
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FARKLI MODÜLASYON TÜRLERİNDEKİ DAR BANTLI TELSİZ SİNYALLERİNİN FİBER OPTİK KABLO ÜZERİNDEN UZUN MESAFELERE İLETİMİ

Şehriyar ÖZEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2025

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şehriyar ÖZEN

04/02/2025

FARKLI MODÜLASYON TÜRLERİNDEKİ DAR BANTLI TELSİZ SİNYALLERİNİN FİBER OPTİK KABLO ÜZERİNDEN UZUN MESAFELERE İLETİMİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Şehriyar ÖZEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2025

ÖZET

Fiber optik haberleşme sistemleri günümüzde iletişimin omurgasını oluşturmaktadır. Bu nedenle hemen her alanda yapılan haberleşme ihtiyacı bu omurga üzerinden geçmektedir. Geniş Banttaki sayısal sinyallerin fiber optik kablo üzerinden iletimi rahatlıkla yapılırken dar banttaki telsiz sinyallerinin fiber optik kablo üzerinden iletimi önemli bir araştırma konusudur. Sayısal telsiz sistemleri, farklı kullanıcı ihtiyaçları ve uygulama alanlarına göre geliştirilmiş, sınırlı frekans bant genişliklerini kullanarak ses ve veri iletimini gerçekleştiren sistemlerdir. Dünya genelinde özellikle acil durum servisleri, kamu güvenliği ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu sinyallerin iletim mesafesi oldukça sınırlıdır. Bu çalışmada, sınırlı iletim mesafesi fiber optik haberleşme hattı kullanılarak uzatılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla TETRA (π/4-DQPSK Modülasyonu), DMR (4FSK Modülasyonu) ve APCO25 (C4FM Modülasyonu) sayısal telsiz standartlarında, farklı mesafelerde RoF (fiber optik üzerinden RF sinyal iletimi) iletiminin, Kalite Faktörü (Quality Factor-QF) ve Bit Hata Oranı (Bit-error-rate- BER) açısından sistem performansı değerlendirilmektedir. Sistem Modeli, Optisystem 22 kullanılarak tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Sonuç olarak 50 km'lik bir fiber hatta; referans çalışmalarla karşılaştırıldığında oldukça kaliteli bir şekilde telsiz haberleşmesi sağlanmıştır.

Bilim Kodu	:	93420
Anahtar Kelimeler	:	RF, telsiz, fiber optik, dar bant
Sayfa Adedi	:	71
Danışman	:	Prof. Dr. Murat YÜCEL

TRANSMISSION OF NARROWBAND RADIO SIGNALS WITH DIFFERENT MODULATION TYPES OVER LONG DISTANCES OVER FIBER OPTIC CABLE

(M. Sc. Thesis)

Şehriyar ÖZEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2025

ABSTRACT

Fiber optic communication systems form the backbone of modern communication infrastructure. Consequently, communication needs across nearly all fields are routed through this backbone. While broadband digital signals are easily transmitted via fiber optic cables, the transmission of narrowband radio signals over fiber optic cables remains a critical research area. Digital radio systems are designed to meet diverse user requirements and application areas, enabling voice and data transmission using limited frequency bandwidths. These systems are widely used worldwide, particularly in emergency services, public safety, and industrial sectors. However, the transmission range of such signals is significantly limited. In this study, the restricted transmission range was extended using a fiber optic communication link. For this purpose, the system performance of RoF (RF signal transmission over fiber optic) transmission at different distances in TETRA (π/4-DQPSK Modulation), DMR(4FSK Modulation), and APCO25 (C4FM Modulation) digital radio standards is evaluated in terms of Quality Factor (QF) and Bit Error Rate (BER). The system model was designed and simulated using OptiSystem 22. As a result, high-quality radio communication was achieved compared to reference studies over a 50 km fiber optic link.

Science Code : 93420
Key Words : RF, radio, fiber optic, narrowband
Page Number : 71
Supervisor : Prof. Dr. Murat YÜCEL

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince yardım ve destekleriyle beni yönlendiren saygıdeğer hocam Prof. Dr. Murat YÜCEL'e, tez çalışmam boyunca beni her daim teşvik eden sevgili eşim Meryem ve beni sabırla bekleyen oğlum Alperen'e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. TELSİZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ 7

2.1. Telsiz Bağlantı Türleri 8

2.1.1. Simpleks bağlantı 8

2.2.2. Tek yönlü (half dubleks) bağlantı 9

2.2.3. Çift yönlü (full-dubleks) bağlantı 9

2.2. Geniş Alan Telsiz Kapsama Sistemi 10

2.3. Konvansiyonel Telsiz Sistemleri 12

2.4. Trunk Telsiz Sistemleri 12

2.5. Analog Telsiz Sistemleri 13

2.6. Sayısal Telsiz Sistemleri 15

2.6.1. DMR telsiz standardı 18

2.6.2. TETRA telsiz standardı 27

2.6.3. APCO25 telsiz standardı 34

3. FİBER ÜZERİNDEN RF SİNYAL İLETİMİ (RoF) 43

3.1. Kullanım Alanları 44

3.2. Çalışma Prensibi 44

Sayfa

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI 51
4.1. TETRA Telsiz Sinyali RoF İletimi 51
4.2. DMR Telsiz Sinyali RoF İletimi 55
4.3. Apco25 Telsiz Sinyali RoF İletimi 59
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 63
KAYNAKLAR 65
ÖZGEÇMİŞ 71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Analog ve sayısal telsizlerin çeşitli parametrelere göre karşılaştırılması... 15

Çizelge 2.2. TDMA ve FDMA karşılaştırması 17

Çizelge 2.3. DMR hava protokolünün temel parametreleri (European Telecommunications Standard Institute [ETSI], 2023). 21

Çizelge 2.4. Dibit sembolünün 4FSK sapmasına eşlenmesi 25

Çizelge 2.5. TETRA modülasyon türlerinin karşılaştırılması. 29

Çizelge 2.6. TETRA Modülasyon türleri için alttaşıyıcı sayısı/hız ilişkisi 30

Çizelge 2.7. π/4-DQPSK modülasyonu için faz geçişleri 31

Çizelge 2.8. Apco25 C4FM ve CQPSK modülasyonları için dibit ile sapma ilişkisi 38

Çizelge 2.9. Apco25, DMR ve TETRA telsiz standartlarının karşılaştırılması 41

Çizelge 3.1. RF sinyallerinin hava, bakır ve fiber üzerinden iletimlerinin karşılaştırılması 43

Çizelge 3.2. RoF'in avantajları ve dezavantajları 47

Çizelge 3.3. Q-kalite faktörü, BER-bit hata oranı ile sistem performans değerlendirmesi 48

Çizelge 4.1. 5-50 km arasında fiber optik kablo kullanımında q kalite faktörü ve min. BER bit hata oranı 54

Çizelge 4.2. 5-50 km arasında fiber optik kablo kullanımında q kalite faktörü ve min. Ber bit hata oranı 58

Çizelge 4.3. 5-50 km arasında fiber optik kablo kullanımında q kalite faktörü ve min. Ber bit hata oranı 61

Çizelge 5.1. Q kalite faktörü ve BER bit hata oranı açısından fiber uzunluğuna göre telsiz standartlarının (modülasyonları) performans değerlendirmeleri 64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Genel telsiz haberleşme yapısı 8
Şekil 2.2. Simpleks telsiz bağlantısı 9
Şekil 2.3. Tek yönlü telsiz bağlantısı 9
Şekil 2.4. Çift yönlü telsiz bağlantısı 10
Şekil 2.5. Geniş alan telsiz kapsama sistemi 11
Şekil 2.6 Konvansiyonel (a) ve trunk (b) telsiz modları 13
Şekil 2.7. Analog telsizler için FM modülasyonu 14
Şekil 2.8. Analog ve sayısal telsiz ses kalitesi/zayıflama eğrileri 16
Şekil 2.9. Analog veya frekans bölmeli çoklu iletim (FDMA) yapısı 17
Şekil 2.10. Zaman bölmeli çoklu iletim (TDMA) yapısı 18
Şekil 2.11. DMR ses ve veri sinyallerinin taşınması ile işlenmesi 19
Şekil 2.12. Ses ve veri kanalları ve TDMA timeslotları 20
Şekil 2.13. DMR hava arayüzü protokolü genel yapısı 23
Şekil 2.14. DMR genel burst yapısı 23
Şekil 2.15. 4FSK modülatörü 24
Şekil 2.16. 4FSK modülasyon sinyali 26
Şekil 2.17. TETRA frekans/zaman ilişkisi 27
Şekil 2.18. TETRA standardı çerçeve yapısı 28
Şekil 2.19. π/4-DQPSK modülasyon sembol takımyıldızı ve olası geçişler 31
Şekil 2.20. π/4-DQPSK modülasyon sinyali 33
Şekil 2.21. Apco25 ile analog telsiz haberleşme ilişkisi 34
Şekil 2.22. Apco25 Mimarisi 36
Şekil 2.23. C4FM Modülatörü 38
Şekil 2.24. C4FM modülasyon sinyali 39
Şekil 2.25. CQPSK modülatörü 39

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.26. Analog ile Apco25 kanal karşılaştırması 40

Şekil 2.27. Apco25 CAI ses mesaj yapısı 40

Şekil 3.1. RoF genel gösterimi..... 43

Şekil 3.2. MZM modülatör yapısı..... 46

Şekil 3.3. RoF genel blok şeması..... 47

Şekil 4.1. Sistem genel blok diyagramı 51

Şekil 4.2. TETRA verici blok diyagramı 52

Şekil 4.3. TETRA alıcı blok diyagramı 53

Şekil 4.4. (a): 5 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri
(b): 10 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri ... 53

Şekil 4.5. (a): 20 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri
(b): 35 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri ... 54

Şekil 4.6. 50 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri..... 54

Şekil 4.7. 5-50 km arasındaki fiber uzunluğunun Q kalite faktörü ve min. BER bit
hata oranı grafiği 55

Şekil 4.8. DMR verici blok diyagramı..... 55

Şekil 4.9. 3R regeneratör yapısı..... 56

Şekil 4.10. DMR alıcı blok diyagramı 56

Şekil 4.11. (a): 5 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri
(b): 10 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri . 57

Şekil 4.12. (a): 20 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri
(b): 35 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri . 57

Şekil 4.13. 50 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri..... 58

Şekil 4.14. 5-50 km arasındaki fiber uzunluğunun Q kalite faktörü ve min. BER bit
hata oranı grafiği 58

Şekil 4.15. Apco25 verici blok diyagramı 59

Şekil 4.16. Apco25 alıcı blok diyagramı 60

Şekil 4.17. (a): 5 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri
(b): 10 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri . 60

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.18. (a): 20 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri (b): 35 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri . 60

Şekil 4.19. 50 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri..... 61

Şekil 4.20. 5-50 km arasındaki fiber uzunluğunun q kalite faktörü ve min. Ber bit hata oranı grafiği..... 61

Şekil 5.1. Farklı telsiz standartlarına(modülasyon türleri) göre (a): Q kalite faktörü ve fiber uzunluğu ilişkisi (b): BER bit hata oranı ve fiber uzunluğu ilişkisi..... 63

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
db	Desibel
Fc	Taşıyıcı Frekans
hz	Hertz
kbps	Kilobit/saniye
kHz	Kilo Hertz
km	Kilometre
MHz	Mega Hertz
RF	Radyo Frekans
Rx	Alıcı
Tx	Verici
UHF	Ultra Yüksek Frekans
VHF	Çok Yüksek Frekans

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ACELP	Cebirsel kod uyarımlı doğrusal tahmin
AM	Genlik modülasyonu
AMBE	Gelişmiş çok bantlı uyarım
APCO	Kamu güvenliği iletişim görevlileri derneği
ASK	Genlik kaydırmalı anahtarlama
BER	bit hata oranı
Burst	Patlama
CACH	Ortak Duyuru Kanalı
CC	Renk Kodu
CH	Kanal
Cut-Off	Kesim
DMR	Sayısal Mobil Telsiz

Kısaltmalar	Açıklamalar
DPSK	Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama
DSP	Sayısal Sinyal İşleme
DTMF	Çift Tonlu Çok Frekanslı Sinyalleşme
Duty cycle	Görev Döngüsü
EDACS	Gelişmiş Sayısal Erişim İletişim Sistemi
EMI	Elektromanyetik Girişim
EN	Avrupa Standartları
ERFC	Tamamlayıcı Hata Fonksiyonu
ETSI	Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü
FDMA	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
FEC	İleri Hata Düzeltme
FM	Frekans Modülasyonu
FSK	Frekans Kaydırmalı Anahtarlama
IDEN	Entegre Sayısal Gelişmiş Ağ
IM/DD	Yoğunluk Modülasyonu / Doğrudan Algılama
IMBE	Geliştirilmiş Çok Bantlı Uyarım
IoT	Nesnelerin İnterneti
İnbound	Giriş
M-ary	Çok Seviyeli
MS	Mobil İstasyon
MZM	Mach-Zehnder modülatör
OADM	Optik Ekleme-Bırakma Çoklayıcı
OFDM	Ortogonal Frekans Bölmeli Çoklama
Outbound	Çıkış
P25	Proje 25
PA	Güç Yükselteç
PBRS	Rastgele Veri Bit Dizisi
PDF	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
PM	Faz Modülasyonu
PMR	Özel Mobil Telsiz
PSK	Faz Kaydırmalı Anahtarlama
QAM	Karesel Genlik Modülasyonu

Kısaltmalar	Açıklamalar
QF	Kalite Faktörü
R/L	Radyolink
Repeater	Tekrarlayıcı
RFI	Radyo Frekansı Girişimi
RoF	Fiber Üzerinden RF
SINAD	Sinyal-gürültü ve bozulma oranı
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
TDMA	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim
TETRA	Karasal Trunk Telsiz
TETRAPOL	Karasal Trunked Telsiz Polisi
Vocoder	Ses Kodlayıcı
VOX	Sesle Çalışan Santral
WDM	Dalgaboyu Bölmeli Çoklama

1. GİRİŞ

Dar bantlı telsiz sistemleri, farklı kullanıcı ihtiyaçları ve alanlarına göre geliştirilmiş, sınırlı frekans bant genişliklerini kullanarak ses ve veri iletimini gerçekleştiren sistemlerdir. Dünya genelinde özellikle acil durum servisleri, kamu güvenliği ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya üzerindeki ilk telsiz uygulamaları olan ve yalnızca ses iletiminin yapıldığı analog telsizler, günümüzde yerini ses ve veri iletiminin yapıldığı sayısal telsizlere bırakmaktadır. Analog telsizlerde, analog ses sinyalleri doğrudan yüksek frekanslı taşıyıcı sinyallere bindirilerek iletilirken, sayısal telsizlerde ise analog ses sinyalleri, sayısal veri paketlerine dönüştürülerek yüksek frekanslı taşıyıcı sinyallere bindirilerek iletilir. Ayrıca analog telsizlerde genellikle FM, AM veya PM gibi analog modülasyonlar kullanılırken sayısal telsizlerde ise FSK, ASK, PSK, DPSK veya QAM gibi sayısal modülasyonlar kullanılır. Sayısal telsizler, gürültüden etkilenmemesi ve sinyallerin işlenmesinin çok daha kolay olması gibi özellikleri ile öne çıkmaktadır. Dünya üzerindeki standartları; Avrupa'da TETRA ve DMR, ABD'de APCO-25, Güney Amerika'da IDEN, Kanada'da EDACS ve Meksika'da TETRAPOL telsiz standardı kullanılmaktadır. Yalnızca APCO-25, DMR ve TETRA; sayısal, açık standart olma özelliğini sağlayan ve Kamu Güvenliği gruplarının ortak istek ve ihtiyaçlarını karşılayabilen telsiz standartlarıdır (Şahin, 2015). Ses ve veri iletimi genellikle hava yolu ile antenden anten(ler)e iletilebildiği gibi Fiber Optik kablo üzerinden de iletilebilir. RoF (Fiber üzerinden RF sinyali taşınması) denilen bu yöntem, özellikle uzun mesafelerde; düşük iletim kaybı, elektromagnetik parazitlere karşı dayanıklılık, düşük gecikme, yüksek bant genişliği ve veri kapasitesi gibi üstün özellikleri sayesinde veri iletiminde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Christiano, 2017).

Literatür çalışmaları

2024 yılında yayımlanan bir yüksek lisans tezinde fiber üzerinden radyo haberleşme (RoF) sistemlerinde farklı modülasyon tekniklerinin iletim performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Özellikle, çeşitli modülasyon tekniklerinin sistemin bit hata oranı (BER), sinyal-gürültü oranı (SNR) ve veri iletim hızına etkisi üzerinde durulmuştur. Çalışma, RoF sistemlerinde daha verimli iletim sağlamak için hangi modülasyon tekniklerinin daha uygun olduğunu ortaya koymayı amaçlamaktadır (Hayır, 2024).

2019 yılında yayımlanan bir yüksek lisans tezinde, Radyo üzerinden Fiber (RoF) teknolojisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. RoF sistemlerinin tasarımında kullanılan optik kaynaklar, darbe üreteçleri, modülatörler, optik fiberler, optik ekleme-bırakma çoğullayıcıları (OADM), amplifikatörler ve filtreler hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir. Ayrıca, RoF sistemlerinde kullanılan WDM ve OADM elemanlarının işlevleri ve uygulama alanları tartışılmıştır (Kazancılı, 2019).

2016 yılında yayımlanan bir yüksek lisans tezinde radyo frekans (RF) sinyallerinin fiber optik kablolardan iletimi konusu detaylı bir şekilde ele alınmıştır. RoF teknolojisinin kullanımının avantajları, uygulama alanları ve sistemin tasarım bileşenleri incelenmiştir. Optik fiberlerin RF sinyalleri taşıma kapasitesinin yanı sıra, bu teknolojinin mobil ağlar, kablosuz iletişim ve veri iletimi üzerindeki etkileri de tartışılmıştır (Yıldız, 2016).

Xu ve diğerleri, (2024) tarafından yayımlanan bu çalışmada, 400 MHz bant genişliğine sahip 5G sinyaliyle çalıştırılan RoF fronthaul bağlantıları için bir analog önyükleyici (predistorter) tasarımı ele alınmıştır. Çalışmada, geniş bant sinyallerin doğrusal olmayan bozulmalarını azaltarak sistem performansını artırmaya odaklanılmıştır. Tasarlanan önyükleyicinin etkinliği, deneysel sonuçlarla doğrulanmış ve özellikle 5G ağlarının taleplerini karşılamada umut vaat eden bir çözüm olduğu gösterilmiştir (Xu ve diğerleri, 2024).

2024 yılında yayımlanan bir çalışmada, 5G sinyalleri için yüksek dinamik aralıklı OFDM tabanlı bir RoF sisteminin performansı analiz edilmiştir. Sistemde kullanılan farklı parametrelerin BER ve sinyal kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma, 5G sistemler için etkili bir RoF çözümü sunmayı hedeflemiştir (Muhsin, Mohammad ve Jihad, 2024).

2023 yılında yayımlanan bir çalışmada, milimetre dalga tabanlı RoF sistemlerinin performansı incelenmiştir. Farklı modülasyon formatları ve kanal koşullarındaki performans değerlendirmeleri, gelecekteki ağlar için optimal yapıların belirlenmesine odaklanılmıştır. Performans metrikleri arasında kalite faktörü ve hata oranları bulunmaktadır (Dahiya ve Asha, 2023).

Thakur ve Bharti tarafından yapılan çalışmada, 32 kanallı WDM RoF haberleşme sisteminin performans değerlendirmesi ele alınmıştır. Çalışmada, WDM tabanlı RoF sisteminin veri

iletim kapasitesi ve performansını artırma potansiyeli incelenmiştir. Farklı kanal konfigürasyonları ve parametreler analiz edilerek sistemin hata oranı, bant genişliği verimliliği ve sinyal gücü gibi metrikler üzerinde etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, bu tür sistemlerin gelecekteki yüksek kapasiteli ağlar için uygun bir çözüm olduğunu göstermektedir (Thakur ve Bharti, 2023).

Balram Tamrakar ve diğerleri, tarafından yapılan çalışmada, RoF sistemlerinde kullanılan farklı modülasyon şemalarının BER üzerindeki etkileri incelenmektedir. Çalışma, yeni nesil ağlar için uygun modülasyon tekniklerini belirlemeye odaklanmış ve BER performansı ile bant genişliği verimliliği gibi kritik metrikler değerlendirilmiştir. Sonuçlar, RoF sistemlerinin veri iletim kapasitesini artırmada ve yeni nesil iletişim ağları için uygun bir çözüm sunmada güçlü bir potansiyele sahip olduğunu gösterilmiştir (Tamrakar ve diğerleri, 2023).

Hasan K. Al Deen ve Haider J. Abd tarafından yapılan bir çalışmada, RoF haberleşme sistemleri teknolojisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma, RoF sistemlerinin temel prensiplerini, avantajlarını, zorluklarını ve uygulama alanlarını ele almaktadır. Ayrıca, bu teknolojiyle ilgili son gelişmeler ve gelecekteki araştırma alanları tartışılmıştır. Makalede, RoF sistemlerinin veri iletimindeki verimliliği artırma ve yeni nesil iletişim ağları için uygun bir çözüm sunma potansiyeli vurgulanmaktadır (Al Deen ve Abd, 2022).

Louay Younis ve Essa Essa (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, RoF teknikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, RoF sistemlerinin farklı teknikleri, avantajları, sınırlamaları ve uygulama alanları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, RoF teknolojisinin gelecekteki yönelimleri ve potansiyel araştırma alanları tartışılmıştır. Makalede, RoF sistemlerinin modern iletişim ağlarında kritik bir rol oynayabileceğini vurgulanmaktadır (Younis ve Essa, 2022).

2022 yılında yayımlanan bir makalede RoF sistemlerine dair mevcut durumu ve gelecekteki zorlukları ele alınmaktadır. RoF teknolojisinin temel bileşenleri ve uygulama alanları incelenmiş, özellikle 5G ve IoT gibi yeni nesil ağlarda sağladığı verimlilik tartışılmıştır. Gelecek perspektifleri açısından, düşük gecikme süreleri ve yüksek verimlilik hedeflenerek sistemlerin gelişim süreçleri değerlendirilmiştir (Kaur, Bhamrah ve Kaur, 2022).

2021 yılında yayımlanan bir makalede, 28 GHz milimetre dalga bandında OFDM tabanlı bir RF over Fiber sistemi geliştirilmiştir. Çalışmada, 5 km ile 35 km arasındaki fiber uzunluklarında yapılan iletim testlerinde, 100 Gbps veri iletim kapasitesine ulaşılırlığı incelenmiştir. Fiber uzunluğunun performansa etkisi QF ve BER metrikleriyle değerlendirilmiştir (Gadze, Akwafo, Agyekum ve Opare, 2021).

Li ve diğerleri, (2021) tarafından yapılan çalışmada, RoF sistemleri için optoelektronik osilatör ve ayrık modlu lazer kullanan yeni bir yaklaşımı ele alınmıştır. Çalışma, sistemin verimliliğini artırmaya ve maliyetini düşürmeye odaklanmıştır. Tasarlanan sistemin performansı, düşük gürültü, yüksek kararlılık ve geniş bant genişliği gibi avantajlar sunarak RoF iletişim teknolojisi için umut vaat etmektedir. Bu yaklaşımın, modern ve gelecekteki ağlarda etkili bir çözüm sunduğu gösterilmiştir (Li, Yu, Yang, Manie ve Peng, 2021).

Haleema Khalil ve diğerleri, tarafından gerçekleştirilen çalışmada, RoF sistemlerinin performans analizine odaklanılmaktadır. Çalışmada, yeni nesil ağlar için uygun modülasyon formatlarının belirlenmesi amacıyla farklı modülasyon formatlarının performansı karşılaştırılmıştır. Değerlendirmeler, hata oranları, bant genişliği verimliliği ve sinyal doğruluğu gibi kritik parametrelere dayanmıştır. Elde edilen sonuçlar, RoF sistemlerinin veri aktarımı için yüksek verimlilik ve düşük gecikme sağlama potansiyelini ortaya koymaktadır (Khalil ve diğerleri, 2021).

2020 yılında yayımlanan bir makalede, 28 GHz milimetre dalga frekansında çalışan bir RoF tabanlı radyo erişim ağının 5G mobil iletişim sistemlerindeki performansı incelenmiştir. Farklı modülasyon formatlarının etkileri ve sistemin optik uzunluklarla uyumluluğu değerlendirilmiştir. Çalışma, 5G altyapısı için pratik çözümler sunmayı hedeflemiştir (Sung, Kim, Kim, Cho, Won ve Lim, 2020).

Miao Kong ve diğerleri, çalışmasında, RoF sisteminde DP-MZM (Çift Paralel Mach-Zehnder Modülatörü) kullanılarak hem kablolu hem de kablosuz sinyallerin eşzamanlı üretilmesini ele almıştır. Çalışmada, DP-MZM'nin optik modülasyon yetenekleri incelenmiş ve farklı türdeki sinyallerin bir sistem üzerinden verimli şekilde iletilebileceği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar, RoF sistemlerinin hem kablolu hem de kablosuz ağlar için entegrasyon potansiyelini ortaya koymaktadır (Kong, Zhou, Ding, Li ve Yu, 2020).

Siming Liu ve diğerleri, tarafından yapılan çalışmada, düşük maliyetli bir doğrudan modüle edilmiş lazer kullanılarak uzun mesafeli bir milimetre dalga RoF sisteminin tasarımını ve performansını ele alınmaktadır. Çalışma, bu sistemin veri iletim performansını analiz ederek, maliyet etkin çözümler sunmayı hedeflemiştir. Milimetre dalga frekanslarının ve doğrudan modüle edilmiş lazerlerin kullanımı sayesinde hem uzun mesafeli iletişim sağlanmış hem de sistem maliyetleri düşürülmüştür. Elde edilen sonuçlar, RoF sistemlerinin düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir alternatif olarak uygulanabilirliğini göstermektedir (Liu ve diğerleri, 2018).

2018 yılında yayımlanan bir makalede, 5G ve IoT çağında RoF ağları üzerinde uygulanan milimetre dalga haberleşme sistemlerini incelenmiştir. Çalışma, düşük gecikme süreleri ve yüksek bant genişlikleri sağlamak için optik sistemlerin entegrasyonunu ele almıştır (Kanno, 2018).

2016 yılında yayımlanan bir makalede, 5G erişim fronthaul uygulamaları için fotonik tabanlı milimetre dalga sinyal üretimi ele alınmıştır. Çalışma, optik modülasyon tekniklerinin avantajlarını ve 5G iletişim altyapısındaki uygulamalarını detaylandırmıştır (Alavi, Soltanian, Amiri, Khalily, Supa'at ve Ahmad, 2016).

2015 yılında yayımlanan bir makalede, RoF haberleşme sistemlerinin performansını artırmak ve maliyetlerini düşürmek için önerilen teknikler anlatılmıştır. Çalışma, yeni nesil iletişim sistemleri için RoF teknolojisinin verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır (Thomas, El-Hajjar ve Hanzo, 2015).

2015 yılında yayımlanan bir makalede, yeni nesil kablosuz sistemler için RoF teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulamaları tartışılmıştır. Çalışma, RoF ağlarının düşük maliyet ve yüksek performans avantajlarını vurgulamaktadır (Novak ve diğerleri, 2015).

2013 yılında yayımlanan bir çalışmada, milimetre dalga frekansında çalışan RoF sistemlerinin tasarımı ve uygulama alanları üzerine kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Çalışma, 5G ve ötesi için RoF sistemlerinin potansiyelini tartışılmaktadır (Beas, Castanon, Aldaya, Aragon-Zavala ve Campuzano, 2013).

2007 yalında yapılan bir çalışmada, demiryolu sistemlerinin kontrol ve operasyonlarında kablosuz iletişim teknolojilerinin gereksinimleri incelenirken, RoF teknolojisinin potansiyeline vurgu yapılmıştır. Çalışma, RoF'un düşük gecikme, yüksek bant genişliği ve uzun mesafelerde güvenilir iletişim sağlayarak demiryolu ağlarının performansını artırabileceğini belirtilmiş, bu teknolojinin gelecekteki demiryolu sistemlerinde kritik bir rol oynayabileceğini tartışılmıştır (Briso ve Alonso, 2007).

Araştırmanın önemi

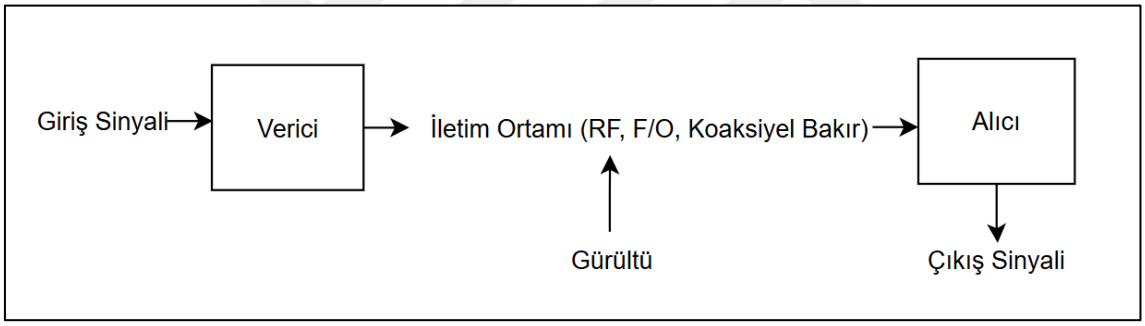
Yapılan literatür taramasında görüldüğü üzere yüksek hızlı, geniş banttaki veri sinyallerin fiber optik kablo üzerinden iletimi ile ilgili akademik çerçevede çok sayıda çalışmaya ve gerçek uygulamalara rastlanırken daha düşük frekansa sahip, darbant telsiz sinyallerinin fiber optik kablo üzerinden iletimi önemli bir araştırma konusudur. Telsiz sinyallerinin RoF iletiminin gerçekleştirilmesi özellikle uzun mesafelerde hava iletiminde yaşanan olumsuzlukların (zayıflama, gecikme, güvenlik vb.) önüne geçmek adına büyük fayda sağlayacaktır. Bu nedenle çalışmanın gerçekleşebilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında, kamu güvenliği (polis, jandarma), acil durum hizmetleri (itfaiye, ambulans) ve ulaşım (demiryolu, karayolu, havayolları) gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılan; açık mimarili, sayısal telsiz standartları olan TETRA, APCO25 ve DRM telsiz standartlarının mimari yapıları, çalışma prensipleri, modülasyon teknikleri anlatılarak ardından ilgili standartlardaki telsiz sinyallerinin 5 km'den 50 km'e kadar RoF iletiminin, Kalite Faktörü (QF) ve Bit Hata Oranı (BER) açısından sistem performansı değerlendirilmektedir. Sistem Modeli, Optisystem 22 kullanılarak tasarlanmış ve simüle edilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde telsiz standartları, ikinci bölümünde RoF ve son olarak üçüncü bölümünde ilgili simülasyon çalışması ve test sonuçları anlatılmıştır.

2. TELSİZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

Telsiz haberleşme sistemleri, elektromanyetik dalgalar aracılığıyla ses, veri aktarımını sağlayan kablosuz haberleşme teknolojileridir. Bu sistemler, iletişim ihtiyacını kabloya bağlı olmaksızın karşılayarak bireysel ve kurumsal uygulamalar için geniş bir çözüm yelpazesi sunmaktadır. Tarihsel gelişimi boyunca telsiz haberleşme teknolojileri, dünya genelinde çeşitli teknolojik evrimlerden geçmiş ve önemli bir altyapı bileşeni haline gelmiştir. Telsiz haberleşme teknolojilerinin temelleri, 19. yüzyılda James Clerk Maxwell tarafından geliştirilen elektromanyetik dalga teorisine dayanmaktadır. Bu teorinin Heinrich Hertz tarafından 1887 yılında deneysel olarak doğrulanması, radyo dalgalarının varlığını ispat etmiştir. Guglielmo Marconi, 1895 yılında elektromanyetik dalgalar yoluyla ilk uzun mesafeli haberleşme denemesini başarıyla gerçekleştirerek telsiz haberleşme çağını başlatmıştır (Yaylalı, 2018). 20.yüzyılın ilk yarısında telsiz haberleşme sistemleri, özellikle askeri ve ticari uygulamalarda yaygınlaşmış; II. Dünya Savaşı boyunca stratejik haberleşme ve lojistik destekte kritik bir rol oynamıştır. 1980'lerde sayısal telsiz sistemlerinin geliştirilmesiyle birlikte, telsiz haberleşme teknolojilerinde devrim niteliğinde değişiklikler yaşanmış ve mobil haberleşme protokollerinin temel yapıtaşları oluşturulmuştur. Ülkemizde telsiz haberleşme sistemleri, Cumhuriyet'in ilk yıllarından itibaren geliştirilmeye başlanmıştır. 1930'lu yıllarda radyo yayınları kamu iletişiminin temel bir aracı haline gelirken, 20. yüzyılın ortalarında polis, itfaiye ve diğer kamu hizmetlerinde analog telsiz sistemleri yoğun bir şekilde kullanılmıştır. 2000'li yıllarda, gelişmiş şifreleme ve çoklama tekniklerine sahip sayısal telsiz sistemleri yaygınlaşmış ve bu teknolojiler kamusal ve özel sektör uygulamalarında tercih edilmeye başlanmıştır. Alçak frekanslı ses ve/veya veri sinyallerinin, yüksek frekanslı taşıyıcı sinyaller üzerine bindirilerek uzak mesafelere gönderilmesi işlemine modülasyon denir. Modülasyona ihtiyaç duyulmasının temel sebepleri; daha uzak mesafelere sinyal iletimi (Alçak frekanslı sinyaller büyük dalga boylarına sahip olduğu için verimli anten kullanımı zorlaşır. Modülasyon, sinyali yüksek frekansa taşıyarak daha etkili iletim sağlar), atmosferik ve çevresel etkilerin azaltılması (Düşük frekanslı sinyaller zemin, atmosfer ve iyonosferde daha fazla zayıflamaya uğrar. Modülasyon sayesinde yüksek frekanslı taşıyıcı kullanılarak bu kayıplar minimize edilir.), aynı ortamda birden fazla sinyalin taşınması (Düşük frekanslı sinyaller birbirine karışır. Modülasyon sayesinde her sinyal farklı bir frekansa kaydırılarak çakışma önlenir ve birden fazla sinyal aynı anda iletilebilir.), gürültüye karşı direnç (Alçak frekanslı sinyaller çevresel gürültü ve parazitlere daha duyarlıdır. Modülasyon, sinyali daha yüksek frekansa taşıyarak

bu etkileri azaltır.) ve bant genişliğinin verimli kullanımıdır (Haberleşme sistemlerinde yüksek veri iletimi için geniş bant gereklidir. Modülasyon, alçak frekanslı sinyalleri yüksek frekanslı taşıyıcılara aktarıp geniş bant kullanımı sağlayarak daha yüksek veri hızları sunar). Telsiz haberleşme sistemlerinde iletilmek istenilen bilgi (ses veya veri), taşıyıcı görevi yapan elektromanyetik bir dalga sayesinde iletilir. Almaç ve göndermeç haberleşmeyi sağlayan sistemlerin temel ögeleridir. Telsiz ile iletilecek sinyallerinin frekansları düşük olduğu için havada kısa mesafede sönümleneceğinden yalın bir biçimde iletilemez ve uygun bir modülasyon yöntemiyle taşıyıcı sinyal üzerine bindirilen bilgi sinyalleri anten kullanılarak göndermeç tarafından istenilen noktaya doğru yayınlanır. Yayınlanan bu sinyaller, bilginin iletilmek istendiği diğer noktadaki sistemin almacıyla alınır ve alma noktasında bilgiyi taşıyan bu sinyalin uygun bir yöntemle taşıyıcı sinyalden ayrılması gerekir. Bu nedenle alınan sinyaller çeşitli süzme, yükseltme ve demodülasyondan geçirilerek ses frekansındaki bilgi sinyalleri elde edilir.



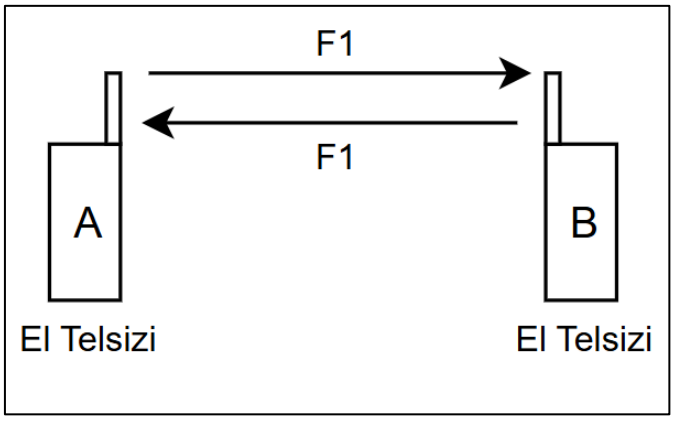
Şekil 2.1. Genel telsiz haberleşme yapısı

2.1. Telsiz Bağlantı Türleri

Telsizler, simpleks, half-dubleks ve full dubleks olarak 3 farklı şekilde kullanılmaktadır.

2.1.1. Simpleks bağlantı

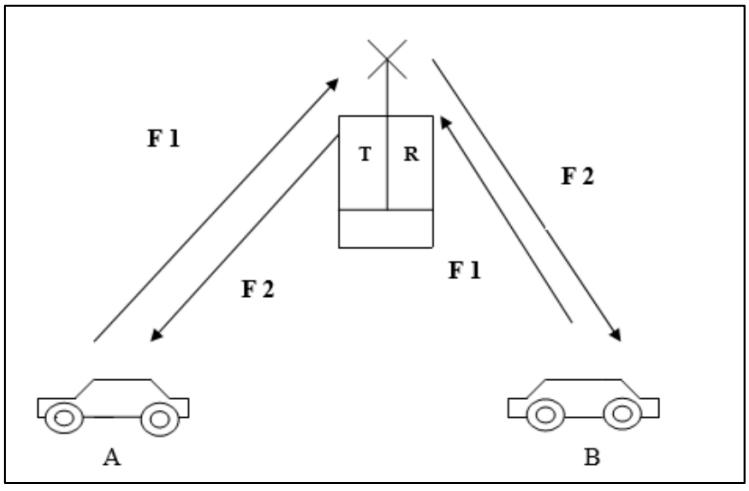
Şebekede yer alan tüm telsizlerin almaç ve göndermeçlerinin aynı frekansta olduğu çalışma şeklidir. Haberleşme tek yöndedir. Dar alanda, yapılan görüşmeler için tek kanallı olarak kullanılır.



Şekil 2.2. Simpleks telsiz bağlantısı

2.2.2. Tek yönlü (half dubleks) bağlantı

Bu çalışma yönteminde sistemde kullanılan telsizlerin alma ve gönderme frekansları birbirinden farklıdır. Aynı anda tek yönde haberleşme yapılır. Görüşme bitiminde öbür yönde haberleşme yapılabilir. Geniş alanlarda yapılan görüşmeler için yüksek, hâkim noktalara tekrarlayıcı röle istasyonları kurularak görüşme kapsaması artırılarak telsiz haberleşmesi sağlanır.

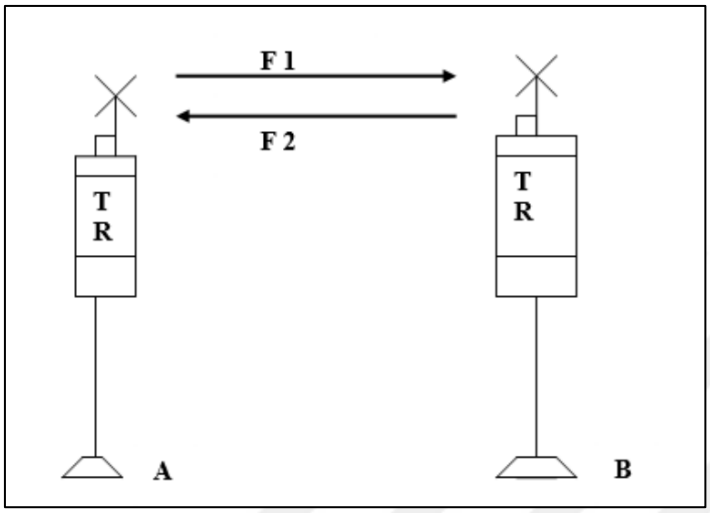


Şekil 2.3. Tek yönlü telsiz bağlantısı

2.2.3. Çift yönlü (full-dubleks) bağlantı

Aynı iletim ortamını kullanarak aynı anda dinleme ve konuşma yapılabilen çalışma şeklidir. Biri gönderme diğeri alma kanalı olmak üzere 2 ayrı frekans kullanılır. Telefon görüşmeleri buna bir örnektedir. Telsiz aynı anda alma ve gönderme yaptığında alma/gönderme frekansı

farklı olmak zorundadır. Bu fark “dubleks aralık” olarak tanımlanmaktadır. Bu aralık ülkeden ülkeye farklılık göstermesine rağmen, genel olarak dubleks aralık VHF bandında 500 KHz, UHF bandında 5MHz (Avrupa’da 10 MHz), 800 MHz bandında ise 39-45 MHz’dir. TETRA; tam dubleks haberleşmeyi desteklemekte DMR ve P25 desteklememektedir.



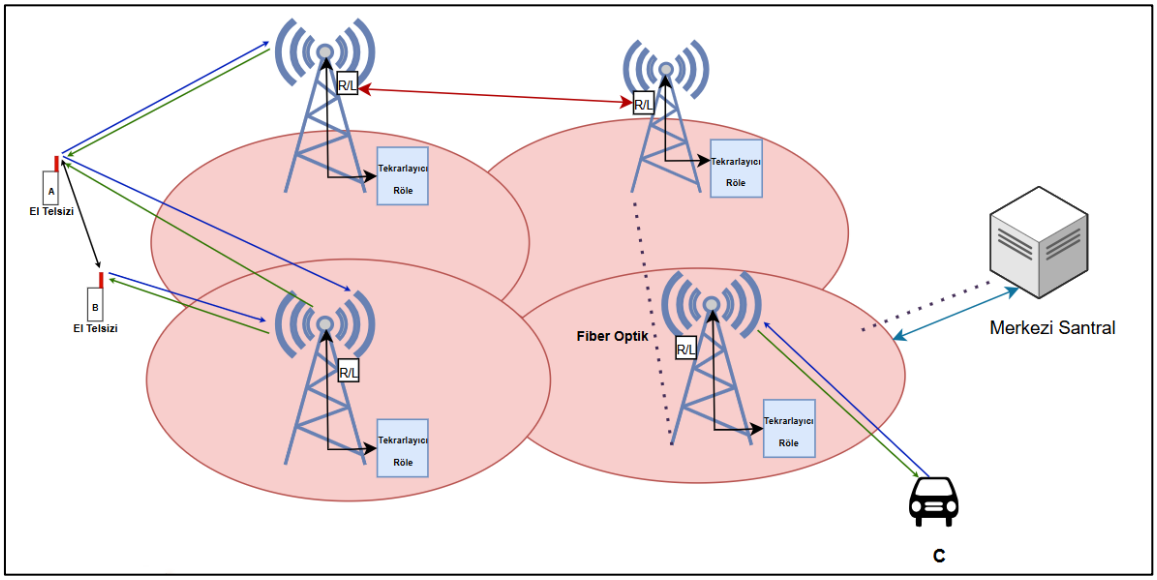
Şekil 2.4. Çift yönlü telsiz bağlantısı

2.2. Geniş Alan Telsiz Kapsama Sistemi

En basit telsiz haberleşme yöntemi yukarıda anlatılan bağlantı türlerinden olan simpleks haberleşme yöntemidir. Bu bağlantı türünde el, araç ve sabit telsizlerin bir arada hiçbir aktarıcı olmaksızın birbirleriyle haberleşmesidir. Böyle bir sistemde haberleşme alanı cihazların bölge içindeki konumuna ve çıkış güçlerine bağlıdır. Telsizler, açık hatta, aralarında herhangi bir fiziksel engel olmayan alanlarda, 10 km’ye kadar ses aktarımının simpleks olarak yapılabilmektedir. Ancak çoğu zaman bu pek mümkün olmadığı gibi kapsama alanının çok daha fazla olması istenilen durumlar bulunmaktadır. Bu nedenle haberleşme alanını genişletmek için değişik yöntemler vardır.

- Sistemde kullanılan telsizlerin RF çıkış güçlerini yükseltmek: Telsizlerin çıkış güçlerini arttırmak haberleşmenin daha geniş bir alanda yapılmasına yardımcı olabilir. Ancak yakın bölgede aynı frekansı kullanan başka kullanıcılar rahatsız olabilir, ayrıca coğrafik olarak problemli olan yerlerde güç arttırımı alanın genişletilmesine yardımcı olmaz ve yeterli güvenirlilikte haberleşme sağlanamaz.

- Tekrarlayıcı telsiz kullanmak: Haberleşme yapılacak bölgenin en yüksek yerine aldığı yayını aktaran bir tekrarlayıcı telsiz kullanarak, haberleşme alanı genişletilebilir. Ancak böyle bir sistemde haberleşme alanı tekrarlayıcı telsizin yerine ve çıkış gücüne bağlı olarak sınırlı kalır.
- Haberleşme alanını bölgelere ayırmak ve her bölgede farklı frekans kullanmak: Her bölgede ayrı frekans kullanmak sınırlı frekans spektrumunun ekonomik kullanılmamasına neden olur. Telsiz kullanıcıları hangi kanalda görüşme yapacaklarını saptamakta zorlanabilirler. Dar bir alanda görüşme yapan telsiz diğer bölgelerle görüşemez.



Şekil 2.5. Geniş alan telsiz kapsama sistemi

Yukarıdaki geniş alan telsiz sisteminde tekrarlayıcı röleler arası bağlantı radyolinkler aracılığıyla veya baz istasyonları arasına döşenen fiber optik kablolar ile gerçekleştirilmektedir. İlgili bağlantılar sonrası örneğin A telsizi ile C aracı arasında bir haberleşme kurulabilmesi için; A telsizinin yayını en yakın tekrarlayıcı röle vasıtasıyla alınır. Kulede kurulan yapı ile ilgili yayın bilgisi R/L veya fiber optik kablo üzerinden merkezi santrale kadar gider. Merkezi santralde kimlik doğrulanması gibi işlemlerden sonra anahtarlama yapılarak A telsizinin bulunduğu kanalda yayın başlatılır. A telsizi ile aynı kanalda olan C telsizi de kendisine en yakın tekrarlayıcı röleden yayın bilgisini anteninden alarak sesi duyar. Ayrıca A telsizinin bulunduğu lokasyon sayesinde 2 farklı tekrarlayıcı röleden de yayın alabilmektedir.

2.3. Konvansiyonel Telsiz Sistemleri

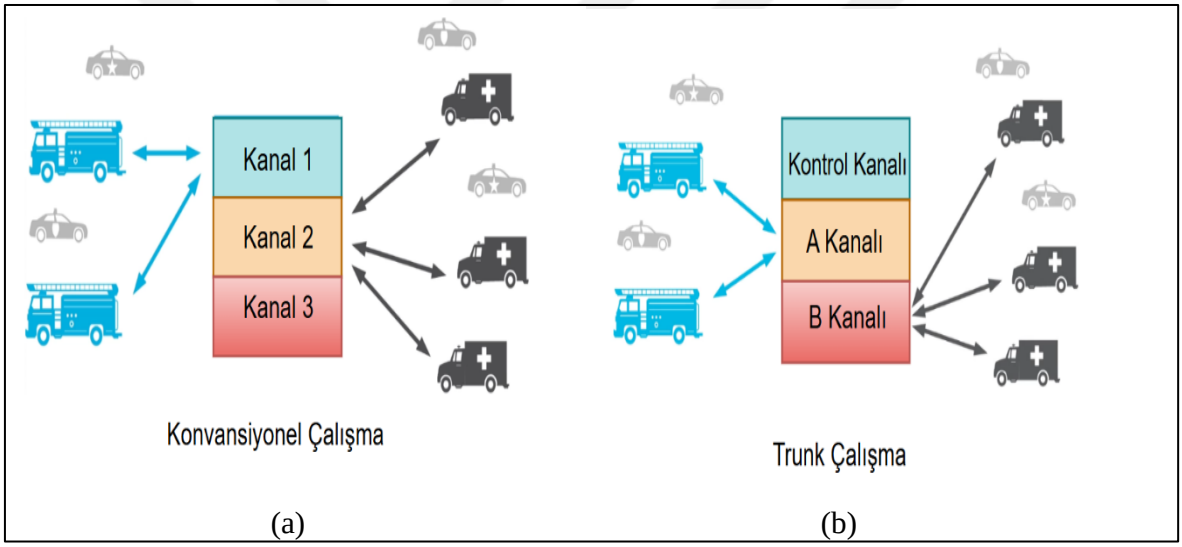
Konvansiyonel bir sistem belirli gruplar ve kullanıcılar için özel kanallara sahiptir ve kullanıcı istediği kanalları elle seçer (MacGillivray, 2022). Örneğin, Kanal 1 acil hizmetler için tahsis edilmişken, Kanal 2 genel hizmetler için olabilir ve kullanıcı ihtiyacına göre bu kanallardan birine geçerek görüşme başlatabilir, konuşmaları dinleyebilir. Konvansiyonel sistemlerde kontrol kanalı bulunmamaktadır. Bu nedenle sistemde herhangi bir kanal anahtarlama mantığı ve trafik-kontrol kanalı ayrımı yoktur. Tüm kanallar hem kontrol sinyalleşmesi hem de haberleşme trafiği için kullanılır. Bir telsizin görüşme mesafesi telsizin çıkış gücü ile sınırlıdır ve bu mesafe iklim/coğrafik şartlarla orantılıdır. Bu görüşme mesafesi araya bir adet tekrarlayıcı telsiz konularak arttırılabilir. Bu tür sistemler tek röleli sistemlerdir (Kalaç, 2006). Her kullanıcı grubuna bir röle etrafında farklı kanal tahsis edilmekte, kullanıcı kullanmadığında kanal boş, atıl kalmaktadır. Bu nedenle kanal frekans verimliliği düşüktür. Geleneksel sistemler genellikle daha az sayıda kullanıcıya sahip işletmeler, kuruluşlar veya kamu güvenliği kurumları için en uygunudur. Konvansiyonel telsiz sistemleri ile kullanıcı gruplarına özel bir frekans kanalının tahsis edildiği ve bu kullanıcı grubu tarafından işletilen geleneksel VHF/UHF telsiz sistemleri kastedilmektedir. Genellikle grup görüşme yapan kullanıcılar için uygun olan bu sistemlerde, kullanıcılar grup içerisindeki haberleşmeyi sağlamak için kendilerine tahsisli olan kanaldan alma-gönderme yaparlar ve bir telsizin gönderdiği ses bilgisi gruptaki tüm telsizler tarafından dinlenir.

2.4. Trunk Telsiz Sistemleri

Trunk modunda bir kanal gurubunun farklı kurum ve kullanıcılar tarafından sorunsuz paylaşımı sağlanmaktadır. Bu amaçla her baz istasyonunda bir kontrol kanalı tahsis edilmektedir. Kontrol kanalı, sistem ve telsizler arasında sinyalleşme için kullanılır. Diğer kanallar ses veya veri haberleşmesi için kullanılır ve trafik kanalı olarak adlandırılır (MPT, 1997). Kontrol kanalından gelen istekleri değerlendiren merkezi kontrol sistemi ses veya veri haberleşme isteğine boş olan trafik kanallarından birisini atar. Görüşme bitimine kadar kanal görüşme isteğinde bulunan telsiz ve görüşülmek istenen telsiz veya grup tarafından kullanılır. Kullanılan trafik kanalı görüşme bitimi sonunda boş trafik kanalı listesine dahil edilir ve yeni bir istek için kullanılabilir. Trunk sistemlerde, var olan trafik kanallarının tümü kullanımdayken gelen ses veya veri haberleşme istekleri sıraya konmaktadır. Trafik

kanallarından biri boşaldığında, sırada bekleyen isteklerden birisi için kullanılır. Burada “ilk gelen ilk çıkar” mantığı kullanılmaktadır (Çeven, 2010).

Trunk telsiz sisteminin getirdiği faydalar arasında kanal verimliliği en önemli yeri tutar. Konvansiyonel telsiz sistemlerinde birbirinden izole kullanıcı gruplarının ellerinde bulunan kanalları sürekli kullanmadıkları, bu nedenle bir kanalda aşırı yoğunluk varken diğer kanalların boş kalabildiği sık rastlanabilen bir durumdur. Trunk Telsiz sistemi kanal kullanım kapasitesini telsiz kullanıcıları arasında eşit oranda dağıttığı için şekil 2.6.’da görüldüğü gibi kanal kullanım ve frekans verimliliğini arttırır. ApcoP25 Faz 1‘de 12.5 KHz’lik bir kanal kontrol kanalı olarak ayrılırken, diğer sistemlerde (TETRA, DMR) bir zaman dilimi kontrol kanalı olarak ayrılmıştır.

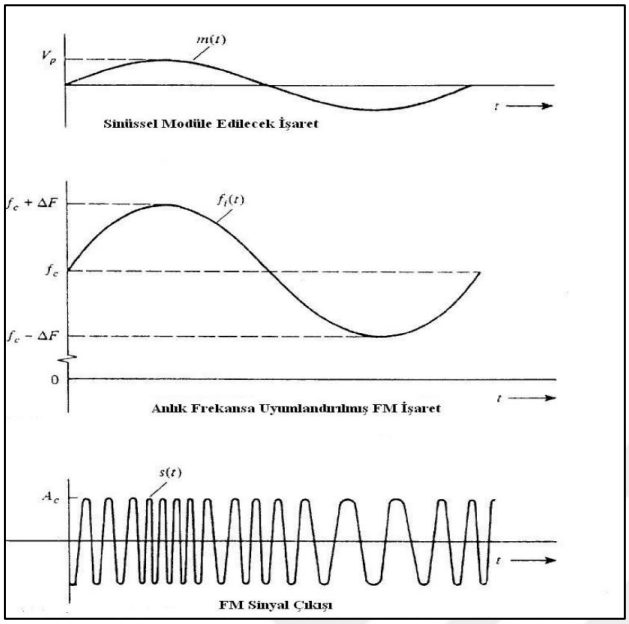


Şekil 2.6 Konvansiyonel (a) ve trunk (b) telsiz modları

2.5. Analog Telsiz Sistemleri

Telsiz haberleşme sistemleri Verici (Transmitter), Alıcı (Receiver) ve/veya bunların her ikisinden oluşurlar. Vericiler ve alıcılar çeşitli modülasyon-demodülasyon (İki frekansın birbirine miks edilip karıştırılması veya çözülmesi) teknikleri kullanılarak ses veya verilerin bir taşıyıcı frekansından (fc Carrier frequency) faydalanılarak iletilmesi mantığıyla çalışırlar. Telsizler, kendilerine tahsis edilmiş kanal frekanslarında, hava ortamından yararlanarak sinyallerini antenleri vasıtasıyla iletirler. Analog ses sinyallerin doğrudan yüksek frekanslı taşıyıcı sinyallere bindirilerek iletildiği Analog Telsiz Sistemleri, analog sistem ve cihazlar

kullanılarak tasarlanmışlardır. FM, AM ve PM modülasyonlarından en fazla FM kullanılır. Analog telsizler genelde VHF-UHF bandlarında çalışmaktadır.



Şekil 2.7. Analog telsizler için FM modülasyonu

FM modülasyon tipinde, modüle edilecek işaretin negatif ve pozitif tepe değerleri (+Vp , -Vp) ile zamana bağlı açısal değişim için tespit edilen ΔF fark frekansına (sapma, deviasyon) karşılık gelen değerler taşıyıcı fc frekansına ilave edilerek veya çıkartılarak çıkış sinyali elde edilir. Bunu bir örnekle açıklayacak olursak: 1 kHz 100 mV luk bir sinyalin sapması 3 kHz ve taşıyıcımız 150,875 MHz ise konuşma bandımızı da 300-3000 Hz (Bu bant bazı kaynaklarda 300-3400 Hz veya 0-4 kHz arası olarak ta verilebilir) arası sayarsak 100 mV sabit kalmak ve maksimum değer olmak şartıyla, konuşmamız yaklaşık 150,866MHz-150,884MHz bandına yerleşir. Band genişliği 18 kHz civarında olur. Sivil ve tahsisli frekanslarda band genişliği olarak ülkemizde 25 kHz veya 12,5 kHz kullanılmaktadır. Bu bandın dışına taşmamak için cihazlarımızın sapma ayarlarını iyi yapmamız gerekmektedir. Radyo yayınları için ses kalitesini artırıp giriş bandındaki sesi 15 kHz'e kadar yükseltebilmek amacıyla 150-200 kHz gibi yüksek bant genişlikleri kullanılır. Buradan da anlaşılacağı üzere band dışına taşma arızalarına misal olmak üzere temel etkenleri sayacak olursak;

- fc taşıyıcı frekansı doğru değildir.
- Sapma ayarı yüksektir

- Giriş sinyali yüksek genlikli olup sapma değeri yükselmektedir.

Analog Telsiz Sistemleri 2000'li yılların başına kadar yaygın olarak kullanılmış olsalar da analog yapılarından dolayı spektrum verimliliği ve veri haberleşmesi konularında yeterli olamamışlar ve bu nedenle yerlerini sayısal telsiz sistemlerine bırakmışlardır.

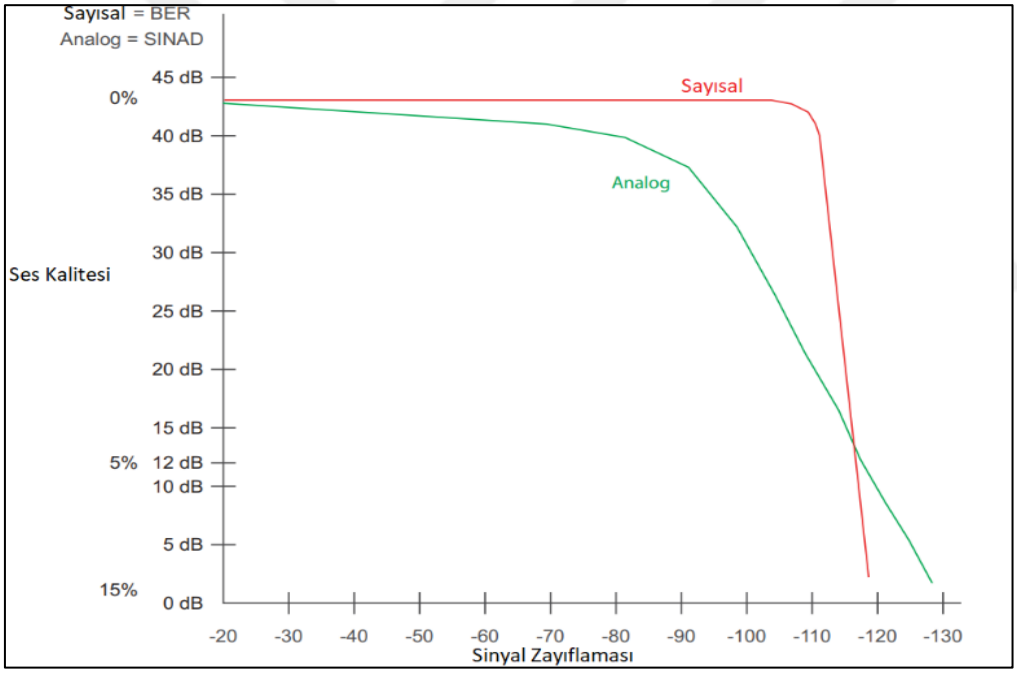
2.6. Sayısal Telsiz Sistemleri

Sayısal teknolojiyle birlikte vericiden gönderilmeden önce veya alıcıdan alındıktan sonra sayısal forma dönüştürülen bilgi üzerinde sayısal yöntemler uygulanabilmektedir. Örneğin verimli bir ses sıkıştırma yöntemi ile iletilen sesin spektrum kullanım oranı düşürülerek spektrum verimliliği arttırılabilmektedir. Sayısal sistemlerde analog sistemlerden farklı olarak iletilen sinyalin üzerinde sürekli olan gürültü, eğer eşik seviyesini aşmıyorsa etkisiz olmaktadır. Ayrıca sayısal teknolojiyle birlikte ses haberleşmesinin yanında modeme ihtiyaç duyulmadan veri haberleşmesi de gerçekleştirilebilmektedir (Çeven, 2010). Sayısal Telsiz Sistemleri, telsiz haberleşmesi için kısıtlı kaynak olan frekans spektrumunun etkin kullanımı ve veri haberleşmesi ihtiyaçlarına cevap verebilmek amacıyla sayısal sistem ve teknolojiler kullanılarak gerçeklenmiş sistemlerdir (Lathi, 1998). Aşağıdaki tabloda analog ve sayısal telsizler çıkış gücü, kapsama alanı, SNR, spektrum verimliliği gibi kritik parametreler ele alınarak karşılaştırılmıştır. Buna göre tüm alanlarda sayısal telsizlerin öne çıktığı görülmektedir.

Çizelge 2.1. Analog ve sayısal telsizlerin çeşitli parametrelere göre karşılaştırılması

Özellik	Analog El Telsizi	Sayısal El Telsizi
Çıkış Gücü	1-5 watt (kullanıma göre ayarlanabilir).	1-5 watt (genelde aynı seviyelerde).
Kapsama Alanı	- Şehir içinde: 1-3 km (engeller nedeniyle sınırlı). - Açık alanda: 5-15 km (araziye bağlı).	- Şehir içinde: 3-5 km (hata düzeltme avantajı). - Açık alanda: 10-20 km (verimli frekans kullanımı).
Ses Kalitesi (SNR)	Ortalama 30-40 dB (sinyal zayıfladıkça parazit artar).	Ortalama 40-50 dB (DSP ve hata düzeltme ile net kalır).
Veri İletim Hızı	Veri iletimi desteklenmez (yalnızca ses).	DMR: 9.6 kbps (12.5 kHz). TETRA: 36 kbps (25 kHz).
Spektrum Verimliliği	12.5 kHz veya 25 kHz kanal genişliği kullanır.	6.25 kHz veya 12.5 kHz kanal genişliği ile daha verimlidir (DMR ve TETRA).
Güvenlik (Şifreleme)	Şifreleme genelde yok, sinyaller dinlenebilir.	AES-256 veya özel algoritmalar ile yüksek güvenlik sağlar.
Enerji Tüketimi	Daha fazla enerji tüketir, pil ömrü 8-10 saat civarındadır.	Daha verimli enerji tüketir, pil ömrü 12-16 saat arasında değişir.
Hata Düzeltme	Hata düzeltme yoktur, zayıf sinyallerde iletişim kaybı yaşanır.	FEC (Forward Error Correction) ile iletişim kalitesi korunur.
Uyumluluk (Standartlar)	Eski analog sistemlerle uyumludur (VHF/UHF).	Modern standartlarla uyumludur (DMR, TETRA, P25) ve geriye dönük uyumluluk sağlar.

Analog sistemlerde ses kalitesi, SINAD (Signal-to-Noise and Distortion) ile, sayısal sistemlerde ise BER üzerinden değerlendirilmektedir. Analog telsizlerde ses kalitesi, sinyal zayıflaması ile kademeli olarak azalır. Sinyal seviyesi düşük olsa bile, sistem belirli bir kalite düzeyinde çalışmaya devam eder. Ancak, sinyal zayıflaması arttıkça ses kalitesinde ciddi bozulmalar gözlenir. Sayısal telsizlerde ise, belirli bir eşik değerine kadar sabit ve yüksek kalitede bir performans sunar. Sinyal zayıflaması kritik bir seviyeye ulaştığında, ses kalitesi aniden bozulur ve sistem çalışamaz hale gelir. Bu durum, sayısal iletişim sistemlerinin "ya hep ya hiç" prensibi ile çalıştığını gösterir. Sonuç olarak analog telsizler, kademeli bir kalite kaybı yaşarken düşük sinyal seviyelerinde dahi çalışabilirken, sayısal sistemler daha geniş bir aralıkta sabit kalite sunar ancak belirli bir eşik değerinden sonra tamamen işlevsiz hale gelir.

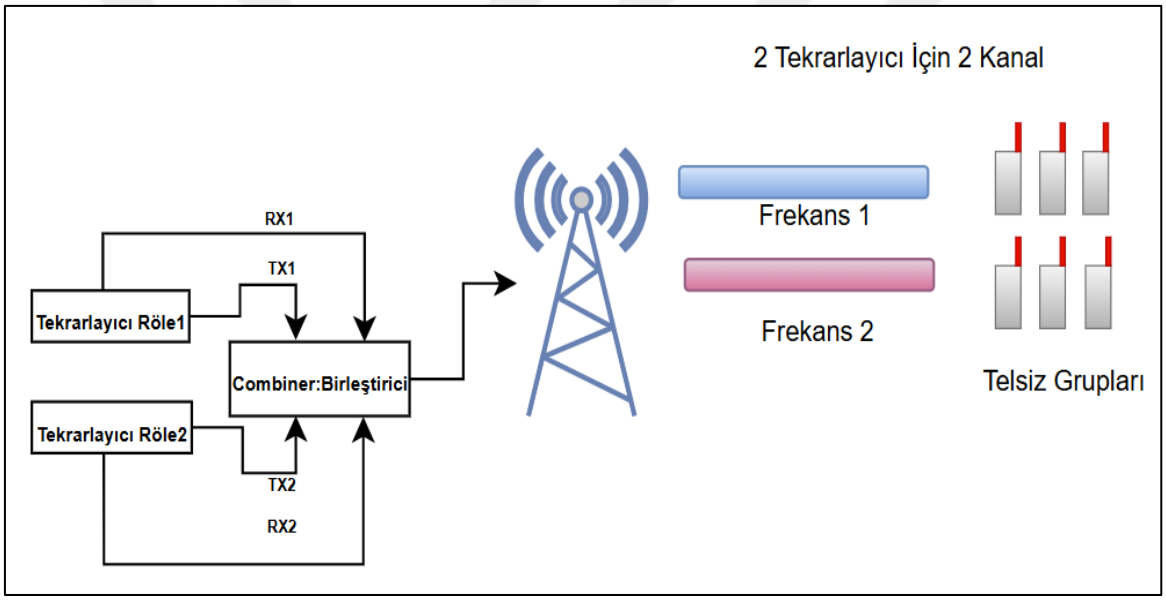


Şekil 2.8. Analog ve sayısal telsiz ses kalitesi/zayıflama eğrileri

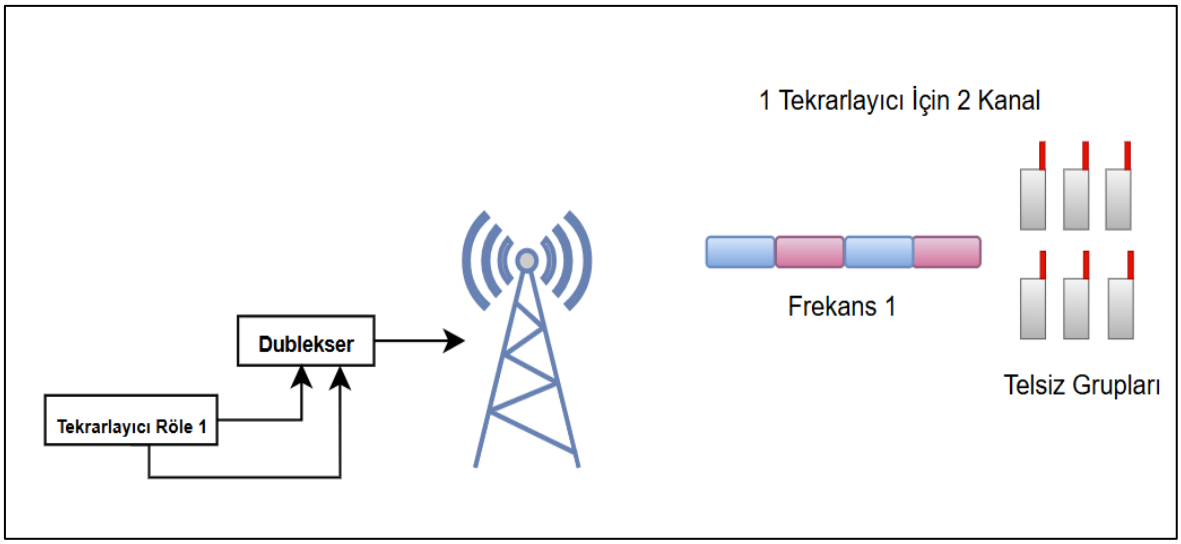
Sayısal telsizlerde çoklu veri iletimi 2 şekilde olur. Bunlar FDMA (Frequency Division Multiple Access: Frekans bölmeli çoklu erişim ve TDMA (Time Division Multiple Access: Zaman bölmeli çoklu erişim)'dir. Aşağıdaki bu iki çoklama yöntemi temel parametrelere göre karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.2. TDMA ve FDMA karşılaştırması

FDMA	TDMA
FDMA, frekans bölmeli çoklu erişim anlamına gelir.	TDMA, zaman bölmeli çoklu erişim anlamına gelir.
FDMA (frekans bölmeli çoklu erişim) senkronizasyon gerektirmez.	Senkronizasyon gereklidir.
Daha az güç verimliliğine sahiptir.	Daha fazla güç verimliliğine sahiptir.
Yüksek taşıyıcı frekans kararlılığı gerektirir.	Yüksek taşıyıcı frekansı gerekli değildir.
Frekans bandını ayrık alt banda bölmüştür.	Zamanı örtüşmeyen zaman dilimine böldü.
Tüm frekans bandı birden çok RF kanalına/taşıyıcıya bölünmüştür. Her operatör farklı kullanıcılara tahsis edilmiştir.	Tüm bant genişliği, önceden belirlenmiş sabit veya dinamik olarak atanmış zaman aralıklarında/yuvalarında farklı aboneler arasında paylaşılır.
Sürekli iletim şemasına sahiptir.	Süreksiz iletim şeması.



Şekil 2.9. Analog veya frekans bölmeli çoklu iletim (FDMA) yapısı



Şekil 2.10. Zaman bölmeli çoklu iletim (TDMA) yapısı

2.6.1. DMR telsiz standardı

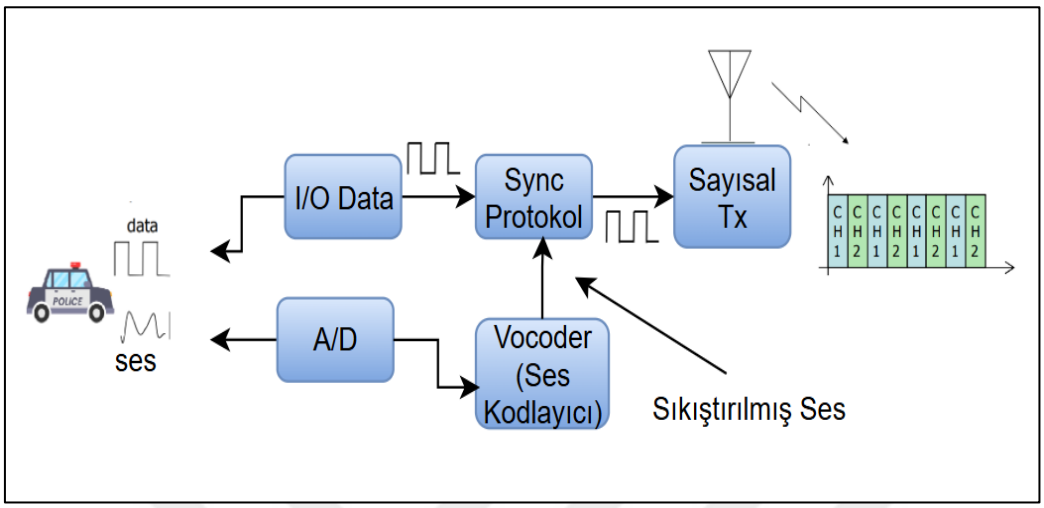
DMR (Digital Mobile Radio), ETSI (Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü) tarafından geliştirilen ve ilk olarak 2005 yılında onaylanan, ticari mobil radyo kullanıcıları için belirlenmiş bir sayısal telsiz standardıdır. Standart, dünya çapında lisanslı kara mobil frekans bantlarında kullanılan mevcut 12,5 kHz kanal aralığında çalışmak ve 6,25 kHz kanal eşdeğerliği için gelecekteki düzenleyici gereklilikleri karşılamak üzere tasarlanmıştır. Birincil hedef, düşük karmaşıklığa sahip uygun fiyatlı sayısal sistemleri belirtmektir. DMR, ses, veri ve diğer tamamlayıcı hizmetler sağlar. Günümüzde, özelliklerine göre tasarlanan ürünler dünyanın tüm bölgelerinde satılmaktadır. (DMR Derneği)

DMR tekrarlayıcıları çift standart teknolojisi ile tasarlanmıştır hem analog hem de sayısal şekilde çalışabilir (çift mod).

- Geleneksel protokollere dayalı FM analog modülasyon ile sesli iletişim sağlar.
- DMR standardına göre 4FSK sayısal modülasyonlu ses iletişimi ve veri iletimi sağlar.

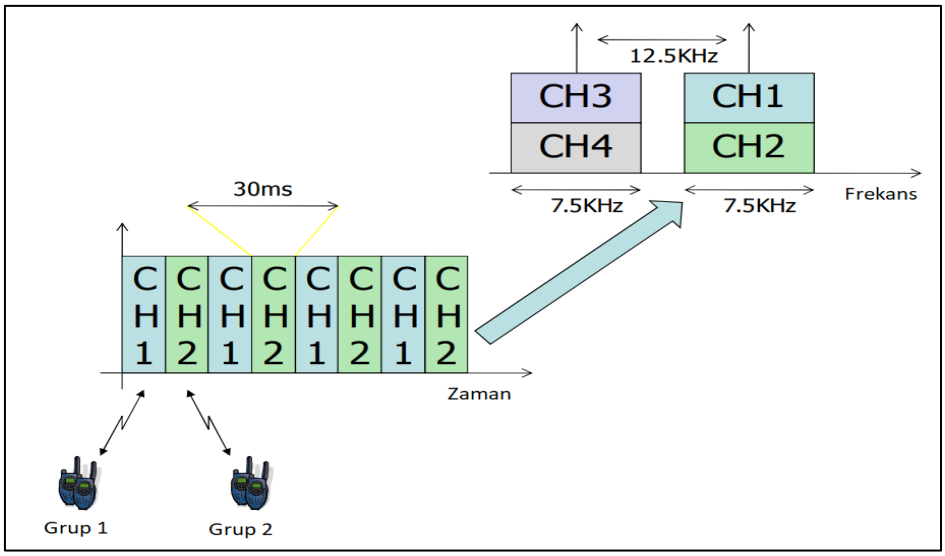
Ayrıca, gerekli çalışma modunun seçimi tamamen otomatiktir. Bu durum tekrarlayıcının gelen sinyalin analog veya sayısal olup olmadığını otonom olarak algılayabildiği ve buna bağlı olarak kendisini sırasıyla analog veya DMR olarak çalışacak şekilde yapılandırabildiği anlamına gelir. DMR standardı hem veri hem de sesin taşınmasını gerçekleştirir. Ses sinyali

sayısal formata dönüştürülür, kodlanır, sıkıştırılır, sayısal taşıma kanalına "paketlenir" ve veri sinyalinden farklı şekilde "işaretlenir"(Radioactivity, 2009).



Şekil 2.11. DMR ses ve veri sinyallerinin taşınması ile işlenmesi

Ses/veri kanalları, 12,5 kHz genişliğindeki aynı telsiz kanalını paylaşan iki TDMA (Zaman bölmeli çoklu erişim) zaman dilimiyle yönetilir. İki ses/veri kanalı, sanki farklı frekanslarda (taşıyıcılar) konvansiyonel bir modda çalışıyormuş gibi, mükemmel bir şekilde ayrılmış ve birbirlerinden bağımsızdır. Verici, yalnızca kendi çalışma kanallarına ait zaman dilimleri sırasında aktif hale gelir. DMR sistemin ana amacı, en basit ve en ucuz sayısal sistemi kullanıcıya sunmaktır. DMR, daha çok iş, operasyon uygulamaları için tasarlanmıştır. Ancak üreticiler hedef kritik uygulama özelliklerini gerçekleştirerek sistemi misyon kritik platform (kamu güvenliği haberleşme platformu) haline getirmiştir. DMR standardının üç fazı bulunmaktadır. Faz 1 Amatör, Faz 2 geleneksel, Faz 3 trunk kullanım için tasarlanmıştır. 12.5 kHz bant genişliğinde iki zaman dilimi bulunmaktadır. DMR faz 3'te 12.5 kHz'lik kanallardan birindeki iki zaman diliminden biri kontrol kanalı olarak kullanılır. Tüm kanallar dolu olduğunda kontrol kanalı da trafik kanalı olarak da hizmet verebilmektedir. DMR kurulumların çoğu trunk kullanım şeklindedir.



Şekil 2.12. Ses ve veri kanalları ve TDMA timeslotları (Radioactivity, 2009)

DMR sistemleri, her ikisi için de herhangi bir performans düşüşü olmadan bitişik kanallarda geleneksel analog sistemlerle birlikte çalışabilir. DMR sistemi, TETRA ile aynı ve geleneksel sistemlere kıyasla iki katı olan 1CH/6.25KHz'lik bir spektral verimliliğe sahiptir. Sadece bir telsiz başlığı (header, sadece bir verici), daha düşük maliyetler ve tüketimler ve daha fazla kullanılabilir güç etkisiyle RF kuplaj sistemlerine ihtiyaç duymadan 2 kanal sağlar. Ayrıca, DMR sistemi terminaller arasında doğrudan iletişime izin verir. Bu durumda, senkronizasyon tekrarlayıcı/ağ tarafından yapıldığından, 12.5KHz başına sadece bir kanal kullanılabilir olacaktır.

Üç kademe DMR ekipmanı vardır:

- kademe I ekipmanı en düşük maliyetli "sayısal PMR446" uygulaması içindir;
- kademe II, eşler arası mod (peer to peer) ve tekrarlayıcı modu sunan profesyonel pazar içindir; ve
- kademe III, trunk operasyon içindir.

Kademe II ve III TMDA yöntemi ile iletim sağlarken kademe I FDMA ile iletim sağlar. DMR kademe II ve kademe III ürünleri hem eş zamanlı (simulcast) yayın yapan hem de eş zamanlı olmayan sistemleri kapsar. DMR hava arayüzü protokolü, hem konvansiyonel (hem tek siteli hem de çok siteli) hem de sistem (örneğin trunk veya çok siteli operasyon)

pazarlarındaki profesyonel kullanıcılara, aşina olduğu mevcut özellik ve olanak sağlar. İlgili özellikler aşağıdaki çizelge 2.3.'de belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. DMR hava protokolünün temel parametreleri (European Telecommunications Standard Institute [ETSI], 2023).

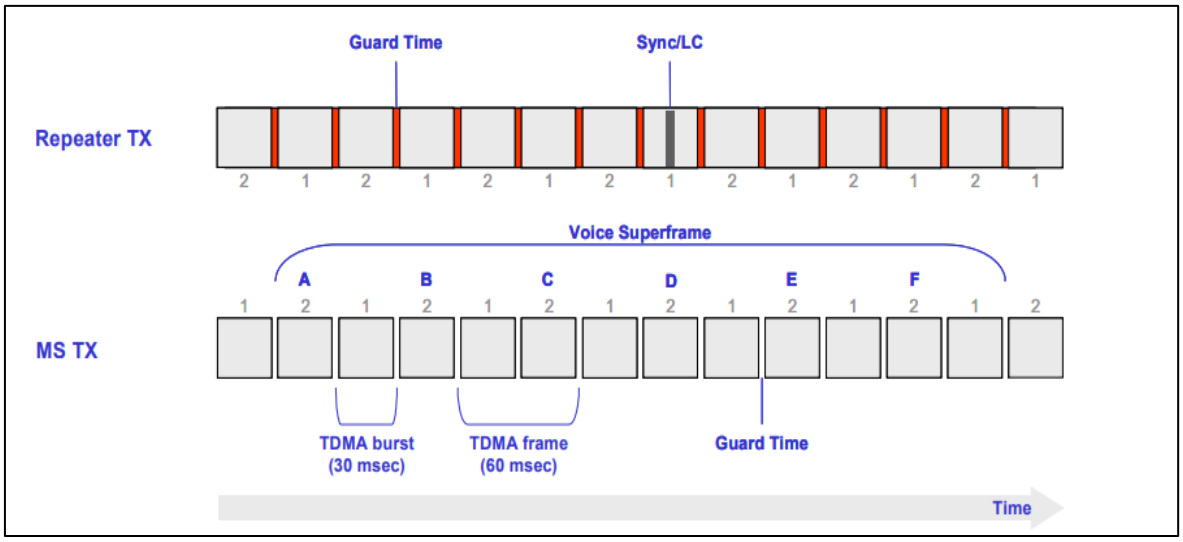
Başlık	Açıklama
Temel Yapı	50/50 zaman bölmeli görev döngüsü, iletimin ileri ve geri olarak yapılmasına olanak tanır. İletim, ses, veri veya genel sinyalleşme için kullanılabilir. Aktifken, senkronizasyonun sağlanması için iletimler sürdürülür.
Çift Yönlü (Dubleks) İşletim	İleri ve geri sinyalleşme ile ses, çift yönlü bir konuşmayı zaman bölmeli bir temelde sürdürmek için yeterince hızlıdır. Sinyal değişim hızı, doğru bir VOX'un (Sesle çalıştırılan santral) uygulanmasını sağlayacak kadar yeterlidir.
Pil Tasarrufu	Zaman bölmeli yapı, çeşitli pil tasarrufu seçenekleri sunar. Bu seçenekler, kullanıcıların özel ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde optimize edilebilir.
Çağrı Kesintisi	Zaman bölmeli yapı, kullanıcı konuşurken bile birimlerin sinyal almasına izin verir. Bu, konuşmacının iletiminin kesilmesi gerektiği kamu güvenliği uygulamalarında kullanılabilir.
6,25 kHz Eşdeğerliliği	Zaman bölmeli yapı, tek bir 12,5 kHz telsiz kanalında iki çağrının sürdürülebilmesini destekler. Bu yapı, frekans domaininde kanalı bölmeye gerek kalmadan 6,25 kHz kanal eşdeğerliliği avantajı sağlar. Böylece kanal merkez frekansı değişmeden kalır.
Frekans Aralığı ve Modülasyon	Protokol, mevcut PMR bantlarında çalışan PMR ekipmanları için tasarlanmıştır. Modülasyon tekniği 4FSK'dır.
Vocoder	Protokol, ses kodlayıcı seçimine bağımsız olarak tasarlanmıştır. Sağlayıcılar gelecekte ortak bir ses kodlayıcı benimsemeyi tercih edebilir. Bu karar protokolün dışında kalır.
Yayılan Güç ve Menzil	Protokol, menzil performansını mevcut analog teknolojiyle eşitlemek için tasarlanmıştır. Kodlama kazancı, çağrıların menzil sınırında daha güvenilir olmasını sağlar ve spektrum kurallarını değiştirmeden PMR bantlarına uyum sağlar.
Kanal Erişimi	Protokol, diğer kullanıcılarla paylaşımı kolaylaştıran kanal erişimini devre dışı bırakma seçeneği sunar. Bu, belirli kullanıcıların belirli çağrıların başarı olasılığını en üst düzeye çıkaracak uygulamalara sahip olmasını desteklemek için önemlidir.
İletimin Yükselme ve Düşüş Süresi	Mevcut ETSI EN 300 113 standartlarına uygundur.
Birim Tanımlama ve Numaralandırma	Protokole dahildir.

Hava arayüzü protokolü

DMR protokolü %50 görev döngüsüne (duty cycle) sahip 30 ms'lik bir slot yapısı etrafında oluşturulmuştur. İletilen bloklar arasındaki boşluklarda protokol, ünitenin alım yapmasını ister. Bu nedenle, bir konuşma sırasında bile ters yönde sinyalleşme ve/veya sese izin verir. Kullanıcının algısı, bu ünitenin tam bir çift yönlü (full-dubleks) konuşma sağladığı yönünde olacaktır. Bu nedenle bu protokol, tekrarlayıcı, eş zamanlı yayın(simulcast), trunk veya eşler arası (peer to peer) modlarda çift yönlü iletişimi destekler. Eş zamanlı yayın mimarileri için gereken sistem gecikmeleriyle ilgili özel gereksinimler dikkate alınır. Şekil 2.13.'de genel yapı sunulmaktadır. Protokol, konuşmanın her iki ucunda da verici ve alıcı durumlarını

senkronize edecek bir yöntem çağrısında bulunur, böylece bir tarafın iletim yapmasına izin verildiği sırada diğer tarafın her zaman alım yapması sağlanır. DMR, hem giriş (inbound) hem de çıkış (outbound) kanalları için 2 slotlu TDMA kanalını içerir. Şekil 2.13.'de aboneler ile sabit uç ekipman arasındaki değişimlerin genelleştirilmiş bir zaman diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramda iki TDMA kanalına ait slotlar, "1" ve "2" olarak adlandırılmıştır. Giriş sinyalleşmesi "MS TX" ve çıkış sinyalleşmesi "Repeater TX" olarak etiketlenmiştir. Şema şu özellikleri içermektedir:

- Aktifken, gönderilecek bir bilgi olmasa bile çıkış kanalı sürekli olarak iletim yapar. Giriş kanallarının her biri, gönderilecek bilgi olmadığında kullanılmaz. Ayrıca protokol, iletimlerin belirli durumlarda, örneğin belirli bir süre hareketsizlikten sonra durdurulmasına izin verir.
- Giriş kanalı, burst'ler arasında kullanılmayan bir koruma bandına sahiptir. Bu, sentezleyici kilidi ve PA (güç amplifikatörü) ayarına olanak tanır.
- Çıkış kanalı, burst'ler arasında kanal yönetimi (çerçeveleme ve erişim) ile düşük hızlı sinyalleşme için bir ortak duyuru kanalı (CACH:common announcement channel) içerir.
- Giriş kanalındaki 1 ve 2 numaralı burst'ler, çıkış kanalındaki 1 ve 2 numaralı burst'lere göre zaman açısından kaydırılmıştır. Bu numaralandırma sistemi, çıkış CACH'deki tek bir kanal tanımlayıcı alanının, girişteki (kanal kullanımı) ve çıkıştaki (kanal numarası) aynı kanal numarasına atıfta bulunmasına olanak tanır.
- Burst'ler, ya bir senkronizasyon deseni ya da burst'ün ortasında yer alan gömülü bir sinyal alanı içerir. Gömülü sinyalin burst'ün ortasına yerleştirilmesi, iletim yapan abonenin çıkış kanalına geçiş yapması ve ters kanal bilgisini geri kazanması için zaman tanır.
- Ses burst'leri ve veri burst'leri arasında ayrım yapılmasını sağlamak için farklı senkronizasyon desenleri kullanılır. Giriş ve çıkış kanallarında farklı senkronizasyon desenleri kullanılarak alıcının ortak kanal parazitini reddetmesi sağlanır.
- Gömülü sinyal alanında ve veri/kontrol burst'ünde bir renk kodu (cc) bulunur. Bu, radyo ağlarını veya belirli bir tekrarlayıcıyı adreslemek için basit bir yöntem sunarak ortak kanal parazitinin reddedilmesini sağlar.
- Kanal 1'deki senkronizasyon burst'lerinin konumu, kanal 2'deki senkronizasyon burst'lerinin konumundan bağımsızdır. Giriş kanallarındaki senkronizasyon burst'lerinin konumu, çıkış kanallarındaki senkronizasyon burst'lerinin konumundan bağımsızdır.

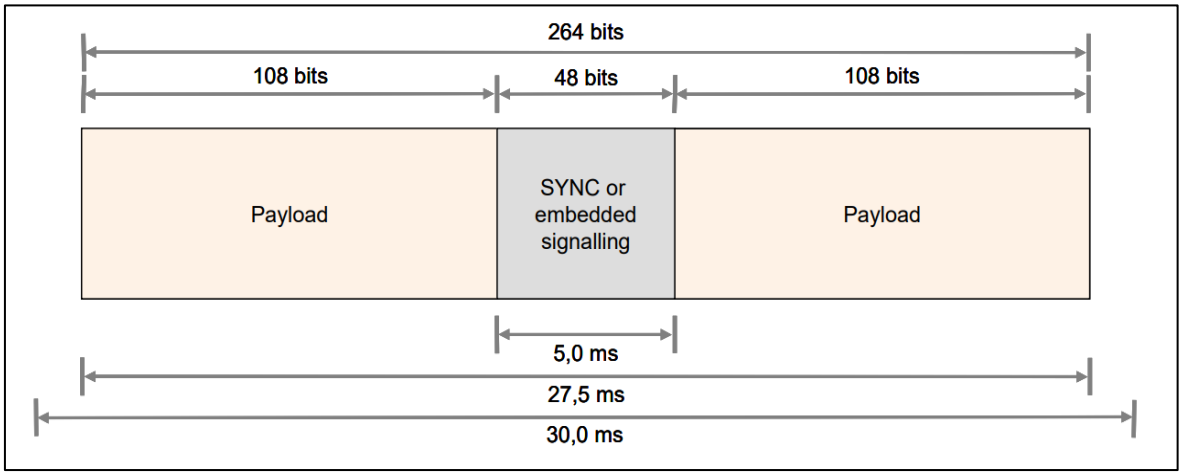


Şekil 2.13. DMR hava arayüzü protokolü genel yapısı

Burada Sync/LC, Senkronizasyon (sync) ve Link Control (LC) için kullanılan özel bir bölüm olup zamanlama ve bağlantı durumunun yönetilmesini sağlar. Guard Time (Koruma Süresi) ise Zaman dilimleri arasında olası çakışmaları önlemek için ayrılan kısa bir süredir. Kullanıcıların gönderimlerinin birbirine karışmasını engeller.

DMR burst and çerçeve yapısı:

Genel burst yapısı, Şekil 2.14.'de gösterildiği gibi iki adet 108 bitlik yük alanı ve bir adet 48 bitlik senkronizasyon veya sinyalleşme alanından oluşur. Her burstun toplam uzunluğu 30 ms'dir ancak 264 bitlik içerik için 27,5 ms kullanılır ve bu da 216 bitlik yük kullanılarak 60 ms sıkıştırılmış konuşma taşımak için yeterlidir.

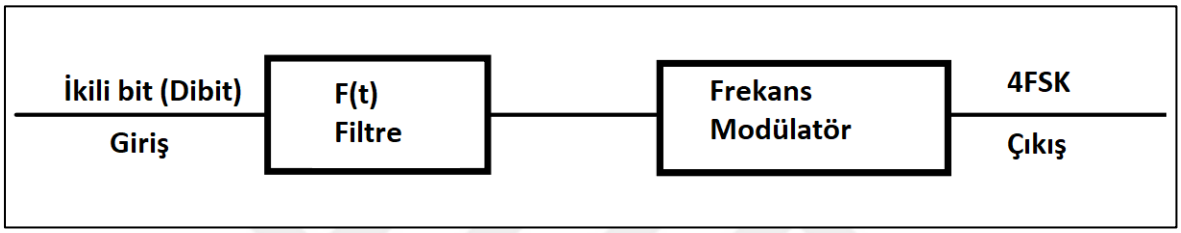


Şekil 2.14. DMR genel burst yapısı

Örneğin 20 ms'lik vocoder çerçeveleri kullanan bir vocoder için, burst üç 72 bitlik vocoder çerçevesi (FEC dahil) artı bir ses burstunda 48 bitlik senkronizasyon sözcüğü taşıyacaktır, yani burst içerikleri için 264 bit (27,5 ms) kullanılır. Veri ve kontrol bilgileri için yük, ek bir Veri Türü alanı tanımı için 20 bitlik bir alan bırakan iki 98 bitlik yüke düşürülür.

Modülasyon tekniği

4FSK modülatörü, aşağıda görüldüğü gibi bir frekans modülatörü ile bir karekök yükseltilmiş kosinüs filtresinden oluşur.



Şekil 2.15. 4FSK modülatörü

4FSK (4-Level Frequency Shift Keying), dar bant frekans modülasyonu (FM) prensibiyle çalışır. Temelde, 4FSK'nin çalışma mantığı FM modülasyonunun özel bir versiyonudur. Ancak burada kritik fark, frekans sapmalarının belirli 4 seviyeye sabitlenmiş olmasıdır. Standart FM modülasyonu analog bir giriş sinyalinin genliğine bağlı olarak taşıyıcının frekansını sürekli değiştirir. Fakat 4FSK'de giriş sinyali sayısaldır (dibit - 2 bitlik veri) ve yalnızca 4 farklı, belirli frekans seviyesinden birine kaydırılır. Dibit veri doğrudan FM modülatörüne verilirse, ani frekans değişiklikleri nedeniyle bant genişliği genişler ve bitişik kanallara girişim (adjacent channel interference) yaratır. Bu yüzden, giriş verisi önce bir filtreden geçirilerek, daha yumuşak bir geçiş sağlanır. DMR'da filtre olarak Karekök Yükseltilmiş Kosinüs (Root Raised Cosine - RRC) filtresi kullanılmaktadır. Bu filtre, RRC filtresi olarak tanımlanır ve temel olarak Nyquist kriterine uygun bir bant sınırlama işlemi gerçekleştirir. Nyquist filtresi teorik olarak ISI'yi tamamen ortadan kaldırabilirken, pratik uygulamalarda tam bir Yükseltilmiş Kosinüs (RC) filtresi yerine RRC filtresi tercih edilir. Bunun nedeni, RRC filtresinin verici ve alıcı arasında simetrik olarak bölüştürülerek uygulanabilmesi ve böylece toplamda tam bir RC filtresi etkisi yaratmasıdır. Bu yaklaşım hem vericide hem de alıcıda filtreleme işlemi yaparak sinyalin daha verimli iletilmesini ve

alınmasını sağlar. RRC filtresinin frekans tepkisi, Nyquist bant sınırlama prensiplerine uygun olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:

$$\begin{aligned} \mathrm{F}(f) &= 1 && |f| \leq 1920 \\ |\mathrm{F}(f) &= \cos(\pi f \div 1920) && 1920\ Hz\ < |f| \leq 2880 \\ |\mathrm{F}(f) &= 0 && |f| > 2880 \end{aligned} \qquad (2.1)$$

|F(*f*)|= Karekök yükseltilmiş kosinüs filtresinin büyüklük tepkisi.

Burada, 1920 Hz'in altındaki frekans bileşenlerini olduğu gibi geçirirken, 1920 Hz - 2880 Hz arasındaki bileşenleri bir kosinüs fonksiyonuna göre azaltır ve 2880 Hz'den yüksek bileşenleri tamamen filtreleyerek bastırır. Bu sayede, bitişik kanallara girişim (adjacent channel interference) minimize edilerek, sınırlı bant genişliği içinde yüksek verimli veri iletimi sağlanır.

Modülasyon, her sembol 2 bit bilgi ileterek 4800 sembol/sn gönderir. Sembolün maksimum sapması, *D*, şu şekilde tanımlanır:

$$D = 3h \div 2T \qquad (2.2)$$

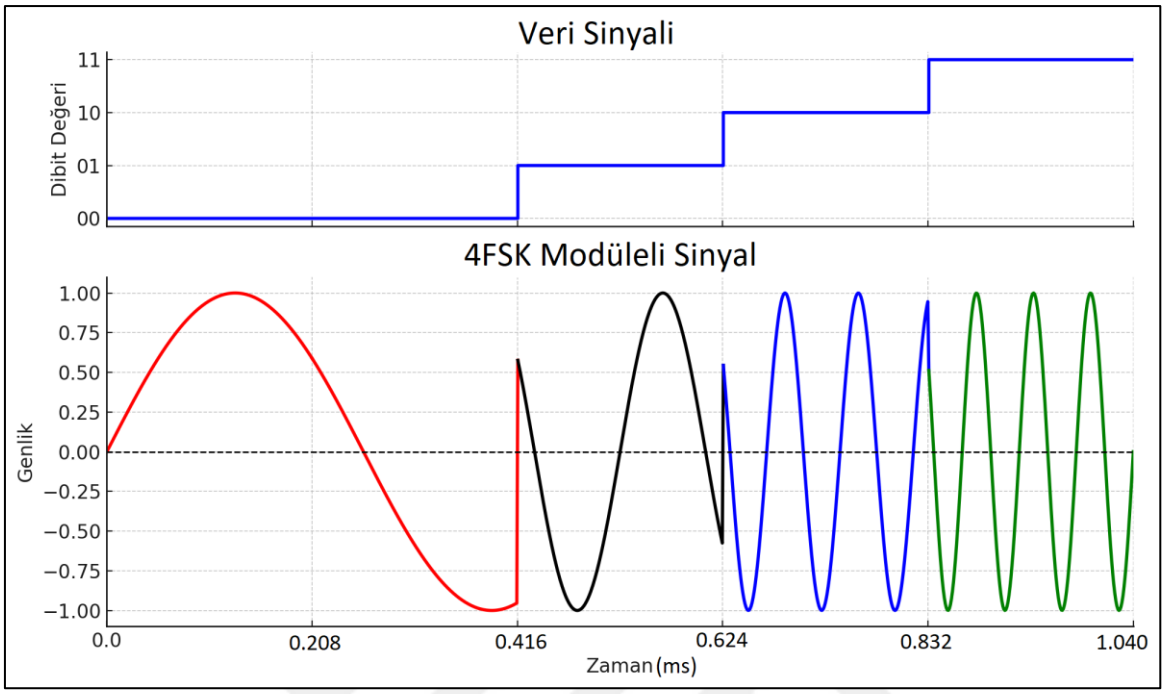
h belirli bir modülasyon için tanımlanan sapma endeksidir; ve *T* saniye cinsinden sembol süresidir (1/4800). 4FSK için sapma endeksi, *h*, 0,27 (sembol 3 ve sembol -3) ve 0,09 (sembol 1 ve sembol -1) olarak tanımlanır. Bu, sembol merkezinde 1,944 kHz'lik bir sembol sapması verir. Semboller ve bitler arasındaki eşleme çizelge 2.4.'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Dibit sembolünün 4FSK sapmasına eşlenmesi

Bilgi Bitleri		Sembol	4FSK Sapması
Bit 1	Bit 0		
0	1	3	+1,944 kHz
0	0	1	+0,648 kHz
1	0	-1	-0,648 kHz
1	1	-3	-1,944 kHz

Örneğin taşıyıcı frekans 500 MHz seçilirse sapmaların eklenmesi ile 4 farklı frekans sırasıyla 500,001944 MHz, 500,000648 MHz, 499,999352 MHz, 499,998056 MHz şeklinde olacaktır.

Aşağıda örnek bir 4FSK modülasyon sinyali gösterilmiştir.



Şekil 2.16. 4FSK modülasyon sinyali

DMR Tier I, Tier II ve DMR Tier III (trunking) için net veri hızı 4.8 kbps'dır. (9600 bps brüt hızın yarısı, çünkü zaman bölmeli çift yönlü (TDMA) yapıda her kullanıcı 2 slotlu yapıda bir slotu kullanır). Sembol süresi (Ts), sembol hızının tersi olup 1/4800'den 0,208 ms'dir. DMR sistemlerinde kullanılan 4FSK modülasyonu, belirli frekans sapmaları ile sembol seviyelerini kodlar. Modülatör, her sembol için taşıyıcının faz kaymasını uygun şekilde ayarlayarak, ilgili frekans sapmasını oluşturur. Frekans sapmalarının hesaplanması aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmektedir:

$$\sqrt{2} \times 1944\ Hz\ =\ 2749\ Hz \tag{2.3}$$

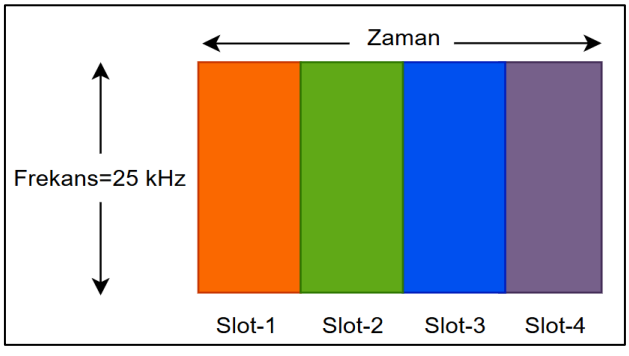
Bu değer, tepe frekans sapmasını belirlemek için kullanılan bir hesaplama yöntemidir ve modülatör çıkışında FM demodülasyonu ile doğru veri elde edilebilmesi için referans değer olarak kullanılır. DMR standardına uygun olarak, ölçüm yöntemleri ve demodülatör ayarları da belirli kısıtlamalara sahiptir. FM demodülatörleri için:

- Yüksek geçişli filtre köşe frekansı ≤ 15 Hz, düşük frekans bileşenlerini bastırmak amacıyla kullanılır.

- Düşük geçişli filtre köşe frekansı ≥ 3 kHz, gereksiz spektral genişlemeyi önler.
- DMR sistemlerinde izin verilen maksimum frekans sapma sınırları 2474 Hz ile 3024 Hz arasındadır, bu sınırların dışına çıkılması durumunda bitişik kanallar arasında girişim meydana gelebilir.

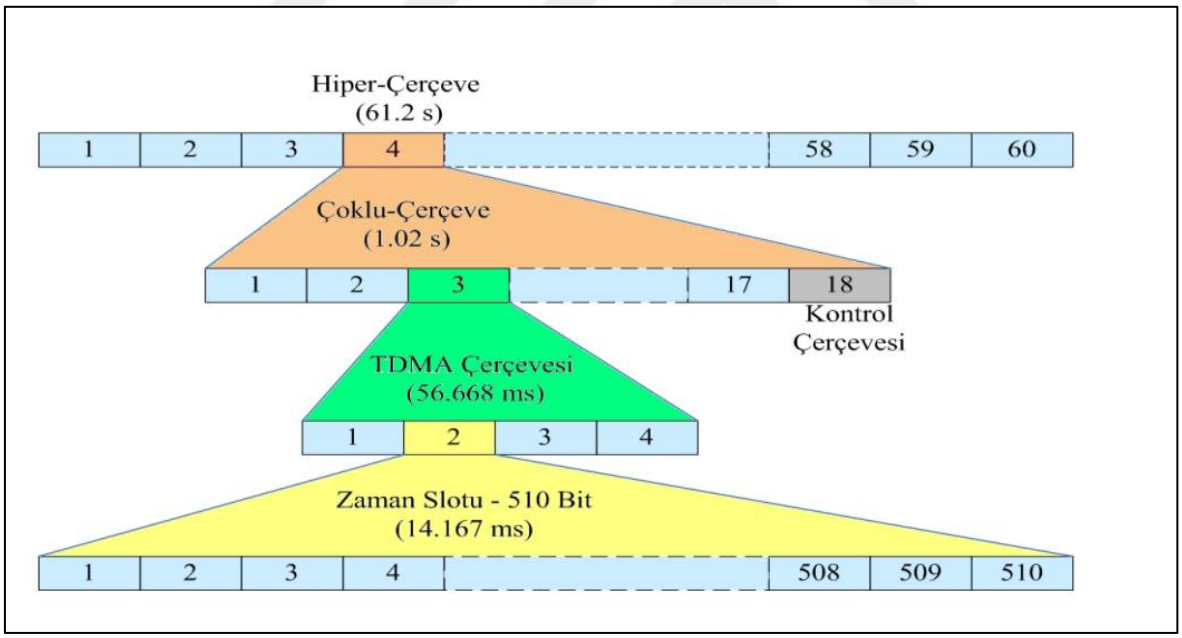
2.6.2. TETRA telsiz standardı

TETRA (Terrestrial Trunked Radio), Avrupa Telekomünikasyon Standartları Enstitüsü (ETSI) tarafından geliştirilen, sayısal trunk telsiz haberleşme sistemi standardıdır. Profesyonel kullanıcılar için güvenilir, güvenli ve verimli bir haberleşme altyapısı sunmak üzere tasarlanmıştır. Özellikle kamu güvenliği, acil durum hizmetleri ve ulaşım gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılır. TETRA standardında, düşük veri hızları için DPSK (Differansiyel Faz Kaydırmalı Modülasyon) ve yüksek veri hızları için QAM (Karesel Genlik Modülasyonu) modülasyonları kullanılır. DPSK modülasyonları; π/4-Kaydırılmış Diferansiyel Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (π/4-DQPSK) ve π/8-Kaydırılmış Diferansiyel 8 PSK'dır (π/8-D8PSK). Bant genişliği 25 kHz olup veri iletiminde TDMA (Zaman Bölmeli Çoklu İletişim) yöntemi kullanılır. 25 kHz'lik kanal, her biri 14.167 ms süren 4 zaman dilimine (time slot) bölünür ve böylece tek bir frekans bandında aynı anda 4 farklı telsiz haberleşmesi sağlanarak frekans verimliliği artırılmış olur. Buna karşın kanal yoğun olmadığı, örneğin sistemin yalnızca bir slotunda kullanıcı olduğu durumda bile 4 slotluk çerçeve bilgisi gönderilmektedir. Bu da sistemin yoğun olmadığı zamanlarda gereksiz güç tüketimine ve kanal kullanımına neden olmaktadır. Ayrıca kanal kullanım yönteminde Trunk mantığıyla çalışan TETRA sistemleri kanal trafiğini yönetmek için en az 1 tane kontrol kanalı kullanmaktadır. Sistem için 1 kontrol kanalı yeterli gelmediği takdirde birden fazla kontrol kanalı kullanılmaktadır (Çeven 2010).



Şekil 2.17. TETRA frekans/zaman ilişkisi

TETRA sisteminde alma ve gönderme için farklı zaman slotları kullandığında tam dubleks haberleşme yapılabilmektedir. Kullanıcı birim 56.668 milisaniyelik çerçeve oluşturulurken 14.167 milisaniye gönderim yapar ve diğer slotlardaki kullanıcıların işlemlerinin bitmesini beklerken gönderim slotundan farklı alım slotu kullandığında alıcı olarak çalışabilir. Böylelikle 56.668 milisaniyelik periyotlarla alım ve gönderim yaparak tam dubleks haberleşme yapabilir. TETRA çerçeve yapısında her TDMA çerçevesi için 4 zaman slotu bulunmaktadır. Her slot 510-bit bilgi taşımaktadır. 18 TDMA çerçevesi bir araya getirilerek Çoklu-Çerçeve (Multi-Frame) yapısını oluşturur. 60 Çoklu-Çerçeve bir araya gelerek Hiper-Çerçeve (Hyper-Frame) yapısını oluşturur. Çoklu-Çerçeve yapısında ses ve veri haberleşmesi yapılan 17 TDMA çerçevesinin trafik kontrol işaretleri 18. TDMA çerçevesinde toplanır ve böylece haberleşme slotlarında kesilme olmadan kontrol işlemleri bu çerçeve üzerinden yürütülür. Bu 18. çerçeve kontrol çerçevesidir ve SACCH'ın (Yavaş Birleşik Kontrol Kanalı) temelini oluşturur. SACCH arka planda kontrol kanalı sinyalleşmesini sürekli olarak yürütmektedir (Çeven, 2010).



Şekil 2.18. TETRA standardı çerçeve yapısı (Çeven 2010)

Modülasyon hızları π/4-DQPSK için 36 kbps ve π/8-D8PSK için 54 kbps'dir. π/4-DQPSK modülasyonunda, her sembolde 2 bit bilgi taşır ve sembol hızı 18.000 sembol/saniyedir, bu da ham veri hızının 36 kbps olmasını sağlar. Ancak kanal kodlaması ve hata düzeltme mekanizmaları nedeniyle, kullanıcıya ulaşan net veri hızı genellikle daha düşüktür. TETRA sisteminde, π/4-DQPSK modülasyonunda her 25 kHz'lik kanal dört zaman dilimine

bölünmüştür ve her bir zaman dilimi yaklaşık 7,2 kbps net veri hızı sunar. Bu nedenle, birden fazla zaman diliminin birleştirilmesiyle toplam veri iletim kapasitesi artırılabilir; Örneğin, dört zaman diliminin tamamı veri iletimi için kullanıldığında, toplam net veri hızı yaklaşık 28,8 kbps'ye ulaşır (Radioreference Wiki, 2022). TETRA standardında veri ve/veya ses iletiminde kullanılan tüm modülasyon türleri veri hızı, bit sayısı, avantajlar ve dezavantajlar gibi kritik yönleriyle Çizelge 2.5.'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.5. TETRA modülasyon türlerinin karşılaştırılması.

Modülasyon Türü	Faz Kayması / Faz-Genlik Kombinasyonu	Her Semboldeki Bit Sayısı	Ham Veri Hızı (Kbps)	Net Veri Hızı (Kbps)	Spektrum Verimliliği	Avantajlar	Dezavantajlar	Kullanım Alanı
π/4-DQPSK	±45°, ±135°	2	36	7.2 - 28.8	Orta	Basit alıcı, çok yollu yayılmaya dayanıklı	Düşük veri hızı	Temel hava arayüzü (ses ve veri)
π/8-D8PSK	±22.5°, ±67.5°, ±112.5°, ±157.5°	3	54	43.2	Yüksek	Daha yüksek veri hızı, spektrum verimliliği	Daha karmaşık alıcı tasarımı	Genişletilmiş veri hizmetleri
4-QAM	Faz + Genlik Kombinasyonu (4 konum)	2	36	28.8	Orta	Spektrum verimliliği yüksek, basit alıcı	Düşük veri hızı, sadece 2 bit/simge taşıma	Özel veri hizmetleri
16-QAM	Faz + Genlik Kombinasyonu (16 konum)	4	72	57.6	Yüksek	Yüksek veri hızı, spektrum verimliliği	Faz ve genlik hatalarına karşı daha hassas	Gelişmiş veri hizmetleri
64-QAM	Faz + Genlik Kombinasyonu (64 konum)	6	108	86.4	Çok Yüksek	Yüksek veri hızı, spektrum verimliliği	Faz ve genlik hatalarına karşı daha hassas	Gelişmiş veri hizmetleri

Çizelgeden anlaşılacağı üzere π/4-DQPSK'den 64-QAM'e doğru gidildikçe veri hızının artmasına bağlı olarak faz ve genlik değişimlerinde yaşanan hatalara karşı hassasiyet de artacaktır. Bu nedenle ses iletimi uygulamalarında genellikle daha düşük veri hızlarına sahip π/4-DQPSK modülasyon tekniği kullanılırken, yüksek veri hızlarında ise QAM teknikleri kullanılır. QAM modülasyonları 4-QAM, 16-QAM veya 64-QAM'dir. 25 kHz başına 8 alt taşıyıcıya sahip çoklu alt taşıyıcı yaklaşımı kullanılır, yani 25 kHz, 50 kHz, 100 kHz ve 150 kHz taşıyıcılarda sırasıyla 8, 16, 32 ve 48 alt taşıyıcı vardır. Ayrıca her alt taşıyıcıdaki modülasyon sembol oranı 2400 sembol/s'dir (ETSI, 2023).

Burada; 4-QAM: 2 bit/simge x 2400 sembol/s = 4800 bps (4.8 kbps) , 16-QAM: 4 bit/simge x 2400 sembol/s = 9600 bps (9.6 kbps), 64-QAM: 6 bit/simge x 2400 sembol/s = 14.4 kbps

Çizelge 2.6. TETRA Modülasyon türleri için alttaşıyıcı sayısı/hız ilişkisi

Bant Genişliği	Alt Taşıyıcı Sayısı	Veri Hızı (4-QAM)	Veri Hızı (16-QAM)	Veri Hızı (64-QAM)
25 kHz	8 alt taşıyıcı	8 x 4.8 = 38.4 kbps	8 x 9.6 = 76.8 kbps	8 x 14.4 = 115.2 kbps
50 kHz	16 alt taşıyıcı	16 x 4.8 = 76.8 kbps	16 x 9.6 = 153.6 kbps	16 x 1 4.4 = 230.4 kbps
100 kHz	32 alt taşıyıcı	32 x 4.8 = 153.6 kbps	32 x 9.6 = 307.2 kbps	32 x 14.4 = 460.8 kbps
150 kHz	48 alt taşıyıcı	48 x 4.8 = 230.4 kbps	48 x 9.6 = 460.8 kbps	48 x 14.4 = 691.2 kbps

Çizelge 2.6.'ya göre; alt taşıyıcıların kullanılması, aynı bant genişliği içinde daha fazla veri iletilmesini sağlayarak spektrum verimliliğini arttırır. Alt taşıyıcılar birbirinden bağımsız çalıştığı için, çok yollu yayılmadan kaynaklanan parazit etkilerini azaltır. Daha geniş bant genişliklerinde (100 kHz, 150 kHz) çok yüksek veri hızları elde edilir. TETRA'nın temel hava arayüzü için π/4-DQPSK kullanılırken, π/8-D8PSK, 4-QAM, 16-QAM ve 64-QAM, yüksek veri hızlarına ihtiyaç duyulan gelişmiş veri hizmetleri için tercih edilir. Özellikle, π/8-D8PSK ve 64-QAM, genişletilmiş veri hizmetleri ve veri yoğun uygulamalar için kullanılır. Bu çalışmada RoF iletiminde ses ve aktarımı üzerinde durulduğu için TETRA telsiz standardının aynı zamanda en çok kullanılan modülasyonu olan π/4-DQPSK modülasyonu kullanılmıştır. DQPSK, her sembolde iki bitlik veri taşır ve bu veriyi, mevcut sembolün fazı ile bir önceki sembolün fazı arasındaki fark üzerinden kodlar. Bu diferansiyel kodlama yöntemi, alıcı tarafında mutlak faz bilgisinin gerekli olmamasını sağlar; bunun yerine, ardışık semboller arasındaki faz farkları kullanılarak veri çözülür. Bu yaklaşım, özellikle taşıyıcı fazının kesin olarak bilinmediği veya zamanla değişebildiği durumlarda avantajlıdır (Keim, 2016). DQPSK, özellikle kablosuz iletişim sistemlerinde, uydu haberleşmesinde ve fiber optik iletişimde yaygın olarak kullanılır. Özellikle, faz senkronizasyonunun zor olduğu veya kanal koşullarının değişkenlik gösterdiği ortamlarda tercih edilir. (Khan, Iqbal, Mahmood, Anee, Rahman ve Mahmud, 2018)

Modülasyon Tekniği:

Aşağıda DQPSK modülasyonun denklemleri verilmiştir (ETSI, 2023). S(k), modülasyon sembolünü ifade eder ve şu şekilde tanımlanır:

$$S(k) = S(k-1) \times exp\big(j\Delta\phi(k)\big) \tag{2.4}$$

Δϕ(k): k-nıncı sembol için faz geçişi (radyan cinsinden). Başlangıç sembolü şu şekilde verilir: S(0)=1. Bu ifadeler, diferansiyel kodlama anlamına gelir. Yani sinyal, Δϕ(k) kadar döndürülür. Her sembol, önceki sembolün üzerine belirli bir faz değişimi Δϕ(k) eklenerek hesaplanır. Exp(jΔϕ(k)) ifadesi Euler formülüyle verilen, faz geçişini ifade eden kompleks bir sayıdır. Euler'in formülüne göre:

$$exp(j\theta) = cos(\theta) + jsin(\theta) \tag{2.5}$$

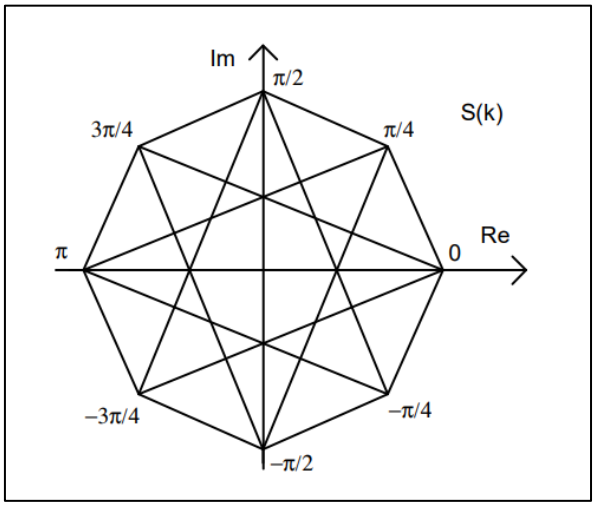
Bu, karmaşık düzlemde birim çember üzerinde bir açıyı (θ) ifade eder. Buradan;

$$exp(j\Delta\phi(k)) = cos(\Delta\phi(k)) + sin(j\Delta\phi(k)) \tag{2.6}$$

S(k−1): Bir önceki modülasyon değeridir. Bu, mevcut sinyalin bulunduğu noktadır. Buradan; S(k−1) . exp(jΔϕ(k)) önceki sinyalin fazının, bu faz geçişi kadar değiştirilmiş hâlini verir. Aşağıda iki bitlik bir veriye karşılık gelen faz değişimlerini Δϕ(k) belirtir. Faz geçişleri aşağıdaki Çizelge 2.7.'daki gibi tanımlanmıştır. Burada B(2k−1) ve B(2k): Modülasyon için verilen iki biti ifade eder.

Çizelge 2.7. π/4-DQPSK modülasyonu için faz geçişleri

B(2k−1)	B(2k)	Δϕ(k)
1	1	−3π/4
1	0	−π/4
0	0	+π/4
0	1	+3π/4



Şekil 2.19. π/4-DQPSK modülasyon sembol takımyıldızı ve olası geçişler

Grafik, modülasyon sembollerinin karmaşık düzlemdeki yerleşimini ifade eder. Yatay eksen gerçek ekseni (Re) ifade ederek sinyalin gerçek kısmını gösterir. Dikey eksen ise sanal ekseni (Im) ifade ederek sinyalin sanal kısmını gösterir. Semboller bu eksenlerin kesişim noktalarında yer alır ve fazları exp(jnπ/4) formülüne göre yerleştirilmiştir. Şekilde toplam 8 nokta vardır, bu noktalar karmaşık düzlemdeki olası sembol fazlarını gösterir. ±π/4,±3π/4,±5π/4,±7π/4 gibi faz açılarına karşılık gelir. Bu fazlar, Δϕ(k) değerlerine göre değişir ve sembollerin birbirine nasıl geçtiğini temsil eder. Her sembol, şu şekilde gösterilir:

$$S(k) = exp(j \times n\pi/4) \tag{2.7}$$

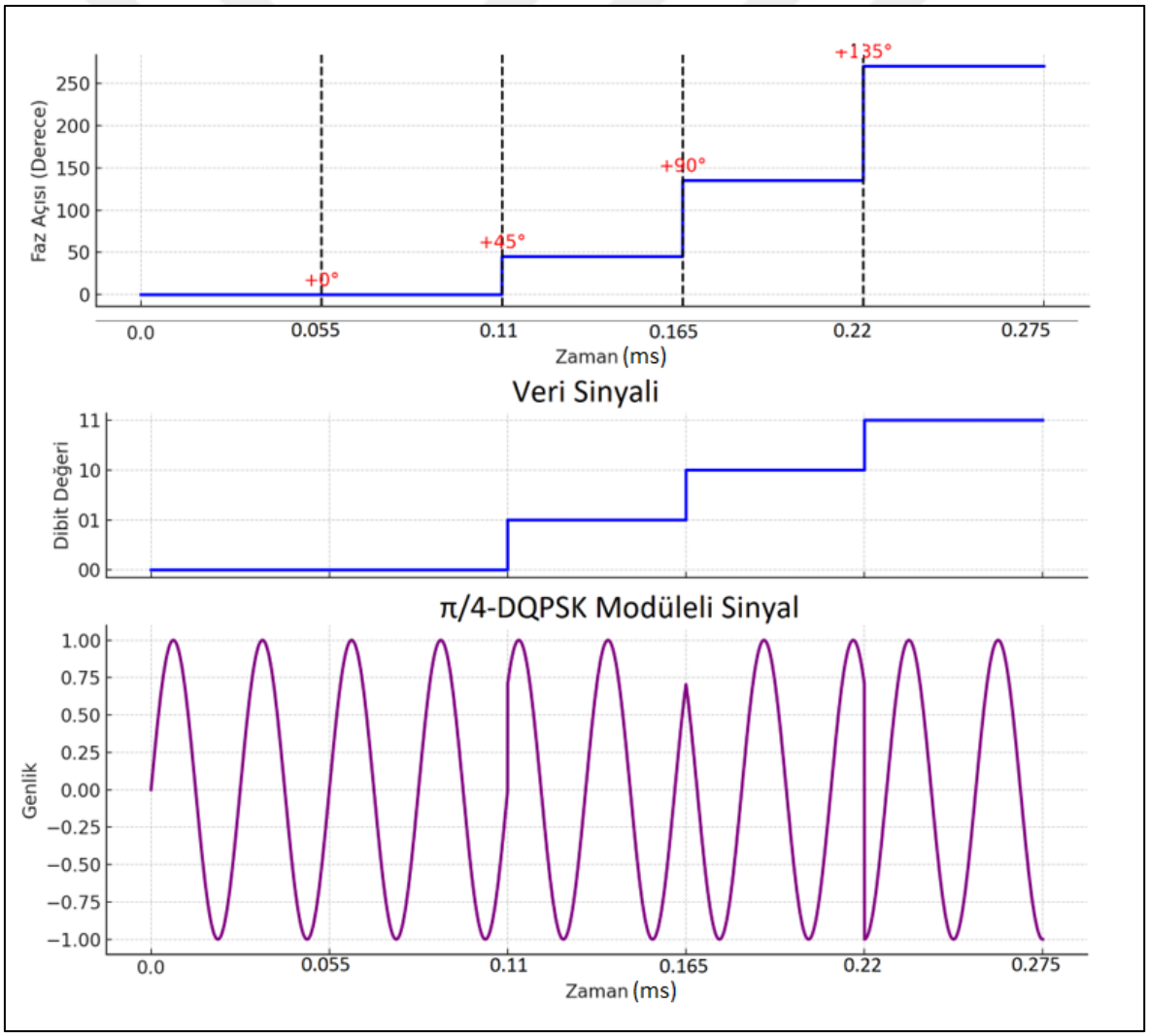
$$n = 0,1,2,\dots,7 \tag{2.8}$$

Burada n bir tam sayıdır. Grafikteki çizgiler, semboller arasındaki olası faz geçişlerini temsil eder. Faz geçişleri yalnızca ±3π/4, ±π/4 değerlerinde olabilir. S(k), S(k−1)'den yalnızca belirli bir faz değişimi ile elde edilir. Örneğin: S(k−1)=exp(jπ/4) ise ve faz geçişi Δϕ(k)=3π/4 ise: S(k)=S(k−1)·exp(j3π/4)=exp(j(π/4+3π/4))=exp(jπ) Bu, sembolü yeni bir noktaya taşır. Faz geçişleri diferansiyel olduğu için, her sembol, bir önceki sembole göre bir dönüş (faz değişimi) uygular. Mutlak konumlar yerine göreli geçişler önemlidir. Bu da diferansiyel modülasyonun alıcı tarafından mutlak faz bilgisi olmadan çözülmesini sağlar.

π/4-DQPSK özellikleri

- 8 Farklı Sembol: Bu semboller karmaşık düzlemde eşit aralıklarla yerleşmiştir. Bu nedenle π/4-DQPSK, toplamda 8 faz pozisyonuna sahiptir.
- Faz Değişimlerinin Sınırlandırılması: Faz değişimleri, yalnızca bir önceki sembole göre belirli bir açı (±π/4,±3π/4) kadar gerçekleşir. Bu sınırlama, semboller arasında daha net geçişler sağlar ve hata oranını düşürür.
- Diferansiyel Modülasyonun Görsel Temsili: Şekil 2.18.deki çizgiler, faz değişimlerini ve diferansiyel modülasyonun görsel bir ifadesidir.
- Spektrum verimliliği: Faz değişimlerinin sınırlandırılması, π/4-DQPSK'nin QPSK'ye göre daha spektrum verimli olmasını sağlar.
- Pratik Kullanım: Bu modülasyon, özellikle hücresel sistemler (örneğin GSM), telsiz sinyalleri (Örneğin TETRA) gibi yüksek güvenilirlik ve düşük hata gereksinimleri olan sistemlerde kullanılır.

Aşağıda π/4-DQPSK modülasyonuna ait grafik verilmiştir. 00 sembolü için 0°, 01 sembolü için 45°, 10 sembolü için 90° ve 11 sembolü için 135° belirlenmiştir. Burada 00'dan 01'e geçişte faz açısı 0° ye 45 ° eklenerek 45° olmuş ve taşıyıcı görüldüğü gibi 45° ileriye kaydırılmıştır. 01 sembolünden 10 sembolüne geçişte ise mevcut 45° faz açısına 90° eklenerek 135° elde edilmiştir. Ayrıca bu değişim esnasında taşıyıcı sinyalin genliğinde bir miktar düşme meydana gelmektedir. Son olarak 10 sembolünden 11 sembolüne geçişte mevcut 135° faz açısına 135 ° eklenerek 270 ° elde edilmiştir. Görüldüğü gibi taşıyıcı sinyalin frekansında herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Ayrıca π/4-DQPSK modülasyonun ham veri hızı 36 kbps ve 2 bit/sembol olduğu için Sembol süresi (Ts), sembol hızının tersi olup 1/18000'den 0,055 ms'dir.



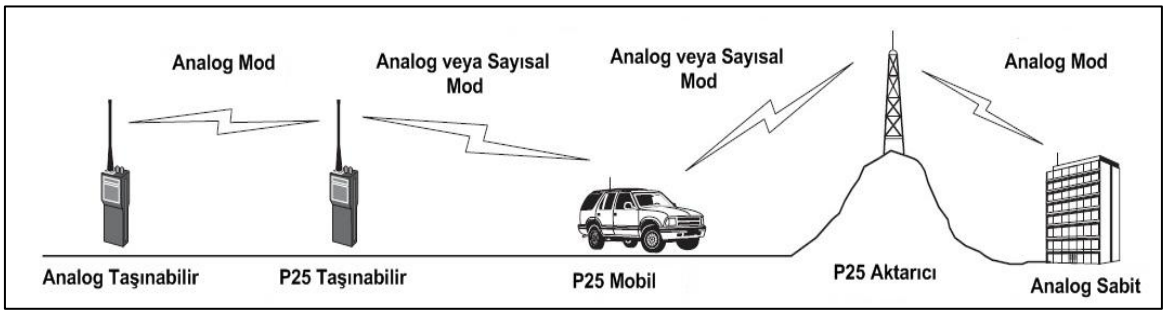
Şekil 2.20. π/4-DQPSK modülasyon sinyali

2.6.3. APCO25 telsiz standardı

APCO-25 (Kamu Güvenliği İletişim Görevlileri Uluslararası Derneği:Association of Public Safety Communications Officials International) Kuzey Amerika'da federal/eyalet kamu güvenliği kurumlarının sayısal radyo haberleşmesine olanak sağlayan standartlar ailesini ifade eder. P25 uyumlu telsizler, eski telsizlerle analog modda ve diğer P25 radyolarıyla sayısal veya analog modda iletişim kurabilir. Direkt Mod, Konvansiyonel Geniş Alan ve Trunk Geniş Alan Uygulamaları mevcuttur.

Başlıca özellikleri şunlardır:

- Geniş alan kaplamayı sağlayan hücresel sistem
- Kullanıcı Grubu Sayısı ve Görüşme Sıklığına göre uygulama alanı belirleme
- Genelde kırsalda/dağlık alanlarda haberleşme ihtiyacında tercih edilme
- Ses ve veri (Araç ve Personel Takibi Uygulaması, Mesajlaşma, Veri Tabanı Sorgulaması, Operatör Konsolu, Arıza Takip ve Çağrı Alma Yazılımları vb. gibi) iletişimine olanak sağlama
- Bireysel çağrı, grup çağrı, sistem içi yayın, acil çağrı hizmetleri
- Geniş alan kaplamada frekans verimliliği sağlamaya yönelik olarak sistemin Simulcast (İletilecek mesajın, aynı anda, bütün baz istasyonlarından aynı frekansta iletimine dayanan iletişim şekli) olarak kurulabilmesi



Şekil 2.21. Apco25 ile analog telsiz haberleşme ilişkisi

Apco25 telsizlerin demodülatör yapısı hem Apco25 sayısal sinyallerin hem de analog sinyallerin işlenmesi, çözülmesine uygun olduğu için Apco25 bir telsiz analog kanala alınarak analog telsizlerle görüşme sağlayabilir. Ayrıca Apco25 el, araç veya sabit merkez

telsizleri kendi arasında da sayısal modda veya analog modda haberleşebilir. Uzak mesafelerde görüşme tekrarlayıcı röle (repeater) üzerinden sağlanır.

Apco25 3 aşamadan oluşur:

Faz-1

Faz-I, APCO Proje–25 uyumlu sistemler için gereken servisleri ve hizmetleri tanımlayan, hepsi tamamlanmış 33 standart dokümandan oluşmaktadır (Lunnes, 2007). 12,5 KHz analog, sayısal veya karma modda çalışır. Faz 1 telsizler sayısal iletim için Sürekli 4 seviyeli FM (C4FM) doğrusal olmayan modülasyon kullanır. Faz-1 P25 uyumlu sistemler geriye dönük uyumludur ve eski sistemlerle, sistem sınırları boyunca ve sistem altyapısından bağımsız olarak birlikte çalışabilir. Ayrıca, P25 standart paketi farklı satıcıların sistemlerinin birbirine bağlanmasını kolaylaştırmak için radyo frekansı (RF) alt sistemine açık bir arayüz sağlar. Sayısal modda 4800 sembol/s veri iletim hızı ve her sembol 2-bit olduğu için iletilen kanalda toplam 9600 bit/saniye'lik hıza ulaşılmaktadır (Çeven, 2010)

Faz 2

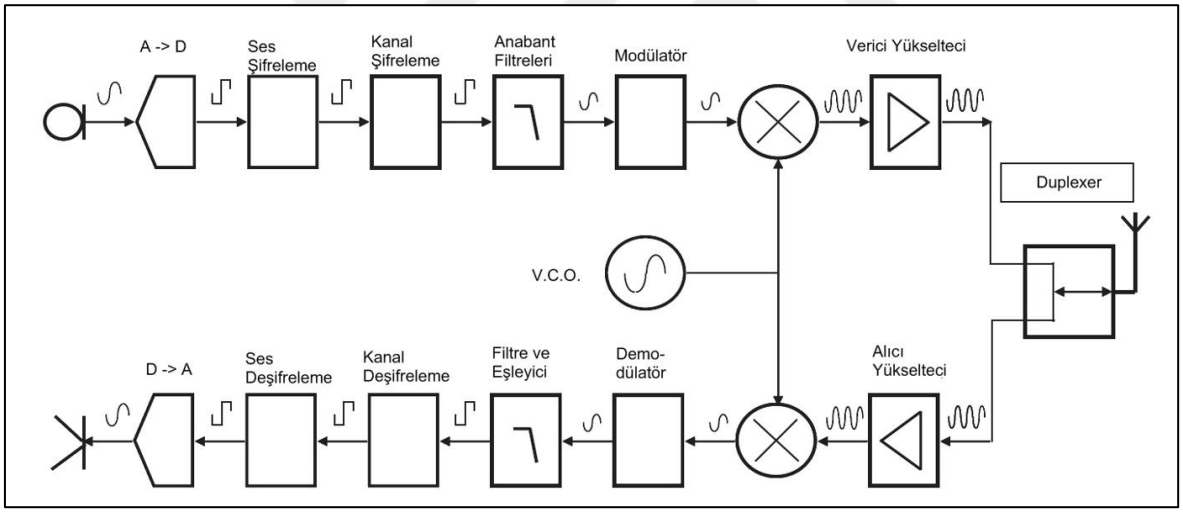
P25 Aşama 2 Standartları, 12,5 kHz kanal bant genişliği içinde iki slotlu bir TDMA kanal erişim yöntemine dayanır ve P25 trunk sistemler için kullanılır. P25 Faz 2 iki slotlu TDMA kanal, P25 Standardına bir ektir ve P25 Faz 1 FDMA'nın yerini almaz. Faz 2 için P25 2 slotlu TDMA, Faz 1'in (12,5 kHz) spektrum verimliliğini iki katına çıkarır. (Codan Communications, 2013). FDMA yönteminde, kanal kullanım aralığı CQPSK (Uyumlu Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama) modülasyon tekniği kullanılarak 6.25 kHz'e taşınmıştır. C4FM için tasarlanan alıcılar, CQPSK gibi faz kaydırma tekniğini kullanan tüm vericilerle uyumludur. Bu çözümle Faz-I ve Faz-II arası uyum sorunu olmamaktadır. Fakat günümüzde 6.25 kHz'lik kanal aralığına ulaşmada teknolojik sınırlamalar ve bunun getirdiği yüksek maliyetler mevcuttur. Bunun için alternatif olarak kullanıcı yoğunluğunu fazla olduğu bölgelerdeki spektrum verimliliği de düşünülerek 6.25 kHz kanal yeterliğini sağlayan TDMA tabanlı çözümler önerilmiştir. Bu çözümlerden 25 KHz kanal aralığında 4 slot ve 12.5 kHz kanal aralığında 2 slot çalışma önerileri APCO Proje– 25 yürütme kurulu tarafından 19 Kasım 1999 tarafına kabul edilerek Faz-II standardı geliştirme çalışmalarına dahil edilmiştir. (Çeven, 2010)

Faz 3

Faz 3'ün uygulanması, kamu güvenliği kullanımı için yüksek hızlı veri ihtiyacını ele alacaktır. Faaliyetler, geniş alan, çoklu kurum ağlarında ses, video ve yüksek hızlı veri iletmek ve almak için kullanılabilen yeni bir havacılık ve karasal kablosuz sayısal geniş bant/geniş bant kamu güvenliği radyo standardının işletimini ve işlevselliğini kapsayacaktır. ETSI ve TIA, Proje MESA (Acil Durum ve Güvenlik Uygulamaları için Mobilite) olarak bilinen Faz 3 üzerinde iş birliği içinde çalışmaktadır. Mevcut P25 sistemleri ve gelecekteki Proje MESA teknolojisi birçok uyumluluk gereksinimini ve işlevselliği paylaşacaktır (Danelec, 2004)

Apco25 uygulamaları genellikle Faz-1 kullanımı şeklinde olmaktadır.

Sistem mimarisi



Şekil 2.22. Apco25 Mimarisi

Analog- sayısal dönüşümü ile ses kodlayıcı/çözücü

Konuşma kodlamasından önce ses üzerinde Analog'dan sayısal'a dönüşüm yapılır ve konuşma kod çözme işleminden sonra ses oluşturmak için sayısaldan analoğa dönüşüm yapılır. P25, Geliştirilmiş Çok Bantlı Uyarım (IMBE™) adı verilen belirli bir sayısallaştırılmış ses yöntemi (konuşma kodlaması) kullanır. IMBE™ ses kodlayıcı (vocoder) ses girişinin bir örneğini dinler ve yalnızca sesi temsil eden belirli özellikleri iletir. Alıcı, giriş sesinin sentetik bir eşdeğerini üretmek için bu temel özellikleri kullanır. IMBE™,

insan konuşması için büyük ölçüde optimize edilmiştir. Daha eski IMBE™ ses kodlayıcıları, çift tonlu çok frekanslı (DTMF) tonlar ve sürekli test tonları dahil olmak üzere diğer ses türlerini yeniden üretmede her zaman iyi performans göstermiyordu. 2009'dan beri, geliştirilmiş IMBE™ vocoder, DTMF ve sürekli tonlarla önemli ölçüde daha iyi çalışmaktadır. IMBE™ vocoder, her 20 milisaniyede 88 bit kodlanmış konuşma üreterek mikrofon girişini örnekler. Bu nedenle, vocoder saniyede 4400 bit hızında konuşma özellikleri üretir.

Kanal kodlayıcı/çözücü

Kanal Kodlaması, sayısal RF sistemlerinin verilerin (ses veya kontrol) doğru bir şekilde ulaştığından ve kurtarıldığından emin olmak için ileri hata koruması / hata düzeltme (FEP: forward error protection / FEC: forward error correction) tekniklerini kullandığı yöntemdir. İleri hata koruması / hata düzeltme, gürültü, solma ve girişim gibi kanal bozulmalarının üstesinden gelerek sistem performansını iyileştirmek için tasarlanmıştır. Kanal Kodlaması ses bilgisiyle birlikte gelen tüm genel verilerin eklenmesini de içerebilir. P25 hata koruması / düzeltme kanal kodları şunları içerir; Hamming kodları, Golay kodları, Reed-Solomon kodları, İlkel BCH ve kısaltılmış döngüsel kodlar gibi iç içe geçmeli ve doğrusal blok kodları.

Modülasyon, demodülasyon ve filtreleme

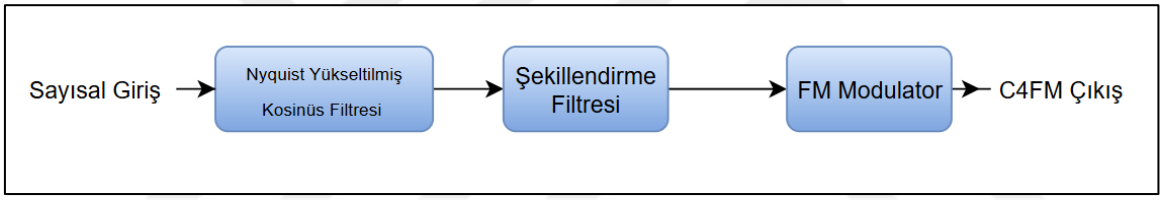
Faz 1'de, C4FM modüle edilmiş sayısal bilgileri iletmek için 12,5 kHz'lik bir kanal kullanılır. C4FM modülasyonu, her sembolün bir önceki sembolden 45 derece faz kaydırıldığı bir tür diferansiyel Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK)'dır. Faz (frekans) C4FM için modüle edilmiş olsa da taşıyıcının genliği sabittir ve sabit bir zarf frekansı modüle edilmiş dalga formu üretir.

Faz-2'de, sayısal bilgi 6,25 KHz kanal üzerinden CQPSK modülasyon formatı kullanılarak iletilir. CQPSK fazı modüle eder ve aynı anda taşıyıcı genliğini modüle ederek yayılan spektrumun genişliğini en aza indirir ve bu da genlik modüle edilmiş bir dalga formu oluşturur. Modülasyon saniyede 4800 sembol gönderir ve her sembol 2 bit bilgi iletir. Semboller ve bitler arasındaki eşleme aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 2.8. Apco25 C4FM ve CQPSK modülasyonları için dibit ile sapma ilişkisi

Bilgi Bitleri	Sembol	C4FM Sapma (Faz-1)	CQPSK Faz Değişikliği (Faz-2)
01	+3	+1.8 kHz	+135°
00	+1	+0.6 kHz	+45°
10	-1	-0.6 kHz	- 45°
11	-3	-1.8 kHz	-135°

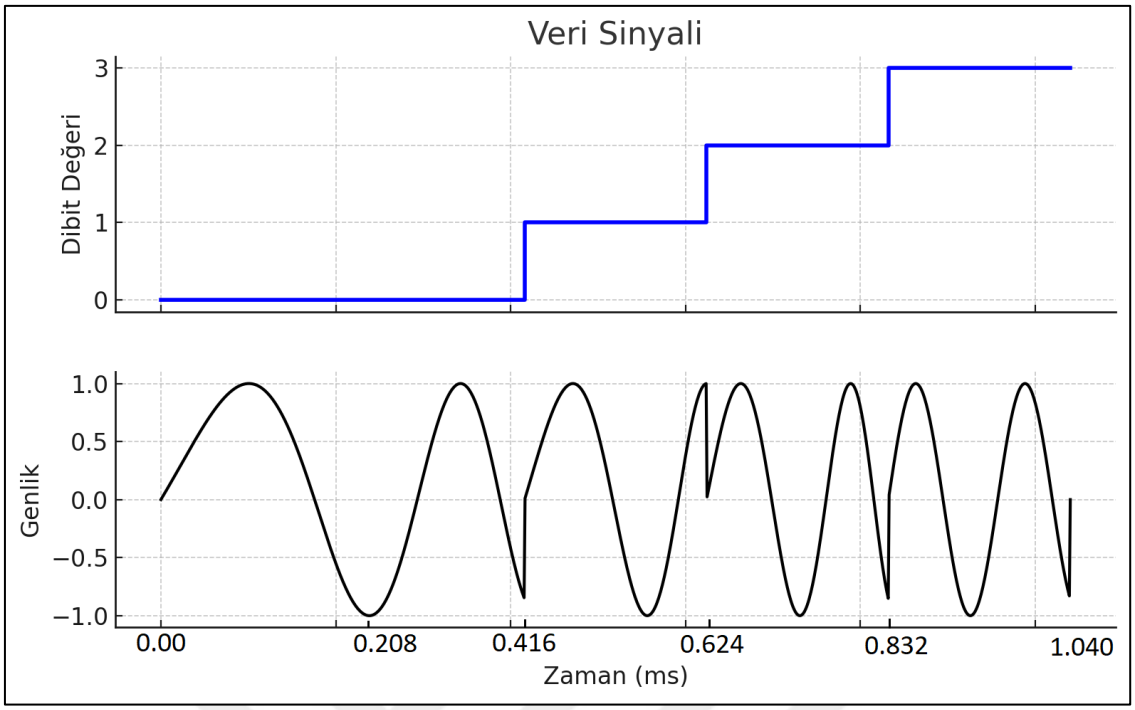
C4FM modülatörü, bir Nyquist yükseltilmiş kosinüs filtresi (nyquist raised cosine filter), bir şekillendirme filtresi (a shaping filter) ve bir FM modülatöründen oluşur. Burada Nyquist yükseltilmiş kosinüs filtresi, semboller arası girişimi (ISI) azaltarak sinyalin bant genişliğini optimize eder ve daha düzgün geçişler sağlar. Şekillendirme filtresi, keskin frekans değişimlerini yumuşatarak faz sürekliliğini korur ve spektral verimliliği artırır. FM modülatör ise, bu işlenmiş sinyali taşıyıcıya uygulayarak 4 seviyeli frekans kaymaları (±1.8 kHz, ±0.6 kHz) ile C4FM sinyalini üretir.



Şekil 2.23. C4FM Modülatörü

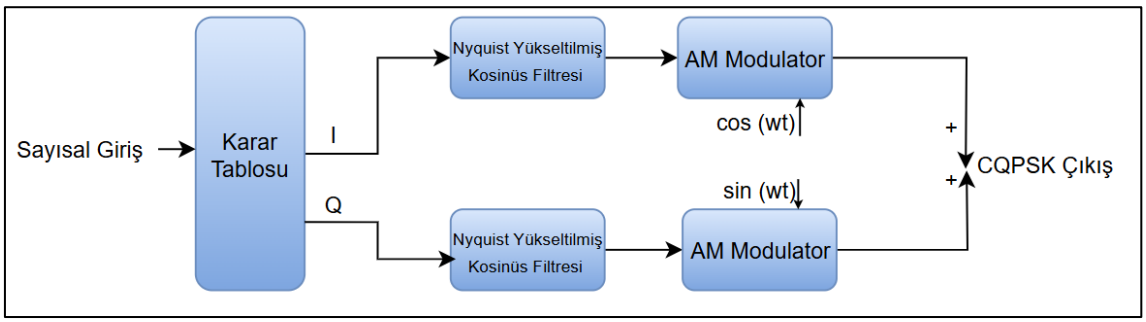
Örneğin taşıyıcı frekans 500 MHz seçilirse sapmaların eklenmesi ile 4 farklı frekans sırasıyla 500,0018 MHz, 500,006 MHz, 499.9982 MHz, 499.994 MHz şeklinde olacaktır.

Aşağıda örnek bir 4FSK modülasyon sinyali gösterilmiştir. Sembol süresi (Ts), sembol hızının tersi olup 1/4800'den 0,208 ms'dir.



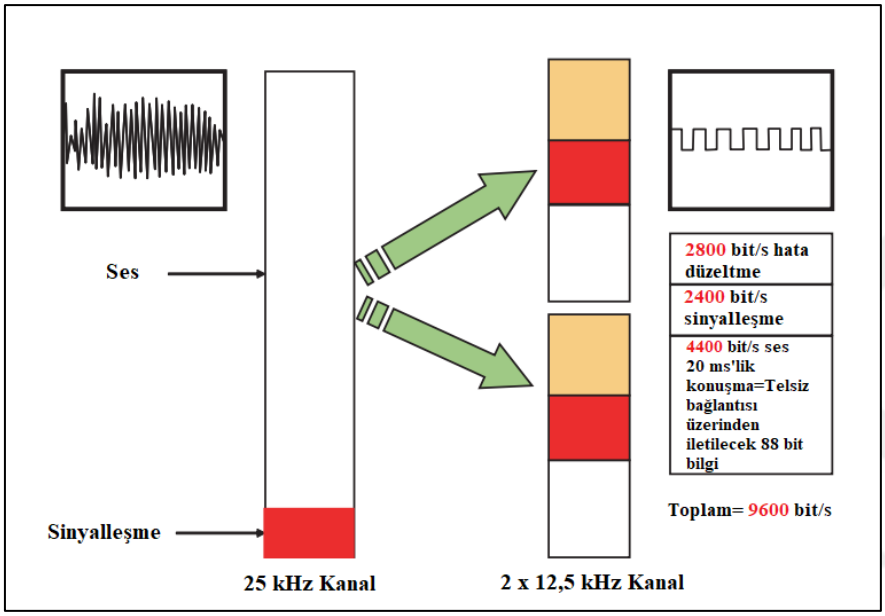
Şekil 2.24. C4FM modülasyon sinyali

CQPSK modülatörü, iki taşıyıcıyı modüle eden faz içi (In phase), I ve Dörtlü Faz (Quadrature Phase), Q genlik modülatörlerinden oluşur. Q fazı, I fazından 90 derece geciktirilir. Karar tablosu bilgilerinden türetilen 5 seviyeli bir sinyalin filtrelenmiş çıkışı, I ve Q modülatörlerini çalıştırmak için kullanılır. Burada karar tablosu, sayısal giriş verisini I ve Q bileşenlerine ayırarak her sembol için uygun genlik ve faz değerlerini belirler; Nyquist yükseltilmiş kosinüs filtresi, bant genişliğini optimize edip semboller arası girişimi (ISI) azaltır; AM modülatörü, I bileşenini cos(ωt) ve Q bileşenini sin(ωt) ile çarparak iki taşıyıcı sinyali oluşturur ve bunları toplayarak CQPSK çıkış sinyalini üretir.

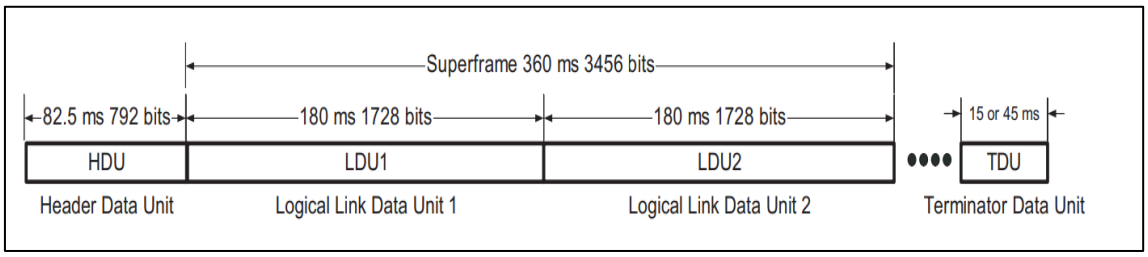


Şekil 2.25. CQPSK modülatörü

Kanal kapasitesinin dörtte birinden fazlası hata düzeltme için kullanıldığından, P25 sayısal sinyalleri, özellikle düşük veya gürültülü RF taşıyıcı seviyelerinde, standart analog sinyallere kıyasla ses kalitesini büyük ölçüde iyileştirmiştir. IMBE™ ses kodlayıcısı, ses bilgilerini sayısal verilere dönüştürür ve ardından veriler hata düzeltme kodları kullanılarak korunur. Hata düzeltme, alınan sinyaldeki küçük hataları düzeltebilir. Ses sayısal olarak kodlandığından, analog sistemlerde tipik olarak bulunan arka plan gürültüsü de kaldırılır.



Şekil 2.26. Analog ile Apco25 kanal karşılaştırması (Danelec, 2004)



Şekil 2.27. Apco25 CAI ses mesaj yapısı

P25 standardı, konuşmayı (ton ve ses seviyesi) dijital bir bit akışına kodlamak için IMBE™ Vocoder'ın kullanılmasını gerektirir. IMBE™ dijital bit akışı, her ses çerçevesinin 88 bit uzunluğunda olduğu (20 ms konuşmayı temsil eder) ses çerçevelerine bölünür. Ses çerçeveleri, 56 parite kontrol biti ekleyen ve toplam ses çerçevesi boyutunun 144 bit olduğu hata düzeltme kodlarıyla korunur. Ses çerçeveleri, her biri 9 ses çerçevesi içeren Mantıksal Bağlantı Veri Birimleri (LDU1 ve LDU2) halinde gruplandırılır. Her Mantıksal Bağlantı

Veri Birimi 180 ms uzunluğundadır ve 360 ms'lik Süper Çerçeveler halinde art arda gruplandırılabilir. Süper çerçeveler, bir Başlık Veri Birimi gönderildikten sonra sesli mesaj boyunca sürekli olarak tekrarlanır. Ek bilgiler (şifreleme, Bağlantı Kontrol bilgileri ve Düşük Hızlı Veriler) sesli mesaj boyunca iç içe geçirilir. P25 CAI ses iletimi için sesli mesaj yapısı Şekil 4-1'de gösterilmiştir. Sesli mesaj, bir Başlık Veri Birimiyle (mesaj için herhangi bir şifreleme ve bağlantı kontrol işlevini düzgün bir şekilde başlatmak için) başlar ve ardından Mantıksal Bağlantı Veri Birimleri veya LDU'larla devam eder. LDU'lar sesli mesajın sonuna kadar dönüşümlü olarak değişir. Mesajın sonu bir Terminatör Veri Birimiyle işaretlenir. Terminatör Veri Birimi diğer ses veri birimlerinden herhangi birini takip edebilir. DMR, TETRA ve APCO25 telsiz standartları, erişim tekniği, veri hızı, modülasyon türü gibi son derece önemli olan ayırt edici özellikleri açısından karşılaştırıldığında sonuç olarak aşağıdaki çizelge elde edilir.

Çizelge 2.9. Apco25, DMR ve TETRA telsiz standartlarının karşılaştırılması

Özellik	APCO 25 (P25)	DMR	TETRA
Erişim Tekniği	FDMA / FDMA, TDMA	TDMA (2 Slot), FDMA	TDMA (4 Slot)
Kanal Aralığı	12.5 kHz	12.5 kHz	25 kHz
Modülasyon	C4FM/ CQPSK	4FSK	π/4 DQPSK, π/8-D8PSK, 4,16,64 QAM
Ses Kodlayıcı	IMBE	AMBE	ACELP
Frekans Bandı	38-174 MHz, 406-512 MHz, 764-869 MHz 380-400 MHz	68-87.5 MHz, 146-174 MHz, 406-430 MHz, 440-470 MHz	380-400 MHz, 410-430 MHz, 450-470 MHz, 870-993 MHz
Dublex Aralık	500 kHz (VHF) 5 MHz (UHF) 800 MHz bandında 39-45 MHz	500 kHz (VHF) 5 MHz (UHF)	10 MHz (UHF) 900 MHz bandında 45 MHz
Veri Aktarım Hızı	Havadaki RF Bit hızı: 9.6 kbps Korumasız veri hızı: 7.2 kbps Korumalı veri hızı: 4.8 kbps	Onaylı ½ kodlanmış: 1.333 Kbps Onaylı ¾ kodlanmış: 2.333 Kbps Onaylı 1 kodlanmış: 2.933 Kbps Onaysız ½ kodlanmış: 1.6 Kbps Onaysız ¾ kodlanmış: 2.4 Kbps Onaysız 1 kodlanmış: 3.2 Kbps	Havadaki RF Bit hızı: 36 kbps Korumasız veri hızı: 7.2 - 28.8 kbps Korumalı veri hızı: 2.4 - 19.2 kbps
Çalışma Modu	Konvansiyonel Mod, Trunk Mod, Direkt Mod	Konvansiyonel Mod, Trunk Mod, Direkt Mod	Trunk Mod, Direkt Mod
Kripto	Hava-arayüzü ve Uçtan Uca Kripto Standartta Tanımlı	Kripto Standartta Tanımlı Değil, Üretici Çözümleri Mevcut	Hava-arayüzü Standartta Tanımlı, Uçtan Uca Kripto Üretici Çözümlü
Baz İstasyonu Alma Duyarlılık Seviyesi	-116 dBm	-110 dBm	-115 dBm
Mobil Telsiz (El, Araç) Alma Duyarlılık Seviyesi	-116 dBm	-110 dBm	-112 dBm
Baz İstasyon Çıkış Gücü	50-100 W	25-100 W	10-40 W
Araç Telsizi Çıkış Gücü	30-100 W	25-50 W	10 W
El Telsizi Çıkış Gücü	5 W	5 W	1-3 W

Baz istasyonları ile el telsizlerinin çıkış güçleri ve alma duyarlılık seviyeleri Apco25 ile DMR'da birbirine çok yakındır. Bu nedenle aynı frekans bandında kapsama alanları da aynı sayılabilir. TETRA standardı, P25 ve DMR'a göre özellikle baz istasyon çıkış gücü çok altında kaldığından sistemin geniş alana kurulumu için frekans / site tekrar kullanım sıklığı

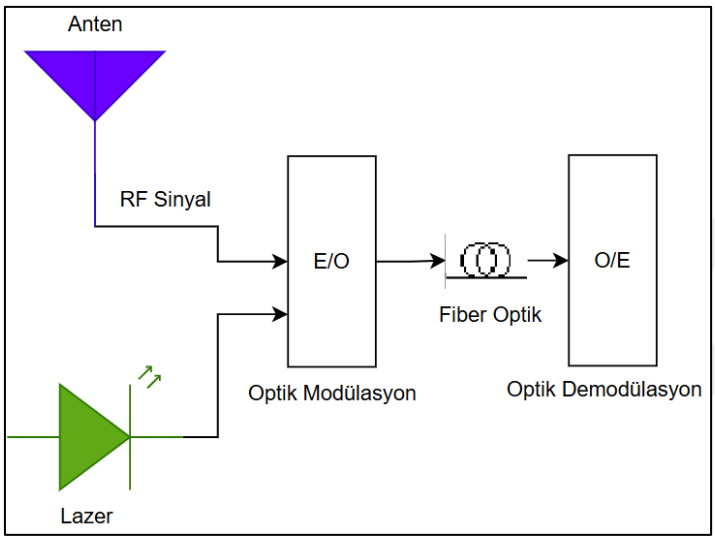
yaklaşık 20 sitedir. Frekans planlamasında yaklaşık 20 kanal / site frekans setine gereksinim duyulur. Bu oran P25 ve DMR için 6-8 kanal / site frekansıdır. Kısıtlı dar bant kanal frekansından dolayı özellikle şehir ve banliyölerinde yeni kanal frekansına gerek duyulmadan frekans tekrarı yapılması yüksek güçlü P25 sistemlerin avantajı olmaktadır. Düşük güçlü tasarımdan dolayı aynı coğrafi alanı kapsamak için TETRA, P25 ve DMR sistemine göre daha fazla siteye gereksinim duyar. Buna karşılık TETRA'nın kanal verimliliği, kullanıcı sayısı başına kullanılan bant genişliği açısından sistem kapasitesi yüksektir. TETRA, DMR ve Apco25'e göre x3 site gerektirir. Ancak kanal kapasitesi de DMR, Apco25 sistemin yaklaşık 3 katıdır.

Buna göre:

- Kapsama alanı açısından değerlendirildiğinde Apco25 ve DMR,
- Spektrum verimliliği ve Baz İstasyonu ekipmanı açısından değerlendirildiğinde TETRA veya DMR,
- Veri aktarma hızı ve veri uygulamaları açısından değerlendirildiğinde APCO25 ve TETRA öne çıkmaktadır.

3. FİBER ÜZERİNDEN RF SİNYAL İLETİMİ (RoF)

RF over Fiber (RoF), radyo frekans (RF) sinyallerinin fiber optik kablolar üzerinden iletilmesini sağlayan bir teknolojidir. Burada RF sinyalleri önce bir optik modülasyona uğrayarak fiber optik kablo boyunca istenilen yere kadar taşınır. Ardından optik demodülasyon ile bu sinyaller tekrar RF sinyallere dönüştürülür. Şekil 3.1.'de RoF yapısının genel bir şeması verilmiştir.



Şekil 3.1. RoF genel gösterimi.

RF sinyalleri uygulamalarda, havadan, koaksiyel bakır kablo üzerinden ve fiber üzerinden iletilmektedir. Çizelge 3.1.'de çeşitli parametreler açısından bu iletim türleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.1. RF sinyallerinin hava, bakır ve fiber üzerinden iletimlerinin karşılaştırılması

Parametre	Havadan	Bakır Üzerinden	Fiber Üzerinden
Zayıflama	Yüksek (hava koşullarından etkilenir)	Yüksek (mesafe arttıkça artar)	Çok Düşük (0.2 dB/km)
Bant Genişliği	Orta	Sınırlı	Yüksek (THz seviyesi)
Parazit Bağışıklığı	Zayıf (EMI/RFI etkilenir)	Zayıf (EMI'ye duyarlı)	Tam (EMI ve RFI etkilenmez)
Taşınabilirlik	Yüksek (kablosuz)	Orta	Yüksek (ince ve hafif)
Güvenlik	Düşük (dinlenebilir)	Düşük (manyetik algılayıcı ile dinlenebilir)	Yüksek (kesilmedikçe dinlenemez)
Güç Tüketimi	Yüksek (antenler ve tekrarlayıcılar gereklidir)	Orta	Düşük (pasif ortam)
Sinyal Maliyeti	Orta	Yüksek	Düşük (daha az ekipman ihtiyacı)
Gecikme (Latency)	Orta	Yüksek	Düşük
Veri Yoğunluğu Desteği	Sınırlı (frekans yoğun kullanılır)	Sınırlı (veri yoğunluğunda performans düşer)	Yüksek (birden fazla veri taşınabilir)

Yukarıdaki çizelgede karşılaştırılan parametrelerden de anlaşılacağı üzere RF sinyallerinin fiber üzerinden iletimi tamamında öne çıkmaktadır. RF sinyallerinin optik sinyallere dönüştürülmesi ve bu sinyallerin fiber optik kablolar üzerinden iletilmesi, hem ticari hem de askeri uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır (Islam, Khan, Hossan ve Amin, 2019).

3.1. Kullanım Alanları

RoF uygulamaları endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir:

Haberleşme Sistemleri: Uydu yer istasyonlarında, deniz ve hava taşıtlarındaki haberleşme sistemlerinde RF sinyallerinin fiber optik kablolarla iletilmesi yaygındır (Lim ve Nirmalathas, 2021).

Radar Sistemleri: RoF, radar sistemlerinde uzak mesafedeki radar antenleri ile kontrol birimleri arasında sinyal iletimi için kullanılır. Bu yöntem, kayıpları azaltır ve çoklu radar anteni sistemlerinin tasarımını kolaylaştırır (Roy, M ve Purohit, 2023).

Telekomünikasyon: 5G altyapısında, baz istasyonlarından çekirdek şebekelere veri taşınması için RFoF kullanılır. Bu, hızlı ve verimli veri aktarımı sağlar (Pandey, Choudhary ve Dixit, 2021).

IoT: RF over Fiber teknolojisi, 5G hücresel ağlar ve Nesnelerin İnterneti (IoT) için radyo-fiber sistemlerinin optik olarak güçlendirilir (Al-Zubaidi, López-Cardona, Sánchez Montero, ve Vázquez, 2021).

3.2. Çalışma Prensibi

RoF teknolojisinin çalışma prensibi, RF sinyalinin bir optik sinyale dönüştürülmesi ve fiber optik kablo üzerinden iletilmesi esasına dayanır. Bu işlem üç temel adımdan oluşur:

Optik modülasyon:

RF sinyallerinin optik taşıyıcılara modüle edilmesinde yaygın olarak kullanılan cihazlardan biri de Mach-Zehnder modülatörleridir. Bu cihazlar, yüksek hızlı veri iletimi ve geniş bant gereksinimlerini karşılamak için genellikle tercih edilir (Shankarananda, Shreyas ve Guruprasad, 2016; Saleh ve Teich, 2019; Yariv ve Yeh, 2007). Mach-Zehnder modülatörlerinin matematiksel modeli, optik sinyalin fazını değiştirerek modülasyon işlemini gerçekleştirir. Bu yöntem, optik iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

RF sinyali, bir Mach-Zehnder modülatör (MZM) kullanılarak optik taşıyıcı üzerine bindirilir. Bu adımda, RF sinyali, lazer ışığının genliğine veya frekansına kodlanır. MZM, genellikle lazer ışığının genliğini veya fazını kontrol ederek RF sinyalini optik taşıyıcıya bindirir. Frekans modülasyonu doğrudan MZM ile yapılmaz; bunun yerine faz modülasyonu kullanılarak dolaylı olarak frekans etkileri oluşturulabilir. Mach-Zehnder Modülatör (MZM), RF sinyalini lazerin optik gücü ile modüle eder. Bu modülasyon genellikle faz modülasyonu veya genlik modülasyonu (AM) olarak gerçekleştirilir. MZM'nin çıkış sinyali $E_{out}(t)$ şu şekilde ifade edilir:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \times cos(\pi V_{RF}(t) \div 2V_{\pi}) \quad (3.1)$$

$E_{in}(t)$: Giriş optik sinyali, $V_{RF}(t)$: Modülasyon için kullanılan RF sinyali, V_{π}: Modülatörün voltaj-duyarlılık katsayısıdır. Modülatörün elektro-optik koluna RF gerilimi uygulanır. Bu gerilim faz değişimi yaratır.

$$\Delta\phi = \pi V_{RF}(t) \div V_{\pi} \quad (3.2)$$

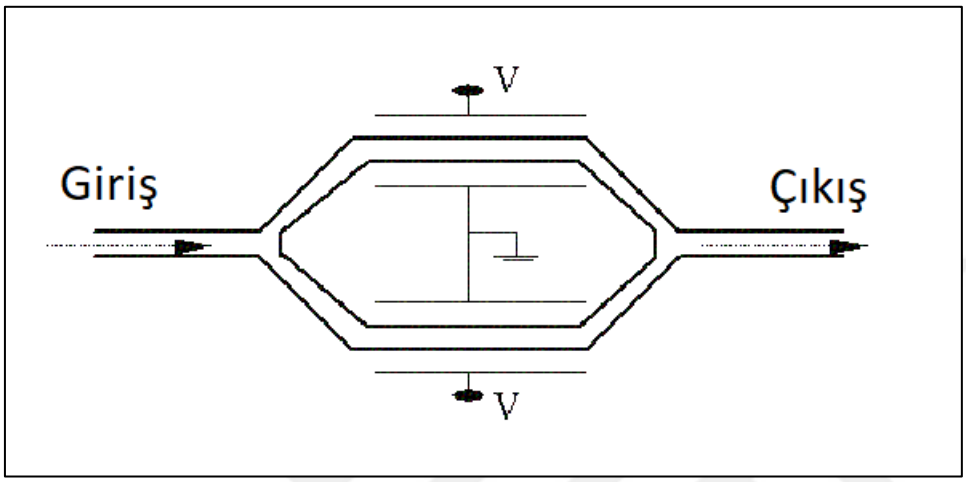
Bu faz farkı iki kol arasında bir girişim oluşturur ve çıkış optik alanı aşağıdaki gibi yeniden elde edilebilir.

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \times \cos(\Delta\phi \div 2) \quad (3.3)$$

Eğer $V_{RF}(t) = V_{\pi}$ olursa iki kol arasındaki faz farkı tam olarak π olur ve optik alan sıfır olur (destrüktif girişim).

$V_{RF}(t) = V_\pi \div 2$ olursa çıkış optik alanı maksimum olur (konstrüktif girişim).

MZM çıkışı RF voltajına bağlı olarak optik taşıyıcının genliğini modüle eder, yani düşük genlikli RF sinyalleri için çıkış doğrusal bir modülasyon gösterirken büyük genlikli RF sinyalleri için doğrusal olmayan bozulmalar meydana gelir.



Şekil 3.2. MZM modülatör yapısı

Fiber optik kablo

Modüle edilen optik sinyal, fiber optik kablo üzerinden uzak mesafelere iletilir. Fiber optik kabloların düşük kayıp özelliği sayesinde uzun mesafeli iletim mümkün olur. Optik sinyal, fiber optik kablo boyunca iletilir. Fiberdeki kayıplar ve faz gecikmeleri, genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$P_{out}(L) = P_{in} \times 10^{\frac{-\alpha L}{10}} \quad (3.4)$$

$P_{out}(L)$: Fiber sonunda elde edilen sinyal gücü, P_{in}:Fiber girişindeki sinyal gücü, α: Fiber kayıp katsayısı (dB/km), L: Fiber uzunluğudur (km).

Optik demodülasyon

Fiber kablodan çıkan optik sinyal, bir fotodedektör tarafından algılanır ve tekrar RF sinyaline dönüştürülür. Bu RF sinyali daha sonra kullanıcıya veya bir alıcı cihaza iletilir.

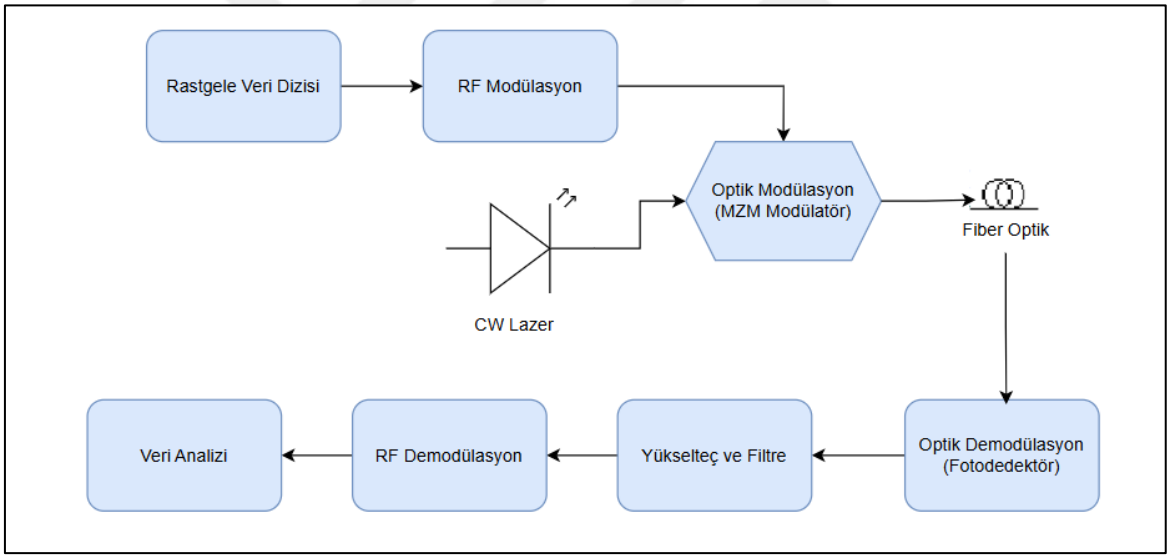
Fotodetektör, optik sinyali yeniden bir elektrik sinyaline dönüştürür. Fotodetektörün çıkışı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$I_{PD}(t) = R \times P_{opt}(t) \tag{3.5}$$

$I_{PD}(t)$: Fotodetektör çıkış akımı, R: Fotodetektörün foto-duyarlılığı (A/W), $P_{opt}(t)$:Giriş optik gücüdür.

Çizelge 3.2. RoF'in avantajları ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Düşük kayıp	Optik modülatörlerin karmaşıklığı
Yüksek bant genişliği	Yüksek maliyet
EMI (elektromanyetik girişim) dayanımı	Bakım zorluğu
Uzak mesafeli iletişim	Güç tüketimi



Şekil 3.3. RoF genel blok şeması

Darbant telsiz sinyallerinin RoF olarak iletilmesi Şekil 3.3.'de gösterilmiştir. Buna göre gönderme hattında; rasgele veri, taşıyıcı RF sinyal ile modüle edilerek modüleli sinyal oluşturulur. Ardından, ışık kaynağı ile optik modülasyona tabi tutularak optik kanala iletilir ve fiber optik boyunca ilerler. Alma Hattında; zayıflayan ve bozulan veri sinyallerinin, optik demodülasyon sonrasında yükseltme ve filtreleme, RF demodülasyon ve veri analizi yapılır. Burada sistemin performansı Q-kalite faktörü ve BER-bit hata oranı metrikleriyle değerlendirilir. RF over Fiber (RoF) sistemlerinde, Q Faktörü sinyalin gürültüye karşı ne kadar güçlü olduğunu gösteren bir ölçüttür ve SNR (Sinyal-Gürültü Oranı) ile doğrudan

ilişkilidir. RF sinyalleri, fiber optik üzerinden iletilirken optik modülasyon (IM/DD veya heterodin) kullanılarak taşınır ve alıcı tarafında fotodiyotlar tarafından demodüle edilir. Haberleşme sistemlerinde sinyaller Gaussian (Normal) dağılımlı gürültü ile bozunur ve RF sinyallerinin fiber üzerinden iletimi sırasında optik gürültü (ASE, shot noise), termal gürültü ve dispersiyon etkileri nedeniyle bozulma meydana gelir. Gaussian dağılım modeline ve olasılık yoğunluk fonksiyonlarına (PDF- Probability Density Function) göre, sinyalin yanlış algılanma olasılığı, karar eşiğinin yanlış geçilme ihtimali ile belirlenir. Bu olasılık, Gaussian fonksiyonunun integralini almakla hesaplanır ve tamamlayıcı hata fonksiyonu (erfc) kullanılarak BER (Bit Hata Oranı) ile Q Faktörü arasındaki ilişki tanımlanır. RF over Fiber sistemlerinde Q Faktörü, optik haberleşme ve dijital sistemlerde sinyalin "1" ve "0" seviyeleri arasındaki ayrımı ne kadar iyi yaptığına bağlı olarak tanımlanır. Fiber uzunluğu arttıkça, sinyal zayıflaması, faz gürültüsü ve dispersiyon etkileri nedeniyle Q Faktörü düşer ve BER artar. BER, alıcıda yanlış çözülme olasılığını gösterir ve Q Faktörü ile ters orantılıdır; yani, Q arttıkça BER azalır ve sinyalin güvenilirliği artar. Haberleşme sistemlerinde Q Faktörü ≥ 6 olduğunda BER seviyesi 10^{-9} veya daha düşük olur ve hata oranı kabul edilebilir olarak değerlendirilir. Optik güç seviyesi, alıcı duyarlılığı ve fiber kayıpları dikkate alınarak Q ve BER analizleri yapılarak sistem performansı değerlendirilmelidir. Aşağıdaki çizelgede haberleşme sistemlerinde genel kabul olarak ele alınan Q ve BER ilişkisi verilmektedir.

Çizelge 3.3. Q-kalite faktörü, BER-bit hata oranı ile sistem performans değerlendirmesi

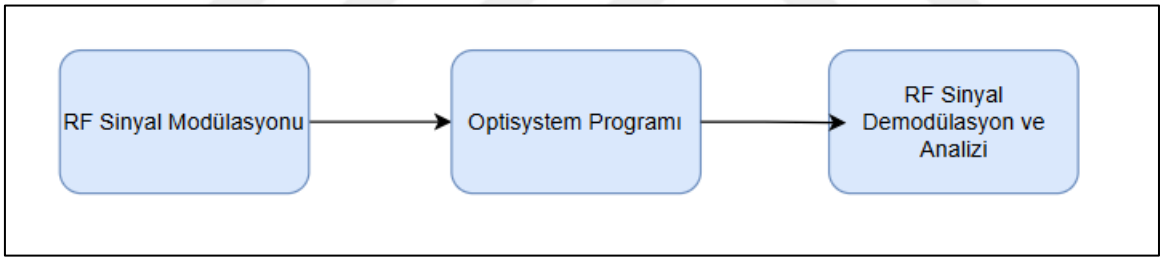
Q-Kalite Faktörü	BER-Bit Hata Oranı	Değerlendirme
$Q \geq 6$	$BER \leq 10^{-9}$	Mükemmel haberleşme kalitesi, düşük hata oranı, güçlü sinyal.
$5 \leq Q < 6$	$10^{-9} < BER \leq 10^{-6}$	Genellikle güvenilir haberleşme, hata oranı düşük, ek hata düzeltme gerekmez.
$4 \leq Q < 5$	$10^{-6} < BER \leq 10^{-5}$	Hata düzeltme (FEC) gerekebilir, BER yüksek, güvenilirlik azalmaktadır.
$3.5 \leq Q < 4$	$10^{-5} < BER \leq 10^{-3}$	Hata oranı yüksek, sinyal kalitesi düşük, güçlü hata düzeltme gereklidir.
$Q < 3.5$	$BER > 10^{-3}$	Sinyal bozuk, haberleşme güvenilmez, yüksek hata oranı vardır.

RoF sistemi, yüksek bant genişliğine sahip taşıyıcı sinyallerle iletilen yüksek hızlı veri iletiminde etkin bir çözümdür. Bunun yanı sıra TETRA, Apco25 veya DMR gibi telsiz sinyallerinin iletiminde de kullanılabilmektedir. Örneğin TETRA sisteminde, 400-500 MHz

bandındaki RF sinyalleri iletilir ve bu sinyallerin menzili genellikle sınırlıdır. RoF, bu menzili genişletmek için kullanılabilir. Özellikle TETRA gibi profesyonel dar bant telsiz sistemlerinde, uzun mesafelerde, kayıpsız ve parazitsiz iletimi mümkün kılar. Dar bant telsiz sistemlerinde fiber optik iletim, genellikle fiber optik tekrarlayıcılar aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu sistemler, baz istasyonundan alınan RF sinyalini optik sinyale dönüştürerek fiber optik kablo üzerinden uzak noktalara iletir ve hedef noktada tekrar RF sinyaline dönüştürerek kapsama alanını genişletir. Örneğin, EMTS Telecom Services Ltd. tarafından sunulan TETRA 400MHz Fiber Optik Tekrarlayıcı Sistemi, bu tür bir çözüm sunmaktadır (EMTS Telecom Services Ltd, 2016). TETRA sistemlerinde RoF teknolojisi kullanılarak sinyal menzilinin artırılması, güvenlik birimlerinin operasyonel etkinliğini artırır (Bărtuşică, Mihai, Halunga ve Fratu, 2022).

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Simülasyon programlarında darbant bir telsiz sinyalinin RoF iletimini gerçekleştirilmek istenildiğinde; aynı layout ortamında, düşük frekanslı darbant bir telsiz sinyali (kbps seviyelerinde) ile yüksek frekanslı (örneğin 1550 nm dalgaboyu, 193.1 THz frekans) lazer sinyallerinin birlikte çalışması gerekecektir. Bu durumda telsiz sinyallerinin oluşabilmesi için layout parametreleri darbant sinyale göre ayarlandığında; lazer sinyal oluşumu, mesafeye bağlı kalite faktöründe kararsızlık gibi çeşitli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, bunun nedeni olarak veri hızının, ışık kaynağının yanında çok düşük kalması saptanmış olup RoF gerçekleştirmek için veri hızı 100 Mbps seçildiğinde söz konusu sorunların önüne geçilmiştir. Bu nedenle Şekil 4.1.'de gösterildiği gibi dış ortamda, modülasyon gibi tekniklerle hızı yükseltilen telsiz sinyali, öncelikle Optisystem programına iletilmiş ve ardından Optisystem programından çıkış olarak alınan sinyal dış ortamda tekrar hızı düşürülerek elde edilmiştir. Veri analizi, Optisystem programı içerisindeki 100 Mbps hızındaki rasgele veri üzerinde yapılmıştır.

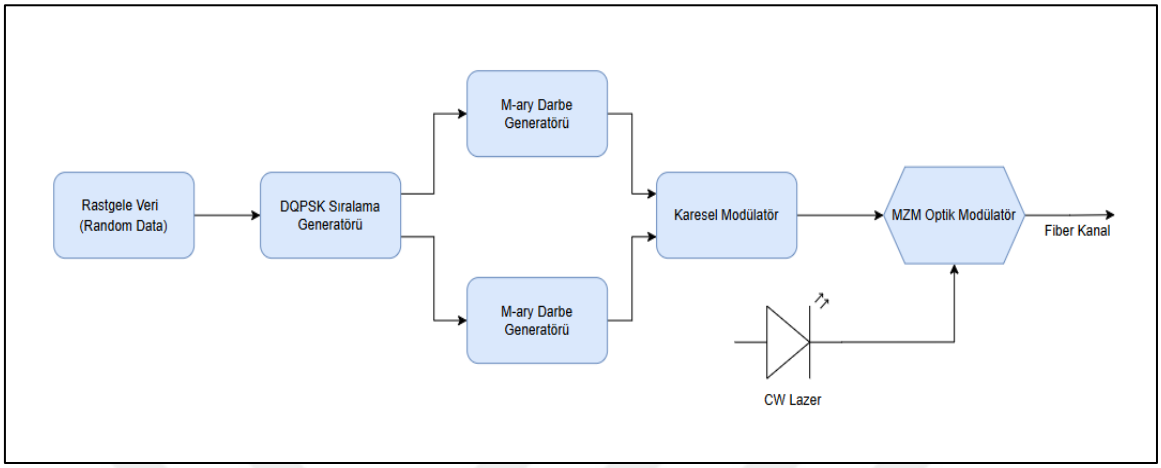


Şekil 4.1. Sistem genel blok diyagramı

4.1. TETRA Telsiz Sinyali RoF İletimi

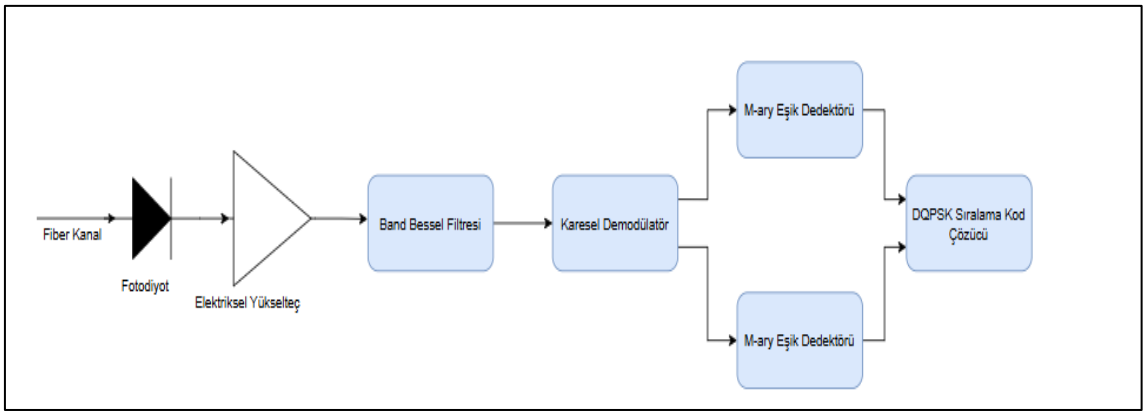
Çalışmada, 100 Mbps hızındaki rasgele veri sinyalinin fiber optik sonrasında alıcı devresinde çözülebilmesi için gerekli olan DQPSK demodülatörü direkt olarak Optisystem programında bulunmadığı için verici ve alıcı devrelerde modülasyon ve demodülasyon, alt elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Buna göre verici tarafında Rastgele İkili veri ile 100 Mbps hızında rastgele bir bit dizisi oluşturulmuştur. DQPSK sıralama generatör, diferansiyel dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama modülasyonunu (DQPSK) kullanarak binary sinyallerden 2 adet paralel M-ary sembol dizisi üretir. M-ary darbe generatörü, gelen bu sinyalleri çok seviyeli elektrik sinyallerine dönüştürür. Karesel modülatörde ise bu sinyaller 500 MHz frekansa sahip taşıyıcı sinyal ile modüle edilerek optik modülasyon için hazır hale getirilir.

Oluşturulan RF sinyali ile 193.1 THz frekansındaki CW (sürekli dalga) lazer sinyali MZM optik modülatöründe modülasyona tabi tutularak fiber kanala iletilecek sinyal elde edilir.



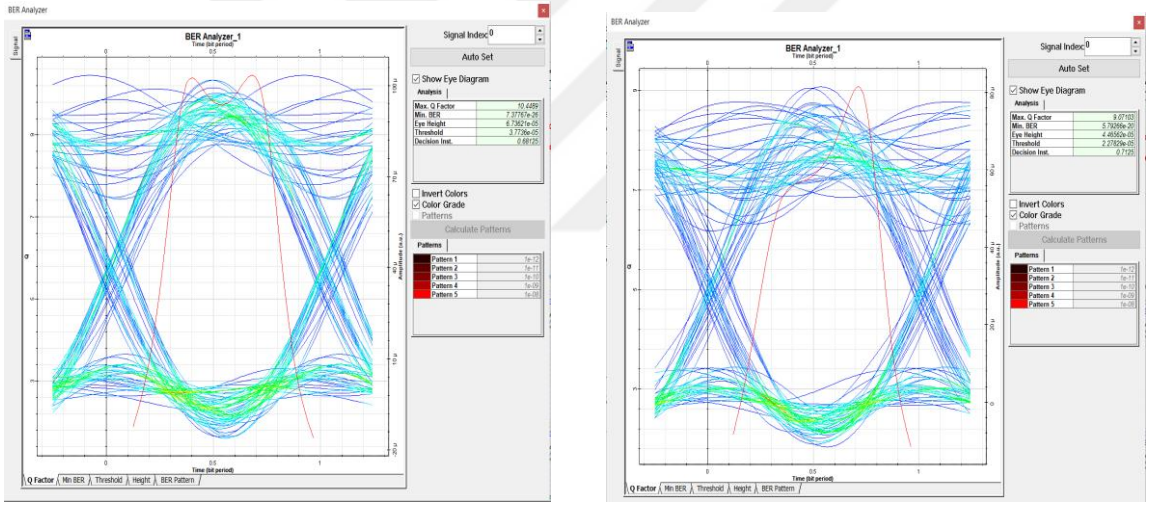
Şekil 4.2. TETRA verici blok diyagramı

Fiber ortamında ilerledikten sonra alıcı tarafına gelen sinyalin çözülerek analizinin yapılabilmesi için verici tarafında olduğu gibi burada da bir dizi aşamadan geçmesi gerekmektedir. Buna göre Fotodiyot kullanılarak optik ortamdaki sinyalden taşınan RF sinyali süzülür. Fiber ortamında zayıflayan sinyal yükseltilerek iletilir. Burada yalnızca 35 km ve 50 km için 10 db güç yükseltilir. Band geçiren Bessel filtre'de bant genişliği, veri hızı/ sembol başına bit sayısı formülüne göre 50 MHz seçilmiştir. Genliği yükseltilerek filtrelenen yüksek frekanslı RF sinyalinin, demodülatör ile frekansı düşürülerek temel bant seviyesine indirilir. Burada Cut-Off/kesim frekansı olarak veri hızı/2 = 50 MHz seçilmiştir. Alınan sinyaller M-ary eşik dedektöru ile M-ary sinyal tipine dönüştürülür. Burada dedektör eşik değerleri programdaki default değerlerdir. Son olarak DQPSK sıralama kod çözücü ile M-ary sinyalleri binary sinyallere çevrilerek girişte rastgele oluşturulan sinyal elde edilmek üzere çözülür.

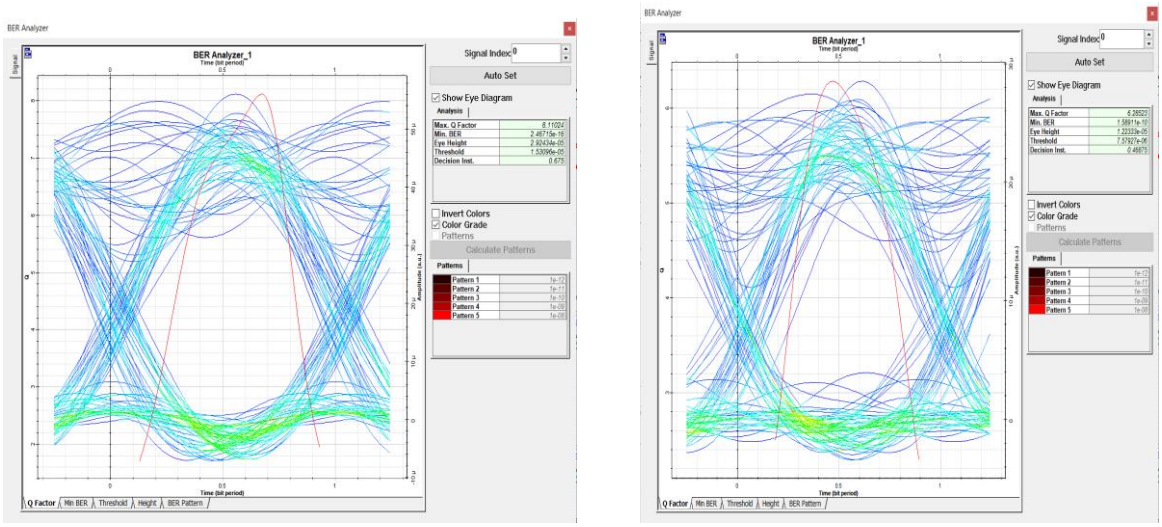


Şekil 4.3. TETRA alıcı blok diyagramı

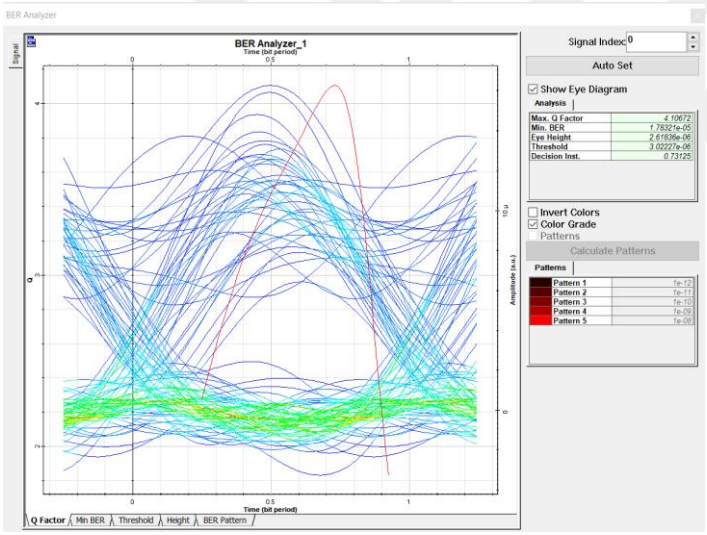
5-10-20-35-50 km uzunluğundaki fiber uzunluğuna bağlı olarak Q kalite faktörü ve Min. BER değişimi sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. (a): 5 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri (b): 10 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri



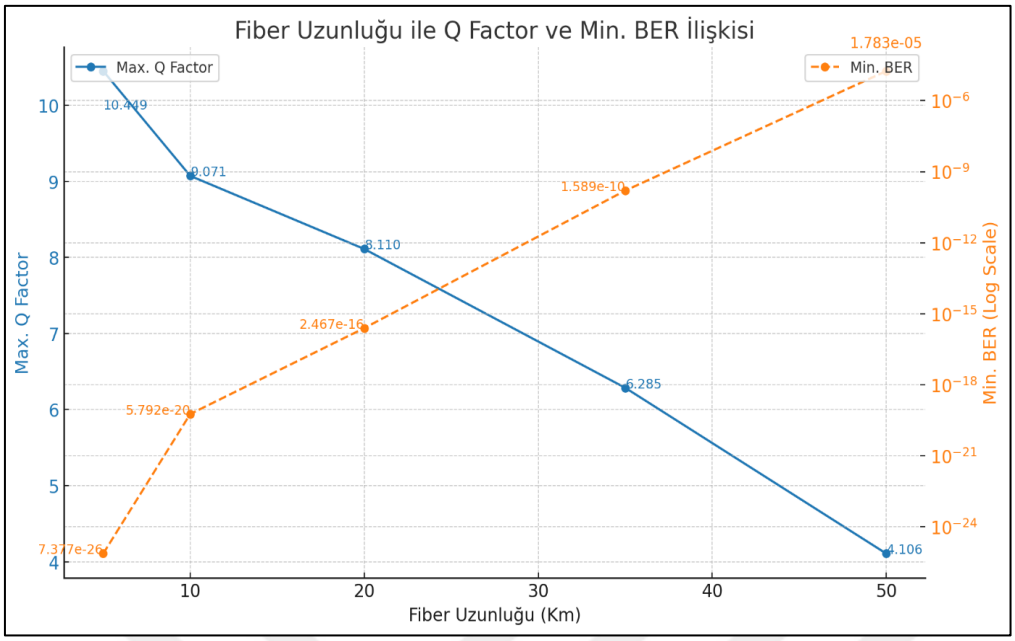
Şekil 4.5. (a): 20 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri (b): 35 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri



Şekil 4.6. 50 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri

Çizelge 4.1. 5-50 km arasında fiber optik kablo kullanımında q kalite faktörü ve min. BER bit hata oranı

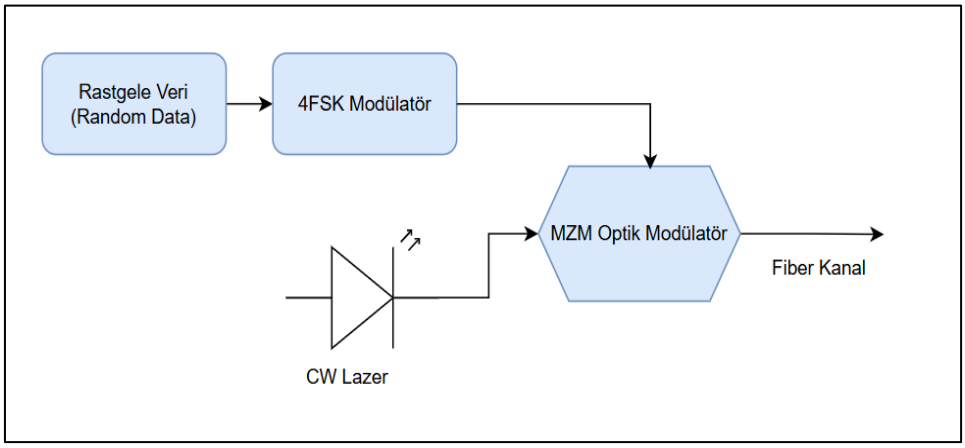
Fiber Uzunluğu (Km)	Max. Q Factor (Maks. Kalite Faktörü)	Min.BER (Min. Bit Hata Oranı)
5	10,448	$7{,}377 \times 10^{-26}$
10	9,071	$5{,}792 \times 10^{-20}$
20	8,11	$2{,}467 \times 10^{-16}$
35	6,285	$1{,}589 \times 10^{-10}$
50	4,106	$1{,}783 \times 10^{-5}$



Şekil 4.7. 5-50 km arasındaki fiber uzunluğunun Q kalite faktörü ve min. BER bit hata oranı grafiği

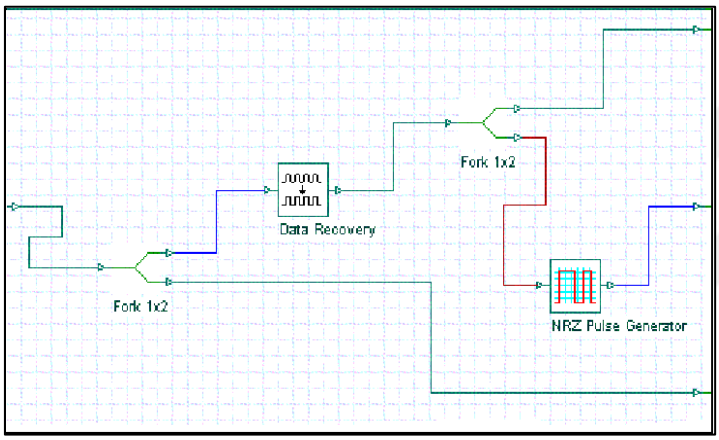
4.2. DMR Telsiz Sinyali RoF İletimi

TETRA telsiz standardında yapıldığı gibi burada da gerçek veri hızlarının optik ortamda simüle edilmesi mümkün olmadığından harici ortamda veri hızı yükseltilerek sisteme dahil edilir. Burada FSK modülasyonun bit sayısı 2 seçilerek 4FSK modülasyonu elde edilir. Taşıyıcı frekans 500 MHz ve frekans aralığı 50 MHz seçildikten sonra elde edilen RF sinyali CW lazer ile MZM modülatörde ışık modülasyonuna uğrar ve kanala verilir.



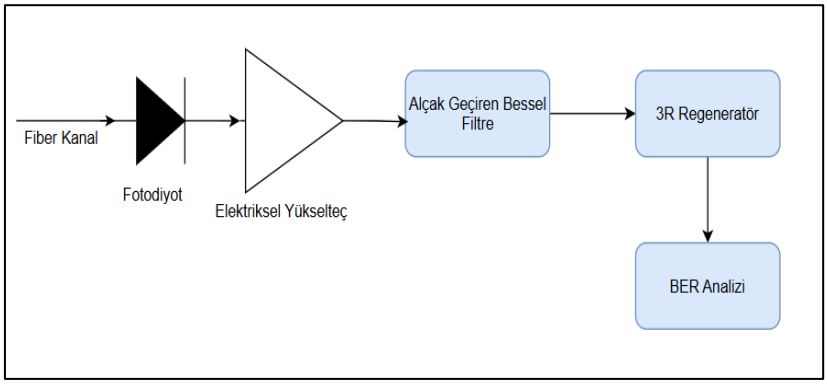
Şekil 4.8. DMR verici blok diyagramı

Fiber ortamında ilerledikten sonra alıcı tarafına gelen sinyalin çözülerek analizinin yapılabilmesi için verici tarafında olduğu gibi burada da bir dizi aşamadan geçmesi gerekmektedir. Buna göre Fotodiyot kullanılarak optik ortamdaki sinyalden taşınan RF sinyali süzülür. Fiber ortamında zayıflayan sinyal yükseltilerek iletilir. Burada yalnızca 35 km ve 50 km için 10 db güç yükseltilir. Ardından sinyal, kesim frekansı sembol hızının 0.75 katı olan bir alçak geçiren bir filtreden (low-pass bessel filter) geçirilir ve 3R regeneratöre iletilir. Burada elektrik sinyalleri yeniden üretilir. 3R regeneratör orijinal bit dizisini ve BER analizi için kullanılacak modüle edilmiş bir elektrik sinyalini üretir. Veri Kurtarma bileşeni ve bir NRZ darbe jeneratörü temelli bir alt sistemdir.



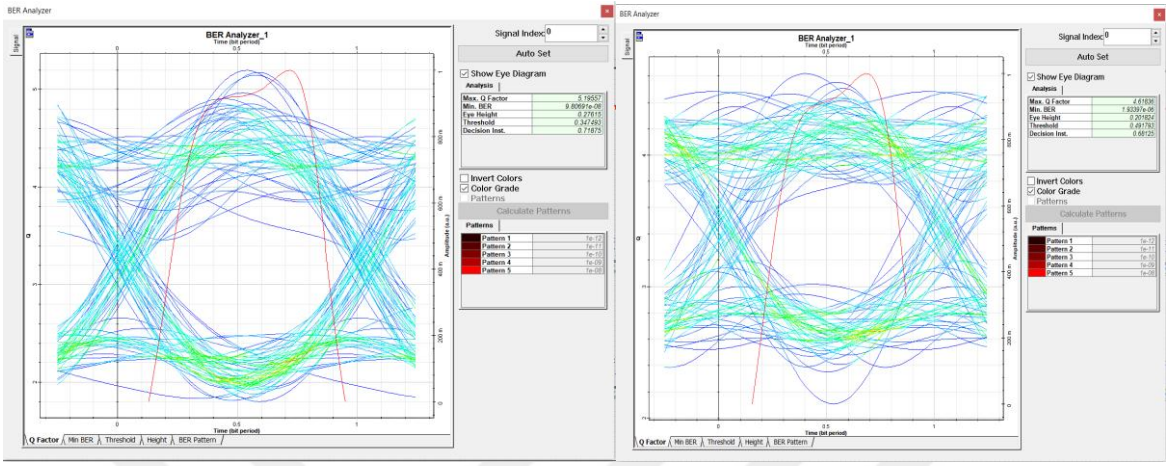
Şekil 4.9. 3R regeneratör yapısı

İlk çıkış portu bit dizisidir, ikinci port modüle edilmiş bir NRZ sinyalidir ve son çıkış ise giriş sinyalinin bir kopyasıdır. Bu üç sinyal doğrudan BER Analizörüne bağlanarak verici ile alıcı aşaması arasında ek bağlantılardan kaçınılmaktadır. 3R regeneratör çıkışları direkt olarak BER analizörüne bağlanarak kalite faktörü ve bit hata oranı (BER) analizi yapılır.

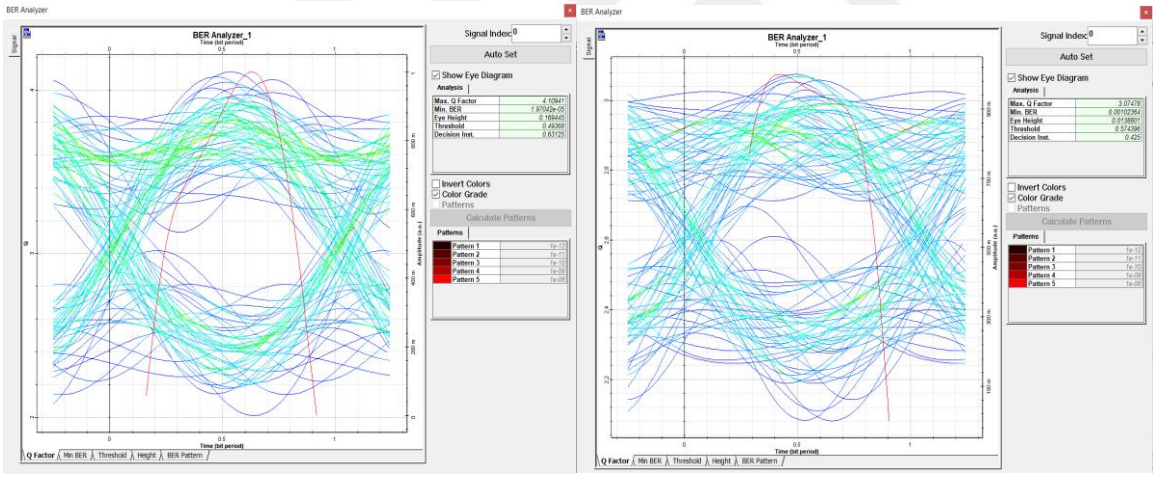


Şekil 4.10. DMR alıcı blok diyagramı

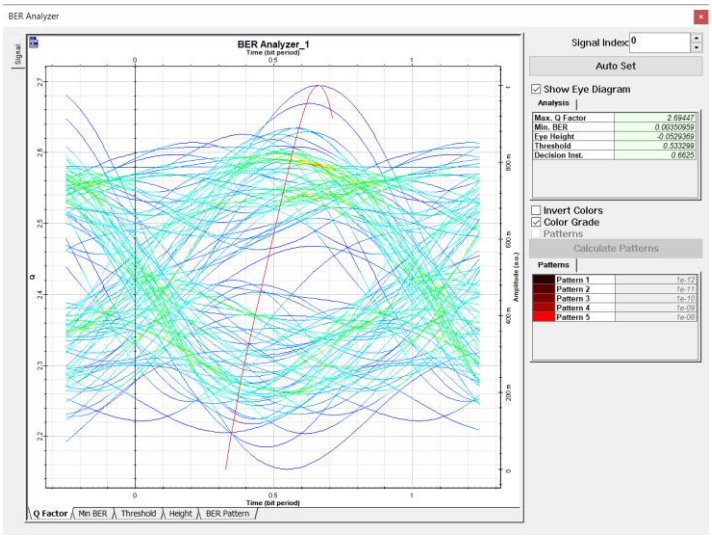
5-10-20-35-50 km uzunluğundaki fiber uzunluğuna bağlı olarak Q kalite faktörü ve Min. BER değişimi sırasıyla Şekil 4.11. , Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. (a): 5 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri (b): 10 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri



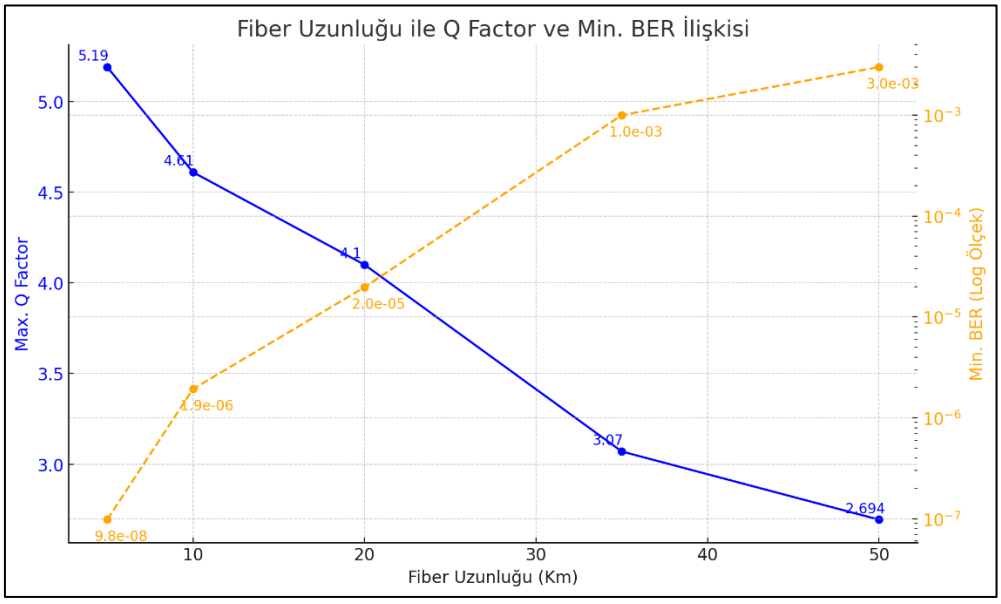
Şekil 4.12. (a): 20 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri (b): 35 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri



Şekil 4.13. 50 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri

Çizelge 4.2. 5-50 km arasında fiber optik kablo kullanımında q kalite faktörü ve min. Ber bit hata oranı

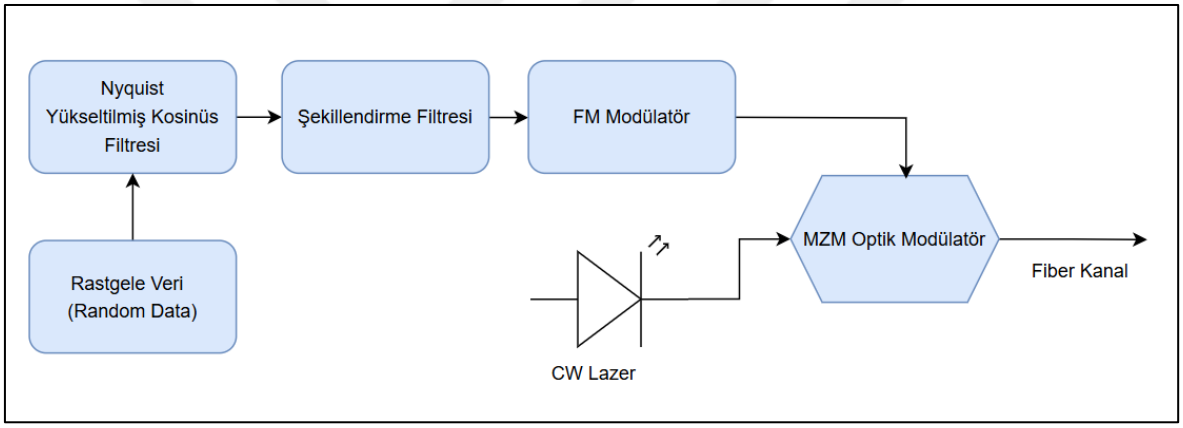
Fiber Uzunluğu (Km)	Max. Q Factor (Maks. Kalite Faktörü)	Min.BER (Min. Bit Hata Oranı)
5	5,19	$9{,}8\text{x } 10^{-8}$
10	4,61	$1{,}93\text{x } 10^{-6}$
20	4,10	$1{,}97 \text{ x } 10^{-5}$
35	3,07	10^{-3}
50	2,694	$3\text{x } 10^{-3}$



Şekil 4.14. 5-50 km arasındaki fiber uzunluğunun Q kalite faktörü ve min. BER bit hata oranı grafiği

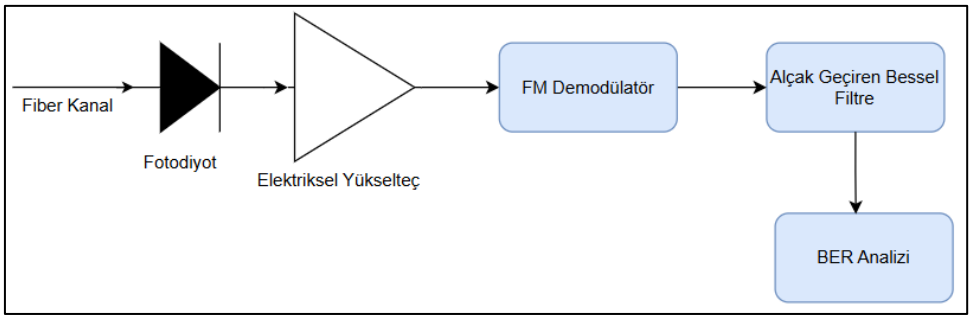
4.3. Apco25 Telsiz Sinyali RoF İletimi

DMR ve TETRA telsiz standartlarında olduğu gibi burada da gerçek veri hızlarının optik ortamda simüle edilmesi mümkün olmadığından harici ortamda veri hızı yükseltilerek sisteme dahil edilir. Ayrıca Apco25 modülasyon tipi olan C4FM modülatörü simülasyon programında bulunmadığı için alt elamanlarına parçalanarak kullanılacaktır. Buna göre rastgele veri dizisi NRZ modülatörde elektriksel sinyale çevrildikten sırasıyla Nyquist yükseltilmiş kosinüs filtresi ve şekillendirme filtresinden geçirildikten sonra 500 MHz taşıyıcı frekansına sahip FM modülatörüne verilir. Modülatör çıkışında elde edilen RF sinyali diğer telsiz standartlarında olduğu gibi burada da CW lazer ile MZM modülatörde ışık modülasyonuna uğrar ve kanala verilir.



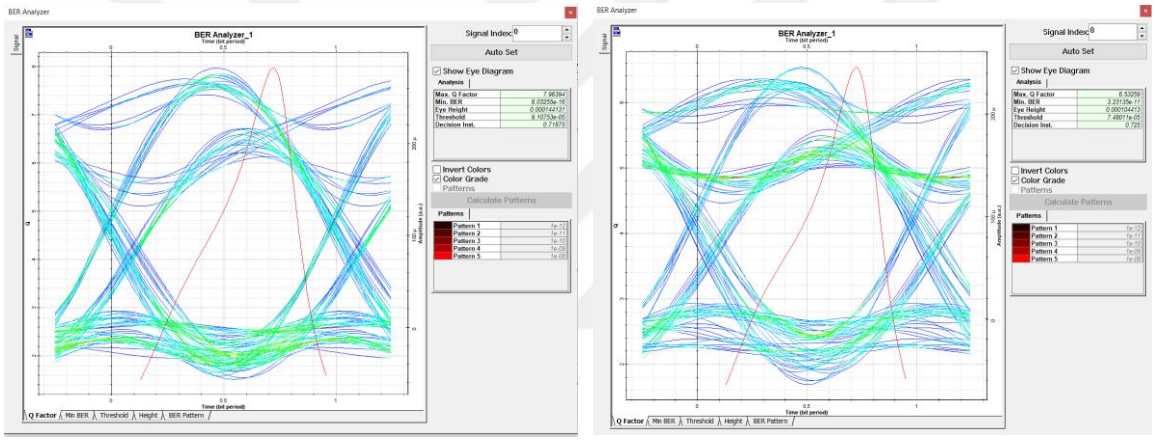
Şekil 4.15. Apco25 verici blok diyagramı

Fiber ortamında ilerledikten sonra alıcı tarafına gelen sinyalin çözülerek analizinin yapılabilmesi için verici tarafında olduğu gibi burada da bir dizi aşamadan geçmesi gerekmektedir. Buna göre Fotodiyot kullanılarak optik ortamdaki sinyalden taşınan RF sinyali süzülür. Fiber ortamında zayıflayan sinyal yükseltilerek iletilir. Burada yalnızca 35 km ve 50 km için 10 db güç yükseltilir. Ardından sinyal, FM demodülatöre iletilir kesim frekansı sembol hızının 0.75 katı olan bir alçak geçiren bir filtreden (low-pass Bessel filter) geçirilir ve BER analizörüne bağlanarak kalite faktörü ve bit hata oranı (BER) analizi yapılır.

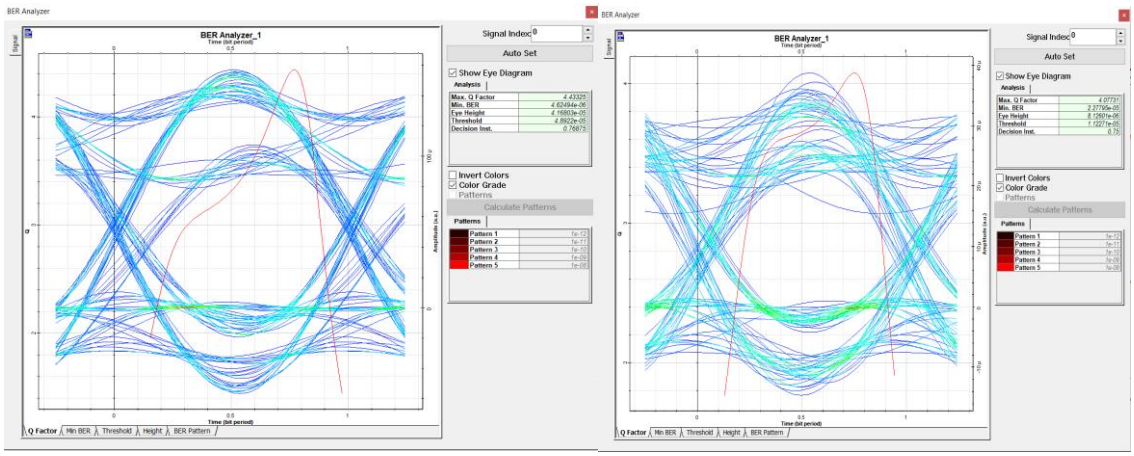


Şekil 4.16. Apco25 alıcı blok diyagramı

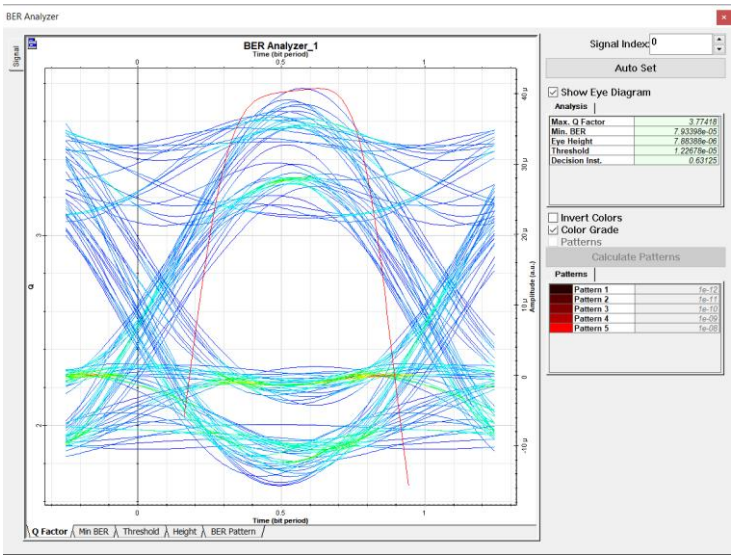
5-10-20-35-50 km uzunluğundaki fiber uzunluğuna bağlı olarak Q kalite faktörü ve Min. BER değişimi sırasıyla Şekil 4.17. , Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. (a): 5 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri (b): 10 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri



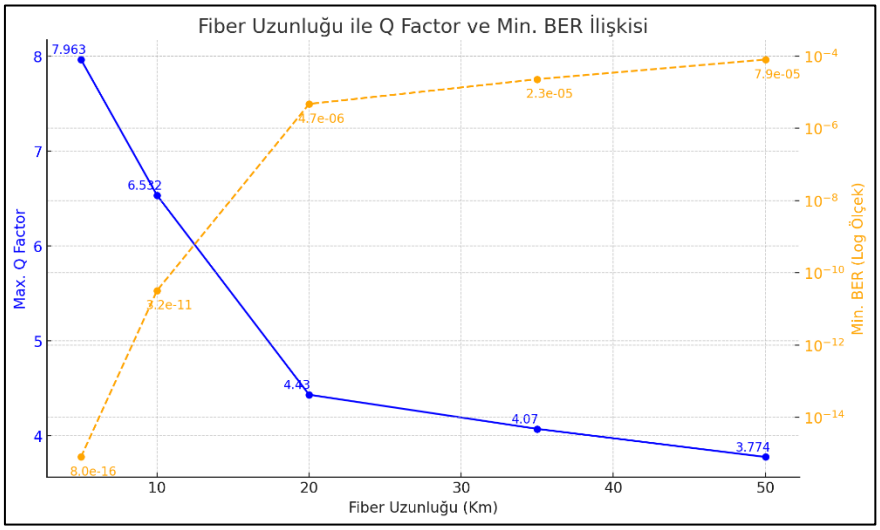
Şekil 4.18. (a): 20 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri (b): 35 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri



Şekil 4.19. 50 km fiber uzunluğuna bağlı Q kalite faktörü ve min.BER değerleri

Çizelge 4.3. 5-50 km arasında fiber optik kablo kullanımında q kalite faktörü ve min. Ber bit hata oranı

Fiber Uzunluğu (Km)	Max. Q Factor (Maks. Kalite Faktörü)	Min.BER (Min. Bit Hata Oranı)
5	7,963	8,032x 10^{-16}
10	6,532	3,231x 10^{-11}
20	4,43	4,694 x10^{-6}
35	4,07	2,27 x 10^{-5}
50	3,774	7,933 x 10^{-5}



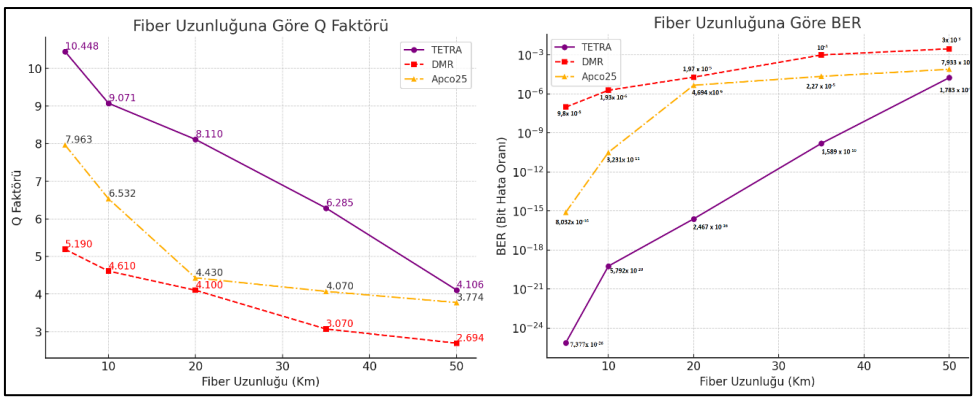
Şekil 4.20. 5-50 km arasındaki fiber uzunluğunun q kalite faktörü ve min. Ber bit hata oranı grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında öncelikle telsiz haberleşme sistemlerinin geçmişten günümüze kullanımı, gelişim süreci, kullanım modları (simpleks, tek yollu, çok yollu), analog- sayısal telsiz karşılaştırması, dünyada yaygın olarak kullanılan TETRA, DMR ve Apco25 sayısal telsiz standartlarının temel özellikleri, mimari yapıları, modülasyon tipleri anlatılmıştır.

Daha sonra RF sinyallerin fiber üzerinden taşınmasına imkân sağlayan RF Over Fiber: Fiber üzerinden RF sinyallerinin iletimi anlatılmış, temel denklemleri verilmiştir. Ayrıca yapılan literatür çalışmasında; yüksek bant genişliği, yüksek veri hızlarındaki verilerin fiber üzerinden iletime dair çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Dar bant telsiz sinyallerinin nasıl iletileceği konusu önemli bir araştırma konusudur.

Son olarak, dar banttaki farklı telsiz sinyallerinin fiber üzerinden iletimi, Q kalite faktörü ve BER bit hata oranı açısından farklı mesafelerde karşılaştırılması yapılmıştır. Literatürde böyle bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Çalışma Optisystem programı ile simüle edilmiştir. Simülasyon bölümünde detayları verilen çalışmada, veri analizi, gerçek telsiz sinyallerinin hızının yükseltilmesi yoluyla gerçekleştirilebilmiştir. Bunun nedeni, simülasyon bölümünde anlatıldığı gibi dar bantlı, düşük frekanstaki telsiz sinyalleri ile yüksek frekanstaki CW lazer sinyalinin aynı layout ortamında tutarlı çalışamamasıdır. Veri analizinin, Optisystem sonrası tekrar elde edilen sinyal üzerinde de yapılmasının, bu çalışmanın sonuçlarını incelemek açısından faydalı olacağı değerlendirilmektedir.Simülasyon bölümünde 100 Mbps hızında bir telsiz sinyalinin RoF iletimi gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki grafiklerde, simülasyon bölümünde oluşturulan sinyaller bir arada gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Farklı telsiz standartlarına(modülasyon türleri) göre (a): Q kalite faktörü ve fiber uzunluğu ilişkisi (b): BER bit hata oranı ve fiber uzunluğu ilişkisi

Çalışma sonuçlarına göre mesafe arttıkça maks. Q Kalite Faktörünün azaldığı ancak min.BER (bit hata oranı) arttığı görülmüştür. Grafikler Çizelge 5.1'e göre değerlendirildiğinde aşağıdaki çizelge elde edilmektedir.

Çizelge 5.1. Q kalite faktörü ve BER bit hata oranı açısından fiber uzunluğuna göre telsiz standartlarının (modülasyonları) performans değerlendirmeleri

<table>
<tr><td rowspan="2">Fiber Uzunluğu (Km)</td><td colspan="3">Q ve BER Açısından RoF Değerlendirmesi</td></tr>
<tr><td>TETRA Standardı (π/4-DQPSK Modülasyonu)</td><td>Apco25 Standardı (C4FM Modülasyonu)</td><td>DMR Standardı (4FSK Modülasyonu)</td></tr>
<tr><td>5</td><td rowspan="4">Mükemmel haberleşme kalitesi, düşük hata oranı, güçlü sinyal.</td><td rowspan="2">Mükemmel haberleşme kalitesi, düşük hata oranı, güçlü sinyal.</td><td>Genellikle güvenilir haberleşme, hata oranı düşük, ek hata düzeltme gerekmez.</td></tr>
<tr><td>10</td><td rowspan="2">Hata düzeltme (FEC) gerekebilir, BER yüksek, güvenilirlik azalmaktadır.</td></tr>
<tr><td>20</td><td rowspan="2">Hata düzeltme (FEC) gerekebilir, BER yüksek, güvenilirlik azalmaktadır.</td></tr>
<tr><td>35</td><td rowspan="2">Sinyal bozuk, haberleşme güvenilmez, yüksek hata oranı vardır.</td></tr>
<tr><td>50</td><td>Hata düzeltme (FEC) gerekebilir, BER yüksek, güvenilirlik azalmaktadır.</td><td>Hata oranı yüksek, sinyal kalitesi düşük, güçlü hata düzeltme gereklidir.</td></tr>
</table>

Sonuç olarak Q kalite faktörü ve BER bit hata oranı açısından yapılan değerlendirmelerde; en iyi performans TETRA telsiz standardı olan π/4-DQPSK modülasyonu ile sağlanırken en kötü performans ise DMR standardı olan 4FSK modülasyonu ile elde edilmiştir. TETRA ile yapılan RoF'de 50 km'ye kadar mükemmel denilebilecek bir performans görülürken 50 km'de ileri hata düzeltmeye ihtiyaç duyulabilmektedir. Apco25 telsiz standardında 5 ve 10 km'de mükemmele yakın bir iletim sağlanırken 20 ve 35 km için ileri hata düzeltmeye ihtiyaç duyulabilmekte ve 50 km'de ise güçlü bir düzeltmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Son olarak DMR telsiz standardında ise 5 km'de iyi seviyede bir performans sağlanabilirken 10 ve 20 km'de ileri hata düzeltmeye ihtiyaç duyulabilmekte ve 35 ile 50 km'lerde ise güçlü bir düzeltmeye ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

Al Deen, H. K., Abd, H. J. (2022). *An investigation of radio over fiber (RoF) communication system technology: A review*. 2022 2nd International Conference on Advances in Engineering Science and Technology (AEST), Babil, 1–6.

Alavi, S. E., Soltanian, M. R. K., Amiri, I. S., Khalily, M., Supa'at, A. S. M. and Ahmad, H. (2016). Towards 5G: A photonic based millimeter wave signal generation for applying in 5G access fronthaul. *Scientific Reports,* 6, 19891.

Al-Zubaidi, F. M. A., López-Cardona, J. D., Sánchez Montero, D. and Vázquez, C. (2021). Optically powered radio-over-fiber systems in support of 5G cellular networks and IoT. *Journal of Lightwave Technology,* 39(13), 4262–4269.

Bărtuşică, R.-G., Mihai, M., Halunga, S. and Fratu, O. (2022). Radio frequency over fibre optics repeater for mission-critical communications: *Design, execution and test. Sensors*, 22(2), 612.

Beas, J., Castanon, G., Aldaya, I., Aragon-Zavala, A. and Campuzano, G. (2013). Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: A survey. *IEEE Communications Surveys ve Tutorials,* 15(4), 1593–1619.

Briso-Rodríguez, C., Alonso, J. I. (2007). Requirements of wireless communications for control and operation of railway systems. *The Journal of The Institute of Telecommunications Professionals*, 1(1), 13–17.

Çeven, M. (2010). *Yazılım tabanlı enstrümantasyon ile APCO Proje-25 telsiz platformu gerçeklemesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Dahiya, S., Asha. (2023). Performance analysis of millimeter wave-based radio over fiber system for next generation networks. *Journal of Optics*, 53, 2174–2182.

Gadze, J. D., Akwafo, R., Agyekum, K. A.-P. and Opare, K. A.-B. (2021). A 100 Gbps OFDM-based 28 GHz millimeter-wave radio over fiber fronthaul system for 5G. *Optics,* 2(2), 70–86.

Hayır, F. (2014). *Fiber üzerinden radyo haberleşme sistemlerinde farklı modülasyon tekniklerinin iletim performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı analizi / Comparative analysis for the effects of different modulation techniques on transmission performance in radio over fiber communication systems*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 38-45.

Islam, S., Khan, M. F., Hossan, M. Z. and Amin, M. A. (2019). *An overview of radio over fiber (RoF) technology*. In 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kerala, 749-752.

İnternet: Christiano, M. (2017, 14 Haziran). Radio meets fiber optics: RF over fiber. All About Circuits. Web: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/radio-meets-fiber-optics-rf-over-fiber/, Son Erişim Tarihi: 16/04/2024.

İnternet: Codan Communications. (2013). *P25 radio systems training guide*. Web: https://www.apcointl.org/~documents/docs/codan-tg-001-4-0-0-p25-training-guide, Son Erişim Tarihi: 27/04/2024.

İnternet: Danelec. (2004). *P25 training guide*. Web: https://www.dvsinc.com/papers/p25_training_guide.pdf, Son Erişim Tarihi: 15/03/2024.

İnternet: DMR Association. (2025). *DMR Association homepage*. Web: https://www.dmrassociation.org/index.html, Son Erişim Tarihi: 13/04/2024.

İnternet: EMTS Telecom Services Ltd. (2016). *TETRA 400 MHz high performances fiber optic repeater system*. Web: https://emtstelecom.com/media/com_product/images/thumb/TETRA_400MHz_Fiber_Opti c_Repeateing_System_Model_FOR-400T40W60-R1.pdf, Son Erişim Tarihi: 12/04/2024.

İnternet: European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (2023, Kasım). *ETSI TR 102 398 V1.5.1: DMR standard report*. Web: https://www.dmrassociation.org/public-downloads/standards/tr_102398v010501p.pdf, Son Erişim Tarihi: 09/03/2024.

İnternet: European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (2023, Mayıs). *ETSI TS 102 361-1 V2.6.1: Digital mobile radio (DMR) standard – Part 1: Air interface*. Web: https://www.dmrassociation.org/public-downloads/standards/ts_10236101v020601p.pdf, Son Erişim Tarihi: 08/03/2024.

İnternet: European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (2023, Mayıs). ETSI TS 102 361-2 V2.5.1: *Digital mobile radio (DMR) standard – Part 2: Voice and generic services and facilities*. Web: https://www.dmrassociation.org/public-downloads/standards/ts_10236102v020501p.pdf, Son Erişim Tarihi: 27/04/2024.

İnternet: European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (2023, Mart). Terrestrial trunked radio (TETRA); Voice plus data (V+D); Part 2: Air interface (AI). Web: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/100300_100399/10039202/03.10.01_60/ts_10039202v031001p.pdf, Son Erişim Tarihi: 28/03/2024.

İnternet: Keim, R. (2016, 22 Ağustos). Learning about differential quadrature phase shift keying (DQPSK) modulation. *All About Electronics*. Web: https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/differential-quadrature-phase-shift-keying-dqpsk-modulation/, Son Erişim Tarihi: 20/03/2024.

İnternet: Lunness, P. (2007). *P25 radio systems: Training guide*. Daniels Electronics Ltd. Web: https://www.repeater-builder.com/tech-info/pdfs/p25-training-guide.pdf, Son Erişim Tarihi: 13/03/2024.

İnternet: MacGillivray, L. (2022). *Two-way radio systems: The difference between conventional and trunked.* Chicago Communications. Web: https://www.chicomm.com/blog/whats-the-difference-between-a-conventional-and-trunked-radio-system, Son Erişim Tarihi: 10/03/2024.

İnternet: MPT. (1997). *MPT 1327: Telsiz özel kara mobil radyo sistemleri için bir çağrı standart protokolü*. Web: https://www.sigidwiki.com/images/8/85/Mpt1327.pdf, Son Erişim Tarihi: 12/04/2024.

İnternet: Radioactivity Tlc. (2009). *DMR versus TETRA systems comparison Version 1v2*. Web: http://www.radioactivity-tlc.com/pdf/dmrvstetra-comparison.pdf, Son Erişim Tarihi: 12/04/2024.

İnternet: Radioreference Wiki. (2022, 8 Haziran). *TETRA*. Web: https://wiki.radioreference.com/index.php/TETRA#, Son Erişim Tarihi: 25/03/2024.

Shankarananda, H. K., Shreyas, S. S., Guruprasad, B. (2016). External modulators and mathematical modeling of Mach-Zehnder modulator. *International Journal of Innovative Science, Engineering ve Technology*, 3(12), 214–217.

Kalaç, M. (2006). *Telli-telsiz haberleşme sistem entegrasyonu ve ses-veri trafik analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, 12-35.

Kanno, A. (2018). *Millimeter wave communication system implemented on radio over fiber networks in 5G/IoT era.* IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications, Stokholm, 1–3.

Kaur, H., Bhamrah, M. S., Kaur, B. (2022). A comprehensive study on radio over fiber systems: Present evaluations and future challenges. *Journal of Optical Communications*, 43(2), 65-80.

Kazancılı, U. U. (2019). *Fiber üzerinden radyo haberleşmesinin analizi ve uygulamaları / Analysis and applications of radio over fiber communication systems*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 93-105.

Khalil, H., Qamar, F., Shahzadi, R., Shahzad, A., Ali, M., Qamar, N. and Al-Otaibi, S. (2021). Performance analysis of modulation formats for next generation RoF systems. *IEEE Access*, 9, 134567–134579.

Khan, S. A., Iqbal, M. M., Mahmood, S. K., Anee, A. A., Rahman, S. and Mahmud, S. (2018). *Differential quadrature phase shift keying modulation in fiber communication: Modelling, design, case implementation and limitation*. 2018 Dördüncü Uluslararası Bilişim, İletişim ve Otomasyon İlerlemeleri Konferansı (ICACCA), Subang Jaya, Malezya, 108-122.

Kong, M., Zhou, W., Ding, J., Li, W. and Yu, J. (2020). Simultaneous generation of wired and wireless signals using a DP-MZM in a RoF system. *IEEE Photonics Technology Letters*, 32(15), 961–964.

Lathi, B. P. (1998). *Modern digital and analog communication systems*. New York: Oxford University Press, 5–18.

Li, J. W., Yu, Y. C., Yang, Z. Q., Manie, Y. C. and Peng, P. C. (2021). *A new approach of RoF system using optoelectronic oscillator and discrete mode laser*. 2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), Penghu, 1–4.

Lim, C., Nirmalathas, A. (2021). Radio-over-fiber technology: Present and future. *Journal of Lightwave Technology,* 39(4), 881–888.

Liu, S., Peng, P.-C., Xu, M., Guidotti, D., Tian, H. and Chang, G.-K. (2018). A long-distance millimeter-wave RoF system with a low-cost directly modulated laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 30(15), 1374–1377.

Muhsin, M. Y., Mohammad, Z. F., Jihad, N. J. (2024). Performance analysis of high dynamic range OFDM radio over fiber system for 5G/NR signals. *Journal of Optical Communications*, 1, 122-135.

Novak, D., Waterhouse, R. B., Nirmalathas, A., Lim, C., Gamage, P. A., Clark, T. R. and Skafidas, E. (2015). Radio-over-fiber technologies for emerging wireless systems. *IEEE Journal of Quantum Electronics,* 52(1), 1–11.

Özen, Ş., Yücel, M. (2024). *Telsiz sinyallerinin fiber optik kablo üzerinden uzun mesafelere iletimi.* 9. Azerbaycan Yaşam, Mühendislik, Matematik ve Uygulamalı Bilimler Kongresi, Bakü, Azerbaycan, 290-308.

Pandey, G., Choudhary, A., Dixit, A. (2021). Wavelength division multiplexed radio over fiber links for 5G fronthaul networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(9), 2789–2803.

Roy, T., M, D., Purohit, S. (2023). *RF over fibre-based built-in test setup for active phased array radars.* In 2023 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT), Bangalore, 1-6.

Saleh, B. E. A., Teich, M. C. (2019). *Fundamentals of photonics* (3rd ed.). New York: Wiley, 180-205..

Sung, M., Kim, J., Kim, E. S., Cho, S. H., Won, Y. J. and Lim, B. C. (2020). RoF-based radio access network for 5G mobile communication system in 28 GHz millimeter wave. *IEEE Journal of Lightwave Technology,* 38(2), 1–11.

Şahin, F. (2015). Telsiz haberleşme standartları. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi,* 7(27), 15–30.

Tamrakar, B., Singh, K., Jha, G., Garg, T., Goel, S., Sharma, A., Shukla, S. and Verma, Y. (2023). *Performance investigation of bit error rate using mostly utilized modulation schemes in RoF system for the next generation networks.* 2023 IEEE International Conference on Power, Instrumentation, Energy and Control (PIECON), Aligarh, 1–6.

Thakur, P., Bharti, M. (2023). Performance evaluation of 32 channel wavelength division multiplexed radio over fiber (RoF) communication system. *2023 First International Conference on Microwave, Antenna and Communication (MAC)*, Uttar Paradesh, 1–5.

Thomas, V. A., El-Hajjar, M., Hanzo, L. (2015). Performance improvement and cost reduction techniques for radio over fiber communications. *IEEE Communications Surveys ve Tutorials,* 17(2), 627–670.

Xu, G., Liu, J., Liu, W., Chen, Y., Liu, T. and Zhong, S. (2024). Analog predistorter for RoF fronthaul link excited by a 400MHz bandwidth 5G NR signal. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 71(8), 3975–3979.

Yariv, A., Yeh, P. (2007). *Photonics: Optical electronics in modern communications* (6th ed.). New York: Oxford University Press, 38-42.

Yaylalı, H. (2018). 1927'den çok partili döneme kadar Türkiye'de radyo yayıncılığı. *İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi,* 10(1), 33-50.

Yıldız, N. (2016). *Radyo frekans (RF) sinyallerinin fiber optik kablolardan iletimi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Ankara, 98-102.

Younis, L., Essa, E. (2022). *Radio over Fiber (RoF) techniques: A survey.* 2022 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, 1–5.



Gazili olmak ayrıcalıktır…