FİBER ÜZERİNDEN RADYO HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE FARKLI MODÜLASYON TEKNİKLERİNİN İLETİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Fatih HAYIR

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİBER ÜZERİNDEN RADYO HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE FARKLI MODÜLASYON TEKNİKLERİNİN İLETİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Fatih HAYIR
0009-0005-2873-5150

Doç. Dr. Sait Eser KARLIK
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FİBER ÜZERİNDEN RADYO HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE FARKLI MODÜLASYON TEKNİKLERİNİN İLETİM PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Fatih HAYIR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Sait Eser KARLIK

Günümüzde haberleşme sistemleri, üstel bir şekilde artan kullanıcı sayısı ve buna bağlı olarak yoğunlaşan veri trafiği sebebiyle alternatif çözümler aramaktadır. Radyo frekans işaretlerinin esnek bir yapıda olmasının yanı sıra optik fiberin yüksek bant genişliği ve düşük gecikme üstünlüklerinden dolayı fiber üzerinden radyo haberleşmesi, bina içi ve bina dışı sistemlerde çözüm önerilerinden biri haline gelmiştir. Bu tezde, fiber üzerinden radyo haberleşmesi sistemlerinde, ikili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK), diferansiyel faz kaydırmalı anahtarlama (DPSK), dördün faz kaydırmalı anahtarlama (QPSK), frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK), çok seviyeli karesel genlik modülasyonu (QAM) performansları, Optisystem sürüm 7.0 programının kullanıldığı benzetimler vasıtasıyla değerlendirilmiştir. BPSK, DPSK, FSK modülasyonları arasında sistemin fiber hat uzunluğu ve giriş işaret gücü parametreleri değiştirilerek, kalite faktörü ve bit hata oranı (BER) üzerindeki değişimler incelenmiştir. Benzetim sonuçlarına göre, 0 dBm lazer giriş gücünde 10, 20, 50 km fiber uzunluklarında kalite faktörü ve BER değerleri dikkate alındığında; en iyi sonuçlar DPSK modülasyonunda, L=10 km'de sırasıyla kalite faktörü 27,473 ve BER 1,866 x 10^{-166} olarak elde edilmiştir. 1 km fiber uzunluğunda -10dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm lazer giriş gücünde kalite faktörü ve BER değerleri dikkate alındığında; en iyi sonuçlar DPSK modülasyonunda lazer giriş gücü 5 dBm iken, sırasıyla kalite faktörü 85,707 ve BER 0 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optik Fiber, Radyo Frekans, RoF, Modülasyon Teknikleri, Haberleşme
2024, xii + 82 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPARATIVE ANALYSIS FOR THE EFFECTS OF DIFFERENT MODULATION TECHNIQUES ON TRANSMISSION PERFORMANCE IN RADIO OVER FIBER COMMUNICATION SYSTEMS

Fatih HAYIR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sait Eser KARLIK

Today, communication systems are looking for alternative solutions due to the exponentially increasing number of users and the resulting intensified data traffic. In addition to the flexible structure of radio frequency signals with the high bandwidth and low delay advantages of optical fiber, radio over fiber (RoF) communication has become one of the solution proposals for indoor and outdoor systems. In this study, performance of binary phase shift keying (BPSK), differential phase shift keying (DPSK), quadrature phase shift keying (QPSK), frequency shift keying (FSK), multi-level quadrature amplitude modulation (QAM) on RoF systems has been analyzed with simulations using Optisystem version 7.0. The variations in the quality factor and bit error rate (BER) have been examined by changing the fiber length and input signal power for RoF systems using the modulation techniques given above. According to the simulation results, at a laser input power of 0 dBm, quality factor and BER have been investigated for fiber lengths of 10, 20, 50 km. The best results have been achieved with DPSK modulation, with quality factor of 27.473 and BER of 1.866 x 10^{-166} at L=10 km. For a 1 km fiber length, quality factor and BER have been examined at laser input powers of -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm, and 5 dBm. The best results have been obtained with DPSK modulation at a laser input power of 5 dBm, with a quality factor of 85.707 and BER of 0.

Key words: Optical Fiber, Radio Frequency, RoF, Modulation Techniques, Telecommunication
2024, xii+ 82 pages.

TEŞEKKÜR

Çalışma süresince desteklerini benden esirgemeyen, bana her daim yol gösteren danışmanım Sayın Doç. Dr. Sait Eser KARLIK'a ve her zaman yanımda olup bana destek olan değerli eşime teşekkür ederim.

Fatih HAYIR
01/06/2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Kaynak Araştırması 3
2.2. Fiber Üzerinden Radyo (RoF) Haberleşme Sistemi 6
2.3. RoF Haberleşme Sisteminin Avantajları 8
2.3.1. Yüksek Bant Genişliği 8
2.3.2. Düşük İşaret Zayıflaması 8
2.3.3. Kurulum ve Bakım Kolaylığı 9
2.3.4. Radyo Frekans Girişimlerine Karşı Bağışıklık 9
2.3.5. Dinamik Kaynak Kullanımı ve Esneklik 9
2.3.6. Düşük Güç Tüketimi 9
2.4. RoF Sistem Elemanları 10
2.4.1. Optik Fiber 10
2.4.2. Lazer Diyotlar 12
2.4.3. Modülatörler 14
2.4.4. Fotoalıcılar 18
2.5. RoF Haberleşmesinde İletim Yöntemleri 19
2.6. RoF Modülasyon Teknikleri 20
2.6.1. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK) 24
2.6.2. Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (DPSK) 26
2.6.3. Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK) 27
2.6.4. Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK) 29
2.6.5. Karesel Genlik Modülasyonu (QAM) 30
2.7. RoF Üzerindeki Bozucu Etkiler 32
2.7.1. Fiber Zayıflaması 32
2.7.2. Dispersiyon 33

3. MATERYAL ve YÖNTEM 35
3.1. Benzetim Modeli 35
3.2. Benzetim Koşulları 36
4. BULGULAR 38
4.1. BPSK- RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları 38
4.2. DPSK-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları 45
4.3. QPSK-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları 53
4.4. FSK-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları 57
4.5. 4-QAM-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları 64
4.6. 8-QAM-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları 68
4.7. Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırmalı Sunumu 72
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 75
KAYNAKLAR 80
ÖZGEÇMİŞ 82

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
D_c	Kromatik dispersiyon katsayısı
$E_i(t)$	Giriş optik alanı
E_{min}	En düşük enerjili işaret
$E_o(t)$	Çıkış optik alanı
J_{th}	Eşik akım yoğunluğu
R_1	Geribeslemenin yansımaları
V_{bias}	Kutuplama gerilimi
V_π	Faz kayması oluşturan tahrik gerilimi
f_c	Taşıyıcı frekansı
g_{th}	Eşik akım kazancı
α_ρ	Fiber zayıflama katsayısı
η_{int}	Dahili kuantum katsayısı
E_s	Sembol enerjisi
m	İletilen bit sayısı
M	İletilen sembol sayısı
NA	Sayısal Açıklık
P(z)	z mesafesindeki güç
T_s	Sembol süresi
V(t)	Elektriksel tahrik gerilimi
$P(0)$	Orijindeki optik güç
Δt_{GI}	Derece indisli çok modlu fiberde modlar arası dispersiyon
Δt_{SI}	Basamak indisli çok modlu fiberde modlar arası dispersiyon
Δt_c	Kromatik dispersiyon
Δf	Taşıyıcılar arasındaki frekans farkı
$\Delta\lambda$	Optik kaynağın çizgi genişliği
β	Orantılılık faktörü
$P_{giriş}$	Lazer giriş gücü

Kısaltmalar	**Açıklama**
AM	Amplitude Modulation (Genlik Modülasyonu)
APK	Amplitude-Phase Keying (Genlik-Faz Kaydırma)
ASK	Amplitude Shift Keying (Genlik Kaydırmalı Anahtarlama)
BER	Bit Error Rate (Bit Hata Oranı)
BPSK	Binary Phase Shift Keying (İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
BS	Base Station (Baz İstasyon)
CS	Central Station (Merkezi İstasyon)
CSRZ	Carrier Supressed Return to Zero (Taşıyıcısı Bastırılmış Sıfıra Dönüşlü)

CW	Continuous Wave (Sürekli Dalga)
DB	Duo Binary (İkili Hat Kodlama)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
DPSK	Differential Phase Shift Keying (Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
DPSK-FM	Differential Phase Shift Keying-Frequency Modulation (Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama-Frekans Modülasyonu)
EHF	Extremely High Frequency (Aşırı Yüksek Frekans)
ELED	Edge-Light Emitting Diode (Kenar Işık Yayan Diyotlar)
EOM	Electro-Optical Modulator (Elektro-Optik Modülatör)
EOPM	Electro-Optical Phase Modulator (Elektro-Optik Faz Modülatör)
FM	Frequency Modulation (Frekans Modülasyonu)
FPM	Frequency-Phase Modulation (Frekans-Faz Modülasyonu)
FSK	Frequency Shift Keying (Frekans Kaydırmalı Anahtarlama)
FWM	Four-Wave Mixing (Dört Dalga Karışımı)
HDTV	High Definition Television (Yüksek Çözünürlüklü Televizyon)
IF	Intermediate Frequency (Ara Frekans)
IMDD	Intensity Modulation Direct Detection (Yoğunluk Modülasyonlu Doğrudan Algılama)
ISI	Intersymbol Interference (Semboller Arası Girişim)
LED	Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
LiNbO3	Lithium Niobate (Lityum Niyobat)
MAC	Medium Access Control (Ortam Erişim Kontrolü)
NRZ	Non Return to Zero (Sıfıra Dönüşsüz)
OCDMA	Optical Code Division Multiplexing (Optik Kod Bölmeli Çoğullama)
OQPSKAM	Offset Quadrature Phase Shift Keying Amplitude Modulation (Ötelemeli Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama Genlik Modülasyonu)
OSNR	Optical Signal-to-Noise Ratio (Optik İşaret-Gürültü-Oranı)
PAFM	Pulse Amplitude-Frequency Modulation (Darbe Genlik-Frekans Modülasyonu)
PM	Phase Modulation (Faz Modülasyonu)
PRBS	Pseudo Random Bit Sequence (Sözde Rassal Bit Üreteci)
QAFM	Quadrature Amplitude-Frequency Modulation (Dördün Genlik-Frekans Modülasyonu)
QAM-FM	Quadrature Amplitude Modulation-Frequency Modulation (Dördün Genlik Modülasyonu-Frekans Modülasyonu)
Q-Factor	Quality Factor (Kalite Faktörü)
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying (Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
RF	Radio Frequency (Radyo Frekans)
RoF	Radio Over Fiber (Fiber Üzerinden Radyo)
RoF-GPON	Radio Over Fiber Hybrid Gigabit Passive Optical Network (Fiber Üzerimden Radyo Haberleşmesi Karma Gigabit Pasif Optik Ağ Yapısı)
SHF	Super High Frequency (Süper Yüksek Frekans)
SNR	Signal to Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
SPM	Self Phase Modulation (Öz Faz Modülasyonu)
SSMF	Standard Single-Mode Fiber (Standart Tek-Modlu Fiber)

SVM	Support Vector Machine (Destek Vektör Makinesi)
UHF	Ultra High Frequency (Ultra Yüksek Frekans)
WDM	Wavelength Division Multiplexing (Dalgaboyu Bölmeli Çoğullama)
xDSL	x Digital Subscriber Line (x Sayısal Abone Hattı)
XPM	Cross Phase Modulation (Çapraz Faz Modülasyonu)

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Temel RoF sistem yapısı.....	7
Şekil 2.2.	a) Tek modlu fiber b) Çok modlu fiber çapları.....	11
Şekil 2.3.	Optik fiber zayıflama bölgeleri.....	11
Şekil 2.4.	Fabry-Perot rezonatör yapısı (Singal 2017'den değiştirilerek alınmıştır)……..	13
Şekil 2.5.	Doğrudan modülasyon yöntemi…….....	15
Şekil 2.6.	Harici modülasyon yöntemi……...	15
Şekil 2.7.	Elektro-optik faz modülatörünün yapısı…….....	17
Şekil 2.8.	Mach-Zehnder modülatör yapısı……	18
Şekil 2.9.	Fiber üzerinden radyo haberleşmesi iletim yöntemleri a) Fiber üzerinden radyo frekans iletim yöntemi b) Fiber üzerinden ara frekans iletim yöntemi c) Fiber üzerinden temel bant iletim yöntemi…….....	20
Şekil 2.10.	NRZ hat kodlaması…….....	22
Şekil 2.11.	RZ hat kodlaması……...	23
Şekil 2.12.	I/Q düzlemi…….....	24
Şekil 2.13.	BPSK modülasyonu……...	25
Şekil 2.14.	DPSK modülasyonu……...	26
Şekil 2.15.	QPSK yıldızkümesi diyagramı……..	28
Şekil 2.16.	FSK modülasyonu……..	30
Şekil 4.1.	RoF-BPSK modülasyonlu sistem yapısı……	39
Şekil 4.2.	RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…….	40
Şekil 4.3.	RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…….....	41
Şekil 4.4	RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…….	41
Şekil 4.5.	RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -10 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…….	42
Şekil 4.6.	RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…….	43
Şekil 4.7.	RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…….	43

Şekil 4.8. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 44
Şekil 4.9. RoF-DPSK modülasyonlu sistem yapısı……..... 46
Şekil 4.10. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 47
Şekil 4.11. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 48
Şekil 4.12. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 48
Şekil 4.13. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -10 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 49
Şekil 4.14. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 50
Şekil 4.15 RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 50
Şekil 4.16. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 51
Şekil 4.17. RoF-QPSK modülasyonlu sistem yapısı……..... 54
Şekil 4.18. RoF-QPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 55
Şekil 4.19. RoF-QPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 56
Şekil 4.20. RoF-QPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 56
Şekil 4.21. Rof-FSK modülasyonlu sistem yapısı……... 58
Şekil 4.22. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 59
Şekil 4.23. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 60
Şekil 4.24. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 60

Şekil 4.25. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -10 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 61
Şekil 4.26. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 62
Şekil 4.27. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 62
Şekil 4.28. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 63
Şekil 4.29. RoF-4-QAM modülasyonlu sistem yapısı……..... 65
Şekil 4.30. RoF-4-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 66
Şekil 4.31. RoF-4-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 67
Şekil 4.32. RoF-4-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 67
Şekil 4.33. RoF-8-QAM modülasyonlu sistem yapısı……..... 69
Şekil 4.34. RoF-8-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 70
Şekil 4.35. RoF-8-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 71
Şekil 4.36. RoF-8-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları……. 71

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. QPSK modülatör giriş bit kombinasyonlarına karşı düşen çıkış işaretleri……. 28

Çizelge 3.1. BPSK, DPSK, FSK modülasyonlu sistem benzetim modelinde kullanılan fiber, filtre ve optik modülatör türleri ile parametre değerleri……. 35

Çizelge 3.2. QPSK, 4-QAM, 8-QAM modülasyonlu sistem benzetim modelinde kullanılan fiber, filtre ve optik modülatör türleri ile parametre değerleri…… 36

Çizelge 4.1. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…… 42

Çizelge 4.2 RoF-BPSK modülasyonlu sistemde fiber hat uzunluğu 1 km, lazer giriş gücü -10, -5, 0, 5 dBm iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 44

Çizelge 4.3. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…… 49

Çizelge 4.4. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde fiber hat uzunluğu 1 km, lazer giriş gücü -10, -5, 0, 5 dBm iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları …… 51

Çizelge 4.5. RoF-QPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…… 57

Çizelge 4.6. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…… 61

Çizelge 4.7. RoF-FSK modülasyonlu sistemde fiber hat uzunluğu 1 km, lazer giriş gücü -10, -5, 0, 5 dBm iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…… 63

Çizelge 4.8. RoF-4-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…… 68

Çizelge 4.9. RoF-8-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları…… 72

Çizelge 4.10. RoF sisteminde BPSK, DPSK, FSK, QPSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonları uygulandığında, lazer giriş gücü 0 dBm iken, fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği sonuçları …… 73

Çizelge 4.11. RoF sisteminde BPSK, DPSK, FSK modülasyonları uygulandığında, fiber hat uzunluğu 1 km iken lazer giriş gücünün -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği sonuçları …… 74

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde internet kullanıcı sayısı 5,44 milyar insana ulaşmıştır. Yani bu oran, Dünya üzerindeki her iki insandan birinin internet kullanıcısı olduğu anlamına gelmektedir (Petrosyan, 2024). Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, yüksek çözünürlüklü televizyonlar (HDTV), video-konferans görüşmeleri, internet üzerinden oynanan oyunlar, sosyal medya, yüksek çözünürlüklü video vb. uygulamaların artışıyla doğru orantılı bir şekilde, kullanıcıların veri hızı ihtiyaçları da artmaktadır. xDSL servis sağlayıcılarının son kullanıcılara vaat ettiği hızlar, 100 Mbps'ye kadar olup Gbps hızlarını hedeflemektedirler. Fakat iletim şekli çift yönlü bakır kablo olan bu teknolojinin sağlayacağı veri hızları, düşük frekans aralıkları nedeniyle sınırlıdır. Servis sağlayıcıların son kullanıcıya sunduğu veri hızları göz önüne alındığında, bu teknoloji yüksek veri hızı gerektiren uygulamalarda kullanıcıyı memnun etmemektedir (Al-Raweshidy ve Komaki, 2002).

20. yüzyılın ortalarından itibaren hızlı bir şekilde gelişim kaydeden optik fiber ve yarı iletken teknolojisiyle birlikte, optik fiberli haberleşme tekniklerinde özellikle 1980'lerden itibaren hızlı bir ilerleme kaydedilmiştir. Sonuç olarak, düşük kayıplı ve uzak mesafelere kadar iletim yapabilen optik fiber kablolar haberleşmede kullanılmaya başlanmıştır. 21. yüzyılın başlarından itibaren dalgaboyu bölmeli çoğullama (WDM) gibi çoğullama tekniklerinin ortaya çıkmasıyla birlikte, yüksek bant genişliği veya bilgi taşıma kapasitesi sağlayan, aynı zamanda yüksek hızlarda haberleşmeye imkân veren optik fiber kabloları yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Djordjevic, 2018).

Yüksek veri hızı, yüksek bant genişliği ve kapasite ihtiyaçlarından dolayı, optik fiberin uzak mesafelere daha az kayıpla iletilmesi ve radyo frekans işaretlerinin de esnek yapıda olduğu fiber üzerinden radyo haberleşmesi (RoF), iletişim tekniği olarak önerilmiştir. Bu teknoloji, mikrodalga ve optik ağların birbiriyle entegrasyonu ile birlikte, kapasite ve mobiliteyi artırırken, erişim ağlarının maliyetlerini de düşürmektedir (Habib, 2018).

Temel bir RoF sistemi; merkezi istasyonda (CS) yer alan optik modülatör, lazer diyot, optik fiber hat ve alıcı tarafta yer alan bir fotoalıcıdan oluşmaktadır.

Bu tezde, RoF sisteminde kullanılan farklı modülasyon tekniklerinin, farklı koşullar altında sistem performansına etkileri incelenmiştir. Bu kapsamda; ikili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK), diferansiyel faz kaydırmalı anahtarlama (DPSK), dördün faz kaydırmalı anahtarlama (QPSK), frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK), 4 seviyeli karesel genlik modülasyonu (4-QAM) ve 8 seviyeli karesel genlik modülasyonu (8-QAM) modülasyonlarının benzetimleri Optisystem programı yardımıyla gerçekleştirilmiş, benzetim sonuçları kalite faktörü (Q-Factor), bit hata oranı (BER) ve göz diyagramı parametreleri açısından değerlendirilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, RoF haberleşmesi konusunda literatürde yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Ayrıca, RoF sisteminin yapısı açıklanmış, sağlamış olduğu avantajlara değinilmiş ve sistemin kısıtlamalarından bahsedilmiştir. Sonrasında RoF sistem elemanları açıklanmış, kullanılan modülasyon tekniklerinden ve RoF sistemi üzerindeki fiber zayıflaması ve dispersiyon etkilerinden bahsedilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, OptiSystem programı üzerinden gerçekleştirilen benzetimlerde kullanılan BPSK, DPSK, QPSK, FSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonları için sistem benzetim modelleri hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, OptiSystem programı kullanılarak elde edilen BPSK, DPSK, QPSK, FSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonlu RoF sistem benzetim sonuçları sunulmuştur. Sonuçlar, kalite faktörü, BER, göz diyagramı yardımıyla yorumlanmıştır. Böylece farklı modülasyon tekniklerinin RoF sistem performansına etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Tezin beşinci bölümünde, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kaynak Araştırması

RoF tekniği hakkında araştırmacılar tarafından yapılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde RoF konusunda yapılan çalışmalardan bahsedilecektir.

Wake vd. (2010)'da, RoF bağlantıları, yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinde dağıtılmış anten uygulamaları için önerilmiştir. Önerilen sistemin maliyet açısından uygun olduğu değerlendirilmiştir (Wake vd. 2010).

Kang vd. (2020)'de, RoF haberleşmesinde diferansiyel faz kaydırmalı anahtarlama-frekans modülasyonu (DPSK-FM) ve dördün genlik modülasyonu-frekans modülasyonu (QAM-FM) hibrit modülasyon tekniklerinin alıcı ve vericideki kuvvetlendirme etkileri ve sistem performansına etkisi incelenmiştir. Performans üzerindeki etkisini incelemek için ilk olarak, alıcıda optik kuvvetlendirici bulunan sistem modeli üzerinde benzetim uygulanmış; sonrasında ise erbiyum katkılı fiber kuvvetlendiricili alıcı-verici içeren sistem modeline benzetim uygulanmış olup daha verimli sonuçlar elde edilmiştir (Kang vd. 2020).

Khalil vd. (2021)'de, RoF haberleşme sisteminde sıfıra dönüşsüz hat kodlaması (NRZ), ikili hat kodlaması (DB), taşıyıcısı bastırılmış sıfıra dönüşlü hat kodlaması (CSRZ) kullanılarak sistem performansına etkisi incelenmiştir. Benzetimlerde fiber hat uzunluğu, veri hızı, verici gücü, kuvvetlendirici kazancı, radyo frekans işaretinin frekansı gibi parametreler kullanılmıştır. 1550 nm dalgaboyu, 30 GHz radyo frekansında gerçekleştirilen benzetimler kalite faktörü ve BER açısından değerlendirilmiş olup sıfıra dönüşsüz (NRZ) hat kodlaması diğer kodlama tekniklerine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir (Khalil vd. 2021).

Rashed vd. (2018)'de, RoF sisteminde darbe genlik-frekans modülasyonu (PAFM), dördün genlik-frekans modülasyonu (QAFM), farksal faz kaydırmalı genlik

modülasyonu (DPSKAM), gecikmeli dördün faz kaydırmalı genlik modülasyonu (OQPSKAM) ve frekans-faz modülasyonu (FPM) kullanılarak Optisystem programı yardımıyla benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimler, kalite faktörü, BER ve alıcı gücü parametreleri açısından değerlendirilmiştir.10 Gbps veri hızı, 1550 nm dalgaboyu ve 20 km fiber hat uzunluğu değerlerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilen benzetimlerin sonucu en yüksek kalite faktörü FPM, en düşük bit hata oranı PAFM ve en yüksek alıcı gücü DPSKA modülasyonu ile elde edilmiştir (Rashed vd. 2018).

Qureshi vd. (2020)'de, uzak mesafeli bağlantı hatlarında 4 baz istasyonu ve 1 merkez istasyon ile kurulan yapıda, çift yönlü haberleşme gerçekleştirilerek, RoF sisteminin kullanılabilirliği incelenmiştir. Baz istasyonları arasındaki mesafe 10 km, fiber hat uzunluğu 50 km ve veri hızı 5 Gbps olarak seçilen sistem üzerinde gerçekleştirilen benzetimler neticesinde 7 Gbps veri hızına kadar başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Qureshi vd. 2020).

Agoua vd. (2020)'de, 60 GHz frekans bandında RoF sisteminde BPSK, QPSK, 16-QAM modülasyonları kullanılarak bina içi ve bina dışı ortamlarda hata vektör büyüklüğü (EVM) parametresi açısından modülasyon tekniklerinin benzetimi gerçekleştirilmiş ve sistem performansı incelenmiştir (Agoua vd. 2020).

Kavitha vd. (2020)'de, RoF gigabit pasif optik ağ (RoF-GPON) karma sisteminde, QPSK modülasyonu kullanılarak sistem performansı incelenmiştir. Benzetimlerde 10 Gbps veri hızı, 2.4 GHz radyo frekansı, 50 km fiber hat uzunluğu seçilmiştir. 32 ve 64 kanallı yapıda gerçekleştirilen benzetimlerde başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Kavitha vd. 2023).

Yahia vd. (2022)'de, RoF dikey frekans bölmeli çoğullama (OFDM) yapısı üzerinde 60 GHz frekans bandında 16-QAM, 64-QAM ve 256-QAM modülasyonları kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen benzetimler, BER ve alınan işaretin yıldızkümesi diyagramı açısından incelenmiş olup, 17 Gbps veri hızına kadar

gerçekleştirilen benzetimlerde 16-QAM, 17 Gbps değerinden büyük veri hızlarında ise 64-QAM modülasyonunda en iyi performans elde edilmiştir (Yahia vd. 2022).

Vahos vd. (2021)'de, RoF sistemlerinde makine öğrenmesi kullanılarak bozunumların azaltılması konusunda çalışma gerçekleştirilmiştir. Alıcı tarafta işaret destek vektör algoritması (SVM) ile 30 km mesafeye kadar başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Benzetimler sonucunda, geleneksel demodülasyon yöntemlerine göre makine öğrenmesi algoritması kullanılmasının, kanal etkileri sonucunda oluşan bozunumları azalttığı gözlemlenmiştir (Vahos vd. 2021).

Kumar vd. (2021)'de, 16 kanallı 160 Gbps veri hızında WDM-RoF sistemlerde benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimler, kalite faktörü, göz diyagramı ve BER parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Kanal giriş gücü, kanal boşluk değerleri değiştirilerek elde edilen benzetimler neticesinde -5 dBm değerinde en iyi sonuç alınmıştır. Ayrıca kanal boşluk değerinin 100 GHz olduğu durum, kanal boşluk değerinin 50 GHz olduğu duruma göre daha iyi bir performans göstermiştir (Kumar vd. 2021).

Jihad ve Almuhsan (2023)'te, RoF sistemlerinde alt taşıyıcılı çoğullama tekniğinde genlik kaydırmalı anahtarlama modülasyonu (SCM-ASK) kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimlerde anahtarlama gerilimi değiştirilmiş ve bunun sonucunda sistemin göz diyagramı ve kalite faktörü parametre değişimleri incelenmiştir. Benzetimler neticesinde 10 V anahtarlama geriliminde en iyi performans elde edilmiştir (Jihad ve Almuhsan, 2023).

Sarkar ve Ghosh (2023)'te, RoF sistemlerinde 2 kanallı dalgaboyu bölmeli çoğullama yapısı üzerinde QAM modülasyonu kullanılarak benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimlerde değiştirilmiş Walsh-Code optik kod bölmeli çoğullama erişimi (OCDMA) yapısı dalgaboyu bölmeli çoğullama üzerine entegre edilmiştir. Böylelikle benzetimler sonucunda geleneksel QAM modülasyonuna göre daha iyi sonuçlar edilmiştir (Sarkar ve Ghosh, 2023).

Thakur ve Bharti (2023)'te, 32 kanallı WDM-RoF sistemlerde kanal boşluk değerleri değiştirilerek benzetimler gerçekleştirilmiştir. Benzetimler neticesinde fiber hat uzunluğunun artması ve kanal boşluklarının 25GHz'in altına düşmesiyle birlikte kalite faktörünün de azaldığı tespit edilmiştir (Thakur ve Bharti, 2023).

Kathpal ve Garg (2020)'de, öz-faz modülasyonu (SPM), dört dalga karışımı (FWM) ve çapraz faz modülasyonu (XPM) içeren RoF sistemlerinde doğrusal olmayan iletim etkilerini azaltmak üzere iletim kanalında tek modlu optik fiber ve dispersiyonu dengelenmiş fiber karma yapısını kullanmanın yanı sıra Bessel filtre kullanımı önerilmiştir. Önerilen sistemin optik işaret gürültü oranını (OSNR) arttırdığı ve FWM yan bant gücünde azalma olduğu gösterilmiştir (Kathpal ve Garg, 2020).

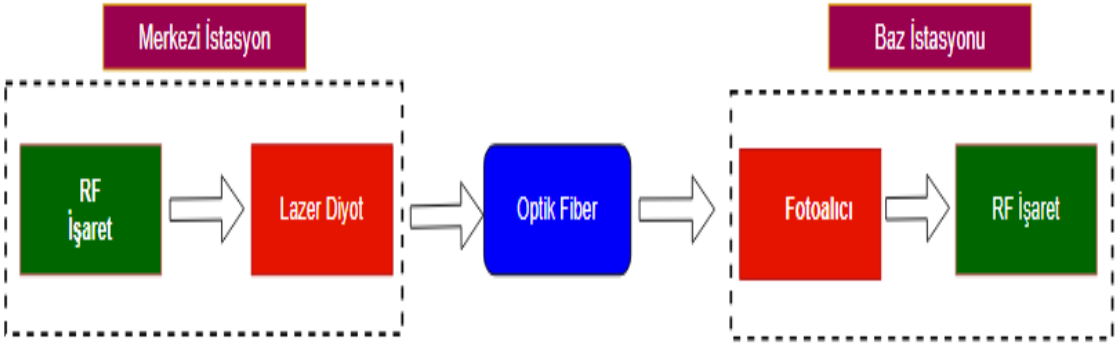
Hadi (2020)'de, 64-QAM modülasyonu kullanan 100 km uzunluklu RoF sisteminde SVM yöntemi ile bozucu etkilerin azaltılması incelenmiştir. Benzetim sonuçları, 20 MHz frekansında 64-QAM kullanan ve 100 km fiber uzunluğuna sahip RoF sisteminde, SVM tekniği yardımıyla alıcıdaki BER değerinde azalma elde edileceğini göstermektedir. (Hadi, 2020).

2.2. Fiber Üzerinden Radyo (RoF) Haberleşme Sistemi

RoF teknolojisi, temelde radyo frekans işaretlerinin optik fiber üzerinden iletilmesi olarak tanımlanmaktadır. Bu haberleşme tekniğinde, analog veya sayısal olarak modüle edilmiş bir radyo frekans (RF) işareti, optik fibere girmeden ışık işaretine dönüştürülür. Optik fiberle taşınan ışık işareti, alıcı tarafında tekrardan RF işaretine dönüştürülmektedir (Singal, 2016). RoF bağlantısı, RF işaretinin merkezi istasyondan baz istasyonuna ya da baz istasyonundan merkezi istasyona iletiminin gerçekleşmesini amaçlamaktadır.

Şekil 2.1'de gösterildiği gibi RoF bağlantısı temelde; fiber bağlantı, merkezi istasyon (CS) ve baz istasyonundan (BS) oluşmaktadır. Merkezi istasyon

tarafında, işaretin anahtarlama, yönlendirme, ortam erişim yönetimi (MAC) ve frekans değeri düzenleme gibi işlevler gerçekleştirilmektedir. Bir diğer ifadeyle, karmaşık işlemlerin çoğu merkezi istasyon tarafında gerçekleştirilmektedir. Baz istasyonu tarafında ise ışık işaretinin radyo frekans işaretine dönüştürülme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu iki yapının arasında kalan fiber kablo ise, istasyonları birbirine bağlamakta kullanılmaktadır. Aşağı yönlü veri iletiminde, merkezi istasyondan baz istasyonuna gönderilen işaret dâhili veya harici modülasyon yöntemiyle optik işarete dönüştürülmektedir. Burada, lazer DC kutuplama akımıyla genliği değişen dalga boyu vererek, RF işaret, optik işareti modüle eder. RF işaret işleme fonksiyonlarının dâhil olmasıyla birlikte, kaynakların dinamik olarak kullanılması, bakımı ve çalışması basitleşmiş ve daha kolay hale gelmiştir (Singh vd. 2022).



Şekil 2.1. Temel RoF sistem yapısı

Bu haberleşme tekniğinde ortam olarak optik fiber kablo kullanılması, yüksek derecede işaret güvenliği sağlamanın yanı sıra, düşük maliyetli ve uzun mesafeli iletim imkânı da sunmaktadır. Ayrıca, yüksek bant genişliği avantajı da bulunmaktadır (Kaur ve Sharma, 2022).

İşaretler, 0,3 GHz – 3 GHz aralığındaki ultra yüksek frekans (UHF), 3 GHz – 30 GHz aralığında süper yüksek frekans (SHF) ve 30 GHz – 300 GHz aralığında aşırı yüksek frekans (EHF) bant değerlerinde uygulanmaktadır. Bağlantı şekline bağlı olarak değişse de, RoF haberleşme tekniğinde genelde tek modlu fiber kablolar tercih edilmektedir.

Ayrıca çok modlu cam fiberler veya geniş çaplı çok modlu polimer optik fiberler de tercih edilmektedir. Bina-içi ortamlarda (örneğin havaalanı transfer noktalarında, hastanelerde, ofislerde ve otel odalarında) kablosuz internet erişimleri maksadıyla kullanılabilmektedir. Gbps büyüklüğünde veri hızlarına ulaşan RoF haberleşmesi kullanıcılar arası veri transferlerinde, yüksek çözünürlükte video izlemede ve internet üzerinden oynanan oyunlar için tercih edilmektedir (Keiser, 2010). Yüksek frekans aralıklarında çalışmasından dolayı, RoF teknolojisi özellikle milimetre dalga haberleşmesinde oldukça popüler olarak kullanılmaktadır. Milimetre dalga haberleşmesi, geleceğin kablosuz sistemlerinin yüksek veri hızı hizmetlerini sunmasına olanak tanımakta ve aynı anda birçok kullanıcının bağlanmasını destekleyebilmektedir. Araştırmalar, mikrodalga frekans bantlarının yetersizliği nedeniyle, milimetre dalga iletiminin önemli olduğunu göstermektedir (Habib, 2018).

2.3. RoF Haberleşme Sisteminin Avantajları

2.3.1. Yüksek Bant Genişliği

Optik kablolarda bant genişliği çok yüksektir. Optik sistemler 10 Gbps bit hızında çalışabilmekte ve optik bant genişliğinin büyük olması sayesinde işaretler elektronik devrelerle elde edilemeyecek hızlarda işlenmektedir. Böylelikle yukarı/aşağı dönüştürme, karıştırma ve filtreleme gibi işlemler hızlı bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, sistem kapasitesini artırmaya yönelik olarak çoğullama teknikleri de tercih edilmektedir (Kaur & Sharma, 2022).

2.3.2. Düşük İşaret Zayıflaması

Optik fiber hatlar kablosuz kanallara kıyasla daha az zayıflama oranlarına sahiptirler. 1300 nm için 0,5 dB/km ve 1550 nm için 0,2 dB/km'den az zayıflama kaybına sahiptir (Al-Raweshidy & Komaki, 2002). İşaretin taşındığı hattın optik fiber olması sayesinde, daha az tekrarlayıcı kullanılarak işaretlerin iletimi sağlanmaktadır.

2.3.3. Kurulum ve Bakım Kolaylığı

RoF haberleşmesi ile uzak anten biriminin yapısı içerisinde lokal osilatör veya karmaşık bağlantı ekipmanları kullanılmasının önüne geçilmiştir. Böylece uzak anten birimleri hafif ve küçük olmakta, dolayısıyla bu yapıların kurulumu ve onarımı ise daha kolay hale gelmektedir.

2.3.4. Radyo Frekans Girişimlerine Karşı Bağışıklık

Optik haberleşme sistemlerinde, optik hat üzerinden taşınması sayesinde, işaret, girişim etkilerine karşı dayanıklı olmaktadır. Böylece, taşınan işaret, içeriği bozulmadan ve güvenli bir şekilde diğer tarafa iletilmektedir.

2.3.5. Dinamik Kaynak Kullanımı ve Esneklik

Dinamik kaynak tahsisi, veri trafiğindeki yoğunluğun değiştiği durumlarda, kaynakların yoğun olan bölgeye aktarılmasına olanak sağlamaktadır. Örneğin alışveriş merkezi gibi büyük alanlara tahsis edilen kaynak, RoF yapısı sayesinde akşam saatlerinde yoğun olan bölgelere aktarılabilmekte ve daha sonrasında tekrardan kendi bölgesinde kullanılabilmektedir.

2.3.6. Düşük Güç Tüketimi

Karmaşık yapının çoğunun merkezi istasyon tarafında olması nedeniyle, baz istasyonları pasif duruma da geçebilmektedir. Bu sayede güç tüketim verimliliği sağlanabilmektedir (Kaur & Sharma, 2022).

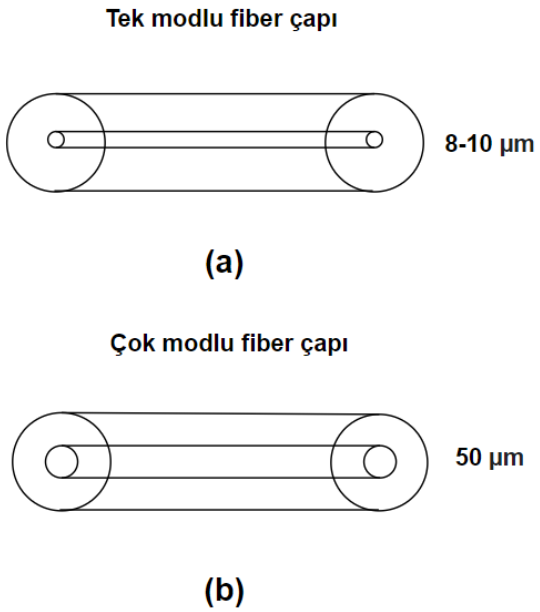
2.4. RoF Sistem Elemanları

2.4.1. Optik Fiber

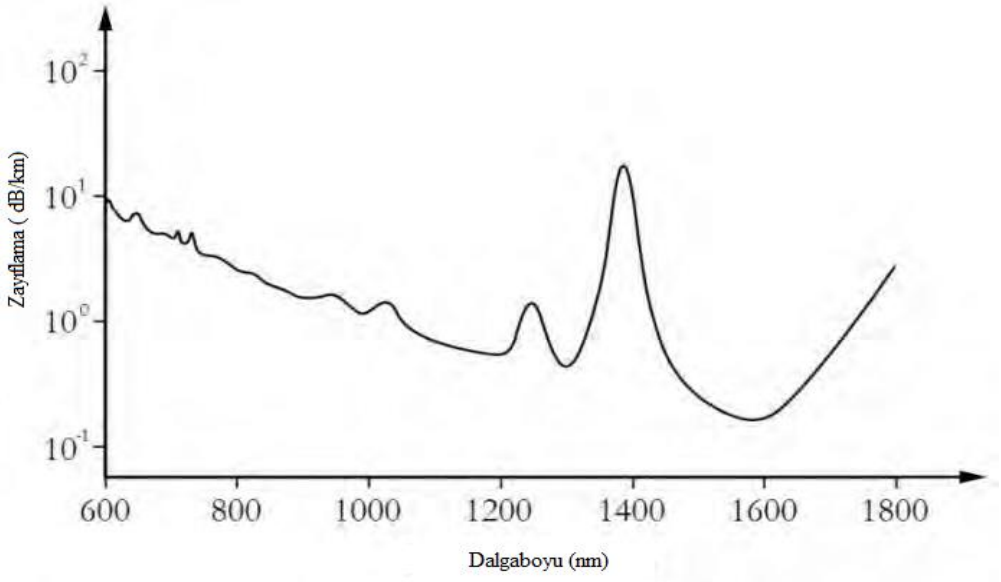
Optik fiberli haberleşmede, analog veya sayısal biçimdeki işaretler, ışık dalgası vasıtasıyla taşınmaktadır. Veriler, cam veya plastik optik fiber vasıtasıyla taşınmaktadır. Veriler, optik fiberler üzerinden taşınırken koaksiyel kablolara göre daha uzun mesafelere taşınabilmektedir. Aynı zamanda koaksiyel kabloya göre daha az kayıp ve daha yüksek bant genişliği avantajları da bulunmaktadır (Ramaswami ve Sivarajn 2002). Optik fiberler sahip olduğu çekirdek yarıçapı ve fiber boyunca ışık hüzmelerinin yayılma yoluna bağlı olarak, tek modlu fiber ve çok modlu fiber şeklinde sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.2'de tek modlu ve çok modlu fiberlerin kesitleri görülmektedir. Tek modlu fiberin çekirdek çapı 8-10 μm, çok modlu fiberin çekirdek çapı ise 50 μm'dir. Tek modlu fiberin çekirdek çapının küçük olması nedeniyle içinden geçen ışık, herhangi bir kırılmaya uğramadan fiber eksenine paralel olarak yayılmaktadır. Çok modlu fiberde ise, birden fazla modun fiberde yayıldığı görülmektedir.

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere, optik fiber hatlarda dalgaboylarının sırasıyla 850 nm, 1310 nm ve 1550 nm olduğu üç iletim bölgesi bulunmaktadır. Bu dalgaboylarında iletim yapılmasının sebebi, zayıflamanın yakın dalgaboylarındakilere oranla, daha düşük olduğu bölgeler olmasından kaynaklıdır.

Çok modlu fiber, yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyulan ve 300 m- 1 km aralığındaki kısa mesafeler için kullanıma uygun bir fiber çeşididir. Bunun sebebi, mesafe arttıkça modal dispersiyon ve semboller arası girişim gibi bozucu etkilerin artmasından dolayı güvenilir bir iletim yapılamamasıdır. Tek modlu fiber ise çok modlu fibere göre bozucu etkilere karşı daha dayanıklı olmaktadır. Böylelikle uzun mesafeli iletimler için tek modlu fiber çeşidi daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Keiser, 2010).



Şekil 2.2. a) Tek modlu fiber b) Çok modlu fiber çapları



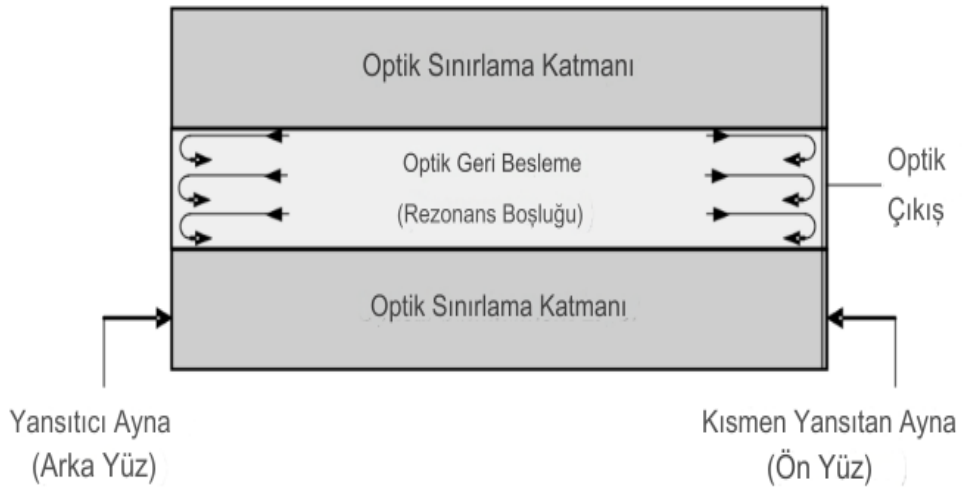
Şekil 2.3. Optik fiber zayıflama bölgeleri

2.4.2. Lazer Diyotlar

Lazer, modüleli verileri fiber hatta taşıma işini yapmak için kullanılan, optik fiberli haberleşme sistemi yapısındaki anahtar elemanlardan biridir. Temelde yarıiletken lazerler ve fiber lazerler olmak üzere iki çeşit lazer vardır. Yarıiletken lazerler hızlı ayarlanabilir yapıda olması, dar spektral çizgi genişliğine sahip olması ve yüksek çıkış gücü elde edilmesinden dolayı en fazla tercih edilen lazer çeşididir.

Lazer, uyumlu kızılötesi görünür veya ultraviyole elektromanyetik ışımalar yayar. Bu uyumlu ışımaların üretilmesi; uyarılmış emisyon adı verilen, yüksek enerji seviyesinde olan elektronların fotonlar tarafından etkilenerek daha düşük bir enerji seviyesine düşmesine neden olmaktadır. Neticesinde, elektromanyetik dalgaların bu fotonlara eşlik etmesiyle beraber tutarlı bir ışık demeti oluşmaktadır.

Bununla beraber gerçekleşmesi gereken iki durum karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan biri fotonların tamamının bir lazer ortamında sınırlandırılmasıdır. Diğer bir durum ise sınırlandırılmış fotonların aynı fazlarda olması gerekliliğidir. Bu koşulların sağlanması maksadıyla ortamın her iki tarafına da fotonların yansıtılması için aynalar dâhil edilir. Bu sayede optik boşluk, geri beslemenin etkin olmasını sağlar ve ortamı geçen optik işaret birkaç kez geri beslenir. Bu lazer diyot yapısı aslında Şekil 2.4'te gösterilen Fabry-Perot rezonatör yapısına benzemektedir.



Şekil 2.4. Fabry-Perot rezonatör yapısı (Singal 2017'den değiştirilerek alınmıştır)

Bu yapıda arka yüzde bir yansıtıcı ayna ve ön yüzde de ışığın kısmi yayılımına izin veren bir ayna daha mevcuttur. Işığın kuvvetlendirilmesi için, rezonatör boşluğu içinde ışık yansıtılmaktadır. Bu işlem optik geri besleme olarak adlandırılmaktadır. Fabry-Perot rezonatör yapılı lazerin yapısı ise, kenar ışık yayan diyotlar (ELED) ile tamamen aynı yapıya sahiptir.

R_1 ve R_2 geri beslemenin yansımalarını temsil etmek suretiyle lazerin eşik koşulu aşağıdaki gibi ifade edilir

$$R_1 R_2 e^{[(g-\alpha)]} \geq 1 \tag{2.1}$$

L lazer boşluğunun uzunluğu, g kazanç katsayısını, α ise soğurma veya kayıp katsayısını ifade etmektedir. g_{th} eşik kazancı ise

$$g_{th} = \alpha + \frac{1}{2L} ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \tag{2.2}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Elektron dağılımının bozulması sebebiyle elektron-oyuk çiftinin oluşumu, p-n yapısına harici bir akım uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Eşik kazancı, uygulanan akım yoğunluğuyla doğrudan orantılıdır. Bu akım yoğunluğu ise

$$J_{th} = \frac{1}{\beta}\left[\alpha + \frac{1}{2L} ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)\right] \tag{2.3}$$

olarak hesaplanmaktadır. Burada β orantılılık faktörü ya da kazanç eğrisinin eğimi olarak bilinmektedir.

Bir lazer diyot için eşik akım yoğunluğu ise

$$J_{th} = \frac{d}{\eta_{int}} + \frac{d}{\beta\sigma\eta_{int}}\left[\alpha + \frac{1}{2L} ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)\right] \tag{2.4}$$

olarak hesaplanmaktadır (Singal, 2016). η_{int}, dahili kuantum katsayısını ifade etmektedir.

2.4.3. Modülatörler

Lazer aracılığıyla üretilen optik işaretin, bilgi işareti tarafından modüle edilmesi gerekmektedir. Bu işleme optik modülasyon adı verilir. Optik modülasyon iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan biri doğrudan modülasyon tekniği ve diğeri ise harici modülasyon tekniğidir (Binh, 2010).

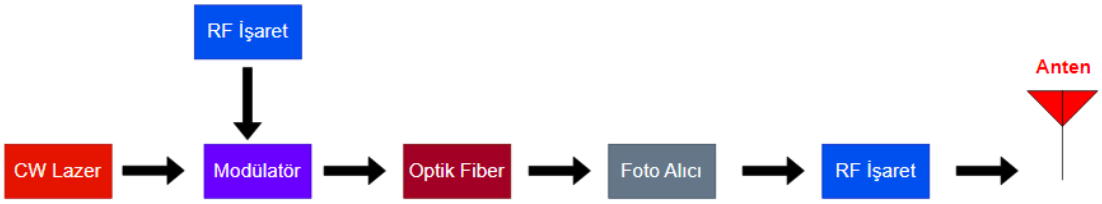
1980 ve 1990'lı yıllarda yarı iletken lazer diyotlarda doğrudan modülasyon tekniği yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak ilerleyen yıllarda, bu tekniğin frekans cıvıltısı indüklemesinden dolayı işaretin spektral genişlemesine neden olduğu ve bu durumun dağılım hatalarına yol açtığı görülmüştür. Özellikle yüksek hızlı iletim sistemlerinde

doğrudan modülasyon tekniğinin kullanımı azalmaktadır. Bu tür modülasyonlarda modülasyon akımı, cıvıltıyı bastırmak amacıyla minimum seviyede tutulmalıdır. Böylece, modülatör sönüm oranı düşer ve işaret gürültü oranı (SNR) azalır. Bu yöntemde, ışık kaynağının yoğunluğu kullanılarak radyo frekans işareti, harici bir kaynak kullanmadan doğrudan modüle edilmektedir. Alıcı tarafında ise, fotoalıcı tarafından doğrudan algılama ile işaret tekrar elde edilmektedir. Bu yöntem, radyo frekans işaretlerinin, optik bir hat üzerinden iletilmesi için kullanılan en basit ve maliyetsiz yöntemdir. Bu yönteme, yoğunluk modülasyonlu doğrudan algılama (IMDD) olarak isim verilmektedir. Şekil 2.5'te doğrudan modülasyon yöntemi gösterilmektedir (Binh, 2010).



Şekil 2.5. Doğrudan modülasyon yöntemi

Şekil 2.6'da gösterilen harici modülasyon, harici bir modülatör yapısı kullanılarak RF işareti ile lazerin ışık yoğunluğunun modüle edilmesine denir. Bu modülasyon türünde kullanılan lazer, sürekli dalga (CW) modunda çalışmaktadır. Ayrıca harici modülasyon tekniği yüksek veri hızlarında iletimi mümkün kılmaktadır. Doğrudan modülasyonda, yüksek hızlarda cıvıltıların ve bozucu etkilerin artması nedeniyle, yüksek hızlı sayısal işaretin uzun mesafelerde iletiminde harici modülasyon tekniği kullanılmaktadır (Rajpal & Goyal, 2017).



Şekil 2.6. Harici modülasyon yöntemi

Harici modülasyonda kullanılan modülatörlerden biri olan elektro optik modülatörler (EOM), yüksek söndürme oranı, doğrusal tepki özelliği ve işaretin genliğini, frekansını ve fazını kontrol etme özelliklerinden dolayı tercih edilen modülatör çeşitlerinden biridir. Son yıllarda EOM'lerin dalga kılavuzları Lityum Niyobat (LiNbO3) malzemesinden imal edilmeye başlanmıştır. Bu materyalin avantajı ise, cıvıltısız işaret üretme ve düşük zayıflama özellikleri olarak karşımıza çıkmaktadır (Binh, 2010).

Veri modülasyonu bir faz modülatörü ile bir yoğunluk modülatörü şeklinde gerçekleştirilmektedir. Elektro-optik faz modülatörü (EOPM) Şekil 2.7'de görüldüğü üzere tek bir elektrotla çalışmaktadır. Elektrota tahrik gerilimi uygulandığında, dalga kılavuzunun kırılma indisi değişmektedir. Bu değişim nedeniyle ışık dalgaları yavaşlamakta ve optik dalgada bir gecikme oluşmaktadır. Bu gecikmeler ile ışık dalgasının fazı değiştirilerek faz modülasyonu yapılır.

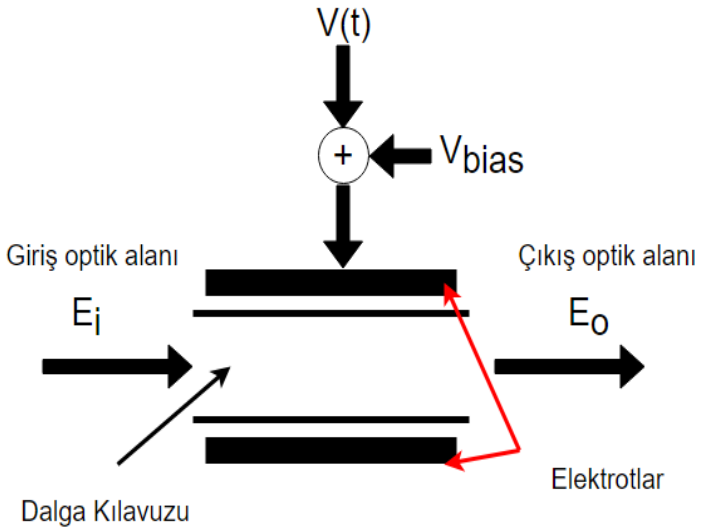
Belirli bir RF elektriksel tahrik gerilimi V(t)'ye karşılık indüklenen faz değişimi şu şekilde verilir:

$$\varphi(t) = \pi \frac{(V(t) + V_{bias})}{V_{\pi}} \tag{2.5}$$

Denklemde verilen V_{π}, taşıyıcıda bir π radyanlık faz kayması oluşturmak için gerekli tahrik gerilimi olup 3–6 V aralığındadır. V(t), zamanla değişen tahrik gerilimidir. V_{bias} ise kutuplama gerilimidir (Binh, 2010).

Son olarak giriş ve çıkış optik alanlarının denklemi şu şekilde verilir:

$$E_o(t) = E_i(t)e^{j\varphi(t)} \tag{2.6}$$

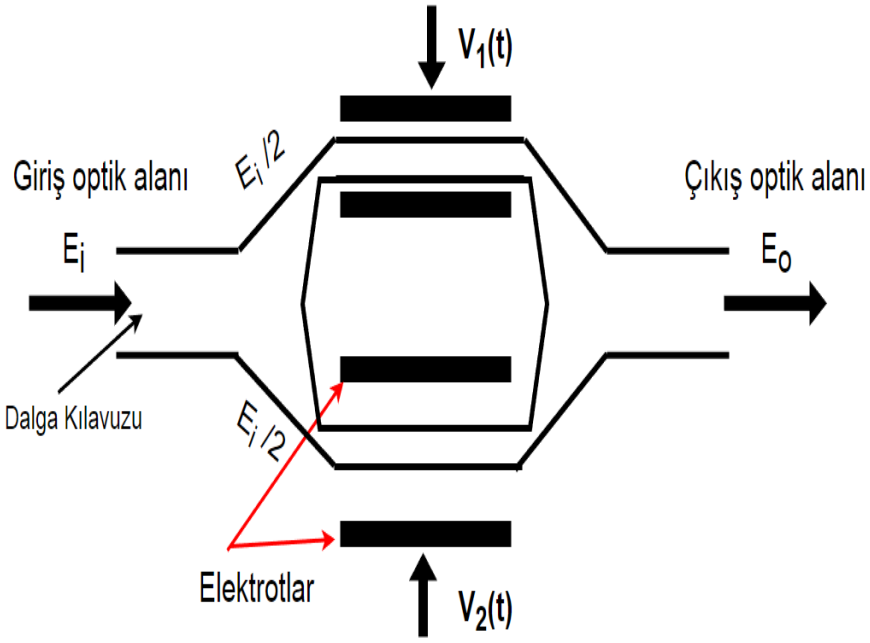


Şekil 2.7. Elektro-optik faz modülatörünün yapısı

Şekil 2.8'de gösterilen yoğunluk modülatörleri genellikle Mach-Zehnder modülatörler olarak bilinmektedir. Mach-Zehnder modülatörleri aslında birbirine paralel iki adet EOPM yapısından oluşmaktadır. Optik dalga modülatörün girişinden girerken iki eşit parçaya bölünür ve her bir kolda bulunan EOPM tarafından modüle edilir. Modülatörün çıkışında ise iki koldan gelen optik dalgalar yapıcı ya da yıkıcı girişim yaparak çıkıştaki ışın yoğunluğunu artırır ya da azaltır. Böylece var-yok anahtarlama (OOK) modülasyonu ortaya çıkar (Binh, 2010).

Çıkış tarafında elde edilen optik alanı ise şu şekilde ifade edilir:

$$E_o(t) = \frac{E_i(t)}{2}\left[1 + e^{j\pi\frac{(V(t)+V_{bias})}{V_\pi}}\right] \tag{2.7}$$



Şekil 2.8. Mach-Zehnder modülatör yapısı

2.4.4. Fotoalıcılar

Doğrudan algılama kullanan alıcılarda, bir fotoalıcı gelen ışın yoğunluğunu elektriksel işarete dönüştürür. Elektriksel işaret daha sonra kuvvetlendirilir ve bir karar devresinden geçirilir. Bir bitin lojik 0 ya da lojik 1 olduğu kararı, bit süresi boyunca elektriksel işaretin karar eşiğinin üstünde veya altında olmasına göre verilir. Doğrudan algılamalı optik ağlar için temel algılama cihazları, PN fotodiyot (p-n eklemi) ve PIN fotodiyottur. Fotodiyot temelde tıkama yönünde kutuplu bir p-n eklemidir. Fotoelektrik etki yoluyla, birleşme noktasına gelen ışık, fotodiyotun hem "n" hem de "p" bölgelerinde elektron-delik çiftleri oluşturmaktadır. “p” bölgesinde salınan elektronlar “n” bölgesine, “n” bölgesinde oluşan delikler “p” bölgesine geçerek akım akmasına neden olur.

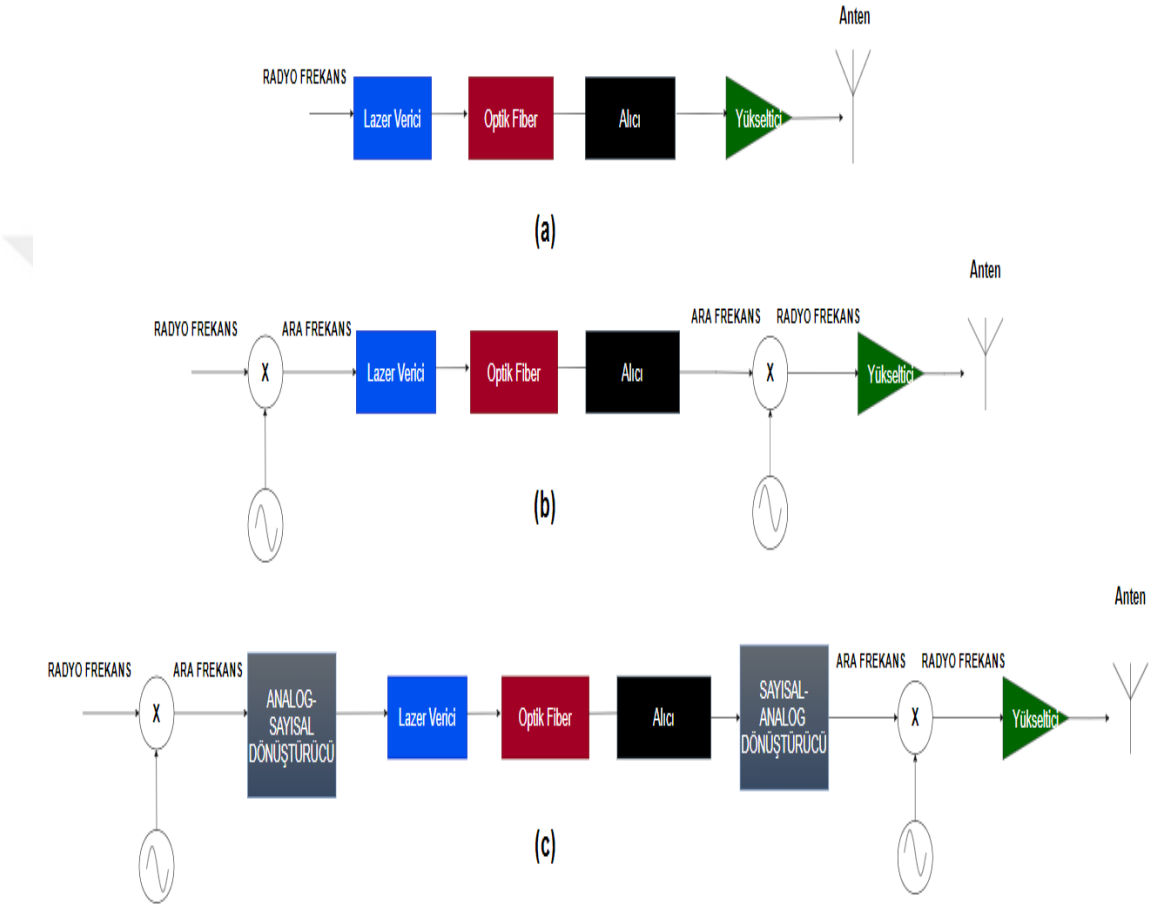
2.5. RoF Haberleşmesinde İletim Yöntemleri

RoF haberleşmesinde kullanılan ve Şekil 2.9'da sistem blok şemaları verilen iletim yöntemlerinden en basiti, fiber üzerinden radyo frekans haberleşmesidir. RF işareti, çıkışı fiber üzerinden taşınan ve bir fotoalıcı tarafından algılanan lazer vericisini modüle etmek için kullanılmaktadır. Alıcıda kuvvetlendirme ve filtrelemeden sonra, RF işareti kablosuz olarak iletilebilmektedir. Bu yapı, kablosuz bağlantının aşağı yönünü temsil etmektedir. Yukarı yönlü bağlantı yapısında ise ters yönde, kablosuz işaretin kuvvetlendirilmesi, bir lazer vericisini modüle etmesi, ışığın optik fiber hattan iletilerek, bir fotoalıcıda tekrar elektriksel işarete dönüştürülmesi gibi benzer işlemler gerçekleştirilmektedir. Fiber üzerinden radyo frekans iletimi herhangi bir frekans dönüşümüne ihtiyaç duymamaktadır. RF işareti, doğrudan lazer diyot üzerinden ışık işaretine dönüştürülerek optik fiber hattında taşınmaktadır. Sonrasında, fotoalıcı tarafında ise aynı şekilde frekans dönüşümüne ihtiyaç duymadan radyo frekans işareti tekrar elde edilmektedir.

Şekil 2.9 (b)'deki yaklaşım ise fiber üzerinden ara frekans (IF) iletimi yöntemidir. Burada RF işareti, optik fiber hatta iletilmeden önce ara frekans olarak adlandırılan daha düşük değerli bir frekansa sahip işarete dönüşümü gerçekleştirilir. Sonrasında, bu işaret, ışık işaretine dönüştürülerek optik fiber hatta aktarılmaktadır. Fotoalıcı tarafında ise, radyo frekans işareti elde edilmesi için aşağı-yukarı dönüşüm gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu dönüşümün gerçekleştirilmesi için fotoalıcı tarafında yani baz istasyonu veya uzak anten biriminde ilave bir dönüşüm ekipmanına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemin avantajı, daha düşük frekansta bir iletim gerçekleştirildiğinden, işaretin, kromatik dispersiyon gibi bozucu etkilere daha az maruz kalmasıdır. Dezavantajı ise, alıcı tarafındaki ilave ekipmanın yapıyı daha karmaşık hale getirmesi nedeniyle, kurulum ve bakım gibi maliyetlerin artmasıdır.

Şekil 2.9 (c) ise fiber üzerinden temel bant iletim yapısını göstermektedir. Bu yöntemde, radyo frekans işareti modüle edilip optik fiber üzerinden gönderilmeden önce, analog-sayısal dönüştürücü ile temel bant işaretine dönüştürülür. Yukarıdaki yöntemler gözden

geçirildiğinde, fiber zayıflama ve bozulma etkilerinin en aza indirgendiği fiber üzerinden radyo frekans iletimi, en yaygın kullanılan yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 2.9. Fiber üzerinden radyo haberleşmesi iletim yöntemleri a) Fiber üzerinden radyo frekans iletim yöntemi b) Fiber üzerinden ara frekans iletim yöntemi c) Fiber üzerinden temel bant iletim yöntemi

2.6. RoF Modülasyon Teknikleri

Optik haberleşme sistemlerinin amacı, ışık işaretlerini taşıyıcı olarak kullanıp bir bilgi işaretini verici tarafından alıcı tarafına iletmektir. Bu süreç; taşıyıcı işaretin yani ışık işaretinin genliğini, yoğunluğunu, frekansını ya da fazını değiştirmek suretiyle, bilgi

işaretinin, taşıyıcı ışık işareti üzerine eklenerek alıcı tarafa iletilmesini içermektedir. Bilgiyi tekrar elde etme süreci içerisinde ise, yüksek bant genişliği verimi elde etmenin yanı sıra, zayıflama ve bozulma etkilerine karşı dayanıklılık sağlama da önem arz etmektedir. Tüm bu noktalar dikkate alındığında, RoF haberleşme sistemlerinde kullanılan çeşitli analog ve sayısal modülasyon yöntemleri literatürde yer almaktadır.

Tercih edilen modülasyon yöntemleri, çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bunlar; iletim mesafesinin kısa veya uzun olması, iletim ortamının tipi, zayıflama etkilerinin çeşitliliği ve bant genişliği verimliliğidir.

RoF haberleşmesinde kullanılan analog modülasyon teknikleri, genlik modülasyonu (AM), faz modülasyonu (PM) ve frekans modülasyonudur (FM). Sayısal modülasyonların, semboller arası girişime (ISI) karşı bağışıklık ve yüksek veri iletim kapasitesi gibi üstünlüklere sahip olmasından dolayı, RoF haberleşme sistemlerinde genlik kaydırmalı anahtarlama (ASK), faz kaydırmalı anahtarlama (PSK), diferansiyel faz kaydırmalı anahtarlama (DPSK), frekans kaydırmalı anahtarlama (FSK) teknikleri kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, genlik ve fazın birlikte kaydırıldığı karesel genlik modülasyonu (QAM) tekniği de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bir periyot içerisinde birden fazla bit iletmek için, çok seviyeli modülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu cümle matematiksel olarak açıklanacak olursa;

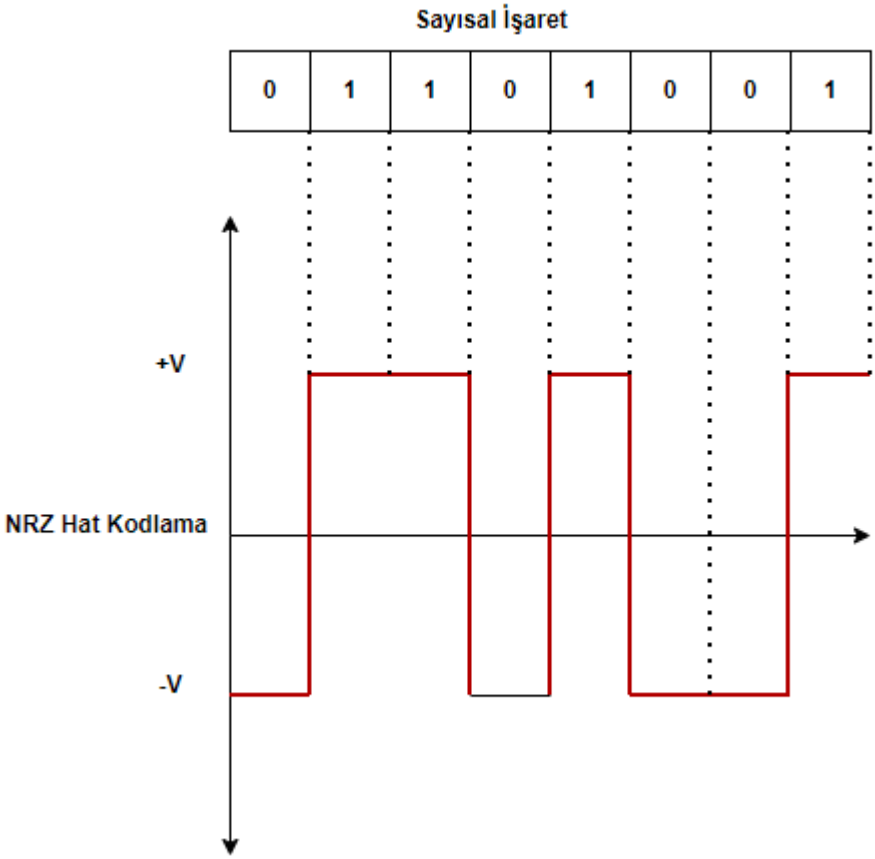
$$m = \log_2(M) \tag{2.8}$$

denkleminde m ifadesi iletilen bit sayısını, M ise seviye sayısını ifade etmektedir. Özellikle, QAM modülasyon türünde, çok seviyeli M-QAM gibi modülasyon seviyesinin çeşitlilik gösterdiği birçok çalışma literatürde yer almaktadır (Hui, 2019).

RoF haberleşme sistemlerinde, modülasyondan önce, sözde rassal sayı üreteci (PRBS) tarafından üretilen sayısal veriler, sayısal işarete dönüştürülmek için hat kodlama

teknikleri kullanılarak, modülatör yapısına uygun bir hale getirilmektedir. Bu kapsamda sıfıra dönüşlü (RZ) ve sıfıra dönüşsüz (NRZ) hat kodlama teknikleri kullanılmaktadır.

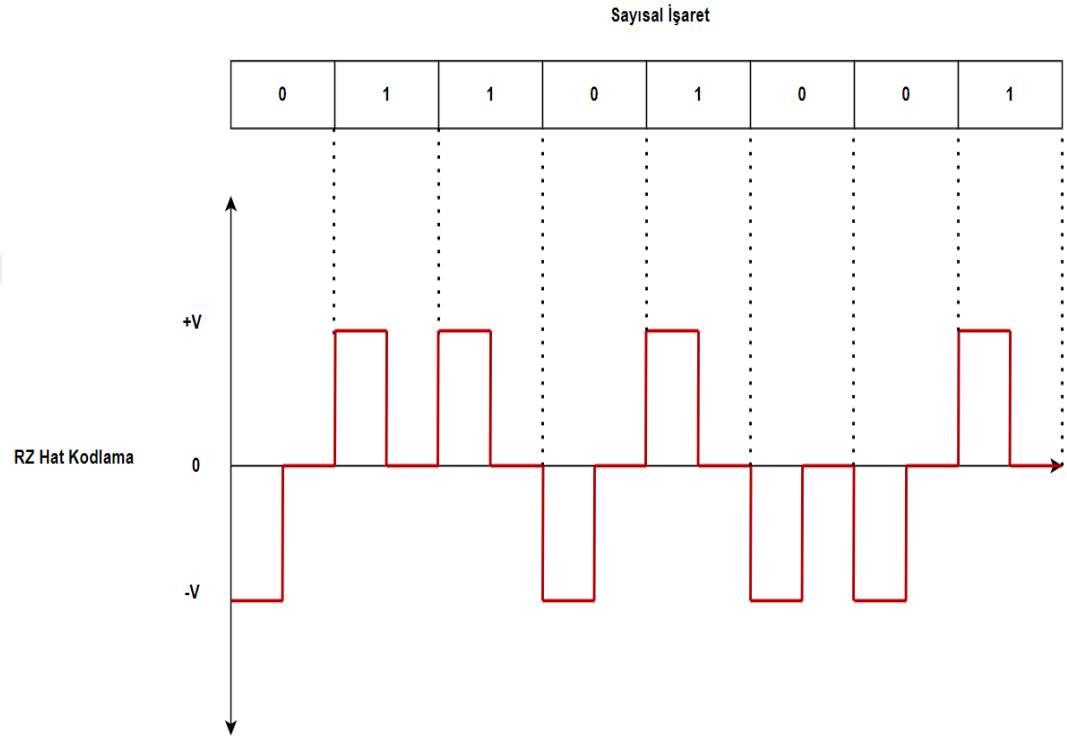
NRZ hat kodlaması tekniğinde, sayısal işaretin lojik 1 veya lojik 0 olması durumuna göre değişiklik gösteren bir işaret oluşmaktadır. PRBS tarafından üretilen sayısal işaretin NRZ hat kodlama tekniği ile kodlanmış hali Şekil 2.10'da verilmiştir. Bu teknikte kodlanan işaret +V, -V genliklerinde değer almaktadır. Eğer sayısal işaret lojik 1 ise +V genliğinde, eğer sayısal işaret lojik 0 ise -V değerinde genlik değeri almaktadır.



Şekil 2.10. NRZ hat kodlaması

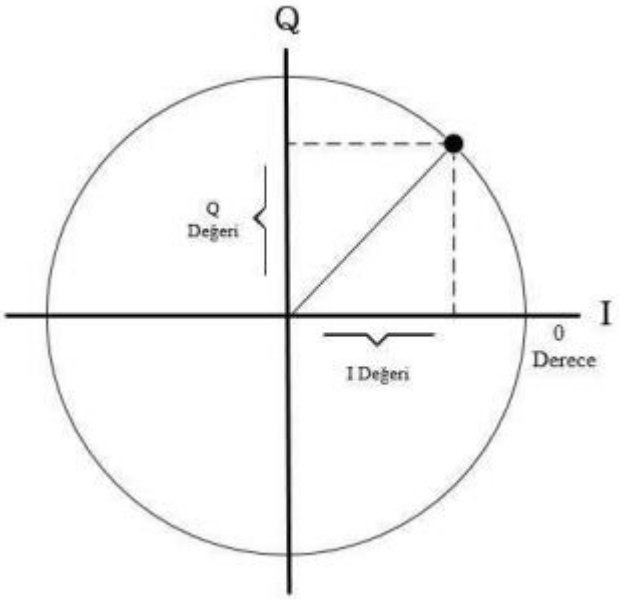
Sıfıra dönüşlü hat kodlama tekniğinde ise NRZ'ye benzer şekilde lojik 1 işaretinde +V genlik değerini, lojik 0 işaretinde ise -V genlik değeri alınmaktadır. Ancak bu değerler

darbe süresinin tamamında değil, sadece ilk yarısında alınmakta; ikinci yarısında genlik değeri sıfır olmaktadır. PRBS tarafından üretilen sayısal işaretin RZ hat kodlama tekniği ile kodlanmış hali Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11. RZ hat kodlaması

Ayrıca, sayısal modülasyon tekniklerinde I ve Q olarak adlandırılan birbirine dik iki bileşen bulunmaktadır. I ve Q bileşenleri arasında 90° faz farkı vardır. I bileşeni kosinüs işaretini temsil ederken, Q bileşeni ise sinüs işaretini temsil etmektedir. Şekil 2.12'de gösterilen I/Q düzlemi, gerçek ve sanal bileşenler içeren sayısal işaretlerin düzlem üzerinde ifade edilmesine olanak sağlar. Örneğin '00' işareti kosinüs ve sinüs işaretlerinin birleştiği noktayı ifade etmektedir. Bu şekilde, sayısal işaretlerin düzlem üzerinde bir bütün oluşturmasına, yıldızkümesi diyagramı adı verilmektedir (Ertürk, 2016).



Şekil 2.12. I/Q düzlemi

2.6.1. İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (BPSK)

BPSK modülasyonunda, taşıyıcı işaretin fazı modüle edilerek iletişim gerçekleştirilmektedir. Bu modülasyon türünde lojik 1 ve lojik 0 değeri için birbiriyle 180° faz farklı iki ayrı taşıyıcı işaret mevcuttur. Lojik 0 için bilgi işareti -1 ile çarpılır, lojik 1 için ise bilgi işaretinin değeri değişmemektedir. BPSK işareti bozulma etkilerine karşı dayanıklı olmasından dolayı uydu haberleşme sistemlerinde kullanılmaktadır.

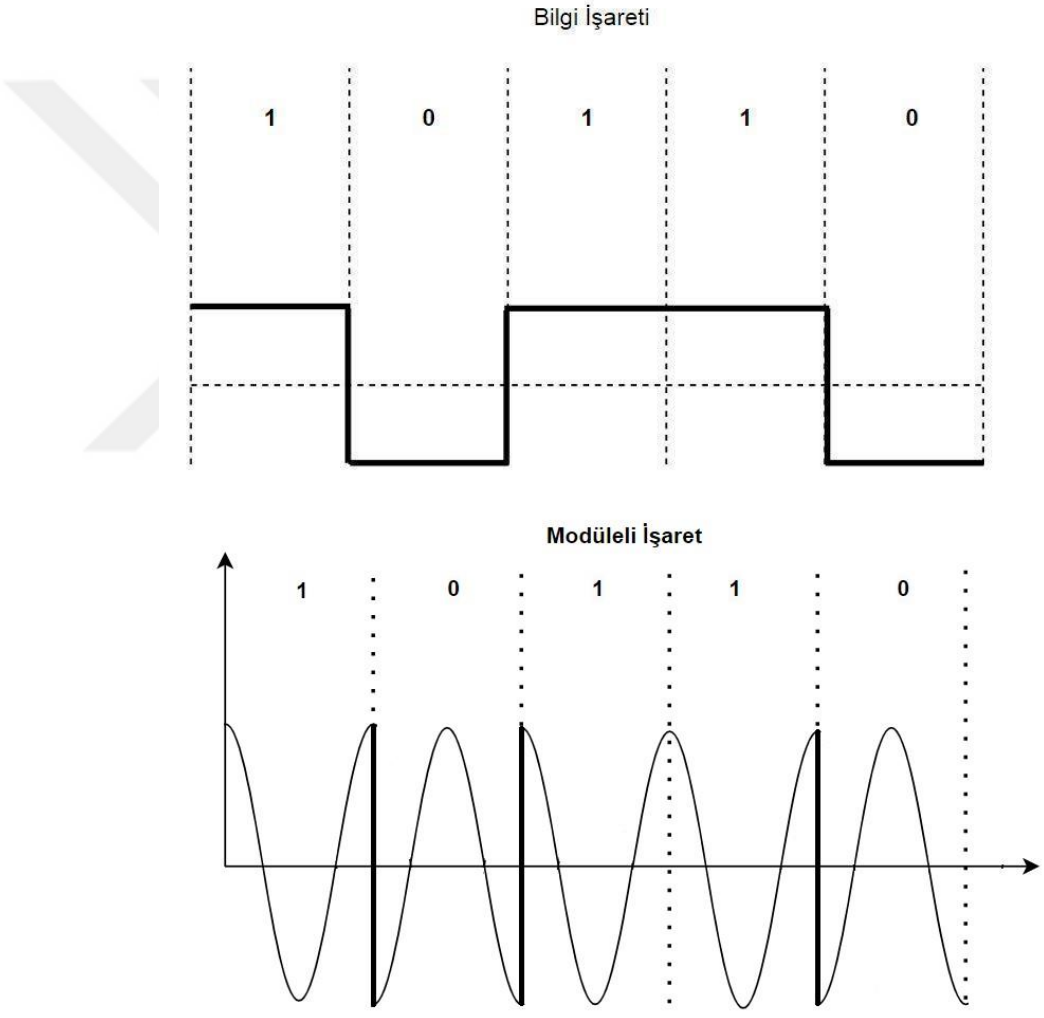
BPSK için, taşıyıcı frekansı f_c ile ifade edildiğinde, iletilen işaret;

$$m(t) = \begin{cases} A\cos(2\pi f_c t + \emptyset_1), \text{bilgi işareti lojik 1 ise } (s_1(t)\text{taşıyıcısı}) \\ A\cos(2\pi f_c t + \emptyset_0), \text{bilgi işareti lojik 0 ise } (s_0(t)\text{taşıyıcısı}) \end{cases} \quad (2.9)$$

olarak ifade edilmektedir. Böylelikle, bilgi işareti lojik 1 iken $s_1(t)$ taşıyıcısında faz değerinin 0° olduğu durumda $m(t) = A\cos(2\pi f_c t)$ olarak;

bilgi işareti lojik 0 iken $s_0(t)$ taşıyıcısında faz değerinin 180° olduğu durumda $m(t) = A\cos(2\pi f_c t+\pi)$ olarak iletilmektedir.

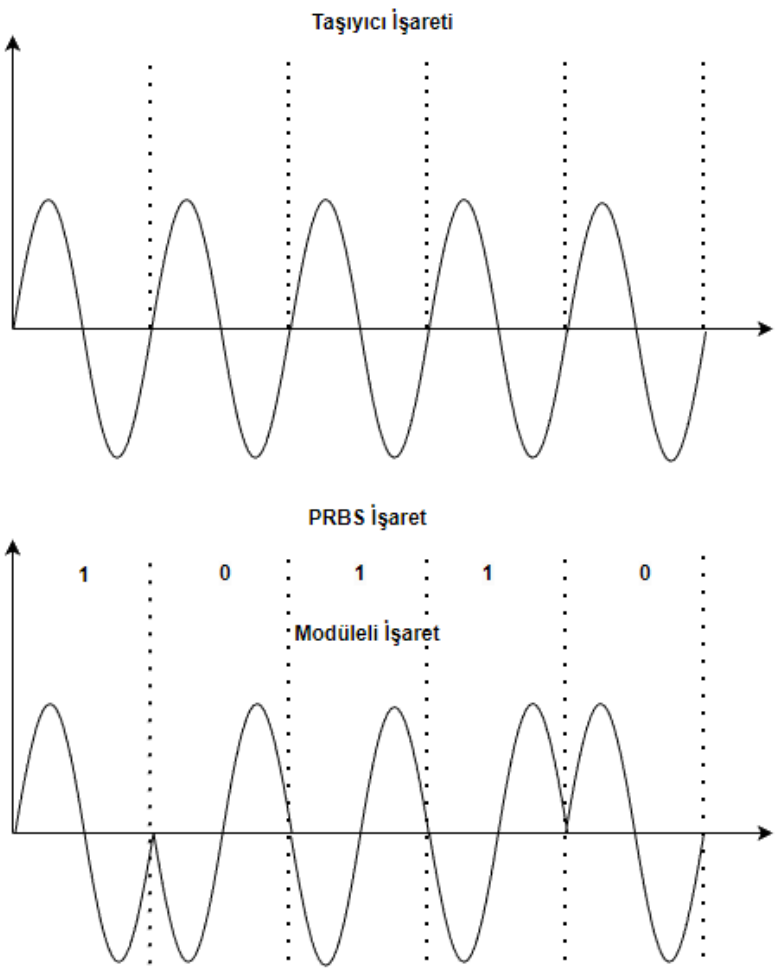
Şekil 2.13'te PRBS tarafından üretilmiş olan lojik 1 ve lojik 0'dan oluşan bilgi işareti verilmektedir. Bilgi işaretinin sinüzoidal formdaki taşıyıcı ile çarpılmasından sonra BPSK işareti üretilmiştir (Ertürk, 2016).



Şekil 2.13. BPSK modülasyonu

2.6.2. Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (DPSK)

DPSK modülasyonu, faz kaydırmalı modülasyon çeşitlerinden biridir. Bu modülasyon türünde, BPSK'da olduğu gibi, taşıyıcı işaretin fazı değiştirilerek modülasyon gerçekleştirilmektedir. Bu modülasyonun BPSK modülasyonundan farkı, bir sonraki faz değişiminin, bir önceki işarete göre olması gerekliliğidir. Şekil 2.14'te görüldüğü gibi bilgi işareti lojik 0 ise taşıyıcı işaretin fazı 180° değiştirilir; bilgi işareti lojik 1 ise taşıyıcı işaretin fazı değişmemektedir (Ertürk, 2016).



Şekil 2.14. DPSK modülasyonu

2.6.3. Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK)

QPSK modülasyonu, faz kaydırmalı modülasyon türleri arasında sembol başına 2 bitin taşındığı bir modülasyon çeşididir. Denklem 2.8 ‘den M=4 olduğunda m=2 olarak hesaplanmaktadır.

Veriler ‘’00,01,10,11’’ şeklinde bit dizileriyle ifade edilmektedir. Çıkış faz değerleri arasında 90° faz farkı bulunmaktadır. QPSK modülatör giriş bit kombinasyonlarına karşı düşen çıkış işaretleri Çizelge 2.1’de yer almaktadır.

QPSK işareti matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$S_n(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}}\ cos\left(2\pi f_c t + \frac{(2n-1)\pi}{4}\right) \dots\dots\ n = 1,2,3,4 \qquad (2.10)$$

Denklem 2.10 genel formülü ifade etmektedir. Buradan I ve Q düzleminde bileşenleri bulmak istenirse;

$$\varphi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}}\cos(2\pi f_c t) \qquad (2.11)$$

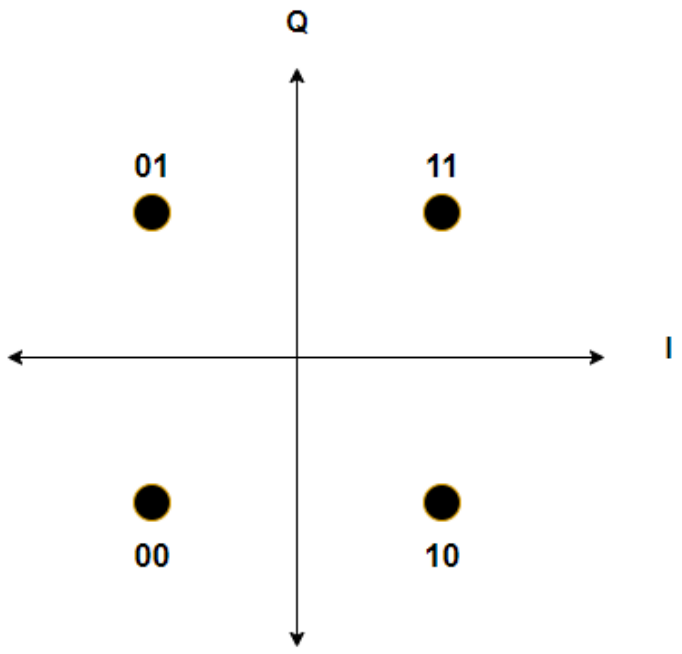
$$\varphi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}}\sin(2\pi f_c t) \qquad (2.12)$$

olur. Burada T_s sembol periyodunu, E_s sembol başına enerji miktarını ifade etmektedir.

Çizelge 2.1. QPSK modülatör giriş bit kombinasyonlarına karşı düşen çıkış işaretleri

GİRİŞ	ÇIKIŞ
1 1	$(1+j)\frac{1}{\sqrt{2}}$
1 0	$(1-j)\frac{1}{\sqrt{2}}$
0 1	$(-1+j)\frac{1}{\sqrt{2}}$
0 0	$(-1-j)\frac{1}{\sqrt{2}}$

Bu çıkış işaretleri Şekil 2.15 'te yıldızkümesi diyagramında gösterilmektedir. Semboller dikkatle incelendiğinde +45 +135 -45 -135 derecelerinde konumlandığı görülmektedir.



Şekil 2.15. QPSK yıldızkümesi diyagramı

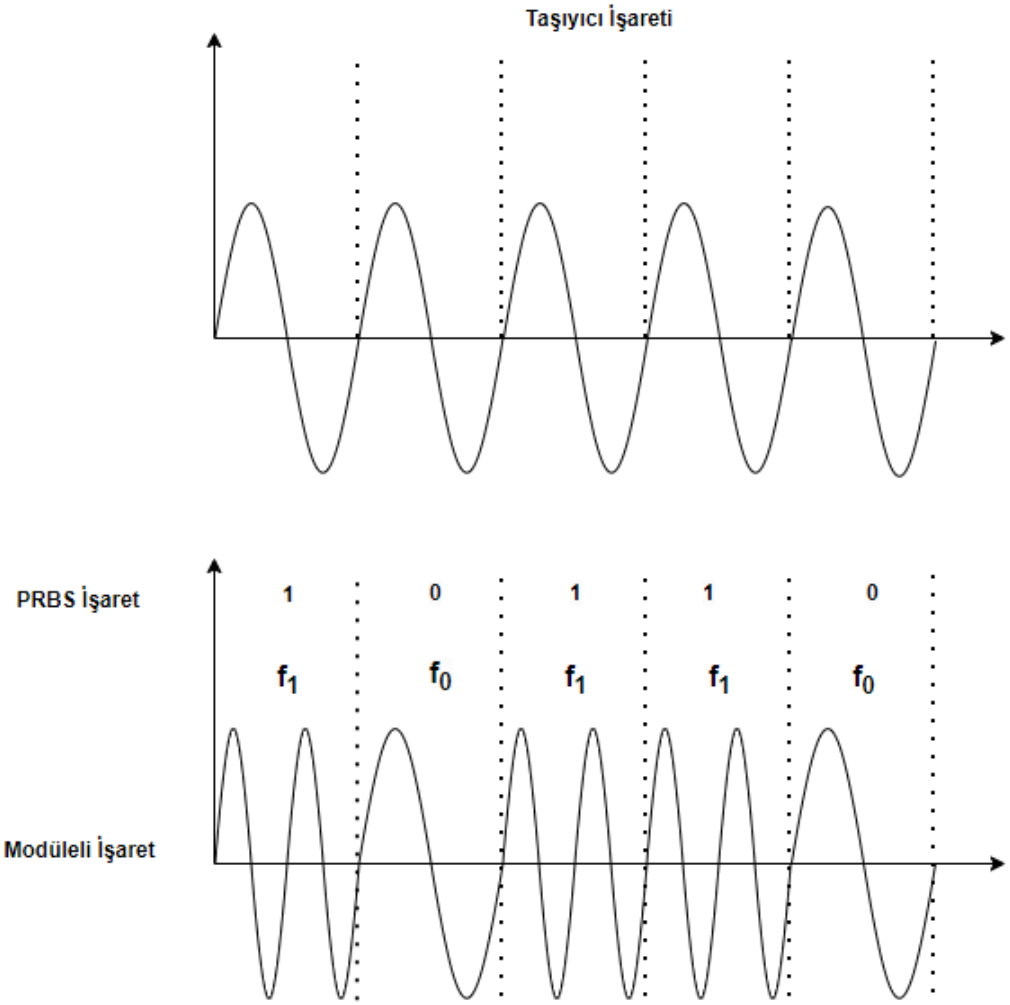
2.6.4. Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (FSK)

Taşıyıcı işaretin frekansının kaydırılarak veri aktarımının sağlandığı modülasyon yöntemine frekans kaydırmalı anahtarlama modülasyonu denir. Bu modülasyonda, her bir sembol farklı frekanslı bir işaret ile temsil edilir. Örnek olarak ikili FSK modülasyon türünde lojik 1 f_1 frekanslı işaret ile ifade edilirken, lojik 0 f_0 frekansı işaret ile ifade edildiğinde, Şekil 2.16'daki FSK modülasyonlu işaret elde edilir.

FSK modülasyonlu işaretin matematiksel olarak gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$S(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}}\, cos(2\pi f_c t + 2\pi m \Delta f t) \qquad m = 0,1,2,3,\dots,M \qquad (2.13)$$

Burada m ifadesi bit veya sembol değerine göre frekans değiştirmek için kullanılmaktadır. $\boldsymbol{\Delta f}$ taşıyıcılar arasındaki frekans farkını ifade etmektedir (Ertürk, 2016).



Şekil 2.16. FSK modülasyonu

2.6.5. Karesel Genlik Modülasyonu (QAM)

Taşıyıcı işaretin genliğinin ve fazının birlikte modüle edildiği sistemlere genlik-faz kaydırmalı sistemler (APK) adı verilmektedir. Bu sistemlerde, iletimi gerçekleştirmek amacıyla modülasyonda kullanılan taşıyıcı fazlarına genlik değerlerinin ilave edilmesiyle taşıyıcı sayısı artırılarak fazör uzayı daha etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Böylelikle frekans spektrumu daha verimli bir şekilde kullanılarak ihtiyaç duyulan bant genişliği düşürülmüştür. APK modülasyonunda farklı genlik ve farklı faz değerlerinin

kullanılabilmesi taşıyıcıların yıldızkümesi diyagramında daha serbest şekilde yer almasını sağlamaktadır. Gürültüden en az düzeyde etkilenmeyi sağlamak amacıyla, taşıyıcıların en iyi performans gösterdiği dizilim bir kare oluşturmaktadır. Buna, dördün (karesel) genlik modülasyonu (QAM) adı verilmektedir. Çok sayıda taşıyıcı kullanılmasından dolayı, QAM ve APK modülasyon türlerinde çok seviyeli bir iletim gerçekleşmektedir. İletilen her sembol başına bit sayısı, modülasyon seviyesi ile orantılı bir şekilde artmaktadır. Örneğin 4-QAM 'de her sembolde 2 bit, 8-QAM'de her sembolde 3 bit taşınmaktadır. M yani modülasyon seviyesinin artmasıyla birlikte çok seviyeli modülasyonlar oluşmaktadır. Bu modülasyonlara M-ary adı verilmektedir.

QAM modülasyonunun matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir;

$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}}\, a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_{min}}{T_s}}\, b_i \sin(2\pi f_c t) \;\; 0 \le t \le T_s \qquad (2.14)$$

Burada E_{min} en düşük enerjili işaret, a_i ve b_i işaret noktasının yerine göre seçilen bağımsız tam sayı çifti, f_c taşıyıcı frekansı, T_s sembol periyodudur. (Ertürk, 2016)

2.7. RoF Üzerindeki Bozucu Etkiler

2.7.1. Fiber Zayıflaması

Fiberde yayılan ışık işaretinin zayıflaması, optik haberleşme sistemlerinde dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biridir. Zayıflamanın derecesi, verici ve alıcı arasındaki en uzun iletim mesafesinin belirlenmesinde kritik pay sahibidir. Zayıflamaya sebep olan kayıplar; soğurma, saçılma ve optik enerjinin ışınımsal kayıpları olarak sıralanabilir. Soğurma, fiber malzemesi kaynaklı kayıplardır. Saçılma ise, hem kullanılan fiber malzemesiyle ilgili, hem de dalga kılavuzunun yapısal zayıflıklarıyla ilgilidir. Son olarak ışınımsal kayıplar ise, fiber geometrisinin bozulmalarından kaynaklanmaktadır.

Işık işareti fiberde ilerlerken, güç, mesafeyle üstel olarak azalmaktadır. Matematiksel olarak açıklamak gerekirse;

$$P(z) = P(0)e^{-\alpha_\rho z} \tag{2.15}$$

Burada $P(0)$ orijindeki ($z = 0$) optik güç, $P(z)$ z mesafesindeki güç iken, denklem düzenlenecek olursa;

$$\alpha_\rho = \frac{1}{z}\ln\left[\frac{P(0)}{P(z)}\right] \tag{2.16}$$

elde edilir. α_ρ, fiber zayıflama katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Bu katsayının hesaplanmasında kolaylık sağlanması amacıyla, zayıflama, dB/km cinsinden ifade edilmektedir. (2.16) ‘daki denklem, buna göre tekrardan düzenlenirse;

$$\alpha\left(\frac{dB}{km}\right) = \frac{10}{z}\log\left[\frac{P(0)}{P(z)}\right] \tag{2.17}$$

olarak elde edilmektedir. (2.17)'deki denklem fiber zayıflaması veya fiber kaybı olarak tanımlanmaktadır.

Tek modlu fiberlerdeki zayıflama 1310 nm dalgaboyunda 0.5 dB/km iken, 1550 nm dalga boyunda ise 0.2 dB/km olmaktadır. (Keiser, 2010).

2.7.2. Dispersiyon

Optik fiber haberleşmesinde, dispersiyonlar genel olarak üç ayrı kategoride sınıflandırılmaktadır. Bunlar; kromatik dispersiyon, modlar arası dispersiyon ve polarizasyon mod dispersiyonudur.

a) Kromatik Dispersiyon:

Bu dispersiyon türü, optik fiber çeşitlerinin tümünde görülebilmektedir. İletilmek istenen ışık işaretinin farklı spektral bileşenleri arasındaki yayılım gecikmelerinden dolayı oluşmaktadır. Bu yayılım gecikmeleri, işaretin genişlemesine veya yayılmasına sebep olmaktadır. Kromatik dispersiyon; kullanılan fiber malzemeden kaynaklanan dispersiyon veya dalga kılavuzundan kaynaklanan dispersiyondan oluşmaktadır. Kromatik dispersiyon Denklem (2.18) ile ifade edilmektedir.

$$\Delta t_c = D_c L(\Delta\lambda) \tag{2.18}$$

Burada, Δt_c kromatik dispersiyonu (ns), D_c ps/(nm.km) cinsinden kromatik dispersiyon parametresini, $\Delta\lambda$ kaynağın çizgi genişliğini, L ise fiber uzunluğunu ifade etmektedir (Singal,2016).

b) Modlar arası (Intermodal) Dispersiyon:

Optik fiberli sayısal haberleşmede, darbe işareti lojik 1 ve 0 ile gösterilmektedir. Bu darbeler, ışık yayan diyot (LED) veya bir lazer diyot tarafından üretilmektedir. Darbe işaretlerinin çok modlu optik fiber hatta girmesiyle birlikte, her bir optik darbe işareti farklı modlarda yayılan işaretlere dönüşür ve bu işaretlerin her birinin farklı yayılma süreleri mevcuttur. Hat üzerinden farklı modlarda taşınan işaretler, çıkış ucunda toplam işareti oluştururken, modal gecikme farklılıkları nedeniyle toplam işaret bozulur. Bu dispersiyon, basamak indisli çok modlu fiberde;

$$\Delta t_{SI} = \frac{L(NA)^2}{2n_1 c} \tag{2.19}$$

ile hesaplanır. Denklem (2.19)'da Δt_{SI} basamak indisli çok modlu fiberdeki modlar arası dispersiyonu, NA sayısal açıklığı belirtmektedir. Diğer taraftan, dereceli indisli fiberde modlar arası dispersiyon;

$$\Delta t_{GI} = \frac{L \times (NA)^4}{32 c {n_1}^3} \tag{2.20}$$

ile bulunur. Denklem (2.20)'de Δt_{GI} dereceli indisli çok modlu fiberdeki modlar arası dispersiyonu belirtmektedir(Singal, 2016).

c) Polarizasyon Mod Dispersiyonu:

Birbirine dik olarak yayılan modların arasındaki hız farklılıkları nedeniyle optik fiberde arka arkaya gönderilen darbelerin yavaş ve hızlı modları arasında örtüşmeler meydana gelebilmektedir. Bu örtüşmeler sonucunda oluşan dispersiyon, polarizasyon mod dispersiyonu olarak adlandırılmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Benzetim Modeli

Bu bölümde, tezde oluşturulan benzetim modelleri hakkında bilgi verilecektir. Yapılan benzetimler, Optisystem programı sürüm 7.0 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. RoF haberleşme sisteminde farklı modülasyon teknikleri için gerçekleştirilen benzetimlerde çalışma dalgaboyu 1550 nm (193,14 THz) olarak belirlenmiştir. Kullanılan fiber çeşidi ise G.652 standart tek modlu fiber (SSMF)'dir. BPSK, DPSK, FSK, QPSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonlu sistem benzetim modellerinde kullanılan fiber, filtre ve optik modülatör türleri ile parametre değerleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. BPSK, DPSK, FSK modülasyonlu sistem benzetim modelinde kullanılan fiber, filtre ve optik modülatör türleri ile parametre değerleri

Modülatör Frekansı	5 GHz
Veri Hızı	1 Gbps
Optik Fiber Çalışma Dalgaboyu	1550 nm
Optik Fiber Zayıflaması	0,2 dB/km
Dispersiyon Katsayısı	16,75 ps/nm/km
Sürekli Dalga Lazer Frekansı	193,1 THz
Fiber Türü	Tek Modlu Fiber
Bant Geçiren Filtre Türü Bant Geçiren Filtre Kesim Frekansı	Bant Geçiren Gauss Filtresi 5 GHz
Optik Bant Geçiren Filtre Türü Optik Bant Geçiren Filtre Kesim Frekansı	Optik Bessel Filtresi 193,1 THz
Alçak Geçiren Filtre Türü Alçak Geçiren Filtre Kesim Frekansı	Alçak Geçiren Gauss Filtresi 0,75 GHz
Optik Modülatör Türü Modülatör Sönümleme Oranı	Mach-Zehnder Modülatör 30 dB

Çizelge 3.2. QPSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonlu sistem benzetim modelinde kullanılan fiber, filtre ve optik modülatör türleri ile parametre değerleri

Modülatör Frekansı	5 GHz
Veri Hızı	1 Gbps
Optik Fiber Çalışma Dalgaboyu	1550 nm
Optik Fiber Zayıflaması	0,2 dB/km
Dispersiyon Katsayısı	16,75 ps/nm/km
Sürekli Dalga Lazer Frekansı	193,1 THz
Fiber Türü	Tek Modlu Fiber
Bant Geçiren Filtre Türü Bant Geçiren Filtre Kesim Frekansı	Bant Geçiren Gauss Filtresi 5 GHz
Optik Bant Geçiren Filtre Türü Optik Bant Geçiren Filtre Kesim Frekansı	Optik Bessel Filtresi 193,1 THz
Alçak Geçiren Filtre Türü Alçak Geçiren Filtre Kesim Frekansı	Alçak Geçiren Yükseltilmiş Kosinüs Filtresi 0,75 GHz
Optik Modülatör Türü Modülatör Sönümleme Oranı	Mach-Zehnder Modülatör 30 dB

Lojik 1 ve lojik 0'ları üretmek için PRBS ve RZ hat kodlaması kullanılmıştır. Modülatör olarak Mach-Zehnder modülatör tercih edilmiştir. Modülatör frekansı 5 GHz olarak seçilmiştir. Lazer olarak CW lazer kullanılmıştır. Alıcı tarafında ise PIN fotodiyot kullanılarak işaret tekrar elde edilmiştir.

3.2. Benzetim Koşulları

Bu alt bölümde BPSK, DPSK, FSK, QPSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonlarının kullanıldığı RoF sistemindeki benzetim koşulları hakkında bilgi verilecektir. Bölüm 3.1'de bahsedilen benzetim modeli kullanılmıştır.

BPSK, DPSK, FSK modülasyonları için benzetim modelinde verilen 1 Gbps veri hızında, 0 dBm giriş gücü değeri için fiber uzunlukları 10 km, 20 km ve 50 km alınarak; sistem performansı, kalite faktörü, BER ve göz diyagramı üzerinden incelenmiştir. Ardından, -10, -5, 0, 5 dBm giriş gücü değerlerinde fiber hat uzunluğu 1 km alınarak; sistem performansı, kalite faktörü, BER ve göz diyagramı üzerinden incelenmiştir.

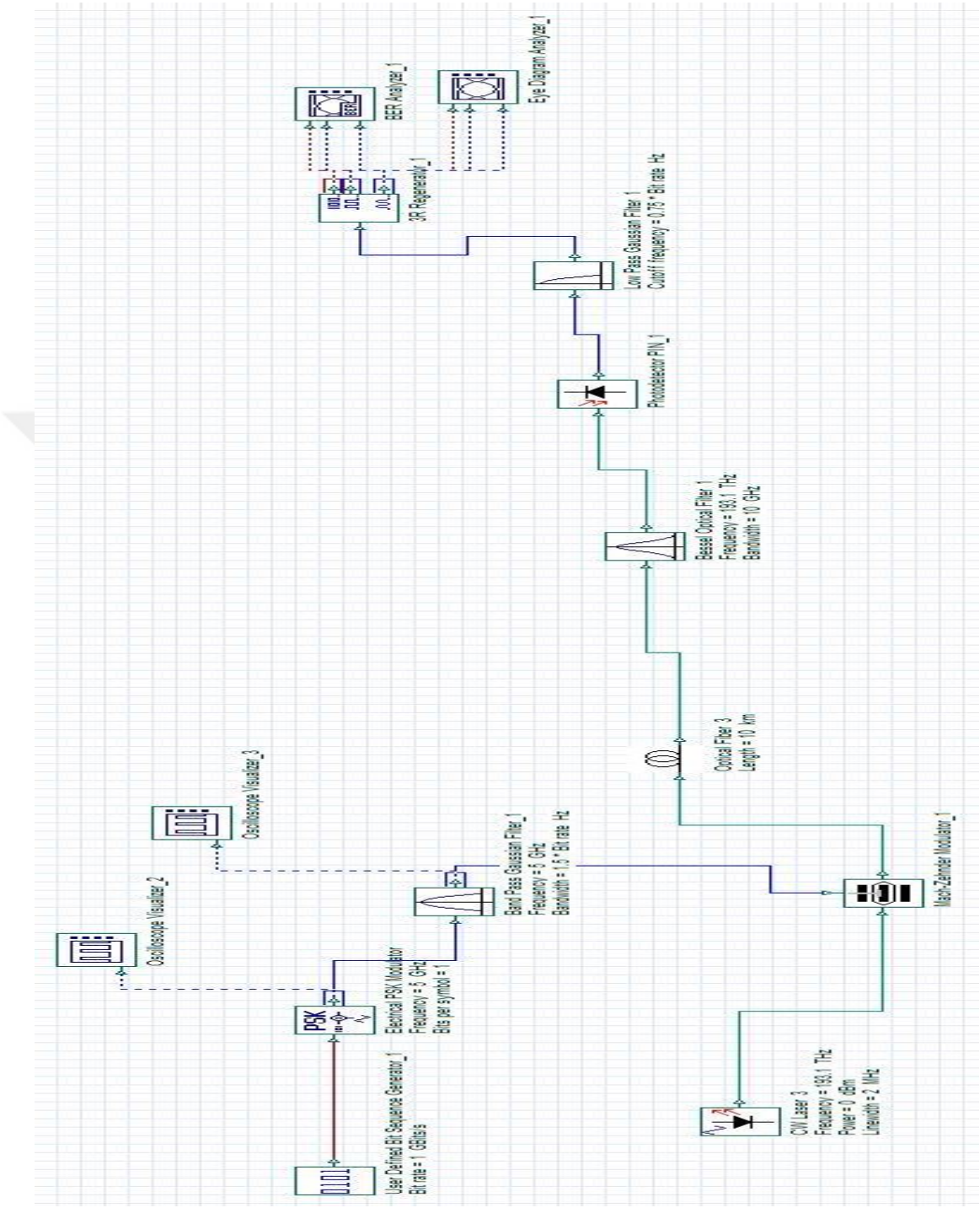
QPSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonları için benzetim modelinde verilen 1 Gbps veri hızında, 0 dBm giriş gücü değeri için fiber uzunlukları 10 km, 20 km ve 50 km alınarak; sistem performansı kalite faktörü, BER ve göz diyagramı üzerinden incelenmiştir.

4. BULGULAR

Bu bölümde, 2.Bölüm'de bahsedilen RoF sistem yapısı ve modülasyon çeşitleri kullanılarak, 3.Bölüm'de verilen benzetim koşulları altında, BPSK, QPSK, DPSK, FSK ve 4-QAM ve 8-QAM modülasyonlarının RoF sistem performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sistem performansı, giriş gücü ve fiber uzunluğu parametreleri değiştirilerek, sistem çıkışındaki kalite faktörü, BER ve göz diyagramı parametreleri kullanılarak analiz edilmiştir.

4.1. BPSK- RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları

RoF haberleşmesinde BPSK modülasyonu kullanılarak Optisystem sürüm 7.0 programından oluşturulan benzetim modeli Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



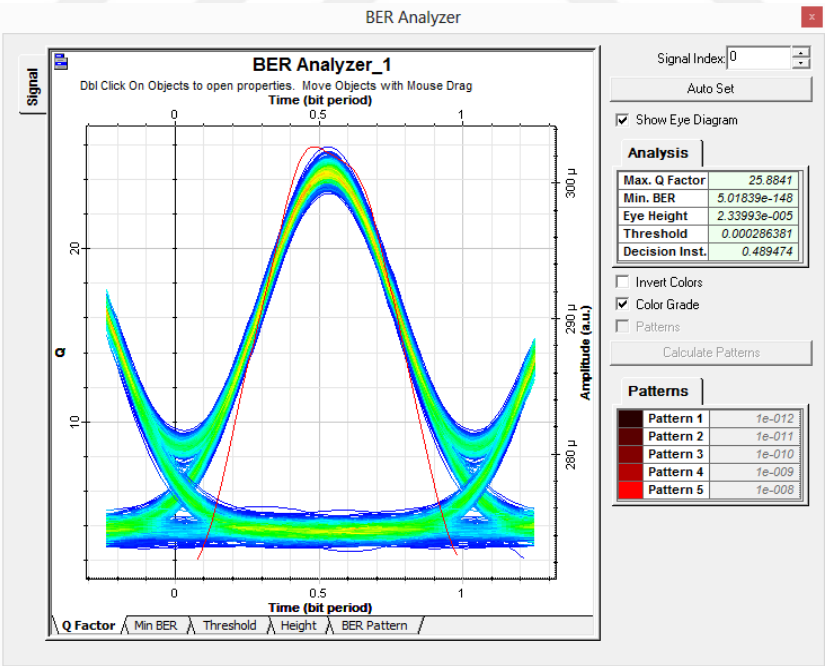
Şekil 4.1. RoF-BPSK modülasyonlu sistem yapısı

Bölüm 3'te bahsedilen benzetim koşullarına göre; lazer giriş gücü 0 dBm, veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.2-4.4'te gösterilmiştir.

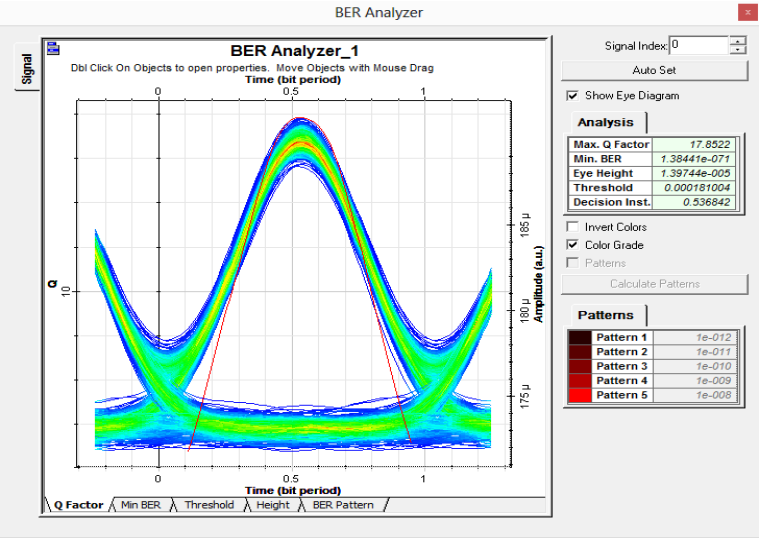
Fiber hat uzunluğu 10 km, 20 km ve 50 km olarak değiştirildiğinde elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

RoF-BPSK modülasyonunda veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup, fiber hat uzunluğunun L=1 km olduğu durumda, lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.5-4.8'de gösterilmiştir.

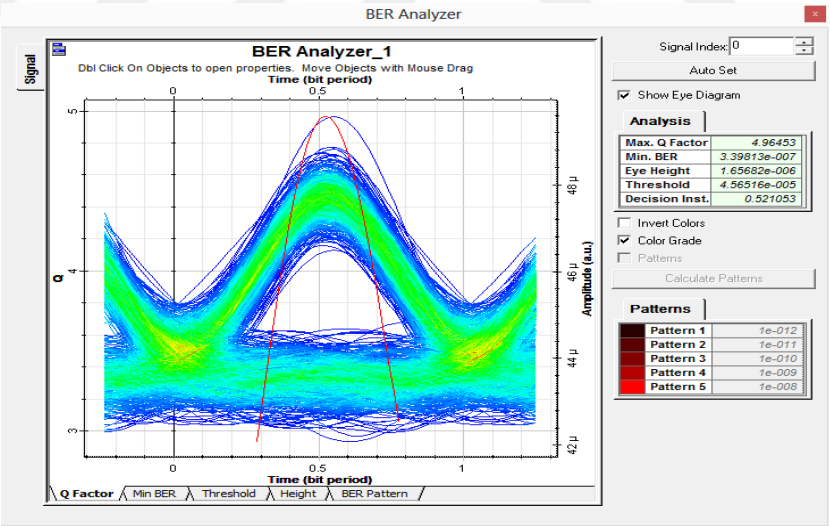
Lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



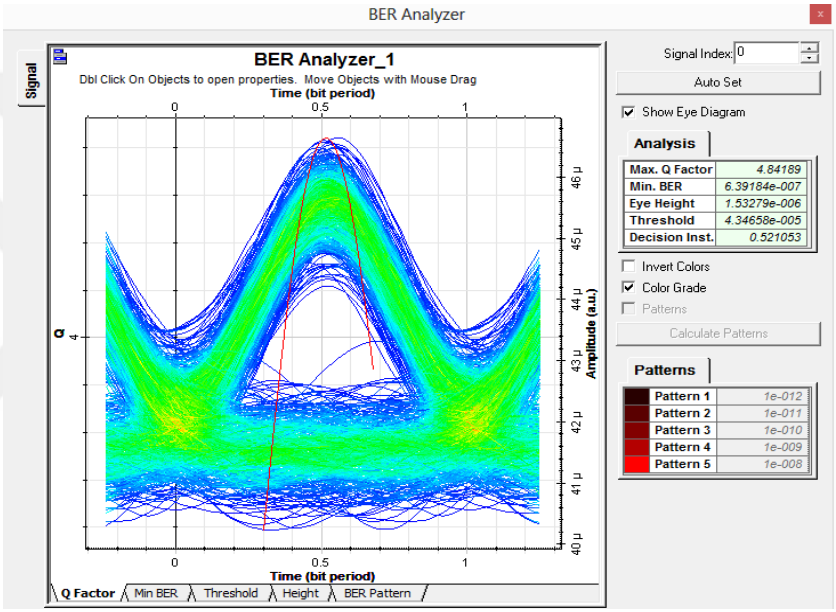
Şekil 4.3. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



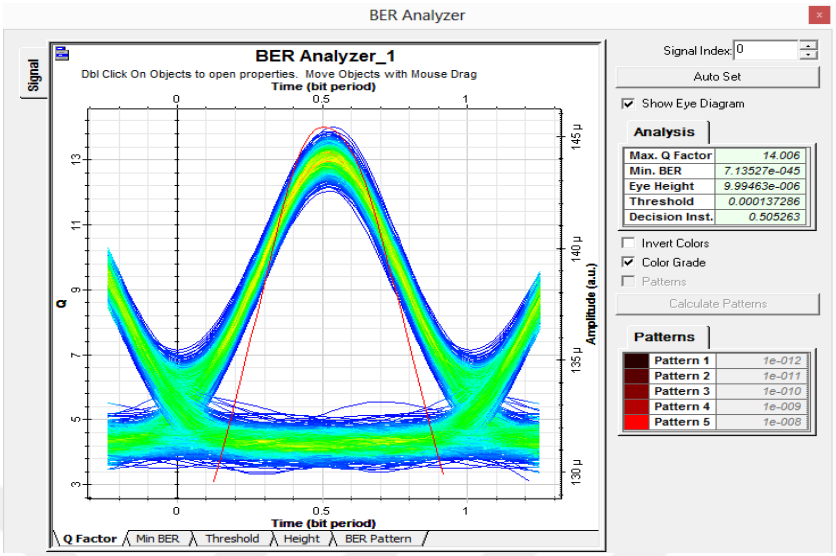
Şekil 4.4. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

Çizelge 4.1. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

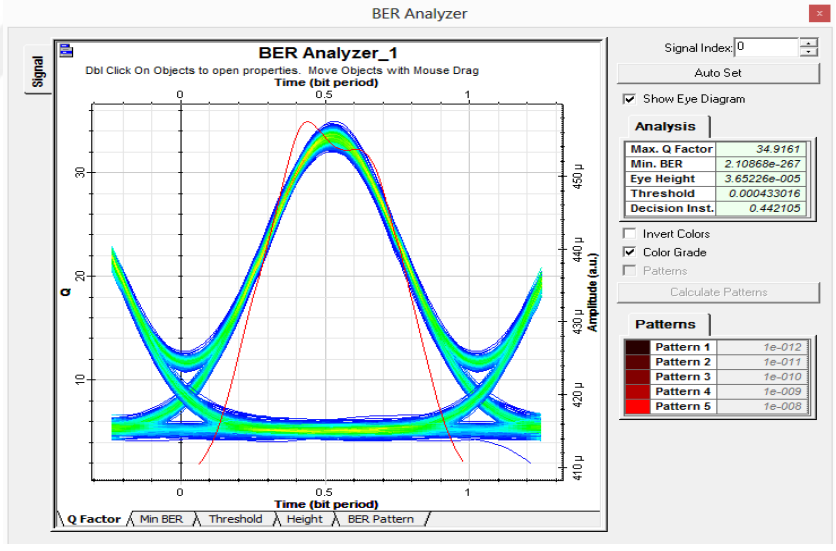
	Fiber Hat Uzunluğu L=10 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=20 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=50 km iken
Kalite Faktörü	**25,884**	17,852	4,964
BER	**$5{,}018 \times 10^{-148}$**	$1{,}384 \times 10^{-71}$	$3{,}398 \times 10^{-7}$
Göz Yüksekliği	**$2{,}339 \times 10^{-5}$**	$1{,}397 \times 10^{-5}$	$1{,}656 \times 10^{-6}$



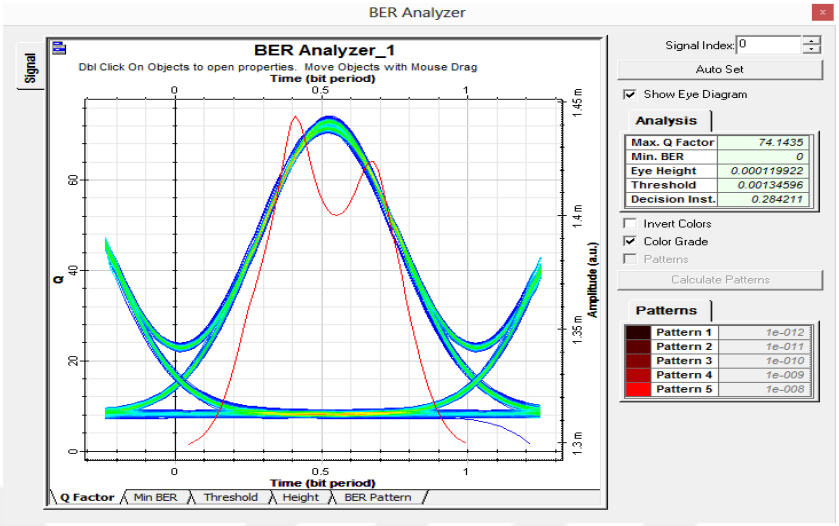
Şekil 4.5. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -10 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.6. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.7. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.8. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

Çizelge 4.2. RoF-BPSK modülasyonlu sistemde fiber hat uzunluğu 1 km, lazer giriş gücü -10, -5, 0, 5 dBm iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

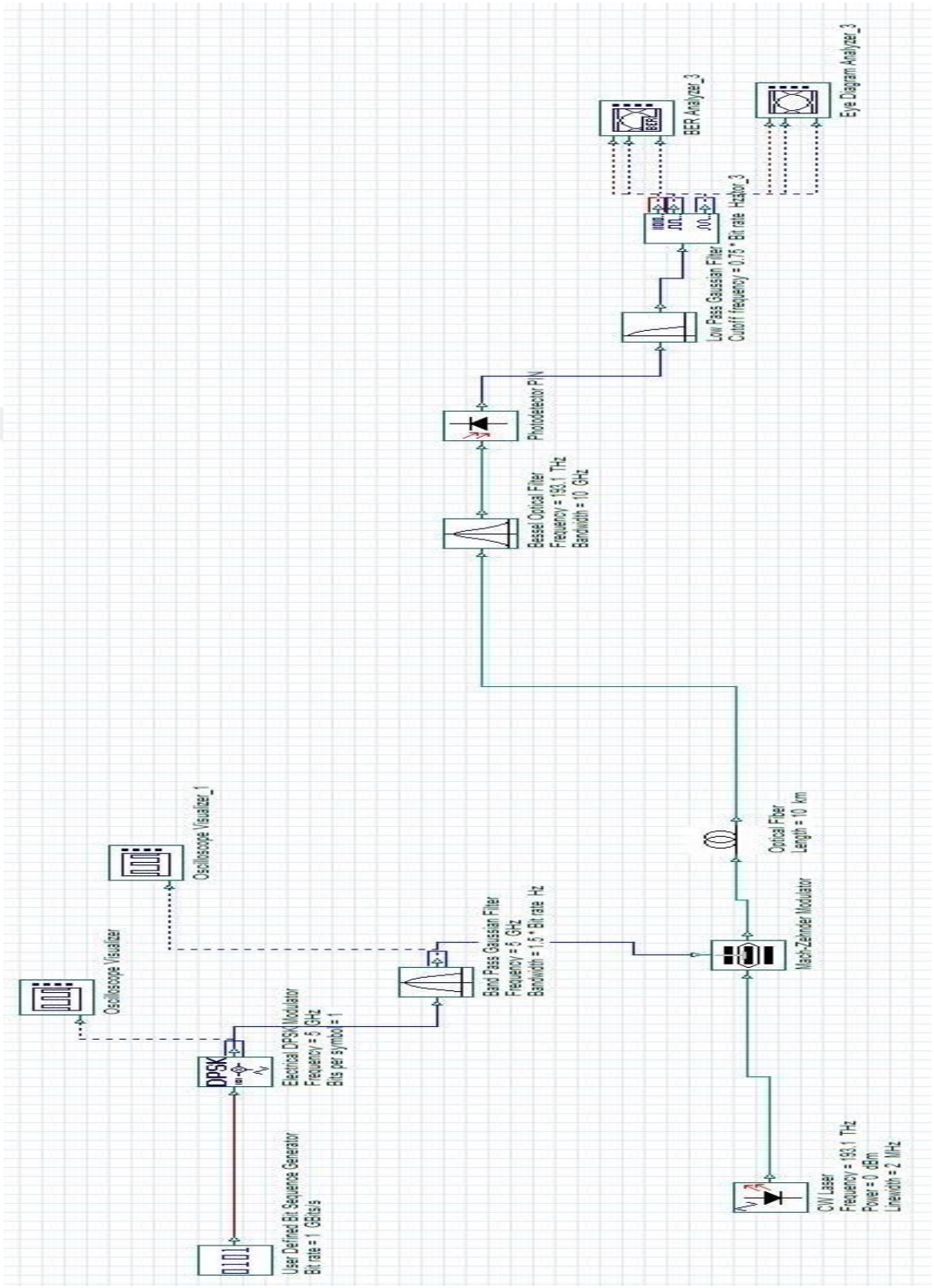
	Lazer Giriş Gücü -10 dBm	Lazer Giriş Gücü -5 dBm	Lazer Giriş Gücü 0 dBm	Lazer Giriş Gücü 5 dBm
Kalite Faktörü	4,841	14,006	34,916	**74,143**
BER	6,391 x 10^{-7}	7,135 x 10^{-45}	2,108 x 10^{-265}	**0**
Göz Yüksekliği	1,532 x 10^{-6}	9,994 x 10^{-6}	3,652 x 10^{-5}	**1,199 x 10^{-4}**

RoF-BPSK modülasyonunda lazer giriş gücü 0 dBm için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.2, 4.3, 4.4 ile birlikte Çizelge 4.1'deki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, fiber hat uzunluğu L=10 km iken 25,884 ile; en düşük kalite faktörü ise L=50 km iken 4,964 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, fiber hat uzunluğu arttıkça kalite faktörü değeri düşüş göstermiştir. BER incelendiğinde, en yüksek BER L=50 km iken 3,39813 x 10^{-7}olarak elde edilirken, en düşük BER L=10 km iken 5,01839 x 10^{-148}olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, fiber hat uzunluğunun artması BER'i artırmaktadır. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise, en büyük göz yüksekliği L=10 km iken 2,33993 x 10^{-5} olarak elde edilirken, en küçük göz yüksekliği L=50 km iken 1,65682 x 10^{-6} olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, fiber hat uzunluğunun artması göz yüksekliği değerini azaltmaktadır.

RoF-BPSK modülasyonunda lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 ile birlikte Çizelge 4.2'deki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, lazer giriş gücü 5 dBm iken 74,143 ile; en düşük kalite faktörü ise lazer giriş gücü -10 dBm iken 4,841 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, lazer giriş gücü arttıkça kalite faktörü değeri artış göstermiştir. BER incelendiğinde, en düşük BER, lazer giriş gücü 5 dBm iken 0 olarak elde edilirken, en yüksek BER, lazer giriş gücü -10 dBm iken 6,391 x 10^{-7} olarak elde edilmiştir. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise, en büyük göz yüksekliği lazer giriş gücü 5 dBm iken 1,199 x 10^{-4} olarak edilirken, en küçük göz yüksekliği lazer giriş gücü -10 dBm iken 1,532 x 10^{-6} olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, lazer giriş gücünün artması göz yüksekliği değerini artırmaktadır.

4.2. DPSK-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları

RoF haberleşmesinde QPSK modülasyonu kullanılarak Optisystem sürüm 7.0 programında oluşturulan benzetim modeli Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



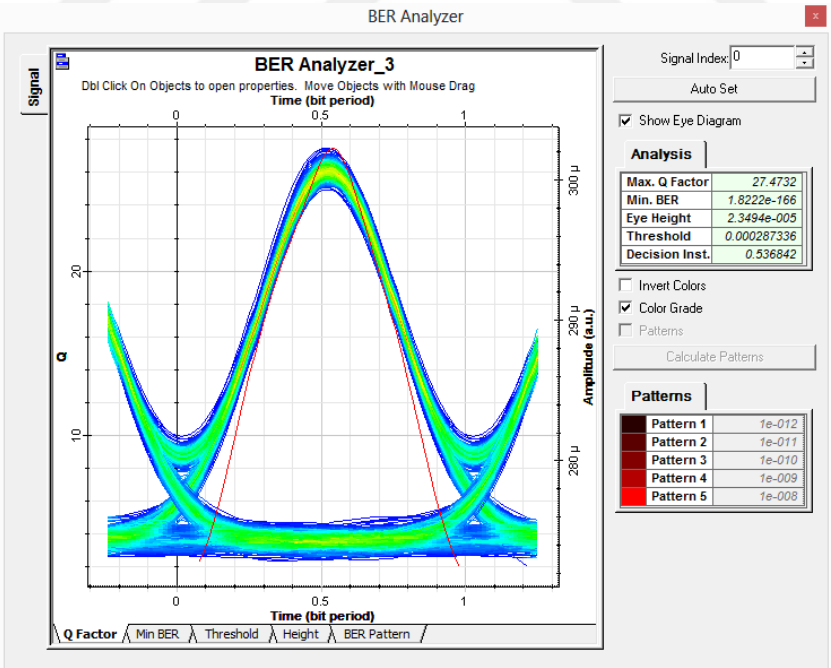
Şekil 4.9. RoF-DPSK modülasyonlu sistem yapısı

Bölüm 3'te bahsedilen benzetim koşullarına göre; lazer giriş gücü 0 dBm, veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.10-4.12'de gösterilmiştir.

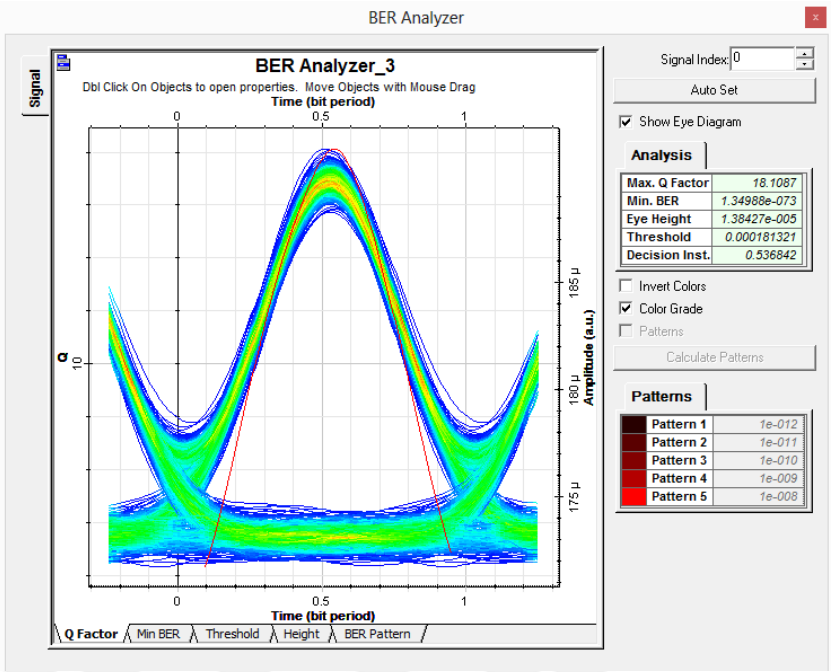
Fiber hat uzunluğu 10 km, 20 km ve 50 km olarak değiştirildiğinde elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

RoF-DPSK modülasyonunda veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup, fiber hat uzunluğunun L=1 km olduğu durumda, lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.13-4.16'da gösterilmiştir.

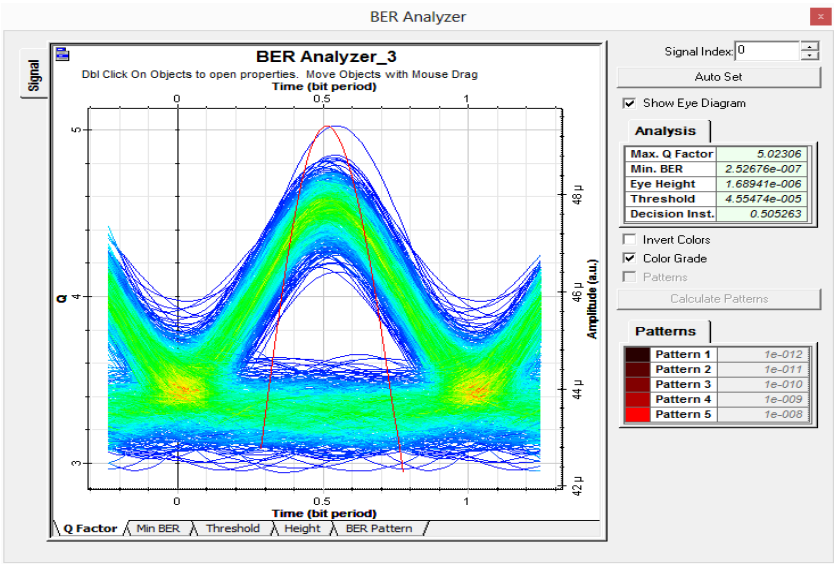
Lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.10. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



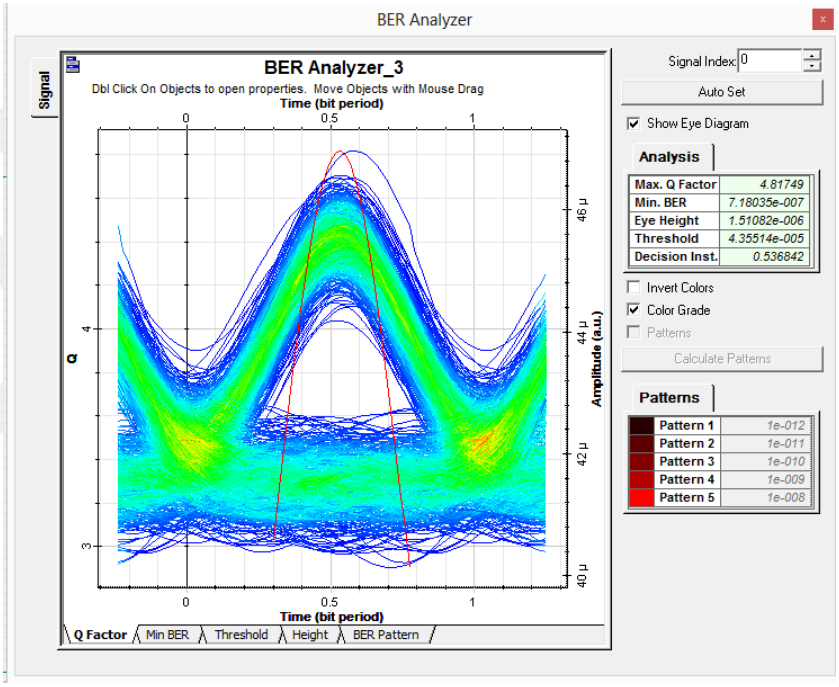
Şekil 4.11. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



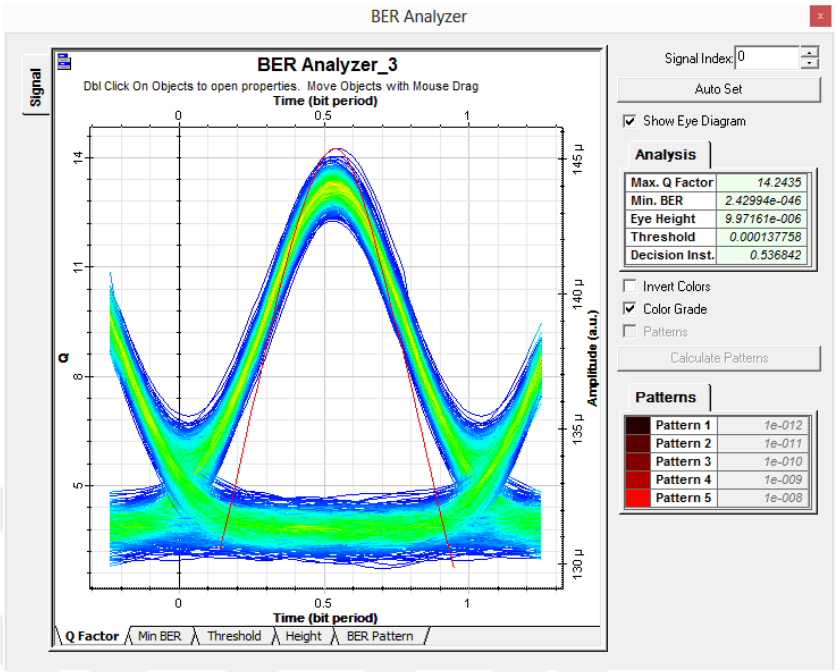
Şekil 4.12. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

Çizelge 4.3. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

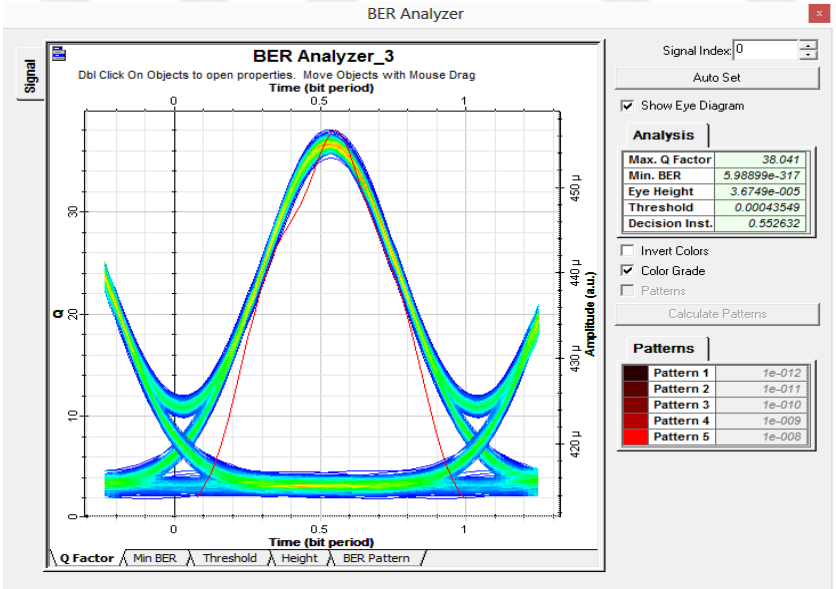
	Fiber Hat Uzunluğu L=10 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=20 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=50 km iken
Kalite Faktörü	**27,473**	18,108	5,023
BER	**$1{,}822 \times 10^{-166}$**	$1{,}349 \times 10^{-73}$	$2{,}526 \times 10^{-7}$
Göz Yüksekliği	**$2{,}349 \times 10^{-5}$**	$1{,}384 \times 10^{-5}$	$1{,}689 \times 10^{-6}$



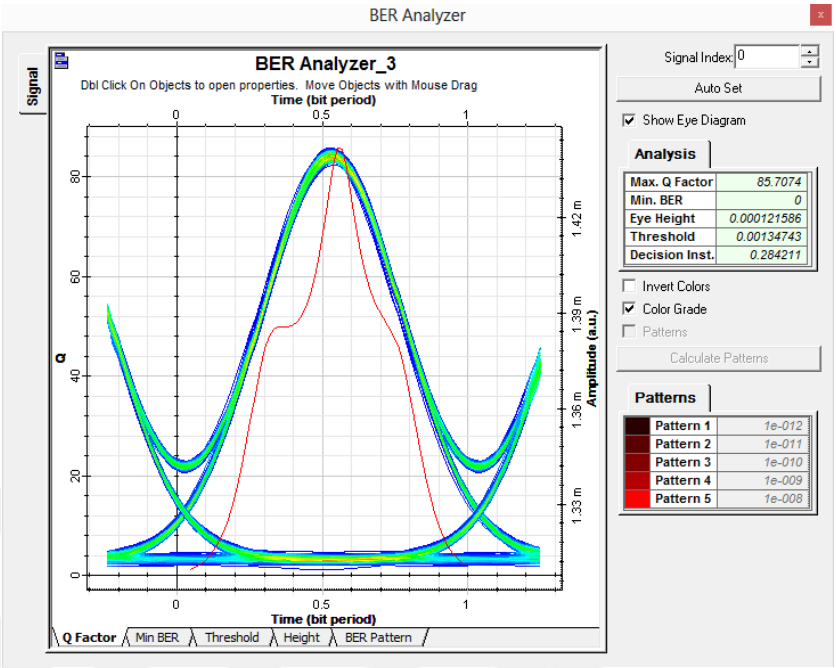
Şekil 4.13. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -10 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.14. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.15. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.16. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

Çizelge 4.4. RoF-DPSK modülasyonlu sistemde fiber hat uzunluğu 1 km, lazer giriş gücü -10, -5, 0, 5 dBm iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

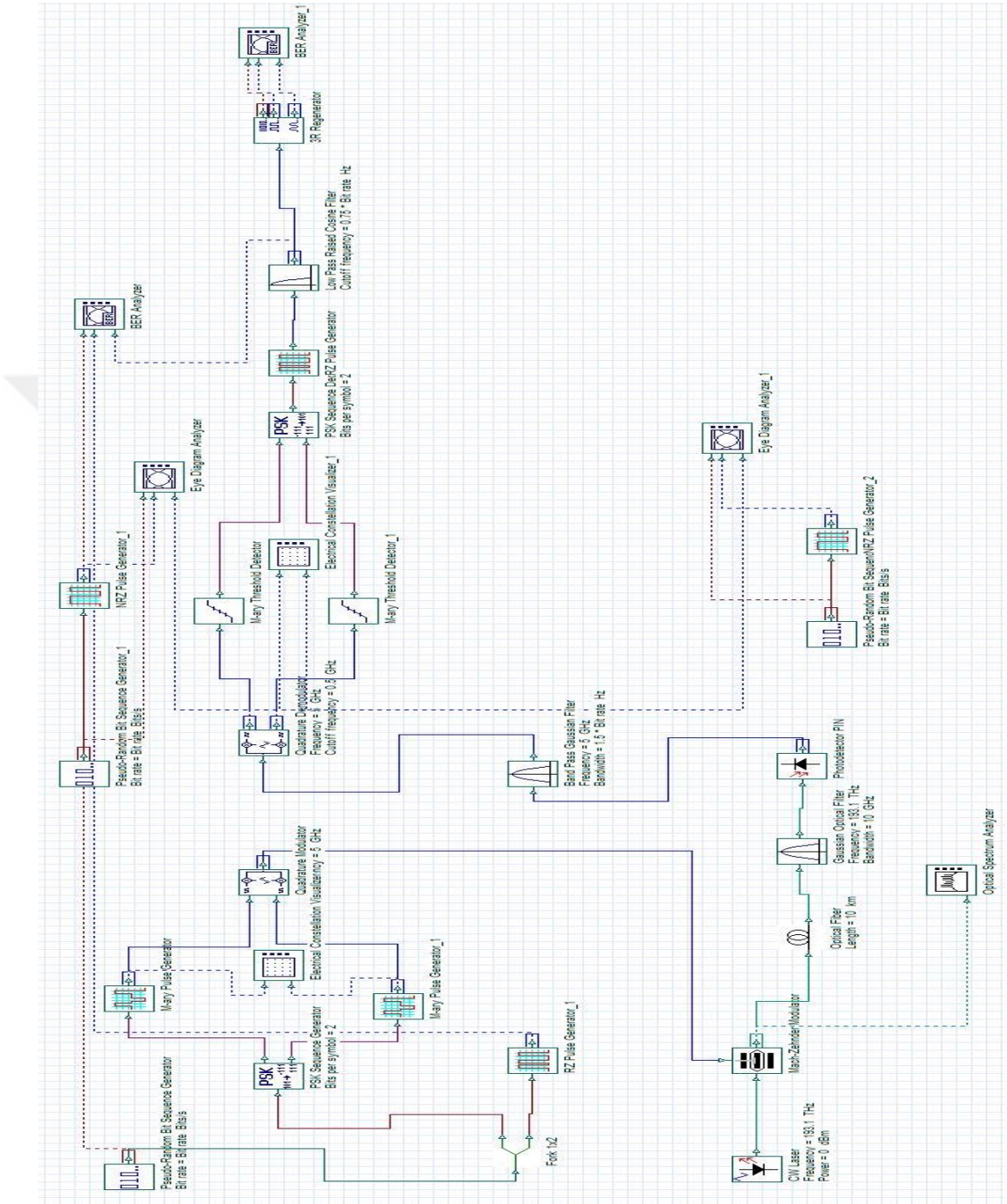
	Lazer Giriş Gücü -10 dBm	Lazer Giriş Gücü -5 dBm	Lazer Giriş Gücü 0 dBm	Lazer Giriş Gücü 5 dBm
Kalite Faktörü	4,817	14,243	38,041	**85,707**
BER	7,180 x 10^{-7}	2,429 x 10^{-46}	5,988 x 10^{-317}	**0**
Göz yüksekliği	1,510 x 10^{-6}	9,971 x 10^{-6}	3,674 x 10^{-5}	**1,215 x 10^{-4}**

RoF-DPSK modülasyonunda lazer giriş gücü 0 dBm için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.10, 4.11, 4.12 ile birlikte Çizelge 4.3'teki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, fiber hat uzunluğu L=10 km iken 27,473 ile; en düşük kalite faktörü ise L=50 km iken 5,023 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, fiber hat uzunluğu arttıkça kalite faktörü değeri düşüş göstermiştir. BER incelendiğinde, en yüksek BER L=50 km iken 2,526 x 10^{-7}olarak elde edilirken, en düşük BER L=10 km iken 1,822 x 10^{-166} olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, fiber hat uzunluğunun artması BER'i artırmaktadır. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise, en büyük göz yüksekliği L=10 km iken 2,349 x 10^{-5} olarak elde edilirken, en küçük göz yüksekliği L=50 km iken 1,689 x 10^{-6} olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, fiber hat uzunluğunun artması göz yüksekliği değerini azaltmaktadır.

RoF-DPSK modülasyonunda lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 ile birlikte Çizelge 4.4'teki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, lazer giriş gücü 5 dBm iken 85,707 ile; en düşük kalite faktörü ise lazer giriş gücü -10 dBm iken 4,817 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, lazer giriş gücü arttıkça kalite faktörü değeri artış göstermiştir. BER incelendiğinde, en düşük BER, lazer giriş gücü 5 dBm iken 0 olarak elde edilirken, en yüksek BER, lazer giriş gücü -10 dBm iken 7,180 x 10^{-7} olarak elde edilmiştir. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise en büyük göz yüksekliği lazer giriş gücü 5 dBm iken 1,215 x 10^{-4} olarak elde edilirken, en küçük göz yüksekliği lazer giriş gücü -10 dBm iken 1,510 x 10^{-6} olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, lazer giriş gücünün artması göz yüksekliği değerini artırmaktadır.

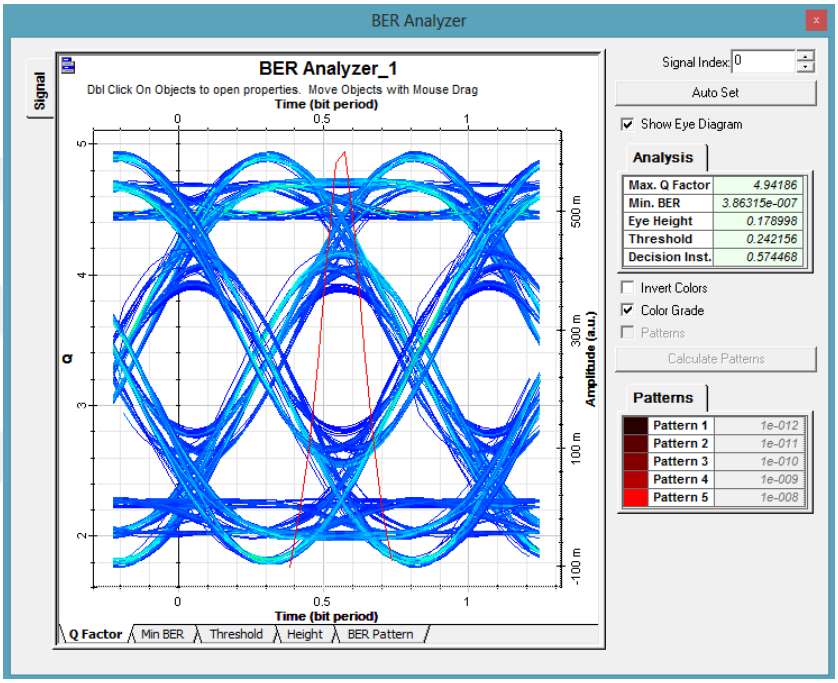
4.3. QPSK-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları

RoF haberleşmesinde QPSK modülasyonu kullanılarak Optisystem sürüm 7.0 programında oluşturulan benzetim modeli Şekil 4.17'de gösterilmektedir.

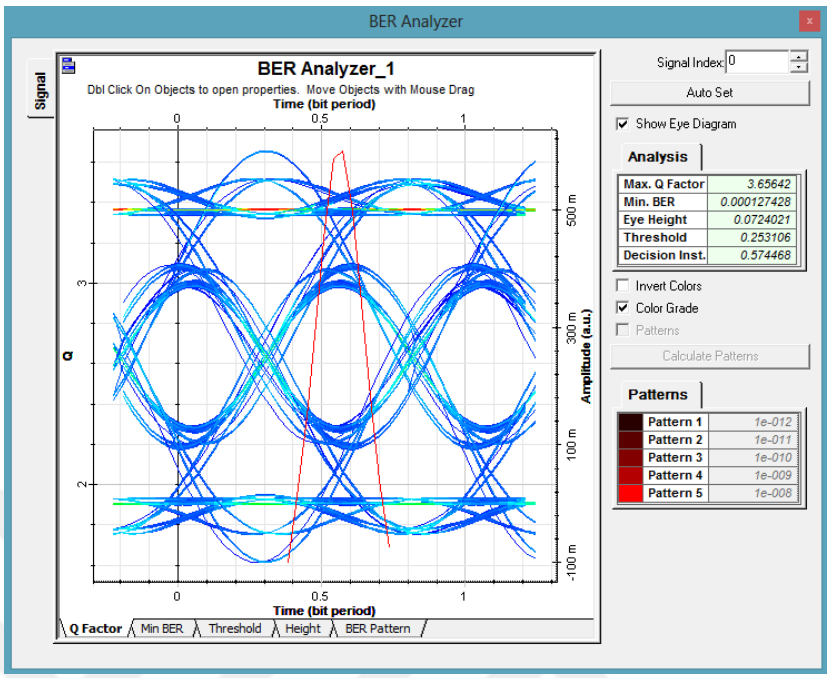


Şekil 4.17. RoF-QPSK modülasyonlu sistem yapısı

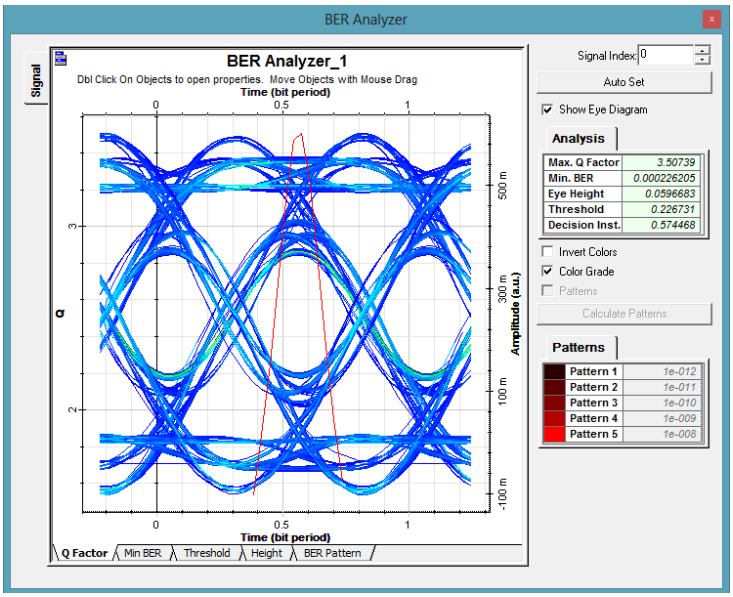
Bölüm 3'te bahsedilen benzetim koşullarına göre, lazer giriş gücü 0 dBm, veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.18-4.20'de gösterilmiştir. Fiber hat uzunlukları 10 km, 20 km ve 50 km olarak değiştirildiğinde elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.18. RoF-QPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.19. RoF-QPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, bit hata oranı ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.20. RoF-QPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

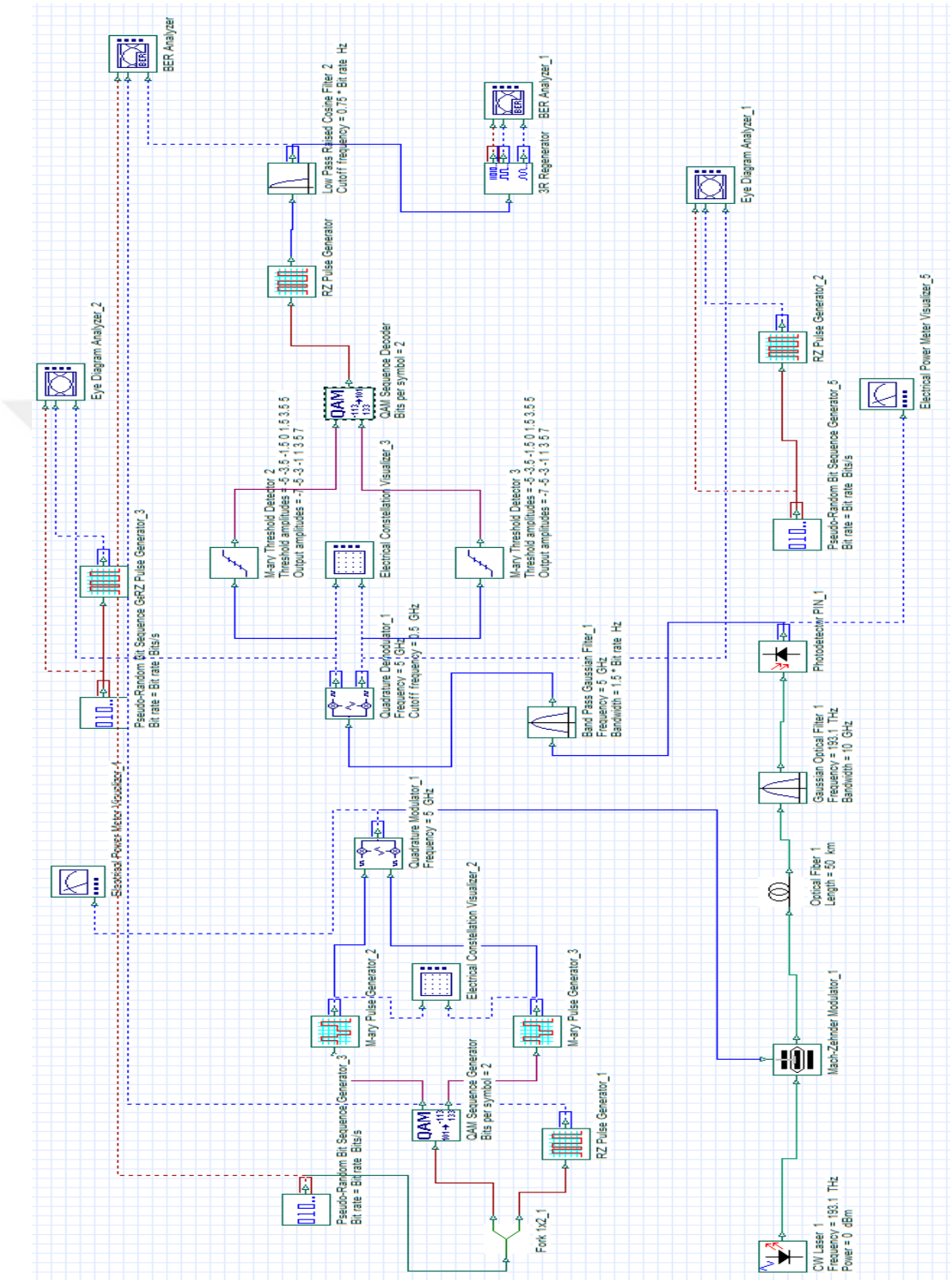
Çizelge 4.5. RoF-QPSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

	Fiber Hat Uzunluğu L=10 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=20 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=50 km iken
Kalite Faktörü	**4,941**	3,656	3,507
BER	**3,863 x 10^{-7}**	1,274 x 10^{-4}	2,262 x 10^{-4}
Göz Yüksekliği	**1,789 x 10^{-1}**	7,240 x 10^{-2}	5,966 x 10^{-2}

RoF-QPSK modülasyonunda lazer giriş gücü 0 dBm için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.18, 4.19, 4.20 ile birlikte Çizelge 4.5'teki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, fiber hat uzunluğu L=10 km iken 4,941 ile; en düşük kalite faktörü ise L=50 km iken 3,507 olarak elde edilmiştir. BER incelendiğinde, en yüksek BER L=50 km iken 2,262 x 10^{-4} olarak elde edilirken, en düşük BER L=10 km iken 3,863 x 10^{-7} olarak elde edilmiştir. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise, en büyük göz yüksekliği L=10 km iken 1,789 x 10^{-1} olarak elde edilirken, en küçük göz yüksekliği L=50 km iken 5,966 x 10^{-2} olarak elde edilmiştir.

4.4. FSK-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları

RoF haberleşmesinde FSK modülasyonu kullanılarak Optisystem sürüm 7.0 programında oluşturulan benzetim modeli Şekil 4.21'de gösterilmektedir.



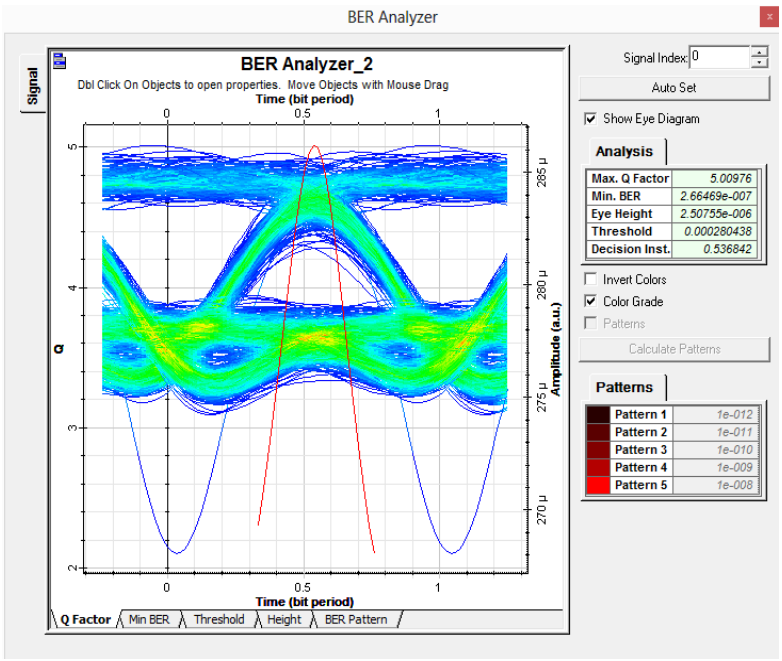
Şekil 4.21. RoF-FSK modülasyonlu sistem yapısı

Bölüm 3'te bahsedilen benzetim koşullarına göre; lazer giriş gücü 0 dBm, veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.22-4.24'te gösterilmiştir.

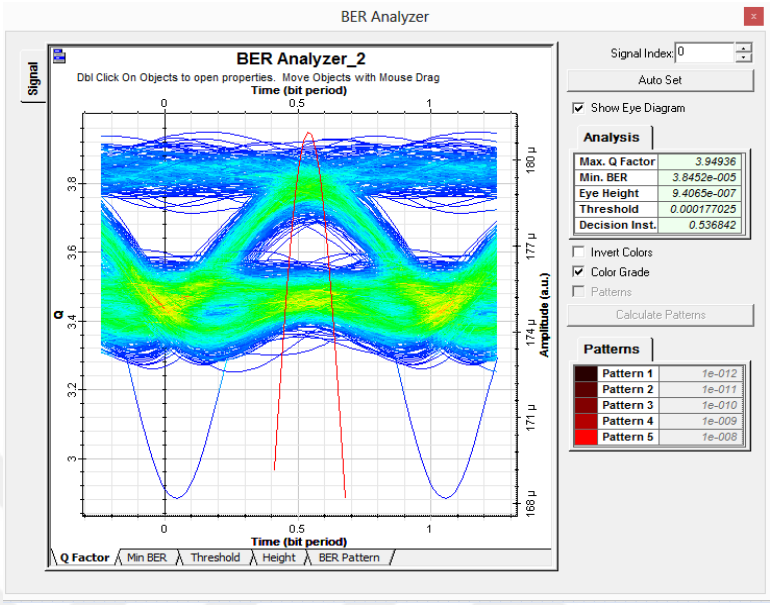
Fiber hat uzunluğu 10 km, 20 km ve 50 km olarak değiştirildiğinde elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

RoF-FSK modülasyonunda veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup, fiber hat uzunluğunun L=1 km olduğu durumda, lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.25-4.28'de gösterilmiştir.

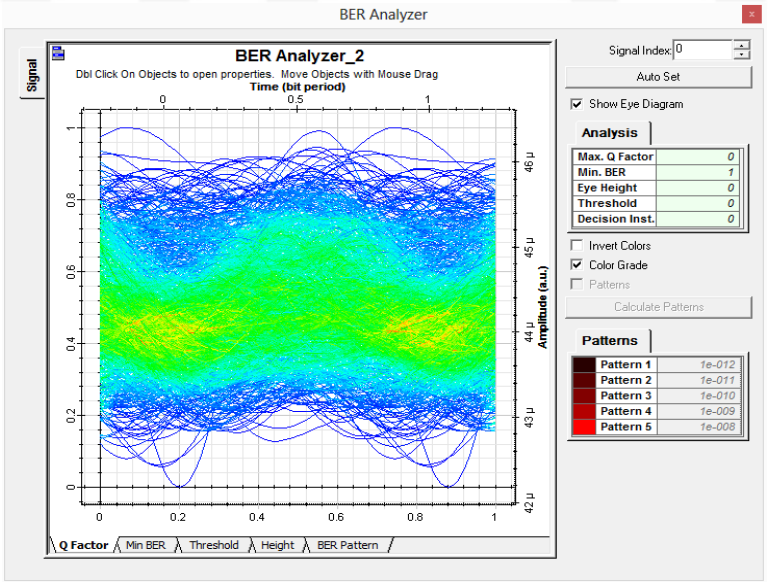
Lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.22. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



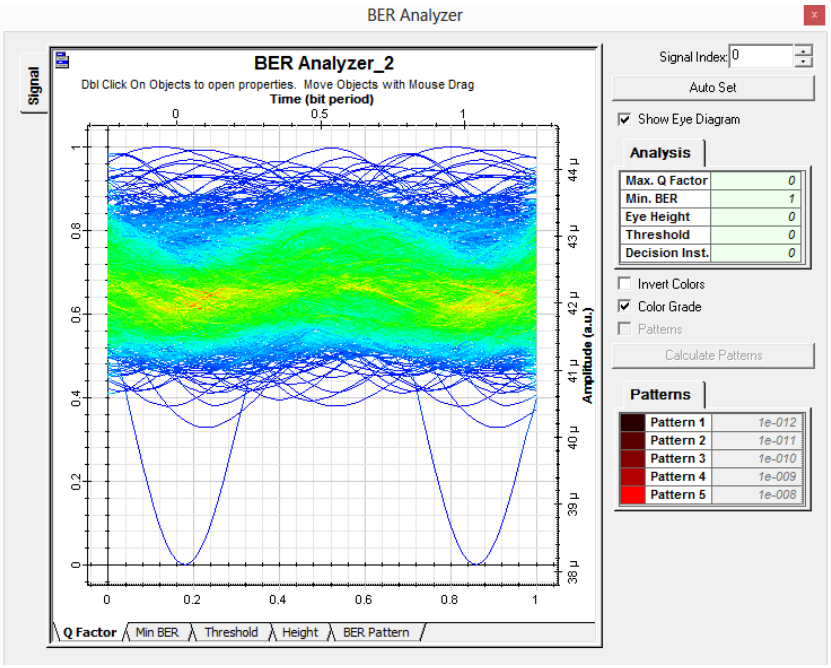
Şekil 4.23. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



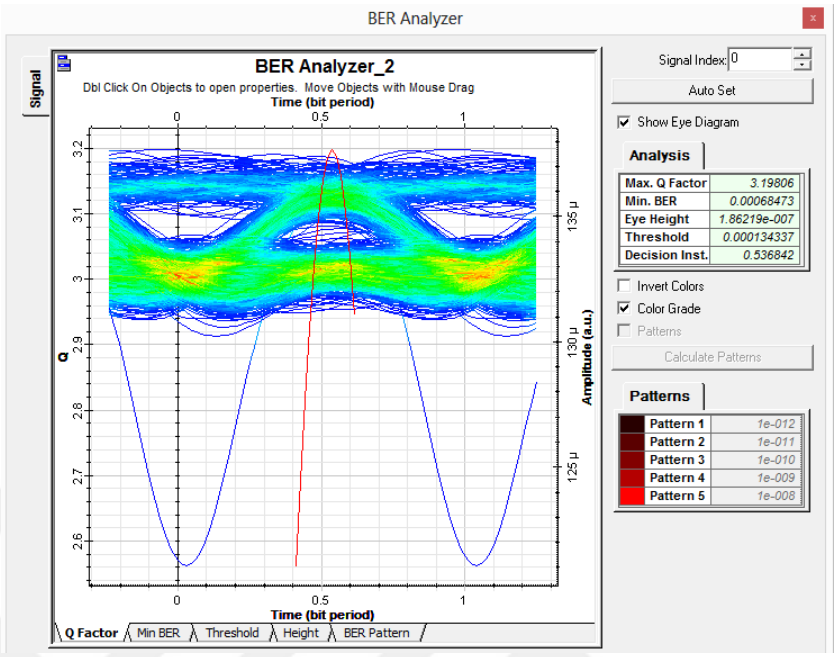
Şekil 4.24. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

Çizelge 4.6. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

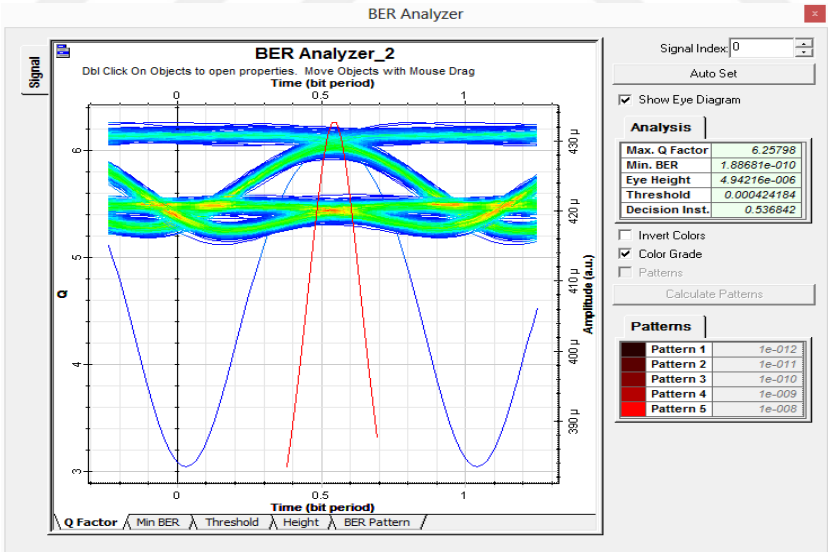
	Fiber Hat Uzunluğu L=10 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=20 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=50 km iken
Kalite Faktörü	**5,009**	3,949	0
BER	**$2{,}664 \times 10^{-7}$**	$3{,}845 \times 10^{-5}$	1
Göz Yüksekliği	**$2{,}507 \times 10^{-6}$**	$9{,}406 \times 10^{-7}$	0



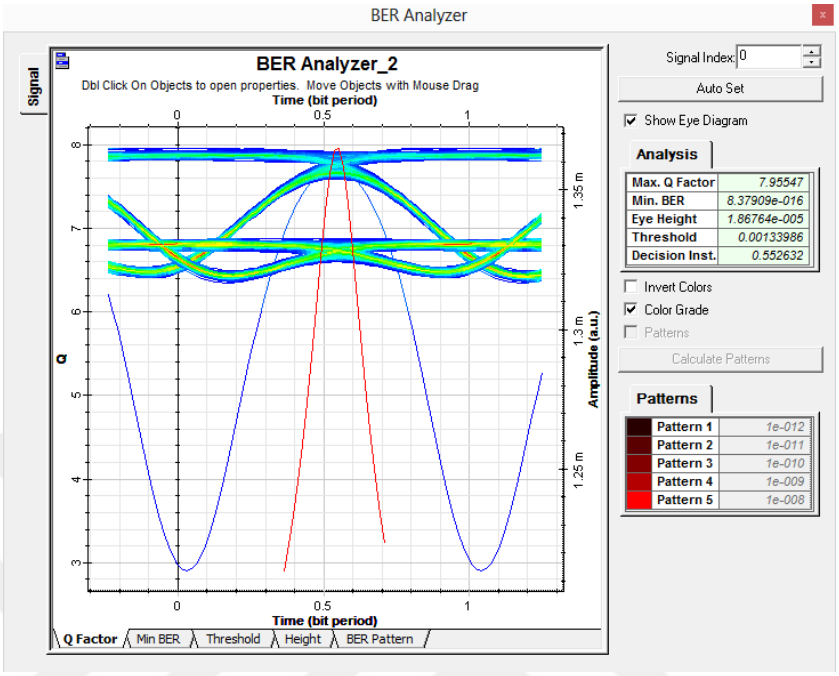
Şekil 4.25. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -10 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.26. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü -5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.27. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.28. RoF-FSK modülasyonlu sistemde giriş gücü 5 dBm, fiber hat uzunluğu 1 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

Çizelge 4.7. RoF-FSK modülasyonlu sistemde fiber hat uzunluğu 1 km, lazer giriş gücü -10, -5, 0, 5 dBm iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

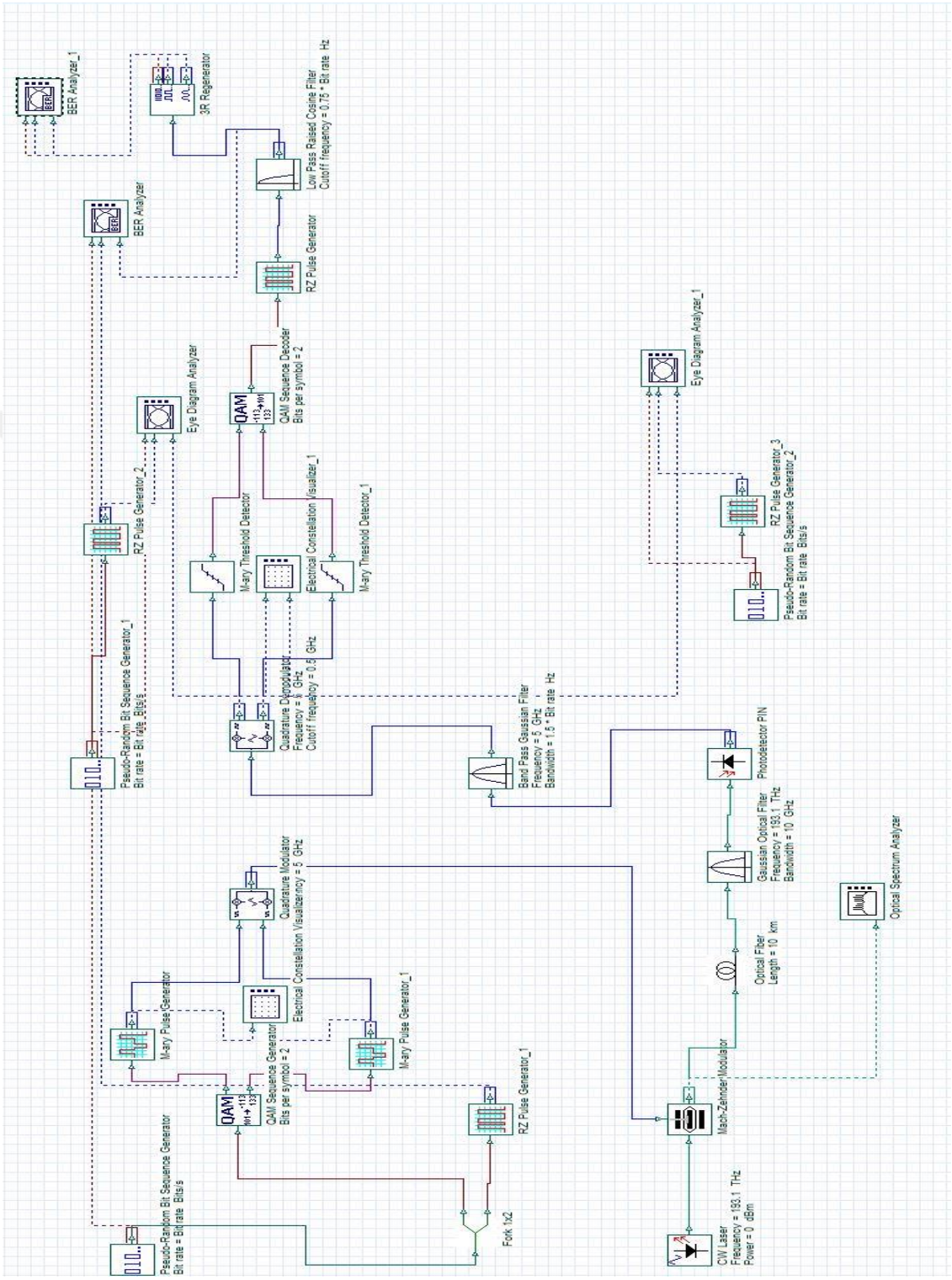
	Lazer Giriş Gücü -10 dBm	Lazer Giriş Gücü -5 dBm	Lazer Giriş Gücü 0 dBm	Lazer Giriş Gücü 5 dBm
Kalite Faktörü	0	3,198	6,257	**7,955**
BER	1	6,847 x 10^{-4}	1,886 x 10^{-10}	**8,379 x 10^{-16}**
Göz Yüksekliği	0	1,862 x 10^{-7}	4,942 x 10^{-6}	**1,867 x 10^{-5}**

RoF-FSK modülasyonunda lazer giriş gücü 0 dBm için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.22, 4.23, 4.24 ile birlikte Çizelge 4.6'daki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, fiber hat uzunluğu L=10 km iken 5,009 ile; en düşük kalite faktörü ise L=50 km iken 0 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, fiber hat uzunluğu arttıkça kalite faktörü değeri düşüş göstermiştir. BER incelendiğinde, en yüksek BER L=50 km iken 1 olarak elde edilirken, en düşük BER L=10 km iken 2,664 x 10^{-7} olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, fiber hat uzunluğunun artması BER'i artırmaktadır. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise, en büyük göz yüksekliği L=10 km iken 2,507 x 10^{-6} olarak elde edilirken, en küçük göz yüksekliği L=50 km iken 0 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, fiber hat uzunluğunun artması göz yüksekliği değerini azaltmaktadır.

RoF-FSK modülasyonunda lazer giriş güçlerinin -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ile birlikte Çizelge 4.7'deki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, lazer giriş gücü 5 dBm iken 7,955 ile; en düşük kalite faktörü ise lazer giriş gücü -10 dBm iken 0 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, lazer giriş gücü arttıkça kalite faktörü değeri artış göstermiştir. BER incelendiğinde, en düşük BER, lazer giriş gücü 5 dBm iken 8,379 x 10^{-16} olarak elde edilirken, en yüksek BER, lazer giriş gücü -10 dBm iken 1 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, lazer giriş gücü arttıkça BER değeri düşüş göstermiştir. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise, en büyük göz yüksekliği lazer giriş gücü 5 dBm iken 1,867 x 10^{-5} olarak edilirken, en küçük göz yüksekliği lazer giriş gücü -10 dBm iken 0 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, lazer giriş gücünün artması göz yüksekliği değerini artırmaktadır.

4.5. 4-QAM-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları

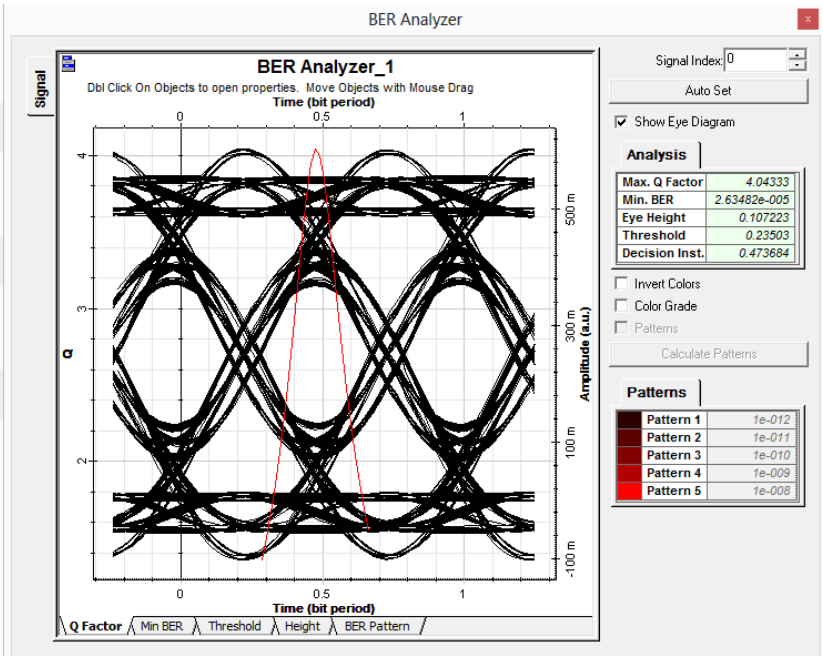
RoF haberleşmesinde 4-QAM modülasyonu kullanılarak Optisystem sürüm 7.0 programında oluşturulan benzetim modeli Şekil 4.29'da gösterilmektedir.



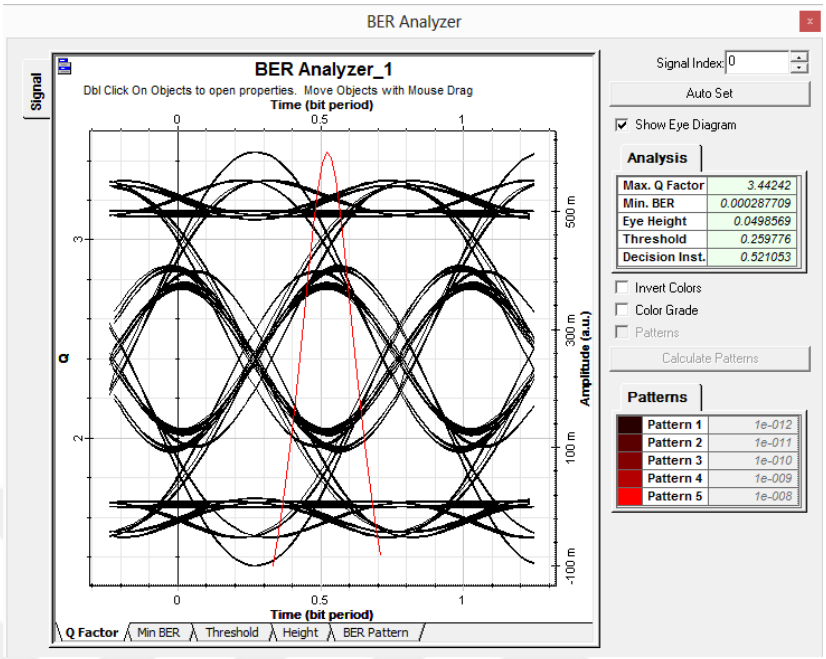
Şekil 4.29. RoF-4-QAM modülasyonlu sistem yapısı

Bölüm 3'te bahsedilen benzetim koşullarına göre, lazer giriş gücü 0 dBm, veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.30-4.32'de gösterilmiştir.

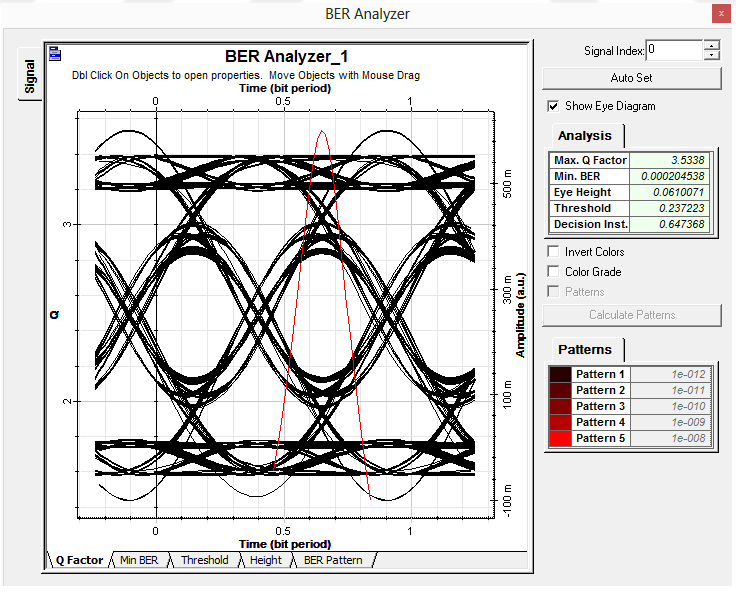
Fiber hat uzunluğu 10 km, 20 km ve 50 km olarak değiştirildiğinde elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.30. RoF-4-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.31. RoF-4-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.32. RoF-4-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

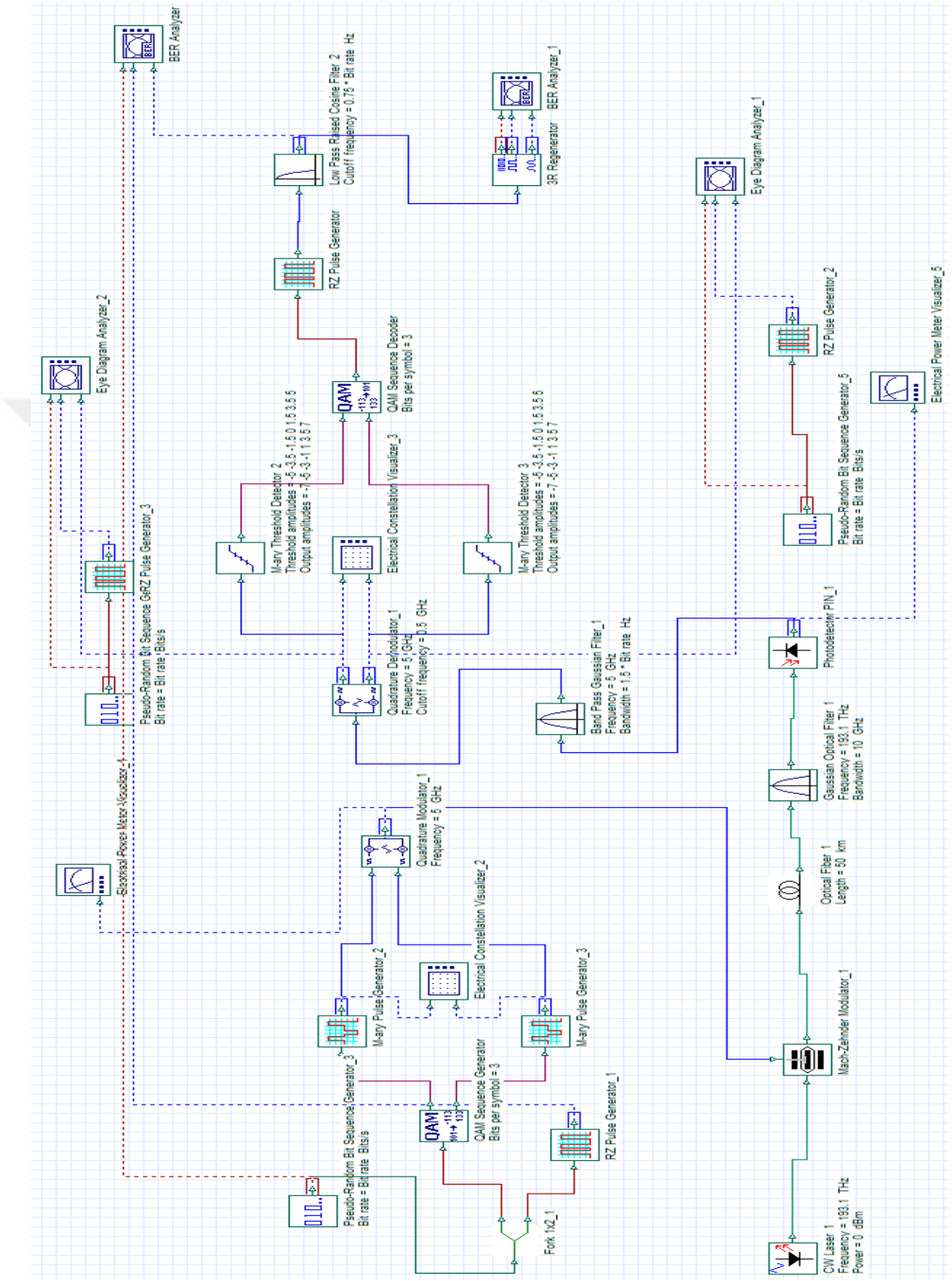
Çizelge 4.8. RoF-4-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

	Fiber Hat Uzunluğu L=10 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=20 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=50 km iken
Kalite Faktörü	**4,043**	3,442	3,533
BER	**2,634 x 10^{-5}**	2,877 x 10^{-4}	2,045 x 10^{-4}
Göz Yüksekliği	**1,072 x 10^{-1}**	4,985 x 10^{-2}	6,100 x 10^{-2}

RoF-4-QAM modülasyonunda lazer giriş gücü 0 dBm için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.30, 4.31, 4.32 ile birlikte Çizelge 4.8'deki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, fiber hat uzunluğu L=5 km iken 4,043 ile; en düşük kalite faktörü ise L=20 km iken 3,442 olarak elde edilmiştir. BER incelendiğinde, en yüksek BER L=20 km iken 2,877 x 10^{-4} olarak elde edilirken, en düşük BER L=10 km iken 2,634 x 10^{-5} olarak elde edilmiştir. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise, en büyük göz yüksekliği L=10 km iken 1,072 x 10^{-1} olarak elde edilirken, en küçük göz yüksekliği L=20 km'de iken 4,985 x 10^{-2} olarak elde edilmiştir.

4.6. 8-QAM-RoF Modülasyonu Benzetim Sonuçları

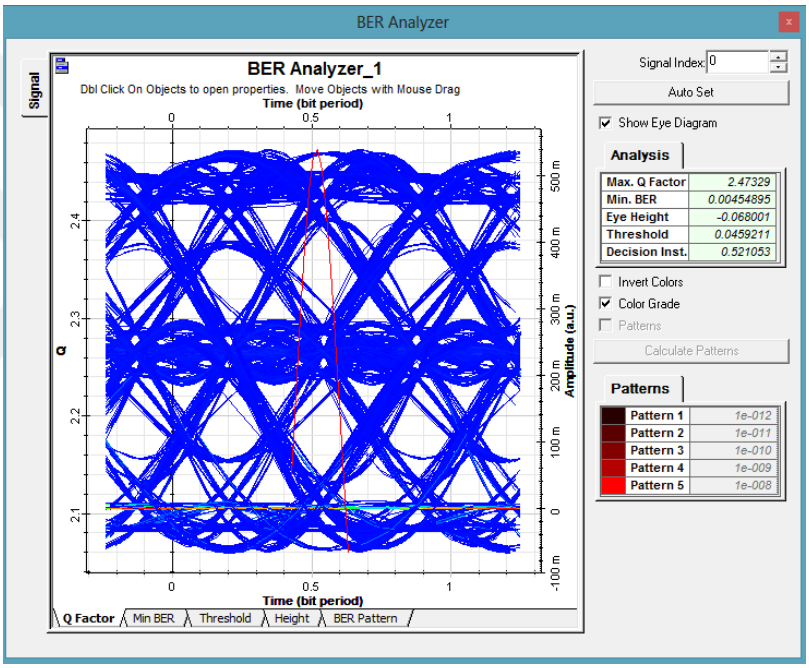
RoF haberleşmesinde 8-QAM modülasyonu kullanılarak Optisystem sürüm 7.0 programında oluşturulan benzetim modeli Şekil 4.33'te gösterilmektedir.



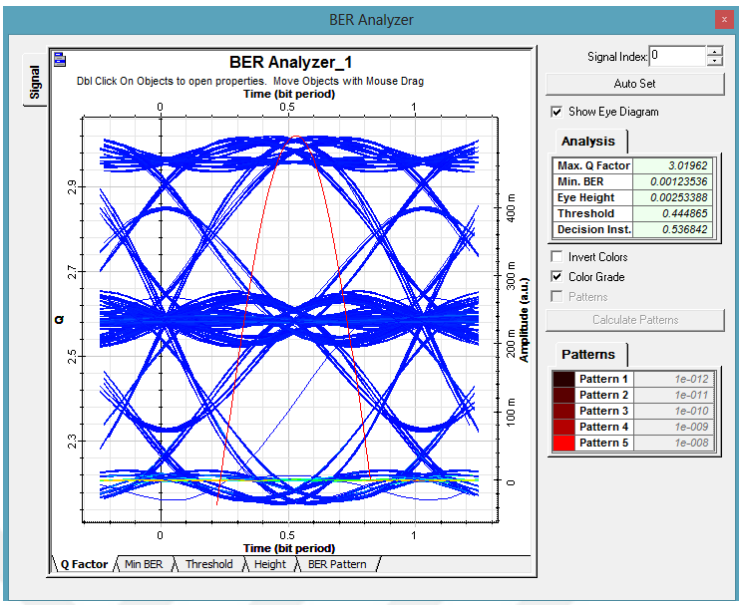
Şekil 4.33. RoF-8-QAM modülasyonlu sistem yapısı

Bölüm 3'te bahsedilen benzetim koşullarına göre, lazer giriş gücü 0 dBm, veri hızı 1 Gbps hızında sabit tutulup fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerlerinde elde edilen kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları, Şekil 4.34-4.36'da gösterilmiştir.

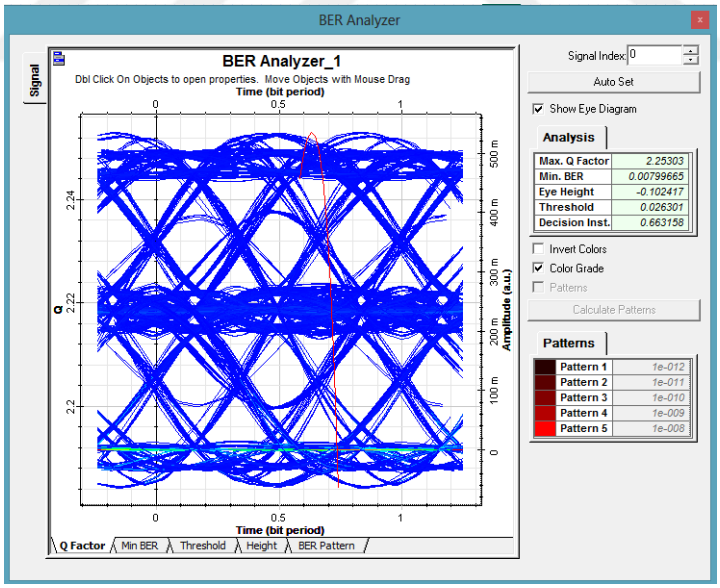
Fiber hat uzunluğu 10 km, 20 km ve 50 km olarak değiştirildiğinde elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği değerleri Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.34. RoF-8-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.35. RoF-8-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 20 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları



Şekil 4.36. RoF-8-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

Çizelge 4.9. RoF-8-QAM modülasyonlu sistemde giriş gücü 0 dBm, fiber hat uzunluğu 10, 20, 50 km iken kalite faktörü, BER ve göz diyagramı sonuçları

	Fiber Hat Uzunluğu L=10 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=20 km iken	Fiber Hat Uzunluğu L=50 km iken
Kalite Faktörü	2,473	**3,019**	2,253
BER	4,548 x 10^{-3}	**1,235 x 10^{-3}**	7,996 x 10^{-3}
Göz Yüksekliği	-6,800 x 10^{-2}	**2,533 x 10^{-3}**	-1,024 x 10^{-1}

RoF-8-QAM modülasyonunda lazer giriş gücü 0 dBm için gerçekleştirilen benzetimlere göre, Şekil 4.34, 4.35, 4.36 ile birlikte Çizelge 4.9'daki sonuçlar incelendiğinde; en yüksek kalite faktörü, fiber hat uzunluğu L=20 km iken 3,019 ile; en düşük kalite faktörü ise L=50 km iken 2,253 olarak elde edilmiştir. BER incelendiğinde, en yüksek BER L=50 km iken 7,996 x 10^{-3} olarak elde edilirken, en düşük BER L=20 km iken 1,235 x 10^{-3} olarak elde edilmiştir. Göz yüksekliği değerleri incelendiğinde ise, en büyük göz yüksekliği L=20 km iken 2,533 x 10^{-3} olarak elde edilirken, en küçük göz yüksekliği L=10 km iken -6,800 x 10^{-2} olarak elde edilmiştir.

Benzetimler incelendiğinde en iyi sonuçların L=20 km'de alındığı görülmektedir. Diğer modülasyon çeşitleriyle kıyaslandığında 8-QAM modülasyonunda L=20 km'de en iyi sonucun alınmasının sebebi, modülasyon seviyesinin artmasıyla birlikte optik fiberde meydana gelen doğrusal olmayan etkilerin sistem performansını sınırlamasıdır. Bu etkilerden kaynaklı olarak fiber hat uzunluğuna bağlı kalite faktörü ve göz yüksekliği değerleri, en iyi sonuçları L=20 km'de almıştır.

4.7. Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırmalı Sunumu

Bu alt bölümde, 4.bölümün genelinde sunulan benzetim sonuçları, modülasyon tekniklerine göre gruplandırılarak Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11'de verilmiştir. Çizelge 4.10'da lazer giriş gücü 0 dBm olan sistem üzerinde BPSK, DPSK, FSK, QPSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonları uygulandığında, fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için benzetimlerde elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge 4.11'de fiber hat uzunluğu 1 km olan sistem üzerinde BPSK, DPSK, FSK modülasyonları uygulandığında, değişik lazer giriş güçleri için benzetimlerde elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Çizelge 4.10. RoF sisteminde BPSK, DPSK, FSK, QPSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyonları uygulandığında, lazer giriş gücü 0 dBm iken, fiber hat uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği sonuçları

Sistem Parametresi/ Hat Uzunluğu (L)		Modülasyon Çeşitleri					
		BPSK	DPSK	FSK	QPSK	4-QAM	8-QAM
Kalite Faktörü	L = 10 km	25,884	27,473	5,009	4,941	4,043	2,473
	L = 20 km	17,852	18,108	3,949	3,656	3,442	3,019
	L = 50 km	4,964	5,023	0	3,507	3,533	2,253
BER	L = 10 km	$5{,}018 \times 10^{-148}$	$1{,}822 \times 10^{-166}$	$2{,}664 \times 10^{-7}$	$3{,}863 \times 10^{-7}$	$2{,}634 \times 10^{-5}$	$4{,}548 \times 10^{-3}$
	L = 20 km	$1{,}384 \times 10^{-71}$	$1{,}349 \times 10^{-73}$	$3{,}845 \times 10^{-5}$	$1{,}274 \times 10^{-4}$	$2{,}877 \times 10^{-4}$	$1{,}235 \times 10^{-3}$
	L = 50 km	$3{,}398 \times 10^{-7}$	$2{,}526 \times 10^{-7}$	1	$2{,}262 \times 10^{-4}$	$2{,}045 \times 10^{-4}$	$7{,}996 \times 10^{-3}$
Göz Yüksekliği	L = 10 km	$2{,}339 \times 10^{-5}$	$2{,}349 \times 10^{-5}$	$2{,}507 \times 10^{-6}$	$1{,}789 \times 10^{-1}$	$1{,}072 \times 10^{-1}$	$-6{,}800 \times 10^{-2}$
	L = 20 km	$1{,}397 \times 10^{-5}$	$1{,}384 \times 10^{-5}$	$9{,}406 \times 10^{-7}$	$7{,}240 \times 10^{-2}$	$4{,}985 \times 10^{-2}$	$2{,}533 \times 10^{-3}$
	L = 50 km	$1{,}656 \times 10^{-6}$	$1{,}689 \times 10^{-6}$	0	$5{,}966 \times 10^{-2}$	$6{,}100 \times 10^{-2}$	$-1{,}024 \times 10^{-1}$

Çizelge 4.11. RoF sisteminde BPSK, DPSK, FSK modülasyonları uygulandığında, fiber hat uzunluğu 1 km iken lazer giriş gücünün -10 dBm, -5 dBm, 0 dBm ve 5 dBm değerleri için elde edilen kalite faktörü, BER ve göz yüksekliği sonuçları

Sistem Parametresi/ Lazer Giriş Gücü ($P_{giriş}$)		Modülasyon Çeşitleri		
		BPSK	DPSK	FSK
Kalite Faktörü	$P_{giriş}$ = -10 dBm	4,841	4,817	0
	$P_{giriş}$ = -5 dBm	14,006	14,243	3,198
	$P_{giriş}$ = 0 dBm	34,916	38,041	6,257
	$P_{giriş}$ = 5 dBm	74,143	85,707	7,955
BER	$P_{giriş}$ = -10 dBm	$6,391 \times 10^{-7}$	$7,180 \times 10^{-7}$	1
	$P_{giriş}$ = -5 dBm	$7,135 \times 10^{-45}$	$2,429 \times 10^{-46}$	$6,847 \times 10^{-4}$
	$P_{giriş}$ = 0 dBm	$2,108 \times 10^{-265}$	$5,988 \times 10^{-317}$	$1,886 \times 10^{-10}$
	$P_{giriş}$ = 5 dBm	0	0	$8,379 \times 10^{-16}$
Göz Yüksekliği	$P_{giriş}$ = -10 dBm	$1,532 \times 10^{-6}$	$1,510 \times 10^{-6}$	0
	$P_{giriş}$ = -5 dBm	$9,994 \times 10^{-6}$	$9,971 \times 10^{-6}$	$1,862 \times 10^{-7}$
	$P_{giriş}$ = 0 dBm	$3,652 \times 10^{-5}$	$3,674 \times 10^{-5}$	$4,942 \times 10^{-6}$
	$P_{giriş}$ = 5 dBm	$1,199 \times 10^{-4}$	$1,215 \times 10^{-4}$	$1,867 \times 10^{-5}$

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

5G haberleşme sistemleri, yüksek veri hızı ve sürekli artan kullanıcı ihtiyaçları kapsamında bina içi ve bina dışı uygulamalarda farklı frekanslarda haberleşme gerçekleştirmektedir. RoF, milimetre dalga boylu, yüksek frekans bantlarında haberleşme gerçekleştirilmesine uygun bir teknik olması nedeniyle gelecek nesil haberleşme sistemlerinde önemli bir seçenek olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu tezde, farklı modülasyon tekniklerinin kullanıldığı, benzer sistem parametrelerine sahip RoF sistem modelleri üzerinde benzetimler yardımıyla performans analizleri yapılmıştır. Analizlerde kalite faktörü, BER ve göz diyagramından yararlanılmıştır.

0 dBm lazer giriş gücü değerine, 1 Gbps veri hızına ve 193,1 THz çalışma frekansına sahip; G.652 standart tek modlu fiber kullanan; BPSK, DPSK ve FSK modülasyonlu sistemlerde yapılan benzetimler neticesinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en yüksek kalite faktörü, DPSK modülasyonunda, L=10 km değeri için 27,473 olarak elde edilmiştir. En düşük kalite faktörü ise FSK modülasyonunda L=10 km değeri için 5,009 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, kalite faktörü dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı DPSK modülasyonu gösterirken, en kötü performansı FSK modülasyonu göstermiştir.

2. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en düşük BER değeri, DPSK modülasyonunda, L=10 km değeri için 1,822 x 10^{-166} olarak elde edilmiştir. En yüksek BER ise, FSK modülasyonunda, L=10 km değeri için 2,664 x 10^{-7}olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, BER dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı DPSK modülasyonu gösterirken, en kötü performansı FSK modülasyonu göstermiştir.

3. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en büyük göz yüksekliği değeri DPSK modülasyonunda L=10 km değeri için 2,349 x 10^{-5} olarak elde edilmiştir. En küçük göz yüksekliği ise FSK modülasyonunda L=10 km değeri için 2,507 x 10^{-6} olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, göz yüksekliği dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı DPSK modülasyonu gösterirken, en kötü performansı FSK modülasyonu göstermiştir.

4. 1 km fiber hat uzunluğu ve lazer giriş gücünün -10, -5, 0, 5 dBm değerleri için yapılan benzetimlerde, en yüksek kalite faktörü, DPSK modülasyonunda, lazer giriş gücünün 5 dBm değeri için 85,707 olarak elde edilmiştir. En düşük kalite faktörü ise, FSK modülasyonunda, lazer giriş gücünün 5 dBm değeri için 7,955 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla kalite faktörü dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı DPSK modülasyonu gösterirken, en kötü performansı FSK modülasyonu göstermiştir.

5. 1 km fiber hat uzunluğu ve lazer giriş gücünün -10, -5, 0, 5 dBm değerleri için yapılan benzetimlerde, en düşük BER değeri DPSK ve BPSK modülasyonlarında lazer giriş gücünün 5 dBm değeri için 0 olarak elde edilmiştir. Lazer giriş gücünün 5 dBm değeri için en yüksek BER ise FSK modülasyonunda 8,379 x 10^{-16} olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, BER dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı DPSK modülasyonu gösterirken, en kötü performansı FSK modülasyonu göstermiştir.

6. 1 km fiber hat uzunluğu ve lazer giriş gücünün -10, -5, 0, 5 dBm değerleri için yapılan benzetimlerde, en büyük göz yüksekliği değeri DPSK modülasyonunda lazer giriş gücünün 5 dBm değeri için 1,215 x 10^{-4} olarak elde edilmiştir. En küçük göz yüksekliği ise FSK modülasyonunda lazer giriş gücünün 5 dBm değeri için 1,867 x 10^{-5}olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, göz yüksekliği dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı DPSK modülasyonu gösterirken, en kötü performansı FSK modülasyonu göstermiştir.

0 dBm lazer giriş gücü değerine, 1 Gbps veri hızına ve 193,1 THz çalışma frekansına sahip; G.652 standart tek modlu fiber kullanan; QPSK ve 4-QAM modülasyonlu sistemlerde yapılan benzetimler neticesinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en yüksek kalite faktörü QPSK modülasyonunda L=10 km değeri için 4,941 olarak elde edilmiştir. Aynı durumda en düşük kalite faktörü ise 4-QAM modülasyonunda L=10 km değerinde 4,043 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, kalite faktörü dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı QPSK modülasyonu gösterirken, en kötü performansı 4-QAM modülasyonu göstermiştir.

2. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en düşük BER değeri QPSK modülasyonunda L=10 km değeri için 3,863 x 10^{-7} olarak elde edilmiştir. Aynı durumda en yüksek BER ise 4-QAM modülasyonunda L=10 km değerinde 2,634 x 10^{-5} olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, BER dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı QPSK modülasyonu gösterirken, en kötü performansı 4-QAM modülasyonu göstermiştir.

3. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en büyük göz yüksekliği değeri QPSK modülasyonunda L=10 km değerinde 1,789 x 10^{-1} olarak elde edilmiştir. Aynı durumda, en küçük göz yüksekliği ise 4-QAM modülasyonunda L=10 km değeri için 1,072 x 10^{-1} olarak elde edilmiştir.

0 dBm lazer giriş gücü değerine, 1 Gbps veri hızına ve 193,1 THz çalışma frekansına sahip; G.652 standart tek modlu fiber kullanan; 4-QAM ve 8-QAM modülasyonlu sistemlerde yapılan benzetimler neticesinde şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en yüksek kalite faktörü 4-QAM modülasyonunda L=10 km değeri için 4,043 olarak elde edilmiştir. Halbuki, 8-QAM modülasyonunda L= 10 km değeri için 2,473 olarak elde

edilmiştir. Dolayısıyla, kalite faktörü dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı 4-QAM modülasyonu gösterirken, en kötü performansı 8-QAM modülasyonu göstermiştir.

2. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en düşük BER değeri 4-QAM modülasyonunda L=10 km değeri için 2,634 x 10^{-5} olarak elde edilmiştir. Halbuki, 8-QAM modülasyonunda L=10 km değeri için BER 4,548 x 10^{-3} olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, BER dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı 4-QAM modülasyonu gösterirken, en kötü performansı 8-QAM modülasyonu göstermiştir.

3. Fiber uzunluğunun 10 km, 20 km ve 50 km değerleri için yapılan benzetimlerde, en büyük göz yüksekliği değeri, 4-QAM modülasyonunda L=10 km değeri için 1,072 x 10^{-1} olarak elde edilmiştir. Aynı durumda en küçük göz yüksekliği ise 8-QAM modülasyonunda L=10 km değerinde -6,800 x 10^{-2} olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, göz yüksekliği dikkate alındığında, bu modülasyonlar arasında en iyi performansı 4-QAM modülasyonu gösterirken, en kötü performansı 8-QAM modülasyonu göstermiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, modülasyon seviyesinin artması kalite faktörü, BER ve göz açıklığını etkilemiştir.

Yüksek lisans tezinin literatüre katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- BPSK, DPSK, QPSK, FSK, 4-QAM ve 8-QAM modülasyon tekniklerinin RoF haberleşme sistemlerinin performansına etkileri Optisystem sürüm 7.0 programı yardımıyla benzetimler yapılarak incelenmiştir. Bu benzetimlerde, sistemin fiber hat uzunlukları ve lazer giriş güçleri parametreleri değiştirilerek, kalite faktörünün, BER'in ve göz diyagramlarının değişimleri incelenmiştir.

- BPSK, DPSK, FSK modülasyonları benzetim sonuçları incelendiğinde, DPSK modülasyonunun, bu modülasyonlar içerisinde kalite faktörü, BER ve göz diyagramları açısından en başarılı sonuçların elde edildiği modülasyon olduğu gözlemlenmiştir. FSK modülasyonunun ise, bu modülasyonlar arasında, elde edilen verilere göre, en düşük performansa sahip modülasyon olduğu görülmüştür.

- Çok seviyeli modülasyonlarda, QPSK ve 4-QAM modülasyonları benzetim sonuçları incelendiğinde, QPSK modülasyonunun kalite faktörü, BER ve göz diyagramları açısından en başarılı sonuçların elde edildiği modülasyon olduğu gözlemlenmiştir.

- 4-QAM ve 8-QAM modülasyonları benzetim sonuçları incelendiğinde ise, 4-QAM modülasyonunun 8-QAM modülasyonuna göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Modülasyon seviyesinin artması yani sembol başına daha fazla bit iletilmesi ile spektrum daha verimli bir şekilde kullanılmakta; ancak bu durum semboller arası girişimi ve bozunumu artırmakta, dolayısıyla kalite faktörü, BER ve göz açıklığı parametre değerlerinde kötüleşmeye sebep olmaktadır. Dolayısıyla düşük seviyeli modülasyon teknikleri, gürültü ve bozunum etkileri yüksek olan sistemlerde kullanılmaya uygundur. Yüksek seviyeli modülasyon tekniklerinin ise yüksek veri hızı ve spektrum verimliliği ihtiyacı bulunan sistemlerde kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

Agoua, R. J. O., Kamagaté, A., Konaté, A., Menif, M., & Asseu, O. (2020). Radio over fiber architecture very high-speed wireless communications in the unlicensed 60 GHz band. *Optics and Photonics Journal*, *10*(03), 29-40. https://doi.org/10.4236/opj.2020.103003

Al-Raweshidy, H., & Komaki, S. (2002). *Radio over fiber technologies for mobile communications networks* (1st ed.). Artech House.

Binh, L. N. (2010). *Optical fiber communication systems with MATLAB and Simulink models*. CRC Press.

Djordjevic, I. B. (2018). *Advanced optical and wireless communications systems*. Springer International Publishing.

Ertürk, S. (2016). *Sayısal Haberleşme*. Birsen Yayınevi.

Torres, V., Escobar, P., Rodriguez, D., & Torres, D. (2021). Mitigation of Distortions in Radio-Over-Fiber Systems Using Machine Learning. *INGE CUC*, *17*(2), 234-244. https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.2.2021.21

Habib, U. (2018). *Millimetre-wave Radio-over-fibre Supported Multi-antenna And Multi-user Transmission [Doctoral Dissertation, University Of Kent]*. Kent Academic Repository. https://www.proquest.com/openview/ab99ab36338daf29d77714ae1a0b2e41/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y

Hadi, M. U. (2020). Mitigation of nonlinearities in analog radio over fiber links using machine learning approach. *ICT Express*, *7*(2), 253-258. https://doi.org/10.1016/j.icte.2020.11.002

Hui, R. (2019). *Introduction to fiber-optic communications*. Academic Press.

Jihad, N. J., & Almuhsan, M. A. A. (2023). Enhancement on the performance of radio-over-fiber RoF technology. *Journal of Optics (India)*, *53*(2), 1447-1455. https://doi.org/10.1007/s12596-023-01310-x

Kang, A. S., Bhatia, S., Kaur, N., & Singh, K. (2020). Performance evaluation of various hybrid modulation techniques transmitted by EDFA in radio-over-fibre communication. *Journal of Information and Telecommunication*, *4*(3), 295-313. https://doi.org/10.1080/24751839.2020.1732766

Kathpal, N., & Garg, A. K. (2020). Analysis of radio over fiber system for mitigating four-wave mixing effect. *Digital Communications and Networks*, *6*(1), 115-122. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.01.003

Kaur, B., & Sharma, N. (2022). *Radio over Fiber (RoF) for future generation networks (pp. 161-184)*. Springer International Publishing.

Kavitha, T., Arulmary, A., & Nagarajan, P. (2023). Radio over fiber on gigabit passive optical network using QPSK modulation scheme. *Journal of Optical Communications*, *44*(1), 1023-1027. https://doi.org/10.1515/joc-2020-0232

Keiser, G. (2010). *Optical fiber communications* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Khalil, H., Qamar, F., Shahzadi, R., Shahzad, A., Ali, M., Qamar, N., & Al-Otaibi, S. (2021). Performance analysis of modulation formats for next generation RoF systems. *IEEE Access*, *9*, 139393-139402. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3116351

Kumar, S., Sharma, S., & Dahiya, S. (2021). WDM-based 160 Gbps radio over fiber system with the application of dispersion compensation fiber and fiber bragg grating. *Frontiers in Physics*, *9*. https://doi.org/10.3389/fphy.2021.691387

Petrosyan, A. (2024, Mayıs 22). *Internet and social media users in the world 2024*. Statista. https://www.statista.com/statistics/617136/digital-population-worldwide/

Qureshi, K. K., Qureshi, A. R., Magam, M. G., & Jamal, L. (2020). Radio-over-fiber front-haul link design using optisystem. *Journal of Optical Communications, 44*(1), 1297-1303. https://doi.org/10.1515/joc-2020-0074

Rajpal, S., & Goyal, R. (2017). A review on radio-over-fiber technology-based ıntegrated (optical/wireless) networks. *Journal of Optical Communications*, *38*(1), 19-25. https://doi.org/10.1515/joc-2016-0020

Rashed, A. N. Z., Abdel Kader, H. M., Al-Awamry, A. A., & Abd El-Aziz, I. A. (2018). Transmission performance simulation study evaluation for high speed radio over fiber communication systems. *Wireless Personal Communications*, *103*(2), 1765-1779. https://doi.org/10.1007/s11277-018-5879-y

Sarkar, M., & Ghosh, S. (2023). Performance analysis of radio over fiber technology for 5G communication using modified Walsh code. *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, ICCCNT 2023*. https://doi.org/10.1109/ICCCNT56998.2023.10308064

Singal, T. L. (2016). *Optical fiber communications: principles and applications*. Cambridge University Press.

Singh, S., Kaur, G., Islam, M. T., & Kaler, R. S. (Ed.). (2022). *Broadband connectivity in 5G and beyond: next generation networks*. Springer International Publishing.

Thakur, P., & Bharti, M. (2023). Performance evaluation of 32 channel wavelength division multiplexed radio over fiber (RoF) communication system. *International Conference on Microwave, Antenna and Communication, MAC 2023*. https://doi.org/10.1109/MAC58191.2023.10177097

Wake, D., Nkansah, A., & Gomes, N. J. (2010). Radio over fiber link design for next generation wireless systems. *Journal of Lightwave Technology*, *16*(28), 2456-2464.

Yahia, S., Graini, L., Beddiaf, S., Gabis, A. B., & Meraihi, Y. (2022). Performance evaluation of a 60-GHz RoF-OFDM system for wireless applications. *Journal of Optics (India), 51*(1), 194-202. https://doi.org/10.1007/s12596-021-00768-x