve bant geçiren yükselteç tarafından anten tarafından yayılan bir RF sinyale dönüştürülmektedir. Nispeten basit ve düşük maliyetli bu yöntem Yoğunluk Modülasyonlu Doğrudan Algılama (IM-DD) olarak adlandırılmaktadır.

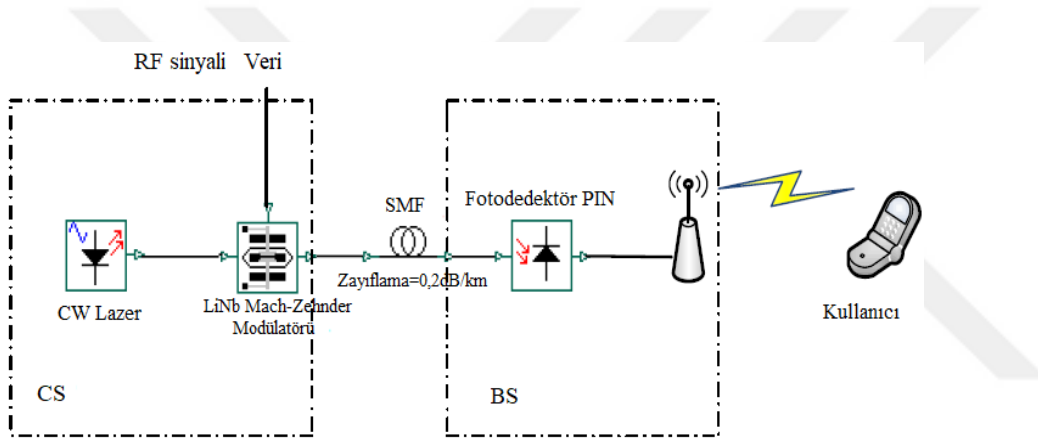


Şekil 3.9. Doğrudan modülasyon [16]

Bu tekniğin dezavantajı, lazer bias akımı ile dalga boyunun değiştirilmesidir. Elde edilen darbelerin bu kırışması, iletilen darbelerin taşıyıcı frekansının zamanla değişmesinden dolayı bant genişliği ile ilişkili olarak optik spektrumun genişlemesine neden olur. Bu yöntem kullanılarak 40 Ghz'e kadar sinyal göndermek mümkündür fakat pahalı lazerler kullanmak gerektirdiğinden çok maliyetli olabilmektedir. Pratikte 10 GHz civarı frekanslarda uygulanmaktadır [8, 16].

Harici modülasyon

Işık yoğunluğunu modüle etmek için diğer bir seçenek, lazerin sürekli dalga (CW) modunda çalıştığı harici modülasyondur. Mach-Zehnder Modülatörü (MZM) gibi harici bir modülatör Şekil 3.10'da gösterildiği gibi kullanılmaktadır. Doğrudan modülasyonda olduğu gibi, modüle edici sinyal de dağıtılacak gerçek RF sinyalidir. Lazerin CW modunda çalışması darbelerin aşırı kırışmasını (bozulmasını) önlemektedir. Harici modülatör ile bağlantılı düşük dispersiyonlu bir fiberin kullanılması durumunda, sistem doğrusallık elde edebilmektedir. Harici modülatörler, 40 GHz'e kadar bant genişlikleri ve 10 Gb/s'den daha yüksek bit hızlarıyla çalışabilir [16].



Şekil 3.10. Harici modülasyon [16]

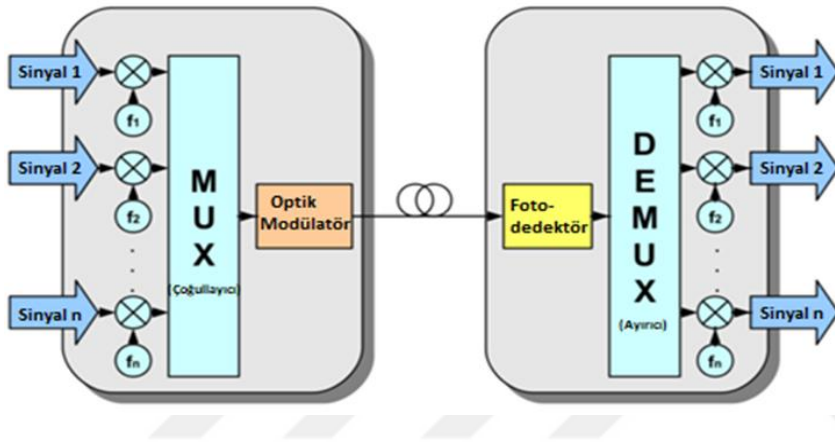
RoF çoğullama teknikleri

Kablosuz haberleşmeyle benzer şekilde fiber optik bant genişliğinin tam olarak kullanılabilmesi ve bağımsız çoklu servis haberleşmesinin taşınabilmesi için çoğullama teknikleri sıklıkla kullanılmaktadır. En çok kullanılan örnekleri; Alt taşıyıcı çoğullama (Sub-carrier multiplexing-SCM) ve Dalga boyu bölmeli çoğullamadır (Wavelength division multiplexing-WDM). SCM'de birçok tekil taşıyıcı (veya alt taşıyıcı) optik taşıyıcıyı modüle ederken, WDM'de ise her bir tekil mm-dalga taşıyıcı belirli bir optik kanala tahsis edilmektedir [20].

Optik SCM, çoklu sinyallerin tek bir fiber içerisinde çoğullanması amacıyla kullanılan bir çözümdür. Bir SCM yapısında (Şekil 3.11) gönderilen her sinyal farklı bir frekans üzerinde modüle edilir ve sonrasında sinyaller elektronik çoğullayıcı (Multiplexer-MUX) tarafından

çoğullanır. Çoğullanmış olan bu sinyal optik taşıyıcıyı modüle etmektedir. Bu yapı, elektrikli ekipmanların optik çoğullayıcılarla karşılaştırıldığında daha düşük maliyetli olması gibi nedenlerle sade WDM erişimine göre bazı avantajlar da sağlamaktadır.

Sinyal hedeflenen noktaya ulaştığında sinyalin tekrar elektrik alanına dönüştürülmesi işlemleri, çoğullama, ayırma ve demodülasyon işlemleri yapılır. Bu şekilde, çok sayıda değişik sinyal, tek bir fiber üzerinden bir lazer kaynağı kullanılarak, bir dalgaboyu ve bir fotodedektör ile taşınabilmektedir [8].



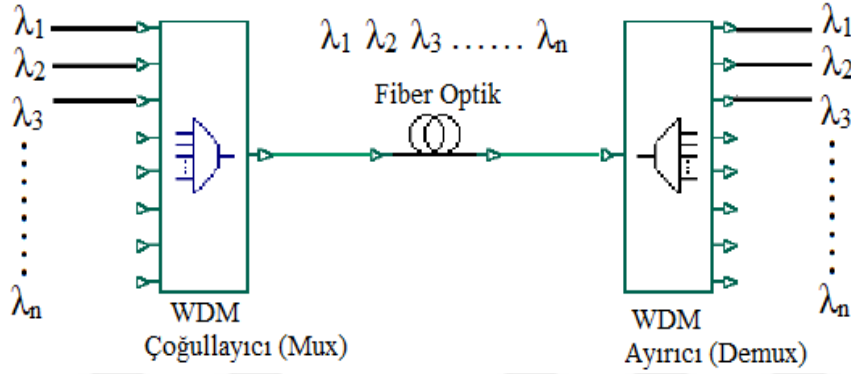
Şekil 3.11. Alt taşıyıcı çoğullama (SCM) yapısı [8]

WDM ise, tek fiberin farklı dalga boyları kullanan iki yönlü (dupleks) haberleşme ortamı olarak kullanılabilmesini sağlamaktadır (Şekil 3.12). DWDM (Yoğun Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama - Dense Wavelength Division Multiplexing) fiber optik şebeke üzerinden gönderilecek olan farklı dalga boylarını birleştirmektedir. Bu şekilde bant genişliği kullanımını ve toplam veri oranını maksimize edilmektedir [3].

RoF şebekelerinde, WDM'in devreye girmesi kapasitelerini ve tek bir merkez istasyon tarafından desteklenen baz istasyonu sayısını artırmaktadır. Şebekeye yeni eklenen baz istasyonları, farklı dalga boyu kanalları üzerinden servise alınabilmektedir (taşıma). WDM'deki kanal başına potansiyel bit hızı, 40 Gb/s ve daha yüksek bir seviyeye yükselmiştir ve bu uygulama, dispersiyon açısından yüksek bir tolerans sağlamaktadır.

Şekil 3.12'de gösterildiği gibi optik WDM şebekelerinde, "dalga boyu" terimi "frekans" terimi ile değiştirilir. Her bir verici, ayrı bir dalga boyunda, $1 \leq i \leq n$ farklı bir alıcıya

gönderir. Bu çoğullama yöntemi radyo yayını için kanal iletiminin çakışma olmaksızın farklı frekanslarda yapılabilmesi avantajına sahiptir. WDM teknolojisinin yeni nesil şebekelerin bir parçası olduğu öngörülmektedir [16].



Şekil 3.12. Dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) tekniği

3.2.3. RoF uygulama alanları

Kablosuz yerel şebekeler (WLAN)

Taşınabilir cihazlar ve bilgisayarlar daha fazla kullanım alanı bulduğundan ve daha güçlü olduğundan 2,4 GHz ile 5 GHz arasında çalışan kablosuz yerel şebeke sinyallerinin iletiminde kullanılan yüksek taşıyıcı frekansları mikro ve piko hücrelerin kullanılmasını gerektirmektedir. Kapsama alanı ile ilgili sorunların en ekonomik çözümü olarak da RoF iletim sistemi ortaya çıkmaktadır.

Mm-dalga fiber iletimi

60 GHz ve daha yüksek seviyedeki milimetre dalgalar yüksek oranlarda zayıflamaya ve daha düşük oranda elektromanyetik girişime neden olması sebebiyle, bina içi kapsamalarda kullanım için daha uygun olmaktadır. Mm-dalga frekanslarının RoF iletim sistemi ile birlikte kullanılması sonucunda, elektromanyetik girişim ve elektromanyetik kirlilik problemlerinin çözümü de mümkün olmaktadır.

OFDM sistemleri

Bu tez çalışması kapsamında da incelendiği üzere, RoF sistemi içerisinde OFDM (Orthogonal Frquency Division Multiplexing-Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama) kullanılması modülasyon tekniğinin geliştirilmesini sağlar ve elektriksel güç kaybı, kromatik dispersiyon ve faz modülasyonu gibi kablosuz iletim sistemlerinde optik bağlantı üzerinde karşılaşılan birçok sınırlandırmanın aşılmasında da yardımcı olur. Bu sistemlerin birleştirilmesi ayrıca, gelecek nesil yüksek hızlı veri iletim sistemleri için de birçok avantaja sahiptir.

Hücresele şebekeler

Mobil hücresele şebekeler RoF teknolojisinin önemli uygulama alanlarından birisidir. Mobil sistemler incelendiğinde, kullanıcı sayısının ve sunulan servis çeşitliliğinin artışına bağlı olarak mobil trafik oranının ve çalışma frekanslarının kalıcı bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir. Bu gelişmeler, sistem geliştiricilerini sistemdeki hücre yapılarını küçültmeye ve bu altyapıya uygun olabilecek BS'lerin maliyetinin çok fazla olmaması için daha ucuz teknolojiler geliştirmeye itmektedir. Bu sorun için en uygun çözümlerden birisi şebeke yapısında en iyi seviyede iletimi sağlamaya yönelik olan RoF iletim sistemi olmaktadır [8].

Wimax sistemi

Wimax, IEEE 802.16 standardına verilen isimdir ve çalışma frekansı 2 ile 66 GHz aralığındadır. Son kullanıcılar için mobil geniş bant servisi ve aynı zamanda ana taşıyıcı veya şebeke erişimi uygulamalarında kullanılmaktadır [42].

Sayısal kablosuz veri haberleşme sistemi olan Wimax, geniş bant erişimini kolaylaştırmak için planlanmış olup, eski karasal ve DSL kablolar ile sağlanan geniş bant erişimin yerini almaktadır. Açık görüş hattı (Line of Sight - LOS) koşulları altında 50 km'ye kadar mesafeler için 54 Mb/s'den 1 Gb/s'ye kadar yüksek hızda, mobil geniş bant hizmetleri göndererek, uzaktaki bölgelere bile ulaşabilmektedir. Wimax sistemi, bir kule ve alıcıdan oluşur; bu alıcı sabit veya anten ile birlikte ileri seviye bir cihaz olabilir. Sistem daha büyük alanlara hizmet edebilir ve BPSK, QPSK, 16-QAM ve 64-QAM gibi farklı modülasyon tekniklerinin kombinasyonlarını destekleyebilir. Wimax fiziksel katmanı, çok yolluluğa

karşı bağıklık sağlayan OFDM veya OFDMA'dan oluşur ve Wimax'ın 8 km'ye kadar tipik bir hücre yarıçapıyla NLOS'da çalışmasına izin verir [16].

Uydu haberleşmesi

Uydu haberleşmesi RoF teknolojisinin ilk pratik uygulamasıdır. Bu alandaki RoF uygulamalarından birisi, uydu yer istasyonlarından uydu antenlerinin uygun yerlere uzaktan erişim ile yerleştirilmesidir. Bu durumda, 1 km'den daha kısa mesafeli ve 1 GHz ile 15 GHz arasında çalışan küçük optik fiber hatlar kullanılmaktadır. Bu şekilde, yüksek frekanslı cihazlar merkezi bir hale getirilebilmektedir. RoF teknolojisinin kullanımı ile antenler uydu görünürlüğünün artırılabilmesi veya diğer karasal unsurlar ile çakışmanın azaltılabilmesi amacıyla kilometrelerce uzağa konumlandırılabilir [27].

Araç haberleşmesi ve kontrolü

Araç haberleşmesi, RoF teknolojisi için önemli potansiyele sahip bir uygulama alanıdır. Avrupa'da 63-64 GHz ile 76-77 GHz frekans aralıkları bu hizmet için zaten ayrılmış durumdadır. Bunun amacı önemli ana yollarda Akıllı Ulaşım Sistemleri (Intelligent Transport Systems (ITS)) uygulaması bakımından, örneğin araçlar arası haberleşme (IVC) ve yol-araç haberleşmesi (RVC) için kesintisiz bir mobil haberleşme kapsamı sağlanmasıdır. ITS sistemleri trafik bilgisi sağlanması, taşıma verimliliğinin geliştirilmesi, sürücülerin üzerindeki yükün azaltılması ve çevresel gelişmelere yönelik katkı sağlanması gibi konuları amaçlamaktadır. Gerekli olan yol kapsama alanını sağlayabilmek için çok sayıda baz istasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemler için RoF kullanılması ile birlikte basit ve düşük maliyetli bir çözüm oluşması ve sistemin toplamında da verimli ve kolay yönetilebilir bir yapının elde edilmesi sağlanmaktadır [29].

3.2.4. RoF kullanım avantajları

RoF sisteminin temelinde yer alan düşünce ve en öncelikli avantajı CS'lerin merkezileştirilmiş yapıda olmasıdır. Bu durum dolaylı olarak gereken temel bandın ve BS'deki ve RAU'daki RF sinyal işleme işlemlerinin minimize edilmesini de sağlamaktadır. Merkezi istasyonlar (CS), BS'lere fiber optik aracılığıyla bağlanmaktadır ve bu sayede de

en uç birimlerin basit yapıda, esnek ve maliyet açısından daha ekonomik olması sağlanmış olmaktadır.

Basitlik ve düşük maliyet

RoF kullanımı, uzak istasyon (Remote station-RS) kavramını kullanmayı sağlamıştır. Bu istasyon sadece optik-elektrik (O/E) (ve opsiyonel olarak frekans yukarı veya aşağı dönüştürücü), yükseltici ve anten içermektedir. Bu sayede baz istasyonunda yer alan kaynak yönetimi ve sinyal oluşturma devreleri daha merkezi bir yere aktarılabilen ve birçok uzak istasyon tarafından kullanılabilir. Böylece şebeke mimarisi daha basit bir yapıya sahip olmaktadır.

Uzak baz istasyonlarının daha basit bir yapıya sahip olması kurulum maliyetinin ve cihazlar tarafından harcanan gücün daha az ve bakımın da daha basit olması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla toplamda maliyetin önemli oranda düşmesini sağlamaktadır. Diğer bir düşük maliyet ise, daha ekonomik olan kademeli indisli polimer fiber optik (Graded-index polymer optical fiber (GI POF)) kullanımı ile sağlanabilecektir [1].

Kurulum ve bakım kolaylığı

RoF sisteminde, modülasyon ve anahtarlama cihazları CS içerisinde yer alır ve birden çok BS tarafından paylaşılır. Bu özellikle kurulum ve bakım maliyetlerinin azaltılmasını ve daha uygulanabilir bir düzeyde olmasını sağlar. Modülatör ve anahtarlama cihazlarının BS'de konumlandırıldığı mevcut kablosuz haberleşme sistemleri ile karşılaştırıldığında bu fark ortaya çıkmaktadır. Mevcutta kullanılan kablosuz haberleşme sistemi, yeterli kapsama alanını sağlamak için birçok BS gerektirmesinden dolayı, bakım ve kurulum açısından daha pahalı bir sistem olmaktadır [18].

Yüksek bant genişliği

Fiber optik iletim ortamı, çok yüksek kapasitede bant genişliği olanağı sağlamaktadır. Yapılan çalışmalara göre en düşük zayıflama oranı sağlayan üç önemli iletim dalga boyu bulunmaktadır: 850 nm, 1310 nm ve 1550 nm. Tek modlu bir fiber optik (SMF) için, bu üç dalga boyunun birleşimi 50 THz'den fazla olmaktadır. Fiber optikler tarafından sunulan

yüksek bant genişliği, mikrodalga sinyallerinin iletimi için sağladığı yüksek kapasitenin yanında, elektronik sistemlerle yapılması daha zor veya imkânsız olan yüksek hızlı sinyal işlemleri için de olanak sağlamaktadır [1].

Düşük sinyal zayıflaması

RF sinyallerin elektriksel olarak dağıtılması empedans artışı, soğurulma ve yansıma gibi birçok sorun ortaya çıkarmaktadır. RF sinyalin serbest uzayda iletimi frekans artışı ile artan soğurulma ve yansıma kaybı gibi etkilerden daha fazla etkilenmektedir. Bu nedenle, yüksek frekanslı sinyallerin iletimi kararlı bir sinyal rejenerasyon cihazı gerektirir. Elektriksel transmisyon hatlarında frekansın artışıyla birlikte empedans artışı da oluşmaktadır. Bu tür etkilerden korunmak amacıyla rejenerasyon vb. cihazların kullanımı da maliyetli bir durumdur.

Bu durumda, RoF sistemi bu sorunların çözümü olarak ortaya çıkmaktadır. CS ve BS arasındaki bağlantı için fiber optik kullanılması serbest uzay ve bakır kablo iletim ortamı ile karşılaştırıldığında birçok avantaj sağlamaktadır. Sonrasında sinyal BS'de yer alan anten tarafından farklı kullanıcılara yayımlanmaktadır [18].

Çoklu operatör ve çoklu servis çalışması

RoF, sistem çalışması açısından esneklik sağlamaktadır. Mikrodalga frekans oluşturma tekniğine bağlı olmak üzere, RoF dağıtım sistemi sinyal formatı açısından şeffaf bir şekilde oluşturulabilmektedir. Örneğin Yoğunluk Modülasyonlu Doğrudan Algılama (IM-DD) tekniği, doğrusal bir sistem olarak çalışabilmektedir ve bundan dolayı da şeffaf bir sistem oluşturmaktadır. Bu işlem ön modülasyonlu RF alt taşıyıcılarla birlikte SMF kullanılarak yapılabilir. Bu durumda aynı RoF şebekesi çok operatörlü ve çok servisli trafikleri dağıtmak amacıyla kullanılabilir [1].

Güç tüketiminin düşük olması

Sistemin düşük güç tüketimi daha basit radyo istasyonlarına sahip olmasının bir sonucudur. Karmaşık cihazların büyük bir kısmı merkezi istasyonda tutulmaktadır. Bazı uygulamalarda, anten sahaları pasif modda tutulmaktadır. Örneğin, piko-hücreler (küçük radyo hücreleri) ile

çalışan 5 GHz fiber radyo sistemleri inaktif (aktik olmayan) modda çalışan baz istasyonları kullanabilmektedir [29].

Radyo frekans girişimi bağışıklığı

Radyo frekans girişimine karşı bağışıklık (EMI- Electromagnetic Interference Immunity), özellikle mikrodalga iletimi için fiber optik haberleşmenin en önemli özelliğidir. Bunun nedeni, sinyallerin fiber üzerinden bir ışık şeklinde iletilmesidir. RF sinyali fiber optik üzerinden iletildiği için, elektromanyetik girişim gibi bir ihtimal bulunmamaktadır. Bu bağışıklık nedeniyle mm-dalgalarla kullanım açısından kısa mesafelerde bile tercih edilmektedir [18, 27].

Geleceğe dönük sistem yapısı

Fiber optik kablolar gigabit/saniye (Gb/s) hızlarındaki verilerin taşınabileceği şekilde tasarımılanmış iletim ortamları olduğundan, gelecek dönemde kullanılacak olan yeni nesil haberleşme sistemleri için de kullanılabileceği öngörülmektedir. RoF teknolojisi ayrıca protokol ve bit oranı açısından da şeffaf bir teknolojidir. Dolayısıyla, řu anda kullanılan veya gelecek nesil haberleşmede kullanılacak olan herhangi bir teknoloji için altyapı oluşturabilecektir.

3.2.5. RoF kısıtlamaları

RoF teknolojisi için en fazla kısıtlayıcı olan faktörler, her ikisi de optik hattın doğrusallığını ve dinamik oranını etkileyebildiğinden, lazer vericiden ve fiber optikten kaynaklanan doğrusal olmayan etkiler olmaktadır.

RoF sistemi birçok kanalın taşınması açısından çok ideal bir haberleşme alt yapısı olanağı sağlasa da, yüksek bit hızlarında kablosuz kanal tarafında semboller arası girişim (Inter Symbol Interference-ISI) ortaya çıkabilmektedir. Doğrusal olmayan etkilerden dolayı yükleme hattı (uplink) için doğrusal dinamik alan önemli bir konu haline gelmektedir. Alınan sinyalin fiber optik kabloya girmeden önce ilk olarak kablosuz ortamdan geçmesinden dolayı (yol kayıpları, sönümlenme ve gölgelenme gibi etkiler ortaya çıkar) yükleme hattı için bu alanın geniş olması gerekmektedir [27].

RoF sistemi analog modülasyon ve ışığın algılanması gibi işlemler içerdiğinden dolayı temelde analog bir iletim sistemidir. Bundan dolayı, örneğin gürültü ve bozulma gibi analog haberleşme sistemlerinde önemli olan sinyal uyumsuzlukları RoF sistemlerinde de önemli olmaktadır. Analog fiber optik hatlar üzerindeki gürültü kaynakları arasında, bağıl yoğunluk gürültüsü (RIN- Relative Intensity Noise), lazerin faz gürültüsü, fotodiyotun shot gürültüsü, yükselticinin termal gürültüsü, fiber saçılımı (dispersiyonu) gibi gürültüler yer almaktadır. Tek modlu bir fiberle gerçekleştirilen RoF sistemlerinde, kromatik dispersiyon fiber hat uzunluğunu etkilemekte ve yüksek oranda RF taşıyıcısı faz gürültüsüne neden olabilen faz bozukluğuna neden olabilmektedir [1].

3.2.6. Milimetre dalga teknolojisi

Milimetre dalga (mm-dalga) ifadesi sırasıyla 10 mm ve 1 mm dalga boylarına karşılık gelen, 30 GHz ile 300 GHz frekans aralığındaki elektromanyetik dalgaları tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Bu yüksek frekanslı mikrodalga sinyallerini taşımak amacıyla BS ve son kullanıcılar arasında fiber optik kullanan sistemlere mm-dalga RoF sistemleri denilmektedir [24].

Gelecek nesil kablosuz geniş bantlı sistemlerin çalışma frekanslarının 5 GHz ve üzerinde olacağı düşünüldüğünde, uzak anten birimlerine yüksek kalitede mm dalga üretimi ve iletimi RoF tekniklerinin en temel konusu haline gelmektedir. Bu nedenle de RoF genel olarak milimetre dalga transmisyonu olarak ele alınmaktadır. 26-28 GHz veya 60 GHz frekans aralıklarında çalışan milimetre dalga radyo yüksek bant genişliğinde veri transmisyonu için en uygun çözüm olarak görülmektedir.

Çoklu gigabit kablosuz servislerin sağlanabilmesi için önemli bir potansiyele sahip olan milimetre dalga RoF teknolojisi, merkezileştirilmiş kontrol ünitesi ve basitleştirilmiş uzak baz istasyonları ile düşük kayıp ve bant genişliği açısından çok verimli olan fiber optik bağlantı yapısı sayesinde gelecek nesil optik-kablosuz şebekeler için anahtar bir rol üstlenmektedir [3, 21].

Serbest uzayda frekans artışıyla birlikte emilim ve yansımanın da artması nedeniyle kayıp oranı artmaktadır. Dolayısıyla bahsedilen yüksek frekanslarda çalışan radyo dalgaları atmosferde yüksek oranda zayıflamaya maruz kalmaktadır (60 GHz civarındaki zayıflama

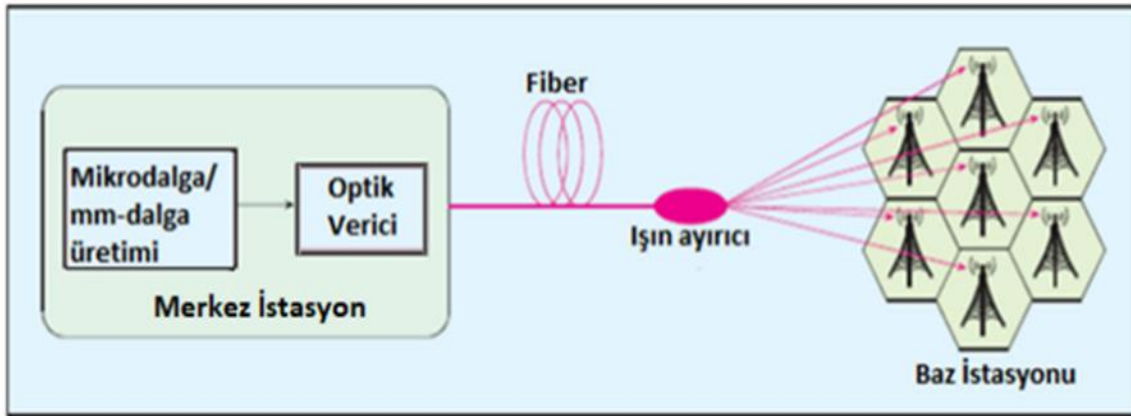
12-16 dB/km). İletim hatlarında ise frekansla birlikte empedansın da yükselmesi yine kayıp oranını oldukça fazla artırmaktadır. Bu nedenle de uzun mesafe iletim sistemleri için (>2 km) kullanımı zor olmaktadır. İletim mesafesinin kısa olmasının yanında sönümlenme etkisinden dolayı da bit oranı 150 Mb/s olmaktadır [3, 17].

Bu etkilere ilave olarak, özellikle 10 km'yi aşan mesafeler için de fiber dispersiyonu iletim performansını kısıtlayabilmektedir. Bu nedenle servis sağlayıcılar, yüksek frekanslı radyo sinyallerini uzun mesafelerde elektriksel olarak iletebilmek için pahalı rejenerasyon (yeniden elde etme) cihazlarına ihtiyaç duymaktadırlar.

Diğer taraftan, milimetre dalgalar yüksek RF yayılım kayıpları nedeniyle elektriksel olarak dağıtılamazlar ve elektriksel cihazlar kullanarak mm dalga frekansların üretimi de oldukça zor olmaktadır. Bunun çözümü olarak da optik cihazlar kullanılmaktadır.

3.2.7. Mm-dalga üretim teknikleri

Şekil 3.13'te genel yapısı görülen mm-dalga RoF sisteminde, CS'nin indirme hattı iletiminde milimetre dalga sinyallerinin üretimi önemli ve zor bir konu olmakla birlikte, son yıllarda RoF teknolojisini destekleyen yeni opto-elektronik cihazlar sayesinde, optik milimetre dalga sinyal üretimi ve iletimi amacıyla birçok teknik geliştirilmiştir. Bu teknikler arasında; optik frekans birleştirme, yoğunluk modülasyonlu doğrudan algılama (IM-DD), harici modülasyon gibi yöntemler sayılabilir [6, 21].

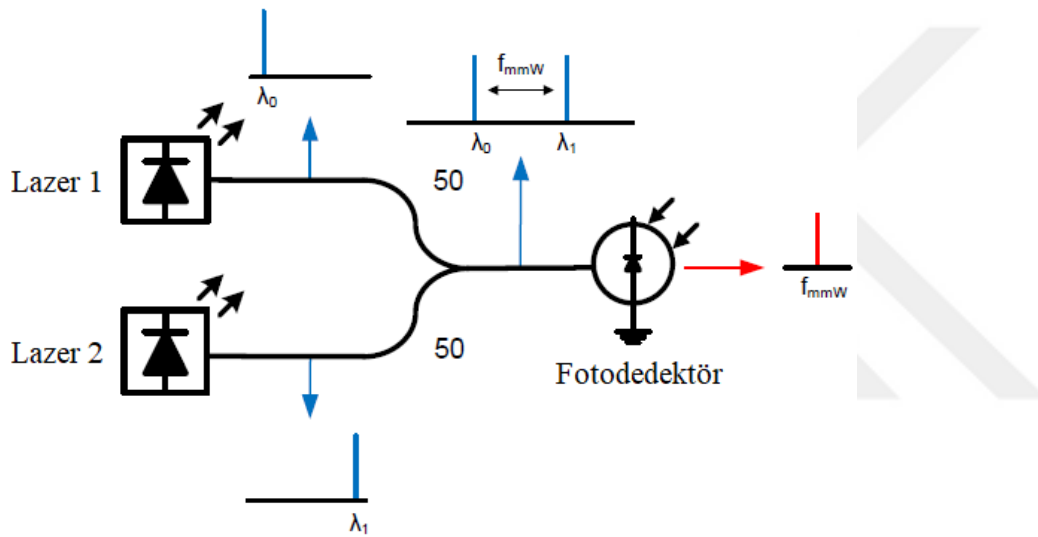


Şekil 3.13. Mm-dalga RoF haberleşme sisteminin temel yapısı [6]

Optik frekans birleştirme (Optical heterodyning)

Mikrodalga ve mm-dalga sinyallerinin optik teknolojilerle üretilmesi amacıyla kullanılabilen en basit yöntem optik frekans birleştirme olarak bilinmektedir.

Bu yöntemde, lazer kaynakları arasındaki frekans farkı elde edilecek olan mm-dalga frekansına eşit olmak üzere, iki bağımsız lazer kullanılmaktadır. Bu iki lazer, Şekil 3.14'te görüldüğü üzere RF mm-dalga üretmesi için optik olarak bir fotodetektör üzerinde birleştirilebilir (girişim yapılabilir).



Şekil 3.14. İki bağımsız lazer kaynağı kullanılarak mm-dalga üretimi [17]

İki optik alan:

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \quad (3.1)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \quad (3.2)$$

Bu eşitliklerde tekil optik dalgalara ait olan E_{01} ve E_{02} genlik terimleri, φ_1 , φ_2 ve ω_1 , ω_2 ise sırasıyla anlık faz terimleri ve açısal frekans terimleridir. İki optik alan bir fotodetektör yüzeyinde limitlenmiş bir bant genişliğiyle birlikte girişim yaptığında, fotodetektörün çıkışında iki alanın toplamının karesiyle orantılı olmak üzere bir fotoakımı üretilmektedir:

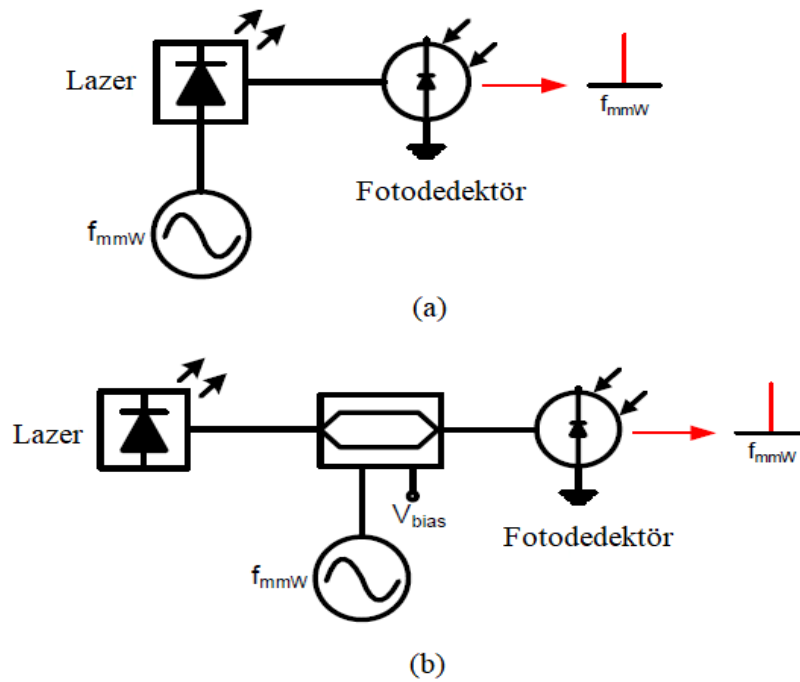
$$I_{PD} = A \cos [(\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2)] + \text{yüksek frekans terimleri} \quad (3.3)$$

Burada A ; E_{01} , E_{02} genliklerine ve fotodedektörün duyarlılığına bağlı bir sabittir. Sadece ilk terim dikkate alınmaktadır; yüksek seviyeli terimler dedektörün (algılayıcının) kısıtlı bant genişliği nedeniyle dikkate alınmayan yüksek frekans bileşenleridir. Eş. 3.3, herhangi bir frekandaki RF sinyalinin fotodedektörün bant genişliği ile kısıtlı olmak üzere, iki optik alan arasındaki frekans farkından elde edilebileceğini göstermektedir [17].

Yoğunluk modüasyonlu doğrudan algılama (Intensity-Modulated Direct Detection – IM/DD)

Bu yöntemde temel olarak ışık kaynağının şiddeti (yoğunluğu) RF sinyali ile doğrudan modüle edilir ve sonrasında RF sinyalini tekrar elde etmek için de bir fotodedektör ile doğrudan algılanır [23].

Mm-dalga sinyali üretiminde faz gürültüsünü en aza indirebilmek için iki aynı optik faz dalgalanmasını barındıran uyumlu kaynaklar kullanılması önemlidir. Doğrudan modülasyonda basit olarak CW lazeri süren akım istenilen bir mm-dalga frekansındaki RF sinyali ile modüle edilir (Şekil 3.15). Bununla birlikte, bu tekniğin kullanımı doğrudan modüle edilen lazer diyotun modülasyon bant genişliği tarafından kısıtlanmaktadır (~10 GHz).

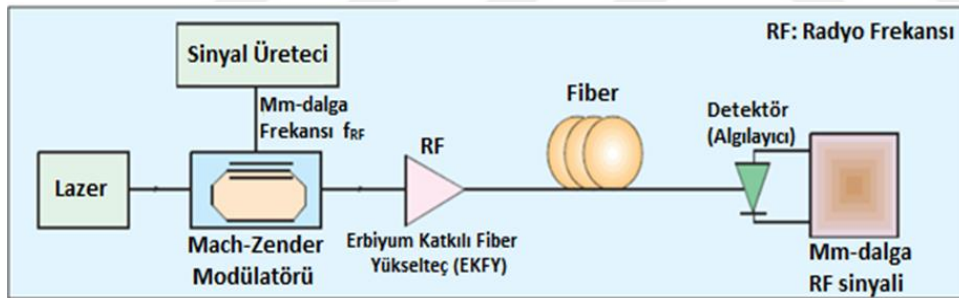


Şekil 3.15. Lazerin optik yoğunluğunun (a) Doğrudan (b) Harici modülasyonu [17]

Yüksek frekanslar doğrudan modülasyon yöntemiyle üretilmemektedir. Doğrudan modülasyondaki diğer bir problem ise lazer diyotun çıkış spektrumundaki kırışması olayıdır. Bu kırışma lazerin harici olarak modüle edilmesi durumunda baskılanabilmektedir. Harici optik modülatörler ise 100 GHz'e kadar modüle edebilmektedir [24].

Harici modülasyon

Mikrodalga sinyallerinin diğer bir optik üretim tekniği harici modülasyon teknolojisidir. Harici modülasyon tekniğinde kullanılan temel cihaz yüksek hızlı optik modülatördür. Lazerden çıkan optik dalga Mach-Zehnder Modülatöründen (MZM) geçer ve iletim mesajını içeren bir milimetre dalga RF sinyali MZM tarafından yüklenir. Böylece optik dalga, modüle edilmiş çift yan bantlı optik sinyal oluşturur. Optik alıcı tarafında her bir yan bant gerekli milimetre dalga frekansındaki RF sinyalini elde etmek için merkez frekans ile girişim yapar (Şekil 3.16) [6].



Şekil 3.16. Harici modülasyon kullanılan RF verici [6]

Harici modülatör, yoğunluk veya faz modülatörü olabilir. Doğrusal modülasyon söz konusu ise, modülasyon frekansının iki katı frekansa sahip sinyaller üretilir; derin modülasyon mevcut ise, modülasyon frekansının dört katı frekansta mikrodalga sinyaller üretilir. Harici modülasyon teknolojisinin avantajı, mikrodalga modülasyon sinyal frekanslarının değiştirilmesiyle frekansın ayarlanabilir olmasıdır.

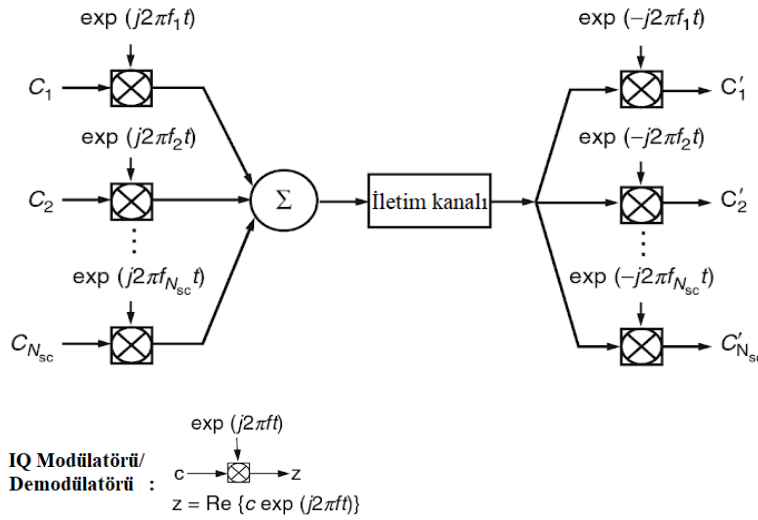
60 GHz veya daha yüksek mikrodalga sinyalleri optik taşıyıcı üzerinde modüle etmek için, harici modülasyon teknolojisi kullanılması gerekmektedir. Hareketli dalga yapısındaki LiNbO_3 modülatörü 70 GHz bant genişliğine sahip sinyalleri modüle edebilir. Ayrıca, Elektrik soğurma modülatörü (EAM) de kullanılabilir. Küçük olması ve düşük kullanım

gerilimi nedeniyle bu modülatör, bir lazer veya optik dedektör ile kolaylıkla entegre edilebilir [11].

Yukarıda bahsedilen mm-dalga üretim tekniklerine ilave olarak, diğer önemli milimetre dalga üretim teknikleri ise frekans yukarı dönüşümü, yarı iletken optik yükselteç (semiconductor optical amplifiers -SOA) kullanımı ve uyarılmış brillouin saçılımı (SBS) teknikleridir [12].

3.3. OFDM Teknolojisi ve Sistem Mimarisi

Dikgen alt taşıyıcılardan oluşan çok taşıyıcılı haberleşme sistemi OFDM (Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama) olarak adlandırılmaktadır. OFDM, yüksek hızlı bir bilgi akışının iletimi amacıyla birbirlerinin harmoniği durumunda olan dar bantlı alt taşıyıcıları kullanan çok taşıyıcılı bir modülasyon şeklidir. Bu sayısal modülasyon tekniğinde veri, gönderici girişinde birbirine paralel şekilde yer alan farklı frekanslar üzerinden iletilmektedir (Şekil 3.17).

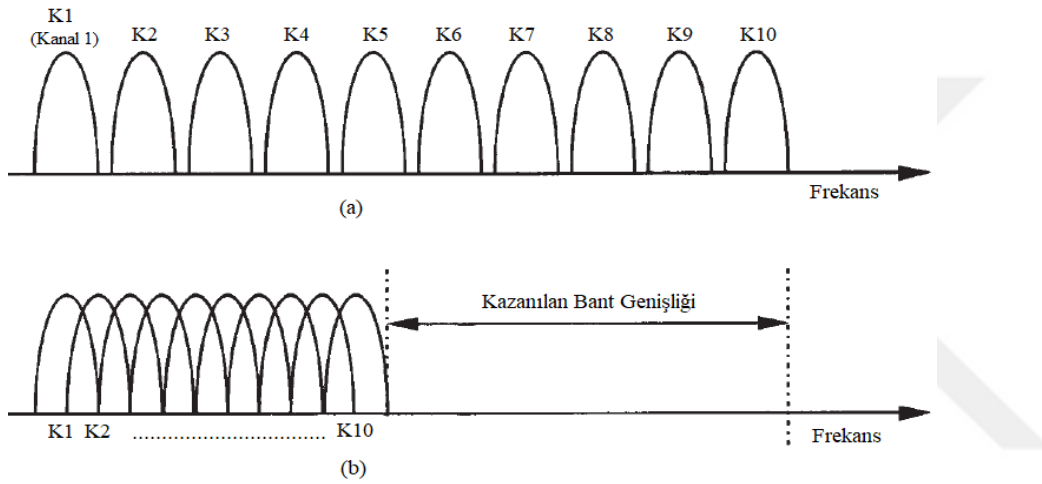


Şekil 3.17. OFDM sisteminin temel iletim yapısı (C=Alt taşıyıcılara ait veri sembolü, N_{sc} =Alt taşıyıcı N) [35]

OFDM, yüksek hızlı veri akışını daha düşük hızlarda veriye ayırarak birden çok alt taşıyıcı üzerinden aynı anda ilemesi sayesinde, frekans seçici sönmleme, dar bant girişimi ve çok yollu gecikme yayılımı gibi etkilere karşı dayanıklı olmasından dolayı gelecek nesil geniş bantlı kablosuz haberleşme için uygun bir modülasyon tekniği olarak görülmektedir. OFDM

her biri farklı frekansa sahip, birbirine dik olacak şekilde çok sayıda paralel alt taşıyıcı üzerinden taşınması yöntemini temel almaktadır. OFDM frekans seçici sönmüleme kanalını N alt taşıyıcı sayısı olmak üzere N tane düz sönmülemeli kanala dönüştürmektedir.

OFDM, CDMA için alternatif oluşturan ve 4G teknolojisi için de uygun bir sayısal kablosuz modülasyon ve çoğullama tekniğidir. Bu tekniğin arkasındaki temel neden ise oldukça hızlı artan mobil haberleşme ve internet çoklu ortam servislerinin karşısında kısıtlı bir radyo spektrumunun verimli bir şekilde değerlendirilmesi gerekliliğidir (Şekil 3.18) [22].



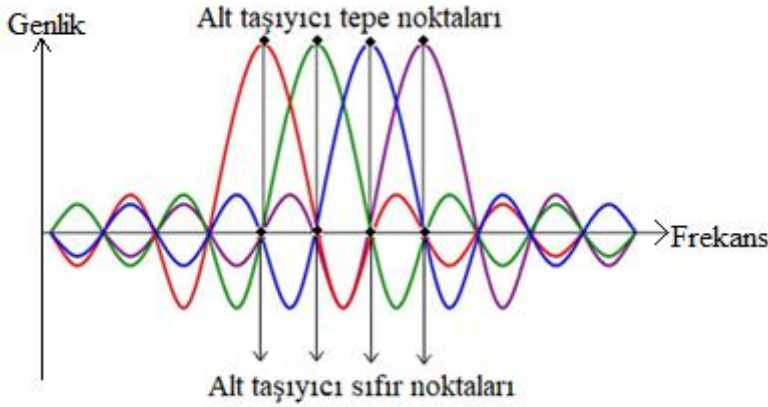
Şekil 3.18. Bant genişliğinin verimli kullanımı (a) FDM (b) OFDM [46]

Son dönemde, birçok kablosuz standart (Wi-Max, IEEE802.11a, LTE ve DVB) gelecek kablosuz haberleşmedeki kullanım artışını karşılayabilmek için OFDM'i adapte etmektedir. OFDM çoklu taşıyıcılı iletim sistemlerinin özel bir türüdür ve frekans seçici kanallar ve veri hızları için uygulanmaktadır. Bu teknik, frekans seçici geniş bantlı bir kanalı, frekans alanındaki dikgenliğin korunması sayesinde geniş gecikme yayılmalarına karşı dirençli olacak şekilde seçici olmayan dar bantlı kanallara bölmektedir. Dahası, gönderici taraftaki döngüsel yedekleme yapısı sayesinde karmaşık sinyal işlemleri sadece FFT ile çözülmüş olmaktadır [31].

IEEE 802.11 standardı çoklu sönmüleme ortamlarındaki radyo kanalları üzerinden sayısal verilerin aktarımı konusunda verimli ve güvenli performansından dolayı OFDM'i güvenilir bir modülasyon tekniği olarak kullanmaktadır [5].

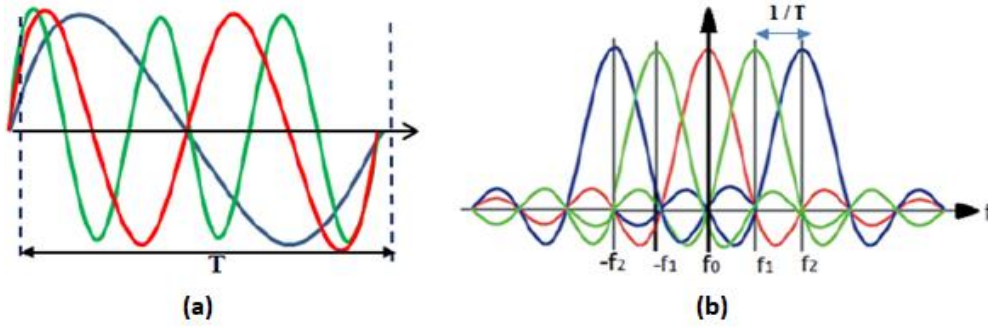
OFDM çok yüksek spektrum verimliliğine sahiptir. Sistem kapasitesini ve yeteneklerini artırmak amacıyla oluşturulmuş bir teknolojidir ve fiber optik ve RF üzerinde uzak mesafelere taşınabilmektedir. Optik ve kablosuz yüksek hızlı iletim sistemleri için uygulanabilen bir çoğullama sistemi olarak tasarlanmıştır. Kablosuz sistemde OFDM, ayrı kablosuz kanalların yayılımından kaynaklanan semboller arası girişimin (ISI- Inter symbol interference) engellenmesi açısından da etkili bir çözüm oluşturduğu için, fiziksel katman teknolojisi olarak uygulanmaktadır [2].

OFDM sisteminin tekil alt taşıyıcılı yapısı için bir örnek Şekil 3.19’da görülmektedir. Düşük hızdaki veri akışları genellikle QAM ile modüle edilir ve paralel olarak iletilir. Eş zamanlı olacak şekilde yüksek spektral verimlilik sağlayan OFDM aynı zamanda optik haberleşme sistemleri için önemli olan kromatik dispersiyona karşı da doğal bir direnç oluşturur.



Şekil 3.19. OFDM sistemindeki tekil alt taşıyıcıların sembolik gösterimi (Her bir alt taşıyıcının tepe noktası diğer alt taşıyıcıların sıfır noktasıyla örtüşmektedir)

OFDM’de kullanıcı bilgilerinin bir kısmını taşıyan her bir alt taşıyıcı, bir banttıan iletilir. FDM’den farklı olarak, her bir alt taşıyıcı diğer bütün alt taşıyıcılara göre dikgendir (bir diğerinden bağımsız olacak şekilde). Dikgen FDM (OFDM)’in yayılı spektrum tekniği veriyi birbirinden belirli frekans aralıklarıyla ayrık olarak yerleşmiş olan çok sayıda taşıyıcı üzerine dağıtmaktadır (Şekil 3.20). Bu teknikte yer alan ayrık yerleşim, demodülatörlerin kendi frekanslarından farklı frekansları görmelerini engelleyen “dikgenlik” özelliğini sağlamaktadır. Sonuç olarak, OFDM rastlantısal ve dizi halinde oluşan gürültüleri ve aynı zamanda frekans seçimli sönmülemeyi ve ortak kanal girişimini azaltabilmektedir [14].



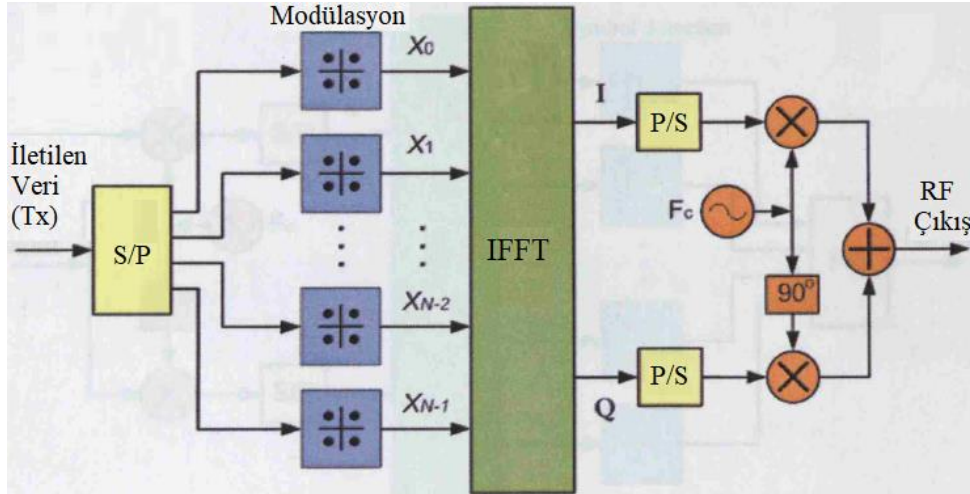
Şekil 3.20. OFDM sembolünün spektrumu (a) Zaman alanında (b) Frekans alanında [28]

Wi-Fi, GSM, WiMAX ve LTE gibi kablosuz haberleşme standartlarının çalışma frekansı olan 2-4 GHz arası düşük mikrodalga sinyal aralığı, frekanslardaki yapısal yayılım gecikmelerinden ve çoklu hat zayıflamasından dolayı, çoklu hat ortamlarına dayanıklı ve dar bant girişimlerine karşı kararlı bir yapı sağlayan verimli bir çözüm olarak OFDM kullanılmaktadır. Ayrıca OFDM, yüksek kapasiteli ve yüksek hızda kablosuz geniş bantlı çoklu ortam şebekeleri sağlamakla kalmaz, mevcut sistemlerle ve gelecek nesil haberleşme sistemleriyle de birlikte çalışabilir [15].

OFDM sistem mimarisi

OFDM gibi çoklu taşıyıcı modülasyon sistemleri, yüksek hızlı seri veri akışını çok sayıda düşük hızlı paralel bit akışlarına bölerek iletmektedir. Bu alt akışlar çok sayıda paralel alt taşıyıcıyı modüle etmek için kullanılmaktadır. Bu sistem gerçekte veriyi frekans alanında yaymaktadır. Bu birleştirilmiş sinyaller daha sonra RF alanına yükseltilerek iletilmektedir [32].

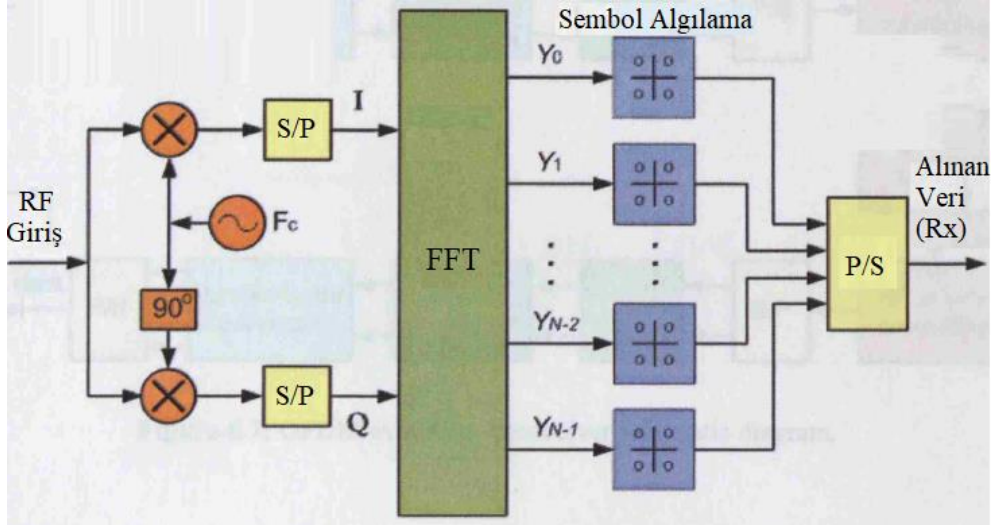
Diğer taraftan bir OFDM sinyali, bazı sayısal modülasyon teknikleri kullanılarak her bir alt taşıyıcı üzerinde temel bant verisi ile modüle edilmiş olan dikgen alt taşıyıcıların toplamı olarak ifade edilebilmektedir. Birleşik temel bant sinyali normal olarak bir ana RF taşıyıcıyı modüle etmek için kullanılır. OFDM sinyalleri sayısal olarak elde edilirler (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Tipik bir OFDM gönderici tarafı blok diyagramı [23]

Şekil 3.21’de iletilen Tx verisi seri haldeki ikili bit dizisidir. Bu bitler, S/P (seri/paralel) dönüştürücü kullanılarak N tane paralel bit serisi (X_0, X_1, \dots, X_{N-1}) olarak demultipleks edilir. Daha sonra ise, karmaşık modülasyon teknikleri (QPSK, QAM gibi) kullanılarak veri modülasyonu yapılır (mapping). Yani veri sembol dizilerine dönüştürülür. Sonrasında IFFT her bir sembol dizisi üzerinde uygulanarak zaman alanında karmaşık örnekler oluşturulur. Bu karmaşık örnekler, temel bant OFDM sinyali oluşturmak amacıyla birleşim sağlayan P/S (paralel/seri) dönüştürücü ve çoğullama (multipleksing) uygulanarak Eş-Faz (In-phase-I) ve Dörtlü Faz (Quadrature Phase-Q) bileşenleri olan seri dizilere dönüştürülür. Daha sonra ise, bu iki sinyal dizisi bir RF frekanslı OFDM sinyali üretmek amacıyla, sırasıyla kosinüs ve sinüs fonksiyonlarını F_c taşıyıcı frekansında modüle etmek için kullanılırlar. İletilen RF sinyali sadece alan şiddetindeki değişim olduğu için her zaman gerçektir [23].

OFDM alıcı tarafında ise, verici taraf ile tam tersi bir işlem uygulamaktadır (Şekil 3.22). RF OFDM giriş sinyalinden temel bant OFDM sinyalini elde edebilmek amacıyla aynı fazda karmaşık taşıyıcı ile çarpılır ve sinyalin frekans alanındaki ifadesini elde etmek amacıyla da FFT uygulanır. Çıktıdaki veri serisi N tane paralel ikili sayı dizisi oluşturmak üzere modüle edilir. Bu diziler daha sonra ikili seri haldeki Rx verisini oluşturmak üzere çoğullandır ve tekrar birleştirilir. Rx verisi iletimi yapılan orijinal ikili serinin tahmin edilmiş halidir.

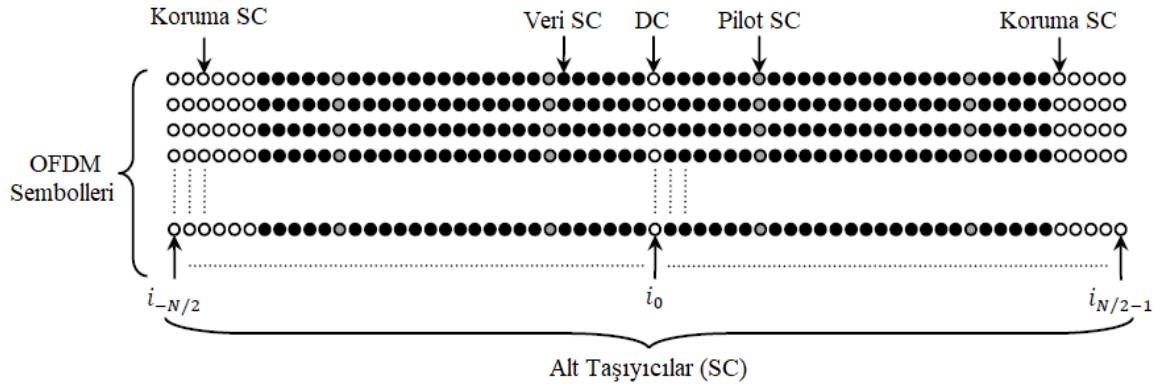


Şekil 3.22. Tipik bir OFDM alıcı tarafı blok diyagramı [23]

OFDM sistemlerinde, alt taşıyıcılar FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) ve IFFT (Ters Hızlı Fourier Dönüşümü) kullanılarak elde edilmektedir. Kullanılan FFT boyutları 128, 256, 512, 1024 veya 2048 olmaktadır. Desteklenen bant genişlikleri ise 5, 10 ve 20 MHz'dir. Bu tekniğin bir faydası da farklı bant genişliklerine adapte olabilmesidir. Toplam bant genişliği kullanımı değişirken bile daha küçük bir bant genişliği birimi sabit kalabilir. Örneğin, 5 MHz'lik bir bant genişliği 512 küçük banda bölünebilirken 10 MHz bant genişliği 1024 küçük bant oranlarına bölünebilir [32].

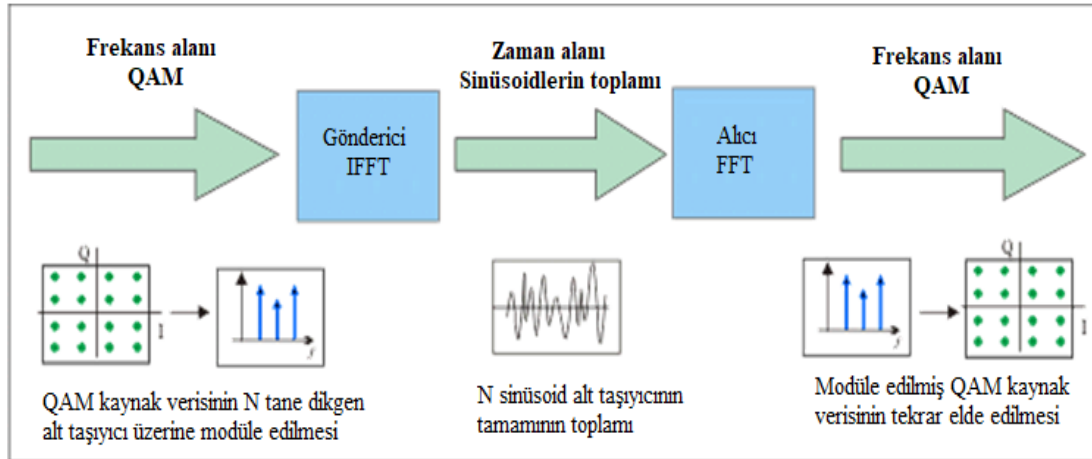
OFDM sisteminde çeşitli alt taşıyıcı tipleri kullanılmaktadır (Şekil 3.23). En fazla sayıda, modüle edilmiş veriyi taşıyan alt taşıyıcılar olmakla birlikte, alıcı taraftaki kanal tahmini işlemleri için pilot alt taşıyıcılar da bulunmaktadır. Bazı taşıyıcılar ise boş durumdadır. Bunun amacı da alıcı ve gönderici taraftaki analog-sayısal dönüşüm için kullanılan filtrelemede Nyquist Frekansına yakın olan frekansların ($f_s/2$) elde edilememesi ve veri iletimi sağlayamamasıdır.

Şekil 3.23'te modüle edilmiş olan veri örnekleri ilk olarak soldan sağa olacak şekilde birinci OFDM sembolü üzerine dağıtılır ve sonrasında ikinci ve diğerleri de sırasıyla dağıtılmış olur. Bu işlem tüm örnekler yerleşinceye kadar devam eder [34].



Şekil 3.23. Paralel sütunlar: Alt taşıyıcılar (SC), Satırlar: OFDM sembolleri [34]

OFDM sisteminin gönderici tarafında veri frekans alanına paylaştırılır ve veriyi zaman alanında modüle etmek için IFFT kullanılır. Alıcı tarafında ise orijinal veriyi tekrar elde etmek için FFT kullanılmaktadır (Şekil 3.24). FFT verinin çoklu taşıyıcılar üzerinde verimli bir şekilde modülasyonunun yapılmasını sağlamaktadır. İleri yönlü ve ters yönlü dönüşümün benzerliği nedeniyle, aynı devreler, bazı küçük ayarlamalarla hem modülasyon hem de demodülasyon işlemleri için gönderici-alıcı birim (transceiver unit) içerisinde kullanılabilir.



Şekil 3.24. OFDM sisteminin basit çalışma prensibi [47]

OFDM sinyalinin alçak-geçiren eşdeğerinin matematiksel eşitliği aşağıdaki gibidir [15]:

$$X(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{j2\pi kt}{T}}, \quad 0 \leq t < T \quad (3.4)$$

Bu eşitlik (Eş. 3.4) aynı zamanda Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform-DFT) olmaktadır. Buradaki X_k 'lar, BPSK, QPSK veya QAM temel bant sembollerini temsil eden karmaşık sayı dizileri halindeki veri sembolleridir. N toplam kullanıcı sayısı ve T ise OFDM sembol hattıdır. Kullanıcıların arasındaki boşluk $1/T$, kullanıcıların her bir sembol periyodu boyunca dikgen olmasını sağlamaktadır.

ISI (Semboller arası girişim) etkisinden kaçınmak amacıyla OFDM bloğundan önce, T_g uzunluğunda bir koruma aralığı oluşturulur. Bu aralık boyunca, döngüsel önekin iletimi sağlanır. Döngüsel önek ile birlikte sinyal aşağıdaki gibidir:

$$X(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{j2\pi kt}{T}} \quad , -T_g \leq t < T \quad (3.5)$$

Aşağıdaki Eş. 3.6 ise IFFT'nin ayrık formunu vermektedir [17]:

$$x_m = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(\frac{j2\pi km}{N}\right) \quad , 0 \leq m \leq N - 1 \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte N , IFFT giriş sayısı (alt taşıyıcı sayısına eşittir), X_k , frekans alanı girişleri ve x_m ise, IFFT sonucunda elde edilen zaman alanı çıkış sayısını ifade etmektedir. Her bir x_m çıkışı, bütün X_k katsayılarının bilgilerini içermektedir, X_k ($0 \leq k \leq N-1$ için).

Eş. 3.6 incelendiğinde çıkış frekanslarının $k/N = 0/N, 1/N, \dots, N-1/N$ olacak şekilde değiştiği görülebilir. Her bir alt taşıyıcı frekansı temel frekansın tam sayı katı olacak şekilde oluşmaktadır. Temel frekansın (ω) tam sayı katı olan bir frekansa sahip iki sinüsoidal dalga şeklinin çarpımının altında kalan alanın hesaplama sonucu sıfır olmaktadır [17]:

$$\frac{1}{T} \cdot \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sin(p\omega t) \cdot \sin(q\omega t) dt = 0 \quad , p, q \in Z, p \neq q \quad (3.7)$$

Sonuç olarak, sinüsoidlerin veya IFFT tarafından belirlenen alt taşıyıcı frekanslarının, bir IFFT işlemi sonucunda dikgen oldukları söylenebilir. Alt taşıyıcılar, girişim yapmazlar ve dolayısıyla da alıcı tarafında yapılacak tersi işlemle de (FFT) bağımsız bir şekilde elde edilebilirler.

Spektral verimlilik, sayısal haberleşme sisteminde, belirli bir bant genişliği kullanılarak iletimi sağlanabilen bilgi miktarı anlamına gelmektedir ve her bir Hz bant genişliği için saniye başına iletimi yapılan bit sayısının ölçülmesidir [22]:

$$S_E = \frac{c}{w} = \log_2 \left(1 + \frac{s}{N} \right) \quad (3.8)$$

Burada sinyal ve gürültünün her ikisi de doğrusal ölçeklendirmede yer alır ve spektral verimlilik $b/s/Hz$ olarak belirlenir. OFDM sinyalinin spektral verimliliği, modülasyon tekniğinin spektral verimliliği ile alt taşıyıcı sayısının çarpımından elde edilebilir.

Sinyal gürültü oranı (SNR), sistem tarafından tekrar elde edilen sinyalin gücü ile arka planda sistem tarafından oluşturulan gürültünün gücü veya genliği arasındaki fark anlamına gelir. Shannon Teoremine göre bant genişliği W olan bir kanalın, sinyal gücü S olmak üzere ve ortalama olarak gücü N olan bir beyaz gürültüye maruz kaldığındaki maksimum kapasitesi aşağıdaki eşitlik ile elde edilebilir [22]:

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (3.9)$$

3.3.1. OFDM parametreleri ve özellikleri

Tek taşıyıcılı modülasyon sistemlerine kıyasla OFDM frekans ayarlamalarına ve faz gürültüsüne karşı daha hassastır. İlave olarak OFDM daha yüksek bir Tepe-Ortalama Güç Oranı Değerine (Peak-to-average power ratio – PAPR) sahip olmaktadır. Bu da RF yükseltecinin güç verimliliğini düşüren bir etkidir [28].

OFDM sisteminde bulunan taşıyıcı sayısı sadece mevcut kullanılabilir spektral bant genişliği ile sınırlı olmayıp, sistemin karmaşıklığına göre belirlenen IFFT ile de ilgili bir durumdur. Daha karmaşık bir OFDM sistemi daha büyük bir IFFT boyutuna sahip olur ve bunun sonucu olarak ise daha fazla taşıyıcı kullanılarak daha yüksek verimli iletim sağlanabilir [13].

OFDM sisteminin belirleyici en önemli parametre ve özellikleri arasında; döngüsel önek (cyclic prefix), koruma aralığı (guard interval), taşıyıcıların dikgenliği ve bunların yanında

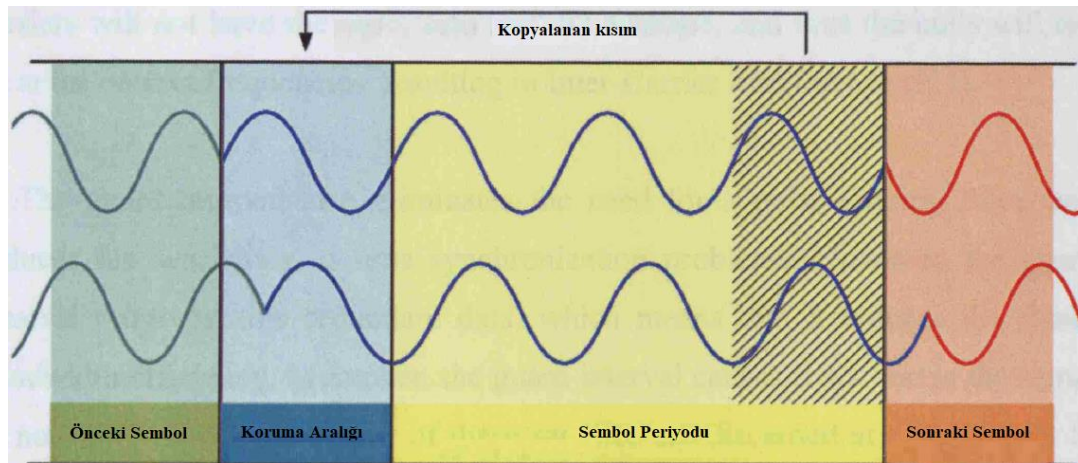
dezavantajları olan tepe-ortalama güç oranı değeri (PAPR), semboller arası girişim (ISI) ve taşıyıcılar arası girişim (ICI) gibi özellikler sayılabilir.

Döngüsel önek (Cyclic Prefix-CP) ve koruma aralığı (Guard Interval-GI)

Döngüsel önek (CP) eklenmesi OFDM sinyali oluşturulmasında önemli bir özelliktir. Bir döngüsel önek, bir önceki iletilmiş olan OFDM sembolüyle çakışmayı engellemek için gereklidir. CP uzunluğu çok taşıyıcılı transmisyonda önemli bir tasarım parametresidir. Bir taraftan CP uzunluğunun gecikme yayılımlarını engelleyecek kadar uzun olması gerekirken, diğer taraftan da bu uzunluğun veri iletim kapasitesini etkilememesi gereklidir. Çünkü CP olarak iletilen OFDM sinyali alıcı tarafında değerlendirilmez [37]. Genel olarak CP uzunluğu gecikme yayılımının dört katına kadar olmalıdır. SNR kaybının en az olması için sembol süresinin koruma aralığı zamanından çok daha uzun olması gerekir [5].

Koruma aralığı süresinde iletilen döngüsel önek (CP), çok yollu radyo sinyallerinin iletimi sırasında alıcı tarafta oluşabilecek problemlerin engellenmesi amacıyla eklenen ve sembolün son parçasını oluşturan bitlerin aynısı olan tekrar bitleridir [23].

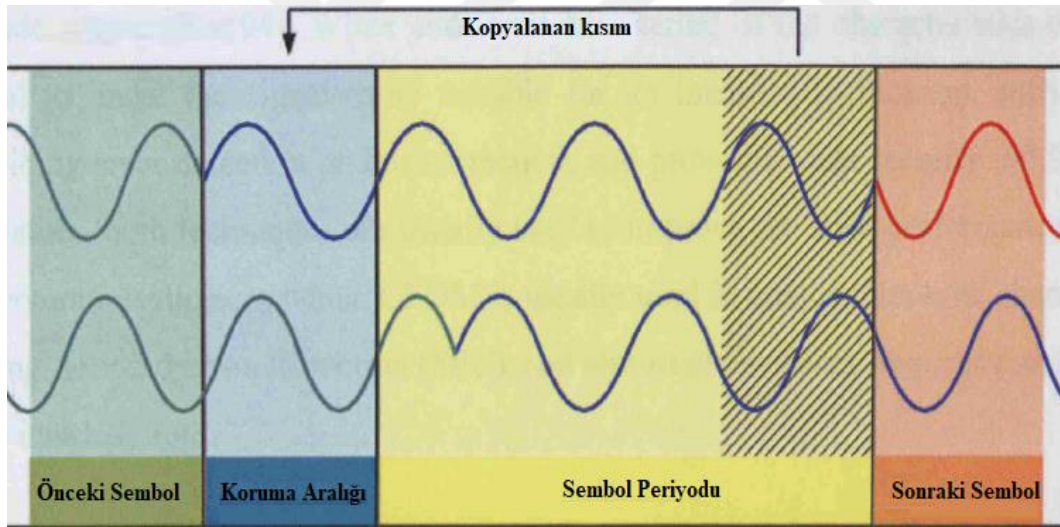
Koruma aralığı (GI) her bir OFDM sembolünden önce eklenmektedir. GI, OFDM sembolünün son kısmının kopyalanması ve başlangıç kısmına eklenmesi ile elde edilmektedir. GI, çok yollu gecikmelerden kaynaklanan ISI ve ICI problemlerinin engellenebilmesi amacıyla kullanılmaktadır [5].



Şekil 3.25. Koruma aralığı ve periyot içerisinde uzatılmış kopyası [23]

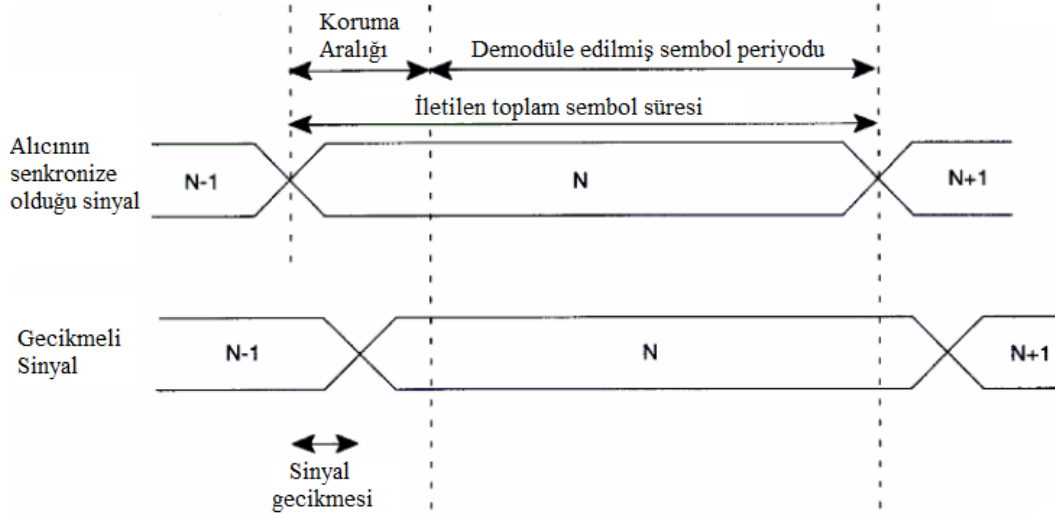
CP oluşturulması Şekil 3.25’de görüldüğü gibi bir OFDM sembolünün son kısmından bir bölüm örneklemin kopyalanması ve koruma bandı (GI) süresi boyunca OFDM sembolünün baş kısmına eklenmesi işlemidir. Bu şekilde, iletilen sinyal periyodik bir yapıya kavuşur ve çok yollu kanalın zamana bağlı bozulma etkisi dögüsel konvolüsyona eşit olur. Bundan dolayı GI’nın etkili olması için çok yollu kanal gecikme zamanından daha uzun olması gereklidir. GI, kullanışlı bir veri içermediğinden dolayı alıcı tarafta silinebilir [34].

Eğer koruma aralığı aşılsa (Şekil 3.26) gecikmeye maruz kalan çok yollu tekrar kısmı, alt taşıyıcıların dikgenlik özelliğinin frekans bölgesinde bozulmasına neden olur ve sonuçta elde edilen sinyaller tam olarak sinüs şeklini sağlayamaz. Dolayısıyla, diğer alt taşıyıcı sinyallerin frekanslarında özel sıfır bölgeleri oluşmaz ve sinyallerin toplamı da bir sinüs şekli oluşturamaz. Bu durum alt taşıyıcıların dikgenliğini değiştirir ve taşıyıcılar arası girişim (Inter Carrier Interference – ICI) oluşmasına neden olur.



Şekil 3.26. Koruma aralığı ve periyodu aşan uzatılmış kopyası ile uzatılmış olan OFDM sembolü [23]

Koruma aralığının OFDM sembolünün son kısmının tekrarını içermesinin nedeni, alıcı tarafta FFT ile OFDM demodülasyonu gerçekleştirirken sinüzoidal dögülerin tam sayı katının entegre edilmesi ve her bir çok yollu sinyal için düzgün ve sürekli bir sinyal oluşturmasıdır. Bunun yanında, alt taşıyıcılar arasındaki dikgenliğin sürekliliği amacıyla, her bir alt taşıyıcı için sembol periyodu süresince genlik ve faz sabit kalmaktadır. İlave olarak, koruma aralığı sayesinde darbe şeklini düzeltmek için kullanılan filtrelere de gerek kalmaz, hassasiyet ve zaman senkronizasyon problemlerini de yok eder (Şekil 3.27) [23].



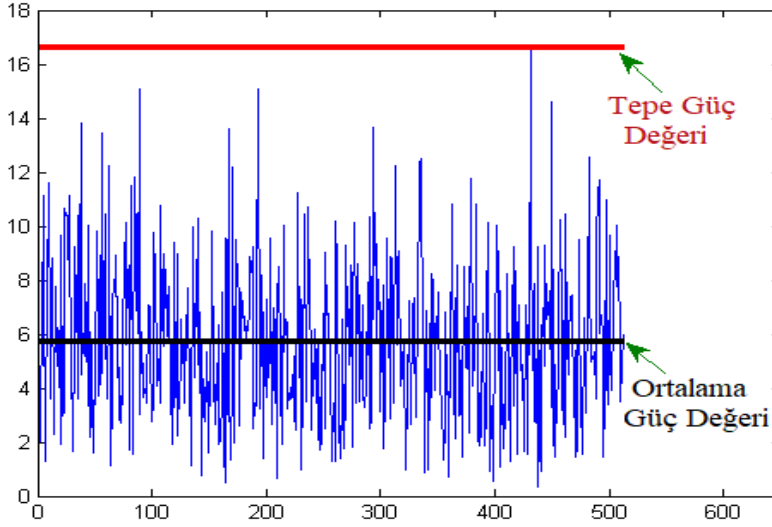
Şekil 3.27. Döngüsel önek uygulamasının etkisi [26]

Toplam OFDM sembol süresi $T_{\text{toplam}} = T_g + T$ olarak hesaplanır. T_g koruma aralığı ve T ise kullanılabilir sembol süresidir. Koruma aralığı (GI) kanalın dürtü tepkisinden veya çok yollu gecikmeden daha uzun olduğu sürece ISI engellenebilir. Bununla birlikte, ICI etkisi veya bant içi sönümlenme etkisi hala devam edecektir. Koruma aralığının kullanılabilir sembol süresine oranı uygulamaya bağlı olarak değişebilir. Koruma aralığının kullanılması veri akışını yavaşlattığından dolayı T_g genellikle $T/4$ oranından daha düşüktür [28].

Bu çözümle oluşan dezavantaj, GI iletimi nedeniyle gönderilen etkin gücün az da olsa azalması ve bant genişliği kullanımının artışı şeklinde ortaya çıkar. Genellikle GI uzunluğu OFDM sembolünün dörtte biri oranındadır; bu da 0,5 dB ile 1 dB arasında bir Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) kaybına neden olur [34].

PAPR, ISI ve ICI

Bir OFDM sinyalinin eş-fazlı (In-phase – I) ve dörtlük (Quadrature – Q) bileşenleri rasgele fazlara sahip birçok sinüzoidin üst üste gelmiş (süperpozisyon) halidir. Bu nedenle yüksek oranlı bir tepe-ortalama güç oranı değeri (Peak to Average Power Ratio – PAPR) oluşabilir (Şekil 3.28). Bu durum özellikle OFDM-RoF sistemleri için önemli bir konudur [32].



Şekil 3.28. OFDM sinyalinde PAPR oluşumu [44]

PAPR alt taşıyıcı sayısı ile orantılı olarak artmaktadır. Bu da, OFDM sinyalinin dikgen frekanslara sahip alt taşıyıcıların toplamından oluştuğu göz önüne alınırsa önemli bir durumdur. Toplanan birçok alt taşıyıcı yüksek genliğe sahipse PAPR artmaktadır. Bu da alt taşıyıcıların yapısal süperpozisyonu yapılırsa ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı, daha az sayıda alt taşıyıcı olması durumunda, oluşturulacak OFDM sinyalinde yüksek tepe noktalarının oluşması olasılığı da azalmaktadır.

PAPR etkisini azaltmak için en basit yöntem sinyalin kırılması işlemidir. Kırma işlemi zaman alanındaki genlik değerleri için bir eşik belirlenmesi ve eşik değerinden daha büyük olan genliklerin sınır değerine eşit olarak ayarlanması yoluyla OFDM sembolleri üzerinde uygulanır. Bununla birlikte, bu çözüm bazı sakıncalar da oluşturabilmektedir. İlk olarak, genlikteki tepe noktaların doğrudan kırılması ile OFDM sinyalinde, Bit-hata oranını (BER) arttıran bir bozulma meydana gelmektedir. İkinci olarak ise, kırmadan kaynaklı olarak artan bant dışı yayılım nedeniyle doğrusal olmayan bozulma oluşmaktadır [34].

Mobil bir radyo hattının alıcı tarafındaki sinyal sadece açık bir görüş hattı radyo dalgasına sahip değildir ve alıcı tarafına birden fazla yoldan, yansıtılmış şekilde ve farklı zamanlarda gelen çok sayıda radyo dalgası bulunur. Yansımalarından dolayı gecikmeli olarak gelen bu sinyaller ağaç, tepe, dağ, araçlar veya binalardan kaynaklanmaktadır. Yansıyan bu gecikmeli dalgalar doğrudan gelen sinyal ile girişim yaparak şebeke performansında önemli azalmaya neden olan sinyaller arası girişim (ISI) etkisi oluşmasına neden olmaktadır.

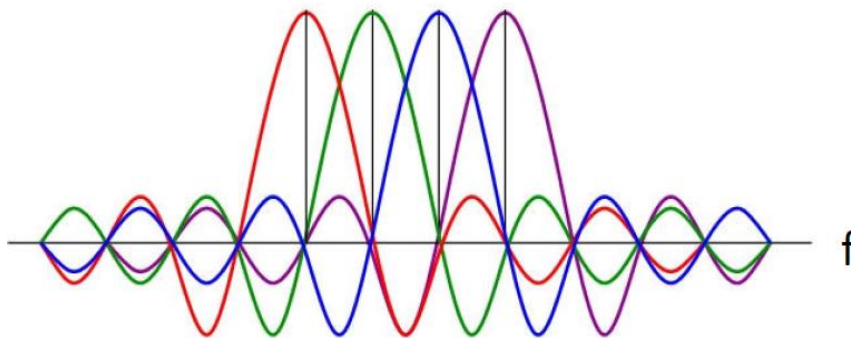
Sinyaldeki ISI'yi yok etmek için çok çeşitli denkleştiriciler (equalizer) kullanılabilir. Denkleştirici ihtiyacı, kanalın iletilen sinyallerde girişime ve ISI'ya neden olan genlik ve faz bozulmasına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Denkleştiriciler, SNR'ın yüksek, BER'in ise düşük olmasını sağlayacak şekilde tasarlanır. Alıcı tarafındaki bir denkleştirici, beklenen kanal genliği ve gecikme özelliği oranı için kompanzasyon sağlamaktadır [33].

OFDM sinyalinin spektrumu kesin olarak bant sınırlamalı ($\text{sinc}(f)$ fonksiyonu) olmamasından dolayı, örneğin çok yollu bozulma gibi doğrusal bozulmalar her bir alt kanalın enerjisinin komşu kanalların enerjisine yayılmasına neden olur ve bundan kaynaklı olarak da ISI'ya neden olur. Ayrıca, demodülasyon süresince, iletilen OFDM sembol süresinin başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki senkronizasyon da çok önemlidir. Bu sağlanamazsa da ISI etkisi oluşacaktır. Ek olarak, alt taşıyıcılar arasındaki dikgenliğin kaybolması halinde ise ICI etkisi oluşacaktır.

Basit bir çözüm olarak sembol süresi uzatılabilir veya taşıyıcı sayısı artırılabilir, böylece bozulma etkisi önemsiz bir hale gelir. Bununla birlikte bu yöntem taşıyıcı kararlılığı, doppler kayması, FFT boyutu ve gecikme açısından uygulama olarak zor olmaktadır [28].

Dikgenlik

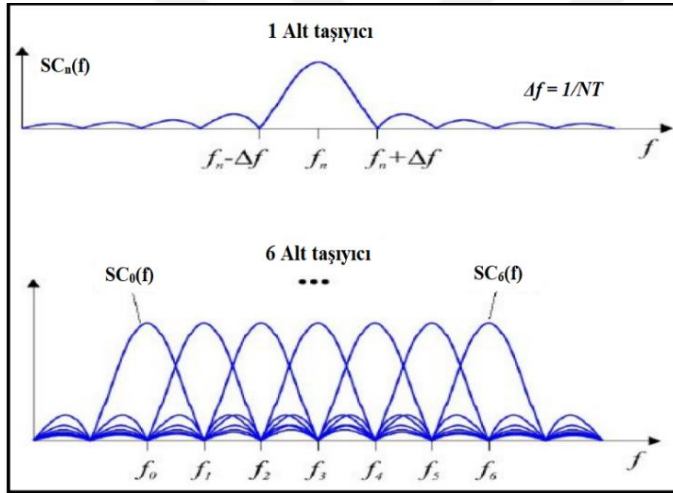
Tanım olarak, sinüs ve kosinüs sinyalleri birbirine dikgendir. Fourier teoremi tanımında periyodik bir sinyal, harmonik olarak bağlantılı sinüsoidlerin toplamına eşittir. Bu tanıma göre bir periyottaki harmonikler, tam sayı oranında döngüler içermektedir. Bundan dolayı, bütün harmonikler birbirine dikgen olacak şekildedir. Spektral analiz olarak bakılırsa, bu harmonikler üst üste gelse bile frekansları birbiriyle girişim yapmayacaktır (Şekil 3.29) [34].



Şekil 3.29. OFDM sistemindeki dikgen alt taşıyıcılar [17]

Tanımında da belirtildiği üzere OFDM düşük hızlı veri akışlarının paralel olarak iletimi için çok sayıda alt taşıyıcı kullanmaktadır. Alt taşıyıcı dikgenliği zaman ve frekans alanlarında olmak üzere iki yolla görülebilir. Zaman alanında (domeninde) her bir alt taşıyıcı her bir OFDM sembol aralığı süresince belirli bir tam sayıda döngüye sahip olmalıdır.

Bir OFDM sisteminde, alt taşıyıcı (SC) aralıklandırması Δf , $1/NT$ 'ye eşittir. Burada N alt taşıyıcı sayısı ve $1/T$ ise bütün sembolün hızıdır (Şekil 3.30). Taşıyıcı aralıklandırılması ile alt taşıyıcılar üst üste gelse bile dikgenlik devam ettirilebilmektedir. Dolayısıyla, ideal bir OFDM sisteminde alt taşıyıcılar arası girişim oluşmamaktadır. Alt taşıyıcı sayısı N , alt taşıyıcı bant genişliklerinin kanalın tutarlı bant genişliğinden daha az olacak şekilde seçilmektedir. Bu koşulda, her bir alt taşıyıcı önemli oranda ISI etkisi yaşamayacaktır.



Şekil 3.30. Frekans alanındaki OFDM alt taşıyıcıları [30]

OFDM'deki temel konu taşıyıcıların dikgenlik durumunun sürdürülmesidir. Eğer iki sinyalin belirli bir zaman periyodundaki çarpımının integrali sifıra eşitse, bu iki sinyalin birbirine dikgen olduğu söylenebilir. Ortak bir frekansın tamsayı katları olan frekanslara sahip iki sinüs sinyali bu koşulu sağlayabilir [13].

Aşağıdaki koşul sağlanırsa $\phi_i(t)$ ve $\phi_j(t)$ fonksiyonları T periyodu boyunca dikgendir:

$$\int_0^T \phi_i(t)\phi_j(t) dt = \begin{cases} k, & (i = j) \\ 0, & (i \neq j) \end{cases}, (k \neq 0) \quad (3.10)$$

OFDM sistemlerinde taşıyıcılar eş-fazlı (in phase) ve frekansları birbirinin katları olacak şekilde seçilir. Dolayısıyla, bu şekildeki iki taşıyıcının bir periyod boyunca integrali $T=1/f_0$ sifıra eşit olmaktadır.

$$\int_0^T \cos(2\pi n f_0 t) \cos(2\pi m f_0 t) dt = 0, \quad (n \neq m) \quad (3.11)$$

Eş. 3.11'de: n ve m eşit olmayan iki farklı tam sayı, f_0 temel frekans, T integralin hesaplandığı periyottur.

Genellikle, tam sayı frekansların katlarının her biri diğerine göre dikgendir ve harmonik olarak bilinirler. OFDM sistemlerinde, alt taşıyıcılar $1/T$ 'nin katları ile ayrılırlar. Böylece tam sayı oranlarında döngüler her bir periyotta alt taşıyıcıların ayrılmasını sağlamaktadırlar [34].

OFDM sisteminin avantajları

OFDM sisteminin mevcut ve gelecek nesil haberleşme alt yapısı için oldukça avantajlı bir çözüm olarak kullanım alanı bulmasının temelindeki sağladığı başlıca faydalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- OFDM kanallar arasındaki örtüşme kullanımı sayesinde spektrumun en verimli şekilde kullanılmasını sağlar. OFDM teknolojisinde, dikgen frekanslara sahip alt taşıyıcıların spektrumları bir diğerini etkilemeden üst üste gelebilmektedir. Çok sayıda alt taşıyıcı olduğunda frekans spektrumu dikdörtgen şekline dönüşmektedir, dolayısıyla da yüksek bir spektral verimlilik vardır.
- Kanalın dar bantlı düz sönümlenmeli alt kanallara bölünmesi ile OFDM, tek taşıyıcılı sistemlere göre frekans seçici sönümlenmeye karşı daha dirençli bir sistem olmaktadır. Alıcı tarafında, her bir alt taşıyıcının karşılaştığı kanal kazancı/fazına göre ağırlıklandırılması gereklidir. Bazı alt taşıyıcılar sönümlenmeden dolayı tamamen yok olsa bile, verici tarafındaki doğru kodlama ve aralıklandırma kullanıcı bilgilerini kurtarabilmektedir.

- OFDM, kablosuz kanallarda semboller arası girişime (ISI) neden olabilen çok yollu gecikme yayılmasına karşı yüksek oranda dirençli bir sistemdir. Sembol süresi daha uzun olduğundan (yüksek veri oranındaki bir sinyalin N tane düşük oranlı sinyale bölünmesi sayesinde) gecikme yayılımı etkisi aynı faktör oranında azaltılmış olur. Ayrıca, koruma bandı ve döngüsel uzantı kavramı da düşünüldüğünde ISI ve ICI tamamen ortadan kaldırılabilmektedir.

- Alt taşıyıcıların modülasyon ve demodülasyonu işlemsel olarak verimli olan, sırasıyla IFFT ve FFT yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır. Sayısal ortamda modülasyon ve demodülasyon işlemlerinin yapılmasıyla birlikte, yüksek frekanslı kararlı osilatör ihtiyacı da kalmamaktadır.

- OFDM, karmaşık zaman alanlı denkleştirme işlemlerine gerek olmaksızın zor kanal koşullarına adapte olabilmektedir. Ayrıca, yeterli düzeyde kanal kodlama ve aralıklandırma sayesinde kaybolan semboller yeniden elde edilebilmektedir [13, 15, 34].

OFDM sisteminin dezavantajları

PAPR (Tepe-ortalama güç oranı) Problemi: PAPR veya tepe faktörü, bir dalga şeklinin tepe noktası genliğinin bu dalganın etkin (RMS) değerine bölümü ile hesaplanan bir ölçümdür. N tane sinyal aynı fazda olmak üzere uyumlu bir şekilde toplandığında, tepe güç değeri ortalama değer N katı kadar olacak şekilde oluşur. OFDM teknolojisi kullanan çok taşıyıcılı modülasyon sistemleri Yüksek Güç Yükseltecinin (HPA) doğrusal olmayan etkilerine karşı tek taşıyıcılı sistemlere göre daha hassastır. Özellikle OFDM sistemleri yüksek PAPR değeri üretmeye daha eğilimlidir, bu da ADC (Analog-Sayısal Dönüştürücü) ve DAC (Sayısal-Analog Dönüştürücü)'nin karmaşıklığının artmasına ve RF güç yükseltecinin güç verimliliğinin önemli oranda düşmesine neden olmak gibi dezavantajları içermektedir.

Zaman ve frekans senkronizasyonlarına karşı hassaslık ve geniş dinamik sinyal oranı: Gönderici ve alıcı tarafındaki genellikle eşit olmayan lokal osilatör frekansından kaynaklanan frekans kaymaları, alt taşıyıcılar arasındaki dikgenliğin bozulmasına ve dolayısıyla da ICI oluşmasına neden olmaktadır. Örneğin gecikme genişlemelerinden kaynaklanan zaman değişimleri ise komşu veri sembollerinin birbiriyle üst üste gelerek

girişim yapmasına ve dolayısıyla da ISI oluşmasına neden olur. Yüksek tepe noktaları da güç yükselteçlerinde satürasyona ve bunun sonucu olarak ise Modülasyonlar arası Bozulmaya (Intermodulation Distortion (IMD)) ve bant dışı yayılmaya neden olmaktadır. Bu problemler de ICI'ya neden olmaktadır.

GI (Koruma aralığı) 'dan kaynaklı Spektral verimlilik kaybı: GI periyodikliğin devamlılığını sağlamak amacıyla, OFDM sembolünün son kısmından kopyalanmış olan yedeklenmiş örneklerin sembolün baş kısmına iletimini içermektedir. Bu yöntem çok yollu sönümlemeli ortamlarda direnç sağlamakla birlikte, yedeklenmiş verilerin de iletim süresince bant genişliğini ve gücü kullanması nedeniyle spektral verimlilik kaybına da neden olmaktadır. Dolayısıyla, OFDM modelleme parametreleri belirlenirken doppler ve faz gürültüsü etkileri ve GI'dan kaynaklı kayıpların arasında bir denge göz önüne alınması gereklidir.

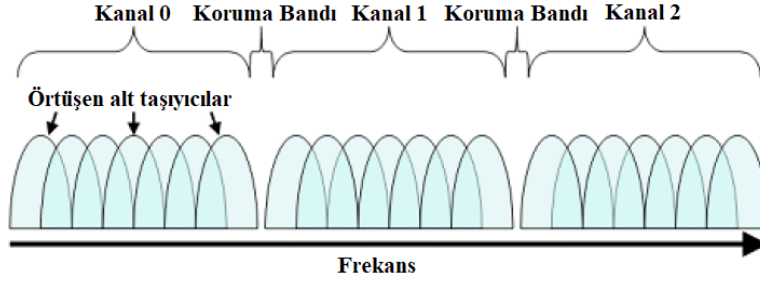
Doppler yayılımlarına karşı hassaslık: Doppler yayılımları çok hızlı kanal değişimlerinde ortaya çıkarak alınan dalgaların fazlarında değişimlere ve bunun sonucunda da zamanla değişen çok yollu yayılmaya neden olur. Bundan dolayı, doppler yayılımları alt taşıyıcılar arasındaki dikgenliğin yok olmasına ve dolayısıyla da ICI'ya neden olmaktadır [34].

3.3.2. OFDM çeşitleri ve uygulama alanları

Geçen yıllar boyunca OFDM, Avrupa sayısal ses yayını, karasal sayısal video yayını ve uydu-karasal etkileşimli çoklu servis altyapısı (Çin'deki) da dâhil olmak üzere birçok kablosuz standarda adapte olmuştur. OFDM'in, temel OFDM formatına uymakla birlikte ilave özellikler ve farklılıklar içeren farklı çeşitleri bulunmaktadır [14].

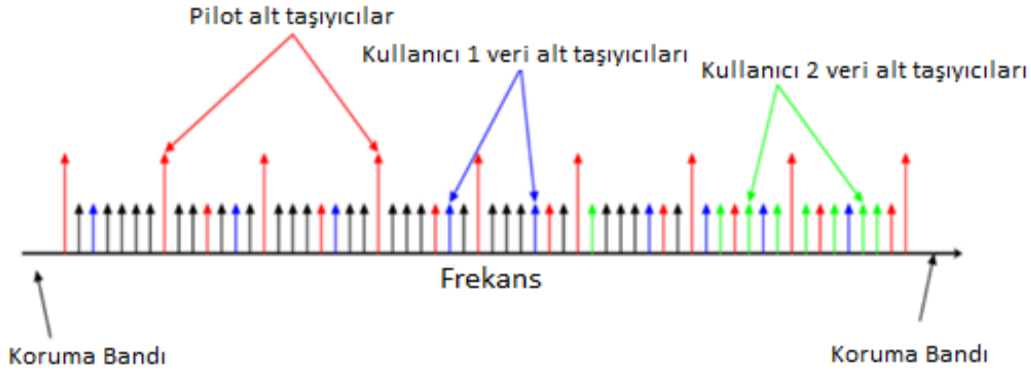
OFDM erişimi (OFDMA-OFDM Access)

OFDMA teknolojisi OFDM'in bir sonraki adımı olarak geliştirilmiştir. OFDM frekans alanı yayılmasından kaynaklı kanal bozulmalarına karşı tasarlanmış bir sistemdir. OFDMA ise bir sonraki adım olarak çok kullanıcılı erişimi de sağlamaktadır. Temel alınan teknoloji aynıdır fakat OFDMA daha fazla işlevsellik sağlanmaktadır. OFDMA'da alt taşıyıcılar daha büyük birimler halinde gruplanarak alt kanallar oluşturulur ve bu alt kanallar daha sonra her biri farklı kablosuz kullanıcılara ait olmak üzere kanal blokları halinde tekrar gruplanırlar (Şekil 3.31) [32].



Şekil 3.31. Alt taşıyıcıların kanallara gruplanması [45]

Her bir blok paylaşırması çerçeveler arasında ve aynı zamanda modülasyon derecesi içerisinde de değiştirilebilir. Bu da BS'nin bant genişliği kullanımını mevcut sistem gereksinimlerine göre dinamik olarak ayarlayabilmesini sağlar. Buna ek olarak, her bir kullanıcı toplam bant genişliğinin sadece bir kısmını kullandığından dolayı, her bir kullanıcının gücü de mevcut duruma göre modüle edilebilir (Şekil 3.32). OFDMA sistemlerinde, QoS (Servis Kalitesi Düzeyi) kullanıcıların örneğin ses, video akışı veya internet erişimi gibi özel kullanım ihtiyaçlarına göre ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.32. Her kullanıcıya ait veri alt taşıyıcıları [14]

OFDMA, örneğin Çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO-Multiple Input Multiple Output) ve akıllı antenler gibi diğer teknolojilerle de uyumludur.

Kodlanmış OFDM (COFDM-Coded OFDM)

OFDM zaman ve frekans farklılığı kullanılarak, frekans seçici bir kanal içerisinde veri aktarımı sağlar. Bununla birlikte sönümlemeyi, kendi kendine engelleyemez. Frekans alanındaki konumlarına bağlı olarak, tekil alt kanallar sönümlemeden etkilenebilmektedir.

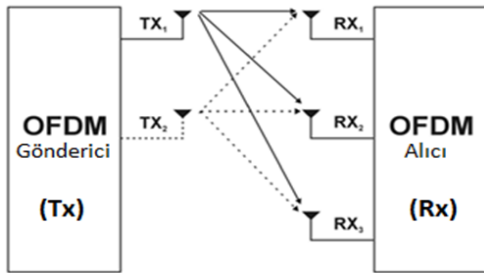
Bu durum iletilen verinin korunabilmesi için kanal kodlaması yapılmasını gerektirmektedir. Kodlanmış OFDM veya COFDM, hata kontrol kodlaması ve OFDM modülasyon işlemlerinin oldukça yakın şekilde beraber çalışmalarını sağlayan bir sistem olarak tanımlanır. Hata düzeltme kodlamasının sinyal içerisinde yapıldığı bir OFDM çeşididir. COFDM sistemleri frekans seçici kanallarda, çoklu taşıyıcı modülasyonu ve kodlamasının faydaları nedeniyle mükemmel bir performans yakalayabilir [14].

Genişbant OFDM (WOFDM- Wideband OFDM)

WOFDM’de kanallar arası aralıklandırma yeterince geniş olduğundan, alıcı ve verici arasındaki frekans hatalarının sistem performansı üzerinde bir etkisi yoktur. Özellikle Wi-Fi sistemleri için uygulanır. WOFDM aynı bant içerisinde çalışmak için birçok bağımsız kanal içerir. Bu durum, çok noktalı radyo şebekeleri ve noktadan noktaya omurga sistemleri için düşük güç çakışması oluşturur [14].

Vektör OFDM (VOFDM-Vector OFDM)

VOFDM, MIMO teknolojisi mantığını kullanır. Uzaysal (konumsal) çeşitlendirme kullanılarak, kablosuz bir sistemin gürültüye, girişime ve çoklu yola karşı toleransı artırılabilir. Vektör OFDM tekli bir anten üzerinden birçok sinyal iletimi veya bu sinyallerin birçok anten üzerinden alınabilmesini sağlar. Bu sayede iyi kalitede bir sinyal alınması olasılığı artırılmış olur. Kablosuz bir sistemde, her biri farklı çok yönlü sinyal setine sahip iki veya daha fazla anten yerleştirilmesi ile her bir kanalın etkisi bir antenden diğerine değişecektir. Bundan dolayı, bir anten üzerinde kullanılamaz durumda olan kanallar bir diğer anten üzerinde kabul edilir olabilir. Şekil 3.33’te VOFDM ve MIMO mantığı görülmektedir [14].

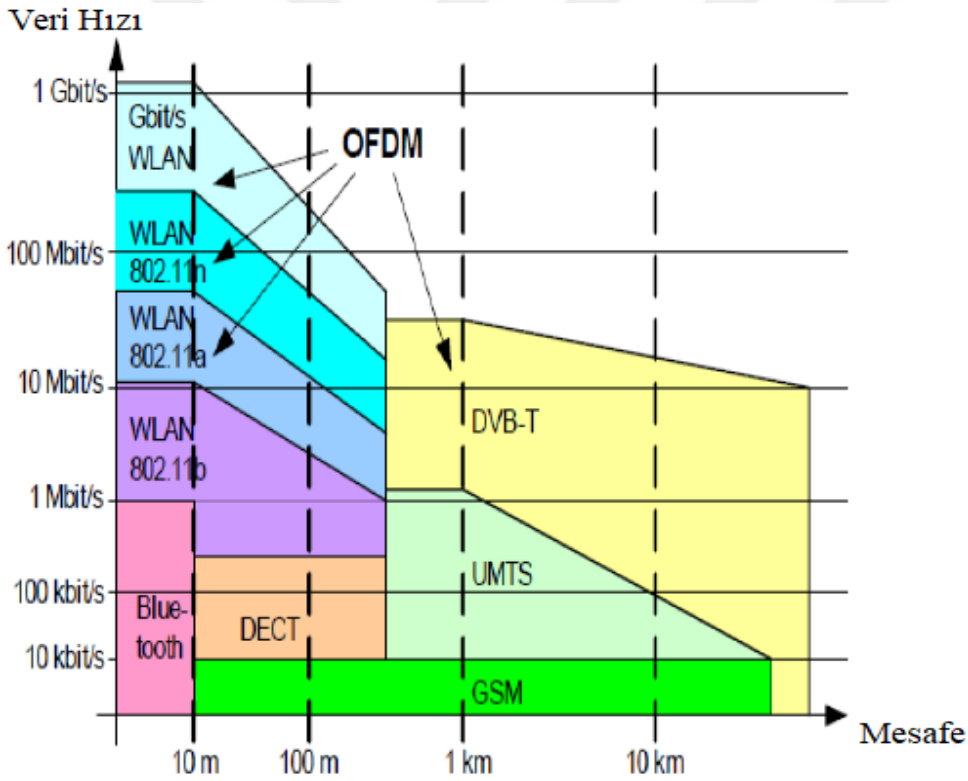


Şekil 3.33. VOFDM ile kullanılan MIMO

FLASH OFDM (F-OFDM)

Hızlı düşük gecikmeli ve hatasız aktarımlı erişim OFDM (Fast low-latency access with seamless handoff OFDM), OFDM temellidir ve daha yüksek protokol seviyelerinde de kullanılır. Flarion tarafından geliştirilmiştir ve OFDM'in hızlandırılmış atlamalı bir şeklidir. Çoklu ton ve hızlı atlama kullanarak belirli bir spektrum üzerinde sinyallerin yayılmasını sağlar. Tekli bir baz istasyonu ile daha geniş kapsama alanı sağlayan düşük frekans bantlarında (450 MHz, 700 MHz, 800 MHz) çalışır. F-OFDM düşük frekanslarda çalıştığı için yoğun nüfuslu şehir içi alanlardaki uygulamalarda uygun değildir [14].

OFDM uygulama alanları



Şekil 3.34. OFDM ve kablosuz haberleşme standartları [14]

OFDM'in birlikte kullanıldığı kablosuz haberleşme standartları Şekil 3.34'te görülmektedir. Bunun yanında OFDM, Avrupa'da Sayısal Ses Yayını (DAB) standardı için temel oluşturmaktadır. OFDM modülasyonu çok sayıda ticari kablolu ve kablosuz uygulamalarda kullanılmaktadır. Kablolu ortamlarda sayısal abone hattı (DSL) çeşitlerinde kullanılırken, kablosuz ortamda ise OFDM birçok televizyon ve radyo yayın uygulamalarında

kullanılmaktadır. Bunlar arasında Avrupa sayısal yayın TV standardı ve aynı zamanda Kuzey Amerika sayısal radyo yayını bulunmaktadır [14].

Bunlara ek olarak, Akıllı Ulaşım Sistemleri (ITS) kullanım alanlarının yaygınlaşmasıyla birlikte araçlar çevresinde tehlike oluşturabilecek nesnelerin varlığını fark edebilecek şekilde sistemlerle donatılmaktadır. V2X (Araç-Yol, Araç-Araç...) bilgi paylaşımı ve haberleşme sistemi de Akıllı ulaşım sistemlerinin önemli bir bileşeni olmaktadır. OFDM sistemi bu sistemlerde de önemli oranda kullanım alanı bulmaktadır.

3.3.3. OFDM sisteminde kullanılan modülasyon teknikleri

Herhangi bir verinin fiber optik haberleşme sistemi üzerinden iletilebilmesi için verinin öncelikle ışığın özelliklerinin veri sinyali ile modüle edilebilmesi amacıyla kodlanması gerekmektedir. Modüle edilmiş ışık özellikleri örneğin; şiddet, frekans, faz veya sayısal/analog sinyaller ile kutuplanması olabilmektedir. Analog teknikler Genlik Modülasyonu (AM), Frekans Modülasyonu (FM) ve Faz Modülasyonu (PM); sayısal teknikler ise, Genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK), Frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK) ve Faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) olabilmektedir. Seçenekler optik fiberin, mevcut optik kaynak dedektörlerinin özelliklerine göre ve tüm sistemle birlikte değerlendirilmesi sonucunda belirlenmektedir.

Mevcut durumda kullanılan birçok kablosuz iletim sınırlı miktarda spektrum ile çalışan sayısal iletim sistemleridir. Bundan dolayı da kullanılacak olan modülasyon tekniği kritik bir durumdur. Sayısal modülasyon teknikleri, yüksek miktarda veri iletimi kapasitesi ve yüksek gürültü bağırsıklığı gibi birçok fayda sağlamaktadır. Diğer bir önemli avantajı ise ayrıık iletimin alıcı tarafındaki gürültülü bir ortamda kolay algılanmasıdır [22].

Her bir sembol içerisinde çok sayıda bit iletibilmenin en basit yolu yüksek seviyeli genlik modülasyon formatı kullanmaktır ve bu format Genlik Kaydırma Anahtarlama (ASK) olarak bilinir. Daha ileri düzey modülasyon formatları optik sinyalin sadece genliğini değil aynı zamanda fazını da modüle etmektedir. Bitlerin özel bir dizilimi ile çok sayıda faz kayması veri sembollerini temsil etmesi amacıyla kullanılabilir. Sadece fazın modülasyonu Faz Kaydırmalı Anahtarlama (PSK) olarak bilinmektedir. Genlik ve faz modülasyonunun birlikte kullanılması sembol modülasyon alanını ve dolayısıyla da iletimi yapılabilecek bit

sayısını arttırmaktadır. Genlik ve fazın birlikte modüle edilmesi tekniği ise Dörtlü Genlik Modülasyon (QAM) olarak bilinir.

Herhangi bir modülasyon formatı için sembol sayısı (M) ile her bir sembol başına iletilen bit sayısı (m) arasında aşağıdaki bağlantı vardır [17]:

$$m = \log_2(M) \quad (3.12)$$

Her bir kodlama tekniği farklı genlik ve sembol başına farklı sayıda bit oranına ve aynı zamanda farklı faz hareketine sahiptir. Dolayısıyla, yüksek seviyeli modülasyon teknikleri sembol başına daha fazla bit iletmeye olanağı sunar ve daha hızlı çıktılar veya verimli spektrum elde edilebilir.

Faz kaydırmalı anahtarlama (PSK – Phase shift keying)

PSK, sinyalin fazını modüle ederek veri iletimi sağlayan bir sayısal modülasyon şeklidir. M-PSK çok seviyeli bir modülasyon tekniğidir. Burada belirtilen M belirli bir sayıdaki biti kodlamak amacıyla kullanılan faz sayısıdır. BPSK (Binary Phase Shift Keying – İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama) 2-PSK anlamındadır ve burada belirtilen 2 sayısı, 180 derece (π) farkla ayrılmış olan 2 fazı ifade eder ve her sembol için 1 biti destekler. QPSK (Dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama) de 4-PSK anlamındadır ve 90 derece ($\pi/2$) faz kaydırmasını ifade eder. Bu da her sembol için 2 bit demektir [2]. Bu teknikler kullanılarak veri iletimi taşıyıcı dalganın fazının değiştirilmesi ile sağlanmaktadır. BPSK sayısal modülasyon tekniği, faz kaydırmalı anahtarlama modülasyonunun en basit biçimidir.

BPSK modülasyonun matematiksel gösterimi aşağıdaki eşitlikteki gibidir [22]:

$$S_c(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) + \pi(1 - n) \dots \dots n = 0,1 \quad (3.13)$$

Sabit bit enerjisi, gürültü seviyesi ve diğer bozulmalara sahip BPSK sistemi en düşük bit hata oranını sağlamaktadır. Çünkü BPSK sistemi iki sinyal noktası arasında en fazla uzaklığa sahiptir.

BPSK, uygulama kolaylığı ve kararlı yapıda olması nedeniyle çoğunlukla uydu haberleşmesinde kullanılmaktadır. BPSK'nin diğer avantajları 3 dB güç kazancı ve BASK (İkili Genlik Kaydırmalı Anahtarlama) ile karşılaştırıldığında iki kat fazla bilgi taşıyabilme kapasitesi olmasıdır. Bununla birlikte bu modülasyon tekniği 1 bit/sembol oranı ile iletim sağladığından bant genişliği açısından verimsiz bir tekniktir ve yüksek hızlı veri iletimi uygulamaları için uygun bir teknik olmamaktadır.

PSK'nin diğer bir çeşidi ise daha yüksek seviyeli sayısal modülasyon tekniği kullanan QPSK'dir. 2 bit/sembol oranında iletim yapan dört seviyeli faz kullanılmaktadır. Dört eşit aralıklı taşıyıcı faz kaydırması olarak $0, \pi/2, \pi$ ve $3\pi/2$ kullanır ve bu fazların her birisi ayrı mesaj bit çiftleri olarak 00, 01, 10 ve 11 değerlerine karşılık gelir. Bu şekilde aynı bant genişliği kullanılarak iki kat daha fazla veri iletimi sağlanabilmektedir. Dolayısıyla da QPSK, BPSK'ye göre bant genişliği açısından daha verimli bir tekniktir.

QPSK, örneğin video konferans, hücresel telefon sistemleri ve diğer RF taşıyıcısı üzerinden sayısal haberleşme sistemleri gibi uydu transmisyonu uygulamalarında kullanılmaktadır.

QPSK sinyali matematiksel olarak aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilebilir [22]:

$$S_{qpsk}(t) = \left\{ \sqrt{E_s} \cos \left[(i-1) \frac{\pi}{2} \right] \phi_1(t) - \sqrt{E_s} \sin \left[(i-1) \frac{\pi}{2} \right] \phi_2(t) \right\} \quad i = 1,2,3,4 \quad (3.14)$$

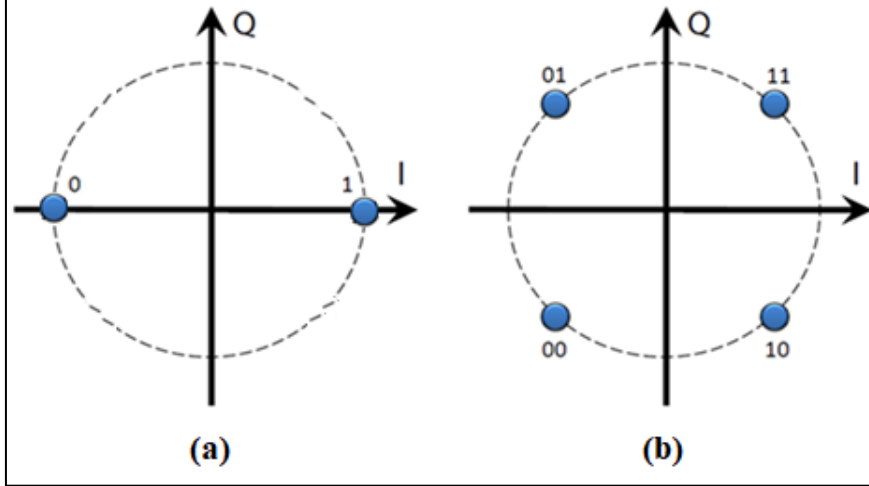
Eşitlikte yer alan ;

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) , \quad \phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_c t) \quad 0 \leq t \leq T_s$$

T_s sembol periyodu, E_s ise sembol başına enerji miktarıdır.

QPSK dörtlü modülasyon tekniği olarak görülse de, bağımsız olarak modüle edilen iki dörtlü taşıyıcıya sahip olduğu anlaşılabilir. Bu açıklamadan yola çıkarak; çift (veya tek) bitler taşıyıcının eş-fazlı (in-phase (I)) bileşeninin modüle edilmesinde, tek (veya çift) bitler ise taşıyıcının dörtlü-faz (quadrature-phase (Q)) bileşenlerinin modüle edilmesinde kullanılmaktadır [29].

BPSK ve QPSK konstelasyon (kümelenme) diyagramları Şekil 3.35(a) ve (b)'de görülmektedir. Diyagramda da görüldüğü üzere QPSK için iki bitin dört farklı kombinasyonu mümkündür: 00, 01, 10 ve 11. Bu kombinasyonların her biri taşıyıcı fazının dört farklı değerine karşılık gelmektedir [17].



Şekil 3.35. (a) BPSK ve (b) QPSK Konstelasyon (kümelenme) diyagramları

Sonuç olarak, PSK seviyesinin artması, sembol boyutunu da artırarak daha az sayıda sembol iletilmesini ve yüksek veri hızı elde edilmesini sağlamaktadır. Fakat bu durum BER'i artırmaktadır; çünkü fazın 0-360 derece aralığı daha fazla alt bölgeye ayrılmakta ve bundan dolayı da alıcı tarafında fazların tam olarak elde edilememesi riski de artmaktadır [26].

Dörtlü genlik modülasyonu (QAM – Quadrature amplitude modulation)

QAM, her bir sembol için bit sayısını artırmak amacıyla bir sinyalin hem genlik hem de fazını modüle ederek veri aktarımını sağlayan bir modülasyon formatıdır. M-QAM (Çok düzeyli Dörtlü Genlik Modülasyonu) sinyali, aynı frekansa ait iki taşıyıcı içerisinde $\pi/2$ oranında bir faz kayması ile modüle edilmektedir. 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM ve 256-QAM sırasıyla 2, 3, 4, 6 ve 8 bit/sembol olarak tanımlanmaktadır [2].

QAM, temel olarak sayısal haberleşme sistemlerinde ve örneğin kablolu modem sistemleri gibi yüksek veri iletimi uygulamalarında kullanılmaktadır. İhtiyaç duyulan veri hızı 8-PSK'nin üzerinde ise QAM tekniğine geçilmesi tavsiye edilmektedir. Çünkü QAM tekniğinde I (In-Phase) (gerçek kısım) ve Q (Quadrature) (sanal kısım) düzlemlerindeki

komşu kümelenme noktaları arasında, noktaların çiftli dağıtımı sayesinde daha fazla mesafe elde edilebilmektedir [22].

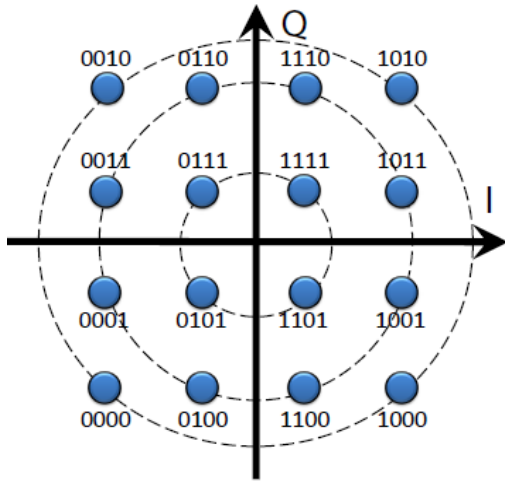
Bir M-ary sinyalleşmesinde sembol oluşturmak için iki veya daha fazla bit birlikte gruplanarak, her bir sembol periyodu süresinde M tane sinyalden birisi iletilmektedir. Genellikle, olası sinyal sayısı $M=2^n$ tanedir ($n = \text{tam sayı}$). Genlik, faz veya frekansın değişime uğramasına bağlı olarak modülasyon tekniği M-ary ASK, M-ary PSK veya M-ary FSK olarak adlandırılır. Genlik ve fazın her ikisinin de modüle edildiği teknik ise M-ary QAM olmaktadır.

QAM modülasyonun matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir [25]:

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} a_i \cos(2\pi f_0 t) + \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}} b_i \sin(2\pi f_0 t) \quad 0 \leq t \leq T_s \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3.15)$$

E_{min} en düşük genliğe sahip sinyalin enerjisi, a_i ve b_i belirli bir sinyal noktasının yerine göre seçilen bağımsız tam sayı çifti, f_0 taşıyıcı frekansı ve T_s sembol periyodudur.

QAM, sembol modülasyonu için çoklu genlik seviyelerini kullanarak kümelenme noktaları arasındaki mesafeyi artırmaktadır. Örneğin; Şekil 3.36'daki 16-QAM kümelenme diyagramında sembol sayısını 16'ya yükselterek ($M=16$) belirli bir hızdaki sembol hızını QPSK'den bile daha fazla azaltmaktadır. Bu durumda ayrıca, bit hızını da QPSK'ye göre iki katına çıkartarak spektral verimi de artırmaktadır. Spektral verimlilik artmasına rağmen, QAM kümelenme boyutundaki büyümenin, alıcı tarafında sembollerin tam olarak elde edilmesinin sağlanması amacıyla SNR'da ne kadar bir artış gerektireceğinin ele alınması da önemlidir. Ayrıca, kümelenme boyutunun 32-QAM, 64-QAM ve daha fazla artırılması da mümkün olmakla birlikte, bu boyut ve SNR arasındaki dengenin de göz önüne alınması önemli bir konudur [17].



Şekil 3.36. 16-QAM Konstelasyon (kümelenme) diyagramı

Radyo hattı temiz durumda olduğunda, yani SNR değeri nispeten yüksek ise, örneğin 64-QAM gibi daha yoğun kümelenmeye sahip modülasyon formatları kullanılabilir. Bu durumda tek bir sembolün iletimi için 6 bitlik bir iletim yapılması gerekir ve dolayısıyla veri hacmi de artmış olur. Bunun yanında kanal daha gürültülü bir hale geldiğinde de örneğin QPSK kullanarak semboller arasındaki boşluğun da artırılması gerekir. Bu ise sembol başına bit sayısını azaltır ve veri hacminde düşüşe neden olur [37].

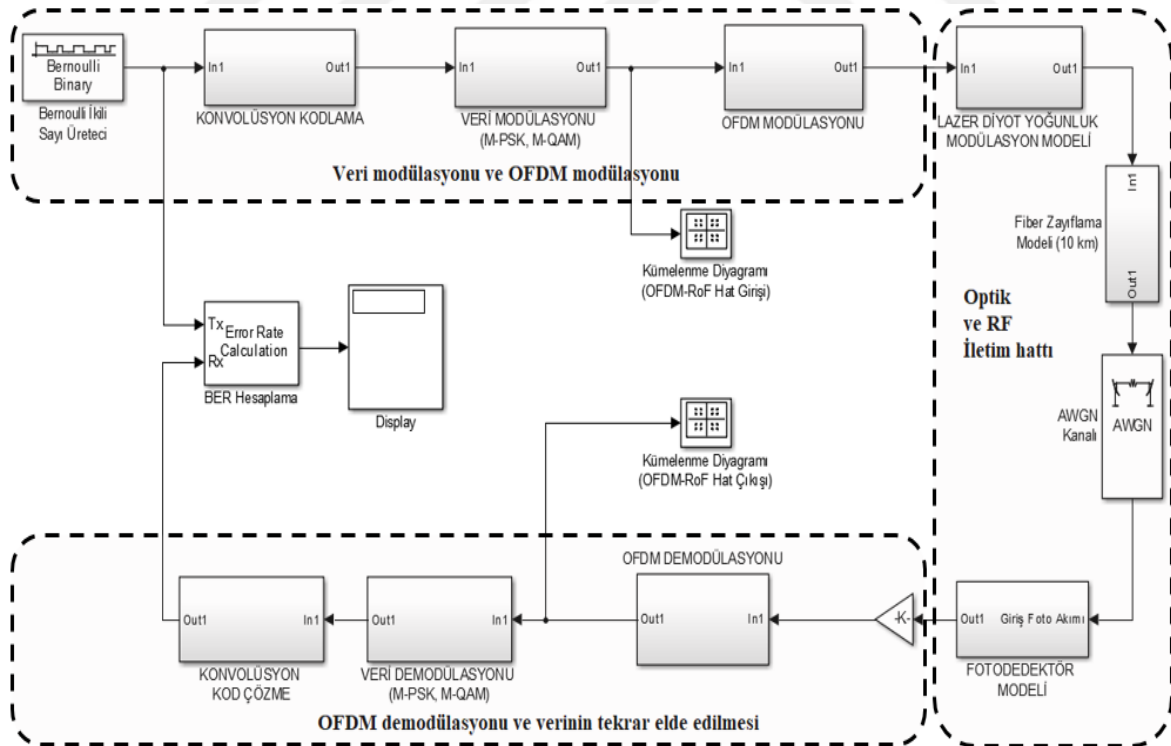
Her bir sembol veya kümelenme noktası, genlik ve fazın tek bir birleşimine sahip olmaktadır. Her bir sembole verilen bitler komşu sembollere verilen bit kodlarından sadece tek bit farkıyla ayrılmaktadır. Bu şekilde yapılan kodlama tekniği Gray Kodlama (Gray coding) olarak bilinmektedir. Gray Kodlama kullanılmaması durumunda, kodu tam ve eksiksiz olarak çözülmeyen bir sembol çok sayıda farklı bitlerde de hata oluşturabilir. Bunun sonucunda da sistemim BER değeri artmış olur [17].

4. bölümde Şekil 3.1’de genel blok şeması verilen OFDM-RoF devresinin Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak yapılan benzetim modellemesi ve benzetim sonuçlarında elde edilen veriler yer almaktadır.

4. OFDM-ROF İLETİM SİSTEMİ BENZETİM ÇALIŞMASI

Bu tez çalışmasında, OFDM-RoF iletim sistemi performansının test edilmesi amacıyla yapılan benzetim çalışmasının ilk kısmında, OFDM sistemi ile kullanılan farklı veri modülasyon tekniklerinin (BPSK, QPSK, 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM) performansının incelenmesi, ikinci kısımda 4-QAM veri modülasyonu kullanılarak hızlı hareketli kullanıcılar için farklı hızlar ve farklı taşıyıcı frekanslar için performans analizi ve üçüncü kısımda ise 4-QAM ve BPSK veri modülasyonları kullanılarak hızlı hareketli kullanıcılar için farklı hızlar ve fiber mesafeleri için veri iletimi performanslarının karşılaştırılması için benzetim modelleri oluşturulmuş ve BER, SNR, kümelenme diyagramı ve iletilen veri oranı gibi farklı kriterlere göre değerlendirmeler yapılmıştır.

İlk kısımdaki farklı modülasyon teknikleri için benzetimi yapılan Matlab/Simulink devre modeli Şekil 4.1’de ve diğer kısımlardaki benzetimler de dâhil tüm modellere ait ortak parametreler ise Çizelge 4.1’de yer almaktadır.



Şekil 4.1. MATLAB/Simulink benzetim çalışmaları için oluşturulan OFDM-RoF devre şeması

Çizelge 4.1. Benzetim çalışmalarına ait ortak parametreler

OFDM Parametresi	Değeri
Modülasyon tekniği	M-PSK (M=2, 4) ve M-QAM (M=4, 16, 64)
Kodlama tekniği (kodlama hızı)	Konvolüsyon (1/2)
Toplam alt taşıyıcı sayısı	512
Veri alt taşıyıcı sayısı	420
Pilot alt taşıyıcı sayısı	13
Null alt taşıyıcı (Zero padding)	79
Döngüsel önek (CP)	128
Alt taşıyıcı frekans aralığı (F_{sp})	31,25 kHz (20 MHz/640)
Veri aralığı süresi (T_{FFT})	32 μ s ($1/F_{sp}$)
Koruma aralığı süresi (T_{GI})	8 μ s ($T_{FFT}/4$)
IFFT/FFT periyodu (T_{FFT})	32 μ s ($1/F_{sp}$)
Sinyal sembol süresi	40 μ s ($T_{GI} + T_{FFT}$)
FFT örnek boyutu	512 nokta

Şekil 4.1'de yer alan ve ortak modelde kullanılan başlıca devre elemanları sırasıyla; konvolüsyon kodlayıcı ve matris aralıklandırıcı (interleaver), veri modülatörü, OFDM modülatörü, lazer modülasyon modeli, fiber zayıflama modeli, eklemeli beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) kanalı, fotodedektör modeli, OFDM demodülatörü, veri demodülatörü ve viterbi kod çözücü olarak sıralanmaktadır.

- Konvolüsyon kodlayıcı, Bernoulli ikili sayı üretici ile üretilen ikili sayı dizisinin içerisine belirli oranlarda ve belirlenmiş yedekleyici artıklık bitleri eklenmesiyle kanal kapasitesinin artırılması ve ileri yönlü hata düzeltme (FEC-Forward error correction) yapılabilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Belirli bir oranda (1/2, 2/3 veya 3/4) kodlanmış olan veri dizisi üzerinde sönmüleme kanalından dolayı oluşacak hata oranının azaltılması ve veri bitlerinin karıştırılarak veri blokları üzerinde oluşabilecek hataların iletilmesi amaçlanan bilgi üzerindeki etkisini en aza indirmek amacıyla da aralıklandırma (interleaving) işlemi yapılmaktadır.

- Veri modülasyonu bloğunda bit/tam sayı dönüştürücü ile kullanılan modülasyon tekniğine göre ikili sayı dizisi tam sayılara dönüştürüldükten sonra veri kümelenme diyagramı üzerinde I ve Q bileşenleri şeklinde karmaşık sayılara dönüştürülerek modüle edilmektedir. Modülasyon tekniğine bağlı olarak kümelenme diyagramı üzerindeki her bir sembol için belirli sayıda bit kullanılmaktadır.

- OFDM Modülasyonu bloğu, karmaşık sayı olarak elde edilen veri akışına belirli aralıklarla pilot taşıyıcılar eklenmesi, IFFT işlemi uygulanarak frekans alanındaki verinin zaman alanına dönüştürülmesi ve koruma aralığına 1/4 oranında döngüsel önek (CP) eklenmesi işlemlerini içermektedir. OFDM bloğu çıkışında 640 adet paralel haldeki veri sembolünün 640 adet seri veri sembolüne dönüştürülmesi amacıyla şekil tekrarlayıcı (reshape) bloğu kullanılmaktadır.

- RoF hattında oluşan gürültü ve bozulmaların en önemli kaynağı lazer olmaktadır ve lazer diyot normalde doğrusal olmayan bir davranış göstermektedir. Lazer diyot genel olarak bellekli doğrusal olmayan özellikler gösterir ve buna da zayıf doğrusal olmama durumu denilmektedir. Volterra serisi bir lazerin giriş/çıkış özelliklerini tanımlamak amacıyla kullanılabilir. Lazer eşik akımının üzerinde sürüldüğünde giriş/çıkış ilişkisi Eş. 4.1'de olduğu gibi 3. dereceden Volterra serisi ile modellenilebilir:

$$P_{opt}(t) = -0,0045 + 0,32(I(t) - I_{th}) + 147,05(I(t) - I_{th})^2 - 12033(I(t) - I_{th})^3 \quad (4.1)$$

Diğer taraftan, ideal özellikler gösterdiği varsayılan bir lazer diyotun giriş/çıkış ilişkisi için ise Eş. 4.2 kullanılabilir [39]:

$$P_{opt}(t) = r(I(t) - I_{th}) \quad (4.2)$$

Eşitlikte;

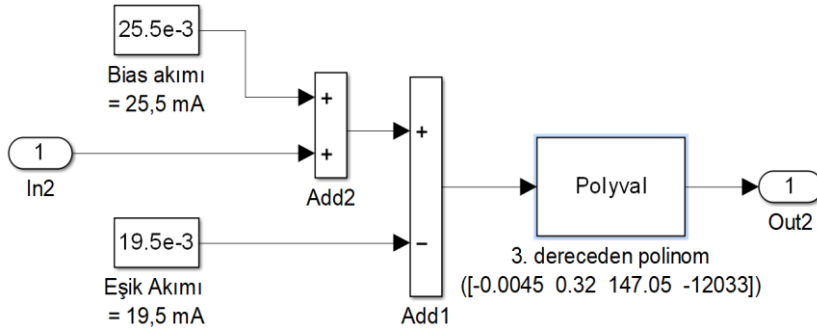
$I(t)$ = Mikrodalga sinyalin dc besleme (bias) içeren giriş akımı (dc bias=25,5 mA)

I_{th} = Lazer diyotun eşik akımı (19,5 mA)

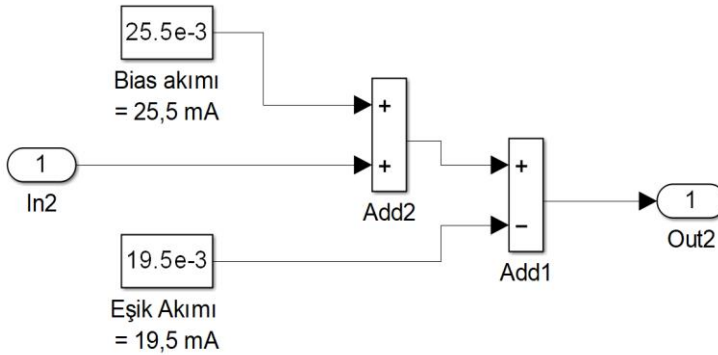
r = "P-I" eğimi (çıkış optik gücünün eğimi – giriş elektriksel akım eğrisi)

P_{opt} = Lazer diyotun çıkış optik gücü

Eş. 4.1 ve Eş. 4.2 için oluşturulan benzetim modelleri Şekil 4.2(a) ve Şekil 4.2(b)'de yer almaktadır. Benzetim çalışmalarında lazer diyotun giriş/çıkış koşullarının ideal doğrusal özellikler gösterdiği varsayılarak Eş. 4.2'ye göre modellenmiş olan (Şekil 4.2 (b)) model kullanılmıştır.



(a)



(b)

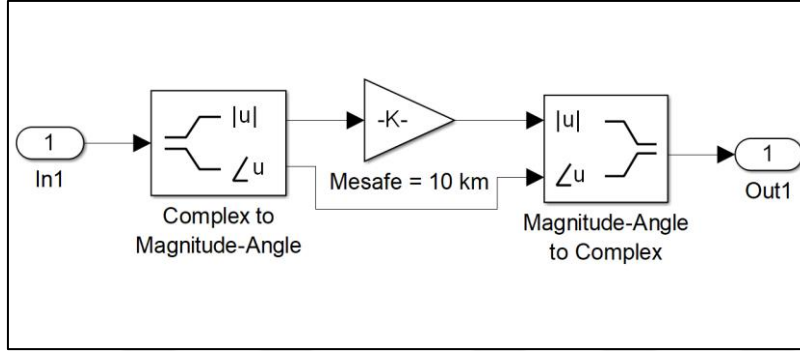
Şekil 4.2. Lazer modülasyon modeli (a) Doğrusal olmayan devre şeması (b) Doğrusal devre şeması

- Optik iletim hatlarındaki doğrusal etkilerin çoğunluğu fiber optik hat üzerinde oluşmaktadır. Bu doğrusal etkiler genellikle dispersiyon ve fiber üzerindeki sinyal kaybı yani zayıflama olmaktadır. Fiber üzerindeki iletim mesafesinin artmasıyla birlikte sinyal gücünde meydana gelen azalma, yani zayıflama iletim kayıplarını ifade etmektedir.

Benzetim çalışmasında kullanılan fiber optiğin tek modlu fiber (SMF) olduğu varsayılarak zayıflaması 0,21 dB/km olarak hesaplanmıştır. Farklı modülasyon tekniklerinin incelendiği ilk kısımdaki modelde 10 km'lik mesafeye sahip bir fiber modeli kullanıldığından bu zayıflama değeri 2,1 dB olarak elde edilmektedir.

Bölüm 4.3'te farklı kullanıcı hızları ve mesafeler için kullanılan modelde de 0,21 dB/km zayıflama kullanılarak farklı mesafeler için zayıflama değerleri elde edilmiştir.

Benzetim modelinde kullanılan fiber zayıflama modeli Şekil 4.3'te yer almaktadır [40]:



Şekil 4.3. Fiber zayıflama modeli devre şeması

- AWGN kanalı OFDM sistemlerinin çalışmasını incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modelde beyaz Gauss gürültüsünün sabit bir spektral yoğunluk ve genliğin Gauss dağılımını içeren doğrusal etkisi incelenmektedir.

Gerçek uygulamalarda kullanılan transmisyon sistemleri iletim ortamının çeşidine bağlı olarak değişik seviyelerde beyaz gürültüye maruz kalmaktadır. Beyaz gürültü, belirli bir frekans bandında sürekli ve değişmeyen özellikte frekans spektrumuna sahip bir gürültü olarak tanımlanabilmektedir. Dolayısıyla bu frekans bandı boyunca eşit güç/Hz oranı sağlamaktadır [34].

AWGN kanalı benzetim çalışmasındaki devrede SNR (E_b/N_0) değerinin belirlenerek performans değerlendirmesi amacıyla kullanılmaktadır.

- İletimi gerçekleştiren sinyallerin algılanması işlemi genellikle fotodedektörler tarafından yapılmaktadır. Çoğu durumda alınan optik sinyal oldukça zayıflamış durumdadır ve yükseltilmesi gerekmektedir. Bunun için de, istenilen SNR değerlerinin elde edilebilmesi amacıyla fotodiyottan hemen sonra yükseltme işlemi yapılmaktadır [41].

Benzetim çalışmasında kullanılan fotodedektör modelinin sinyal/gürültü oranı aşağıdaki 4.3 eşitliğine göre oluşturulmuştur:

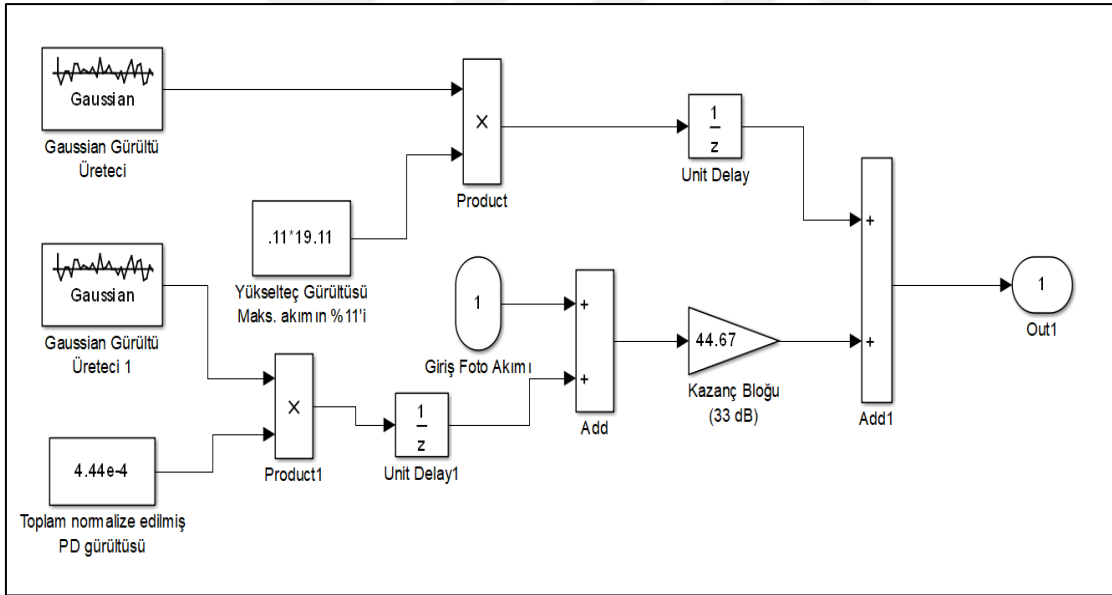
$$\frac{S}{N} = \frac{I_{sinyal}^2}{\langle I_{gürültü}^2 \rangle} \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte:

I_{sinyal} = Foto akımı

$\langle I_{gürültü}^2 \rangle$ = Fotodetektörden kaynaklı gürültü akımının ortalama karesi

Benzetim çalışmasında kullanılan foto diyot modelinin gürültü akımının ortalama karesi $4,44 \times 10^{-4}$ olarak alınmaktadır. Bununla birlikte, elde edilen elektriksel sinyalin yükseltilmesi amacıyla kullanılan yükseltecin gücü 33 dB yani 44,67 güç kazancı olarak kullanılmaktadır. Fotoakımına eklenen foto diyot gürültüsü, yükselteç kazancı ve yükseltecin gürültü kaynağının da modellenmesi ile elde edilen toplam PD modeli Şekil 4.4'teki gibi olmaktadır [41]:



Şekil 4.4. Fotodetektör modeli devre şeması

- Benzetim devresinin alıcı tarafında ise OFDM demodülasyonu, veri demodülasyonu ve kod çözme işlemleri için benzer devre elemanları kullanılarak gönderici tarafında yapılan işlemlerin tersi işlemler uygulanarak iletilen ikili verinin tekrar elde edilmesi sağlanmaktadır.

4.1. OFDM- RoF-PSK Benzetimi ve Performans Analizi

OFDM-RoF sisteminin veri iletim performansı ilk olarak Şekil 4.1’de yer alan devre modelinde BPSK ve QPSK veri modülasyon teknikleri uygulanarak test edilmiştir.

Bernoulli ikili sayı üretici ile elde edilen ve konvolüsyon kodlayıcı ile 1/2 oranında kodlanan veri, aralıklandırma (interleaving) işlemi ve tam sayı dönüşümünden sonra, BPSK ve QPSK ile modüle edilerek karmaşık sayı değerleri elde edilmektedir.

Buradaki modülasyon sonrasında 420 paralel alt taşıyıcı için veri üretilmektedir. Modüle edilmiş olan veri OFDM bloğundan geçerken IFFT işlemi sayesinde dikgen frekans modülasyonu yapılmaktadır. OFDM modülasyonu sırasında pilot taşıyıcı ve sıfır ekleme (zero padding) işlemi ile birlikte alt taşıyıcı sayısı 640 olmaktadır.

IFFT frekans alanındaki giriş verisini zaman alanında çıkış verisine dönüştürmektedir. Giriş verisi karmaşık sayılar olarak ifade edilmektedir, çıkış verisi ise analog OFDM sembolleridir.

OFDM bloğunda, çok yollu gecikme etkisine karşı direncin artırılabilmesi amacıyla 1/4 oranında döngüsel önek (CP) eklenmektedir. Bundan sonra ise veri lazer ile optik alanda modüle edilerek fiber iletim ortamına geçmektedir. Lazer diyot modelinin doğrusal özellikler gösterdiği varsayılarak benzetim yapılmıştır. Fiber üzerinden iletilecek olan OFDM sinyali lazer diyodu modüle etmek için kullanılmaktadır.

Sonuçta elde edilen optik sinyal fiber üzerinden iletilmektedir. Fiber kazanç bloğu için ise SMF için zayıflama değeri baz alınarak 10 km’lik bir mesafe için zayıflama oluşturacak şekilde benzetim yapılmıştır. Sonrasında sinyal AWGN (Eklemeli beyaz gaussian gürültüsü) kanalına girmektedir. AWGN kanalı boyunca uygulanacak olan SNR değeri (Eb/No) sistemin performans değerlendirmesi amacıyla farklı değerlerde olacak şekilde ayarlanarak test çalışmaları yapılmıştır.

AWGN kanalından geçtikten sonra alıcı tarafına ulaşan ve fotodedyektör ile algılanan optik sinyal elektriksel sinyale dönüştürülerek OFDM alıcısına girmektedir. Burada FFT dönüşümü ile zaman/frekans alanı dönüşümü ve OFDM demodülasyonu işlemleri

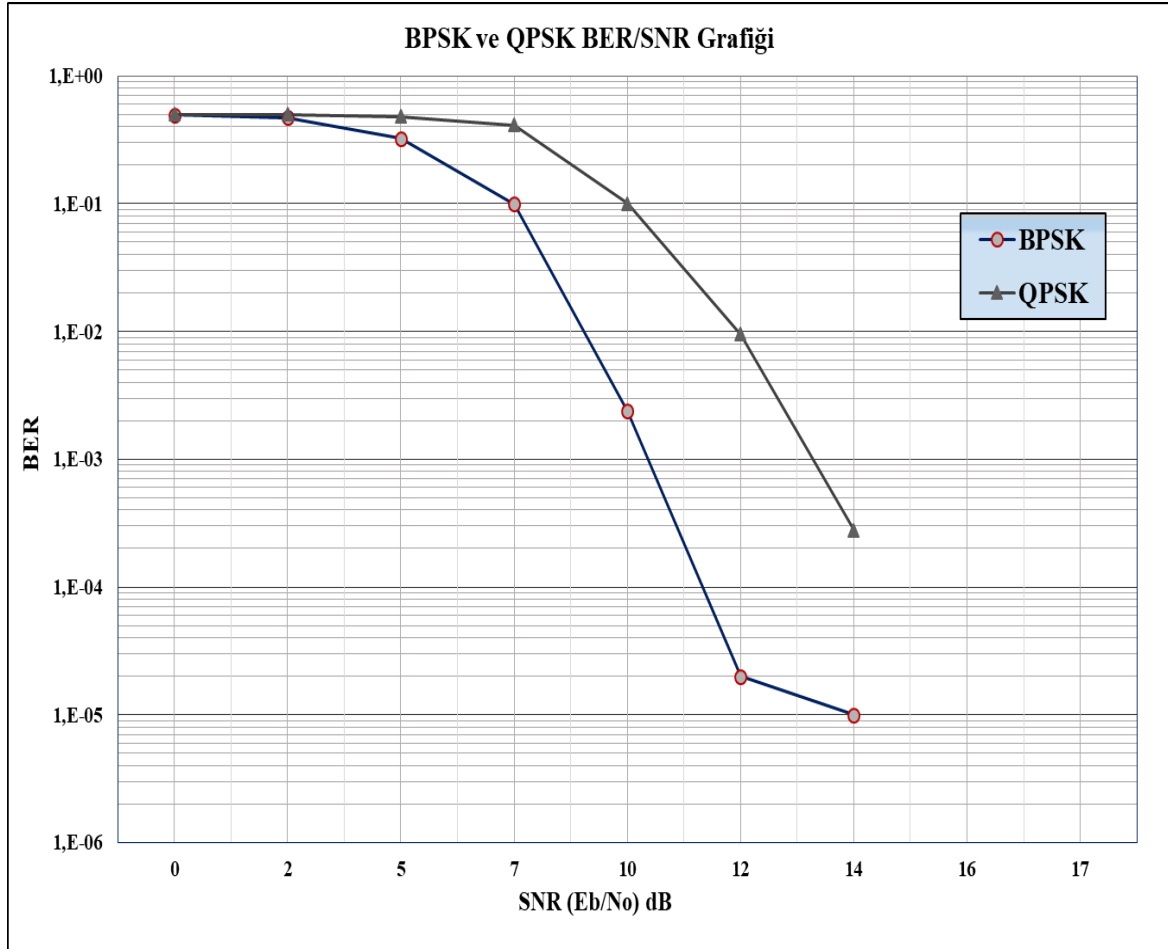
yapıldıktan sonra verinin BPSK ve QPSK demodülasyonu yapılmaktadır. PSK ile demodüle edilmiş olan veri viterbi kod çözücünden de geçerek başta eklenmiş olan artık bitler çıkartılarak orijinal temel sinyal elde edilmiş olmaktadır.

Bundan sonraki aşamada iletim hattına gönderilen veri ile iletim hattı üzerinden tekrar elde edilmiş olan veri karşılaştırılarak BER ve SNR performans değerlendirilmesi yapılmaktadır. Ayrıca, kümelenme diyagramı ile gönderilen ve alınan veri arasındaki modülasyon sonrasında oluşan kümelenme diyagramları da karşılaştırılmaktadır.

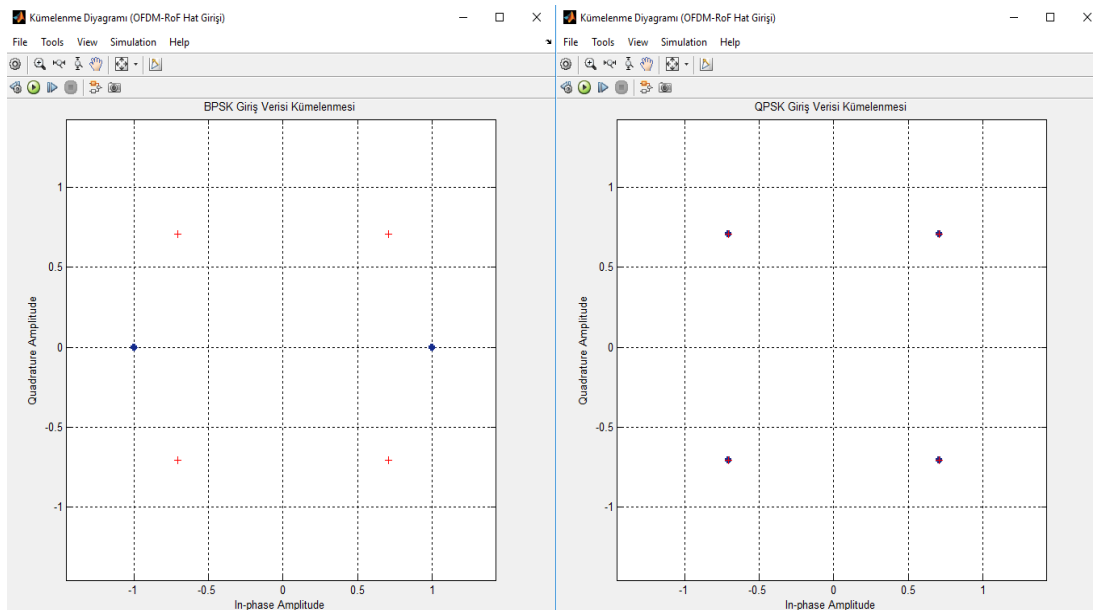
BPSK ve QPSK modülasyon teknikleri ile modüle edilmiş olan ikili bitler halindeki verinin iletimi sonucunda elde edilen BER/SNR değerleri Çizelge 4.2’de, BER/SNR grafiği Şekil 4.5’te, giriş verisi (orijinal mesaj verileri) kümelenme diyagramları Şekil 4.6’da; BPSK ve QPSK ile farklı SNR değerleri için elde edilen kümelenme diyagramları ise sırasıyla Şekil 4.7’de ve Şekil 4.8’de yer almaktadır.

Çizelge 4.2. BPSK ve QPSK ile elde edilen BER/SNR değerleri

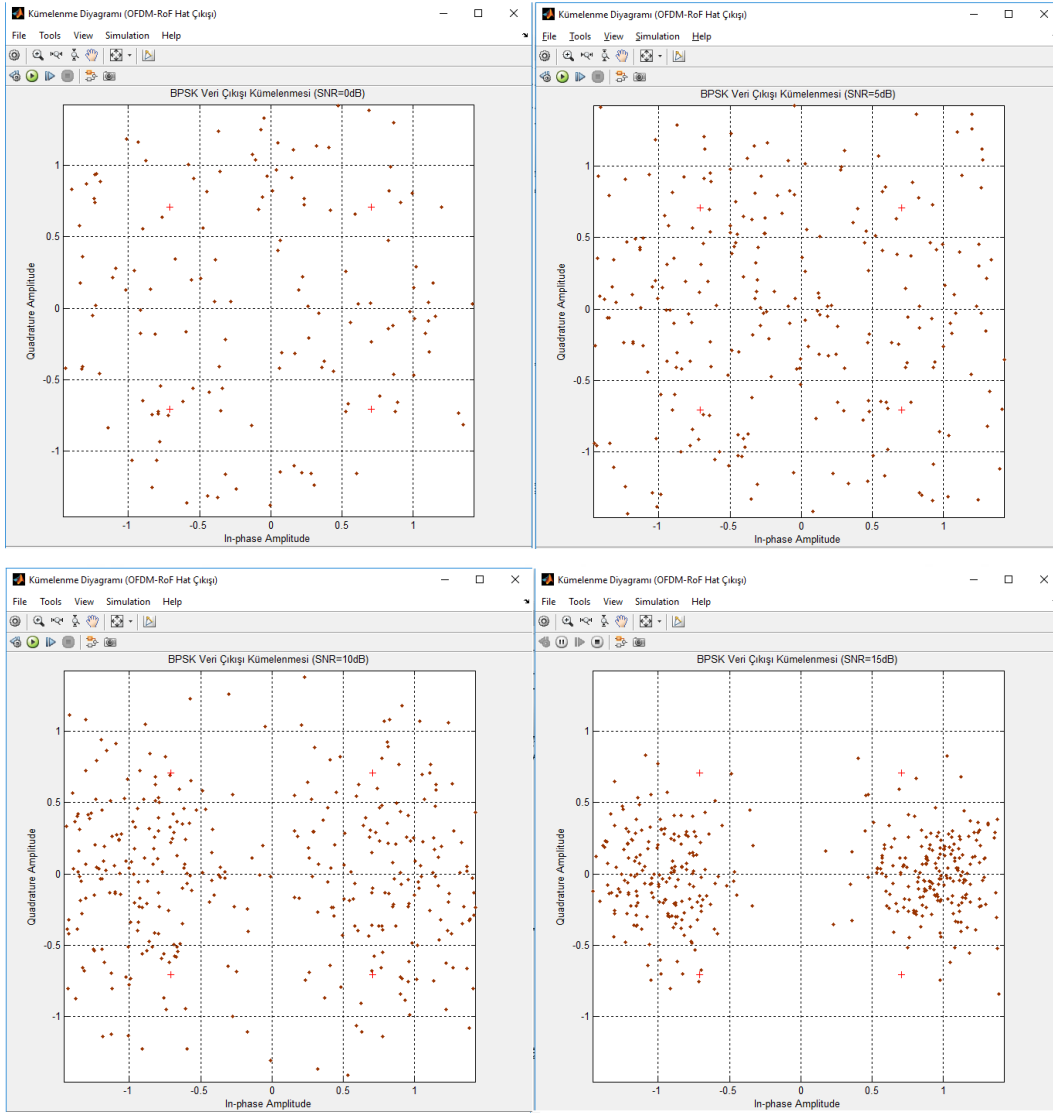
Modülasyon	BPSK			QPSK		
	BER	Hatalı bit sayısı	Toplam bit sayısı	BER	Hatalı bit sayısı	Toplam bit sayısı
0	0,4938	49470	100200	0,4997	50160	100400
2	0,4711	47200	100200	0,4977	49960	100400
5	0,3230	32350	100200	0,4796	48150	100400
7	0,09956	9973	100200	0,4124	41400	100400
10	0,002386	239	100200	0,1001	10050	100400
12	1,997e-5	2	100200	0,009494	953	100400
14	9,983e-6	1	100200	0,0002789	28	100400
16	0	0	100200	0	0	100400



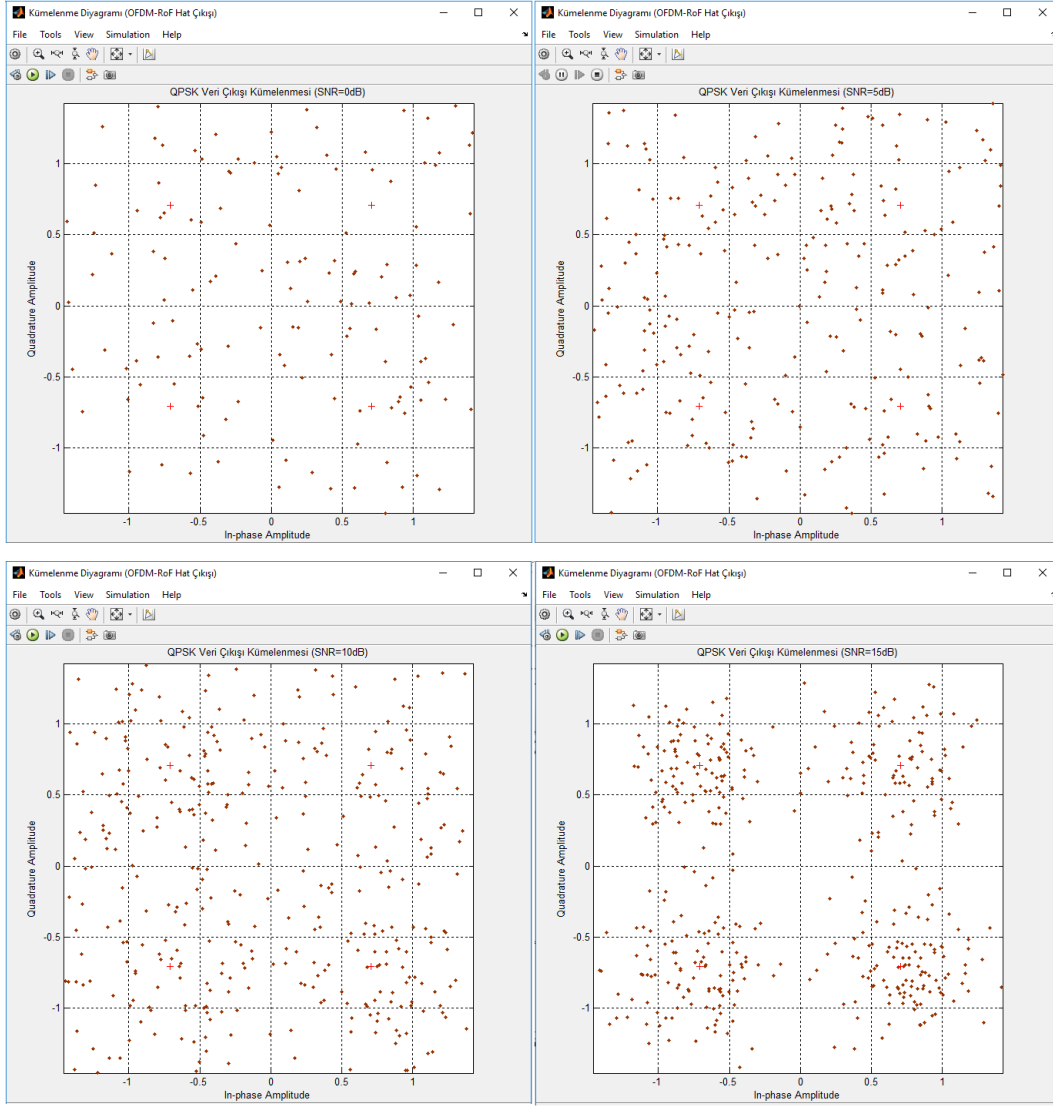
Şekil 4.5. BPSK ve QPSK için BER/SNR grafiği



Şekil 4.6. BPSK ve QPSK giriş verisi kümelenme diyagramları



Şekil 4.7. Farklı SNR değerleri için BPSK kümelene çıkış diyagramları



Şekil 4.8. Farklı SNR değerleri için QPSK kümelenme çıkış diyagramları

Benzetim çalışmasının ilk kısmında BPSK ve QPSK veri modülasyonları ile yapılan benzetim sonuçlarında, BER değerinin en düşük değerini elde etmek için sağlanması gereken SNR değeri yaklaşık değerler olmakla birlikte (15-16 dB), aynı SNR değerleri için elde edilen BER değerleri arasında önemli farklılıklar oluşmaktadır (Çizelge 4.2). Sonuç olarak aynı veri hızlarında BPSK daha verimli bir performans göstermektedir (Şekil 4.5). Aynı şekilde, kümelenme diyagramlarında da görüldüğü üzere SNR değerinin artmasıyla birlikte elde edilen kümelenme şekilleri iletilen verinin orijinal kümelenmesi ile daha tutarlı olmaktadır (Şekil 4.7 ve 4.8).

4.2. OFDM-RoF-QAM Benzetimi ve Performans Analizi

Farklı modülasyon tekniklerinin performans analizi için yapılan benzetim çalışmasının ikinci kısmında ise, 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM veri modülasyonu teknikleri kullanılarak OFDM-RoF modellemesi test edilmiştir. Genel modeli Şekil 4.1’de verilen devrenin çalışması sırasında gerçekleşen işlemler PSK için gerçekleşen işlemler ile aynı olmakla birlikte modülasyon ve demodülasyon adımları için QAM tekniği uygulanmıştır.

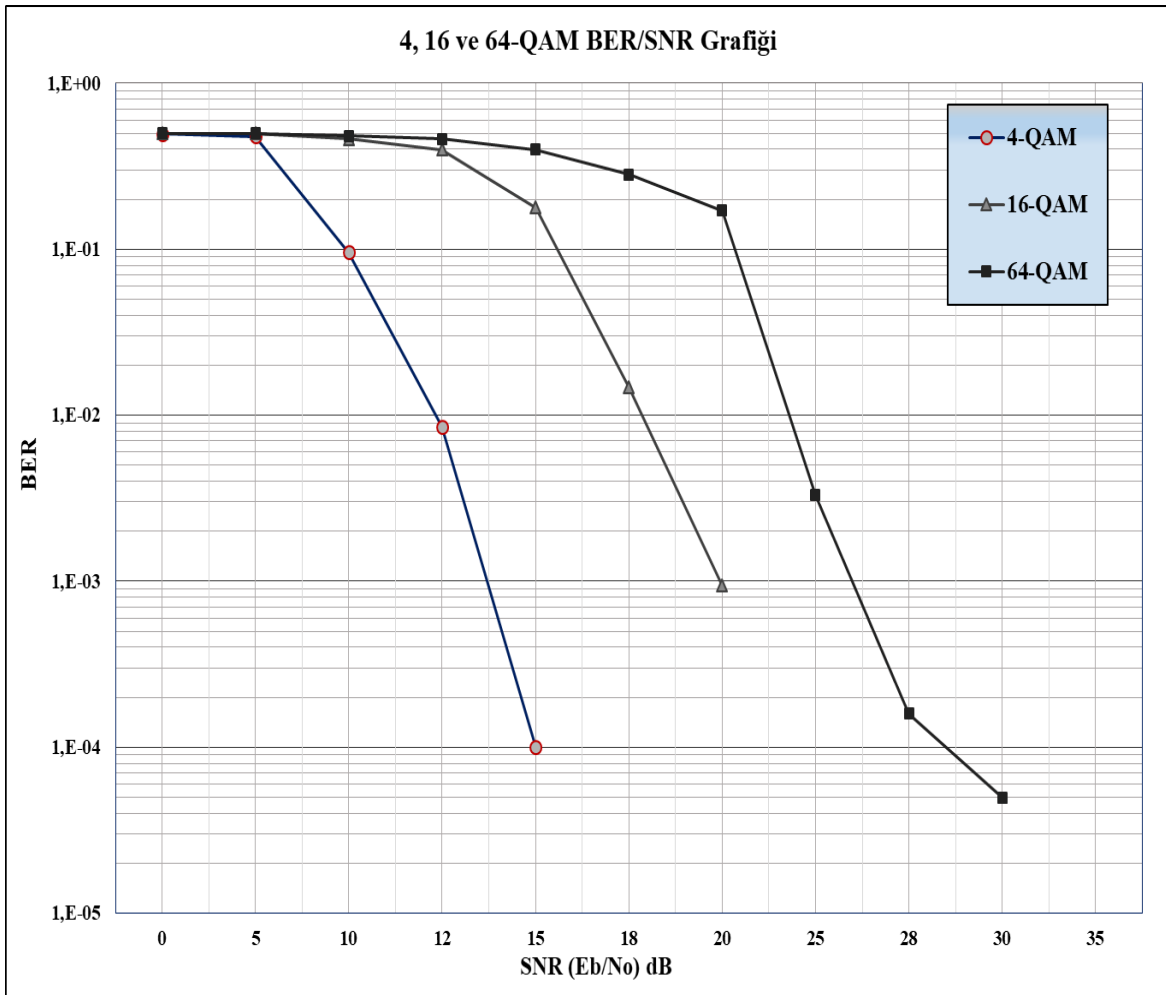
Veri modülasyonu için kullanılan 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM teknikleri ile modüle edilmiş olan verinin iletimi sonucunda elde edilen BER/SNR değerleri Çizelge 4.3’te, BER/SNR grafiği Şekil 4.9’da, giriş verisi (orijinal mesaj verileri) kümelenme diyagramları Şekil 4.10’da ve farklı SNR değerleri için elde edilen kümelenme diyagramları ise 4, 16 ve 64-QAM için sırasıyla Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te yer almaktadır.

Çizelge 4.3. 4, 16 ve 64-QAM modülasyonu için elde edilen BER/SNR değerleri

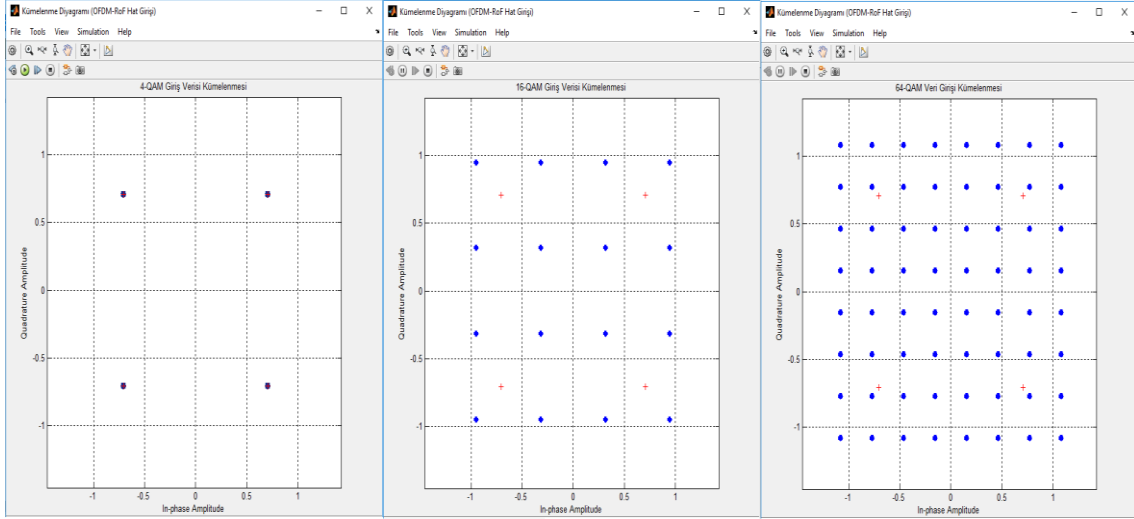
SNR (dB)	4-QAM			16-QAM			64-QAM		
	BER	Hatalı bit sayısı	Toplam bit sayısı	BER	Hatalı bit sayısı	Toplam bit sayısı	BER	Hatalı bit sayısı	Toplam bit sayısı
0	0,4983	50030	100400	0,4984	50240	100800	0,4994	50340	100800
5	0,4783	48010	100400	0,4971	50110	100800	0,4979	50190	100800
10	0,0958	9616	100400	0,4602	46380	100800	0,4818	48570	100800
12	0,008538	857	100400	0,3987	40190	100800	0,4617	46540	100800
15	9,962e-5	10	100400	0,1778	17930	100800	0,3969	40010	100800
18	0	0	100400	0,01472	1484	100800	0,2815	28380	100800
20	0	0	100400	0,0009425	95	100800	0,1703	17170	100800

Çizelge 4.3.(devam) 4, 16 ve 64-QAM modülasyonu için elde edilen BER/SNR değerleri

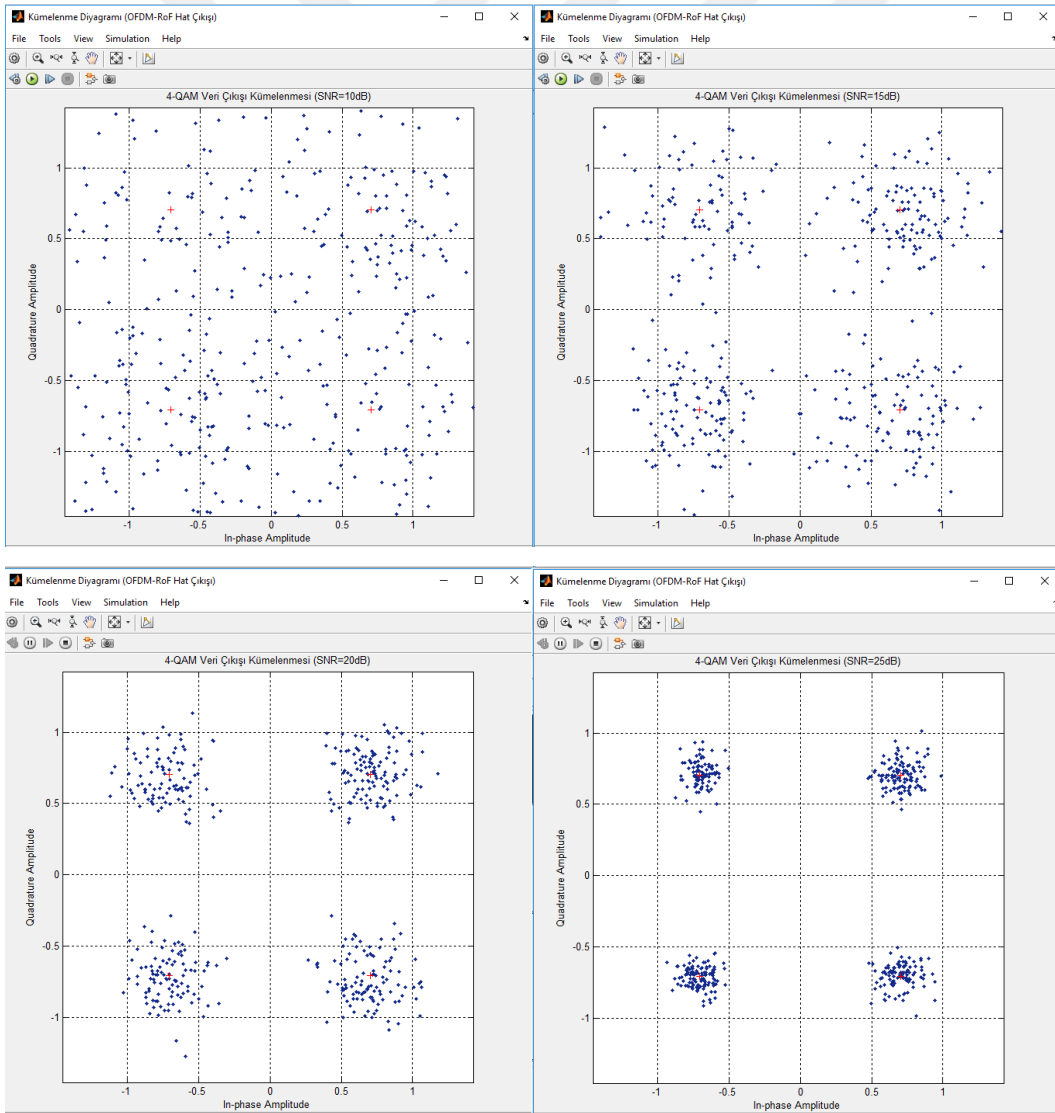
25	0	0	100400	0	0	100800	0,003304	333	100800
28	0	0	100400	0	0	100800	0,0001587	16	100800
30	0	0	100400	0	0	100800	4,96e-5	5	100800
35	0	0	100400	0	0	100800	0	0	100800



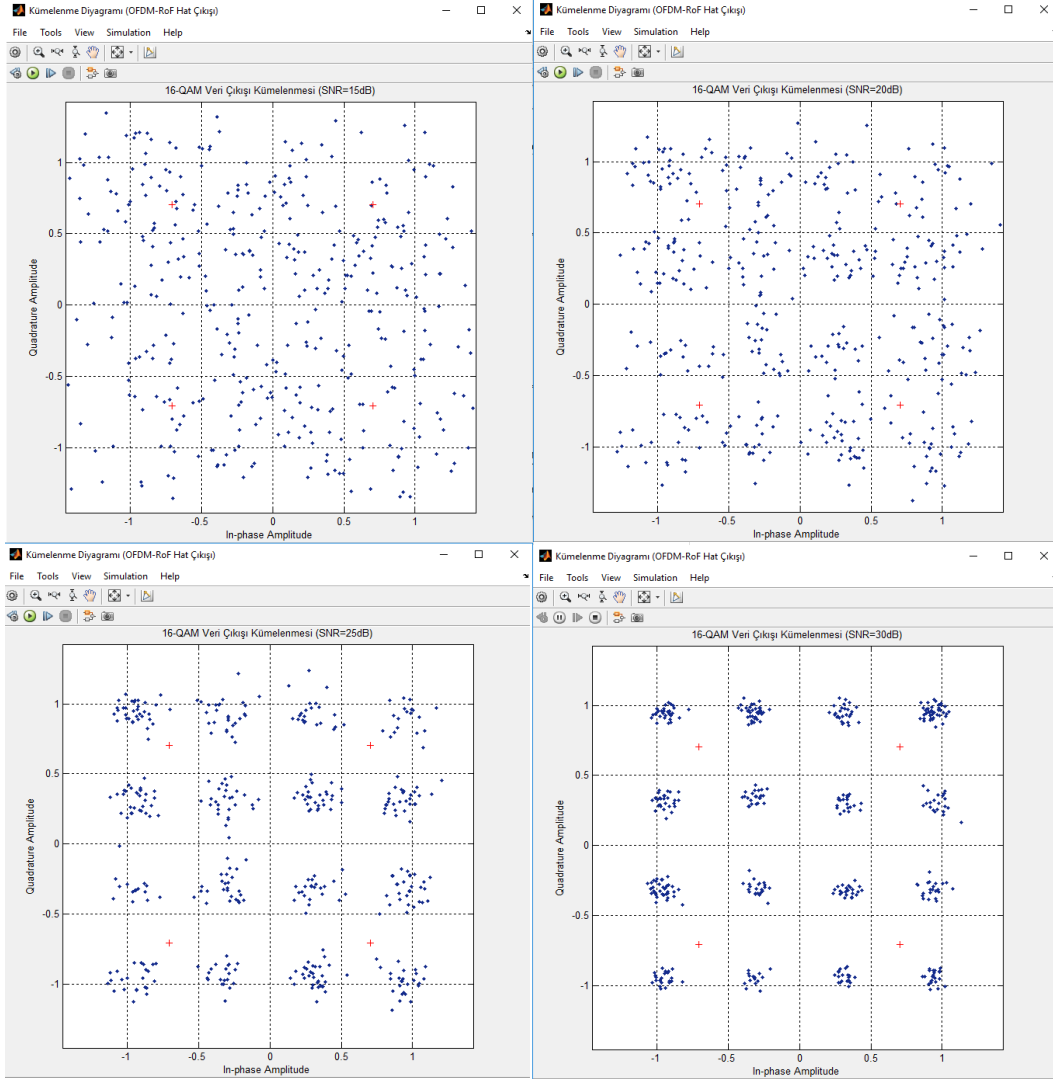
Şekil 4.9. 4, 16 ve 64-QAM modülasyonu için BER/SNR grafiği



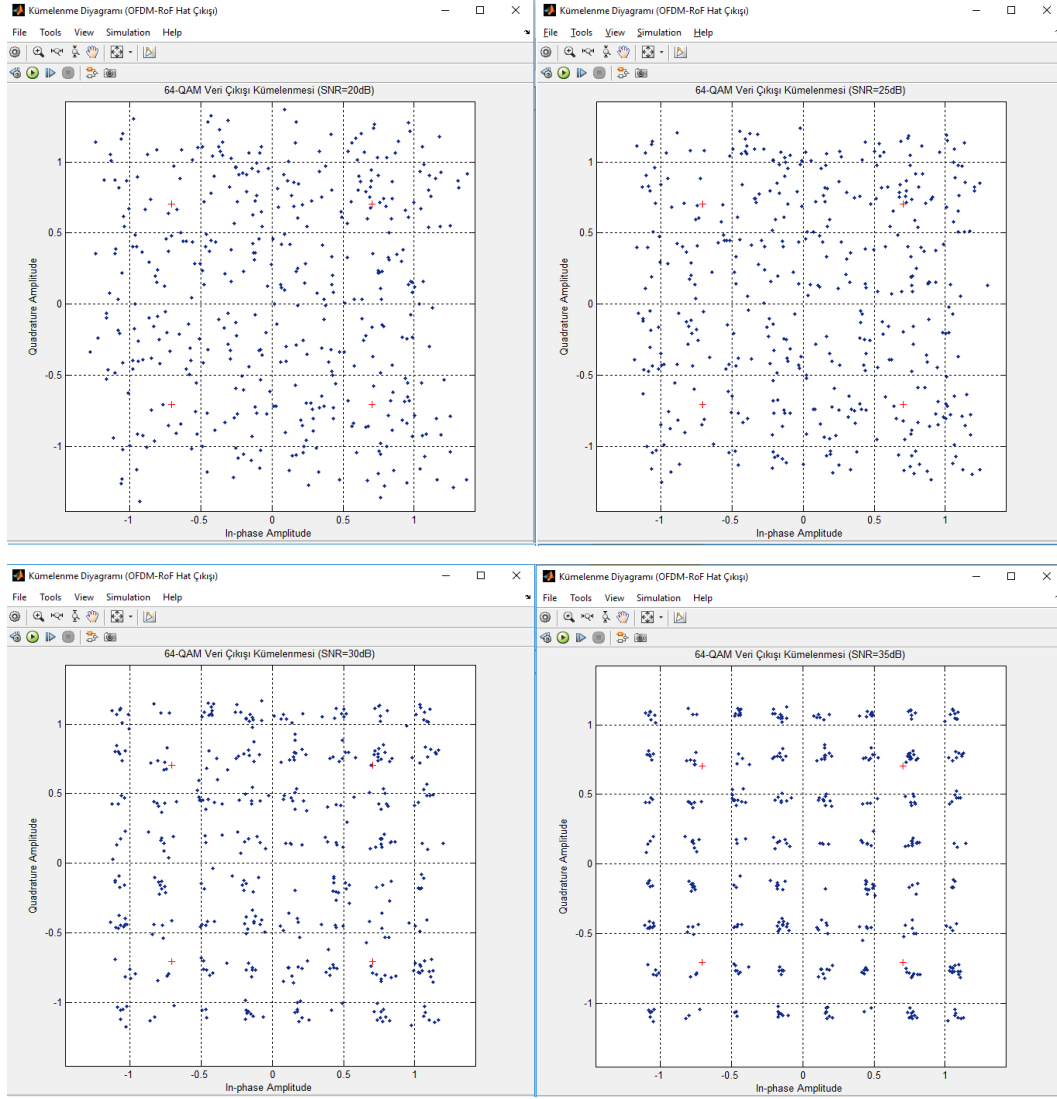
Şekil 4.10. 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM giriş verisi kümelenme diyagramları



Şekil 4.11. Farklı SNR değerleri için 4-QAM kümelenme çıkış diyagramları



Şekil 4.12. Farklı SNR değerleri için 16-QAM kümelene çıkış diyagramları



Şekil 4.13. Farklı SNR değerleri için 64-QAM kümelenme çıkış diyagramları

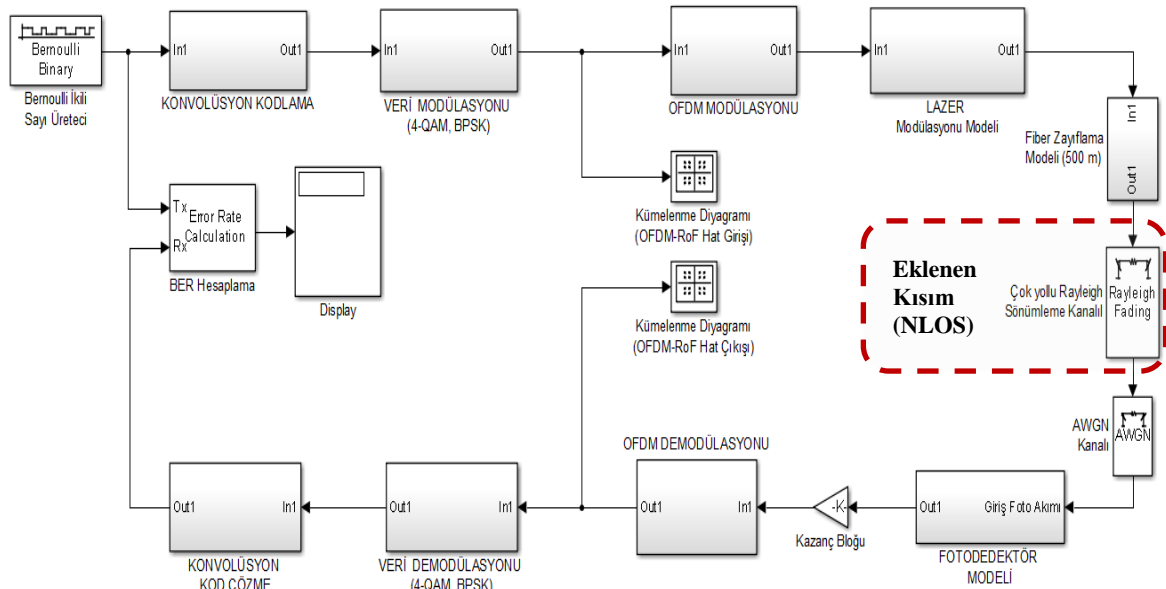
4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM veri modülasyonları için yapılan benzetimlerde de, PSK'de olduğu gibi modülasyon seviyesi arttıkça veri iletimindeki hata oranını azaltmak için gereken SNR değerinin arttığı görülmektedir. BER değerinin en düşük değerine ulaştığı yaklaşık SNR değerleri 4-QAM için 18 dB, 16-QAM için 25 dB ve 64-QAM için de 35 dB olarak elde edilmiştir (Çizelge 4.3). Dolayısıyla yaklaşık aynı veri hızları için 4-QAM sinyal gücü açısından daha verimli olmaktadır. PSK modülasyonunda olduğu gibi QAM'in farklı modülasyon seviyelerinde de aynı SNR değerleri için elde edilebilen BER değerleri oldukça farklı olmaktadır. Benzetim çalışmasında değerlendirilen bütün modülasyon tekniklerinde aynı olduğu üzere, kümelenme diyagramlarında da SNR değerinin artmasıyla birlikte elde edilen şekiller iletilen verinin orijinal kümelenme şekli ile daha tutarlı olmaktadır. Diğer

tarafından kümelene diyagramları için SNR değerinin mümkün olduğunca artırılması kesinlik açısından daha verimli olmaktadır.

PSK ve QAM modülasyon teknikleri için elde edilen BER/SNR performans değerleri arasında bir karşılaştırma yapılırsa; örneğin aynı seviyede modülasyon yapan QPSK ve 4-QAM teknikleri için, aynı oranda BER değeri elde etmek için QPSK modülasyonu 4-QAM'e göre daha yüksek SNR değerleri gerektirmektedir. Yani genel olarak 4-QAM daha verimli olmaktadır. Ancak diğer taraftan sıfıra en yakın BER değerinin elde edilebilmesi için gereken değer, QPSK için 15-16 dB civarı olmakla birlikte, 4-QAM için bu değer 17-18 dB civarında olmaktadır (Çizelge 4.2 ve 4.3).

4.3. OFDM-RoF Hattının Farklı Kanal Koşulları İçin Benzetimi

Bu kısımda, bölüm 4.1 ve 4.2'de yapılan benzetim çalışmaları için oluşturulmuş olan genel devre modeline (Şekil 4.1) farklı bir kanal koşulu olarak hızlı hareketli mobil kullanıcılar için oluşan etkiler de eklenerek test yapılmıştır. Bu amaçla hareketli kullanıcılara ait ilave parametre olarak açık olmayan görüş hattına (NLOS) sahip kanalların benzetimini sağlayan Rayleigh Sönümlenme kanalı kullanılmıştır (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. OFDM-RoF farklı kanal koşulları için kullanılan devre modeli

OFDM-RoF sistemlerinin performansında hareketlilik (mobilité) ve buna bağlı olarak hız diğer önemli bir faktör olmaktadır. Çalışmaların gösterdiğine göre kullanıcı hızının artmasıyla birlikte alınan verideki hata oranı da aynı şekilde artmaktadır. BER oranı özellikle yüksek seviyeli modülasyonlarda olmak üzere hızdaki değişimlere oldukça bağımlı olmaktadır. Daha yüksek hızlarla birlikte oluşan Doppler Kayması etkisi nedeniyle hızlı kullanıcılar arasındaki haberleşme daha güç bir hale gelmektedir [5].

Doppler kayması, en basit ifadeyle frekanstaki değişim olarak tanımlanabilir. Frekansta oluşan değişim gönderici ve alıcı tarafların birbirlerine göre hareket etmesi nedeniyle ortaya çıkar. Doppler etkisi sabit konumlu istasyonlar için çok önemli bir faktör değildir. Ancak hareketli kullanıcılar için alıcı ve gönderici arasındaki bağlı hareketlilik miktarı frekans değişimini doğrudan etkilemektedir [34].

Doppler yayılımı temelde hıza bağlı olarak (ters orantılı) değişmektedir. Doppler yayılma frekansı genellikle 200 Hz civarında olmakla birlikte 2 KHz'e kadar çıkabilmektedir. Özellikle araç haberleşmesinde meydana gelen doppler frekansı, aynı hıza sahip hücrel bir kanalda oluşan frekansa göre dört kat daha fazla olabilir. Bunun nedeni ise gönderici ve alıcı tarafın her ikisinin de hareket halinde olması durumudur.

Kablosuz haberleşme için Doppler frekansı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [38]:

$$f_D = \frac{V_r}{c} f_0 \quad (4.4)$$

Eşitlikteki ifadeler:

f_D = Doppler frekansı

c = Işık hızı (3×10^8 m/s)

f_0 = Transmisyon taşıyıcı frekansı

V_r = Bağlı hız

Bunun yanında araç haberleşmesi söz konusu olduğunda gönderici ve alıcı hareketli ise etkin hızın (V_{eff}) da hesaplanması gerekmektedir [38]:

$$V_{eff} = \sqrt{V_R^2 + V_T^2} \quad (4.5)$$

$$f_D = \left(\frac{0.428}{\lambda\sqrt{2}} \right) V_{eff} + 11,5 \quad (4.6)$$

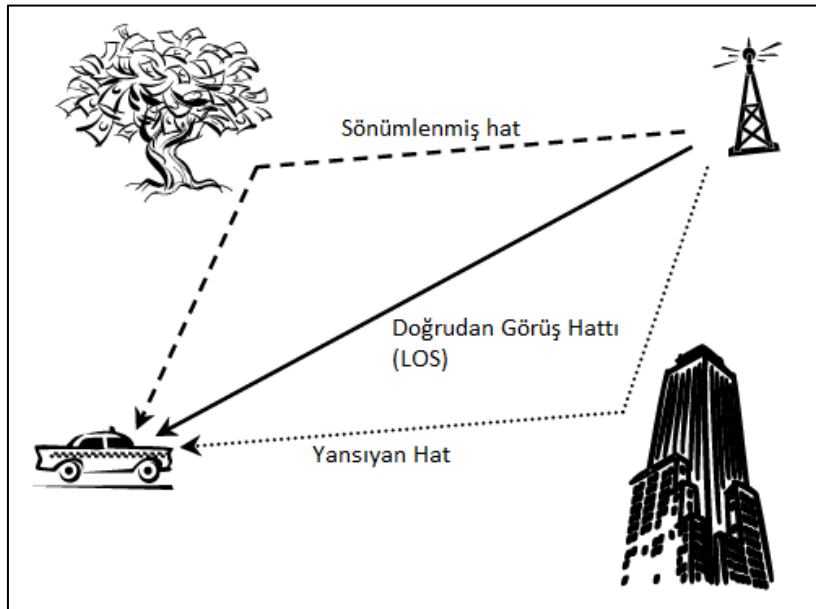
Eş. 4.5 ve 4.6'daki ifadeler:

λ = Taşıyıcı sinyalin dalga boyu

V_T = Gönderici araç hızı (V transmitter)

V_R = Alıcı araç hızı (V receiver)

Kablosuz kanallar özellikle yoğun nüfus ve fiziksel yapı bulunan şehir içi koşullar düşünüldüğünde çok karmaşık yapıdaki iletim sistemleridir. Açık olmayan görüş hattı olan iletim hatları (NLOS) değerlendirildiğinde yayılım yapan sinyalde yüksek oranda bozulmalar (yansıma, dağılma ve kırılma gibi) meydana geldiği görülmektedir. Bu bozulmaların sonucu da çok yollu gecikmeler olarak sinyale etki etmektedir. Sinyalde meydana gelen bu bozulmaların benzetim ortamında uygulanabilmesi için Rayleigh sönümlenme modeli kullanılmaktadır. Bu modelde yayılım yapan sinyalin genliğinin zamanla değişen bir iletim ortamından geçtiği varsayılır. Rayleigh sönümlenme kanal modeli 1-20 km arası mesafelerdeki iletim sistemlerinin benzetimi için uygun olmaktadır [36].



Şekil 4.15. Açık görüş (LOS) ve açık olmayan görüş (NLOS) hatları [34]

Öncelikle devrede kullanılacak olan hız parametresine göre doppler frekansının belirlenmesi gerekmektedir. Doppler frekansının belirlenmesi için, tüm kullanıcıların hareketli olduğu varsayılarak efektif hız değeri ile birlikte Eş. 4.6 kullanılmıştır. Ayrıca, taşıyıcı frekansları

da sırasıyla GSM, LTE ve mm-dalga çalışma spektrumlarında bulunan 900 MHz, 2,5 GHz ve 60 GHz frekansları için üç farklı durum incelenmiştir. Kullanılan fiber optik mesafesi 500 m'dir ve zayıflama 0,21 dB/km zayıflama modeline (Şekil 4.3) göre hesaplanmıştır.

Benzetimde kullanılan farklı efektif hızlar ve taşıyıcı frekanslar için elde edilen doppler frekansı değerleri aşağıdaki Çizelge 4.4'te yer almaktadır.

Çizelge 4.4. Farklı efektif hızlar ve taşıyıcı frekansları için elde edilen f_D değerleri

Taşıyıcı Frekansı ve Dalga boyu	$f_0=900$ MHz $\lambda = c/f_0$ $\lambda = 0,33$ m	$f_0=2,5$ GHz $\lambda = c/f_0$ $\lambda = 0,12$ m	$f_0=60$ GHz $\lambda = c/f_0$ $\lambda = 0,005$ m
Efektif Hız (V_{eff}) (km/sa)	f_D (Hz)	f_D (Hz)	f_D (Hz)
10	14,02	18,51	179,63
40	21,59	39,52	684,04
90	34,20	74,55	1524,71

4.3.1. Farklı taşıyıcı frekanslar için performans analizi

Hızlı hareketli kullanıcıların, farklı taşıyıcı frekanslar üzerinden haberleşmesinin benzetimi için 4-QAM modülasyon tekniği kullanılarak, 900 MHz, 2,5 GHz ve 60 GHz frekansları için Çizelge 4.4'te yer alan hız/doppler frekansı değerlerine göre benzetimler yapılmıştır. Farklı taşıyıcı frekanslar (900 MHz, 2,5 GHz ve 60 GHz) ve efektif hızlar için elde edilen BER/SNR değerleri sırasıyla Çizelge 4.5, Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de yer almaktadır.

Bununla birlikte, benzetim sonuçlarından elde edilen BER/SNR değerlerinin grafikleri 900 MHz, 2,5 GHz ve 60 GHz frekansları için sırasıyla Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de ve bazı SNR değerleri ve hızlar için elde edilen kümelenme diyagramları da 900 MHz, 2,5 GHz ve 60 GHz frekansları için sırasıyla Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmektedir.

Çizelge 4.5. 4-QAM veri modülasyonu ve farklı efektif hızlarda 900 MHz taşıyıcı frekans için elde edilen BER/SNR değerleri

4-QAM veri modülasyonu ve 900 MHz frekans (Toplam bit sayısı = 20160)			
	Hız=10 km/sa $f_D=14,02$ Hz	Hız=40 km/sa $f_D=21,59$ Hz	Hız=90 km/sa $f_D=34,20$ Hz
SNR (dB)	BER	BER	BER
0	0,5027	0,5033	0,5017
5	0,5066	0,5070	0,5068
10	0,4999	0,4984	0,4981
20	0,5010	0,5004	0,4994
25	0,4817	0,4849	0,4861
30	0,2975	0,3072	0,3304
35	0,02232	0,02728	0,03998
40	9,921e-5	9,921e-5	1,488e-4
45	0	0	0
50	0	0	0

Çizelge 4.6. 4-QAM veri modülasyonu ve farklı efektif hızlarda 2,5 GHz taşıyıcı frekans için elde edilen BER/SNR değerleri

4-QAM veri modülasyonu ve 2,5 GHz frekans (Toplam bit sayısı = 20160)			
	Hız=10 km/sa $f_D=18,51$ Hz	Hız=40 km/sa $f_D=39,52$ Hz	Hız=90 km/sa $f_D=74,55$ Hz
SNR (dB)	BER	BER	BER
0	0,5029	0,5015	0,5029
5	0,5062	0,5066	0,5068
10	0,4996	0,4970	0,5001
20	0,5003	0,5011	0,4996

Çizelge 4.6.(devam) 4-QAM veri modülasyonu ve farklı efektif hızlarda 2,5 GHz taşıyıcı frekans için elde edilen BER/SNR değerleri

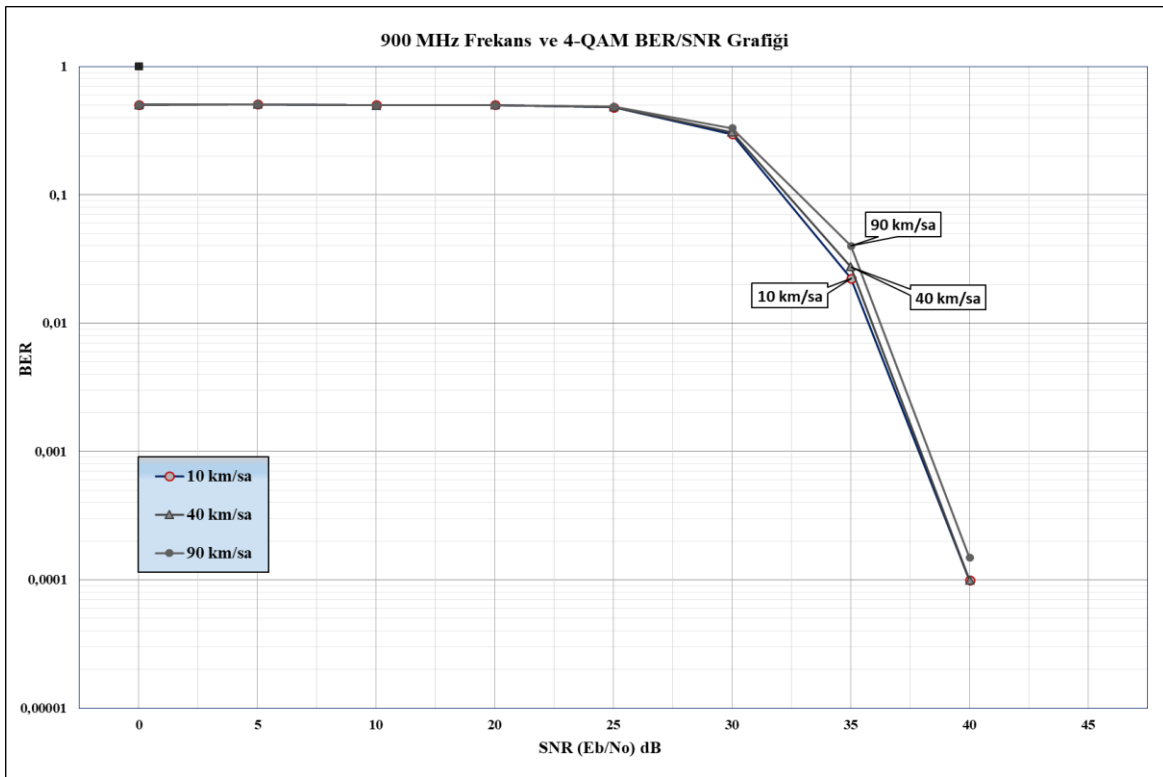
25	0,4822	0,4866	0,4922
30	0,3048	0,3404	0,3762
35	0,02475	0,04489	0,1141
40	9,921e-5	0,000248	0,004861
45	0	0	9,921e-5
50	0	0	0

Çizelge 4.7. 4-QAM veri modülasyonu ve farklı efektif hızlarda 60 GHz taşıyıcı frekans için elde edilen BER/SNR değerleri

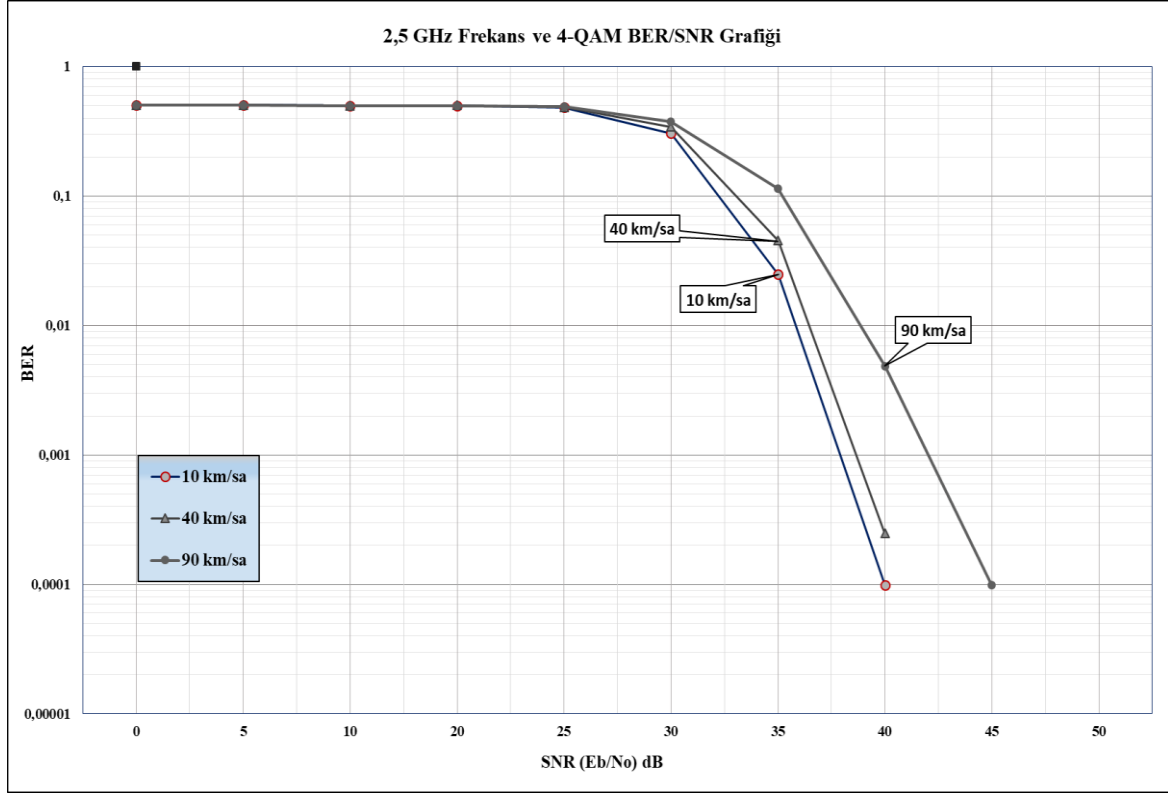
4-QAM veri modülasyonu ve 60 GHz frekans (Toplam bit sayısı = 20160)			
	Hız=10 km/sa $f_D=179,63$ Hz	Hız=40 km/sa $f_D=684,04$ Hz	Hız=90 km/sa $f_D=1524,71$ Hz
SNR (dB)	BER	BER	BER
0	0,5055	0,5066	0,5023
5	0,5055	0,5075	0,5021
10	0,5016	0,4978	0,5066
20	0,4996	0,5027	0,5025
25	0,4990	0,4982	0,5021
30	0,4355	0,4850	0,4920
35	0,3099	0,5049	0,5383
40	0,2213	0,5088	0,5569
45	0,1814	0,5130	0,5662

Çizelge 4.7.(devam) 4-QAM veri modülasyonu ve farklı efektif hızlarda 60 GHz taşıyıcı frekans için elde edilen BER/SNR değerleri

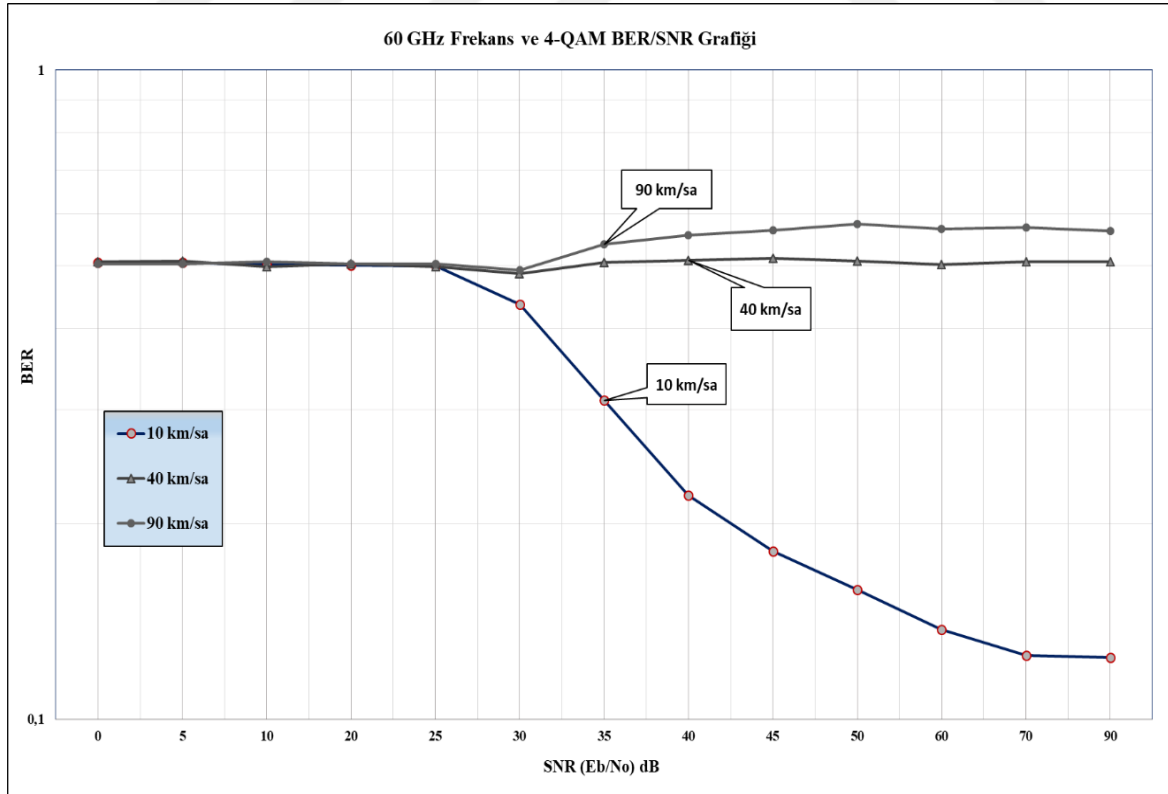
50	0,1581	0,5070	0,5784
60	0,1375	0,5015	0,5686
70	0,1254	0,5064	0,5716
90	0,1243	0,5069	0,5646



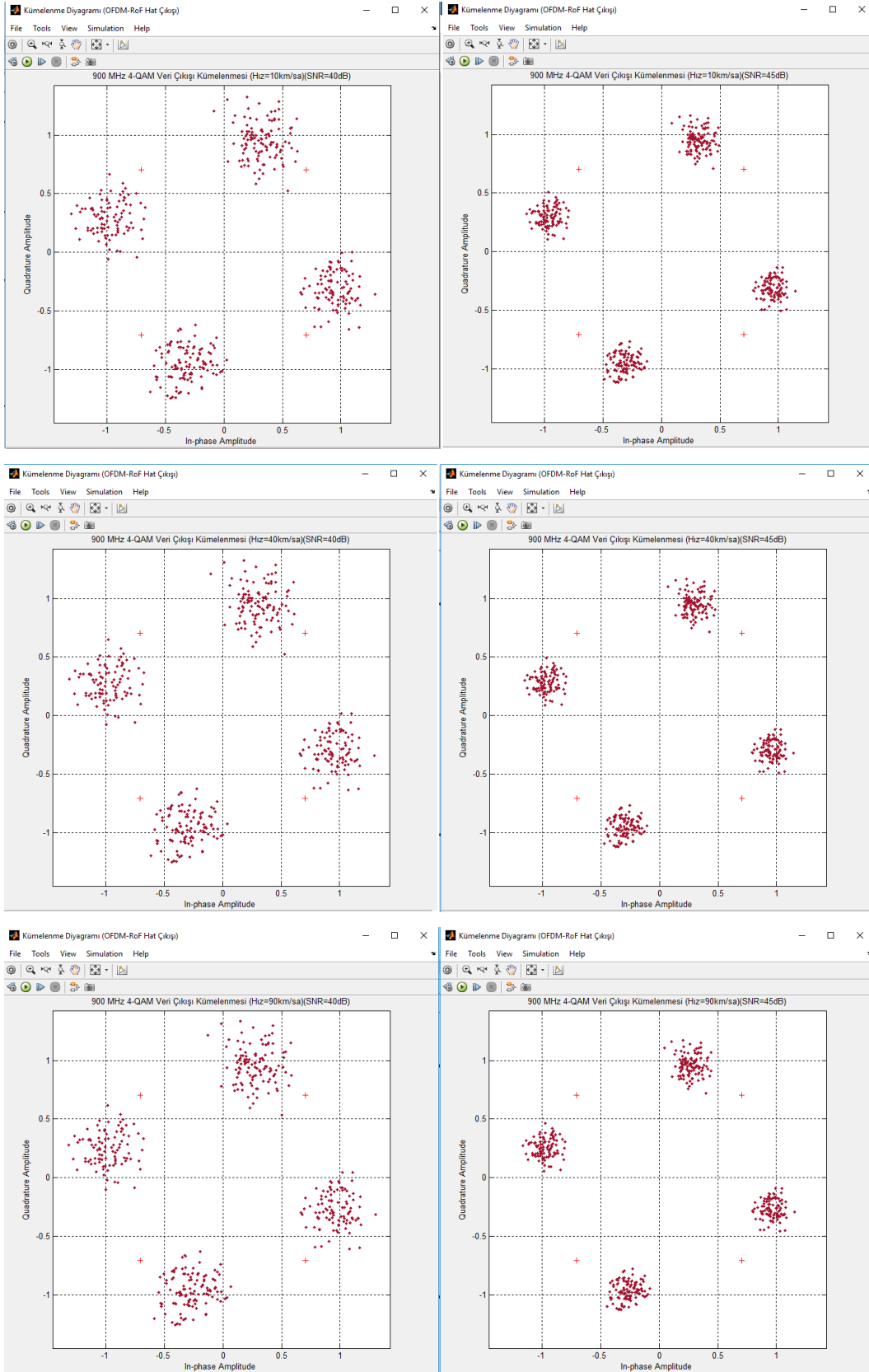
Şekil 4.16. 900 MHz ve 4-QAM için farklı hızlardaki BER/SNR grafiği



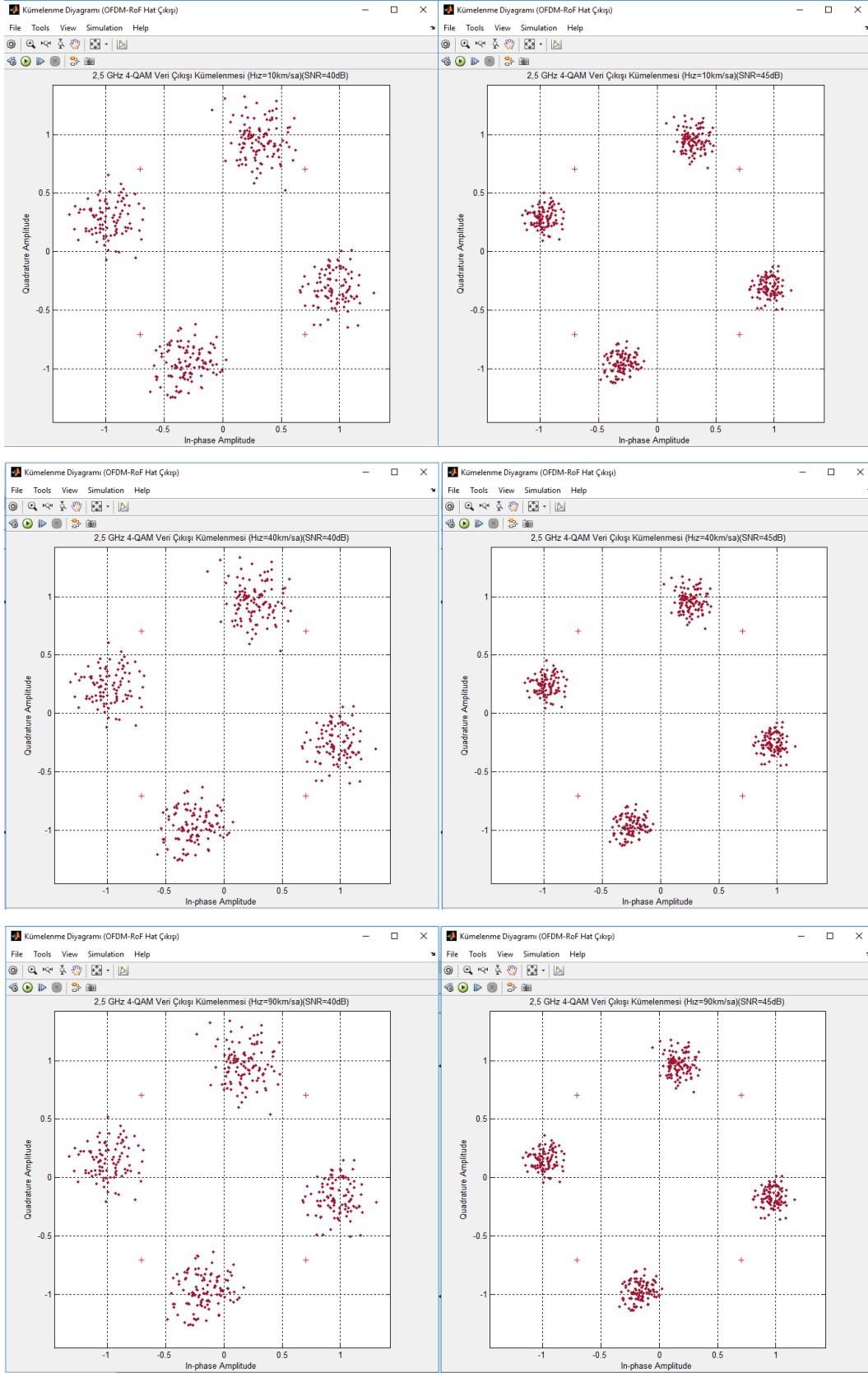
Şekil 4.17. 2,5 GHz ve 4-QAM için farklı hızlardaki BER/SNR grafiği



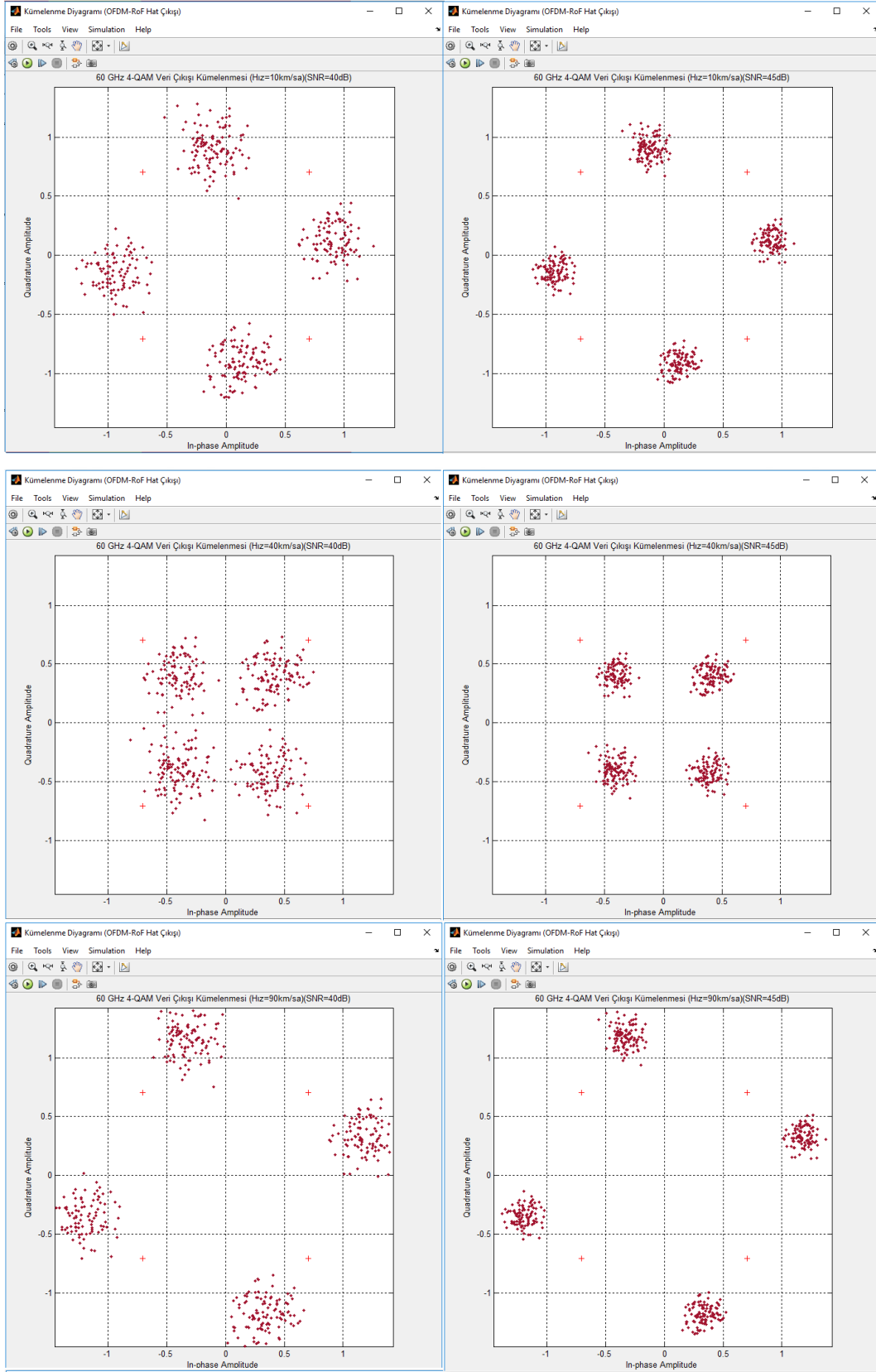
Şekil 4.18. 60 GHz ve 4-QAM için farklı hızlardaki BER/SNR grafiği



Şekil 4.19. 900 MHz ve 4-QAM için farklı SNR ve hızlardaki kümelendirme çıkış diyagramları



Şekil 4.20. 2,5 GHz ve 4-QAM için farklı SNR ve hızlardaki kümelene çıkış diyagramları



Şekil 4.21. 60 GHz ve 4-QAM için farklı SNR ve hızlardaki kümelene çıkış diyagramları

Hız ve diğer faktörlerin benzetimi için kullanılan modelde Rayleigh Sönümlenme Kanalı'nın etkisi, efektif araç hızı (V_{eff}) ve taşıyıcı frekansın da (f_0) hesaplandığı eşitlik (Eş. 4.6) ile elde edilen doppler frekansının (f_D) değişimiyle birlikte görülmektedir. Dolayısıyla aynı taşıyıcı frekans için hızın artışıyla birlikte f_D değeri de artmaktadır (Çizelge 4.4). Örneğin; 2,5 GHz taşıyıcı frekans için hesaplanan f_D değerleriyle alınan sonuçlara bakılırsa; 40 dB SNR değerinde 10 km/sa için BER değeri $0,9921e-4$; 40 km/sa için $2,48e-4$ ve 90 km/sa için ise $48,61e-4$ olarak elde edilmektedir (Çizelge 4.6). Sonuç olarak f_D değerinin artması (yani efektif hız ve taşıyıcı frekansın artması) çok doğrusal olmamakla birlikte aynı BER değeri için gereken SNR değerinin de artmasına neden olmaktadır. Aynı şekilde, BER/SNR grafiklerinde de görüldüğü üzere, taşıyıcı frekansın artması ile birlikte aynı hızlardaki f_D değişimi ve dolayısıyla da SNR değerleri daha yüksek olmaktadır (Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18). Diğer taraftan elde edilen kümelenme diyagramlarında görüldüğü üzere hareketli kullanıcılar için etkisi gözlemlenen f_D , iletilen ve alınan veriler arasında faz kaymalarına ve genlikte yüksek oranda değişikliğe de neden olmaktadır (Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21). Ayrıca benzetim esnasında faz kaymalarının ve genlik değişimlerinin zamanla yer değiştirdiği ve hızların artmasıyla birlikte çok daha fazla etki ettiği de gözlemlenmiştir.

BER/SNR grafiklerinde görüldüğü şekilde düşük doppler frekanslarında BER/SNR ters orantılı olarak değişmektedir. Fakat çok daha yüksek frekanslarda ($f_0=60$ GHz ve $f_D=600-1600$ Hz olduğunda) BER düşüşü çok limitli olmaktadır. SNR yüksek olmasına rağmen BER oranı hala yüksek çıkmaktadır. Bu da kanal koşullarının çok hızlı değişikliğe uğraması ve olumsuz olmasından kaynaklanmaktadır. Çok yüksek SNR değerlerinde dâhi ($f_0=60$ GHz ve $V_{\text{eff}}=40$ km/sa ve 90 km/sa iken SNR=90 dB olduğunda) BER değerleri en fazla 0,12 ve 0,5 aralığında değişim göstermektedir (Çizelge 4.7).

4.3.2. Farklı veri modülasyonları ve mesafeler için performans analizi

Bölüm 4.3.1'de yer alan ve farklı efektif hızlar ve farklı taşıyıcı frekans etkileri altındaki BER/SNR ve kümelenme performanslarının hesaplanmasında kullanılan benzetim modelindeki fiber modelinin zayıflama etkisi 500 m mesafe için sabit olarak kullanılmaktadır (Şekil 4.14).

Bu bölümde gerçekleştirilen performans analizinde, farklı veri modülasyon tekniklerinin hız etkisi altında karşılaştırılması amacıyla; BPSK ve 4-QAM veri modülasyonları kullanılarak,

2,5 GHz taşıyıcı frekansında fiber mesafesinin değişmesiyle oluşan zayıflamanın, farklı SNR değerleri ve farklı efektif hızlar için BER değeri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kullanılan fiber optik mesafesine göre oluşan zayıflama değerleri Şekil 4.3'teki zayıflama modeline göre hesaplanmıştır (0,21 dB/km) (Zayıflama = $10\log K$).

Yapılan benzetim çalışması sonucunda, farklı SNR değerleri ve farklı fiber zayıflama mesafelerine göre elde edilen BER değerleri 4-QAM veri modülasyonu ve 10, 40 ve 90 km/sa hızları için sırasıyla Çizelge 4.8, Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.10'da; BPSK veri modülasyonu ve 10, 40 ve 90 km/sa hızları için ise sırasıyla Çizelge 4.11, Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'te yer almaktadır. Ayrıca, bu çizelgelerdeki değerlerden elde edilen Mesafe/BER grafikleri de 4-QAM veri modülasyonu için Şekil 4.22, Şekil 4.23, Şekil 4.24 ve Şekil 4.25'te; BPSK veri modülasyonu için ise Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmektedir. BPSK ve 4-QAM'in aynı SNR koşulları için karşılaştırması amacıyla 30 dB SNR ve farklı hızlardaki Mesafe/BER grafiği ise Şekil 4.30'da yer almaktadır.

Çizelge 4.8. 4-QAM, 10 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri

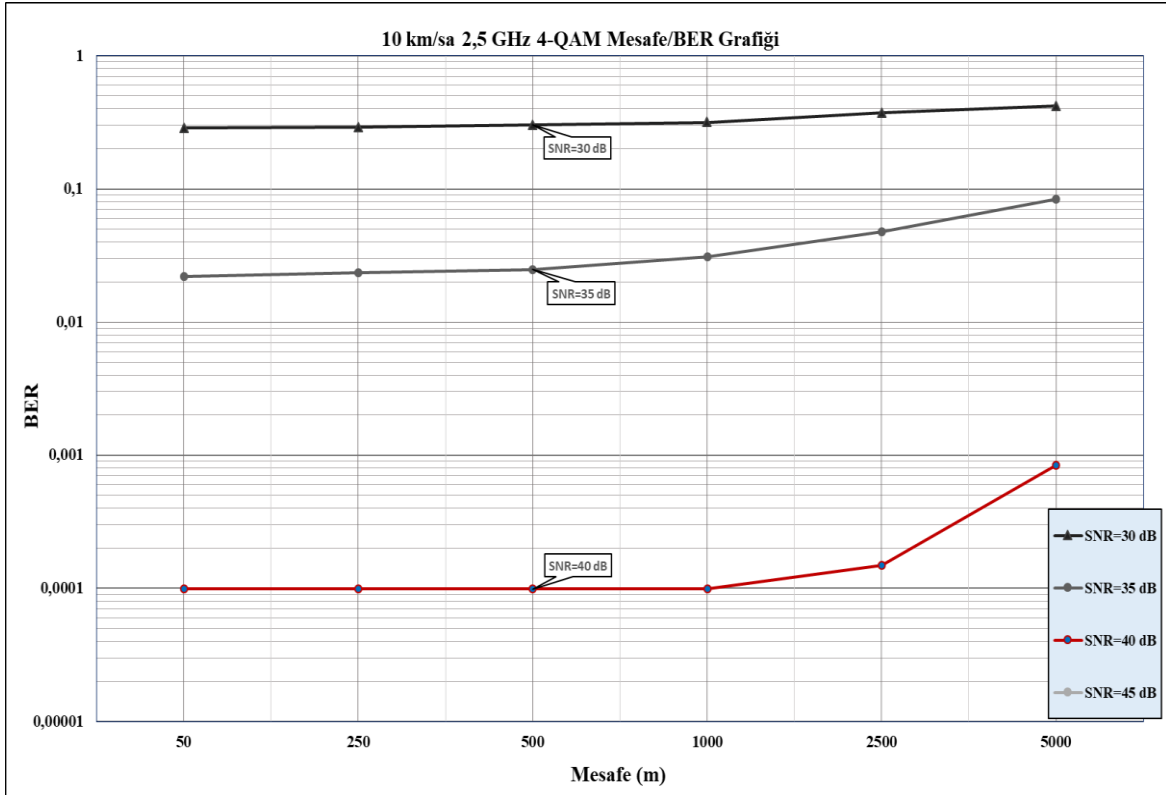
4-QAM veri modülasyonu ve 2,5 GHz frekans (Hız=10 km/sa) ($f_D = 18,51$ Hz) (Toplam bit sayısı = 20160)						
SNR(dB)	5	25	30	35	40	45
Mesafe (m)	BER	BER	BER	BER	BER	BER
10	0,5055	0,4803	0,2877	0,02138	9,921e-5	0
50	0,5054	0,4811	0,2881	0,02202	9,921e-5	0
100	0,5026	0,4812	0,2885	0,02242	9,921e-5	0
250	0,5062	0,4817	0,2929	0,02351	9,921e-5	0
500	0,5062	0,4822	0,3048	0,02475	9,921e-5	0
1000	0,5050	0,4848	0,3167	0,03085	9,921e-5	0
2500	0,5032	0,4924	0,3736	0,04762	1,488e-4	0
5000	0,5064	0,4896	0,4190	0,08428	8,433e-4	0

Çizelge 4.9. 4-QAM, 40 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri

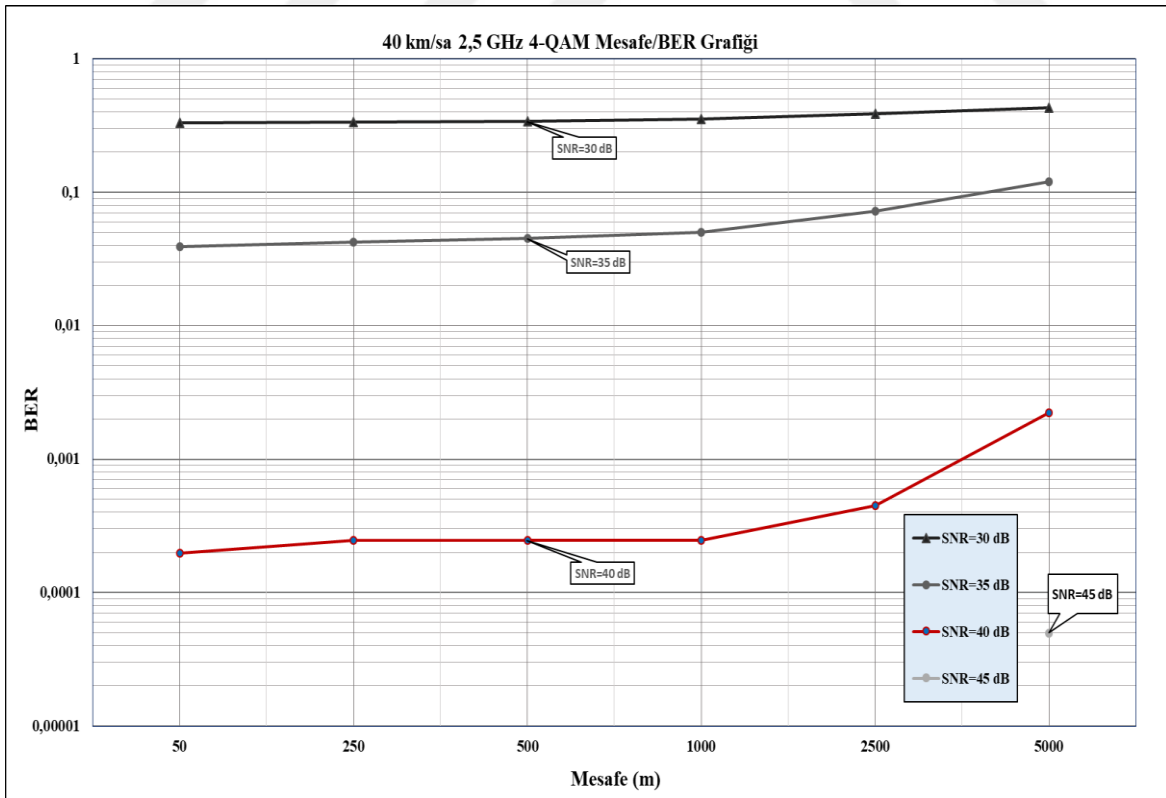
4-QAM veri modülasyonu ve 2,5 GHz frekans (Hız=40 km/sa) ($f_D = 39,52$ Hz) (Toplam bit sayısı = 20160)						
SNR(dB)	5	25	30	35	40	45
Mesafe (m)	BER	BER	BER	BER	BER	BER
10	0,5061	0,4885	0,3287	0,03889	1,984e-4	0
50	0,5058	0,4875	0,3299	0,03929	1,984e-4	0
100	0,5060	0,4885	0,3324	0,04028	1,984e-4	0
250	0,5063	0,4867	0,3351	0,04206	2,48e-4	0
500	0,5066	0,4866	0,3404	0,04489	2,48e-4	0
1000	0,5054	0,4889	0,3532	0,04985	2,48e-4	0
2500	0,5031	0,4923	0,3880	0,07257	4,464e-4	0
5000	0,5061	0,4870	0,4288	0,1206	0,002232	4,96e-5

Çizelge 4.10. 4-QAM, 90 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri

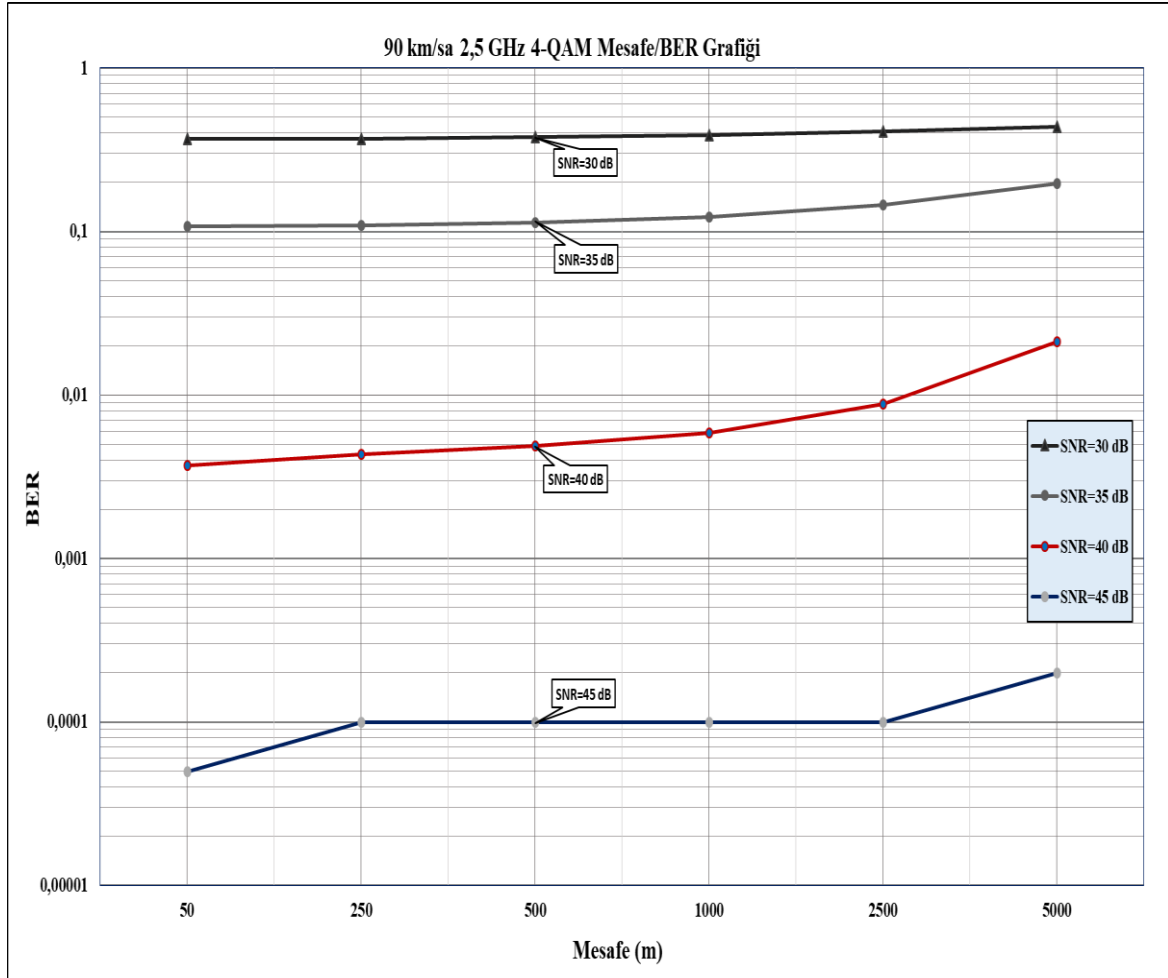
4-QAM veri modülasyonu ve 2,5 GHz frekans (Hız=90 km/sa) ($f_D = 74,55$ Hz) (Toplam bit sayısı = 20160)						
SNR(dB)	5	25	30	35	40	45
Mesafe (m)	BER	BER	BER	BER	BER	BER
10	0,5060	0,4925	0,3666	0,1075	0,00372	4,96e-5
50	0,5062	0,4920	0,3667	0,1082	0,00372	4,96e-5
100	0,5062	0,4909	0,3657	0,1072	0,003819	4,96e-5
250	0,5059	0,4897	0,3691	0,1085	0,004315	9,921e-5
500	0,5068	0,4922	0,3762	0,1141	0,004861	9,921e-5
1000	0,5067	0,4902	0,3882	0,1232	0,005853	9,921e-5
2500	0,5053	0,4936	0,4094	0,1448	0,008829	9,921e-5
5000	0,5050	0,4852	0,4368	0,1978	0,02108	1,984e-4



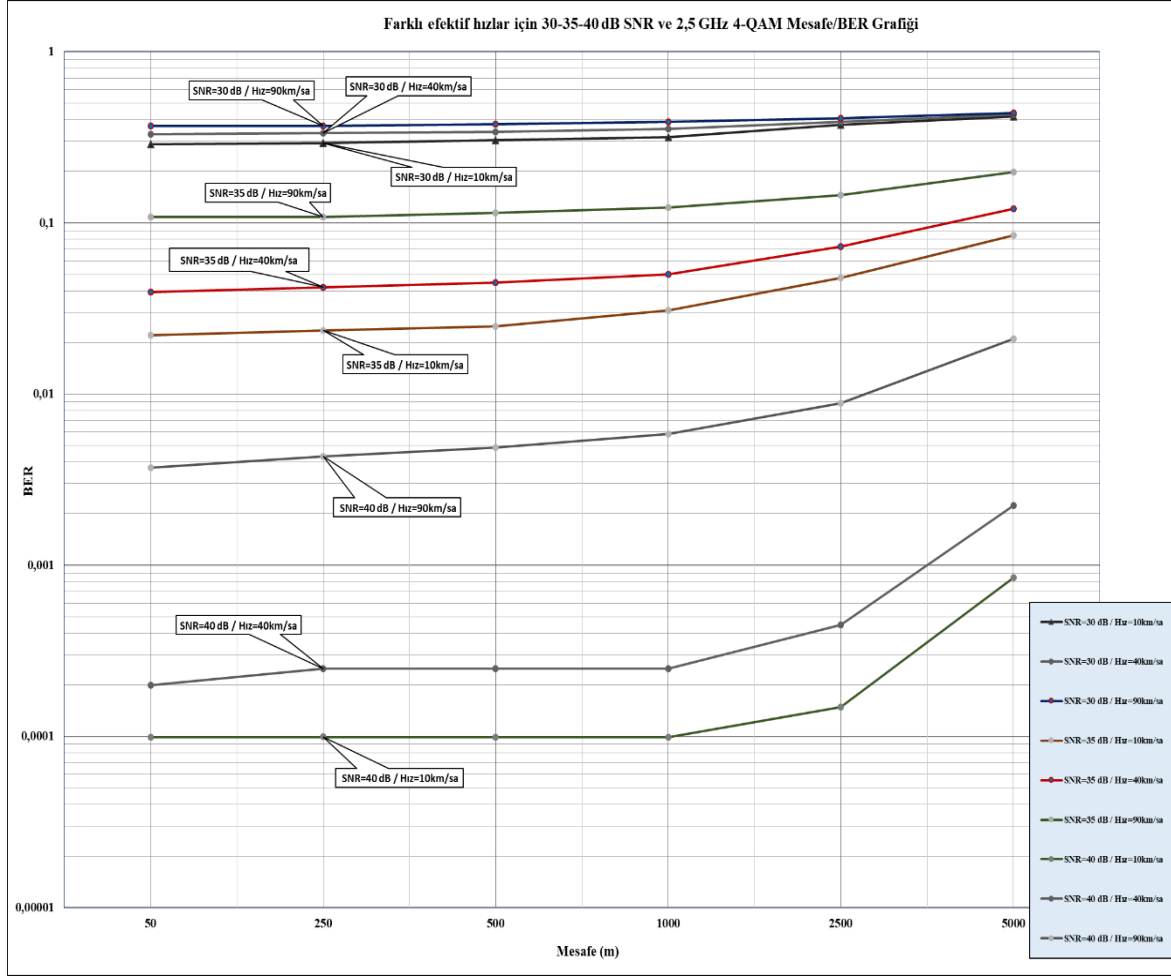
Şekil 4.22. 4-QAM, 10 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği



Şekil 4.23. 4-QAM, 40 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği



Şekil 4.24. 4-QAM, 90 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği



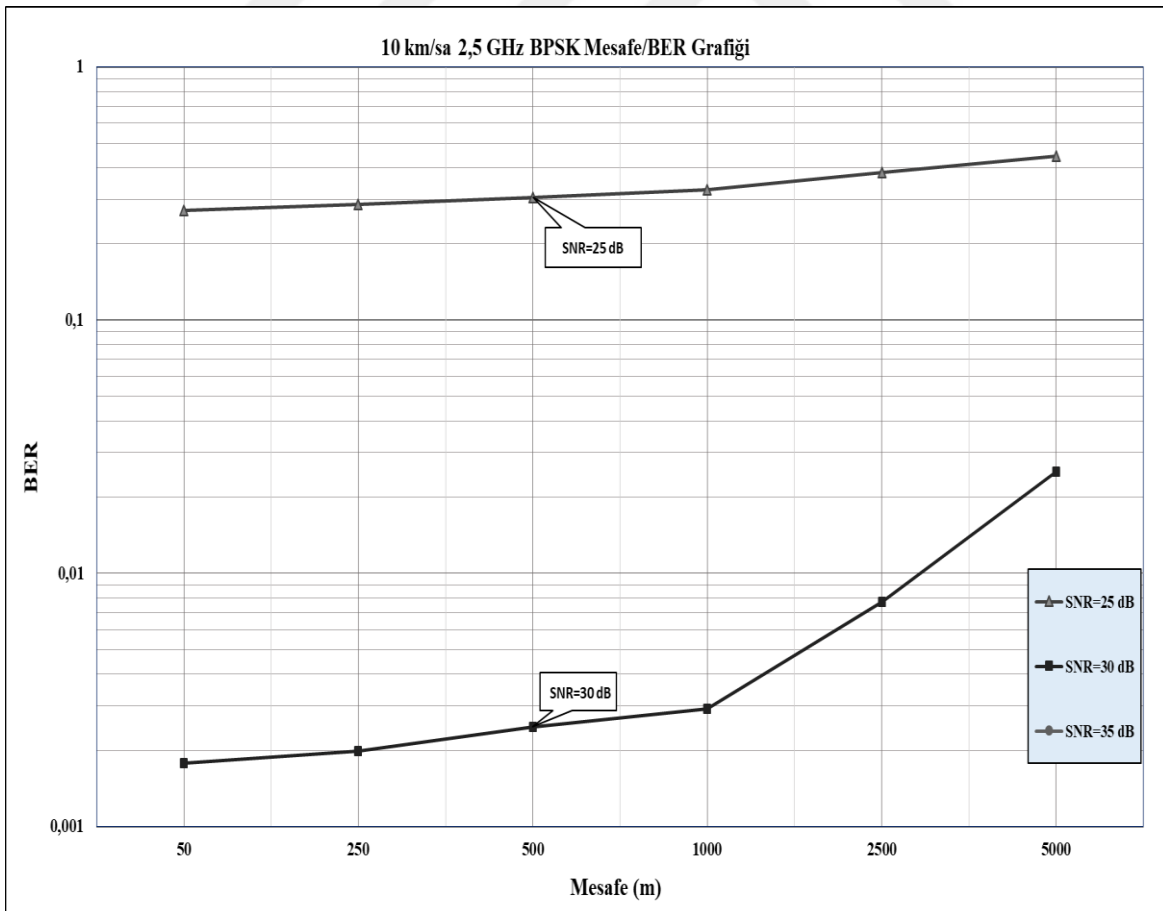
Şekil 4.25. 4-QAM, farklı hızlar ve SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği

Çizelge 4.11. BPSK, 10 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri

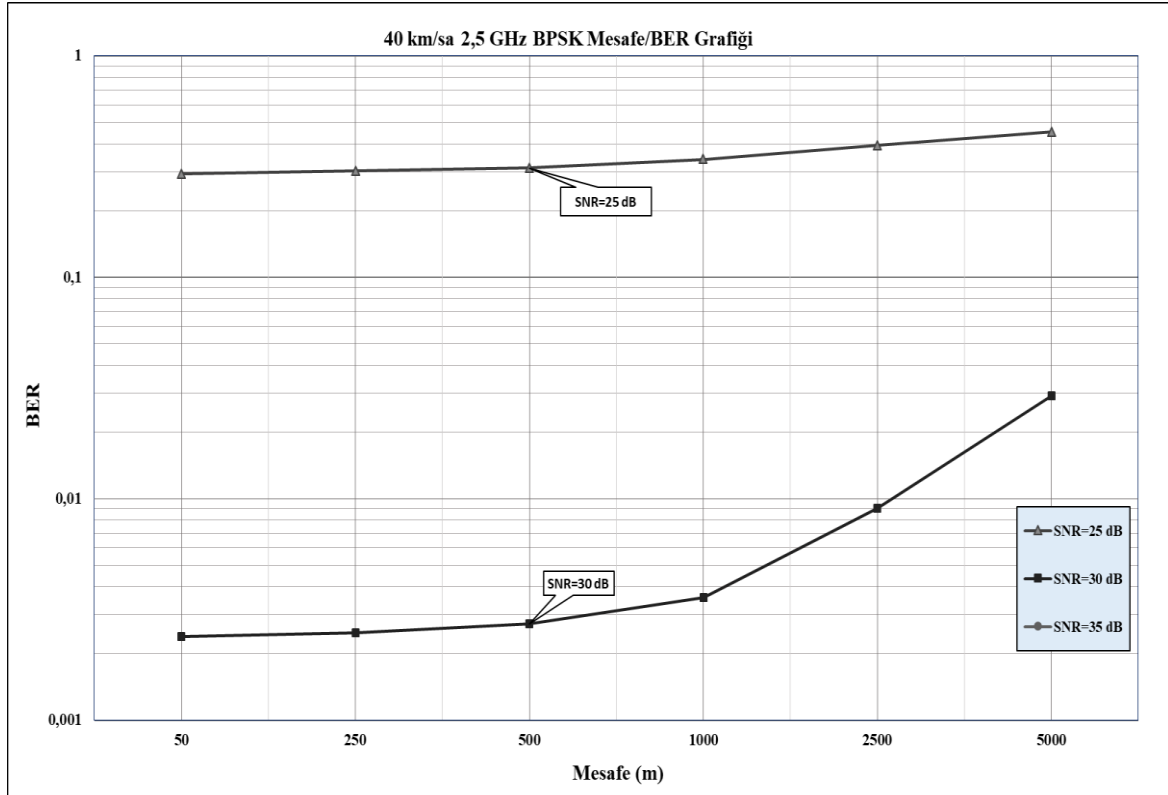
BPSK veri modülasyonu ve 2,5 GHz frekans (Hız=10 km/sa) ($f_D = 18,51$ Hz) (Toplam bit sayısı = 20160)						
SNR(dB)	5	25	30	35	40	45
Mesafe (m)	BER	BER	BER	BER	BER	BER
10	0,5038	0,2719	0,001786	0	0	0
50	0,5033	0,2716	0,001786	0	0	0
100	0,5037	0,2747	0,001786	0	0	0
250	0,5049	0,2858	0,001984	0	0	0
500	0,5041	0,3065	0,00248	0	0	0

Çizelge 4.13. (devam) BPSK, 90 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için elde edilen Mesafe/BER değerleri

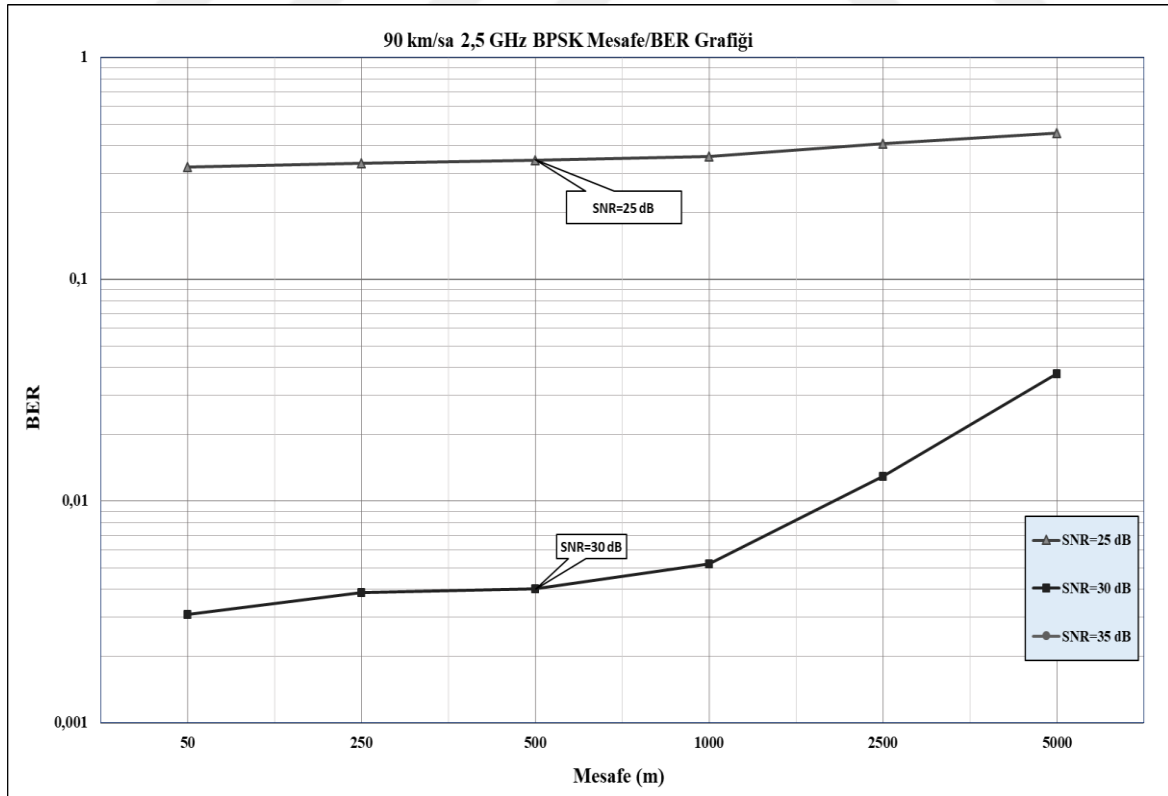
10	0,5026	0,3205	0,003075	0	0	0
50	0,5021	0,3210	0,003075	0	0	0
100	0,5021	0,3245	0,003075	0	0	0
250	0,5022	0,3330	0,003869	0	0	0
500	0,5038	0,3438	0,004018	0	0	0
1000	0,5061	0,3574	0,005208	0	0	0
2500	0,5039	0,4069	0,01290	0	0	0
5000	0,5053	0,4555	0,03735	0	0	0



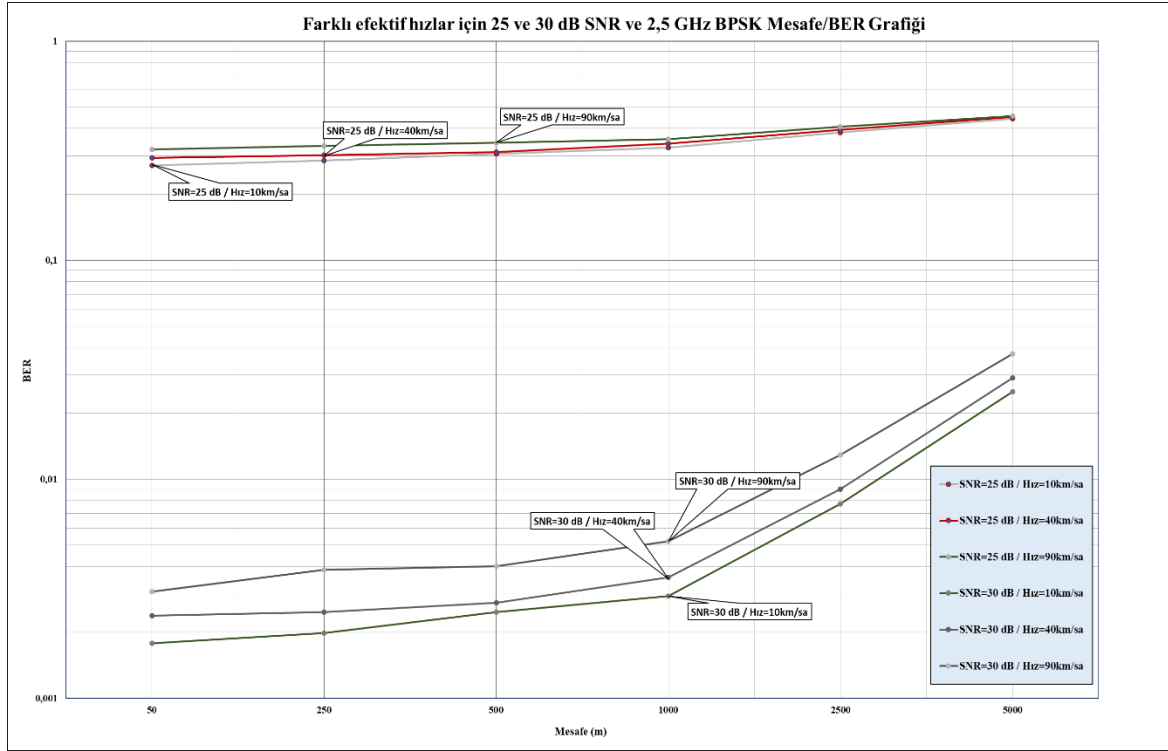
Şekil 4.26. BPSK, 10 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği



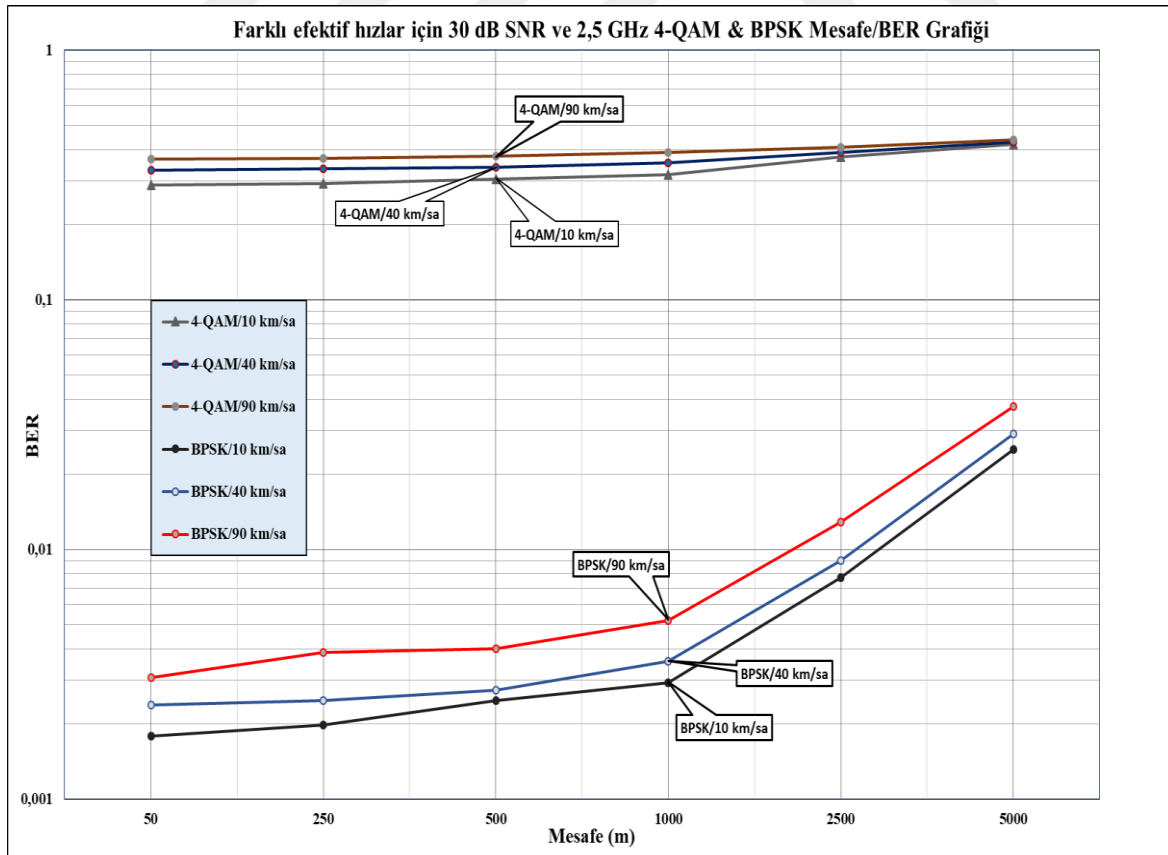
Şekil 4.27. BPSK, 40 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği



Şekil 4.28. BPSK, 90 km/sa hız ve farklı SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği



Şekil 4.29. BPSK, farklı hızlar ve SNR değerleri için Mesafe/BER grafiği



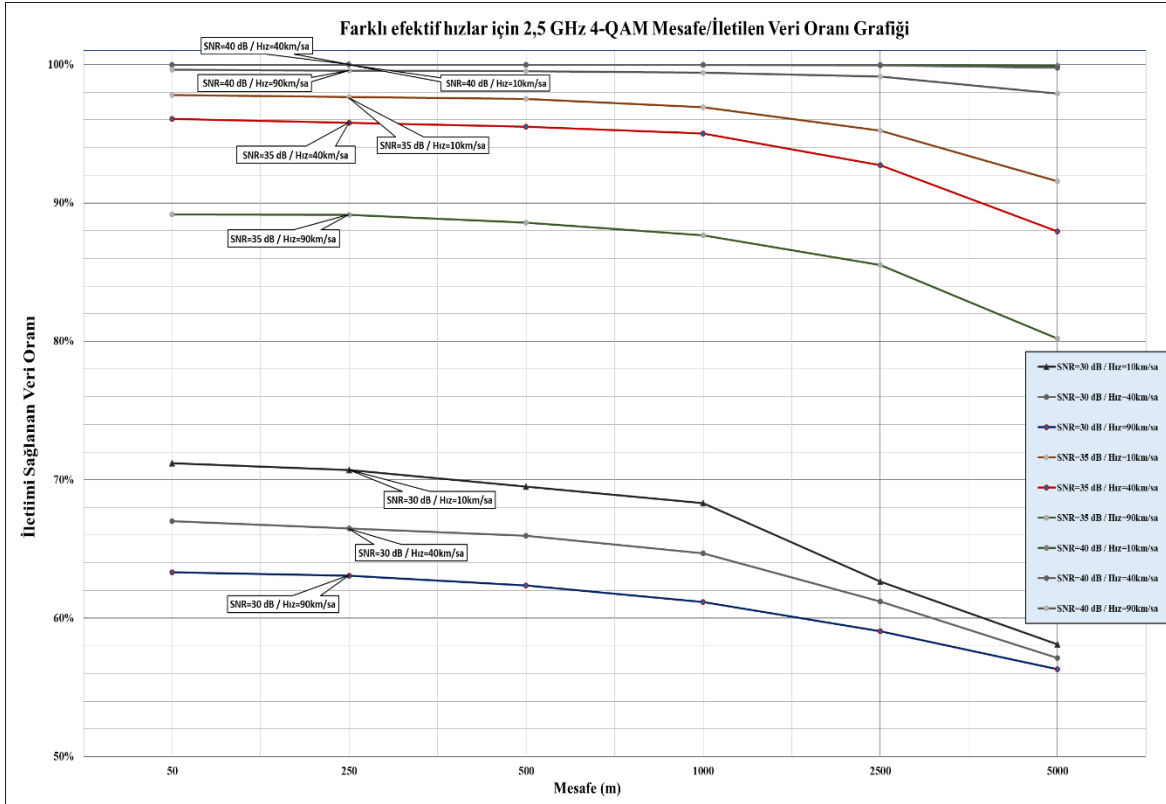
Şekil 4.30. BPSK ve 4-QAM için 30 dB SNR ve farklı hızlardaki Mesafe/BER grafiği

Farklı fiber mesafelerine bağlı sinyal gücü zayıflaması ile BPSK ve 4-QAM modülasyonları için yapılan benzetim çalışmasında, fiber mesafesinin ve dolayısıyla sinyal zayıflamasının artmasıyla birlikte BER değerinin de arttığı görülmektedir. Aynı zamanda, kullanıcı hızlarının ve taşıyıcı frekansın artmasıyla birlikte fiber mesafesinden kaynaklanan sinyal zayıflamasının BER değeri üzerinde artan bir etki ortaya çıkardığı görülebilmektedir. BPSK ve 4-QAM ile elde edilen değerlerde SNR artışıyla birlikte BER değerleri düşmektedir (Şekil 4.25 ve 4.29).

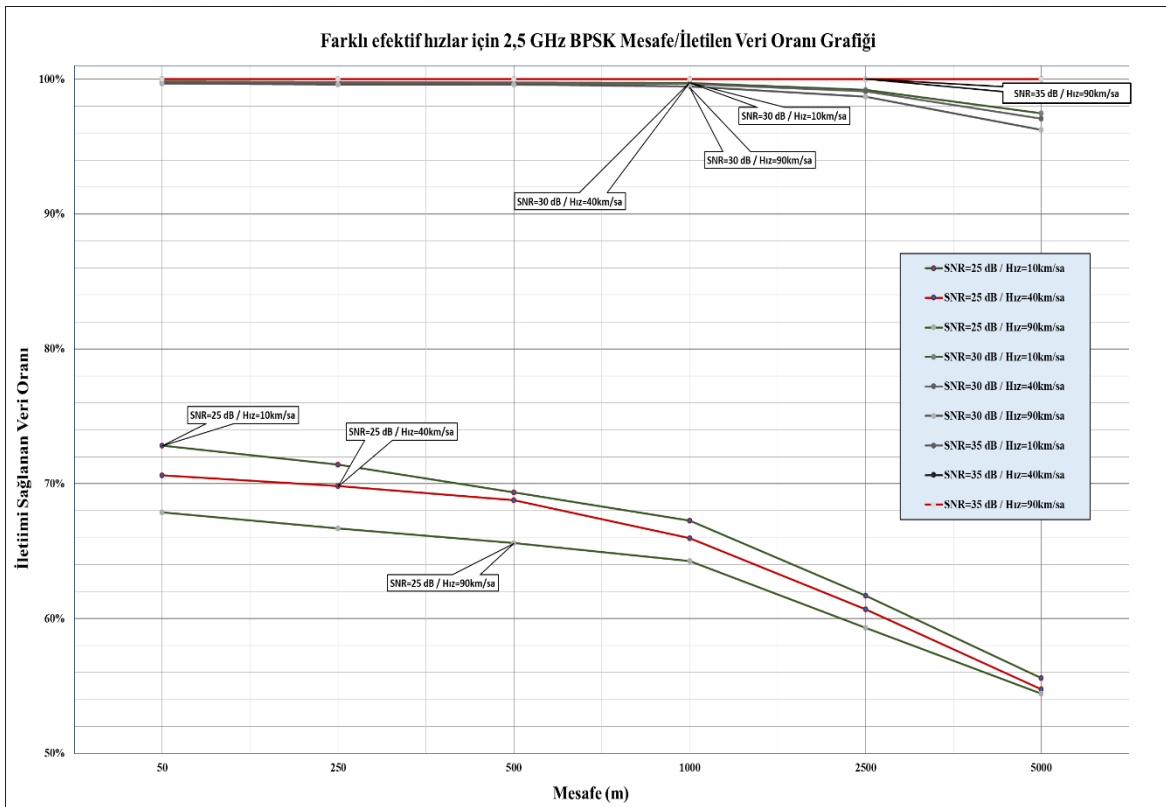
Diğer taraftan, 4-QAM ile karşılaştırıldığında BPSK için BER'deki azalma, daha düşük SNR değerleri için daha yüksek oranlarda yaşanmıştır. 4-QAM için SNR değeri 45 dB ($V_{\text{eff}}=10$ km/sa ve 40 km/sa için) ve daha yüksek ($V_{\text{eff}}=90$ km/sa için) olduğunda BER değeri en düşük değerine ulaşırken (Çizelge 4.8, 4.9 ve 4.10), BPSK için tüm hızlarda 35 dB SNR değerinde en düşük BER değeri elde edilebilmektedir (Çizelge 4.11, 4.12 ve 4.13). Özellikle daha düşük SNR değerleri söz konusu olduğunda ve zayıflama etkisi daha az olduğu durumlarda; BPSK, 4-QAM veri modülasyonuna göre daha verimli olmaktadır. Şekil 4.30'da aynı SNR değeri için yapılan karşılaştırmada da görüldüğü üzere, mesafelere göre BPSK için BER değişimi daha yüksek oranda olmaktadır. Aynı mesafeler için BER değeri BPSK'de çok daha düşük olarak gerçekleşmiştir.

4-QAM ve BPSK veri modülasyonları kullanılarak farklı fiber mesafeleri ile farklı kullanıcı hızları için elde edilmiş olan yukarıdaki verilerden yola çıkarak, hızlı hareketli kullanıcılar için kullanılan haberleşme sisteminin veri iletimi oranlarının değerlendirilebilmesi amacıyla, BPSK ve 4-QAM veri modülasyonları için (2,5 GHz taşıyıcı frekansında) fiber zayıflama mesafesi, SNR değeri ve kullanıcı hızındaki değişimin iletimi sağlanan veri oranı üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Yapılan benzetim çalışması sonucunda elde edilen ve SNR, kullanıcı hızı ve fiber zayıflama mesafelerine göre değişen veri iletimi oranı (% olarak) değerlerine ait grafikler 4-QAM veri modülasyonu için Şekil 4.31'de, BPSK veri modülasyonu için de Şekil 4.32'de verilmektedir.



Şekil 4.31. 4-QAM için farklı SNR ve farklı hızlardaki Mesafe/Veri iletim oranı grafiği



Şekil 4.32. BPSK için farklı SNR ve farklı hızlardaki Mesafe/Veri İletim Oranı grafiği

Son kısımda yapılan BPSK ve 4-QAM için veri iletim oranlarının incelenmesi sonucunda ise; 4-QAM modülasyonu için (Şekil 4.31) 30 dB SNR değerinde yaklaşık 2000 m mesafeye kadar bütün hızlarda %60 - %70 arasında oluşan bir verim sağlanmaktadır. 1000 m'den sonra ise verim oldukça düşmektedir. Özellikle 90 km/sa hız için yaklaşık 2000 m'den sonra %60'ın da altına düşen bir verim söz konusudur. 35 dB için de 90 km/sa hızda verim %90'ın üzerinde çıkamamaktadır. 10 km/sa ve 40 km/sa hızlarda ise 35 dB'de verim 500 m mesafeye kadar %98 ve üzerinde oluşmaktadır. 40 dB ve üzerindeki SNR değerleri için tüm hızlarda %100'e yakın bir verim söz konusu olmakla birlikte, 90 km/sa için bu oran 2500 m'den sonra %98'in altına düşmektedir.

BPSK için ise (Şekil 4.32) düşük SNR değerlerindeki iletim veriminin 4-QAM'e göre daha yüksek oranda gerçekleştiği görülmektedir. 25 dB SNR için 2500 m'ye kadar %60-70 arası bir verim oluşmaktadır. Bu oran 10 km/sa ve 40 km/sa hızlarda 500 m'ye kadar %70 ve civarında olmaktadır. SNR değeri 30 dB ve 35 dB olduğunda verim %100'e yakın olmakla birlikte, 30 dB'de 2500 m'den sonra verim, özellikle artan hıza bağlı olarak büyük bir düşüş göstermiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında da ele alındığı üzere, yüksek kapasite gerektiren gelecek nesil haberleşme sistemleri mm-dalga spektrumunda bulunan frekans bantlarında uygulama alanı bulabilecektir. Özellikle 60 GHz frekans bandının, yüksek kalitede video iletimi ve kablosuz yükleme gibi ultra hızlı veri transferi uygulamalarında kullanılması öngörülmektedir. Bunun yanında mm-dalgalar RF sinyal yayımlanması aşamasında OFDM-RoF sistemlerinde de kullanılacak olan önemli bir frekans alanıdır.

Diğer taraftan, gelecek nesil erişim şebekelerinin konfigürasyon olarak esnek bir yapıda olmasının yanı sıra maliyet olarak da hesaplı olması gerekmektedir. Bu açıdan bakıldığında OFDM teknolojisi spektral verimlilik (her bir hücresele alan için veri miktarı) ve konfigürasyon çeşitliliği ile düşük maliyetli elektronik cihazların kullanımı ve optik ortamda yaşanan güçlülere karşı dirençli olması gibi nedenlerden dolayı gelecek nesil haberleşme sistemleri için uygun bir çözüm olacaktır.

Bununla birlikte, beşinci nesil (5G) haberleşme alt yapısı hazırlık aşamasındadır ve mükemmel bir kablosuz bağlantı ortamı (www – World Wide Wireless Web) sağlaması beklenmektedir. Çok sayıda küçük ve akıllı kablosuz cihazın 5G kablosuz şebekesine erişim sağlaması ve artan internet trafiği ile birlikte iletim hızı da artmış olacaktır. Örneğin, 5G sistemlerde 10 Gb/s tepe veri hızları beklenmektedir. 5G şebekelerinin mevcut ve yeni kablosuz şebeke teknolojilerini birleştirmesi ve birbiri arasında geçiş yapabilme ve dolaşım imkânı sunması beklenmektedir. 5G şebekelerinin ayrıca, yüksek spektral verimlilik, düşük enerji tüketimi, daha geniş kapsama alanlarında yüksek veri hızı sağlama, düşük gecikmeler, daha fazla sayıda cihazı destekleme, altyapı maliyetlerinde düşüş ve daha güvenilir haberleşme ortamı gibi birçok alanda gelişmeler sağlaması da beklenmektedir. Bunlardan da görüleceği üzere 5G radyo hücreleri çok daha küçük olacaktır. Dolayısıyla, RoF ve fiber iletim ortamları 5G şebekeleri için kablosuz ortamı azaltmak açısından önemli bir rol üstlenecektir [32].

Bu tez çalışmasında, esnek bir şebeke yapısına sahip olmasıyla birlikte maliyet açısından da etkin bir sistem olan ve her geçen yıl daha yüksek hızda ve yoğunlukta bir hizmet kalitesi gerektiren gelecek nesil haberleşme teknolojileri için alt yapı oluşturulması öngörülen

OFDM-RoF iletim sisteminin, farklı modülasyon teknikleri (BPSK, QPSK, 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM) için bit hata oranları ile sinyal gücü açısından performans analizi ile birlikte Rayleigh sönümlenme etkisi ve doppler frekans etkisi eklenerek farklı hızlarda ve farklı fiber mesafelerindeki sinyal zayıflamalarında BPSK ve 4-QAM veri modülasyonları için performans analizi yapılmıştır.

PSK ve QAM modülasyonlarının her ikisi için de modülasyon seviyesinin artmasıyla birlikte sembol başına daha fazla bit iletimi gerçekleştiğinden spektrumun daha verimli kullanımı mümkün olmaktadır. Ancak bu durum benzetim sonuçlarında da görüldüğü üzere daha yüksek bir SNR (devredeki sinyalin gücünün gürültü gücüne oranı) değeri gerektirmektedir. Her iki modülasyon tekniğinde de modülasyon seviyesinin artması aynı kanal koşullarının sürdürülebilmesi için SNR değerinin de artmasını gerektirmektedir.

Benzetim sonuçlarına göre, düşük seviyeli modülasyon formatlarında kümelenme diyagramları üzerindeki semboller arasındaki mesafe en uzak olduğundan, semboller arası girişim olması olasılığı daha düşük olmakta ve daha kararlı bir yapı göstermektedirler. Dolayısıyla devredeki gürültü ve bozulmalara karşı da daha dayanıklı olmaktadır. Sonuç olarak, sembol başına bit sayısının artması, veri iletim hızının artması ve spektrumun verimli kullanımı için yüksek seviyeli modülasyon teknikleri daha uygun; gürültü ve bozulma faktörleri yüksek olan ortamlar için ise düşük seviyeli ve daha kararlı modülasyon formatları daha uygun olmaktadır.

Diğer taraftan, farklı hızlar ve taşıyıcı frekanslar ile farklı fiber mesafelerinin oluşturduğu farklı kanal koşulları için yapılan performans analizine göre, farklı modülasyon tekniklerinin yanı sıra hız ve taşıyıcı frekans gibi faktörlerin de OFDM-RoF sistemlerinin performansını etkileyen önemli parametreler olduğu görülmüştür. Beklendiği üzere, hız ve taşıyıcı frekansların artışı ve aynı şekilde fiber mesafelerinin artışı BER değerlerinde önemli oranda artışa neden olmuş ve aynı şekilde alınan veri kümelenme diyagramlarında da önemli oranlarda faz ve genlik kaymalarına yol açmıştır.

Uzun mesafelerde ve daha yüksek seviyeli modülasyonlarda sistemde oluşan kararsızlıktan kaynaklı olarak verinin iletiminde verim düşüşleri yaşanmaktadır. Dolayısıyla, hız ve buna bağlı diğer faktörler düşünüldüğünde verimin artırılması için iletim mesafesinin mümkün

olduğu kadar az olması ve aynı zamanda iletim ve modülasyon kalitesinin de artırılması gerekmektedir.

OFDM-RoF sisteminin gelecek nesil haberleşme alt yapısı olarak kullanılacağı alanların arasında özellikle yüksek hızlı hareketli haberleşme (örn: araç haberleşmesi (V2X)) ve benzeri diğer alanlar olduğu düşünülürse, son kısımda ele alınan verimli iletim performansının %90 ve üzerinde olacak şekilde elde edilebilmesi için özellikle benzetim çalışmasında kullanılan 2,5 GHz ve üzerindeki taşıyıcı frekans bantlarındaki (örn. 60 GHz) hız, mesafe ve ortamdan kaynaklı diğer faktörlerin daha fazla oranda oluşacak zayıflatıcı etkilerinin en uygun şekilde düzeltilmesi de önemli bir konu olarak öne çıkmaktadır.

Aynı zamanda bu çalışmada sadece fiber zayıflamasından ve (hız ve taşıyıcı frekansa göre hesaplanan) doppler etkisinden kaynaklı kanal koşulları benzetim için kullanılmış olmakla birlikte, gerçek iletim ortamındaki farklı birçok faktörün de değerlendirilmesi ile meydana gelebilecek etkilerin daha fazla olacağı öngörülebilir. Dolayısıyla gelecek nesil haberleşme alt yapılarında birçok faktörün ortak olarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

Sonraki aşamada yapılabilecek çalışmalarda, özellikle mm-dalga frekans bandında çalışan ve gelecek nesil haberleşme alt yapısı olarak öngörülen OFDM-RoF sisteminin gerçek koşullara daha yakın olacak şekilde benzetimi için farklı kanal koşulları da benzetim çalışmalarına eklenerek iletim performansını ve kalitesini artırıcı etki gösterebilecek modeller geliştirilebilir. Özellikle hızlı hareketli kullanıcı haberleşmesi konusunda doppler etkisinden ve gerçek iletim ortamındaki gibi ele alınabilecek farklı etkenlerden kaynaklanan faz ve genlik değişimlerini engelleyecek şekilde kanal tahmin yöntemleri veya devredeki iletim koşullarını iyileştirici farklı devre elemanları kullanılarak farklı çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

1. Kaur, S., Srivastava, M., Bhatia, K. S. (2015). Radio over Fiber Technology-A Review. *An International Journal of Engineering Sciences*, International Conference of Technology, Management and Social Sciences-15 Special Issue, 85-89.
2. Karthikeyan, R., Dr. Prakasam, S. (2014). A Review-OFDM-RoF (Radio over Fiber) System for Wireless Network. *International Journal of Research in Computer and Communication Technology*, 3(3), 344-349.
3. Sarup, V., Gupta, A. (2015). A Study of various Trends and Enabling Technologies in Radio over Fiber (RoF) Systems. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 126(20), 2606–2611.
4. Lim, C., Bakaul, M., Yang, Y. (2010). Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies. *Journal of Lightwave Technology*, 28(4), 390-405.
5. Arslan, S., Saritaş, M. (2017). The effects of OFDM design parameters on the V2X communication performance: A survey. *Elsevier Incorporated, Vehicular Communications*. 7, 1-6.
6. Ronghui, Q. (2009, September). New Optoelectronic Devices and Technologies for RoF. *Zhongxing Telecommunication Equipment Communications*, 7(3), 6-11.
7. Mitchell, J. E. (2009). Radio-over-Fiber (RoF) Networks. In A. Shami et al. (eds.), *Broadband Access Networks, Optical Networks*. (First edition). Boston: Springer Science+Business Media LLC., 283-300.
8. İnternet: Prasnal, L., Nycz, M., Maruszak, R. (2010, November). Radio-Over-Fiber-Interesting Details, Applications. URL: <https://tr.scribd.com/document/291563376/RoF-pdf>. Son erişim tarihi: 24.09.2018.
9. Novak, D., Waterhouse, R. B., Nirmalathas, A., Lim, C., Gamage, P.A., Jr., Clark, T.R., Dennis, M.L., Nanzer, J.A. (2016, January). Radio-Over-Fiber Technologies for Emerging Wireless Systems. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 52(1), 1-11.
10. Shaddad, R. Q., Mohammad, A. B., AI-Hetar, A. M., AI-Gailani, S. A. (2013). *Wireless Signals Transport Schemes in Fiber Wireless Systems*. Proceedings of IEEE 4th International Conference on Photonics, Melaka, Malaysia, 47-49.
11. Shizhong, X., Minghua, C., Hongwei, C. (2009, January). Advance in Microwave Photonics. *Zhongxing Telecommunication Equipment Communications*, 7(3), 1-5.
12. Bajwa, G., Singh, S. (2016, January). A review of millimeter wave generation for radio over fiber(ROF) systems. *An International Journal of Engineering Sciences*, 17, 403-408.
13. Saxena, A., Kaushik, S. (2015, June). A Review on Various OFDM Techniques and Their Applications. *International Journal of Science and Research*, 4(6), 2510-2513.

14. Chide, N., Deshmukh, S., Prof. Borole, P. B., Prof. Chore, N. (2013). An Overview of OFDM Variants and Their Applications. *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*. 4(2), 47-51.
15. Ballal, B. R., Chadha A., Satam, N. (2013, January). Orthogonal Frequency Division Multiplexing and its Applications. *International Journal of Science and Research*, 2(1), 325-328.
16. Mazin, A. N. (2012). *Green radio communication networks applying radio-over-fibre technology for wireless access*. Doctor of Philosophy Thesis, Middlesex University, London. 9-34,92.
17. Martin, E. (2015, May). *Photonic Generation of Millimetre Waves for Radio over Fibre Distribution Systems*. Doctor of Philosophy Thesis, Dublin City University, 28-60.
18. Singh, B., Singh, D. (2016, January). A Review on Advantages and Applications of Radio over Fiber System. *International Journal of Current Engineering and Technology*. 6(3), 1042-1044.
19. Ballal, B. R., Dr. Nema, S. (2012, April). Digital Radio Over Fiber Link to Overcome Impairments in Fiber Wireless Networks. *International Organization of Scientific Research Journal of Engineering*, 2(5), 966-970.
20. İnternet: Karabetsos, S., Mikroulis, S., Pikasis, E., Nassiopoulos, A. (2008). Radio-Over-Fiber Technology: A brief overview and the work at Research and Development for Telecommunications Laboratory. URL: http://www.temu.gr/2008/proceedings/papers/17July/session_4/45.pdf. Son erişim tarihi: 24.09.2018.
21. Ahmad, S. & Zafrullah, M. (2015). 40 Gb/s 4-QAM OFDM radio over fiber system at 60 GHz employing coherent detection. *Journal of Modern Optics*, 62(4), 296-301.
22. Ndujiuba, C. U., Oni, O., Ibhaze, A. E. (2015). Comparative Analysis of Digital Modulation Techniques in LTE 4G Systems. *Journal of Wireless Networking and Communications*, 5(2), 60-66.
23. Sari, S. (2007, September). *Modelling the Transport of Complex Modulation in Radio-over-Fibre Networks*. Doctor of Philosophy Thesis. Department of Electronic and Electrical Engineering University College London, 32, 42, 176-190.
24. Nawawi, N. B. M. (2008, May). *Investigation Of Stimulated Brillouin Scattering For The Generation Of Millimeter Wave For Radio Over Fiber System*. Master of Engineering (Electrical - Electronic & Telecommunication) Thesis, Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 1-3, 15-25.
25. Li, X. (2008). *Simulink-based Simulation of Quadrature Amplitude Modulation (QAM) System*. International Association of Journals and Conferences- International Journal of Modern Engineering, International Conference on Engineering & Technology, Nashville, Tennessee, USA, ENG 105 (205).

26. Lin, P. G. (2010, June). *OFDM Simulation in MATLAB*. Project for Degree of bachelor of science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 3-5.
27. Thakur, R., Mudgil, S. (2017, January). *Radio Over Fiber For Wireless Communication*. 6th International Conference on Recent Trends in Engineering, Science & Management, 866-873.
28. Woo, W. S. (2012, July). *Development of OFDM in WDM-Radio over Fiber Access Network*. Project for Master of Electrical Engineering (Communication), Faculty of Electrical and Electronic Engineering Tun Hussein Onn University of Malaysia, 9-24.
29. Razali, S. H. B. M. (2007, April). *Simulation of WCDMA Radio Over Fiber Technology*. Project for Master of Engineering (Electrical-Electronics and Telecommunication), Faculty of Electrical Engineering Universiti Teknologi Malaysia, 8-26, 47-51.
30. Mohamed, M. A., Samarah, A. S., Fath A., M. I. (2012, May). Study Of Performance Parameters Effects On OFDM Systems. *International Journal of Computer Science Issues*, 9(3), 410-417.
31. Mahros, A. M., Tharwat, M. M. (2012, December). Implementation of A Radio-Over-Fiber OFDM Communication System In The Simulink Environment. *International Research Association of Computer Science and Technology - International Journal of Advanced Computing, Engineering and Application*, 1(3), 123-128.
32. Fernando, X. N. (2014). *Radio over Fiber for Wireless Communications: From Fundamentals to Advanced Topics*. (First Edition). John Wiley & Sons, Ltd, 215-223.
33. Manhas P., Soni, M. K. (2016, September). Comparison of Various Channel Equalization Techniques in OFDM System using different Digital Modulations. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 3(3), 634-638.
34. Ravach, T. A. (2011). *Performance Analysis of OFDM Technology on Radio-over-Fiber Systems*. Master Thesis in Electronic Engineering and Telecommunications. Universidade Do Algarve, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 5-49.
35. Ashlaghi, A. A. (2015, December). *100 Gbps Orthogonal Frequency Division Multiplexing Optical Fiber Communication Network*. Master of Science in Electrical Engineering Thesis, Department of Electrical Engineering, California State University, Long Beach, 7-11.
36. Kanesan, T. (2013, February). *The Experimental Design of Radio-over-Fibre System for 4G Long Term Evolution*. Doctor of Philosophy Thesis, Research undertaken in the School of Computing, Engineering and Information Sciences, University of Northumbria at Newcastle, 2-6, 24-47.
37. Dr. Zarrinkoub, H. (2014). *Understanding LTE With MATLAB® From Mathematical Modeling To Simulation And Prototyping*. (First Edition). Massachusetts, USA: John Wiley & Sons Ltd, 1-23.

38. Hossen, M. S., Bang, M. S., Park, Y. and Kim, K. D. (2014, July). *Performance Analysis of an OFDM-based Method for V2X Communication*. Conference paper, International Conference on Ubiquitous and Future Networks, 238-242.
39. Baghersalimi, G., Postoyalko, V., O'Farrell, T. (2003, September). *Modelling Laser-Diode Non-linearity in a Radio-over-Fibre Link*. Proceeding of London Communication Symposium, 321- 324.
40. İnternet: Čertík, F. (2012). Using Matlab tools for simulation of the optical transmission medium. Institute of Telecommunications, Slovak University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology Bratislava, Slovakia. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Using-Matlab-Tools-For-Simulation-Of-The-Optical-Bratislava/264c10a69811295c8e240ab527ee88ca5da11039>. Son erişim tarihi: 24.09.2018.
41. Binh, L. N. and Laville, B. (2005). Technical Report MECSE-5-2005 Simulink Models for Advanced Optical Communications: Part IV- DQPSK Modulation Format. *Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Monash University*, 29-32.
42. Faris, M. A., Eman, A. A. A. A., Mayada, G. T. (2018). Performance Analysis of Radio over Optical Fiber System with OFDM Using Multiplexing Techniques. *International Journal of Applied Engineering Research*. 13(12), 10831-10844.
43. Singh, S., Pani, R. R. (2010). *Software Implementation of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Sheme for Mobile Radio Channel*. Project Report for the Degree of bachelor of technology in Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela, 2-24.
44. İnternet: Anum, A. Wireless Networking and Communications Group Department of Electrical and Computer Engineering University of Texas at Austin, Texas, USA. URL: <http://www.anumali.com/research.html>. Son erişim tarihi: 24.09.2018.
45. İnternet: OFDM and Multi-Channel Communication Systems-National Instruments. (2014, November). URL: <http://www.ni.com/white-paper/3740/en/>. Son erişim tarihi: 08.09.2018.
46. Prasad, R. (2004). *OFDM for wireless Communications systems*. Boston London: Artech House Inc., 11-15.
47. İnternet: Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN
URL:http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/wlan-ofdm/content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm. Son erişim tarihi: 23.09.2018.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AÇIKGÖZ, Muharrem
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.11.1981, Afyonkarahisar
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 566 68 87
 e-mail : muharremacikgoz@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (İngilizce)	2004
Lise	Afyon Lisesi	1999

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı	Mühendis
2005-2011	Türk Telekomünikasyon A.Ş.	Telekom Uzman Yrd.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Doğa yürüyüşü, müzik.



GAZİ GELECEKTİR..