

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İŞBİRLİKLİ AĞLARDA ÇEŞİTLEME İÇİN TAŞIYICI
İNTERFEROMETRİ OFDM’NİN DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ
İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE SİSTEM BAŞARIMININ
İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Bilgin YAZLIK**

**Danışman
Prof. Dr. Cebrail ÇİFLİKLİ**

Doktora Tezi

**Ocak 2021
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**İŞBİRLİKLİ AĞLARDA ÇEŞİTLEME İÇİN TAŞIYICI
İNTERFEROMETRİ OFDM’NİN DALGACIK
DÖNÜŞÜMÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE SİSTEM
BAŞARIMININ İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Bilgin YAZLIK**

**Danışman
Prof. Dr. Cebail ÇİFLİKLİ**

**Ocak 2021
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Adı-Soyadı: Bilgin YAZLIK

İmza:

İşbirlikli Ağlarda Çeşitleme İçin Taşıyıcı İnterferometri OFDM'nin Dalgacık Dönüşümü ile Gerçekleştirilmesi ve Sistem Başarımının İncelenmesi adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Bilgin YAZLIK

Danışman

Prof. Dr. Cebail ÇİFLİKLİ

Elektrik - Elektronik Mühendisliği ABD Başkanı

Prof. Dr. Ömer Galip Saraçoğlu

Prof. Dr. CebraİL ÇİFLİKLİ danışmanlığında **Bilgin YAZLIK** tarafından hazırlanan “İşbirlikli Ağlarda Çeşitleme İçin Taşıyıcı İnterferometri OFDM’nin Dalgacık Dönüşümü ile Gerçekleştirilmesi ve Sistem Başarımının İncelenmesi” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

21/01/2021

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. CebraİL ÇİFLİKLİ

Üye : Prof. Dr. Nurhan KARABOĞA

Üye : Prof. Dr. Şaban ÖZER

Üye : Prof. Dr. Osman ÖZSOY

Üye : Doç. Dr. Esmâ UZUNHİSARCIKLİ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi olan Sayın Hocam Prof. Dr. Cebail ÇİFLİKLİ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmalarım süresince bana destek veren Tez İzleme Komisyonu üyelerinden olan Prof. Dr. Nurhan Karaboğa'ya ve Prof. Dr. Şaban Özer'e teşekkür ederim.

Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen başta eşim Egemen olmak üzere kızım Bilge ve oğlum Ege'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bilgin YAZLIK

Kayseri, Ocak 2021

İŞBİRLİKLİ AĞLARDA ÇEŞİTLEME İÇİN TAŞIYICI İNTERFEROMETRİ OFDM’NİN DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE SİSTEM BAŞARIMININ İNCELENMESİ

Bilgin YAZLIK

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Ocak 2021

Danışman: Prof. Dr. Cebail ÇİFLİKLİ

ÖZET

Kablosuz haberleşme sistemlerinde, kanal yapısından dolayı sönümlenme etkileri gözlemlenmektedir. Sönümlenme etkisi, sistemin bir bütün olarak performansını düşürmektedir. Sönümlenme etkisiyle yapılan mücadele uzun yıllardır devam etmektedir. Bu mücadele için kullanılan önemli bir yöntem de çeşitleme tekniğidir. Bu teknik ile alıcıdan vericiye iletilmek istenen işaretin birden fazla kopyası alıcıya zaman, frekans veya uzaysal farklılıklarla iletilmektedir. İşaretin farklı sönümlenme etkisine maruz kalmış birden fazla kopyasına sahip olan alıcı, bu işaretleri farklı yöntemlerle birleştirerek, sönümlenmenin etkisini azaltabilmektedir.

Kablosuz sistemlerde Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) oldukça yaygın bir biçimde kullanılan bir modülasyon yöntemidir. OFDM yönteminin performansını artırmak için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de taşıyıcı interferometri (CI) kodları kullanılarak işaretin yayılmasını ve tekrar toparlanmasını sağlamaktır. Taşıyıcı interferometri kodlarının OFDM sisteminin performansını artırdığı bilinmektedir. Taşıyıcı interferometri kodlarının OFDM sistemi üzerindeki performansının Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yerine Dalgacık dönüşümü kullanılması ile arttığı da bilinmektedir.

Bu çalışmada bir verici, bir aktarıcı ve bir alıcı içeren, üç farklı kanal üzerinden uzaysal çeşitleme sağlayarak iletişim kuran bir işbirlikli kablosuz sisteme, sistemin performansını iyileştirmek amacıyla dalgacık dönüşümü destekli taşıyıcı interferometri kodları literatürde ilk defa entegre edilmiş ve sistemin performansı bit hata olasılığı (BER) performansı ile Tepe Ortalama Güç Oranı (PAPR) kullanılarak incelenmiştir. Önerilen

sistem kuvvetlendir ve aktar (AAF), çöz ve aktar (DAF) aktarım stratejileri ile eşit oran birleştiricisi (ERC), sabit ortan birleştiricisi (FRC), işaret / gürültü oranı birleştiricisi (SNRC), güçlendirilmiş işaret / gürültü oranı birleştiricisi (ESNRC) ve Rayleigh sönümlemeli kanal kullanılarak analiz edilmiştir.

Bu tez kapsamında ilk defa önerilen dalgacık tabanlı yeni sistemin hem BER performansının hem de PAPR performansının literatürde mevcut olan geleneksel sistemler ile kıyaslandığında benzetim çalışmalarında kullanılan tüm aktarım stratejileri ve birleştirme yöntemleri için belirgin bir biçimde iyileştiği tespit edilmiştir. Önerilen sistemde gerçekleştirilen BER analizine göre sistemin SNR değeri yükseldikçe daha iyi BER performansı sergilenmektedir. Önerilen sistemde yer alan aktarıcının konumunun sistem performansına olan etkisi de bu çalışmada incelenmiştir. Ayrıca yine bu tez çalışması kapsamında önerilen yeni sistemin fayda / maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Fayda / maliyet analizi neticesinde sistemin artan performansına karşılık yükselen işlemsel karmaşıklık nedeniyle tükettiği enerji miktarında artış olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: işbirlikli ağ, çeşitleme, taşıyıcı interferometri, dalgacık dönüşümü, OFDM.

**REALIZATION OF CARRIER INTERFEROMETRY OFDM FOR
COOPERATIVE DIVERSITY BY WAVELET TRANSFORM AND
INVESTIGATION OF SYSTEM PERFORMANCE**

Bilgin YAZLIK

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, January 2021

Supervisor: Prof. Dr. Cebraill CIFLIKLI

ABSTRACT

Because of the nature of wireless communication systems, fading effects occurs in the system. Fading effect reduces the system's overall performance. To combat with fading effects on the system is an important problem for the system designers, an effective method to combat fading effect is diversity technique. In this technique, copies of input signals sent to receiver over time, frequency or space differences. Receiver gets more than one input signals which come from different time, space or frequency slots then receiver combines all of these signals to combat fading effects.

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has wide application area in wireless communication systems and it is very important modulation method. To enhance the performance of the OFDM systems, there are many different methods in literature, one of these methods is realized by using carrier interferometry (CI) codes. In this method signal is spreaded and despreading by carrier interferometry codes. Usually, Carrier Interferometry codes applies to systems by FFT, but wavelet can also be used instead of FFT.

In this thesis, for the first time we applied wavelet transform for performance upgrade of the carrier interferometry OFDM system based wireless cooperation network which has one sender, one receiver and one repeater. We investigated the performance of the proposed system in terms of Bit Error Rate (BER) and Peak to Average Power Ratio (PAPR). The proposed system analyzed with Amplitude and Forward (AAF), Decode and Forward (DAF) relaying strategies and Equal Ratio Combiner (ERC), Fixed Ratio Combiner (FRC), Enhanced Signal to Noise Ratio Combiner (ESNRC) and Signal to

Noise Ratio Combiner (SNRC) combining methods by using of Rayleigh Fading Channel.

We observe that both BER and PAPR performance of the proposed system are better than traditional OFDM systems. The system performs better than traditional systems for every relaying strategies and combining methods those are tested in simulations. We also observe that the proposed system's BER performance gets better with high SNR values. In the thesis we also investigated the effect of the relay position on the system performance. According to cost benefit analysis, despite performance gain, we observe that the proposed system needs high energy then traditional systems, because of increase in computational complexity.

Keywords: cooperative network, diversity, carrier interferometry, wavelet, OFDM.

İÇİNDEKİLER

İŞBİRLİKLİ AĞLARDA ÇEŞİTLEME İÇİN TAŞIYICI İNTERFEROMETRİ OFDM’NİN DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ İLE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE SİSTEM BAŞARIMININ İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	iii
KABUL ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER	x
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xiii
TABLolar LİSTESİ.....	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvi
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

1.1 İş Birliğinin Temelleri	5
1.2 Doğada İş Birliği.....	6
1.3 İş Birliğinde Kazanç – Kayıp İlişkisi	7
1.4 İş Birliğinin Teşvik Edilmesi	9
1.5 Kablosuz İletişim Sistemlerinde İş Birliği.....	10
1.6 Kablosuz İşbirlikli Ağlar	10
1.7 İşbirlikli Ağlarda Senkronizasyon	15
1.8 Kablosuz Kanallarda Çeşitleme.....	18
1.9 Çeşitleme Teknikleri	21
1.9.1 Zaman Çeşitleme.....	22
1.9.2 Frekans Çeşitleme.....	23
1.9.3 Uzaysal Çeşitleme	24
1.9.4 İşbirlikli Çeşitleme.....	25

1.9.5 İşbirlikli Çeşitlemenin Avantajları	27
---	----

2. BÖLÜM

AKTARMALI KANALLAR VE AKTARIM STRATEJİLERİ

2.1 Aktarmalı İletişimin Temelleri.....	32
2.2 Yarı Dubleks ile Tam Dubleks Aktarmalı İletişim Kıyaslanması	34
2.3 Aktarım Protokolleri.....	34
2.3.1 Kuvvetlendir ve Aktar (AAF) Aktarma Protokolü	36
2.3.1.1 AAF Tekniğinin Alt Modelleri.....	39
2.3.1.2 Blok Sönümlemeli Kanallarda AAF Teknikleri	41
2.3.1.3 Dikgen Olmayan Kuvvetlendir ve Aktar (NAF).....	42
2.3.2 Çöz ve Aktar (DAF) Aktarma Protokolü	43
2.3.3 Sıkıştır ve Aktar (CAF) Protokolü	46
2.3.4 Kodlanmış Aktarma Protokolü	48
2.3.5 Adaptif İş Birliği Stratejileri.....	49
2.3.6 Seçici DAF Aktarım.....	49
2.3.7 Artırımlı Aktarma	50

3. BÖLÜM

ÇEŞİTLEME BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

3.1 Eşit Oran Birleştiricisi (ERC)	56
3.2 Sabit Oran Birleştiricisi (FRC)	57
3.3 İşaret – Gürültü Oranı Birleştiricisi (SNRC)	59
3.4 En Yüksek Oran Birleştiricisi (MRC)	60
3.5 Geliştirilmiş İşaret – Gürültü Oranı Birleştirmesi (ESNRC)	63

4. BÖLÜM

TAŞIYICI İNTERFEROMETRİ VE CI DALGACIK TABANLI OFDM

4.1 Taşıyıcı İnterferometri İşaret Yapısı	64
4.2 Taşıyıcı İnterferometri Darbe Şekli.....	66
4.3 Taşıyıcı İnterferometri Kodları.....	66
4.4 Taşıyıcı İnterferometri OFDM Sistemi	73

4.5 Taşıyıcı İnterferometri-FFT OFDM Sistemi	75
4.6 Taşıyıcı İnterferometri OFDM'nin Dalgacık Dönüşümü ile Gerçekleştirilmesi	78

5. BÖLÜM

İŞBİRLİKLİ BİR AĞDA DALGACIK TABANLI TAŞIYICI İNTERFEROMETRİ OFDM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ

5.1 Önerilen Sistem Modeli.....	83
5.2 MATLAB'de Dalgacık Dönüşümleri.....	87
5.3 Benzetim Çalışması Parametreleri	88
5.4 Aktarım Stratejisi Performans Analizi	89
5.4.1 Klasik İşbirlikli Ağın Aktarım Stratejisi Performans Analizi	90
5.4.2 Önerilen Sistemin Aktarım Stratejisi Performans Analizi.....	95
5.5 Birleştiricinin Önerilen Sistem Performansı Üzerindeki Etkisinin Analizi...	99
5.6 Aktarıcı Konumunun Klasik ve Önerilen Sistem Performansına Etkisinin Analizi.....	102
5.7 İşlemsel Karmaşıklık Analizi	106
5.8 Farklı Modülasyon Türlerinin Önerilen Sistem Performansı Üzerindeki Etkisinin Analizi	108
5.9 Farklı Dalgacık Filtrelerinin Önerilen Sistem Performansı Üzerindeki Etkisinin Analizi	111
5.10 Önerilen Sistemin Farklı Veri Büyüklükleri İçin Performans Analizi	113
5.11 Önerilen Sistemin Tepe - Ortalama Güç Oranı (PAPR) Analizi.....	115

6. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Tartışma	117
6.2 Sonuç ve Öneriler	118
KAYNAKÇA	120
ÖZGEÇMİŞ.....	126

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Kısaltma</u>	<u>Anlamı</u>
AAF	Kuvvetlendir ve Aktar
ARQ	Otomatik Cevaplama Talebi
AWGN	Eklemeli Beyaz Gauss Gürültüsü
BER	Bit Hata Olasılığı
BPSK	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama
BFNAF	Blok Sönümlemeli Dikgen Olmayan Kuvvetlendir ve Aktar
CAF	Sıkıştır ve İlet
CDMA	Kod Bölmeli Çoğullama
CI	Taşıyıcı İnterferometri
CI-OFDM	Taşıyıcı İnterferometri OFDM
CI-FFT-OFDM	FFT Tabanlı Taşıyıcı İnterferometri OFDM
DAF	Çöz ve İlet
dB	Desibel
DMT	Çeşitleme – Çoğullama Takası
ERC	Eşit Oran Birleştirmesi
ESNRC	Geliştirilmiş İşaret-Gürültü Oranı Birleştirmesi
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
FRC	Sabit Oran Birleştirmesi
GÇEK	Genelleştirilmiş Geri Beslemeli Çoklu Erişimli Kanal
GSC	Genelleştirilmiş Seçim Birleştirmesi
GSM	Küresel Mobil Sistem
IDFT	Ters Ayrık Fourier Dönüşümü
IFTT	Ters Hızlı Fourier Dönüşümü
ISI	Simgeler Arası Girişim
MIMO	Çok Girişli Çok Çıkışlı
MRC	En Yüksek Oranlar Birleştiricisi
NAF	Dikgen Olmayan Kuvvetlendir ve Aktar
OFDM	Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama
PAPR	Tepe-Ortalama Güç Oranı
QPSK	Karesel Faz Kaydırmalı Anahtarlama

SCF	Basit Sıkıştır ve Aktar
SNR	İşaret-Gürültü Oranı
SNRC	İşaret-Gürültü Oranı Birleştirmesi
TCP	İletim Kontrol Protokolü
TDMA	Zaman Bölmeli Çokullama
UMTS	Evrensel Mobil İletişim Sistemleri
WLAN	Kablosuz Yerel Ağ



TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Çeşitleme Teknikleri.....	21
Tablo 2.1. Çöz ve Aktar Tipi Blok Yapısı	44
Tablo 5.1. Dalgacık Dönüşümü Filtreleri	87
Tablo 5.2. Benzetim Çalışması Parametreleri.....	89
Tablo 5.3. Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF ile AAF Stratejisi Kullanımındaki BER Performans Verileri (QPSK Modülasyonu İçin).....	93
Tablo 5.4. Benzetim Çalışması Parametreleri.....	93
Tablo 5.5. Tablo Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF ile AAF Stratejisi Kullanımındaki BER Performans Verileri (BPSK Modülasyonu İçin)	94
Tablo 5.6. Benzetim Çalışması Parametreleri (Şekil 5.5).....	95
Tablo 5.7. Önerilen Sistemin AAF Stratejisi BER Performans Verileri	96
Tablo 5.8. Klasik Sistemin AAF Stratejisi BER Performans Verileri	97
Tablo 5.9. Önerilen Sistemin DAF Stratejisi Performans Verileri	98
Tablo 5.10. Klasik Sistemin DAF Stratejisi Performans Verileri.....	99
Tablo 5.11. Benzetim Çalışması Parametreleri.....	99
Tablo 5.12. Benzetim Çalışması Parametreleri.....	101
Tablo 5.13. Aktarıcının Konumunun Sistem Performansı Etkisi BER Verileri	105
Tablo 5.14. Benzetim Çalışması Parametreleri.....	105
Tablo 5.15. İşlemsel Karmaşıklık Sonuçları	107
Tablo 5.16. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin QPSK Modülasyonu BER Verileri..	109
Tablo 5.17. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin BPSK Modülasyonu BER Verileri..	110
Tablo 5.18. Benzetim Çalışması Parametreleri.....	110
Tablo 5.19. Benzetim Çalışması Parametreleri.....	111
Tablo 5.20. Önerilen Sistemin Farklı Dalgacık Filtreleri İçin BER Verileri	112
Tablo 5.21. Önerilen Sistemin Farklı Veri Büyüklükleri İçin BER Verileri	114
Tablo 5.22. Benzetim Çalışması Parametreleri.....	116

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. İş Birliği Düzlemi	9
Şekil 1.2. K Adet Kullanıcının ve Baz İstasyonunun Varlığından Oluşan İşbirlikli Hücresel Ağ Modeli	12
Şekil 1.3. İşbirliksiz ve İşbirlikli Ağ Modellerinin Kıyaslanması	13
Şekil 1.4. İşbirlikli Bir Ağın Modeli	14
Şekil 1.5. Kablosuz İşbirlikli Ağ Modeli	17
Şekil 1.6. İki Vericili Bir Kullanıcı – İş Birliği Modeli	27
Şekil 1.7. Kablosuz İşbirlikli İletişim Sisteminin (a) Paralel Aktarıcılar (b) Seri Aktarıcılar ile Gösterimi	28
Şekil 2.1. Doğrudan, İki – Atlamalı ve Aktarmalı İletişim Şemaları.....	31
Şekil 2.2. Üç Terminalli Bir Aktarmalı Kanal. Kaynak (A), Aktarıcı (A) ve Hedef (H) Gösterilmektedir.	32
Şekil 2.3. Basite İndirgenmiş Bir İş birliği Modeli.....	36
Şekil 2.4. (a) İşbirlikli Model (i) Çöz ve Aktar (ii) Kuvvetlendir ve Aktar.....	40
Şekil 3.1. Seçim Birleştiricisi	54
Şekil 3.2. En Yüksek Oran Birleştirme	55
Şekil 3.3. Örnek Bir Tek Aktarıcılı İşbirlikli Ağ Modeli.....	56
Şekil 3.4. Eşit Oran Birleştiricisi Sistem Modeli	57
Şekil 3.5. Sabit Oran Birleştirmesi.....	58
Şekil 3.6. İşaret – Gürültü Oranı Birleştirmesi	60
Şekil 3.7. MRC Birleştirici Modeli	61
Şekil 4.1. CI İşaretinin Frekans Ekseninde Gösterimi	65
Şekil 4.2. CI İşaretinin Zaman Ekseninde Gösterimi	65
Şekil 4.3. Taşıyıcı İnterferometri Darbe Üretici	66
Şekil 4.4. Taşıyıcı İnterferometri Kodlu BPSK OFDM'nin İletim Zarfı	68
Şekil 4.5. CI Kodlu QPSK OFDM'nin İletim Zarfı	69
Şekil 4.6. Taşıyıcı İnterferometri Kodlu 16QAM OFDM'nin İletim Zarfı	71
Şekil 4.7. Taşıyıcı İnterferometri Kodlu 64QAM OFDM'nin İletim Zarfı	72
Şekil 4.8. Taşıyıcı İnterferometri OFDM Vericisinin Yapısı	74
Şekil 4.9. Taşıyıcı İnterferometri OFDM Alıcısının Yapısı	74
Şekil 4.10. CI-FFT/OFDM Verici Yapısı	76
Şekil 4.11. Taşıyıcı İnterferometri - FFT/OFDM Alıcı Yapısı	77

Şekil 4.12. Taşıyıcı İnterferometri - FFT OFDM Sistem Modeli	77
Şekil 4.13. Taşıyıcı İnterferometri - Dalgacık OFDM Sistem Modeli	80
Şekil 4.14. CI – Dalgacık OFDM Sistem ile CI – FFT OFDM Sistemin BER Parametresi ile Kıyaslanması (Kanal: Rayleigh)	80
Şekil 4.15. CI – Dalgacık OFDM Sistem ile CI – FFT OFDM Sistemin BER Parametresi ile Kıyaslanması (Kanal: Rician)	81
Şekil 5.1. Önerilen Sistem Modeli	86
Şekil 5.2. Önerilen Modelin Uygulandığı İşbirlikli Ağ Modeli	86
Şekil 5.3. Dalgacık Dönüşüm Tablosu	88
Şekil 5.4. Klasik Bir İşbirlikli Ağın AAF Kullanımında Farklı Birleştiriciler İçin BER Performans Grafiği (QPSK Modülasyonu İçin)	90
Şekil 5.5. Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF Kullanımında Farklı Birleştiriciler İçin BER Performans Grafiği (QPSK Modülasyonu İçin)	91
Şekil 5.6. Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF ile AAF Stratejisi Kullanımındaki BER Performans Grafiği (QPSK Modülasyonu İçin)	92
Şekil 5.7. Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF ile AAF Stratejisi Kullanımındaki BER Performans Grafiği (BPSK Modülasyonu İçin)	94
Şekil 5.8 Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin AAF Performans Grafiği	96
Şekil 5.9. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin DAF Performans Grafiği	98
Şekil 5.10. Önerilen Sistemin AAF Kullanımında Farklı Birleştiriciler İçin Performans Grafiği	100
Şekil 5.11. Önerilen Sistemin DAF Kullanımında Farklı Birleştiriciler İçin Performans Grafiği	101
Şekil 5.12. Aktarıcının Konumunun Klasik Bir İşbirlikli Ağda Sistem Performansı Üzerindeki Etkisi	102
Şekil 5.13. Aktarıcının Konumunun Önerilen Sistem Performansı Üzerindeki Etkisi	103
Şekil 5.14. Aktarıcının Konumunun Sistem Performansı Üzerine Etkisi (Klasik Sistem ile Önerilen Sistemin Kıyaslanması)	104
Şekil 5.15. Benzetim Çalışmalarında Kullanılan Aktarıcı Konumu Modeli	106
Şekil 5.16. Önerilen Sistemin İşlemsel Karmaşıklık Analizi (Saniye)	107
Şekil 5.17. Önerilen Sistemin BPSK ve QPSK Modülasyonları İçin BER Grafiği	108
Şekil 5.18. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin BPSK ve QPSK Modülasyonları İçin BER Grafiği	109

Şekil 5.19. Önerilen Sistemin Farklı Dalgacık Filtreleri BER Grafiği	112
Şekil 5.20. Önerilen Sistemin Farklı Dalgacık Filtreleri İçin BER Grafiği	113
Şekil 5.21. Önerilen Sistemin Farklı Veri Büyüklükleri İçin BER Grafiği	114
Şekil 5.22. Önerilen Sistemin PAPR Performansı	116



GİRİŞ

İnsan sosyal bir varlıktır ve bu sosyal yapının bir sonucu olarak insan çevresi ile sürekli etkileşim ve iletişim halindedir. İnsanoğlunun haberleşme ihtiyacı onu bu konuda sürekli yeni teknolojiler geliştirmeye teşvik etmiştir. Özellikle son yıllarda meydana gelen teknolojik gelişmeler haberleşme alanında da kendisini göstermiştir. Elektrik sinyalleri ile haberleşme kablolu olarak başlamış ve teknolojik gelişmeler sayesinde kablosuz olarak devam etmiştir. Kablosuz iletişim artık hayatımızın her alanına girmiş durumdadır. Kablosuz iletişime yönelen bu büyük ilgi bu alandaki gelişmeleri hızlandırmaktadır. İnsanların ve insanların kurdukları dijital sistemlerin her geçen gün daha da artan iletişim hızı ve kalite talepleri bu alandaki gelişmelerin temelini oluşturmaktadır. Fakat artan taleplere rağmen kullanılan kaynakların limitli olması bu alandaki gelişmeleri sınırlandırmaktadır. Kablosuz iletişimdeki dikkate değer ilerlemeler günümüzde göze çarpmaktadır. İnsanların sadece kısa mesaj veya ses ile iletişim kurmakla yetinmedikleri, görüntülü ve hatta karşılıklı etkileşimli iletişim yöntemlerini tercih ettikleri görülmektedir. Yeni tarz iletişim yöntemleri kullanılan bant genişliğinin artırılmasını gerektirmekte ve bu da ancak çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistemler ile sağlanabilmektedir. MIMO sistemlerin kurulabilmesi için alıcı ve verici tarafta çok sayıda antene ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu çok antenli mimariler cihazların ebatlarının büyümelerine yol açmaktadır ki bu da istenmeyen bir durumdur. Kablosuz sistemlerin daha etkin kullanımını sağlamak, sistem performansını artırmak ve kaynakları daha verimli kullanmak için geliştirilmiş iletim yöntemlerinden birisi de Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM)'dir. OFDM, günümüzde oldukça yaygın biçimde kullanılan bir iletişim yöntemidir.

OFDM kullanılarak gerçekleştirilen kablosuz iletişimde yüksek Tepe Ortalama Güç Oranı (PAPR) problemi görülmektedir. OFDM yönteminin performansını artırmak, PAPR oranını düşürmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır, bu yöntemlerden biri de taşıyıcı interformetri (CI) kodları kullanılarak işaretin yayılmasını ve tekrar toparlanması-

nı sağlamaktır. Taşıyıcı interferometri kodlarının OFDM sisteminin performansını artırdığı bilinmektedir. CI kodlarının kullanımı ile, Ters Hızlı Fourier Dönüşümü (IFFT) uygulanması nedeniyle işarete oluşmuş tepeler yok edilir ve tek taşıyıcılı sistem gibi yeni salınımlar oluşturulur.

Taşıyıcı İnterferometri OFDM sistemler, taşıyıcı interferometri kodları yerine Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanımı ile de gerçekleştirilebilmektedir. Bu yöntemle gerçekleştirilmiş sistemler, herhangi bir performans kaybına yol açmadan daha düşük enerji gereksinimi ile çalışmaktadırlar. Daha önce tarafımızca yapılan yüksek lisans tez çalışmasında FFT kodları yerine literatürde ilk defa dalgacık dönüşümü uygulanmıştır. Bu yöntemde, verici tarafından gönderilen işaret OFDM için IFFT'ye tabi tutulduktan sonra taşıyıcı interferometri etkisi oluşturmak için tekrar dalgacık yayılımına tabi tutulmaktadır. Alıcı tarafta ise alınan işaret önce dalgacık toparlamaya ve ardından da FFT'ye tabi tutulmaktadır. Elde edilen neticeler göstermiştir ki önerilen sistem her ne kadar yüksek güç gerektirse de buna karşılık yüksek performans sergilemektedir.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde, kanalın yapısından dolayı oluşan ve sinyal kalitesini olumsuz etkileyen sönümlenme etkileri bulunmaktadır. Sönümlenme etkisi, sistemin bir bütün olarak performansını düşürmektedir. Sönümlenme etkisiyle yapılan mücadele uzun yıllardır devam etmektedir. Bu mücadele için kullanılan önemli bir yöntem de çeşitleme tekniğidir. Bu teknik ile vericiden alıcıya iletilmek istenen işaretin birden fazla kopyası alıcıya zaman, frekans veya uzaysal farklılıklarla iletilmektedir. İşaretin birden fazla farklı sönümlenme etkisine maruz kalmış kopyasına sahip olan alıcı, bu işaretleri farklı yöntemlerle birleştirerek, sönümlenme etkisini azaltabilmektedir. Bu problemin üstesinden gelebilmek amacıyla iletişim ortamına farklı bir gözle tekrar bakılması gerekmektedir. Dünya hâlihazırda milyonlarca mobil cihazın aynı anda birbirlerine veri gönderip aldığı bir kanal haline gelmiştir. Bu kanalda yer alan tüm cihazlar her an iletim yapmamaktadırlar, yani mobil cihazlar zamanlarının büyük çoğunluğunu pasif olarak geçirmektedirler. Kablosuz işbirlikli iletişimde amaç bu şekilde pasif konumda bekleyen mobil cihazların kendi kapsama alanlarında tezahür eden kablosuz iletişime destek verecek şekilde katılımlarını sağlamaktır. Bu sayede alıcı ile verici arasında konumlanan ve pasif konumda bulunan tüm mobil cihazlar birer aktarıcı olarak çalışabilmektedirler. Bu sayede gönderilmek istenen işaretin birden fazla kopyası uzaysal çeşitleme etkisi

oluşturan işbirlikli çeşitleme yöntemi ile alıcıya iletilmektedir. Sönümlene etkileri ile mücadele etmek için kullanılan yöntemlerden birisi de işbirlikli iletişimidir. İşbirlikli iletişim görece yeni sayılacak bir iletişim yöntemidir. Yöntemin vadettiği kazanımlar, gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılacağına işaret etmektedir. Kablosuz işbirlikli iletişim ortamında en az bir verici, bir alıcı ve bir de aktarıcı nokta bulunmaktadır. Aktarıcı nokta, alıcı ile verici arasındaki iletişimi dinleyen, destek vermek amacıyla aldığı işareti farklı stratejiler ile aktarıcıya aktaran cihazdır. Aktarıcı bu sayede farklı sönümlene etkisine maruz kalmış bir işaret kopyasını alıcıya iletmektedir. Oluşan bu yapı en basit tabirle alıcı ile verici arasında MIMO kanalını gerçekleştirmektedir. Alıcıya ulaşan birden fazla sayıdaki işaretin birleştirilmesi ile uzaysal çeşitleme kazancı elde edilmektedir. İşbirlikli iletişim veri iletim hızlarına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Bu sayede 5. nesil kablosuz iletişim tekniği işbirlikli iletişime dayanmaktadır. İşbirlikli iletişim her ne kadar veri hızlarını artırıyor olsa da buna karşılık tüketilen enerji miktarlarında da artışa yol açmaktadır.

Bu doktora tezi ile ilk defa; bir verici, bir aktarıcı ve bir alıcı içeren yani toplamda üç farklı kanal üzerinden uzaysal çeşitleme sağlayarak iletişim kuran bir kablosuz işbirlikli iletişim sistemine dalgacık dönüşümü destekli taşıyıcı interferometri kodları entegre edilmiştir. Sistemin bit hata olasılığı performansının ve tepe ortalama güç oranı performansının, farklı aktarım stratejileri ve birleştirme metotlarının tamamı için belirgin bir biçimde iyileştiği tespit edilmiştir. Benzetim çalışmaları kapsamında, aktarıcının konumunun sistem performansı üzerindeki etkisi de ayrıca incelenmiştir. Ancak sistemin tükettiği enerji miktarında da önemli bir artış söz konusu olmuştur. Çalışma kapsamında önerilen yeni sistemin fayda / maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistemin performansı bit hata olasılığı ve tepe ortalama güç oranı açısından MatLab ortamında simüle edilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları neticesinde önerilen sistemin geleneksel sistemlere göre BER ve PAPR açısından belirgin bir biçimde daha iyi performans sergilediği ortaya konulmuştur. Fakat işlemsel karmaşıklık açısından önerilen sistem dezavantajlı konumda bulunmaktadır. Dalgacık dönüşümlerinin meydana getirdiği ekstra işlem yükü hem zaman hem de işlem yükü kaybına neden olmaktadır. Yani sistem bir kazanca karşılık başka bir noktada bir kayba uğramaktadır. Bu doktora çalışması ile elde edilen bulguların literatürde yeni araştırma alanları oluşturması hedeflenmektedir.

Gerçekleştirilen bu doktora çalışmasının kablosuz haberleşmenin geleceğine katkı sunacağı umulmaktadır.

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bilgiler ve literatür özeti sunulmaktadır. Bu bölümde iş birliğinin temelleri, iş birliği türleri, kablosuz işbirlikli ağlar, işbirlikli kablosuz ağların çeşitleme bileşenleri konuları tez konusunun temeli olmaları nedeni ile verilmektedir. İkinci bölümde benzetim çalışmalarında sıklıkla kullanılan aktarım stratejilerinin takdimi için aktarmalı kanallar ve aktarım stratejileri sunulmaktadır. Üçüncü bölümde benzetim çalışmalarında kullanılan birleştirme yöntemleri ele alınmaktadır. Dördüncü bölümde önerilen sistemin temelini oluşturan taşıyıcı interferometri kodları ve dalgacık dönüşümü ile gerçekleştirilen sistem sunulmaktadır. Beşinci bölüm tezin benzetim çalışmalarının ve sonuçlarının takdim edildiği bölümdür. Bu bölümde yapılan benzetim çalışmaları detaylıca anlatılmış, benzetim sonuçları verilmiştir. Altıncı ve son bölümde ise elden edilen bulgular değerlendirilmiş, önerilen sistemin avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde tez konusunun temelini teşkil ediyor olması nedeni ile iş birliği kavramının temellerinden, kablosuz iletişimde iş birliğinden, işbirlikli iletişimde temel sınırlardan, çeşitleme tekniklerinden ve kablosuz işbirlikli ağlarda çeşitleme bileşenlerinden bahsedilmektedir.

1.1 İş Birliğinin Temelleri

İş birliği kelimesinin İngilizce karşılığı olan “cooperate” terimi Latince bir kelimedir ve “co” ile “operate” kelimelerinin birleşiminden meydana gelmektedir. Kelimenin anlamı “birlikte çalışmak” demektir. İş birliği, bir grup unsurun, hep birlikte, genel veya özel bir amaç için birlikte hareket etmeleri stratejisidir [1]. İş birliği stratejisinin arkasında yatan temel fikir, iş birliği içerisinde olan her bir unsurun ortaklaşa icra edilen faaliyetten ortak çıkar elde etmeleridir [1]. İş birliği, fedakârlık ederek, paylaşarak ya da izin vererek bazı avantajlar elde etme hareketi olarak görülebilir. İş birliği insanlar ve hayvanlar âleminde oldukça sık bir biçimde uygulanmaktadır. Bu çalışma ile iş birliğinin kablosuz iletişimde çeşitleme kazancına sunduğu katkı ele alınmaktadır. İş birliği terimi her ne kadar tüm unsurların yardımlaştığı stratejiyi ifade etse de bu çalışmada tüm bileşenlerin hem yardımlaştığı hem de kazanç elde ettiği strateji ele alınacaktır [1].

İş birliği stratejisi, her şart altında ne olursa olsun yardımlaşmayı ifade etmez. Bazı şartlar altında sistemde yer alan bileşenler, kendilerine fayda sağlamayacağını düşündükleri konularda yardımlaşmazlar [2]. Bu da aslında iş birliğinin temelinde egoist bir yaklaşım olduğunu göstermektedir. Yani, tüm unsurların ortak çıkarları olmadığı sürece işbirlikli bir ağ oluşturmak söz konusu değildir [6].

Doğal ve insan yaşamında var olan iş birliği modellerinin bazıları, kablosuz iletişimde de uygulanabilmektedir. Kablosuz iletişimdaki iş birliği ile doğal yaşamdaki iş birliği sonuç

itibarıyla birbirlerine oldukça benzerdirler. Tabii yaşamda iş birliği çok küçük ölçekten çok büyük ölçeğe kadar oldukça farklı senaryolarda gerçekleşebilmektedir. Küçük ölçekli iş birliği içeren sistemler arasında da sistemler arası iş birlikleri söz konusu olmaktadır. Benzer durum, kablosuz iletişim için de geçerlidir. Temel iletişim noktaları iş birliği yaparak bir sistemi oluştururlar [6]. Ardından da sistemler birbirleri ile iş birliği yaparak daha büyük sistemleri oluştururlar. Böylece küresel anlamda işbirlikli ağlar kurulabilir. Böylesi ultra büyük işbirlikli ağlar sayesinde iletişimin teknik ve insani bakış açılarından iyileşmesi sağlanmaktadır [1].

1.2 Doğada İş Birliği

Tabiatta iş birliğinin çok sayıda örneği vardır. Karıncalar, termitler, arılar, avlanan aslanlar, kurtlar ve hatta insanlar arasında iş birliği söz konusudur. Tabiatta, türler arası iş birliği de söz konusudur. Örneğin birlikte yaşam örneği sergileyen mantar ve yosunlar bu konuya güzel bir örnektir. Farklı unsurların iş birliği yaptığı durumlarda, tarafların kazançları birbirlerinden farklı olabilir. Mesela kimi tür gıda elde ederken bir diğeri iş birliğine karşılık güvenlik elde edebilir. Doğadan vampir yarasaların işbirlikli yaşamlarına dair bir örnek ilk olarak Wilkinson tarafından [3]'te incelenmiştir.

Vampir yarasalar genel itibarıyla büyük kitleler halinde hareket ederler ve zamanlarının büyük çoğunluğunu ağaçlarda asılı olarak geçirirler. Gece boyunca ise bir şekilde vücutlarında kanayan yaraları olan hayvanları ararlar. Hedefledikleri özelliklerde bir hayvan bulunca da kanayan yara üzerinden içebildikleri kadar çok kan içerler.

Yarasalar, mümkün olduğunca her gün beslenmeye çalışırlar; ancak beslenmedikleri günler de söz konusu olabilmektedir. Fakat bir yarasanın yaşamını devam ettirebilmesi için 60 saatten daha fazla bir süre aç kalmaması gerekmektedir. Bereket ki, yarasalar arasında bu konuda çok önemli bir iş birliği söz konusudur. Fazla beslenen yarasalar, az beslenen yarasalar ile yiyecek paylaşımı yapmaktadırlar [3]. Fakat bu yardımlaşma tek taraflı bir fedakârlıktan ibaret değildir. Zira yarasalar daha önce gıda yardımıyla bulundukları yarasaları kolaylıkla hatırlayabilmektedirler.

Bunun da ötesinde fazla beslendikleri halde kendisinden gıda talebinde bulunulduğunda reddeden yarasaları da tanımlayabilmektedirler [3]. Wilkinson'a göre yarasalar birbirlerinin midelerini yakından takip ederek bu kararları alabilmektedirler. Bu

tespitlerin neticesinde yarasalar, sahtekârlık yapan yarasalara yardımı reddetmekte ve daha önce yardımda bulunmuş olanlara ise ödül olarak yardım etmektedirler. Yarasalar, topluluk içerisinde geliştirmiş oldukları bu iş birliği stratejisi sayesinde 18 yıl gibi bir süre yaşayabilmektedirler [3]. Stratejinin neticesi olarak sahtekârlık yapan, yardım etmeyen yarasalar elenmekte, yardımda bulunan yarasalar ise yaşatılmaktadır. Böylece iş birliğinin neticesi olarak ortaya iş birliği yapan bir yarasa kitlesi çıkmaktadır [1], [3].

1.3 İş Birliğinde Kazanç – Kayıp İlişkisi

Çok genel olarak konuşacak olursak, insanoğlu hayatta hareket ederken n -boyutlu bir kazanç – kayıp ilişkisi denklemini optimize etme güdüsüyle hareket eder [1], [2], [3]. Bu denklemdaki (Eşitlik 1.1) maliyet (C) ve kazanç (I) bileşenleri kârı (P) maksimize edecek şekilde seçmeye gayret edilir. Başka bir deyişle hayatta amaç sabit kazanç şartlarında minimum maliyet ile maksimum kârı elde etmektir. Tüm senaryolar için kazanç aşağıdaki şekilde maliyetten büyük olmalıdır;

$$I - C = P > 0 \quad (1.1)$$

Tarihsel olarak, bu n -boyutlu kitlesel çıkar – kayıp ilişkileri maalesef kültürel olarak bozulmalara yol açmış ve kölelik sistemi gibi sistemlerin gelişmesine neden olmuştur [1]. Kölelik sisteminde, insanların sabit bir kapasitesi (I) olduğu varsayılmış ve kârı (P) maksimize etmenin tek yolunun maliyeti (C) düşürmek olduğu düşünülmüştür. Kölelik sisteminde köle başına kârlılık (P) oldukça düşüktür. Çünkü düşük motivasyon, gözetmen gerekliliği gibi ekstra maliyetler, maliyeti oldukça yükseltmektedir. Bu durumu tolere etmenin yolunu ise insanoğlu çok sayıda köleyi birlikte çalıştırmakta bulmuştur.

Meseleye modern yaşam perspektifinden bakacak olursak, iyi şartlarda mükâfat sistemi ile çalışan insanlar, iş birliği halinde n -boyutlu kazanç – kayıp ilişkisi içerisinde çalışmanın en uygun çözüm olduğu sonucuna varmışlardır ki bu sistemde artık kölelik bir seçenek değildir [1]. Motive edilmiş bir çalışan daha uygun maliyetli daha çok sayıda ürün üretmek için daha çok çalışacaktır ve maliyetleri düşürecektir. İşveren ve işçinin ortak çıkar paydasında karşılıklı menfaat sağlayacak şekilde “iş birliği” içerisinde çalışmaları sayesinde kazanç maksimize ve maliyetler minimize edilecektir.

İş birliğinin değerini ve önemini artıran çok önemli bir husus da şudur ki, iş birliği yapması arzulanan her bir unsur, aynı kapasite karşılığında kendi başına hareket etmesine

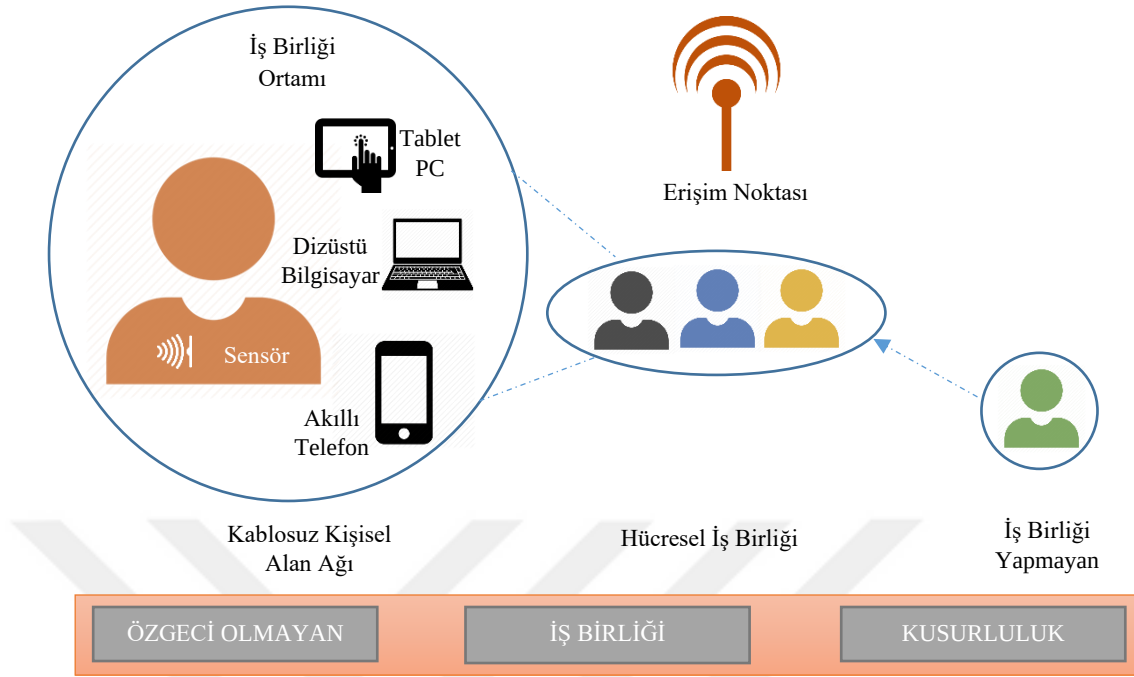
kıyasla iş birliği halinde hareket etmesiyle daha yüksek oranda fayda elde etmelidir [2]. Sistemde yer alan her unsurun, aynı enerjiyi harcaması, aynı kazancı elde ediyor olması gerekmemektedir. Önemli olan bütün sistemin ve bireylerin kendi ölçülerinde kazanç elde ediyor olmalarıdır [2].

İş birliğinin çok sayıda farklı türü mevcuttur. Şekil 1.1’de görüleceği üzere iş birliğinin en yaygın ve bilinen formu özgeci olmayan ya da benmerkezci olmayan olarak adlandırılan türdür [2]. Bu durumda, destek veren unsur, kendi kazançları ile motive edilmez. Fakat diğerlerinin kazançlarını artırmayı amaç edinir. Aslında benmerkezci olmayan yaklaşım, aile kavramının da temelinde yatar.

Kablosuz ortamda, bu senaryo kablosuz kişisel alan ağı olarak adlandırılabilir. Bu ortamda kullanıcının elinin altında birkaç kablosuz aygıt bulunmaktadır [6]. Tüm aygıtlar, aynı kullanıcıya hizmet etmektedir. Tıpkı kovandaki arılar gibi, tüm arılar da aynı kovana hizmet etmektedirler.

Bu ağda, aynı kullanıcı tarafından kullanılan ve bataryası bitmek üzere olan bir aygıtın başka bir aygıt ile iş birliği yapması tek başına değerlendirildiğinde benmerkezci olmayan bir davranış gibi görülebilir. Ancak kişisel kablosuz ağın bir parçası olarak değerlendirildiğinde bu durum benmerkezci bir yaklaşımdır.

İş birliği yapan unsurlar kendi çıkarlarını gözetmeye başladıkları anda bu davranışa artık kusurluluk denilmektedir [1]. Kusurluluk hali, sistemdeki bir unsurun iş birliği yapınca herhangi bir avantaj elde edemeyeceğini hesap etmesi yani tek başına hareket ettiğinde kazancının en yüksek olacağını hesap etmesi ile oluşur. İş birliği ancak, unsurun iş birliği neticesinde daha yüksek kazanç elde edeceğini düşünmesi ile gerçekleşir. Şekil 1.1’de olası iş birliği senaryolarının tamamı bir düzlemde gösterilmiştir [1].



Şekil 1.1. İş Birliği Düzlemi [1]

1.4 İş Birliğinin Teşvik Edilmesi

Bu bölümde, işbirlikli davranışın, seçilen herhangi bir ortamda nasıl teşvik edilebileceği konusu ele alınmaktadır. İnsan türü, iş birliği derecelerine göre değişiklik gösteren çok sayıda alt grubun birleşiminden oluşmaktadır. İlk grup, risklerine rağmen iş birliğine girmeye yatkın olan gruptur. İkinci grup, serbest takılanlar olarak adlandırılan ve asla iş birliğine yönelim göstermeyen gruptur. Üçüncü ve en yaygın olan grup ise iş birliğinin şartlarını analiz eden ve dâhil olup olmamayı kararlaştıran gruptur [1].

Sonuç olarak, kablosuz iletişim sistemlerinin uygulamalarında, aldatıcı davranmanın engellenmesi ya da minimize edilmesi gereken bir davranış olarak karşımıza çıkmıştır [2]. Çünkü aldatıcı davranan ve sadece kendi çıkarları doğrultusunda iş birliği yapan unsurlar, sistemdeki diğer unsurların iş birliği yapma motivasyonunu kırmakta ve sistemin toplam performansına negatif etki etmektedir. Bu nedenledir ki işbirlikli iletişim, hakkaniyet üzerine kurulu olmalıdır ve aldatıcı davranmayı kesin bir biçimde yasaklamalıdır [1].

1.5 Kablosuz İletişim Sistemlerinde İş Birliği

Mühendislik, tabiattaki süreçleri ve olguları, benzetim ile uygulamaya aktararak çoğunlukla başarılı olmaktadır. Evvela, mekanik açılarından bakıldığında, köpek balığı derisi uçaklarda kullanılmak üzere kopyalanmıştır. Mühendislik alanında çok sayıda örnek göstermek mümkündür, internet yönlendirme algoritmaları için karınca davranışları kopyalanmıştır. Burada, doğadaki işbirlikli davranıştan ilham alınarak, işbirlikli davranış modelinin kablosuz iletişim ağlarına uygulanması için gerekli temel konular ele alınmaktadır. İş birliği davranışsal modeli sadece kablosuz iletişim ağlarında değil farklı iletişim ağlarında da kolaylıkla kullanılabilir. Ancak konumuz itibarıyla bu çalışmada işbirlikli davranış modelinin sadece kablosuz iletişim ağlarına uygulanması hususu ele alınmaktadır. Kablosuz iletişimde sıkça kullanılan ve iyi bilinen birçok kavram ve teknik işbirlikli davranış prensipleri kullanılarak rahatlıkla açıklanabilir. Üstelik bu açıklamalarda iş birliğinin özellikle vurgulanması dahi gerekmemektedir. Örnek olarak, ağ protokolleri genel iletişim kurallarını uygulamak zorunda olan iletişim grubunun tüm unsurlarının işbirlikli davranışlarıyla açıklanabilir [6]. İş birliği ve adil sistem birçok dağıtık sistemin temel prensipleridir. Burada, üzerine yoğunlaşılacak temel prensip, iş birliği içerisine giren terminallerin temel iletişim kapasitelerinin artması ve daha az enerji harcanması konusudur [2]. İş birliği yapılıp yapılmaması hususunda, mevcut şartlar değerlendirildikten sonra bir karara varılmaktadır. Bu karar verilirken iş birliği yapması arzu edilen iletişim noktasının iş birliği yapılmayan duruma göre daha fazla kazanç elde ediyor olması beklenir. Benmerkezci yaklaşım sergilendiğinde, örneğin kablosuz iletişim kuran ağda yer alan bir cihaz, hiçbir çıkar elde etmeden ağ ile iş birliği yapıyor ve ağa fayda sağlıyorsa, bu iş birliği sürdürülebilir değildir [1], [2]. Bundan dolayı işbirlikli iletişimin teşvik edilmesi ve sürdürülebilir kılınması için gerekli mekanizmaların tamamının ağın temelinde yer alması istenir.

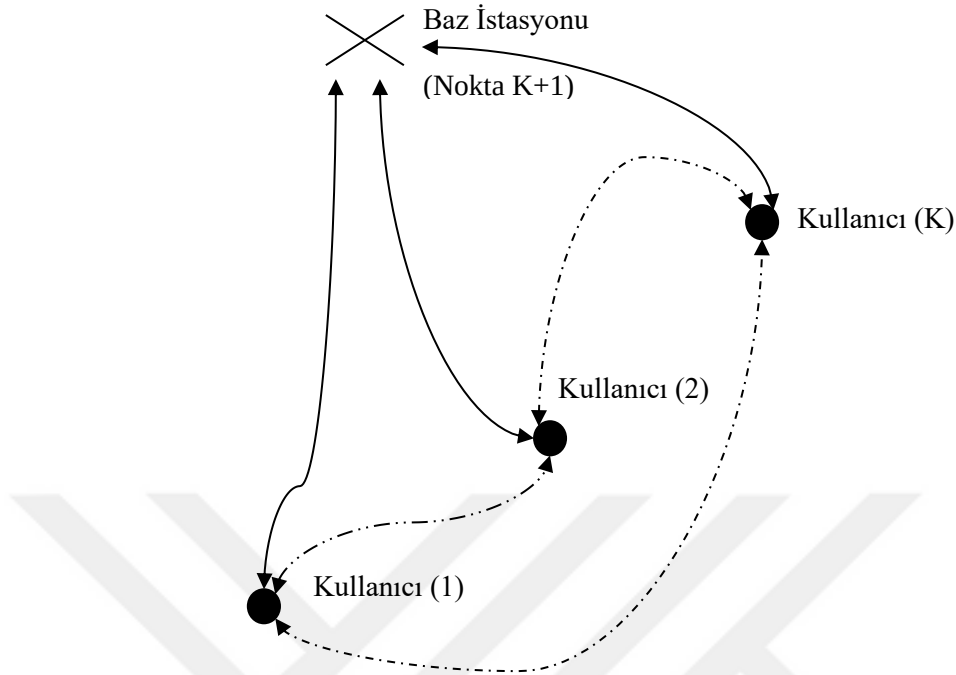
1.6 Kablosuz İşbirlikli Ağlar

İnternet hizmetlerinde her geçen gün artan çeşitlilik, özellikle etkileşimin artması, kablosuz iletişimin gittikçe daha çok talep görmesi gibi hususlar iletişim hızında artış talebi doğurmaktadır [6], [10], [19]. Sonuç olarak daha yüksek iletişim hızına sahip, daha güvenli ve daha az enerji harcayan kablosuz iletişim modelleri için araştırmalar artarak

sürmektedir [34]. Uzay-Zaman Kodlama ve çoğullama gibi verimli uygulamaları bünyesinde barındıran Çok Girişli Çok Çıkışlı (MIMO) sistemlerin gelişmesi ile iletişim teknolojisinde kayda değer bir değişim ve gelişim görülmüştür [9], [28]. MIMO sistemlerde hem kaynak hem de hedefte çok miktarda anten bulunması nedeni ile iletişim güvenilirliği ve bant verimliliği açısından oldukça önemli iyileşme sağlanmaktadır. Bazı istasyonlarındaki hücresele iletişim uygulamaları göz önüne alındığında çoklu anten kullanan modellere kıyasla daha yüksek performans göstermektedirler [28]. Üçüncü nesil hücresele standartlara MIMO halihazırda entegre edilmiştir. Gelişmekte olan kablosuz iletişim standartlarının artık bir unsuru da hiç şüphesiz MIMO teknikleri ve çeşitleridir, örneğin IEEE 802.11, IEEE 802.16 ve IEEE 802.20 [2], [5], [6].

Hücresele iletişimin yaygınlaşması ve taşınabilir cihazların ebat ve güç tüketimi kısıtlarının her geçen gün artması nedenleri ile MIMO tekniklerinin gelişimi hızlanmıştır [9], [28], [29]. Bununla birlikte MIMO'nun kablosuz sensörler ve ad-hoc ağlarında yaygın kullanılabilirliği de MIMO'yu güçlü kılmaktadır [25], [29]. İşbirlikli iletişimin bir neticesi olarak ortaya çıkan işbirlikli çeşitleme aslında bir çeşit uzaysal çeşitleme olmakla birlikte çoklu anten yayılımına gerek duyulmadan gerçekleştirilebilmektedir [8]. Klasik iletişim ağı modellerinde iletişim iki nokta arasında gerçekleşmektedir. Fakat işbirlikli iletişim klasik modelin ötesine geçmekte ve iletişimi en az üç nokta arasında kurgulamaktadır.

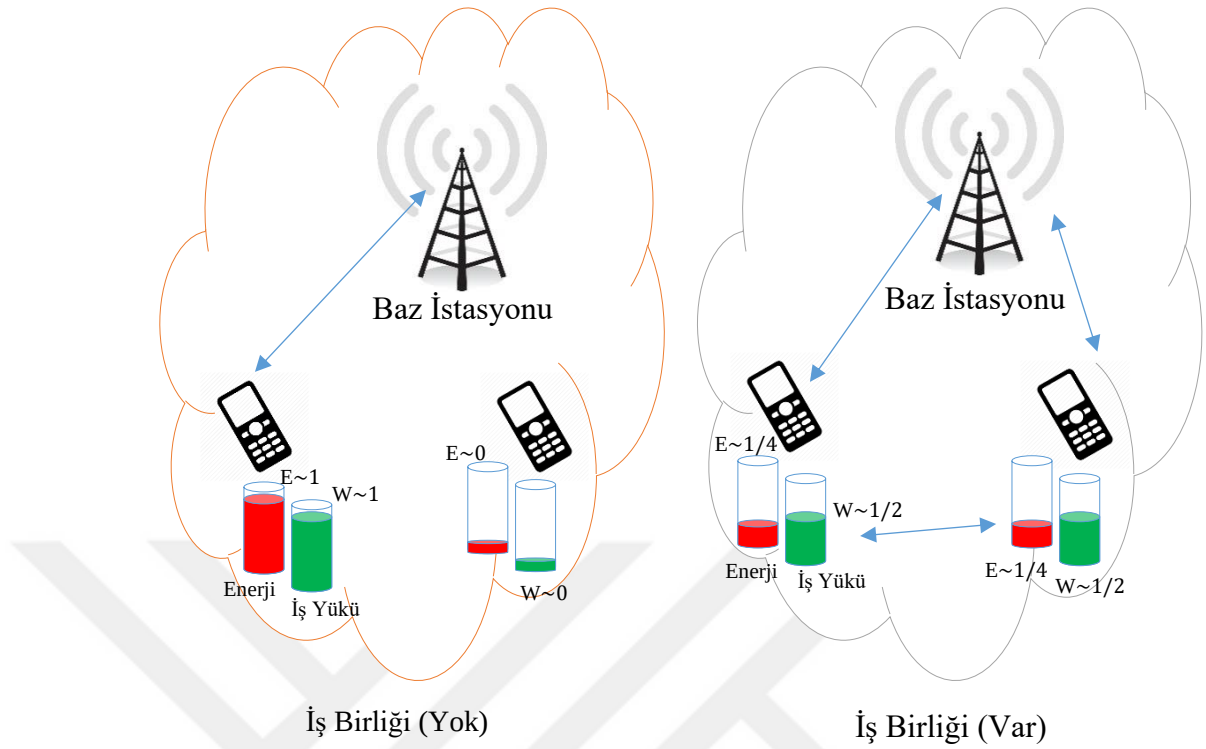
Geleneksel ağ yapılarında birbirinden bağımsız ve habersiz olarak çalışan iletişim noktaları bulunmakta iken işbirlikli ağlarda birbirleri ile sürekli iletişim halinde olan, birbirlerine yardım eden ve bu durumun bir neticesi olarak çeşitleme kazancı elde eden iletişim noktaları bulunmaktadır [20], [24]. İşbirlikli ağda yer alan her bir nokta, iş birliğinin bir faydası olarak hem kendi performansını yükseltmekte hem de sistemin ortalama performansını artırmaktadır. Aslında işbirlikli iletişim modelinde iletişim kurulan noktalar arasında sanal bir anten yapılanması oluşturulmakta ve yayılım stratejisinin avantajları sisteme dolaylı yoldan eklenmektedir. Geliştirilen bu model sayesinde, iletişim güvenilirliği, bant verimliliği, kapasite ve iletişimin gerçekleşme alanı açılarından son derece önemli performans artışları elde edilmektedir [6].



Şekil 1.2. K Adet Kullanıcının ve Baz İstasyonunun Varlığından Oluşan İşbirlikli Hücresel Ağ Modeli [2]

Kablosuz Şehir Ağları (WMAN), Kablosuz Yerel Ağlar (WLAN) gibi altyapıya dayalı hücresel ağlarda işbirlikli iletişim uygulanmaktadır. Bunun da ötesinde Vasıta Ad-Hoc Ağları (VANET), Kablosuz Algılayıcı Ağları (WSN) ve Mobil Ad-Hoc Ağları (MANET) gibi altyapı temelli olmayan ağlarda da uygulanabilmektedir [25].

Uygulama alanlarının çok çeşitli olması, göz ardı edilemeyecek avantajlarının bulunması gibi faydaları sayesinde işbirlikli ağlar kablosuz iletişim alanında gelecek vadeden, başarılı ve yüksek performanslı bir araştırma sahasıdır [1], [2], [7], [11]. İşbirlikli iletişim üniversiteler ve sanayi arasında ortak çalışmaların yapılabileceği, pratik uygulamalar geliştirilebilecek bir alan olarak da değerlendirilmektedir.

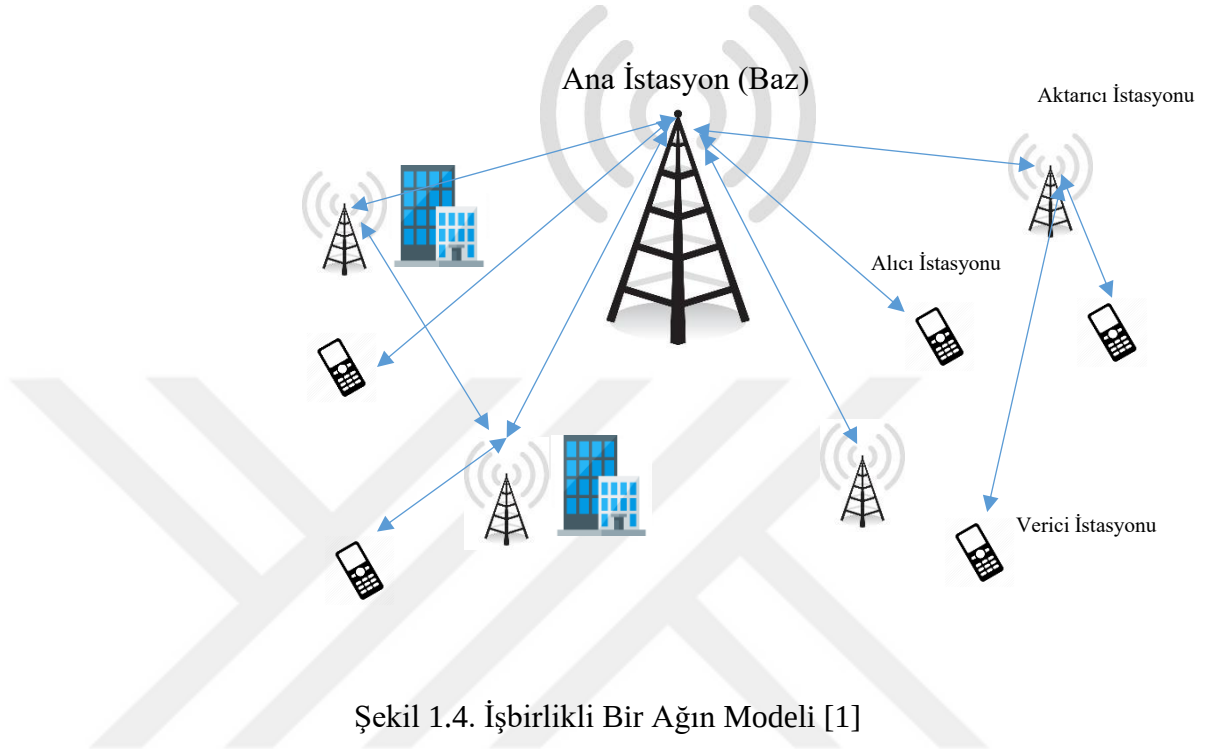


Şekil 1.3. İşbirliksiz ve İşbirlikli Ağ Modellerinin Kıyaslanması [8]

Klasik bir iletişim ağında gerçekleşen bütün iletişim aslında sadece iki nokta arasında geçmektedir. Fakat ağa dikkatli bakıldığında aslında yardıma hazır çok sayıda iletişim noktasının varlığı dikkati çekecektir. Şekil 1.3'te iş birliği yapılan ve yapılmayan iki kablosuz ağ modeli gösterilmektedir. İş birliği yapılmayan klasik kablosuz ağ modelinde, boştaki bekleyen iletişim noktasının kaynaklarından yararlanılmamaktadır. İş birliği yapılan kablosuz ağda ise yardımlaşan iletişim noktalarının varlığı sayesinde kaynak tüketimi daha verimli olarak gerçekleşmektedir.

Klasik iletişim ağında iki nokta dışında herhangi bir iletişim noktası iletişime destek sağlamamaktadır. Oysa işbirlikli ağda boştaki duran iletişim noktaları iki nokta arasında geçen iletişime katkı sağlayabilmektedirler [2], [8], [11]. İşbirlikli kablosuz bir iletişim ağında iki nokta arasında geçen iletişime kulak veren tüm noktalar bu iletişimin nasıl gerçekleştiğini takip edebilmekte, yardım talebi aldıklarında da iletişime destek verebilmektedirler. İletişime destek veren bu ara noktalar sayesinde iletişimin kalitesi, sistemin ortalama ömrü ve çalışma kapsama sahası artırılabilir [8]. Bir işbirlikli ağda sistemin performansının bir bütün olarak ne kadar arttığını tespit edebilmek adına öncelikle teorik bilginin ortaya konulması gerekmektedir. Bu teorik bilgi sayesinde

geleceğin işbirlikli ağları modellenenilmekte, ortaya koyacakları performans artışı hesaplanabilmektedir.



Şekil 1.4. İşbirlikli Bir Ağın Modeli [1]

Aktarmalı iletişimin paralelinde, genelleştirilmiş geri beslemeli çoklu erişimli kanalın kapasitesi üzerine de araştırmalar söz konusu olmuştur [17]. 1978 yılında, iki vericinin ortak bir hedefe veri gönderdiği ve hedeften ortak geri bildirim aldığı kanal için çalışmalar yapılmıştır [17].

Şekil 1.4'te işbirlikli bir kablosuz bir ağ modeli gösterilmektedir. Modelin merkezinde yer alan ana istasyon, alıcı, verici ve aktarıcı istasyonlar arasındaki eşgüdümü sağlamaktadır. Modelde birbiri ile doğrudan iletişim kuramayan noktaların aktarıcı noktalardan yardım aldığı görülmektedir.

Geçen 40 yılda, aktarmalı iletişimin kayda değer yararları tespit edilmiş ve gelecek vadetmektedir. Hâlihazırda çok sayıda araştırmacı teorik olarak elde edilmiş sonuçların ötesine geçmek için çalışmalar yapmaktadırlar. Kullanıcı iş birliği konusunda yakın zamanda, güncel çalışmalar yapılmıştır [23], [28], [34].

Kablolu ve kablosuz ağların tümü için aktarma kanalı oldukça önemli performans artışı sağlamaktadır [8], [9], [10]. Kablolu ağlarda, alıcı ve verici noktaları birbirlerine aktarıcı bağlantı noktaları üzerinden erişirler. Kablosuz ağlarda ise kablosuz ortam avantajı

sayesinde yakın noktalar kendi bölgelerinde gerçekleşen iletişimi fark edip takip edebilirler. Bu noktalar, fark ettikleri bu veriyi hem aktarabilir hem de iletişim hızının artmasını sağlayabilirler.

Her ne kadar yukarıda anlatıldığı gibi kanal kapasitesi hususunda önemli bilimsel gelişmeler kaydedilmiş olsa da geçmiş kırk yılda genel bir aktarımlı kanalın kapasite hesabı yapılamamıştır [1]. İşbirlikli iletişim ve işbirlikli ağlar hususunda gerçekleştirilen çalışmaların kablosuz uygulamalar üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle sağladıkları avantajlar ve bulabildikleri geniş uygulama sahası ile işbirlikli iletim yöntemlerine dair güncel araştırmalar oldukça artmıştır. İşbirlikli ağlar hususundaki çalışmalar her ne kadar artmış olsa da bu ağların kapasite hesapları hususunda henüz tam bir netice ortaya konulamamıştır.

Aktarmalı kanal tabanlı sistemlerde karşımıza çıkan en önemli sınırlamalardan biri aktarım görevi üstlenen elemanların işlemsel gücünün sınırlı olmasıdır. Aktarım ile görevli eleman çift ya da tek yönlü olarak seçilebilir [11]. Aktarıcının çift yönlü olarak hizmet vermesi durumunda aynı frekans sahasında iletim ve alım yapabilmesi beklenir. Tek yönlü bir aktarıcı içeren sistemde ise alım ve iletim işlemi birbirine dik kanallarda gerçekleşir. Her ne kadar da tam dubleks bir aktarımlı kanal gerçekleştirilemiyor olsa da aktarım kanal özelliklerinin belirlenmesinde faydalı sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte, yarı dubleks kanallara ilişkin tahminler kullanılarak pratik uygulamalar geliştirilmektedir [12].

1.7 İşbirlikli Ağlarda Senkronizasyon

Aktarım noktaları kullanarak gerçekleştirilen bir işbirlikli ağın enerji verimliliği açısından üstün olacağı rahatlıkla ön görülebilir. Çok sayıda aktarım noktasının sistemde yer bulması ile çeşitleme kazancı yükselecek ve kanal dışarıdan gelecek negatif etkilere karşı daha yüksek bağışıklığa sahip olacaktır [13], [14]. Uzay-Zaman kodlamanın, iletişim çeşitlemenin ve MIMO sistemlerin yaygınlaşması ile işbirlikli iletişim kavramı da gelişimini artırmaktadır.

Düz sönümlü bir kanal ortamında kurgulanan bir işbirlikli ağın verimli bir veri iletimi temin edebilmesi için farklı işbirlikli kodlama stratejileri bulunmaktadır [23]. MIMO sistemlerinde kullanılan sezme yöntemlerinin doğru netice üretebilmeleri için genel bir

kabul olarak bütün aktarıcı noktalarının birbirleri ile kusursuz bir senkronizasyon içerisinde oldukları kabul edilmektedir [9], [14]. Aktarmalı veya çeşitlemeli sistemlerin kusursuz senkronizasyonu maalesef pratikte arzu edildiği gibi gerçekleşmemektedir, bu durumun sebepleri şu şekilde sıralanabilir:

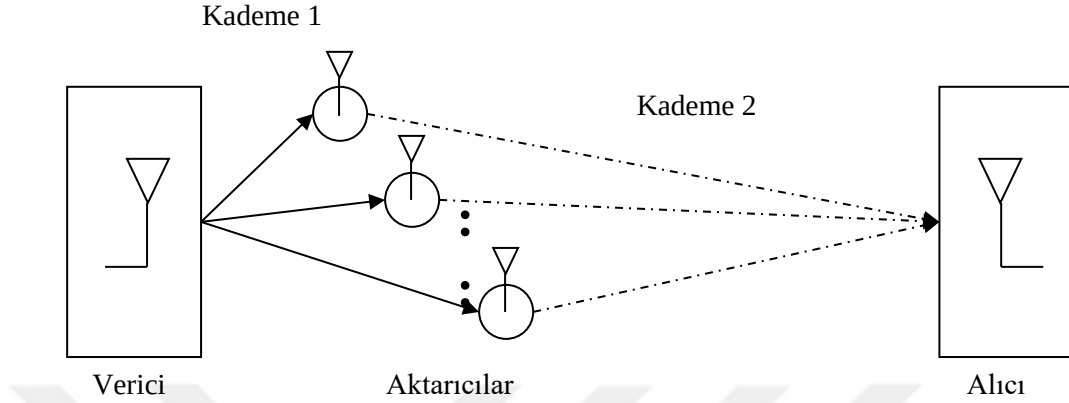
- Farklı noktalarda bulunan aktarıcı noktalar sürekli bir hareket içerisinde oldukları için pratikte senkronize olamazlar.
- Hareketli noktalı ağları bir kenara bırakacak olursak sabit noktalara sahip bir ağda dahi elektronik bileşenlerin özelliklerindeki küçük değişimler bile senkronizasyonu bozar.
- Her ne kadar da senkronizasyon için ciddi çaba sarf edilse de uzun süreli iletişimde senkronizasyonda bir kayma muhakkak gerçekleşir.
- İletim döngüleri arasındaki farklar birikerek ana döngü üzerinde bir senkronizasyon kaymasına neden olur. Yayılımda karşılaşılan gecikmeler işaretler tarafından her zaman bilinemez [5], [14].

Tüm kaynak noktalarının tek bir hedefe senkronize olmak için ayarlandığı sistemlerde yer alan diğer tüm hedefler ile kaynak arasında farklı mesafelerin bulunmasından dolayı senkronizasyon problemlerinde artış görülür [27]. Öte taraftan, birçok ağda, iletişim noktaları parçalı senkronizasyon uygularlar, hatta bu uygulama aslında gereklidir. Parçalı senkronizasyon sayesinde büyük ölçekli bölmeli senkronizasyon da gerçekleştirilmektedir [25]. Esas mesele bir bütün olarak iyi bir iletişim senkronizasyonu geliştirebilmektir.

Dijital modülasyon işaretlerinin birçoğunda, işaretler sadece tam orta noktalarından örnekleme tabi tutulduklarında simgeler arası girişim (ISI) oluşturmayacaklarını garanti etmektedirler [5]. Farklı zaman dilimlerinde, farklı aktarıcı unsurlardan ulaşan işaretler kusursuz senkronize değillerse, darbe dizisine bağlı hataların, örneklemenin hatalı noktadan yapılmasından kaynaklandığı düşünülebilir [22].

Temel işbirlikli bir ağ modeli Şekil 1.5'te yer almaktadır. Vericiden gönderilen ve alıcıya doğru giden işaret setleri incelendiğinde aslında işaretlerin çok sayıda farklı aktarım noktası üzerinden aktarıldığı ve burada bulunan her bir aktarıcı noktanın farklı

konumlarda yer aldığı görülebilmektedir. Tüm bu hususlardan dolayı gönderilen işaretlerin tamamında senkronizasyon bozulmaları ortaya çıkar [32].



Şekil 1.5. Kablosuz İşbirlikli Ağ Modeli

Kablosuz haberleşmede karşılaşılan en ciddi problemlerden biri kanalın karşılaştığı sönmüleme etkisidir. Performans düşüren bu etki uzaysal çeşitleme teknikleri kullanılarak büyük oranda yok edilebilir. Ancak; farklı türden, örneğin sensör ağları gibi çeşitli sistemlerde alıcının ve vericinin boyut ve güç sınırlamalarından dolayı söz konusu uzaysal çeşitleme tekniklerinin kullanımı her zaman mümkün olmamaktadır [8], [20]. Bu probleme çözüm olarak işbirlikli haberleşme tekniği ortaya atılmış ve literatürde büyük ilgi uyandırmıştır.

İşbirlikli haberleşmede, alıcıya yani hedefe veri göndermek isteyen verici taraf yani kaynak, sistem içinde bir veya birden fazla ağın diğer üyelerini aktarıcı unsur olarak kullanmakta ve sanal bir anten dizisi oluşturarak uzaysal çeşitleme avantajlarını gerçekleştirmektedir [20], [24]. İşbirlikli haberleşme konusunda halihazırda zengin bir literatür bulunmaktadır. Son yıllarda işbirlikli haberleşme sistemlerinde kanal kestirimi ve dengelemesi, kanalın kodlanması, gücün optimize edilmesi, en iyi aktarıcının seçimi gibi çeşitli alanlarda bol miktarda çalışma yapılmıştır [13], [30], [33], [36]. Ancak bu çalışmaların hemen hepsinde ortak bir varsayım, alıcıya farklı vericilerden gelen işaretlerin tam senkronize olduğudur.

İşbirlikli haberleşmenin yapısı gereği, kaynak ve röle arasında olması gereken belirli bir mesafe vardır. Dolayısıyla alıcı noktaya, verici ve aktarıcı üzerinden ulaşan işaretler arasında kaçınılmaz olarak zaman farkları oluşmaktadır. İşbirlikli haberleşmede senkronizasyonu bozan dikkate değer bir konu ise verici ve aktarıcının kendi yerel

osilatör kaynaklarından beslenmeleri ve dolayısıyla bunların farklılıklarından kaynaklanmaktadır [25], [33]. Uygulamada son derece önemli olan ve sistem performansını dikkate değer ölçüde etkileyen bu konuda yapılan görece az sayıda çalışma vardır. Bunların çoğu da başarımların analizine yöneliktir [4].

1.8 Kablosuz Kanallarda Çeşitleme

Sönümlü kanallar, zamanla değişiyor olmalarından dolayı kablosuz iletişim açısından çeşitli güçlükler barındırırlar. Kaynak ve hedef arasında tek bir hattın olduğu kablosuz iletişim kanalında, kanal kodlama bloğu kullanmak, iletim hızını düşürmek, sezici denetleyiciler kullanmak gibi ekstra çözümler ile sönümleme etkisi azaltılmaktadır [9], [29]. Bilinmelidir ki bahsedilen teorik çözümlerin birçoğu hala pratik uygulamaya aktarım hususunda zorluklar barındırmaktadır [20].

Kablosuz sistemlerde, çeşitleme teknikleri, kanalda sönümlemeyen dolayısı ile meydana gelen etkileri dengelemek maksadı ile kullanılırlar [20], [35]. Kablosuz kanallardaki yüksek güçlü zayıflamalar düşük performansa yol açarlar. Kısa süreli derin sönümlemeler dahi performansta ciddi düşüşe yol açabilirler. Çeşitleme teknikleri alıcının aynı bilgiyi taşıyan farklı bağımsız sönümlemeli kanallardan elde ettiği çok sayıda işaret kopyasının varlığına dayanmaktadır. Bu tür bir iletişimde, tüm işaret kopyalarının tamamının derin sönümleme etkilerine maruz kalması çok düşük olasılıklıdır [20].

Çeşitleme; zaman, frekans ve uzay olmak üzere üç yöntemle gerçekleştirilebilmektedir. Alıcı çeşitlemesi, genellikle hücresel iletişim sistemlerinde baz istasyonlarında kullanılır. Mobil cihazların boyut ve enerji kısıtlamalarından dolayı, vericide çeşitleme yapmak alıcıda yapmaktan daha güçtür. Bununla beraber kodlama ve iletim çeşitlemenin bir arada kullanıldığı ilgi çekici çeşitleme yöntemleri de vardır [23]. Kablosuz iletişim ortamı sınırlı bir kaynaktır. Çok girişli çok çıkışlı sistemler (MIMO) kullanılarak kayda değer oranda yüksek verimlilik elde edilmektedir [28]. Uzay – zaman kodlama tekniği MIMO kanalın kapasite limitine yaklaşabilir ve çeşitleme ile kodlama kazancına yol açar. Bundan dolayı, pratik açıdan bakacak olursak, yüksek bit hızları, geniş kapsama alanı ve düşük güç tüketimi gibi faydaları sayesinde MIMO sistemleri kablosuz sistemlerde oldukça yaygın kullanılmaktadır [20].

İletişimde sönümlenme problemine, sönümlü kanala farklı bir bakış açısı ile bakarak yaklaşılabileceği olursa, kaynak ile hedef arasındaki tek olan işaret hattını, birbirinden bağımsız sönümlenme etkilerine tabi kalan, farklı bağlantılar ile artırmak bağlantının sürekliliğini ve güvenilirliğini artıracaktır [20]. Bu metotta, en azından bir adet yeteri kadar güçlendirilmiş bir hattın varlığı ön görülmektedir. Çoklu, ideal olarak bağımsız işaret hatları oluşturma amacı taşıyan bu tekniklere çeşitleme teknikleri adı verilir. En sade hali ile bu teknikler tekrarlı kodlamaya benzetilmektedirler (işaret zayıflaması basitçe işaretin tekrarlanması ile önlenir). Burada çoklu hatlar orijinal mesaj işaretinin çoklu kopyalarını taşımaktadırlar. Daha iyi performans elde etmek için çoklu yayılım yolları üzerinden gönderilen işaretlerin alıcı tarafta bir araya getirilmesinde farklı türde kodlama teknikleri kullanılabilmektedir [23]. Burada ele alınan birleştirme metotları, alıcı birleştirme metotlarıdır ve çoklu antenlerden alıcıya ulaşan işaretler üzerine uygulanır. Birleştirme, uygulamaya bağlı olarak, farklı seviyelerde ve farklı metotlar ile gerçekleştirilebilir. Tipik metotlar; seçerek birleştirme, eşit kazanç birleştirme ve en yüksek oran birleştirmesidir. Her bir koldan gelen verinin sezilmesinden sonra yapılacak birleştirme işlemi süreci kolaylaştırır. Birleştirme işlemi sezme işleminden önce de gerçekleştirilebilir [20], [26].

Ayrıca; bir diğer önemli husus şudur ki farklı yollardan kanala ulaşan işaretler, alıcı noktada işaret işleme işlemine tabi tutulurlar. Bu birleştirme işleminde amaç, alıcıya ulaşan her bir işaret kopyasının, verici tarafından gönderilen işarete en yakın olacak şekilde birleştirilmesidir. İşaret işlemenin tabiatı gereği her bir işarete ayrı ayrı uygulanan işlem, sistem tasarımını da etkilemektedir [13]. Eğer amaç, ulaşan işaretleri doğrusal olarak birleştirmek ise SNR değeri yükselecektir. Bu sonucu oluşturan yöntem en yüksek oranlar birleştiricisi (MRC) denilmektedir [18], [20]. Farz edelim ki MRC girişinde L kadar işaret örneği olsun, $y_0, y_1, \dots, y_{L-1}$ bu işaret örnekleri birleşerek y_M işaretini oluştursunlar. Her bir alınan işaret, L kadar farklı yoldan gelen işaretin enerjilerinin toplamını içerir, $h_0 e^{j\phi_0}, h_0 e^{j\phi_1}, \dots, h_{L-1} e^{j\phi_{L-1}}$. MRC doğrusal bir birleştirici olduğu için, giriş ile çıkış arasındaki bağıntı aşağıdaki şekilde yazılır:

$$y_M = \sum_{k=0}^{L-1} c_k e^{-j\phi_k} y_k \quad (1.2)$$

Burada c_k , MRC birleştiricisinin katsayılarıdır ve her bir terimin fazlarının eşitlenmesi için karmaşık üstel olarak kullanılmıştır. Alıcı uçta, birleştirilen işaretlerin N_o güç yoğunluğuna sahip aynı gürültü tarafından eşit bir biçimde etkilendiğini varsayarsak, MRC çıkışındaki SNR değeri, SNR_{y_M} şu şekilde yazılabilir:

$$SNR_{y_M} = \frac{(\sum_{k=0}^{L-1} c_k h_k)^2}{N_o \sum_{k=0}^{L-1} c_k^2} \quad (1.3)$$

Çünkü, gürültü de işaret ile birlikte alınan işaretlerin içerisinde işlenir. Yukarıdaki ifadeyi maksimize eden MRC katsayıları aynı zamanda kendi payını da maksimize etmektedir. SNR değerinin en yüksek değeri c_k 'nın aşağıda belirtilen değeri sağlamasıyla edilmektedir:

$$c_k = \frac{h_k}{\sqrt{N_o}} \quad (1.4)$$

Bu durumda MRC'nin çıkışındaki maksimum SNR şu şekilde hesaplanır:

$$y_M = \frac{\sum_{k=0}^{L-1} h_k^2}{N_o} \quad (1.5)$$

MRC, kendisine ulaşan işaret kopyalarındaki faz kaymalarını giderir, SNR değerleri ile uyumlu olarak ağırlıklandırır ve birleştirir, ardından birbirine ekler. Neticede toplam işaret, her bir hattın kendine ait SNR değerlerinin toplamı kadar bir SNR değerine sahip olur [19].

MRC dışında da birleştiriciler vardır. Diğer birleştiriciler: En iyi SNR'ye sahip girişi seçen seçim birleştiricisi, alınan işaretleri belirli bir eşik seviyesi ile sürekli kıyaslayan ve SNR değeri eşik seviyesini aşan ilk işareti seçen eşik birleştiricisidir. Bu birleştiriciler üçüncü bölümde detaylı olarak anlatılmaktadır.

Tüm çeşitleme tekniklerinde, performans, yüksek SNR değerlerinde iletişim hata olasılığının düşmesi ile ölçülür. Logaritmik eksen kullanıldığında iletişim hata olasılığındaki bu düşüş derecesi sonucu bir eğim oluşur, bu eğim çeşitlilik kazancı olarak bilinir [20].

MIMO sistemler için, verici ve alıcı anten sayıları kadar bir çeşitlilik kazancı elde edilecektir. Ayrıca, belirtmekte fayda var, çeşitleme metoduna göre hata olasılığının

farklı ölçüm yöntemleri de vardır [5], [18]. Örneğin, bazı durumlarda sembol hata olasılığı yerine kesinti olasılığı bir performans ölçüm aracı olarak kullanılabilir [16].

Kablosuz çeşitleme farklı teknikler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Örneğin, zaman çeşitlemede tekniğinde işaret kopyaları farklı zaman dilimlerinde alıcıya gönderilmektedir. Benzer şekilde frekans çeşitlemede, işaretin kopyaları farklı taşıyıcı frekanslar ile gönderilmektedir. Uzaysal çeşitlemede ise işaretin kopyaları farklı fiziki konumlardan alıcıya gönderilmektedir. İşbirlikli çeşitleme ise uzaysal çeşitlemenin farklı bir uygulaması olarak görülebilir. Bunun da ötesinde çok daha iyi performans elde etmek için farklı çeşitleme çeşitleri bir araya getirilerek kullanılmaktadır. Aşağıda farklı çeşitleme teknikleri ve tezin konusu olması nedeni ile işbirlikli çeşitleme konusu anlatılmaktadır.

1.9 Çeşitleme Teknikleri

Burada anlatılan tekniklerde alıcı, çeşitleme kazancı elde etmek adına bağımsız sönümlü kanallardan çoklu işaretler almaktadır. Kablosuz bir iletişim sürecinde kullanılan üç kaynak söz konusudur: zaman, frekans ve uzay. Benzer şekilde çeşitleme üretecek üç eksen söz konusudur; zaman, frekans ve uzay eksenleri [11], [20], [41]. Her bir tekniğin uygulanması için özel şartlar vardır. Tablo 1.1’de teknik ve bu tekniğin gerçekleştirilmesinde kullanılan metot yer almaktadır.

Tablo 1.1. Çeşitleme Teknikleri

Metot	Teknik
Frekans çeşitleme	Çoklu frekans dilimlerinde aynı bilgi Yayılı spektrum işaretleri
Zaman çeşitleme	Tekrarlama Hata giderme kodlama ve ara boşluklandırma
Uzay çeşitleme	Alıcı çeşitleme (çoklu rx antenleri) Verici çeşitleme (çoklu tx antenleri)

	Varış açısı çeşitleme Kutuplama çeşitlemesi MIMO ve uzay-zaman kodlama
--	--

1.9.1 Zaman Çeşitleme

Birçok iletişim senaryosunda kanal bağdaşım (coherence) süresi sembol iletim periyotlarına eşit veya bunlardan daha fazladır. Bu durumun neticesinde bağdaşım süresinden daha uzun bir süre aralığıyla iki sembol gönderilmek istendiğinde ilişkisellik bozulmaları söz konusu olur [18], [40]. Bu durumu aşmanın en kolay yolu, tekrarlamalı kod şeması kullanılarak iki işareti iletmektir. İlişiksiz kanal üzerinden gönderilen tekrarlamalı işaretlerin alıcıya sorunsuz olarak ulaştığından emin olmak için iletilen işaretin arasına uygun miktarda boşluk bırakılır [19].

Zaman çeşitlemede, aynı işaret farklı zaman aralıklarında gönderilir. Zaman aralıkları arasındaki ayırım en az kanalın coherence bant genişliği Δt_c kadar olmalıdır [20], [37]. Frekans ve zaman çeşitlemenin en temel biçimi, tekrarlamalı blok kodlama ile gerçekleştirilir. Blok kodlamada birleştirme yöntemi esnek karar çözmedir. Elbette, tekrarlamalı kodlardan daha verimli kodlar da vardır. Pratikte, çeşitleme işlemi işarete hata düzeltme kodu ve boşluk ekleme ile gerçekleştirilir [20].

Alıcıda, ulaşan işaretlerin tamamının birleştirilme işlemi yapılmaktadır. Her bir iletilen işaret, giriş çıkış ifadesi olarak aşağıdaki biçimde ifade edilirse,

$$y_i = h_i x + n_i \quad (1.6)$$

Bu ifadede x , iletilen işaretin birim enerjisini, y_i , i hattı üzerinden alınan işareti, n_i , N_0 varyanslı, sıfır ortalamalı dairesel simetrik Gaussian rastgele değişkenle modellenen gürültüyü, h_i , i hattı üzerindeki kanal katsayısını ifade etmektedir. Kanalın Rayleigh sönmülemeli bir kanal olduğunu varsayalım, bu durumda SNR değerini maksimize eden birleştirici MRC birleştiricisi olacaktır [18]. Bir MRC'nin çıkışındaki SNR değeri, MRC'nin girişindeki işaretlerin SNR değerlerinin toplamıdır.

Çeşitlilik kazancı sadece sembol tekrar sayısı değerine eşit değildir. Aynı zamanda doğrusal ilişkinin yaklaşık bir zarfıdır. Çeşitlilik kazancı işarettaki tekrar sayısına eşit

olduğu için, tekrarlamalı kod kullanan bir zaman çeşitleme sistemi tam çeşitleme kazancı sağlar denilebilir [18]. Fakat tekrarlamalı kod kullanımı toplam bit hızı ve oranını artırır. Bu durumu bertaraf etmek için ise farklı kodlama ve çeşitleme yöntemleri kullanılabilir.

1.9.2 Frekans Çeşitleme

Zaman çeşitlemede olduğu gibi, kullanılabilir bant genişliği, kanal tutarlılık bant genişliğinden daha geniş olduğunda; kullanılabilir bant genişliği, kanal tutarlılık bant genişliğinden daha fazla olacak şekilde seçilmiş kanal parçaları kullanılarak çeşitleme kazancı sağlanabilir [18], [24], [37].

Frekans çeşitleme tekniğinde, aynı işaret çoklu frekans aralıklarında gönderilir. Aralıklar arasındaki ayırım en az kanalın coherence bant genişliği Δf_c kadar olmalıdır. Özetle çoklu ileticilere ihtiyaç vardır. Pratikte, frekans çeşitleme yayılı spektrum işaretleri ile sağlanır, doğrudan dizili, frekans atlamalı ya da çok taşıyıcılı yayılı spektrum modülasyonları buna örnek olarak verilebilir [18], [24], [37].

Frekans çeşitlemesinin gerçekleştirilmesi için daha dar bant genişlikli ve bağımsız frekans cevaplı alt kanalların kullanılması fikri en doğal yaklaşımdır. Bu yaklaşım, çok taşıyıcılı sistemlere uygulanabilir, çok taşıyıcılı sistemlerde iletim, geniş bandın örtüşmeyen dar alt bantlara bölünmesi ile sağlanmaktadır. Her bir kanalda iletim için kullanılan işaret, her bir alt kanalın düz bir sönümlü alt kanal olarak algılanması için yeterli uzunlukta olmalıdır [5], [18]. Farklı alt kanallar için çeşitleme yapılırken de benzer kural geçerlidir. Bundan dolayı alt kanallardaki sönümleme işlemi çapraz korelasyon gösterecektir. Bu sistemlere en iyi örnek dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) sistemleridir [27].

Doğal bir yöntem olmamasına rağmen frekans çeşitleme, zaman ekseninde yapılacak bazı işlemlerle de gerçekleştirilebilmektedir. Çok yayılımlı kanalların frekans cevabı sabit bir genlik ve doğrusal bir faza sahip değildir. Çünkü her bir spektral bileşen iletişim yollarındaki gecikmelere ve birbirinden bağımsız yıkıcı girişimlere veya farklı genliklere bağlı olarak zayıflar [33], [34]. Bu tarz çok yollu yayılımın neticesi olarak hedefe ulaşan her bir işaret ayrı ayrı çeşitleme etkisine maruz kalır [18]. Bundan dolayı, kanal genel itibarıyla frekans seçici bir kanal görünümü arz eder. Sonuç olarak çeşitlemeyi elde edebilmek için bağımsız hat sayısı kadar işlem gereklidir.

1.9.3 Uzaysal Çeşitleme

Uzaysal çeşitleme, işaretlerin ilişkisiz olma koşulunu sağlayacak mesafe kadar aralarında mesafe bulunan çoklu antenli sistemler ile sağlanır [11], [41]. Antenler arasındaki mesafe yayılım kanalı ve frekansa bağlı olarak değişebilir. Bazı çalışmalarda birkaç dalga boyu mesafenin yeterli olacağı tespit edilmiştir, 0,7'lik bir korelasyon değeri için baz istasyonu ile arada 10-30 dalga boyu mesafe gerekmektedir [20]. Sezme çeşitlemesinde çok sayıda alıcı anten bulunurken, verici çeşitlemesinde çok sayıda verici anten bulunur [26]. Makroskopik çeşitlemede, eş zamanlı olarak iki ya da daha fazla sayıda baz istasyonu kullanılır. Varış açısı çeşitlemesi ve kutuplama çeşitlemesi teknikleri özel durumlu uzaysal çeşitleme teknikleridir.

Sezme çeşitlemesi hücre baz istasyonları gibi çok geniş bir alanda kullanılmaktadır [20], [41]. İletim çeşitlemesi, görece daha zorlu bir işlemdir. Çünkü iletilen işaretler birbirlerine karışırlar ve vericide anlık kanal durum bilgisi bulunmamaktadır. Öte yandan, mobil cihazlara çok sayıda anten yerleştirmek güç ve ebat sınırlamaları nedeni ile çok zordur. Çeşitleme kazancı elde edilmesine rağmen iletim çeşitleme sürecinde alıcının güç tüketimi artmaktadır. Bununla beraber alıcının da modifiye edilmesi gerekmektedir: iletilen işaret üzerinde çeşitleme sağlanabilmesi için bir çeşit geri besleme ya da işaret işleme tekniği uygulanmalıdır. İletim çeşitlemesinin kullanılabilmesi için belirli standartların tanımlanması gerekmektedir, sezme çeşitlemesi ise bütün alıcılara uygulanabilir [22].

İletim çeşitlemesi, hata kontrol kodlaması ile birleştirilebilir. İletim çeşitlemesi, hata kontrol kodlaması ve modülasyon birlikte kullanılarak başarılı bir çeşitleme modeli oluşturabilmektedir. Bu tekniğe literatürde Uzay - Zaman Kodlama tekniği denilmektedir [20], [41]. Uzay – Zaman kodlama tekniği sayesinde bant genişliği artırımına ihtiyaç duyulmadan hem çeşitleme hem de kodlama kazancı elde edilir. Çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistemler kullanılarak oldukça büyük kapasite kazançları elde edilebilmektedir. Bu sistemlerde Uzay – Zaman kodlaması kullanılması ile kapasite sınırlarına ulaşılabilmektedir.

1.9.4 İşbirlikli Çeşitleme

Kablosuz haberleşme sistemlerinde, elektromanyetik dalgaların kullanımı sonucunda işaretlerin çok yollu yayılımı söz konusudur. Bunun neticesinde alınan işaretin gücünde konum ve frekans bağımlı bir fonksiyonun etkileri oluşmaktadır. İstasyonun hareketleri de buna eklenince kablosuz kanalın değişim etkileri oluşmaya başlar [21]. Bu etkiler genellikle uzayda, frekansta ve zamanda sönümleme olarak adlandırılır. Çeşitleme teknikleri, kablosuz iletişim sistemleri ve ağlarının performansını artırmak maksadı ile sönümleme etkilerini azaltmak ve hatta yok etmek üzere kullanılmaktadırlar.

Kablosuz uygulamalarda son yıllarda ön görülemez boyutlarda gelişmeler yaşanmaktadır [6], [10]. Artık sesli iletişim insanların tek beklentisi olmaktan çıkmıştır. Geniş bant internet, online oyunlar ve diğer birçok yüksek veri transfer hızı gerektiren uygulamalar artmaktadır [10]. Ultra Mobil Geniş Bant (UMB), Uzun Dönemli Gelişim (LTE) ve IEEE 802.16e (WiMAX) gibi en güncel kablosuz sistemler, yüksek bant genişlikli kanallar (5, 10 ve 20 MHz) üzerinden kullanıcı başına yüksek veri hızları sağlamaktadır. Örneğin Mobil Geniş Bant Kablosuz erişim (MBWA) veya IEEE 802.20 gibi mobil geniş bantlı erişim sistemlerinde 260 Mbps download hızına ve 60 Mbps upload hızına ulaşılabilmektedir.

Bu iletişim hızları ancak full-rank MIMO sistemler sayesinde temin edilebilmektedir [28]. Özel olarak, full-rank MIMO kullanıcıları mobil terminalde çoklu antenlere sahip olmalıdır ve bu antenler bağımsız sönümlemeye tabi olmalıdırlar. Pratikte tüm kullanıcılar ellerindeki küçük cihazlarda çok sayıda anten yer almadığı için ya da yeteri kadar erişimi olmayan bir ortamda yer aldıkları için bu kadar yüksek veri hızlarını elde edemezler [18]. Kullanıcı çok sayıda antene sahip olsa bile, kullanıcı yine de full-rank MIMO'ya sahiptir diyemeyiz. Çünkü antenler arasındaki bağlantılar yüksek oranda birbirini ile ilişkilidir.

Çeşitleme teknikleri birçok kablosuz haberleşme kanalında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yukarıda da anlatıldığı üzere zaman çeşitleme, frekans çeşitleme ve uzaysal çeşitleme bazı çeşitleme türleri olarak modern iletişim sistemlerinde kullanılmaktadırlar [20], [21], [34].

İşbirlikli çeşitleme, çok genel olarak aktarma ve işbirlikli iletişim teknikleri kullanılarak türetilmiş bir uzaysal çeşitleme tekniği alt türüdür. İşbirlikli iletişimde, dağınık halde bulunan noktalar tek bir sistem gibi birlikte iletişim kurarak ortak bir iletişim sistemi oluştururlar [7], [8], [11].

İşbirlikli çeşitleme metodu işbirlikli iletişim söz konusu olduğunda kullanılabilir dağınık terminallerin uzaysal çeşitlemelerini güçlendirmek için kullanılır. Buradaki ana amaç, mevcut sistem hızı için, sistem performansının artırılması, hata oranlarının iyileştirilmesidir. Öte taraftan işbirlikli iletişim, iletim hızını artırmak için de sıklıkla kullanılır. Her iki durumda da iş birliği, performans hedefi ile ihtiyaç olan iletim enerjisi arasında takas yapılmasını sağlar. Bundan dolayı enerji verimli kablosuz ağlar oluşturabilmek için gelişmiş tasarım seçenekleri kullanılmalıdır [21].

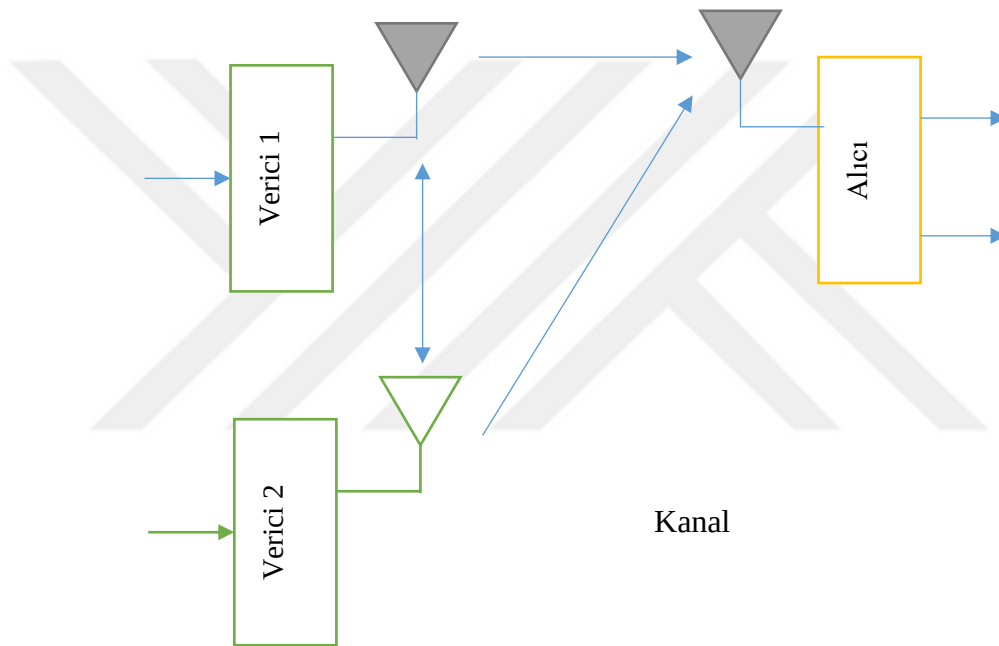
Bahsedilen tüm bu kısıtlayıcı unsurları bertaraf ederek gelecek nesil MIMO sistemler geliştirebilmek için, noktadan noktaya geleneksel iletişimin ötesinde bir vizyonla hareket etmek gerekmektedir. Geleneksel haberleşme sistemi mantığında birbirleri ile haberleşmeye çalışan terminaller vardır. Diğer bir bakış açısı ile tüm bu iletişim kurmak isteyen terminallerin, kablosuz sistem üzerine yayılmış antenler olduğunu düşünebiliriz. Bu düşünceden hareketle sistemdeki her bir anten gibi görülen terminalin bir diğer terminale iletişim için yardımcı olmasını sağlayabiliriz. Bu durumda, iletişime yardımcı olan işbirlikçi terminale aktarıcı terminal denilir [18], [30].

İşbirlikli iletişim yeni bir iletişim paradigmasıdır, Şekil 1.6'da gösterilen bu yöntemde ana istasyon, aktarıcılar üzerinden aktarma kanalları kullanarak iletişime geçer [29], [36], [40]. Aktarma kanalı, verici ile alıcı arasındaki doğrudan kanalın yardımcı kanalı olarak düşünülebilir. Aktarıcı nokta, kaynağa farklı dalga uzunlukları uzaklığında olduğu için, aktarıcı kanalın doğrudan kanaldan bağımsız bir biçimde sönmüneceği aşikârdır. Bu durum da kaynak ile hedef arasında full-rank MIMO kanalını gerçekler [9], [28].

İşbirlikli iletişim senaryolarında, diğer aktarıcı noktalar tarafından yayılan işaretlerden dolayı aktarıcının faydalı enerji temin ettiği az sayıda durum vardır. Uygun işaret işleme algoritmaları kullanılarak, çoklu terminaller birbirleri için aktarıcı rolü üstlenerek iş birliği içerisinde iletişim kurabilirler. Aktarılan bilgi hedef noktada uzaysal çeşitlilik sağlanarak birleştirilir [18], [20]. Bu sistem aslında dağınık çoklu antenler içeren bir

sistem gibi görülebilir, bu sistemde her bir anten bir diğeri için çeşitlenmeli işaret hatları oluşturur.

İşbirlikli iletişim gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerinin en büyük ihtiyacı olan yüksek iletişim hızı konusunda çok ciddi kazanımlar sağlamaktadır. Bundan dolayıdır ki 5. nesil (5G) kablosuz iletişim sistemlerinin temeli işbirlikli iletişime dayanmaktadır [10], [18].



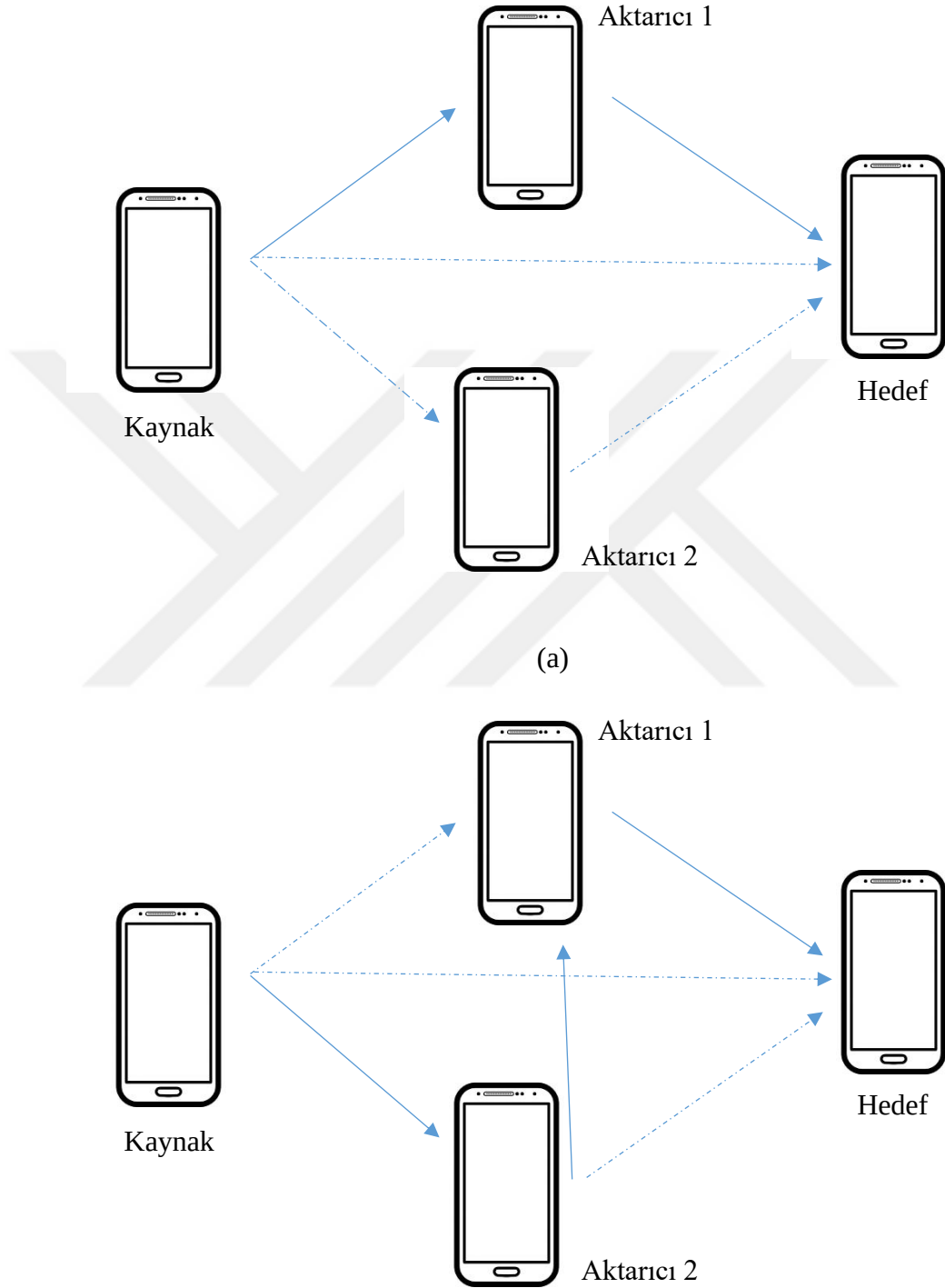
Şekil 1.6. İki Vericili Bir Kullanıcı – İş Birliği Modeli

1.9.5 İşbirlikli Çeşitlemenin Avantajları

Bu bölümde işbirlikli çeşitleme kullanılarak gerçekleştirilen iletişimin avantajlarından bahsedilmektedir. Bunu yaparken Şekil 1.6'dan ve Şekil 1.7'den yararlanılmaktadır. Şekil 1.7'de yer alan sistemde bir kaynak noktası, iki aktarıcı nokta ve bir tane de hedef nokta vardır.

İşbirlikli iletişim, kablosuz yayılım ortamının dağıtım doğasını güçlendirir ve terminal noktalarının aktarma yöntemi ile veriyi iş birliği halinde ortaklaşa olarak iletmesini sağlar [19]. Şekil 1.7 (a)'dan da görüleceği üzere iki aktarıcı kaynaktan işaretleri alır, kaynak ile

hedef arasındaki kapasitenin ve güvenilirliğin artırılması amacı ile iletişime destek olur [21].



Şekil 1.7. Kablosuz İşbirlikli İletişim Sisteminin (a) Paralel Aktarıcılar (b) Seri Aktarıcılar ile Gösterimi

Düz ya da kesikli oklar ile farklı zaman veya frekans bantlarında gerçekleşen iletim gösterilmektedir. Düz çizgiler ile geleneksel çoklu atlamalı iletim gösterilmektedir. İşbirlikli iletişim ise hem kesikli hem de düz çizgilerden oluşan iletişim ağının bir birleşimidir.

Şekil 1.7.b.'de aktarmanın birçok farklı şekilde gerçekleşebileceği gösterilmektedir, bu sayede aktarıcılar da hedef gibi uzaysal çeşitleme avantajlarından faydalanabilirler. Sağlamış olduğu birçok avantajın yanında, işbirlikli iletişim, sönümleme ve/veya gölgelemenin bağımsız olarak gerçekleştiği çoklu iletişim sistemlerinde uzaysal çeşitleme etkisini güçlendirir [21]. Örneğin, kaynak işaretinin hedefte derin bir sönümleme ile karşılaştığını varsayalım, bu durumda kaynak hedefe aktarıcılarını kullanarak sönümleme etkilerini azaltacak ya da yok edecek şekilde ulaşabilir.

İşbirlikli iletişimin ağ seviyesinde bir sistem olmasından dolayı, protokol katmanlandırma ve çapraz katmanlandırma mimarileri gündeme gelmektedir. En düşük olarak fiziksel katmandan başlayacak olursak, kaynak ve aktarıcılarda kodlama ve işaret işleme algoritmaları gerekli olacaktır. Bununla birlikte hedefte de işaret işleme ve çözme algoritmaları gerekmektedir [21], [40]. Tüm bu ihtiyaçlar bağlantı seviyesi kodlama ve otomatik tekrar talebi (ARQ) gibi tekrar iletim yöntemleriyle çözümlenebilir. İletimlerin zaman ve frekans ekseninde programlanabilmesi için protokollerin bağlantı katmanı ve orta seviye erişim ara katmanı düzeyinde fiziksel katman koordinasyonu ile bağlantılandırılması gereklidir. İşaretlerin fiziksel ve bağlantı katmanlarında taşıyıcı, sembol ve çerçeve senkronizasyonu açısından senkronize edilmesi önem taşımaktadır [20], [22], [32]. Sonuç olarak, işbirlikli iletişim kurmak üzere bir araya getirilen noktaların birlikte çalışabilmelerini sağlayabilmek için fiziksel, hatta ağ katmanı seviyesinde çalışmak gereklidir. Etkili ve verimli bir işbirlikli iletişim sistemi kurabilmek için tüm bu katmanlar hesaba katılarak çalışmalar gerçekleştirilmelidir.

Teorik seviyede ilk aktarma temelli problemler 1968 yılında Van der Meulen tarafından gündeme getirilmiştir. Aktarmalı kanal, kaynak, hedef ve kaynak ile hedef arasında yer alarak veri iletimine destek olan aktarıcı terminalden yani toplamda üç terminalden oluşmaktadır.

Aktarma ve iş birliği hususlarında yıllardır çalışılıyor olunmasına rağmen, performans sınırları ve sistem kapasitesi sınırları henüz genel olarak ortaya konulabilmiş değildir

[21]. Fakat bunun yanında farklı yaklaşımlar ve özel şartlar altında bazı kapasite sınırları tayin edilmiştir. Kablosuz bir iletişim ağına, aktarma ya da iş birliği sistemi uygulandığında performans artışı, kapasite artışı, güvenilirlik artışı, çeşitleme kazancında artış gibi çok sayıda parametrede kazanç elde edilir [40]. İşbirlikli iletişim, güncel kablosuz iletişim çalışmalarında, işaret işlemede, ağ sistemlerinde ve bilgi teorisi alanlarında yaygın bir kullanım alanı bulmuştur ve konuya olan ilgi giderek artmaktadır.

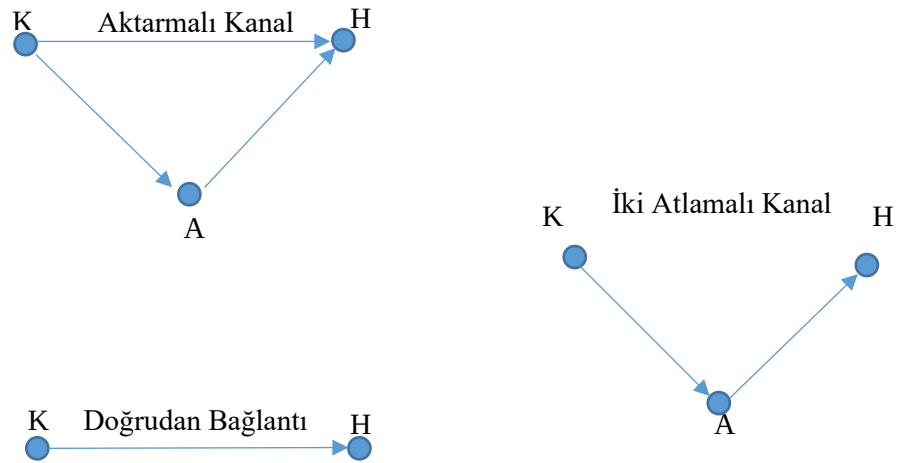


2. BÖLÜM

AKTARMALI KANALLAR VE AKTARIM STRATEJİLERİ

Bir kaynaktan bir hedef noktaya başka herhangi bir noktanın desteği olmaksızın doğrudan bağlantı ile gerçekleştirilen iletişim türüne doğrudan, tek-kullanıcı ya da noktadan-noktaya iletişim denilmektedir. Bu durum, Şekil 2.1’de gösterilmektedir.

Kullanıcı iş birliği ancak en az iki terminalli bir sistemde iş birliği yapmak isteyen üçüncü bir terminalin var olması ile mümkün olmaktadır [17]. En basit ve en eski kullanıcı işbirlikli iletişim örneği, çoklu-atlamalı iletişimdir. Bu tür iletişimde kaynaktan hedefe doğru çeşitli sayıda kullanıcı üzerinden zincir gibi veri gönderilmektedir. Kanalın ne olduğuna bakılmaksızın, mesafe ile birlikte artan bir işaret zayıflaması çoklu – atlamalı iletişimde söz konusudur. Bu durumun bir sonucu olarak uzun menzilli iletişim kurulamaz. Bu problemin üstesinden gelebilmek için çoklu – atlamalı kanallarda alıcı ile verici arasında doğrudan bir bağlantı daha kurulur [36]. Bu sayede aktarıcılar üzerinden gelen veri, sadece sistemin hızını ve kalitesini artırmak için kullanılır.

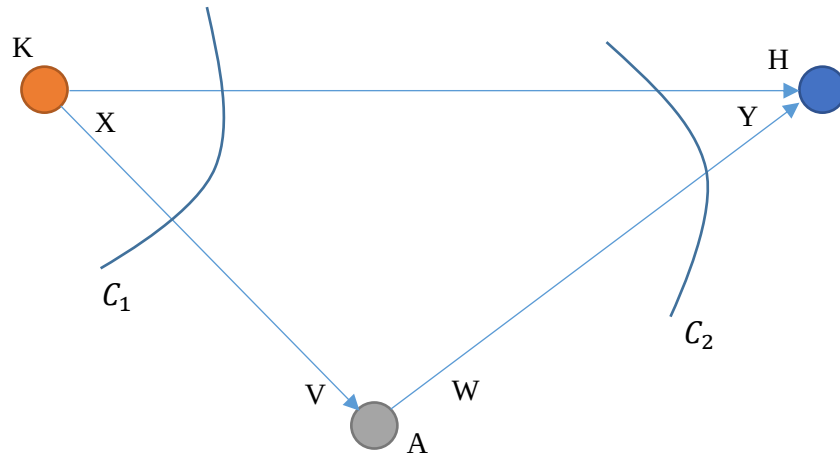


Şekil 2.1. Doğrudan, İki – Atlamalı ve Aktarmalı İletişim Şemaları

2.1 Aktarmalı İletişimin Temelleri

Klasik iletişim ağları göz önüne alındığında, iletişimin alıcı ve verici arasında doğrudan gerçekleştiği görülür. Bu sistemlerde iletişim ortamında yer alan herhangi bir kullanıcı başka bir sistem kullanıcısından yararlanmaz. Fakat, sisteme iş birliği perspektifinden bakacak olursak; aslında çok sayıda aktarıcı göreve hazır olarak beklemektedir [19]. Örneğin kablosuz ağlarda, bir kullanıcı mesajını yayınladığında, yakında bulunan tüm ara bağlantı noktaları bu mesajı alırlar. Bu mesajın alınması ve tekrar iletme sokulması ile sistem performansı ve kapsama alanı geliştirilebilir [12], [19]. Bu tarz yardımlaşmalı iletişime “işbirlikli iletişim” denilmekte olup bu model ile yapılacak iletişimde ne kadarlık bir performans artışının sağlandığını anlayabilmek için teorik çalışmalar yapılması gereklidir. Yapılacak bu çalışmalar sayesinde sistemin yapısı da daha sağlıklı bir biçimde geliştirilmektedir.

Aktarmalı kanal, üç terminalli bir kanaldır ve Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Terminaller Kaynak (S), Hedef (H) ve Aktarıcı (A) olarak adlandırılmıştır. Tüm işaret kaynaktan üretilir ve mutlaka hedefe ulaşmalıdır. Aktarıcı, işaret kaynağı olmadığı halde kaynak ile hedefin birbirleri ile haberleşmesine aktarıcı rolü üstlenerek yardım eder [17]. Kaynaktan gönderilen işaret X olarak adlandırılmıştır. Aktarıcı tarafından alınan işaret ise V ile gösterilmektedir. Aktarıcı tarafından aktarılan işaret ise W ile belirtilmiştir ve hedefe ulaşan işaret Y ile gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Üç Terminalli Bir Aktarmalı Kanal [17].

Kaynak (A), Aktarıcı (A) ve Hedef (H) Gösterilmektedir.

Burada en çok bilinen ifadeler tercih edilmektedir. Bilgi, iki faz ya da mod üzerinden aktarılmaktadır: Birinci modda, kaynak iletimde ve aktarıcı ile hedef alıcı konumundadır, bu durum genelde yayılım modu (BC) olarak bilinir. İkinci modda, kaynak ve aktarıcı iletimde iken ve hedef alıcı konumundadır, bu duruma genelde çoklu – erişim modu da denilir [17]. Bu farklılık kavram olarak; ancak her ikisinin de eş zamanlı olarak uygulanabileceği senaryolarda geçerlidir. Bahsi geçen iki modelden türetilebilecek dört mod burada tanıtılmaktadır.

1. $K \rightarrow (A, H) ; (K, A) \rightarrow H$ (Aktarmalı iletişimin bilinen en yaygın formu);
2. $K \rightarrow A ; (K, A) \rightarrow H$ (İlk modda hedef kaynaktan gelen işareti yok sayar);
3. $K \rightarrow (A, H); A \rightarrow H$ (İkinci modda kaynak iletimde bulunmaz);
4. $K \rightarrow A ; K \rightarrow H$ (Çoklu atlamalı iletişim).

Tüm bunlar arasında en yaygın bilinen mod birinci mod olup aktarmalı iletişime dair ilk bulgular bu mod üzerinden gerçekleştirilmiştir. İkinci ve üçüncü modlar ise basitleştirilmiş modeller olup analitik çalışmalar için kullanılmaktadır. Örneğin, boşta çalışma olasılıklarının ve sönümlü kanallar için uzay – zaman kodlarının tasarımını oldukça basite indirgerler [17].

Gösterilen son aktarma modeli, diğer üçüne kıyasla daha eski ve basittir, özellikle çoklu atlamalı iletişimde kullanılır. Diğer üç modelin aksine, çoklu atlamalı iletişim çeşitlilik kazancı konusuna odaklanmaktan ziyade geniş mesafe iletişimde işaret zayıflamasıyla mücadele etme amacı ile kullanılır. Kablosuz iletişimde, genel olarak iletişim mesafesi arttıkça artan ciddi bir zayıflatma etkisi söz konusudur [41]. Bu zayıflama miktarı, kanalın zayıflamasının kuvveti olan γ ile karakterize edilir. Bir başka deyişle, şayet iletilen güç P ise d mesafesinde alınan güç $\frac{P}{d^\gamma}$ 'dir. Bu zayıflatma değeri uzun menzil iletişimi sanal olarak imkânsız kılar. Bu problemin en kolay çözümü kaynak ile hedef arasına çok sayıda kısa menzilli alt iletişim terminalleri yerleştirerek bir iletişim zinciri kurmaktır. Çoklu atlamalı kanalların ayırt edici önemli özelliği her bir noktanın daha önceden tanımlanmış olması ve kendinden önce yer alan nokta ile iletişim kurmasıdır [17], [30]. Fakat kablosuz iletişimde bir terminalin kendinden birkaç nokta önce olan herhangi bir terminal ile iletişim kurması da mümkün olabilmelidir. Çoklu atlamalı kanallarda sadelik amacı ile bu durum kullanılmaz, bundan dolayı çoklu atlamalı kanalların bu eksik yönü kullanıcı işbirlikli kanallar ile aşılmaktadır.

2.2 Yarı Dupleks ile Tam Dupleks Aktarmalı İletişim Kıyaslanması

Aynı bant üzerinden aynı anda veri gönderip alamayan aktarmalı sistemlere yarı dupleks sistemler denilmektedir. Başka bir deyişle gönderme ve alma kanalları birbirlerine dik olmalıdırlar. Gönderilen ve alınan işaretler arasındaki dikgenlik ilişkisi zaman tabanlı olabilir, frekans tabanlı olabilir veya zaman ve frekans tabanlı olabilir. Bir aktarıcı aynı anda aynı bant üzerinden hem işaret göndermeye hem de almaya çalışırsa bu iki işaret birbirlerine girişimde bulunurlar [5], [21], [41]. Teoride aktarıcı, aktarılan işareti önceden bildiği için, işareti girişim etkilerini yok ederek alabilir. Pratikte, herhangi bir işaret girişim düzeltme hatası, iletilen işaret alınan işarettten 100-150 dB daha güçlü olduğunda tahrip edici olacaktır. Düzeltme hususundaki hassasiyet nedeni ile tam dupleks kanallar pratikte çok fazla rağbet görmezler [17]. Bununla beraber, veri işleme konusundaki ilerlemeler sayesinde gelecekte tam dupleks kanallar daha yoğun kullanılacaklardır.

Aktarmalı iletişim hususundaki teorik bilgi literatürünün ilk yıllarında çalışmalar her ne kadar tam dupleks kanallar üzerine yoğunlaşmış olsalar da zaman içerisinde araştırmaların bilhassa pratik uygulama içeren araştırmaların yönü yarı dupleks kanallara doğru dönmüştür [17].

2.3 Aktarım Protokolleri

Çok sayıda hedef-kaynak çifti içeren kablosuz bir iletişim ağının aktarıcı elemanlarının performansında, işbirlikli kablosuz iletişimin katkısı ile artış görülür [11]. Alıcı ile verici arasında dikkatli bir biçimde konumlandırılan aktarıcılar sayesinde işbirlikli iletişim gerçekleştirilir. Aktarıcılar, kullandıkları yöntemlere göre kendilerine ulaşan işareti aldıktan sonra herhangi bir çözümleme işlemi uygulamadan doğrudan güçlendirip hedefe iletebildikleri (bu yöntemle güçlendir ve aktar (AAF) denilmektedir) gibi, aldıkları işareti çözüp, hatalarını ayıklayıp sonra tekrar kodlayıp güçlendirerek (bu yöntemle çöz ve aktar (DAF) denilmektedir) de aktarma işlemi gerçekleştirebilirler. Hangi strateji kullanılırsa kullanılsın aktarıcılar sistemin bir bütün olarak ortalama iletişim hızını ve performansını yükseltirler, çeşitlilik kazancı sağlarlar [24], [26].

Aktarım yönteminin fiziksel katman olması durumunda, verici ve aktarıcı iletişim esnasında aynı frekans bandını kullanırlar. Fakat bu durumda gerçekleşen iletim zaman

açısından iki ayrı dilimde gerçekleşir, dolayısı ile alıcı, kendisine kaynak ve aktarıcından ulaşan veriyi söz konusu olan zaman dilimleri için ayrı ayrı alır ve işleme tabi tutar [12].

Kuvvetlendir-Aktar (AAF) veya Çöz-Aktar (DAF) stratejileri aktarıcılarda kullanılan ve işbirlikli iletimde aktarım stratejisini belirleyen iki önemli protokoldür. Bu protokoller verinin hedefe ulaşımı sürecinde nasıl işleneceklerini tanımlamaktadırlar [16], [39].

Burada ele alınan tüm protokollerde vericiye sadece tek bir aktarıcının yardımcı olduğu durum ele alınmaktadır. Tipik bir işbirlikli iletişim stratejisinde iki ortogonal fazın olması istenir, bu sayede iki faz arasında bir girişim oluşmaz, bu da TDMA veya FDMA ile mümkündür [18].

- Faz 1’de, bir kaynak hedefe iletim yapar ve aynı zamanda bilgi aktarıcı tarafından da alınır.
- Faz 2’de aktarıcı faz 1’de aldığı veriyi hedefe ileterek iletişime destek verir.

Şekil 2.3’de genel bir aktarmalı kanal gösterilmektedir, burada kaynak P_1 ve aktarıcı P_2 gücü ile iletim yapmaktadırlar. Kaynak ve aktarıcının eşit güç ile yani P ile iletim yaptığını kabul edelim. Faz 1’de kaynak hem hedefe hem de aktarıcıya bilgi gönderir. Sırası ile hedef ve aktarıcı tarafından alınan işaretler $y_{s,d}$ ve $y_{s,r}$ ’dir.

$$y_{s,d} = \sqrt{P}h_{s,d}x + n_{s,d} \quad (2.1)$$

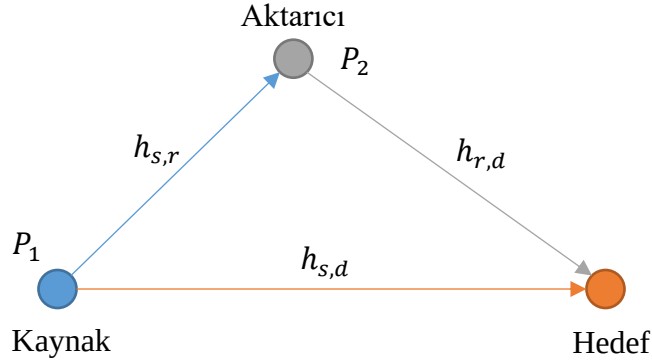
$$y_{s,r} = \sqrt{P}h_{s,r}x + n_{s,r} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki 2.1 ve 2.2 numaralı denklemlerde P kaynaktan iletilen güçtür, x iletilen bilgi sembolüdür, $n_{s,d}$ ve $n_{s,r}$ ise eklemeli gürültüdür. $h_{s,d}$ ve $h_{s,r}$ ifadeleri ise sırasıyla kaynaktan hedefe ve kaynaktan aktarıcıya kanal sabitleridir. Kanal sabitleri, sırasıyla $\delta_{s,d}^2$ ve $\delta_{s,r}^2$ varyanslı, sıfır ortalamalı, karmaşık Gaussian rastgele değişkenleri ile modellenir [18]. Gürültü terimleri $n_{s,d}$ ve $n_{s,r}$ ise N_0 varyanslı, sıfır ortalamalı, karmaşık Gaussian rastgele değişkenleri ile modellenir.

Faz 2’de, aktarıcı kendisine ulaşan işaretin işlenmiş bir kopyasını hedefe gönderir, bu da şu şekilde modellenir:

$$y_{r,d} = h_{r,d}q(y_{s,r}) + n_{r,d} \quad (2.3)$$

Burada $q(.)$ fonksiyonu aktarıcıda uygulanan işleme bağlıdır.



Şekil 2.3. Basite İndirgenmiş Bir İş birliği Modeli

Sabit aktarım senaryosunda, kanal kaynakları, kaynak ve aktarıcı arasında deterministik olarak sabit bir biçimde bölünmüş durumdadır. Uygulanan protokollere göre aktarıcıda uygulanacak işlemler farklılaşmaktadır. En çok bilinen iki iş birliği stratejisi AAF aktarımı ve DAF aktarımı metotlarıdır [18].

2.3.1 Kuvvetlendir ve Aktar (AAF) Aktarma Protokolü

Analog bir işaretin iletiminde, aktarıcı unsurun yetersiz işlemci gücüne sahip olduğu senaryoda ya da zaman bazlı gecikmenin önemli zararlara yol açacağı senaryoda Kuvvetlendir ve Aktar (AAF) aktarma protokolü tercih edilmelidir [4], [12].

Bu protokolde, aktarıcıya ulaşan, kanal boyunca zayıflayan işaret herhangi ek bir işleme tabi tutulmadan olduğu gibi alınır, kuvvetlendirilir ve aktarılır. Kuvvetlendirme işlemi yapılırken dikkat edilmelidir ki işaretin içerisinde yer alan ve kanal boyunca eklenmiş olan gürültü de aynı oranda kuvvetlendirilmektedir. AAF protokolünde en başarısız olunan nokta maalesef gürültüyü de güçlendirmek durumunda kalınmasıdır [8].

Aktarıcıya ulaşan işaret, kanalın davranışının kusursuz olarak kestirilebildiği kabul edilerek kuvvetlendirilir. Aşağıda yer alan denklem 2.4 ile güçlendirme işlemi kazancı hesap edilebilir [21].

Gelen işaret, kanal karakteristiğinin mükemmel bir biçimde tahmin edilebildiği varsayılarak güçlendirilir, böylece kuvvetlendirme işlemi kazancı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [21].

Aktarıcıya ulaşan işaretin güç hesabı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$E[|y_r^2|] = E[|h_{s,r}|^2]E[|x_s|^2] + E[|z_{s,r}|^2] = |h_{s,r}|^2 \varepsilon + 2\sigma_{s,r}^2 \quad (2.4)$$

Bu ifadede gönderici s ile aktarıcı ise r ile gösterilmiştir. Verinin aynı miktarda güç ile gönderilebilmesi için aktarıcının kullanması gereken güç ifadesi:

$$\beta = \sqrt{\frac{\varepsilon}{|h_{s,r}|^2 \varepsilon + 2\sigma_{s,r}^2}} \quad (2.5)$$

Her bir blok için ayrı ayrı hesap yapılması gereken bu ifadenin kullanılabilmesi için aslında her bir blok için yine ayrı ayrı kanal davranışının da ön görülmesi gerekmektedir.

Sabit bir AAF aktarma protokolünde, bu protokol literatürde çoğunlukla sadece AAF protokolü olarak adlandırılmaktadır, aktarıcı kendisine ulaşan işareti ölçeklendirir ve hedefe işaretin kuvvetlendirilmiş bir kopyasını gönderir [12], [39]. Kuvvetlendir ve aktar tipi kanal aşağıdaki gibi modellenir [15]. Kaynaktan iletilen x işareti hem hedefe hem de aktarıcıya ulaşır:

$$y_{s,r} = \sqrt{P}h_{s,r}x + n_{s,r} \quad (2.6)$$

$$y_{s,d} = \sqrt{P}h_{s,d}x + n_{s,d} \quad (2.7)$$

Burada, $h_{s,r}$ ve $h_{s,d}$ ifadeleri sırası ile kaynak ile aktarıcı ve kaynak ile hedef arasında var olan Rayleigh düz sönümlmeli kanallarla modellenen kanal sönümlmelerini ifade etmektedir. $n_{s,r}$ ve $n_{s,d}$ ifadeleri ile N_0 varyanslı, sıfır ortalamalı, eklemeli beyaz Gaussian gürültüyü ifade eder. Bu protokolde aktarıcı, kaynak ile aktarıcı arasındaki kanal sönümlleme etkilerini dengelemek amacı ile aldığı işareti güçlendirerek hedefe iletir. Aktarıcı bu işlemi basitçe alınan işaret gücünün tersiyle orantılı bir faktör ile işareti ölçekleyerek gerçekleştirir [18]. Bu da aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\beta_r = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} \quad (2.8)$$

Bu ifadeden yola çıkarak aktarıcından iletilen işaret $\beta_r y_{s,r}$ olur, işaretin gücü ise kaynaktan iletilen işaretin gücü olan P 'ye eşittir. Kaynak ile hedef arasındaki toplam ortak bilgiyi hesaplayabilmek için öncelikle hedefteki anlık toplam işaret – gürültü oranını hesaplamak gereklidir. Alıcıdaki SNR değeri, kaynak ve aktarıcı bağlantılarından gelen SNR değerlerinin toplamı kadardır. Kaynaktan gelen SNR değeri aşağıda verilmiştir [18]:

$$SNR_{s,d} = \Gamma |h_{s,d}|^2 \quad (2.9)$$

$$\Gamma = \frac{P}{N_0} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki ifade ile aktarıcı bağlantısından elde edilen SNR hesaplanmıştır. Faz 2'de aktarıcı kendisine ulaşan işareti kuvvetlendirerek P iletim gücü ile hedefe iletir. Faz 2'de hedef terminal tarafından alınan işaret şöyle yazılır:

$$y_{r,d} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} h_{r,d} y_{s,r} + n_{r,d} \quad (2.11)$$

Burada $h_{r,d}$ aktarıcı ile hedef arasındaki kanal katsayısıdır ve $n_{r,d}$ eklemeli gürültüdür. Daha özel olarak, alınan işaret $y_{r,d}$:

$$y_{r,d} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} h_{r,d} y_{s,r} x + n'_{r,d} \quad (2.12)$$

Burada;

$$n'_{r,d} = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{P|h_{s,r}|^2 + N_0}} h_{r,d} n_{s,r} + n_{r,d} \quad (2.13)$$

Gürültü terimleri olan $n_{s,r}$ ve $n_{r,d}$ 'nin bağımsız olduklarını varsayalım, bu durumda $n'_{r,d}$ sıfır ortalamalı, karmaşık Gaussian rastgele değişkenidir, bu değişkenin varyansı:

$$N'_0 = \left(\frac{P|h_{r,d}|^2}{P|h_{s,r}|^2 + N_0} + 1 \right) N_0 \quad (2.14)$$

Hedef x işaretini iki farklı kaynaktan, yani hem kaynaktan hem de aktarıcıdan alır. Alınan bu işaretleri birleştirmek gereklidir. Literatürde farklı birleştiriciler yer almaktadır. Bununla birlikte SNR açısından en iyi sonuçları veren birleştirici en yüksek oranlar birleştiricisidir (MRC). Birleştirme yöntemleri ayrıntılı olarak üçüncü bölümde ele alınmaktadır. MRC birleştiricisi, tüm kanal katsayılarına sahip evre uyumlu bir seziciye ihtiyaç duymaktadır [18]. Ayrıca, MRC çıkışındaki işaretin SNR değeri, tüm kollardan ulaşan işaret-gürültü oranlarının toplamı kadardır [18].

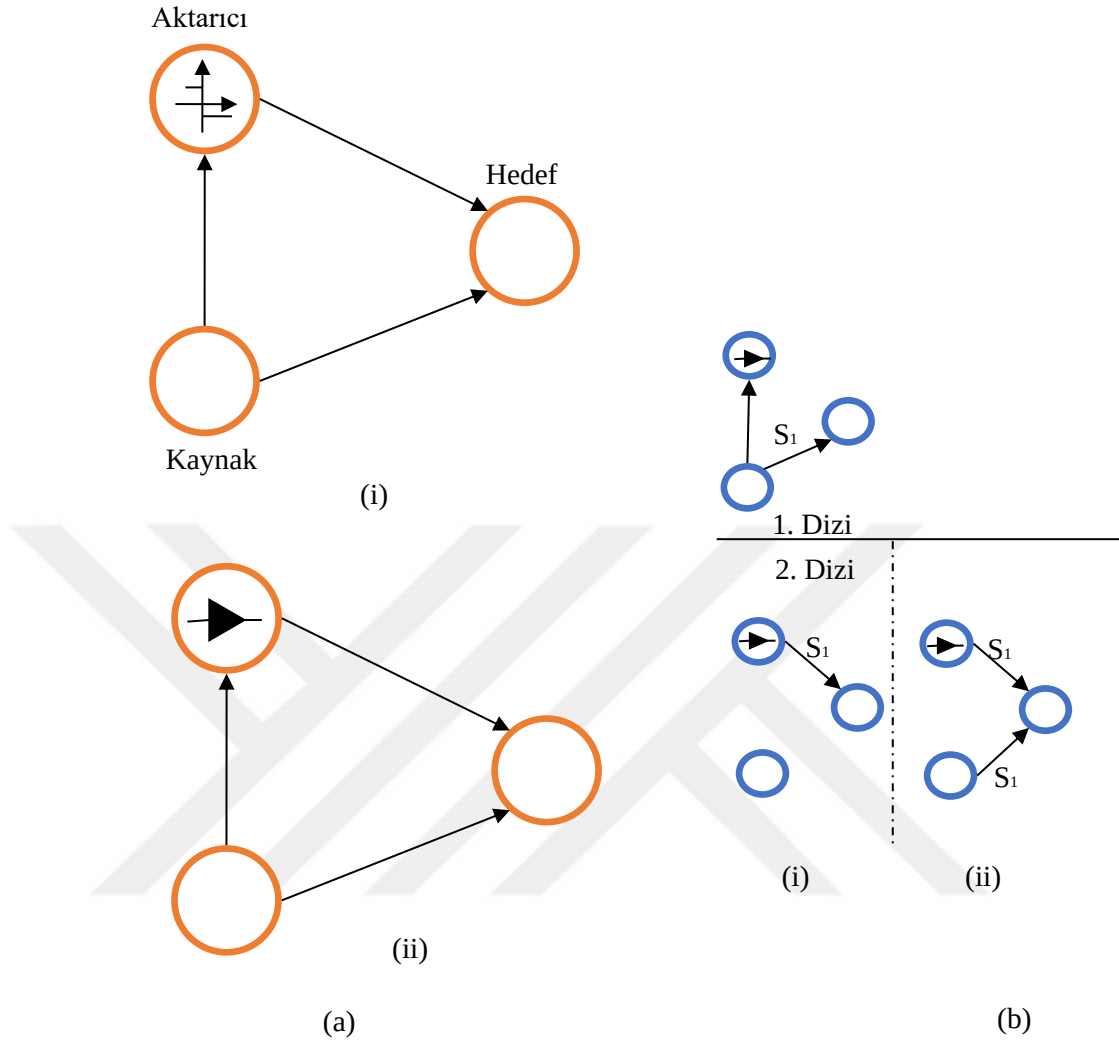
Tüm kanal katsayılarının $h_{s,d}$, $h_{s,r}$ ve $h_{r,d}$ bilinmesi ile hedefteki MRC sezicinin çıkış ifadesi şöyle yazılır:

$$y = a_1 y_{s,d} + a_2 y_{r,d} \quad (2.15)$$

Birleştirici faktörleri olan a_1 ve a_2 değerleri, çıkıştaki SNR değerinin en yüksek olması için uygun şekilde tasarlanmalıdır. Bunu yapmak aslında bir optimizasyon işlemidir. AWGN gürültüsü tüm uzay boyunca yayıldığı için alıcı tarafta gürültü etkilerini minimize etmek için alıcı, alınan işaretler olan $y_{s,d}$ ve $y_{r,d}$ 'yi öngörebilmelidir.

2.3.1.1 AAF Tekniğinin Alt Modelleri

İşbirlikli çeşitleme tekniği kablosuz iletişimde sönümlenme ile mücadele etmek için geliştirilmiş bir tekniktir. Bu teknikte, kablosuz yayılımın doğal avantajlarından faydalanılır. İletişim sürecinde her bir terminal, uzaysal çeşitleme avantajından faydalanmak üzere fiziksel kaynaklarını sanal anten dizilerine dönüştürerek aktarma sürecine dahil olur [34], [35]. En temel aktarma kanalı veri gönderen verici, işareti alan alıcı ve işaretin alıcıdan vericiye gönderilirken aktarılmasına yardım eden aktarıcıdan oluşur.



Şekil 2.4. (a) İşbirlikli Model (i) Çöz ve Aktar (ii) Kuvvetlendir ve Aktar

(b) AF Protokolleri Dizi Yapısı (i) OAF (ii) BFNAF [18]

AAF protokolü ilk defa 2002 yılında önerilmiştir ve yarı dubleks sistemler için tasarlanmıştır [4]. Yukarıda yer alan Şekil 2.4.b.i’de Dikgen Kuvvetlendir ve Aktar tekniğine dair temel fikir kolayca görülebilir. Dikgen Kuvvetlendir ve Aktar protokolünde veri iletimi iki slotta gerçekleştirilir, ikinci slotta aktarıcı birinci slotta kaynaktan aldığı işaretin gürültülü bir kopyasını ölçekler ve tekrar iletir. Bununla beraber ikinci slotta kaynak pasiftir ($P_S^{(2)} = 0$) ve aktarıcı tek başına iletim yapar.

İşbirlikli aktarım modelleri temelde çöz - aktar (DAF) ve kuvvetlendir - aktar (AAF) tipi olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir [18]. Çöz ve aktar tipi aktarım stratejilerinde, aktarıcı alınan kaynak işaretini çözer, ardından tekrar kodlar, nihai mesajı hedefe iletir [15]. Diğer yandan, AAF protokollerinde aktarıcı kendisine ulaşan işarete herhangi bir

işaret işleme uygulamadan işareti olduğu gibi alır, kuvvetlendirir ve hedefe gönderir [12]. Kuvvetlendirme işlemi, kuvvetlendirme katsayısı ile işaretin çarpılması olarak düşünülebilir. Bu iki işbirlikli aktarım stratejisini kıyaslarsak, AAF pratik uygulamalarda karmaşık olmayan bir çözümdür ve aktarıcıda çözme işlemi gerektirmediği için güç açısından da kritik avantaja sahiptir [12]. Karmaşık olmaması avantajına ilave olarak, AAF, çeşitleme performansı göz önüne alındığında asimptotik olarak DAF metoduna yakınsar [18], [32]. Bununla beraber, bazı durumlarda aktarıcıda işaretin çözülmemesi sayesinde aktarıcıda meydana gelebilecek çözümleme hatalarının yayılımı da önlenmiş olur. Şekil 2.4 (a)'da üç noktalı iki temel iş birliği metodu görülmektedir [39].

Pratikte terminaller, birçok sınırlamadan dolayı tam dubleks çalışamazlar, yani aynı anda hem veri alıp hem de iletemezler, bunun yerine yarı dubleks modda çalışırlar. Bu modda terminaller veri alıp aktardıktan sonra ancak yeni veri almaya müsait hale gelirler. 2002 yılında ilk defa bu sınırlamaya uygun aktarım yapacak AF protokolü önerilmiştir, bu protokolda kaynak ve aktarıcı iletimleri zaman bölmeli çoğullama ile ayrılırlar [39]. Fakat, bu yöntemde kaynak zamanın yarısında pasif olduğu için bant genişliğinde kayıp söz konusudur. Bu hız kaybını önlemek için dikgen olmayan AF aktarım stratejisi (NAF) geliştirilmiştir, bu yöntemde aktarım süreci boyunca kaynak yeni bilgi transfer etmeye devam eder. Nihai olarak, işbirlikli çerçeve süresince kanalın değiştiği blok sönümlemeli kanallar için Blok – Sönümlemeli NAF (BFNAF) geliştirilmiştir, bu stratejide kaynak çeşitlilik kazancını artırmak için aynı veriyi tekrar iletir [39].

İşbirlikli iletişim en temelinde bir ağ problemi olduğu için, protokol katmanlama ve çapraz katman mimarileri doğal olarak gündeme gelir. Çapraz katmanlama teknikleri, protokoller arasındaki performans kazançlarını artırmak için birleşik protokol tasarımlarını mümkün kılmaktadır.

2.3.1.2 Blok Sönümlemeli Kanallarda AAF Teknikleri

Bu bölümde klasik durgun benzeri blok sönümlemeli ortamlarda iş birliği protokolleri ele alınmaktadır. Bugüne kadar ele alınmış tüm işbirlikli kanal modellerinde kanalın parçalara bölündüğü ve iş birliği çerçevesi süresince sabit olduğu varsayılmıştır. Bu yaklaşım elbette analizleri kolaylaştırmaktadır. Ancak gerçekte bu yaklaşım doğru olamaz üstelik mobil bir terminalin olduğu bir kanalda kanalın sabit olduğu düşünülemez. Burada, bu sınırlamayı biraz gevşeterek, bütün işbirlikli iletişim çerçevesi süresinden

daha kısa bir eş zamanlama süresine sahip geleneksel durgun benzeri kanallarda işbirlikli protokoller ele alınmaktadır. Bu yeni yaklaşım sayesinde çeşitleme kazancında ilave bir artış söz konusu olur. Çünkü, bu yaklaşımda geleneksel NAF protokolleri kaynağın aynı veriyi iş birliği süresince tekrarlamasına izin verirler, bu da alıcı tarafta çeşitleme kazancının artmasına neden olur [39]. NAF temelli bu yeni protokol Blok Sönümlemeli Dikgen Olmayan Kuvvetlendir ve Aktar (BFNAF) protokolü olarak adlandırılır ve düşük spektral verimlilik koşullarına uyumludur.

Kaynak (S), Aktarıcı (R) ve Hedef (D) terminallerini içeren üç terminalli bir işbirlikli iletişim ağını ele alalım. Tüm terminaller yarı dublektir, yani aynı anda hem veri alıp hem de veri gönderemezler. Terminaller arasındaki fiziksel bağlantılar, blok sönümlemeli, sıfır ortalamalı, bağımsız, birim varyanslı dairesel simetrik Gaussian rastgele değişkenleri ile modellenir. Burada kanal kazançlarının veri blokları arasında bağımsız olarak değiştiğini kabul etmekteyiz. Bu yaklaşım sayesinde pratikte mobil terminaller içeren bir sistemin de analizi kolayca yapılabilmektedir [39]. NAF tabanlı protokoller için bu yaklaşım ilave çeşitleme kazancına yol açmaktadır. Buna ilave olarak, eklemeli gürültü, sıfır ortalamalı ortak bağımsız, dairesel simetrik, birim varyanslı karmaşık Gaussian rastgele değişkenleri ile modellenir. Burada bahsedilen teknik her ne kadar simetrik sistemler için önerilmiş olsa da asimetrik sistemler için de kullanılabilir.

2.3.1.3 Dikgen Olmayan Kuvvetlendir ve Aktar (NAF)

NAF protokolü 2004 yılında önerilmiştir, ardından 2005 yılında yarı dubleks tek aktarıcılı sistemler için bu protokolün çeşitlemeli çoğullama takası (DMT) hususunda ideal protokol olduğu doğrulanmıştır [1]. NAF protokolü, OAF protokolünün optimize edilmiş halidir, bu protokolde kaynak ve aktarıcı iletimleri dikgen kanallarla (slotlar gibi) bölünmektedir. Daha detaylı anlatmak gerekirse, OAF protokolünde ortaya çıkan ve kaynağın her bir zaman slotundan sonra boşa beklemesinden kaynaklı hız düşüşünü engellemek için NAF protokolü geliştirilmiştir [39]. NAF protokolünde kaynak işbirlikli aktarım sürecinde aktarıcı veri transfer ederken dahi iletim yapmaya devam eder. Bu protokolün en önemli avantajı da tam olarak bu noktada ortaya çıkar, kaynak yeni veri x_2 gönderirken, aktarıcı da bir yandan bir önceki slotta aldığı bilgiyi x_1 iletmeye devam eder, $x_2 \neq x_1$. NAF protokolü Şekil 2.5.b.ii'de gösterilmiştir. NAF protokolünde kaynak

hedefe durmaksızın sürekli yeni veri transfer ettiği için çoğullama kazancında artış söz konusu olur. Bununla beraber, tek aktarıcılı modelde, sadece zamanın yarısında aktarım sağlanır, bundan dolayı veri her zaman çeşitleme kazancı sağlayamaz. NAF protokolünün çoklu aktarıcılı sistemlere genişletilmesi mümkündür.

2.3.2 Çöz ve Aktar (DAF) Aktarma Protokolü

Analog kablosuz iletişim günümüzde oldukça az tercih edilir konuma gelmiştir ve aktarma işlemi yapan aktarıcılı elemanlar kendi başlarına yeterli işlemci gücüne ulaşmışlardır. Tüm bu hususlar ışığında DAF (Çöz ve Aktar) metodunun aktarıcılarda daha fazla tercih edildiği görülmektedir [16], [38]. İşaretin alındıktan sonra uygun şekilde çözümlendiği ve bu işlemin ardından tekrar kodlama yapıldığı bu yöntem, oldukça fazla işlem gücü gerektirir. Bu sayede AAF metodunun aksine güçlendirilerek aktarılan işaret içerisinde yer alan gürültü ayıklandığı için gürültü kısmı olmadan sadece işaret güçlendirilir ve aktarılır [12], [38]. Bu şekilde işleyen bir aktarım sistemi kurabilmek için iki önemli uygulama yöntemi bulunmaktadır.

Gayet açık ki aktarıcıya ulaşan işaret aktarıcılı tarafından bir bütün olarak tamamen kendi kaynakları ile çözülebilir. Bu yöntem oldukça avantajlı bir yöntem olarak görülse de aslında önemli miktarda işlemci gücü gerektirdiği için dezavantajlı bir pozisyona düşmektedir. Gelen işaretin çıktığı kaynakta işarete hata düzeltme kodu eklenmişse, alınan işarete bulunan hatalar bu kod vasıtası ile ayıklanabilir [15]. Hata ayıklama kodu içermeyen işaretlerin sonuna eklenecek özel bir doğrulama kodu ile gelen işaretin gönderilen işareten ne kadar farklı olduğu yani ne kadar hata içerdiği tespit edilebilir. Sonuç olarak uygulanacak farklı yöntemler ile işaret hedefe aktarılmadan önce hata ayıklamasına tabi tutulabilirler [16].

Gelen işaretin bütününe çözümlenmesi maalesef her durumda gerçekleşmeyebilir. Gelen verinin bir bütün olarak çözümlenmesi sürecinde bir gecikme oluşuyor ise sisteme bir bütün olarak bakıldığında bu durum kabul edilemez [33]. Aktarma sırasında kullanılan aktarıcılı elemanların veriyi çözecek işlemci gücüne sahip olmamaları durumunda ya da gelen verinin oldukça hassas kodlama gerektirmesi durumunda yine veri bir bütün olarak çözümlenemez [35]. Bu şartlar altında gelen veri, sembollerine ayrılarak çözülebilir ve ardından tekrar kodlanır. Fakat bu durumda veri üzerinde hata denetimi ve hata düzeltilmesi gerçekleştirilemez [37].

Çöz ve aktar tipi protokolde, kaynak ve aktarıcı kodlama bloku gibi işlem gerçekleştirir. Bu bölümde, geriye dönük çözümleme yöntemi ele alınacaktır. Çözümleme sistematığı Tablo 2.1’de görülebilmektedir. İletim B bloklarında gösterilmektedir. Burada her bir blok N adet sembol içermektedir. Kaynak, her bir B bloğunda, $w_0 = w_B = 1$ değeri için N uzunluklu bir kod cümlecisi $x_S^N(w_{B-1}, w_B)$ göndermektedir. Burada, w_B , B bloğunda iletilen yeni işareti belirtmektedir [18].

Kaynak aktarım katsayısı belirlenebilmektedir. Böylece aktarıcı güvenilir şekilde çözümleme yapabilir. Bu faydayı sağlayabilmek için kaynak oranı $R^{(DF)}$ aşağıdaki ifadeyi sağlamalıdır [18].

$$R^{(DF)} \leq I(X_S; Y_R | X_R) \quad (2.16)$$

Tablo 2.1. Çöz ve Aktar Tipi Blok Yapısı

Blok 1	Blok 2	Blok 3	...	Blok B
$X_S^N(1, w_1)$	$X_S^N(w_1, w_2)$	$X_S^N(w_2, w_3)$	...	$X_S^N(w_{B-1}, w_B)$
$X_{R_1}^N(1)$	$X_{R_1}^N(w'_1)$	$X_{R_1}^N(w'_2)$	...	$X_{R_1}^N(w'_{B-1})$

Bu durumda, aktarıcı B bloğunun sonunda w_B için w'_B kestirmesi yapar ve $B+1$ bloğunda $x_R^N(w'_b)$ işaretini gönderir. İlk blokta, aktarıcı öngörülebilir bir kod dizisi $X_{R_1}^N(1)$ gönderir. $w'_b = w_b$ kabulü ile aktarıcı kaynak mesajını güvenilir bir biçimde çözer. Bu sayede, aktarıcı, alınan işaret üzerindeki kanal etkilerini yok eder. Bu durumun bir sonucu olarak kaynak mesajının orijinal temiz bir kopyası elde edilmiş olur. Kaynak w_B , $B + 1$ bloğunda tekrarlandıkça, aktarıcı kaynak ile senkron hareket edebilmektedir [18]. Not edilmelidir ki bu çözümleme şemasını gerçekleştirebilmek için aktarıcının hem iletim hem de alım işlemini eş zamanlı yapabildiği tam dubleks varsayımı kritik öneme sahiptir.

Hedef, tüm B bloklarını aldıktan sonra çözme işlemine başlar ve geriye doğru hareket eder. B bloğunda, herhangi yeni bir bilgi gönderilmez ve kaynak w_{B-1} ’in çözülmesi ile

meşguldür. Doğru mesaj indeksi aşağıdaki koşulun sağlanması ile belirlenebilmektedir [18]:

$$R^{(DF)} \leq I(X_S, X_R; Y_D) \quad (2.17)$$

Kaynak bir defa w_{B-1} işaretini çözerse, benzer şekilde geriye doğru hareket ederek $w_{B-2}, \dots, w_1$ çözme işlemini gerçekleştirir. Denklem 2.16 ve 2.17’de yer alan kısıtlamaları birleştirirsek ve sabit bir giriş dağılımı $p(x_S, x_R)$ kullanırsak:

$$R^{(DF)} \leq \min\{I(X_S; Y_R | X_R), I(X_S, X_R; Y_D)\} \quad (2.18)$$

denklemini gerçekleştirilebilir olacaktır. Tüm giriş dağılımlarını maksimize edecek, DAF protokolünün maksimum oranını şöyle yazabiliriz:

$$R_{max}^{(DF)} = \max_{p(x_S, x_R)} \min\{I(X_S; Y_R | X_R), I(X_S, X_R; Y_D)\} \quad (2.19)$$

İlginçtir ki DAF protokolü, aktarma kanalının fiziksel olarak zayıf olması durumunda kapasite açısından istenen verimi yakalar [21]. Fiziksel zayıflamadan kasıt aktarıcıdaki çözme işleminin sisteme ilave bir sınırlama getirmediğini ifade eder ve DAF optimum bir hale gelir.

Aktarma kanalının fiziksel olarak zayıflamadığı durumlarda, aktarıcıdaki çözme işlemi bazı sınırlamalar ile karşılaşabilir. Örneğin kaynak - aktarıcı kanalı gerçekleştirilebilir iletim hızlarını sınırlandırabilir. Bu tarz durumlarda, parçala - çöz ve aktar (PDF) yöntemi DAF yöntemi yerine tercih edilebilir. Adından da açıkça anlaşıldığı üzere, PDF yönteminde aktarıcı kaynak mesajının sadece belli bir kısmını çözmektedir. Geriye kalan çözülmemiş kısım ise çözülmeden ve aktarıcı kullanılmadan, kaynak tarafından doğrudan hedefe aktarılmaktadır. Bu aktarım stratejisi sayesinde DAF gerçekleştirilebilir iletim hızlarında artış sağlamaktadır [21].

Aktarıcı noktada karşımıza çıkan bir diğer aktarma protokolü olan sabit çöz ve aktar protokolünde, aktarıcı aldığı veriyi çözer, ardından tekrar kodlar ve alıcıya iletir. Bu tarz aktarma yöntemine sabit çöz ve aktar protokolü denilir, literatürde sabit ifadesi pek kullanılmaz [18]. Aktarıcıya ulaşan ve çözülen işaret $\hat{x}$ ile gösterilecek olursa, $\hat{x}$ ’in birim varyanslı olma durumunda aktarıcıya iletilen işaret $\sqrt{P}\hat{x}$ ile gösterilir. Şunu hatırlatmakta

Fayda var, alıcıya ulaşan işaret hatalı olabilir. Şayet hedefe hatalı bir işaret gönderilirse hedefteki çözme işlemi anlamsız olacaktır [18]. Çok açık ki bu çeşitleme modelinde sistemin performansını kaynak – aktarıcı ve kaynak – hedef bağlantıları içerisinde en kötü olanı belirleyecektir.

Çöz ve aktar tipi aktarım, AAF metoduna kıyasla aktarıcıdaki eklemeli gürültü etkisini azaltıyor olsa da hatalı olarak sezilen ve çözülen işaretleri içermeye ihtimali söz konusudur [38]. Bundan dolayı da hatalı iletim, sistemin toplam performansı üzerinde negatif etkilere yol açabilmektedir. Kaynak ile hedef arasındaki ortak bilgi, kaynak ve aktarıcı ile kaynak – hedef ve aktarıcı – hedef kanallarının birleşiminin en zayıf olanı ile sınırlıdır.

Yukarıdaki ifadelerden görüleceği üzere sabit aktarım metodlarının hepsinde uygulama kolaylığı varken, düşük bant genişliği etkisinin dezavantajı söz konusudur. Bunun da temel nedeni aktarmalı iletişimden dolayı aktarıcıya aktarım için kanal kaynaklarının ancak yarısının tahsis edilmesidir [18]. Kaynak – hedef arasındaki iletişim şayet yeteri kadar iyi değilse aktarmalı iletişimin bir anlamı olmaktadır. Aksi takdirde kaynak ile hedef arasında yeteri kadar iyi bir iletişim var ise aktarıcının aktardığı bilginin bir anlamı kalmamaktadır.

Diğer İş Birliği Stratejileri

Literatürde çok iyi bilinen ve oldukça yoğun kullanılan iki aktarım metodu yukarıda anlatılmıştır. Fakat bu metotlara ilave olarak kullanılabilecek farklı aktarım metotları da bulunmaktadır: Sıkıştır ve İlet Aktarma Protokolü ve Kodlanmış Aktarma Protokolü.

2.3.3 Sıkıştır ve Aktar (CAF) Protokolü

DAF aktarım metodunda, aktarıcı zorlayıcı bir karar mekanizması uygulamaktadır [38]. Aktarıcının bir karar vermeye zorlanması, gerçekleştirilebilir iletim hızlarında kayıplara yol açabilmektedir. Bazı durumlarda, aktarıcının daha esnek karar vermesi gerekli olmaktadır.

Basit Sıkıştır ve Aktar (SCF) olarak adlandırılan genel B blok sıkıştırma protokolü şu şekilde işler: Aktarıcı kendisine iletilen Y_R işaretini b bloğunda iken sıkıştırarak $\widehat{Y}_R$ işaretini oluşturur, bu işareti kanala X_R kod cümlecisi ile kodlar, ardından $b+1$ bloğunda X_R işaretini hedefe gönderir. Aktarıcının tam dubleks olması durumunda, aktarıcı bir

yandan mevcut işareti dinleyebilir ve sıkıştırabilirken aynı anda önceki işareti sıkıştırıp gönderebilir, kanal bu sayede aynı anda her iki işlemi de eş zamanlı olarak gerçekleştirir [18]. Bu durumun bir sonucu olarak kanal daha hızlı yanıt verir. B bloğunda alınan işaret Y_D , aynı blok içerisinde iletilen hem kaynak hem de aktarıcı işaretlerin yanı sıra X_S ve X_R 'nin fonksiyonudur.

Hedef noktası yani alıcı, tüm B blokları kendisine ulaştıktan sonra çözme işlemine başlamaktadır. Çözme işlemine öncelikle aktarıcı işareti olan X_R ile başlar. Alıcı, X_R işaretine gürültüymüş gibi davranır ve $\widehat{Y}_R$ işaretini elde eder. Bu adımların güvenilirliğinden emin olmak için, kaynak işaretinin gürültü gibi varsayıldığı durumda aktarıcının sıkıştırma hızının daha düşük olması istenir. Bir başka deyişle; $I(\widehat{Y}_R; Y_R | X_R) \leq I(X_R; Y_D)$ ifadesinin sabit bir giriş dağılımına karşılık doğru olması gereklidir [18]. Alıcı, $\widehat{Y}_R$ işaretini çözdükten sonra, bir önceki bloktan gelen $\widehat{Y}_R$ ve Y_D 'nin her ikisini de kullanarak orijinal X_S kaynak işaretini elde eder.

Sıkıştır ve aktar yöntemi ile çöz kuvvetlendir ve aktar yöntemleri arasındaki en temel fark, aktarıcı sıkıştır ve aktar yönteminde kendisine ulaşan işareti quantize etmesi, sıkıştırıp ardından aktarmasıdır [18]. Bundan dolayı, hedef nokta kendisine ulaşan sıkıştırılmış işaret ile kaynaktan doğrudan gelen işareti birleştirerek sonuç işareti ortaya çıkarır.

Aktarıcı noktada yapılan bu quantize ve sıkıştırma işlemi aslında alınan her bir işaretin bir dizi sembol ile gösterildiği bir çeşit kaynak kodlama işlemidir. Daha sade bir şekilde anlatabilmek için; aktarıcıya ulaşan sembollerin ikili sayılar olduğunu varsayalım. Hedef terminalde, alınan bit dizilerinin çözülmesi ile quantize edilmiş ve sıkıştırılmış işaretin kestirimi yapılır [18]. Bu çözme işlemi, iletilen işareti kestirmek için alınan bitleri bir değerler dizisi ile eşleştirir. Bu kestirme işleminden dolayı gürültü olarak da görülecek bir bozulmaya ortaya çıkar.

Entropi, kaynak kodlayıcılarının performans analizi için kullanılabilecek bir konsepttir. Tanımları sadeleştirmek için kaynak verisinin ayrık ve belleksiz bir kaynaktan üretildiğini düşünelim. Bu senaryoda, rastgele değişkenin entropisinin kaynak tarafından kodlanması, sembol başına bit sayısının ortalaması için bir alt sınır oluşturur. Dolayısı ile entropi aktarıcıda kaynak kodlama hızı için bir alt sınır oluşturur [18]. İş birliği yönteminin

kullanılması ve kaynak ile aktarıcından gelen bağımsız işaretlerin hedef terminalde bir araya getirilmesi bu durumun önüne geçilmesini temin etmektedir. Verimli bir biçimde, kaynaktan hedefe ulaşan bilgi, aktarıcı bilgiyi alma ile meşgul iken yan bilgi olarak kullanılabilir.

Sıkıştır ve aktar yöntemi kullanılması durumunda aktarıcıda işlemsel açıdan yoğunluk oluşmaktadır, bununla beraber aktarıcıda yapılan bu işlem kaynak kodlama olarak da değerlendirilebilir.

2.3.4 Kodlanmış Aktarma Protokolü

Kodlanmış protokolle gerçekleştirilen iş birliği kanal kodlama alt sistemi seviyesinde gerçekleştiği için yukarıda anlatılan aktarım metotlarından farklıdır. Önceki bölümde anlatılan çöz ve aktar yöntemi ile kuvvetlendir ve aktar yönteminde aktarıcı kendisine ulaşan işareti alıp aktarıcıya tekrar iletmektedir [18]. Kodlamalı iş birliğinde aktarıcı, hedefe artırılmış ilave bilgi göndermektedir Kaynaktan gönderilen kod cümlecisi ile alıcıda birleştirme işlemi gerçekleştirildiğinde daha uzun artık koda sahip bir kod cümlecisi ortaya çıkmaktadır.

Kodlanmış iş birliğini daha iyi anlayabilmek için tipik hata düzeltme kodu işlemini ilk olarak ele alalım. Hata düzeltme kodu üreten bir kod üretici, bilgi taşıyan bir dizi sembolü ele alır ve matematiksel bazı işlemler uygular [12], [18]. Bu matematiksel işlemlerin sonucu olarak ortaya sadece girişte yer alan bilgi dizisi çıkmaz, aynı zamanda artık bilgi de ortaya çıkar. Artık bilgi, alıcı terminal tarafından kullanılır, bu bilgi sayesinde alıcı kendisine ulaşan işarete hata olması ihtimaline karşılık orijinal işareti tekrar üretebilir [18]. Kodlanmış iş birliğinde ise kod cümlecisi, her biri farklı kanal ya da yol kullanan iki parça halinde gönderilir.

Kodlanmış iş birliğinde kaynak terminali ve eş terminali tamamen simetrik oldukları için, iş birliği yapan iki terminalde nelerin olduğunu aşağıda ele alalım. Kodlanmış iş birliğinin performansı aşağıdaki olası senaryolara göre şekillenir:

- Hem birinci terminal hem de ikinci terminal diğer kanal kodunun çözülmesinde başarılı olur.
- Hem birinci terminal hem de ikinci terminal diğer kanal kodunun çözülmesinde başarısız olur.

- Birinci terminal, ikinci terminalin kanal kodunu çözmede başarılı olur. Ancak ikinci terminal birinci terminalin kanal kodunu çözmede başarısız olur. Bu senaryoda, tüm terminaller ikinci terminal için ilave bilgi gönderirler. Bu bilgi örneğin en yüksek oran birleştiricisi gibi birleştiriciler kullanılarak ikinci terminal tarafından birleştirilebilir.

Yukarıda yer alan üç senaryonun bir sonucu olarak, kodlanmış iş birliğinde kesinti olasılığı tüm senaryoların kesinti olasılıklarının ortalaması ile elde edilir [16], [21].

2.3.5 Adaptif İş Birliği Stratejileri

Sabit aktarım stratejileri iletim hızındaki deterministik kayıplardan dolayı dezavantaja sahiptirler. Örneğin iki fazda iletim yapılıyor olunmasından dolayı spektral verimlilik açısından %50 kayıp söz konusudur [18], [21]. Bununla beraber, DAF aktarımında, performans kaynak – aktarıcı ve aktarıcı – hedef kanallarının en zayıfı ile sınırlandırılmıştır. Bu da çeşitleme kazancını yarı yarıya düşürür. Tüm bu problemlerin üstesinden gelebilmek için adaptif aktarım stratejileri geliştirilmiştir. Burada en çok bilinen iki strateji ele alınacaktır: Seçici DAF Aktarma ve Artırımlı Aktarma.

2.3.6 Seçici DAF Aktarım

Sabit çöz ve aktar sisteminin kaynak ve aktarıcı arasındaki doğrudan bağlantılar ile sınırlanacağı kolaylıkla tahmin edilebilir. Bununla birlikte sönümleme katsayıları belirli alıcılar tarafından bilindiğinde, A_{ak} (aktarıcı ile kaynak arasındaki sönümleme katsayısı) katsayısı iş birliği halindeki terminaller tarafından yüksek ihtimalle tahmin edilebilirdir [21]. Bu tahminin bir yaklaşımı kullanılarak bu terminaller kendi iletimlerini sisteme adapte edebilirler.

Bu gözleme dayalı olarak şimdi bahsedilecek olan aktarma algoritması geliştirilmiştir. Eğer tahmin edilen ya da ölçülen $|A_{ak}|^2$ değeri, belirlenmiş olan eşik seviyesinin altına düşerse, kaynak tahmin edileceği üzere tekrarlama yöntemi kullanarak ya da daha fazla enerji tüketerek sadece hedefe iletim yapar. Şayet tahmin edilen ya da ölçülen $|A_{ak}|^2$ değeri, belirlenmiş olan eşik seviyesinin üstüne çıkarsa, aktarıcı kaynaktan aldığı veriyi hedefe doğru aktarmaya başlar. Bunu yaparken de çeşitleme kazancından istifade etmek için güçlendir ve aktar ya da çöz ve aktar metotlarını kullanır [21].

Seçici DAF aktarım metodunda, aktarıcıya ulaşan işaretin işaret – gürültü oranı belirlenen bir eşik seviyesini aşarsa, aktarıcı kendisine ulaşan işareti çözer ve hedefe aktarır. Öte taraftan, aktarıcıya ulaşan işaret kanaldaki sönümlleme etkileri gibi etkilere dolayı belirlenmiş eşik seviyesinin altında bir işaret – gürültü oranına sahip olursa bu durumda aktarıcı aktarım yapmaz ve boşta bekler. Seçici aktarma yöntemi, klasik DAF yöntemine kıyasla daha verimli çalışır [15], [16], [21]. Çünkü sabit DAF yönteminde işaretin işaret – gürültü oranına bakılmaksızın tüm işaretler aktarıcıdan hedefe iletilmektedir. İşaret – gürültü oranı bazı durumlarda o kadar düşük olur ki aktarıcı kendisine ulaşan hatalı işareti faydasız bir biçimde hedefe göndermek durumunda kalır. Seçici DAF aktarım yöntemi sayesinde aktarıcı ne zaman işareti gönderip göndermeyeceğine karar vermesini sağlayan bir eşik değere sahiptir [18].

Bir başka deyişle, bu şekilde aktarıcı seçimi ile her iki durumda da çeşitleme kazancı elde edilir. Çünkü her iki durumda da bilgi kaybı yaşanmaması için sönümlleme katsayıları küçüktür. Bu durumu örnekleyecek olursak, şayet $|A_{ak}|^2$ değeri küçük ise, $|A_{hk}|^2$ değeri de küçüktür, bu durumda kaynak iletme devam eder. Benzer şekilde $|A_{ak}|^2$ değeri büyük ise, hem $|A_{hk}|^2$ değeri hem de $|A_{ha}|^2$ değerleri küçük olacaktır, bu durumda aktarıcı kuvvetlendir – aktar veya çöz – aktar metodu ile veri transferi yapacaktır.

Dinamik çöz ve aktar sisteminde, aktarıcı kaynaktan düzenli olarak bilgi alır. Ancak aktarmaya hemen başlamaz. Aktarıma başlamak için kaynaktan alınan bilginin doğru bir biçimde alındığından emin olunur [21].

Şayet, aktarıcıya ulaşan işaretin SNR değeri eşik değerin üstünde ise aktarıcı işareti doğru bir biçimde çözüp aktarabilecektir. Bu durumda, MRC birleştiricisinin çıkışındaki işaretin toplam SNR değeri hem kaynaktan hem de aktarıcıdan gelen işaretlerin SNR değerlerinin toplamı kadardır.

2.3.7 Artırımlı Aktarma

Artırımlı aktarım metodunda, verici ile hedef arasında bir geri beslemenin var olduğu kabul edilir. Hedef, aktarıcıya ilk iletimde işaretin başarı ile ulaşmış olup olmadığına dair bir geri bildirimde bulunur. Bu bilgiye sahip olan aktarıcı herhangi bir aktarım işlemine girmez [18]. Bu metod, spektral verimlilik açısından yukarıda bahsedilen tüm metotlardan daha

verimlidir. Çünkü burada aktarıcı gerekli olmadığı durumlarda ikinci fazda kanal durum bilgisine bağlı olarak gereksiz yere aktarım yapmaz [18].

Sabit ve seçmeli aktarma metotlarında, aktarıcılar sürekli aktarım görevini yürüttükleri için özellikle yüksek iletim hızlarında, gereksiz bir aktarıcı kullanımı söz konusu olabilir. Artırmalı aktarmada, hedef terminalden doğrudan iletimin başarılı olup olmadığına dair bir geri bildirim bir bit ile bile olsa alınmaktadır [18]. Burada bahsedilen artırmalı aktarma metotları aslında artırmalı tekrarlama veya hibrit otomatik cevaplama talebi (ARQ) metotlarının bir çeşidi olarak görülebilir. ARQ metodunda, geri bildirim işaretinde şayet iletişimde bir sorun olduğu tespit edilirse, işaret tekrar gönderilir. Artırmalı aktarma metodunda ise benzer biçimde uzaysal çeşitlemeyi güçlendirmek için aktarıcı tekrar iletim yapar [21].

Bir örnek olarak, kuvvetlendir - aktar ve geri beslemeden yararlanan protokolleri dikkate alalım. Öncelikle, kaynak terminali işareti hedef terminaline iletir. Hedef nokta işareti aldıktan sonra hem kaynağa hem de aktarıcıya işaretin başarılı bir biçimde ulaşmış olup olmadığına dair tek bir bitlik bir geri besleme işareti gönderir. Kaynak – hedef arasındaki, işaret - gürültü oranı (SNR) yeteri kadar yüksek ise, geri besleme doğrudan iletimin başarılı olduğunu bildirecektir ve aktarıcı herhangi bir şey yapmayacaktır [21]. Kaynak – hedef arasındaki SNR oranı yeteri kadar yüksek değilse geri besleme işareti aktarıcıdan kuvvetlendir ve aktar metodu ile kaynaktan aldığı işareti kendisine iletmesini talep edecektir. Sonuç olarak, hedef her iki iletimi birleştirmeye çalışmaktadır. Bu protokoller kanalın serbestlik derecesini daha verimli hale getirirler. Çünkü sadece ihtiyaç halinde ve nadir iletim yaparlar [18], [21].

Artırmalı aktarmada, ilk fazda başarılı bir iletişim gerçekleştirilmiş ise ikinci fazda aktarım yerine yeni bilgi gönderimi yapılır. Öte yandan, ilk fazda iletişim başarısız olmuşsa, aktarıcı herhangi bir sabit aktarım metodunu kullanarak ilk fazda aldığı işaretin aktarımını yapabilir. Burada ele alınan metotta, iletim için AAF protokolü kullanılmaktadır [4], [18].

Artırmalı aktarmada iletim hızı rastgeledir. Eğer ilk faz başarılı olmuşsa iletim hızı R' 'dir. İlk iletimde kesinti (başarısızlık) olmuşsa iletim hızı sabit aktarımda olduğu gibi $R/2$ olacaktır [16].

Algoritmaların performansları incelenirken kesinti olasılıkları bir ölçü olarak kullanılabilir [16]. Kanallar durgun benzeri olduklarında, kanal ortak bilgisi, sönümleme katsayılarının rastgele değişkenlerinden oluşan bir fonksiyon olacaktır [21]. Bu durum, aktarıcılarda kanal kodlama ve çözme algoritmaları, düşük spektral verimlilik gibi birçok detayın yok sayılabileceği bir avantaj doğurmaktadır. Kesinti olasılıklarına dair elde edilen bu sonuçlar, kodlanmamış işbirlikli modülasyon ve demodülasyonun sembol ve bit hata oranlarında da benzer şekilde ortaya çıkmaktadır.



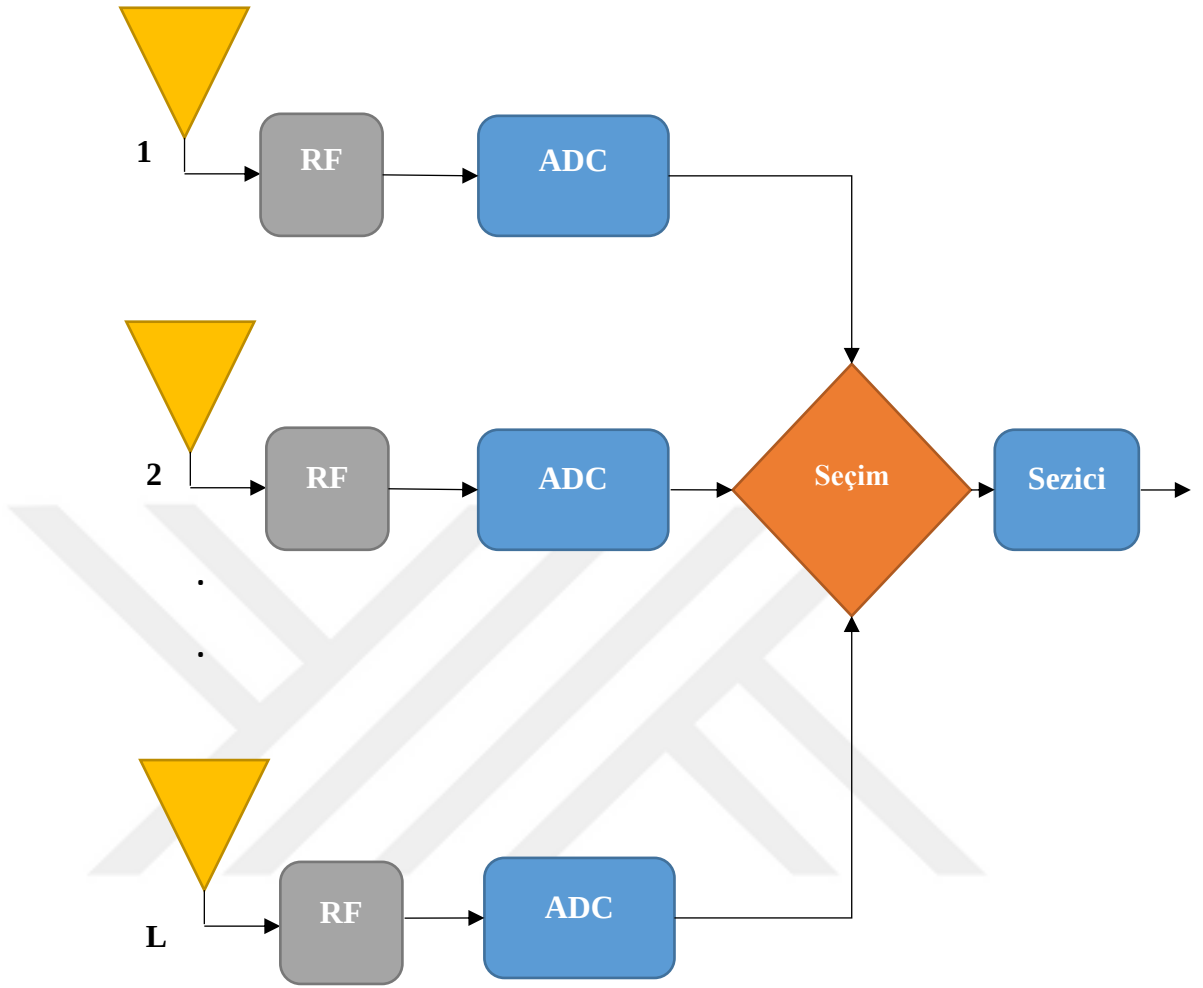
3. BÖLÜM

ÇEŞİTLEME BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Çeşitleme kazancı elde edilebilmesi için çoklu kanallardan gelen farklı işaretlerin birleştirilmesi gerekmektedir. Bu birleştirme işlemi ise farklı metotlar ile gerçekleştirilebilmektedir. Seçilen birleştirme tekniği farklı sistemlerde farklı performans sergileyebilmektedir. Yani birleştirme tekniği çeşitleme kazancının dolayısı ile sistemin tamamının performansı üzerinde etkili olmaktadır [7], [10], [20]. Çeşitli karmaşıklık seviyelerinde ve kanal durum bilgisi ihtiyacı bulunup bulunmamasına göre birleştirme metotları bulunmaktadır.

Birleştirme teknikleri farklı amaçlar için de kullanılabilir. Frekans çeşitleme (RAKE alıcısı) veya paket tekrarlama iletim protokolleri örnek olarak verilebilir. Düşük işlemsel karmaşıklığa sahip olan birleştirme metotları eşit kazanç birleştirme (EGC) ve seçim birleştirme (SC) metotlarıdır. Seçim birleştirmesi yönteminde, anlık olarak en yüksek SNR değerine sahip olan işaret çıkış işareti olarak seçilir.

Şekil 3.1’de bir seçim birleştirici kullanan sistem yer almaktadır. Pratikte SNR değerini doğrudan ölçümlemek çok zordur [37]. Bundan dolayı işaret ve gürültünün toplamının en yüksek olduğu toplam güç değeri bir seçim kriteri olarak kullanılır. Geleneksel SNR metoduna kıyasla $S + N$ seçim yöntemi daha iyi performans sergilemektedir. Birçok durumda faz rehberliğine ihtiyaç duyulan EGC yönteminde eşit performans sergilenmektedir [20], [40].



Şekil 3.1. Seçim Birleştiricisi [20]

Eşit kazanç birleştiricisi ve en yüksek oran birleştiricisi (MRC) yöntemleri lineer birleştirme yöntemleridir. Çünkü her iki metotta da işaretler ağırlıklandırılıp toplanmaktadır:

$$r = \sum_{i=1}^L a_i r_i \quad (3.1)$$

Eşit kazanç birleştirmesinde, ağırlıkların genlikleri eşittir:

$$a_i = e^{-j\varphi_i} \quad (3.2)$$

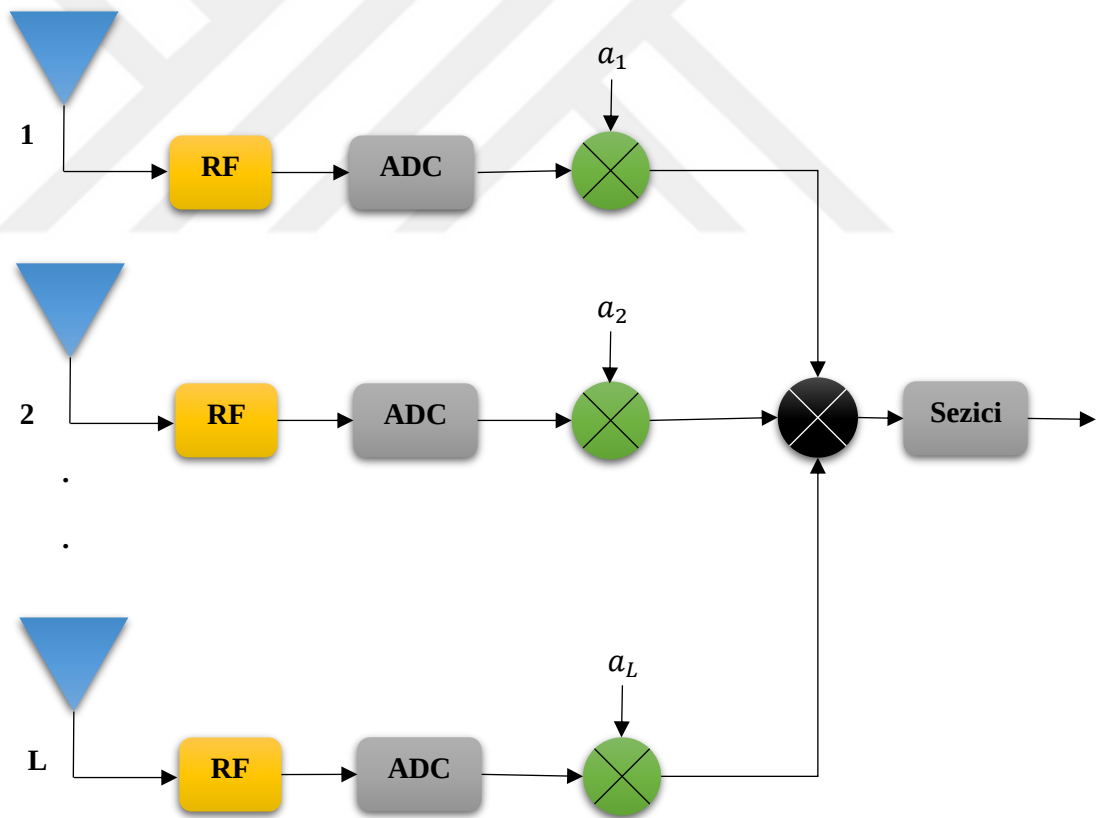
Burada, φ_i değeri alınan işaretin fazıdır, işaretler faz rehberlenir ve birbirlerine eklenir.

En yüksek oran birleştiricisinde, ağırlıklar her bir antenden alınan SNR değerleri ile orantılıdır. Gürültü gücünün eşit olduğu varsayılırsa, ağırlıklar şöyle yazılır:

$$a_i = A_i e^{-j\varphi_i} \quad (3.3)$$

Bu ifadede A_i genlik iken, φ_i ise alınan işaretin fazıdır. Bundan dolayı MRC yönteminde kanal sönümlemesi ve işaretin fazı kestirilmek zorundadır. En yüksek oran birleştiricisi (MRC) yöntemi, alınan SNR değerini maksimize ettiği için en optimum metot olarak karşımıza çıkmaktadır. MRC yöntemi Şekil 3.2’de gösterilmektedir [20].

Sönümleme hakkında herhangi bir kanal durum bilgisi olmaksızın, gürültüsüz işaret gücü ağırlık olarak kullanılamaz [20]. Mükemmel bir faz rehberliğinin sağlandığı varsayılmaktadır.



Şekil 3.2. En Yüksek Oran Birleştirme [20]

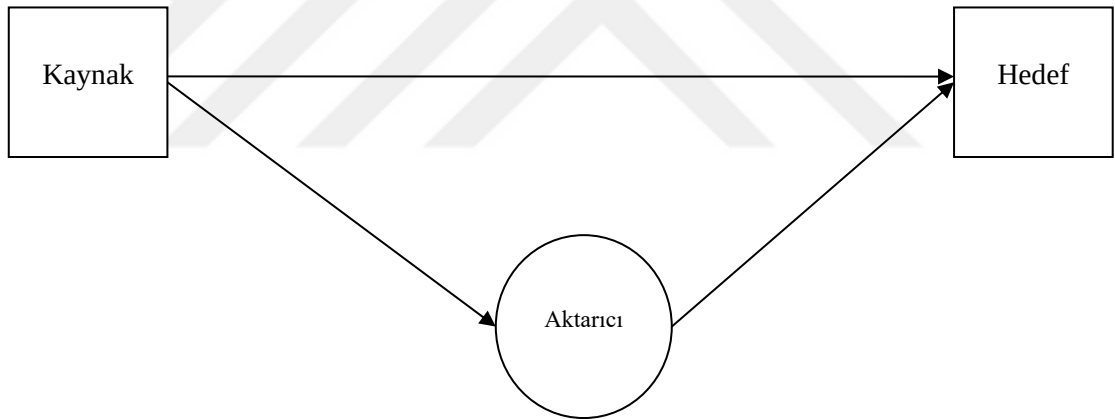
SC metodunda $S+N$ kullanılması stratejisi burada işe yaramaz hatta performans düşüşüne yol açar. Taşıyıcı fazı iki sembol süresince kayda değer oranda değişmiyorsa, farksal PSK

(DPSK) modülasyonu kullanılabilir ve faz rehberleme olmaksızın birleştirme işlemi gerçekleştirilebilir.

Genelleştirilmiş seçim birleştirmesinde (GSC), birden fazla kol birleştirmek için seçilir. İkili seçim birleştirmesinde (SC2), en iyi iki çeşitleme kolu birleştirilmek üzere seçilir. GSC evre uyumsuz sezme durumunda özel olarak daha iyi performans sergilemektedir. Alıcı çeşitlemesi, artan güç tüketimi nedeni ile dezavantajlı bir konumdadır.

Çeşitleme tekniklerinin analizi genel itibarıyla Rayleigh sönümlü kanallar üzerinden yapılmaktadır [7].

Veri seti içerisinde aynı anda birden fazla gelen veri bulunduğu takdirde, gelen işaretler demodüle edilmeden önce birleştirilmelidirler. Şekil 3.3'te yer alan işbirlikli ağ modelinde de farklı birleştiriciler kullanılmaktadır.



Şekil 3.3. Örnek Bir Tek Aktarıcılı İşbirlikli Ağ Modeli

Çeşitleme kazancı sağlayabilmek için alıcıya farklı zaman, frekans ya da konumdan ulaşan işaretlerin birleştirilmesi gerektiği daha önce ifade edilmişti. Bu bölümde, bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında kullanılan birleştiriciler takdim edilmektedir.

3.1 Eşit Oran Birleştiricisi (ERC)

Bu birleştirme yöntemi en sade birleştirme yöntemidir. İşlem süresi hayati öneme sahip ise veya kanal kalitesi tahmin edilemiyorsa, gelen tüm işaretler sadece üst üste eklenebilirler. Eşit oran birleştiricisinde, alıcı kendisine ulaşan tüm işaret kopyalarını

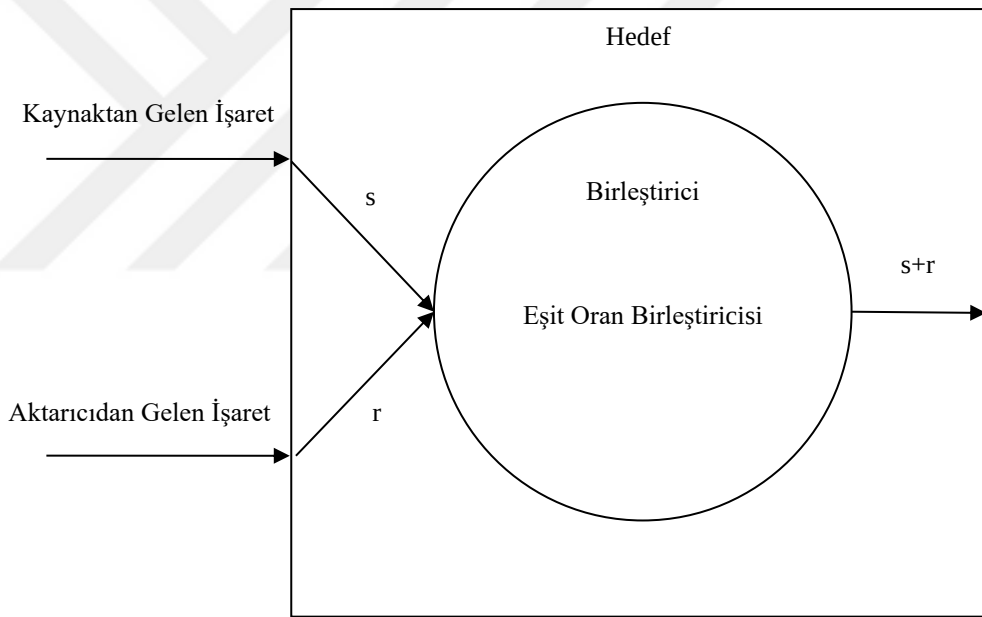
birbirine ekler. Fakat doğal bir sonuç olarak birleştirme performansı görece düşük gerçekleşmektedir [19], [40].

$$y_d[n] = \sum_{i=1}^k y_{i,d}[n] \quad (3.4)$$

Eğer sadece tek bir aktarıcı istasyon kullanılırsa:

$$y_d[n] = y_{s,d}[n] + y_{r,d}[n] \quad (3.5)$$

Bu denklemde $y_{s,d}$ ifadesi göndericiden alınan işareti, $y_{r,d}$ ifadesi ise aktarıcıdan alınan işareti ifade etmektedir [40].



Şekil 3.4. Eşit Oran Birleştiricisi Sistem Modeli

3.2 Sabit Oran Birleştiricisi (FRC)

Sabit oran birleştiricisi yönteminde, alıcıya ulaşan işaret kopyaları, ERC’de olduğu gibi üst üste eklenmek yerine, işaretler tüm iletişim boyunca değişmeyen sabit bir oran ile ağırlıklandırılarak birleştirilirler [21], [24], [40]. Bu sabit oran, ortalama kanal kalitesini temsil etmelidir. Yani kanalda meydana gelen anlık değişimlerden etkilenmemelidir.

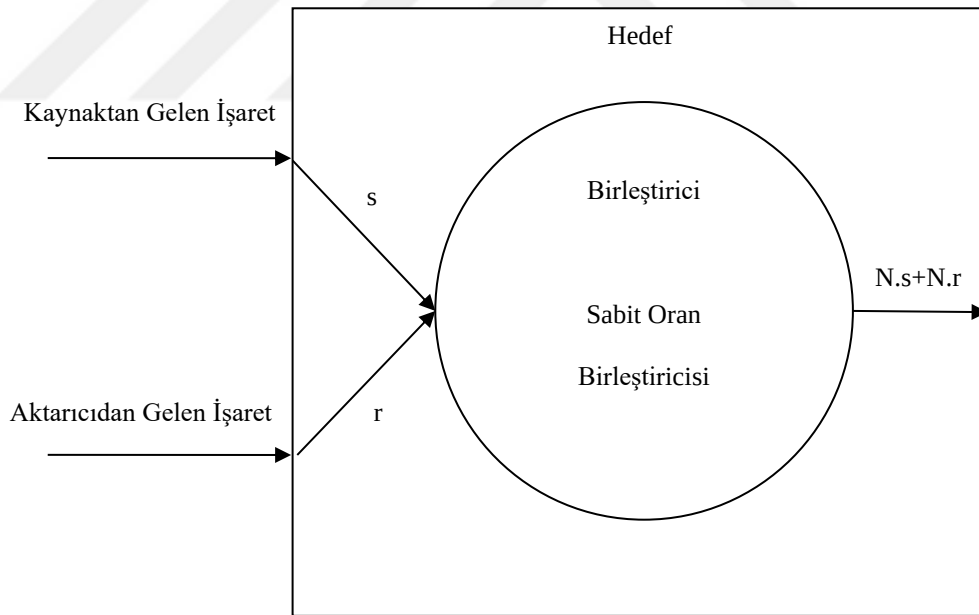
Fakat kanal üzerinde kalıcı etkisi olan, örneğin istasyonlar arasındaki mesafe gibi unsurlar dikkate alınmalıdır. Bu oran oldukça yavaş değişecektir ve dolayısı ile çok az bir işlemci yükü gerektirmektedir. Sabit oran birleştirme metodu kullanılarak ERC'ye göre daha iyi bir performans elde edilebilir. FRC aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [40]:

$$y_d[n] = \sum_{i=1}^k d_{i,d} \cdot y_{i,d}[n] \quad (3.6)$$

Burada, $d_{i,d}$ ifadesi gelen işaret $y_{i,d}$ 'nin ağırlığını ifade etmektedir. Tek bir aktarma istasyonu kullanılması durumunda denklem şu şekilde sadeleşir:

$$y_d[n] = d_{s,d} \cdot y_{s,d}[n] + d_{s,r,d} \cdot y_{r,d}[n] \quad (3.7)$$

Burada $d_{s,d}$ ifadesi doğrudan bağlantının ağırlığını, $d_{s,r,d}$ ifadesi ise çoklu bağlantılardan birinin ağırlığını ifade etmektedir [40].



Şekil 3.5. Sabit Oran Birleştirmesi

3.3 İşaret – Gürültü Oranı Birleştiricisi (SNRC)

ERC yönteminde alıcıya ulaşan işaretler herhangi bir ek işleme tabi tutulmadan doğrudan birbirlerine eklenmekteydi. FRC yönteminde ise alıcıya ulaşan işaretler sabit bir katsayı ile ağırlıklandırılarak birbirlerine ilave edilmekteydi. FRC yönteminde kullanılan katsayının kanalın kalitesine göre belirlenecek bir yöntemle seçilmesi birleştirme performansını artıracaktır.

Bir bağlantının kalitesini ölçmek için en sık kullanılan yöntem SNR parametresidir. SNR parametresi kullanılarak işaretlerin ağırlıklandırılması ve ardından birleştirilmesi yöntemini kullanan birleştiricilere işaret – gürültü oranı birleştiricisi denilmektedir. Alınan işaret şu şekilde gösterilebilir [17], [40]:

$$y_d[n] = \sum_{i=1}^k SNR_i \cdot y_{i,d}[n] \quad (3.8)$$

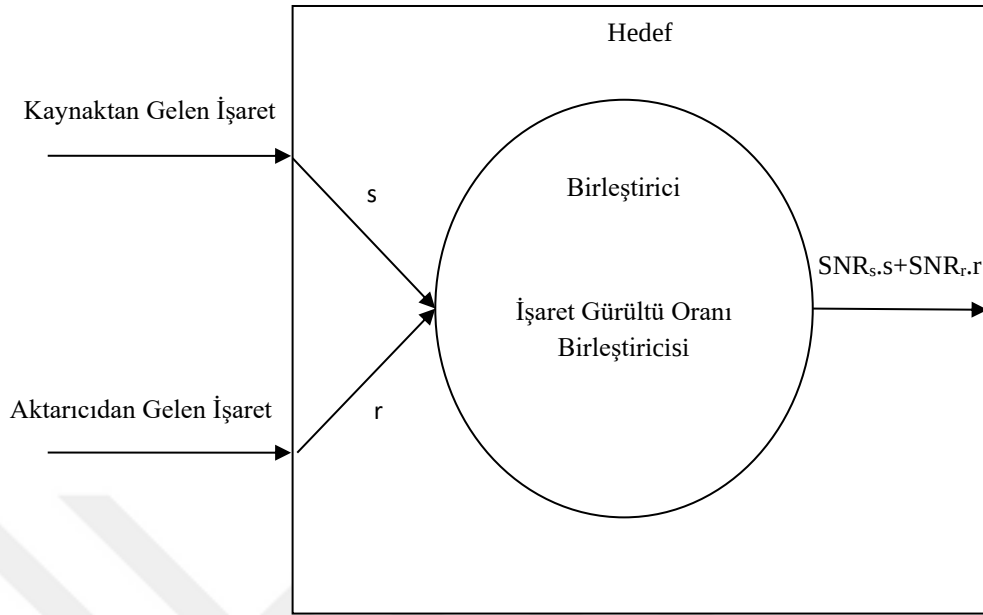
Tek bir aktarıcının kullanıldığı sistem için ifade şu şekilde sadeleştirilebilir:

$$y_d[n] = SNR_{s,d} \cdot y_{s,d}[n] + SNR_{s,r,d} \cdot y_{r,d}[n] \quad (3.9)$$

Burada $SNR_{s,d}$ ifadesi doğrudan bağlantının SNR değerini ve $SNR_{s,r,d}$ ifadesi ise tüm çoklu bağlantılı kanalın SNR değerini ifade etmektedir [40].

AAF kullanılarak, çoklu bağlantılı bir sistemin veya doğrudan bağlantının SNR değerini kestirebilmek için her bir veri setinde bir dizi veri gönderilmelidir [19], [40]. Çoklu bağlantılı sistem DAF metodunu kullanıyor ise alıcı, kanalın yalnızca son döngüdeki SNR değerini görecektir.

Aktarıcının görünmeyen bağlantılara ilişkin SNR bilgisini aktardığı kabul edilmektedir. Ancak bu şekilde tüm kanalın SNR değeri kestirilebilir. Hangi protokol kullanılırsa kullanılsın, kanal kalitesi hesaplanırken ilave bir veri dizisinin gönderilmesi gereklidir, bunun bir sonucu olarak bantta bir miktar kayıp söz konusu olacaktır [40].



Şekil 3.6. İşaret – Gürültü Oranı Birleştirmesi [40]

3.4 En Yüksek Oran Birleştiricisi (MRC)

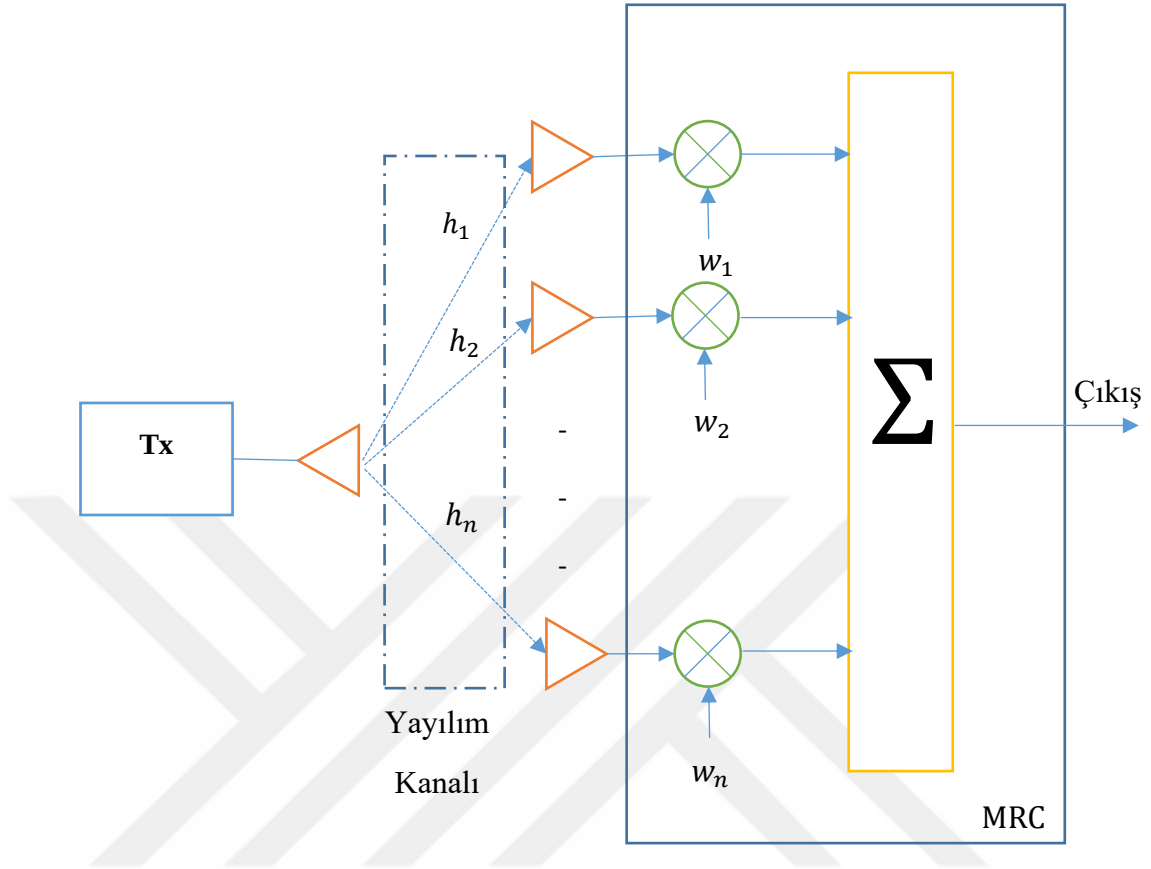
En yüksek oran birleştiricisi metodunda, her bir giriş işareti uygun eşlenik kanal kazancı ile çarpıldığı için mümkün olan en yüksek performans sağlanır [26], [40]. Fakat bunu yapabilmek için kanal faz kaydırmasının ve zayıflamasının mükemmel bir biçimde bilindiği varsayılmaktadır [40].

$$y_d[n] = \sum_{i=1}^k h_{i,d}^*[n] \cdot y_{i,d}[n] \quad (3.10)$$

Tek aktarıcılı sistem kullanılarak, bu denklem şu şekilde sadeleşir:

$$y_d[n] = h_{s,d}^*[n]y_{s,d}[n] + h_{r,d}^*[n]y_{r,d}[n] \quad (3.11)$$

Denkleme dikkatlice bakılacak olursa, çoklu bağlantılı ağda yukarıdaki birleştirme metodunun kullanılmasının en büyük dezavantajı kolayca görülecektir. Bu metotta yalnızca son bağlantıya göre işlem yapılmaktadır. Bundan dolayı bu metot ancak sistemde hata düzeltme kodu kullanıldığı durumlarda uygun olacaktır.



Şekil 3.7. MRC Birleştirici Modeli [40]

En yüksek oran birleştirme yönteminde amaç sistemin çıkışındaki SNR değerini maksimize etmek üzere alınan işaret kollarının doğrusal uyumlu birleştirme işlemi ile bir araya getirilmesidir [40].

Temel bant modelinin eşdeğeri aşağıdaki gibi yazılır. Her bir bağımsız işaret kolu şöyle ifade edilir:

$$x_n = A \cdot h_n + \xi_n \quad (3.12)$$

Yukarıdaki ifadede A , karmaşık genlik zarfıdır, h_n ise kanalın karmaşık kazancıdır, ξ_n ise $\xi_n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_0^2)$ 'dir ve AWGN'dir. İfadede yer alan h_n değeri gürültü çarpanı olarak işlev görür.

Birleştiricinin çıkışındaki işareti ise aşağıdaki denklem ile ifade edebilmekteyiz:

$$x_{out} = \sum_{n=1}^N w_n x_n = A \underbrace{\sum_n w_n h_n}_{\text{işaret}} + \underbrace{\sum_n w_n \xi_n}_{\text{gürültü}} \quad (3.13)$$

Yukarıdaki ifadede yer alan w_n terimi, birleştirme ağırlıklarını ifade etmektedir. İfadenin ilk kısmı işaret değerini verirken ikinci kısım gürültü değerini verir. Çıkıştaki işaret ve gürültü güçleri ise şöyle ifade edilir:

$$P_S = \overline{|A \sum_n w_n h_n|^2} = \frac{1}{2} |A|^2 \sum_n |w_n h_n|^2 \quad (3.14)$$

$$P_\xi = \overline{|\sum_n w_n \xi_n|^2} = \sum_n |w_n|^2 \sigma_n^2 \quad (3.15)$$

İfadede geçen $\sigma_n^2 = \overline{|\xi_n|^2}$ değeri kolun gürültü gücünü ifade etmektedir. Çıkıştaki SNR değeri ise:

$$SNR_{out} = \frac{P_S}{P_\xi} = \frac{1}{2} |A|^2 \frac{|\sum_n w_n h_n|^2}{\sum_n |w_n|^2 \sigma_n^2} \quad (3.16)$$

Çeşitleme birleştirmesinin asıl amacı olan çıkıştaki SNR değerini maksimize etmeyi bu ifade için Lagrange çarpanları kullanarak ya da Cauchy – Schwarz eşitsizliği kullanarak maksimize edebiliriz.

Cauchy – Schwarz eşitsizliği:

$$|\sum_n a_n^* b_n|^2 \leq \sum_n |a_n|^2 \sum_n |b_n|^2 \quad (3.17)$$

Yukarıdaki ifadede eşitlik ancak $a_n^* = c b_n$ olduğunda gerçekleşir. En iyi birleştirme ağırlıkları şöyle hesaplanır:

$$w_n = h_n^* / \sigma_n^2 \quad (3.18)$$

En iyi ağırlıklandırılmış birleştiricinin çıkışındaki SNR şu forma dönüşür:

$$\gamma_{out} = \sum_n \gamma_n \quad (3.19)$$

$$\gamma_n = \frac{A^2 |h_n|^2}{2\sigma_n^2} \quad (3.20)$$

γ_n ninci kolun SNR değerini ifade eder. Sonuç itibarıyla ortaya çıkan birleştirici MRC olarak adlandırılır ve SNR açısından en iyi birleştiricidir [40].

3.5 Geliştirilmiş İşaret – Gürültü Oranı Birleştirmesi (ESNRC)

Bu metotta, birleştirme işlemi, gelen işaret bazen daha güçlü bir gelen işaret söz konusu olduğunda önceki işaret yok sayılarak gerçekleştirilmektedir. Kanallar aynı ya da daha az kanal kalitesine sahip iken gelen işaretler eşit oranlanır.

$$y_d[n] = \begin{cases} y_{s,d}[n] & (\frac{SNR_{s,d}}{SNR_{s,r,d}} > 10) \\ y_{s,d}[n] + y_{s,r,d}[n] & (0,1 \leq \frac{SNR_{s,d}}{SNR_{s,r,d}} \leq 10) \\ y_{s,r,d}[n] & (\frac{SNR_{s,d}}{SNR_{s,r,d}} < 0,1) \end{cases} \quad (3.21)$$

Bu metot kullanılırken alıcının kanalın karakteristiğini birebir bilmesine gerek yoktur. Kanal kalitesinin yaklaşık olarak bilinmesi dahi işaretlerin birleştirilmesi için yeterlidir. Bunun da ötesinde bu metotla çok fazla işlem gücüne gerek yoktur [20], [40].

4. BÖLÜM

TAŞIYICI İNTERFEROMETRİ VE DALGACIK TABANLI CI OFDM SİSTEMİ

4.1 Taşıyıcı İnterferometri İşaret Yapısı

Bu bölümde taşıyıcı interferometri kavramının temelini oluşturan teoriler ele alınmaktadır. Taşıyıcı interferometri (CI) işaretinin temel nitelikleri takdim edilmekte, CI temelli sistemlere ait yapı bileşenleri incelenmektedir. Taşıyıcı interferometri kodları, çok taşıyıcılı haberleşme sistemlerini, verimlilik ve iletişim kalitesi açısından güçlendirmektedirler. Özellikle, OFDM’de kullanılmaları durumunda, tepe – ortalama güç oranını (PAPR) düşürmekte ve haberleşme sisteminin iletişim kalitesini artırmaktadırlar [31], [42].

Taşıyıcı interferometri kavramının temelini, N adet taşıyıcının süper pozisyonu ile ortaya çıkan bütünleşik dalga oluşturmaktadır [44]. Meydana gelen bu tümleşik dalga yapı bloğu taşıyıcı interferometri işareti veya CI olarak adlandırılmaktadır. Frekans aralığı birbirine eşit ve Δf olan, N adet taşıyıcı dalganın toplamı $g(t)$ olarak ifade edilmektedir. Bu durumda CI işareti aşağıdaki şekilde yazılır:

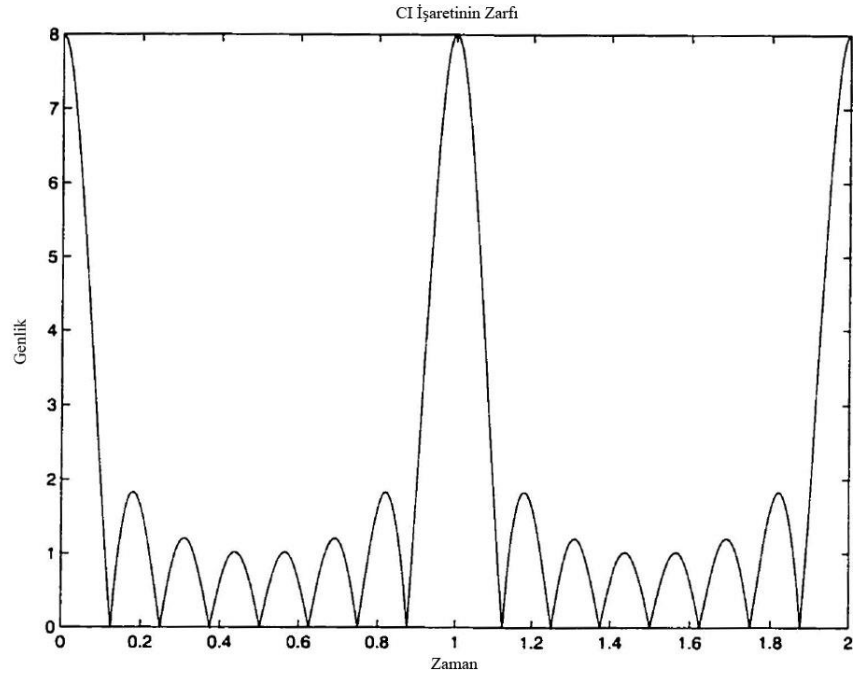
$$g(t) = \sum_{i=0}^{N-1} e^{j(2\pi i \Delta f t)} \quad (4.1)$$

Taşıyıcıların tümü eş fazlıdır. Taşıyıcı interferometri işareti Şekil 4.1’de frekans ekseninde gösterilmektedir.



Şekil 4.1. CI İşaretinin Frekans Ekseninde Gösterimi [45].

Şekil 4.1’de yer alan işaretin zaman eksenindeki zarfı yukarıda yer alan 4.1 nolu eşitlik kullanılarak tek taşıyıcı için çizilebilir.



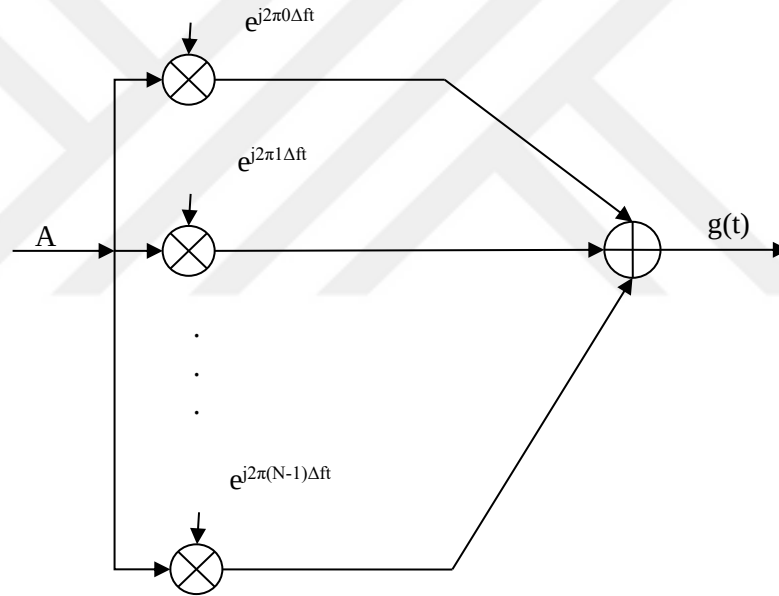
Şekil 4.2. CI İşaretinin Zaman Ekseninde Gösterimi [45]

Şekil 4.2’de yer alan işaret incelendiğinde, CI periyodik işaretinin iki periyodu görülmektedir. Her bir periyot $1/\Delta f$ uzunluğundadır. Her bir periyotta $2/(N\Delta f)$ süreli bir ana salınım ve ana salınımı takip eden $1/(N\Delta f)$ süreli yan salınımlar bulunmaktadır. Taşıyıcı interferometri işareti, bir periyot içerisinde gözlemlendiğinde darbe işareti gibi görünmektedir [42], [45].

4.2 Taşıyıcı İnterferometri Darbe Şekli

Taşıyıcı interferometri işareti, klasik işaretlerden birine benzetilecek olursa, $\text{sinc}()$ dalga formunun frekans örneklenmiş biçimine benzemektedir. Buradan şu sonuç çıkarılır: Taşıyıcı interferometri işareti, frekans örnekleme eşit N aralıklı örneklerden yararlanılarak gerçekleştirilmiş bir $\text{sinc}()$ dalga biçimine benzemektedir [42], [43]. Frekans örnekleme işlemi zaman tekrarlmasına yol açacaktır, bu durumun nedeni de taşıyıcı interferometri işaretinin doğal ardışıklığa sahip olmasıdır. Taşıyıcı interferometri darbesi şu biçimde ifade edilebilir:

$$g(t) = \sum_{i=0}^{N-1} A e^{j2\pi i \Delta f t} \quad (4.2)$$



Şekil 4.3. Taşıyıcı İnterferometri Darbe Üretici [42]

Şekil 4.3'de $g(t)$ olarak ifade ettiğimiz taşıyıcı interferometri darbesinin model olarak nasıl üretildiği gösterilmektedir [42].

4.3 Taşıyıcı İnterferometri Kodları

Zaman ekseninde incelendiklerinde, taşıyıcı interferometri kodlarının dar bantlı kompleks yayma kodları oldukları anlaşılmaktadır [43], [44]. Bir taşıyıcı interferometri işareti, ekseninde yer alan diğer taşıyıcı interferometri işaretlerinden rahatlıkla ayırt edilebilir ve bu sayede mevcut kanalın çok yollu modelinin analiz edilmesi mümkün olmaktadır. Aslında taşıyıcı interferometri kodları, yayma kodu amacıyla da

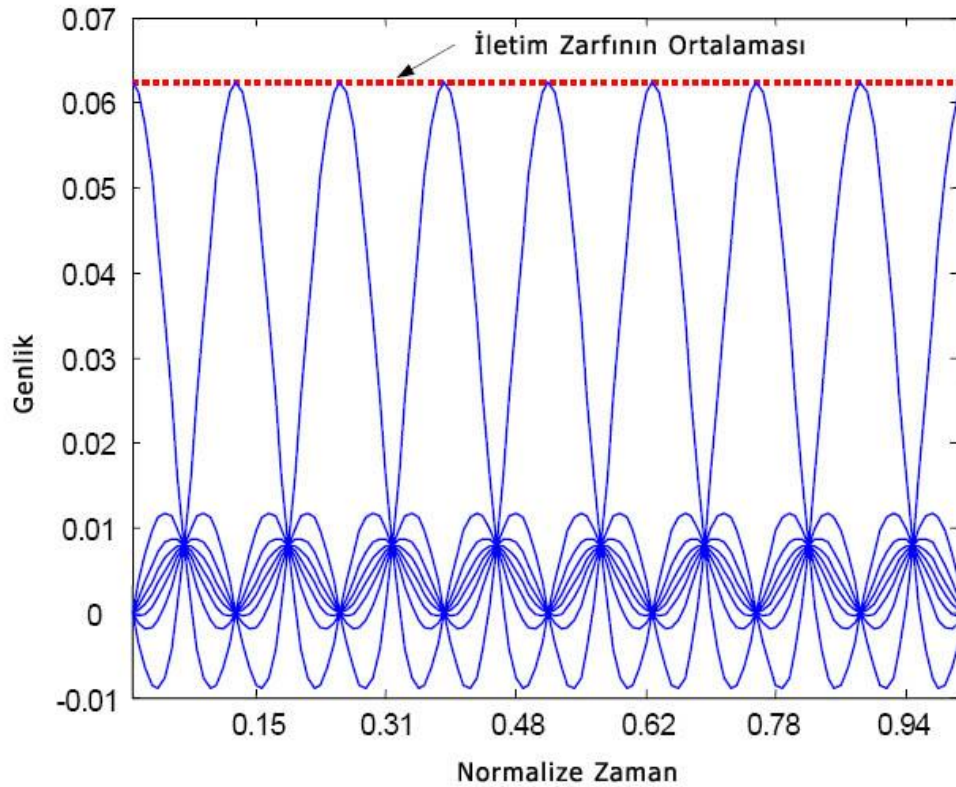
kullanılmakta olan ters ayırık Fourier dönüşümü (IDFT) matrisindeki karmaşık fazörlerdir. Bu bilgi, hızlı Fourier dönüşüm (FFT) matrisinin yayma kodu olarak kullanıldığı ve neticesinde koruma aralıklı (Guard Interval) tek taşıyıcılı bir sistemin oluşturulduğu iletişim modelini tasarlamak için kullanılır [46]. Her ne kadar taşıyıcı interferometri, bir FFT matrisi değilse de taşıyıcı interferometri kodu kullanılan OFDM sistemi yine de çok taşıyıcılı sistem özelliği sergilemektedir.

Taşıyıcı interferometri işaretinin bilinen geleneksel işaretler içerisinde $\text{sinc}()$ dalgasına benzediğini (Şekil 4.2) daha önce ifade etmiştik. Taşıyıcı İnterferometri kodları k 'nıncı sembol için aşağıdaki biçimde yazılır:

$$CI_k = \{e^{j(\frac{2\pi}{N}) \cdot 0 \cdot k}, e^{j(\frac{2\pi}{N}) \cdot 1 \cdot k}, e^{j(\frac{2\pi}{N}) \cdot 2 \cdot k}, e^{j(\frac{2\pi}{N}) \cdot 3 \cdot k}, \dots, e^{j(\frac{2\pi}{N}) \cdot (N-1) \cdot k}\} \quad (4.3)$$

Yukarıda gösterilen kodlar N uzunluğunda ve N adettir. N taşıyıcı sayısını ifade etmektedir. Bu kodları $N \times N$ boyutlu bir matris ile (Eşitlik 4.10) göstermek daha uygun olmaktadır. [43]

Taşıyıcı interferometri kodlarının en mükemmel özelliklerinden birisi de hiç şüphesiz esnek olmalarıdır [44], [45]. Dikgen taşıyıcı interferometri kodları, sıklıkla kullanılan Walsh-Hadamard kodlarında karşımıza çıkan $N=2^m$ veya $N=2m$ sınırlamalarına bağlı olmadan, arzu edilen herhangi bir N uzunluğunda tanımlanabilirler. Taşıyıcı interferometri kodları, OFDM sistem üzerinde uygulandıklarında frekans çeşitlemesi sağlamakta ve bunun da ötesinde tepe - ortalama güç oranını (PAPR) düşürmektedirler. Taşıyıcı interferometri kodları, PAPR kazancı açısından, çok taşıyıcılı OFDM sistemini, tek taşıyıcılı bir sistem özelliği gösterecek şekilde maskelerler [42], [45]. Taşıyıcı interferometri kodlarının kullanımı sayesinde IFFT nedeni ile işarete meydana gelen tepeler yok edilebilmekte ve tek taşıyıcılı sistem benzeri yeni salınımlar oluşturulabilmektedir. Aşağıda yer alan grafikler konunun daha iyi anlaşılabilmesi için sunulmaktadır. Bu grafiklerde taşıyıcı interferometri kodlarının OFDM sistemi üzerinde (CI/OFDM) farklı modülasyon türleri için meydana getirdiği zarf tiplerinin analizi gerçekleştirilmektedir.

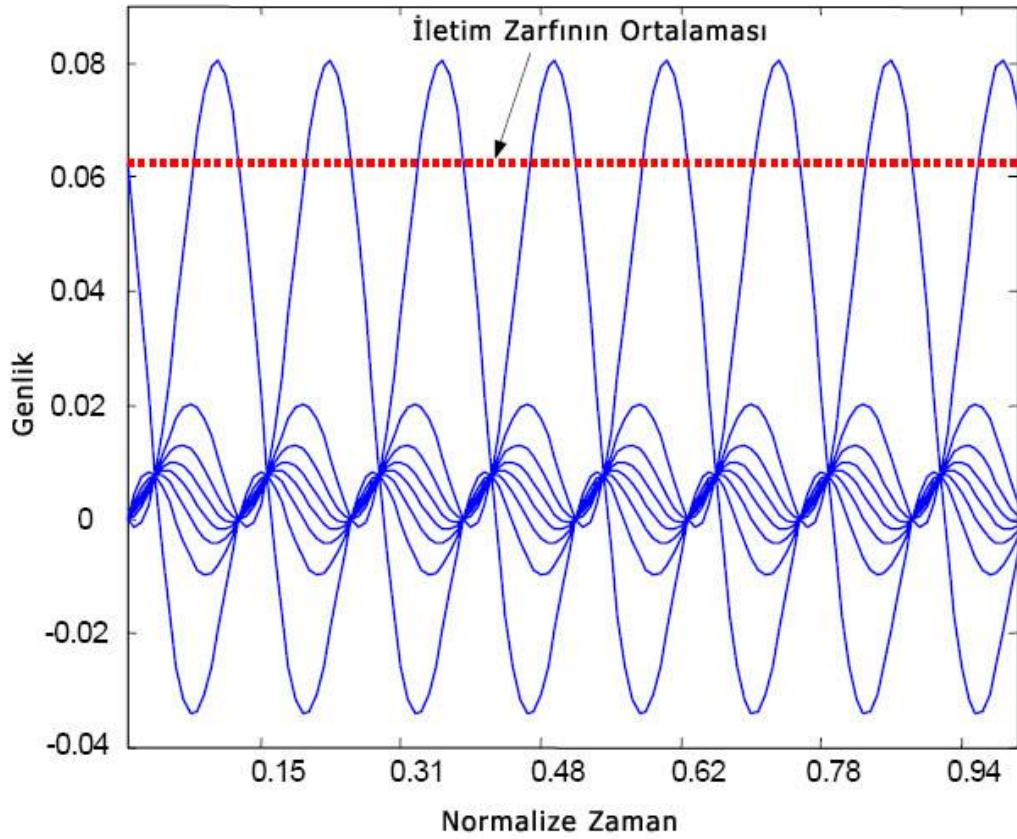


Şekil 4.4. Taşıyıcı İnterferometri Kodlu BPSK OFDM'nin İletim Zarfı [43]

Şekil 4.4'de taşıyıcı interferometri kodlarının yayma kodu amacıyla kullanıldığı ikili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK) modülasyonlu OFDM sisteminin iletim zarfı yer almaktadır. Şekilde yer alan işaret, sekiz alt taşıyıcılı OFDM sisteminin tamamı üzerine yayılmış **[1 1 1 1 1 1 1 1]** şeklindeki BPSK sembolünden meydana gelmektedir. Taşıyıcı interferometri kodları sayesinde, alıcı tarafta semboller kolayca ayırt edilebilmektedir. Dikkatle incelendiğinde (Şekil 4.4), bir sembole ait alt taşıyıcının eklendiği anda diğer sembollere ait alt taşıyıcılar toplam işarete katılmamaktadırlar. Bu durum Şekil 4.4'ten de görüleceği üzere bize Taşıyıcı İnterferometri OFDM sisteminin zarfının dalgalı bir forma sahip olmadığını bilakis toplam zarfın düz olarak meydana geldiğini göstermektedir.

Dikkate değer bir hususu özellikle belirtmek gerekirse, k 'nıncı alt taşıyıcıdaki işaret ($S_k(t)$), maksimum değere sahip iken diğer bir alt taşıyıcıdaki işaret ($S_j(t)$, burada $j \neq k$), minimum değere ($P_j < P_k$) veya oldukça küçük bir değere sahip olmaktadır. Bu sayede, herhangi bir anda tüm N sembollerine ait enerjinin üst üste eklenmesi mümkün değildir. Çünkü dikkatle incelenirse tepe değerleri Şekil 4.4'te de görüleceği üzere zaman

domeninde eşit aralıklarla dağıtılmaktadırlar. Netice itibarıyla taşıyıcı interferometri sayesinde OFDM sembolleri için kusursuza yakın PAPR sonucuna ulaşılmaktadır [43], [46].



Şekil 4.5. CI Kodlu QPSK OFDM'nin İletim Zarfı [43]

Yukarıda yer alan şekilde $[1 + j1, 1 + j1, 1 + j1, 1 + j1, 1 + j1, 1 + j1, 1 + j1, 1 + j1]$ sembol setine sahip Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (QPSK) modülasyonu için elde edilen iletim zarfı gösterilmektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 kıyaslandığında görülmektedir ki farklı modülasyon türleri taşıyıcı interferometri OFDM zarfının farklı şekillerde meydana gelmesine neden olmaktadır. QPSK modülasyonlu işaretin zarfı ile BPSK modülasyonlu işaretin zarfı kıyaslandığında görülmektedir ki aslında zarflar arasında büyük bir fark yoktur. QPSK modülasyonlu işaretin başlangıcında, görece daha yüksek enerjili bir salınım oluşmaktadır. Fakat netice itibarıyla gönderilen toplam sembol miktarı BPSK ile aynıdır. Bu sayede hem BPSK modüeli sistem için hem de QPSK modüeli sistem için PAPR değeri 0 dB olarak ortaya çıkmaktadır. Bunun temel nedeni ise iletim süresi boyunca hiçbir tepenin oluşmamasıdır. Tüm bu analizler neticesinde şu sonuca varılmaktadır: BPSK modüeli taşıyıcı interferometri OFDM ve QPSK modüeli taşıyıcı

interferometri OFDM, 0 dB değeri ile minimum PAPR değerine sahiptirler [46]. Sistem tek taşıyıcılı bir sistem gibi hareket etmektedir.

Bu noktada Tepe – Ortalama Güç Oranı hesabının nasıl yapıldığı özet olarak anlatılacaktır. Tepe – ortalama güç oranı, belirli periyot süresince işaretin aldığı maksimum güç değerinin ortalama güç değerine oranıdır ve aşağıdaki gibi gösterilmektedir:

$$PAPR = \frac{\max_{0 < t < T_s} |s(t)|^2}{\max_{0 < t < T_s} |s(t)|^2} \quad (4.4)$$

OFDM işareti için ortalama güç $P_{mean} = NP_0$ 'dır. Bu ifadede, P_0 bir taşıyıcının gücünü ifade etmektedir ve $P_0 = \frac{1}{2}A^2$ 'dir. Maksimum güç ifadesi ise şu şekilde yazılır:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^N A \right)^2 = \frac{1}{2} (NA)^2 = \frac{1}{2} N^2 A^2 \quad (4.5)$$

Yukarıdaki eşitlikte N alt taşıyıcı sayısını ifade etmektedir.

Taşıyıcı interferometri, OFDM işaretini kusursuza yakın bir biçimde tek taşıyıcılı sistem gibi maskeler, bu sayede BPSK modüleli taşıyıcı interferometri OFDM “(1)²” anında tepe gücüne ulaşır ve aynı şekilde ortalama gücün değeri de 1 olarak ortaya çıkar.

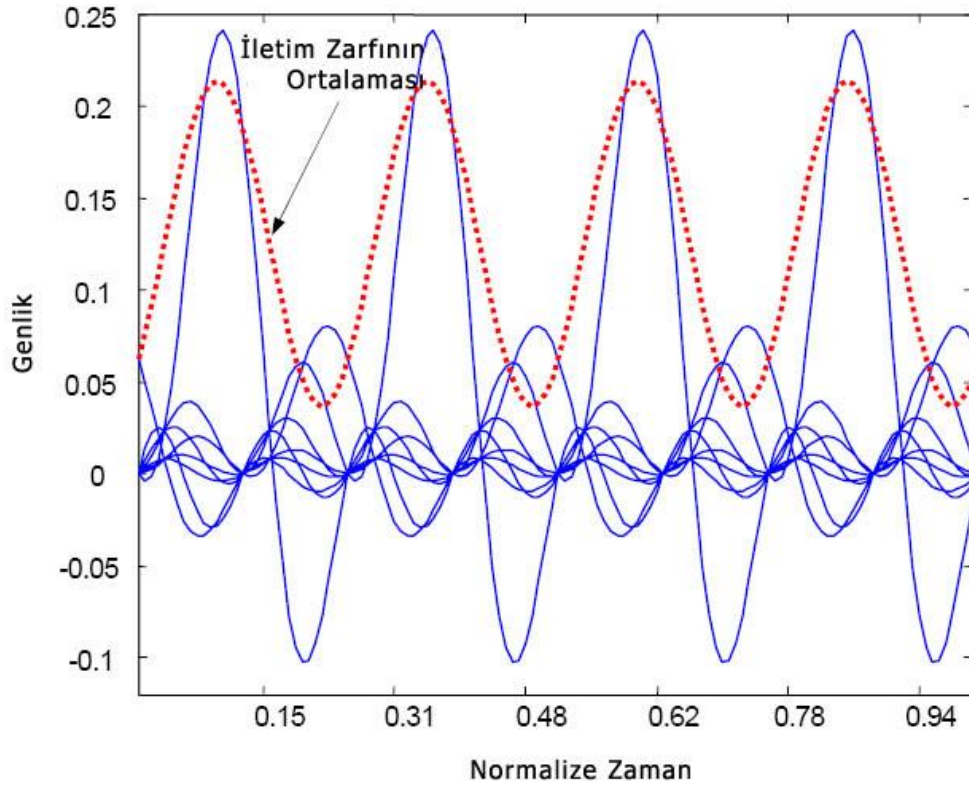
Daha somut bir ifade ile, PAPR değerini dB cinsinden hesaplayacak olursak;

$$PAPR_{BPSK-CI/OFDM} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{1} \right) = 0 \text{ dB} \quad (4.6)$$

sonucuna ulaşılır. QPSK modülasyonlu CI-OFDM için, en yüksek tepe gücü $(1)^2=1$ ve ortalama güç değeri $((1^2+(1)^2)/2)=1$ olarak elde edilir, böylece

$$PAPR_{QPSK-CI/OFDM} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{1} \right) = 0 \text{ dB} \quad (4.7)$$

sonucunu da benzer şekilde elde edilir.



Şekil 4.6. Taşıyıcı İnterferometri Kodlu 16QAM OFDM'nin İletim Zarfı [43]

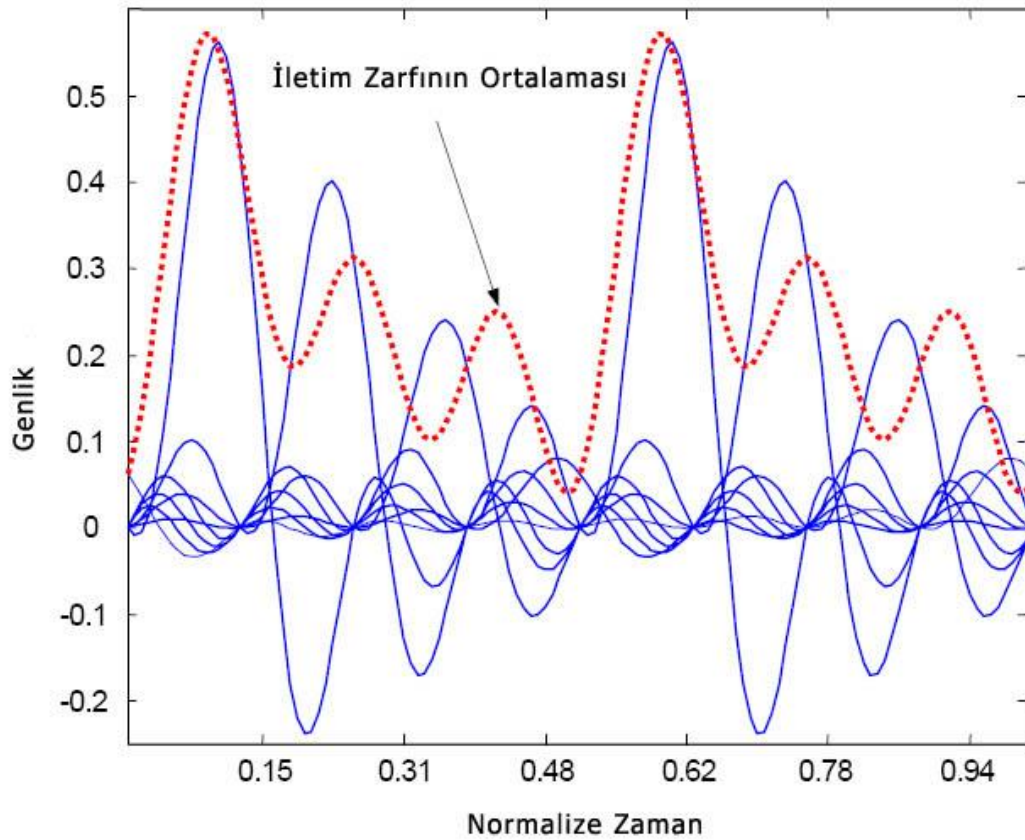
Yukarıda yer alan Şekil 4.6'da 16QAM modülasyonlu taşıyıcı interferometri OFDM'nin işaret zarfı yer almaktadır. Sekiz adet alt taşıyıcı kullanılarak OFDM ile gönderilmekte olan işarete ait sembol dizisi $[1 + j1, 3 + j3, 1 + j1, 3 + j3, 1 + j1, 3 + j3, 1 + j1, 3 + j3]$ şeklindedir. Genlik eksenini üzerinde 16QAM işaretinin zarfı halihazırda zaten düz değildir ($1, j1, 3$ ve $j3$ kombinasyonundan oluşmaktadır). Sonuç itibarıyla 16QAM işaretinin gerçek salınımları tekrar elde edilebilsin diye çıkış işareti olan 16QAM modüleli taşıyıcı interferometri OFDM işareti de beklendiği şekilde düz gerçekleşmeyecektir. Şekil 4.6'da gösterilmekte olan kırmızı noktalı salınım, işarete yer alan tüm alt taşıyıcıların toplamı neticesinde oluşur ve açıkça görüleceği üzere düz bir zarf olmayıp sinüzoidal salınımlı bir zarftır [45], [46].

Bu durumda PAPR değeri artık kolayca hesap edilebilir. 16QAM modüleli Taşıyıcı İnterferometri OFDM'nin ortalama güç değeri $(1^2 + 3^2)/2 = 5$ olarak hesaplanır. İşaretin maksimum tepe güç değeri ise $3^2 = 9$ 'dur, şimdi elde ettiğimiz bu değerlerle PAPR değerini rahatlıkla hesap edebiliriz:

$$PAPR_{16QAM-CI/OFDM} = 10\log_{10}\left(\frac{9}{5}\right) = 2,5527 \text{ dB} \quad (4.8)$$

Aşağıda yer alan Şekil 4.7’de $[1 + j1, 3 + j3, 5 + j5, 7 + j7, 1 + j1, 3 + j3, 5 + j5, 7 + j7]$ giriş veri seti kullanılarak 64QAM modüleli taşıyıcı interferometri OFDM işaretinin zarfı gösterilmektedir. Şekilden de net olarak görüldüğü üzere işaretin zarfı salınımlıdır ve düz değildir. İşaret, 16QAM işareti ile kıyaslanacak olursa 64QAM işaretinin daha hızlı bir değişimi gösterdiği görülecektir. Bu hızlı ve dinamik değişim ise doğal olarak 16QAM modülasyonuna kıyasla daha yüksek PAPR değerini ortaya çıkarmaktadır [42]. İşaretin ortalama gücünü şu şekilde $(1^2+3^2+5^2+7^2)/4=21$ hesap edebiliriz. İşaretin en yüksek anlık tepe güç değeri ise $7^2=49$ olarak hesaplanır. Elde ettiğimiz bu değerlerden yararlanarak işaretin PAPR değerini dB cinsinden kolaylıkla hesap edilebilir:

$$PAPR_{64QAM-CI/OFDM} = 10\log_{10}\left(\frac{49}{21}\right) = 3,678 \text{ dB} \quad (4.9)$$



Şekil 4.7. Taşıyıcı İnterferometri Kodlu 64QAM OFDM’nin İletim Zarfı [43]

4.4 Taşıyıcı İnterferometri OFDM Sistemi

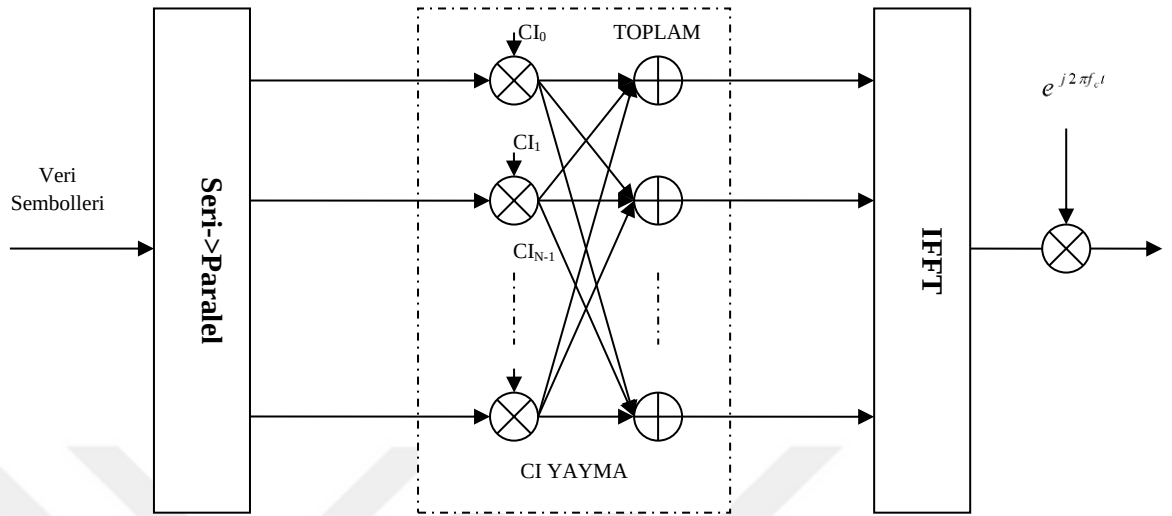
Taşıyıcı interferometri OFDM’de giriş veri seti, klasik OFDM’e benzer şekilde öncelikle seriden paralele dönüştürülmektedir, bu durum Şekil 4.8’de gösterilmektedir. OFDM’de her bir veri seti kanaldan iletilmeden önce kendisine ait taşıyıcı üzerine modüle edilmektedir. İşaret daha sonra kanaldan iletilmektedir [27], [37].

Taşıyıcı interferometri OFDM’de farklı bir uygulama olarak; işaret, N adet alt taşıyıcıların hepsinin üzerine yayılarak iletilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak, elde edilmeye çalışılan herhangi bir veri sembolü, kendisinden başka bütün $(N-1)$ veri sembollerine CI_k kısaltması ile gösterilen, taşıyıcı interferometri yayma kodlarının uygulanması ile tekrar elde edilebilmektedir. Aşağıdaki matriste CI_k kodlarının matris olarak gösterimi yer almaktadır [46].

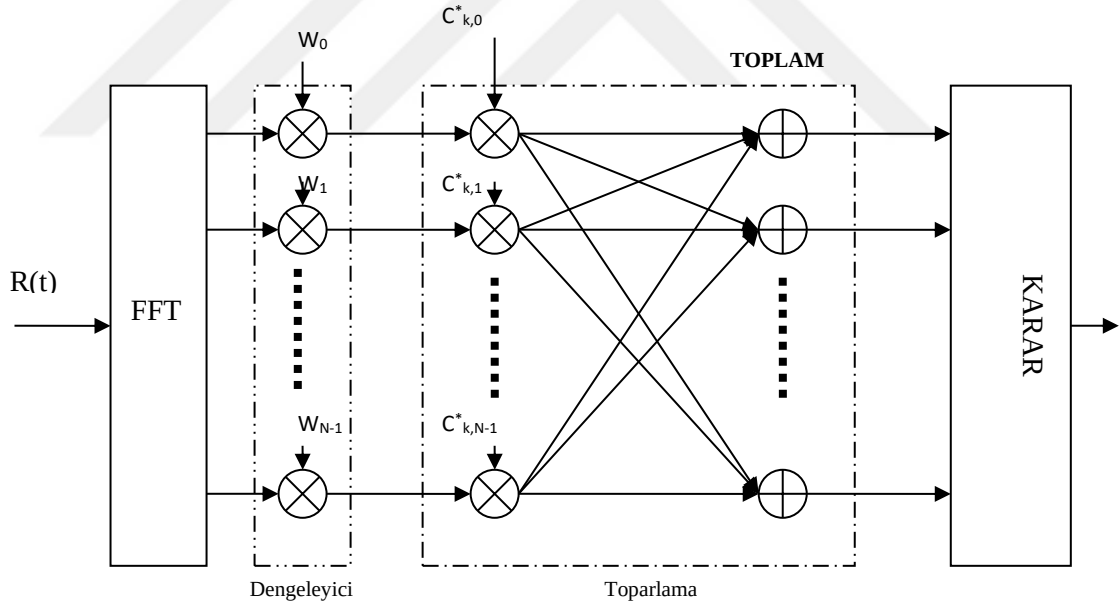
$$CI = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{N}1,1} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2),1} & e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1),1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{N}1,(N-2)} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2),(N-2)} & e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1),(N-2)} \\ 1 & e^{j\frac{2\pi}{N}1,(N-1)} & \dots & e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2),(N-1)} & e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1),(N-1)} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Yukarıdaki matriste k ifadesi veri sembolüdür ve N ifadesi ise alt taşıyıcıyı sembolize etmektedir. Veri sembolüne ait güç değeri $\|CI_k\|^2 N$ ifadesinden dolayı normalden fazla yükselmektedir. Bunun bir sonucu olarak normalizasyon işleminin yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. İfadenin tamamı $1/\sqrt{N}$ sabit değeri ile çarpılarak normalize edilebilmektedir.

Taşıyıcı interferometri yayma kodlarının kullanımı ile gerçekleştirilen OFDM verici yapısı Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Burada, OFDM için IFFT uygulanmadan önce taşıyıcı interferometri kodları ile işaret yayılmaktadır. Her bir işaret tüm taşıyıcılar üzerine yayıldıktan sonra toplanmakta ve OFDM için IFFT’ye tabi tutulmaktadır. Alıcı tarafta ise bu işlemin tersi gerçekleştirilerek işaret toparlanmaktadır. Bu işlem Şekil 4.9’da gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Taşıyıcı İnterferometri OFDM Vericisinin Yapısı [46]



Şekil 4.9. Taşıyıcı İnterferometri OFDM Alıcısının Yapısı [46]

Taşıyıcı interferometri OFDM sisteminde meydana gelen bu yayılma, çok taşıyıcılı kod bölümlü çoklu erişim (MC-CDMA) sisteminde meydana gelen yayılıma benzemektedir. İletilen işaret k 'nıncı bit için şu şekilde gösterilir:

$$s_{CI}^k(t) = \text{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} d^{(k)} \cdot e^{j(2\pi \cdot n \cdot \Delta f \cdot t)} \cdot e^{j\left(\frac{2\pi}{N} k \cdot n\right)} \cdot e^{j2\pi f_c t} \cdot g(t) \right] \quad (4.11)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan d ifadesi veri sembolünü göstermektedir. Dikdörtgen şekilli T_s süresine sahip darbe biçimi $g(t)$ ile gösterilmektedir. OFDM sembolünün süresini T_s ifadesi göstermektedir. Bir taşıyıcı interferometri OFDM sisteminde iletilen sembol için kullanılan bütün işaretler şu şekilde ifade edilebilir:

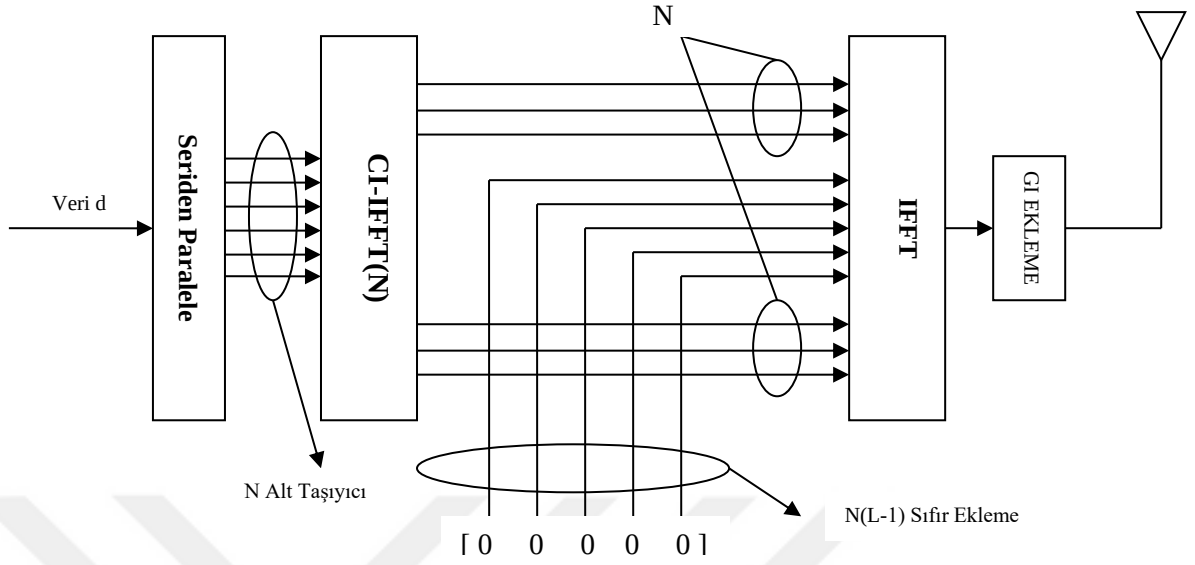
$$S(t) = \text{Re} \left[\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} d^{(k)} \cdot e^{j(2\pi m \Delta f t)} \cdot e^{j\left(\frac{2\pi}{N} k n\right)} \cdot e^{j2\pi f_c t} \cdot g(t) \right] \quad (4.12)$$

4.5 Taşıyıcı İnterferometri-FFT OFDM Sistemi

Bu bölümde, yukarıda anlatılmakta olan taşıyıcı interferometri OFDM sisteminin, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılarak nasıl gerçekleştirildiği anlatılmaktadır. Aşağıda yer alan matris ters ayırık Fourier dönüşümünü göstermektedir:

$$IDFT = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & e^{j2\pi \frac{1}{N}} & \dots & e^{j2\pi \frac{(N-2)}{N}} & e^{j2\pi \frac{(N-1)}{N}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & e^{j2\pi \frac{1}{N}(N-2)} & \dots & e^{j2\pi \frac{(N-2)}{N}(N-2)} & e^{j2\pi \frac{(N-1)}{N}(N-2)} \\ 1 & e^{j2\pi \frac{1}{N}(N-1)} & \dots & e^{j2\pi \frac{(N-2)}{N}(N-1)} & e^{j2\pi \frac{(N-1)}{N}(N-1)} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

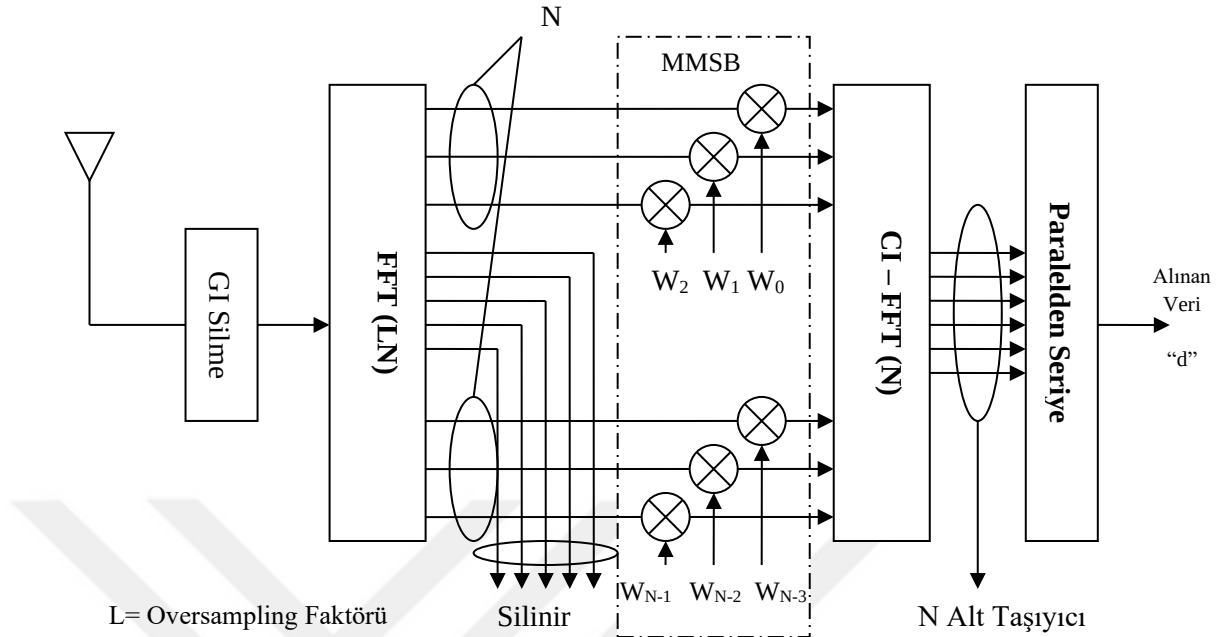
Yukarıda verilen 4.10 ve 4.13 nolu matrisler dikkatlice incelendiğinde, görülmektedir ki taşıyıcı interferometri yayılımını gerçekleştirmek için; taşıyıcı interferometri kodlarını, N uzunluklu IDFT matrisleri ile değiştirebiliriz [46].



Şekil 4.10. CI-FFT/OFDM Verici Yapısı [46]

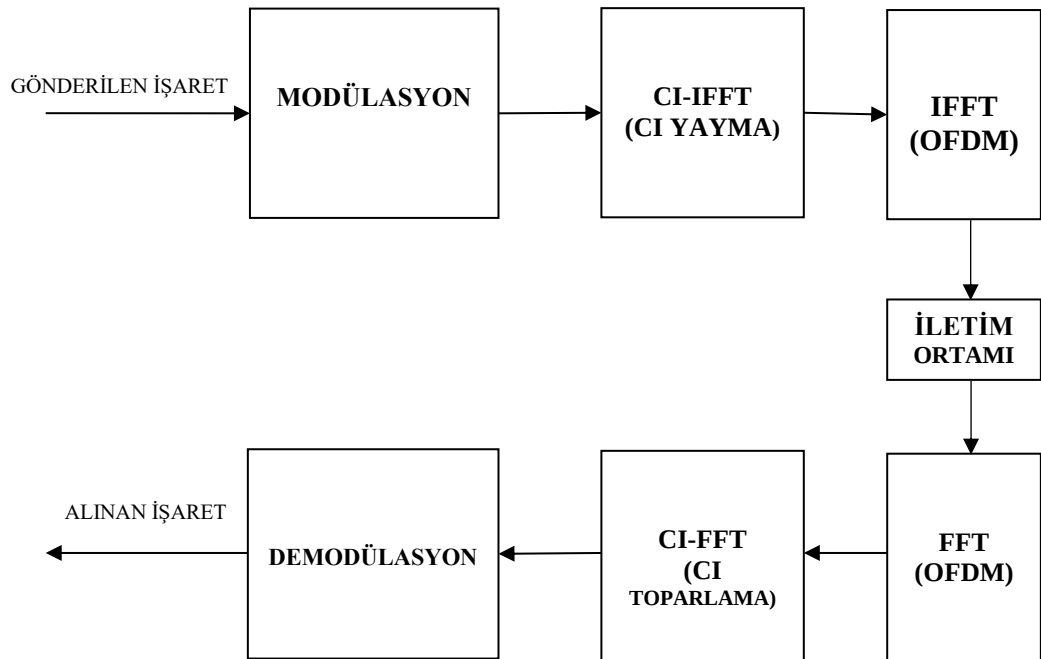
Şekil 4.10’da FFT kodlarının taşıyıcı interferometri yayma kodlarının yerine kullanıldığı CI-FFT OFDM olarak adlandırılan OFDM verici yapısı gösterilmektedir. İletilmek istenen veri seti d ile gösterilmektedir. Bu veri seti BPSK veya QPSK ile modüle edildikten sonra seriden paralele dönüştürülürler. Paralel veri, bu noktada CI-IFFT kullanılarak yayma işlemine tabi tutulmaktadır. Yayılmış olan işarete bir sonraki aşamada OFDM gereği tekrar IFFT işlemi uygulanır ve koruma aralığı eklenerek işaret vericiye ulaşmak üzere kanala gönderilir.

Şekil 4.11’de taşıyıcı interferometri - FFT/OFDM alıcı yapısı gösterilmektedir. Şekil 4.10’da gösterilen sistem tarafından kanala verilen veri, Şekil 4.10’da yer alan alıcı tarafından alınır. İşaret alıcıya ulaştığında, alıcı koruma aralığı bilgisini kaldırır ve işarete OFDM gereği FFT uygular. Çok yollu sönmüleme etkilerinden dolayı işaretlerde meydana gelen asenkron bozulmaları dengelemek için bir dengeleyici kullanılır. Bu işlemden sonra işarete toplama için CI-FFT uygulanır.



Şekil 4.11. Taşıyıcı İnterferometri - FFT/OFDM Alıcı Yapısı [46]

Aşağıda yer alan Şekil 4.12’de, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de anlatılan alıcı ve verici sistemler, bir bütün halinde blok şema ile gösterilmektedir. Şekilde verici ve alıcı tarafta uygulanan işlemler sırası ile gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Taşıyıcı İnterferometri - FFT OFDM Sistem Modeli

4.6 Taşıyıcı İnterferometri OFDM'nin Dalgacık Dönüşümü ile Gerçekleştirilmesi

OFDM sistemlerinin genel olarak yüksek PAPR problemi olduğu bilinmektedir [31]. Taşıyıcı interferometri kodlarının bu problemin üstesinde gelmek için kullanılan oldukça faydalı kodlar olduğu da bilinmektedir. Bu bölümde anlatıldığı üzere taşıyıcı interferometri OFDM sistemleri, taşıyıcı interferometri kodlarının yerine FFT kullanılarak da gerçekleştirilebilmektedir. Üstelik bu sayede performansta artış da görüldüğü tespit edilmiştir [46], [47]. Dalgacık dönüşümleri duruma göre FFT yerine kullanılabilen dönüşümlerdir. Dalgacık dönüşümleri, taşıyıcı interferometri - FFT / OFDM sistemlerde FFT yerine kullanılabilmekte ve başarılı neticeler üretebilmektedir [47].

Dalgacık ifadesi adından da anlaşıldığı üzere görece küçük bir dalgayı ifade eder. Dalgacık dönüşümü teorisi ile belli bir alanda yoğunlaşan işaretler daha küçük dalgacıklarla tanımlanabilir, konumlandırılabilir ve bu sayede bu dar alanda yoğunlaşan oluşumun nedenleri oldukça kolay analiz edilebilir. Fourier analizi ve spektral analizden farklı olarak dalgacık teorisi işarete ait frekansları konum olarak da tanımlayabilmektedir, bu da önemli bir üstünlük olarak ortaya çıkmaktadır [47].

Fourier analizinde işaret, sinüs ve kosinüs işaretlerinin sonsuz toplamı olarak ifade edilmektedir. Fourier dönüşümü bu nedenle işarete ait sadece frekans bilgisi taşımaktadır. Bu durum bir dezavantaj oluşturmaktadır. Çünkü Fourier analizi ile işaretin hangi frekans bileşeninin hangi anda meydana geldiği analiz edilememektedir. Bu problemin üstesinden gelebilmek için hem zaman hem de frekans bilgisi ihtiva eden dönüşüm mantığı geliştirilmiştir. Bu mantığın temelinde işaretin dar pencerele ayrılarak analiz edilmesi fikri yatmaktadır. Bu sayede hangi frekans bileşeninin hangi pencerede gerçekleştiği bilinmekte dolayısı ile gerçekleşme anı tespit edilebilmektedir.

Hem zaman hem de frekans bileşeni analizi için geliştirilen en ciddi metot hiç şüphesiz ki dalgacık dönüşümü metodudur. Dalgacık dönüşümleri esnasında kullanılan modüle edilmiş ölçeklenebilir pencere, işaret süresince kaydırılır ve her bir kaydırmada işlem tekrarlanır. Sonuç olarak işaretin frekans ve zaman örnekleri serisi elde edilir.

Sürekli Dalgacık Dönüşümü matematiksek ifade ile aşağıdaki biçimde yazılır:

$$\gamma(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (4.14)$$

* sembolü ile karmaşık eşlenik ifade edilmektedir. Bu ifade $f(t)$ ile gösterilen bir fonksiyonun $\psi_{s,\tau}^*(f)$ ile gösterilen esas fonksiyon setlerine nasıl bölüneceğini ihtiva etmektedir ki bu fonksiyonlara dalgacıklar denilmektedir. s ve τ ifadeleri sırası ile ölçek ve dönüşüm olarak isimlendirilir ve dalgacık dönüşümü ardından meydana gelen yeni ölçüleri ifade eder.

$$f(t) = \iint \gamma(s, \tau) \psi_{s,\tau}(t) d\tau ds \quad (4.15)$$

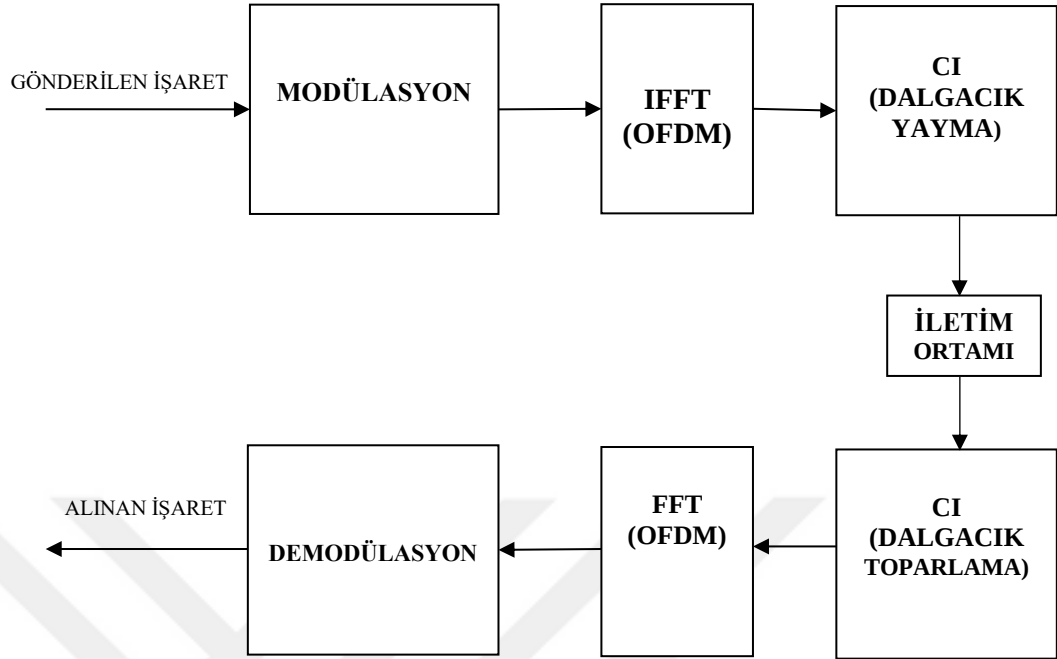
$\psi(t)$ ana dalgacık olarak bilinmektedir ve dalgacıkların tamamı bu dalgadan türetilmektedirler. Yukarıdaki gibi ifadeyi dönüşüm ve ölçek ifadeleri ile tanımlayacak olursak:

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (4.16)$$

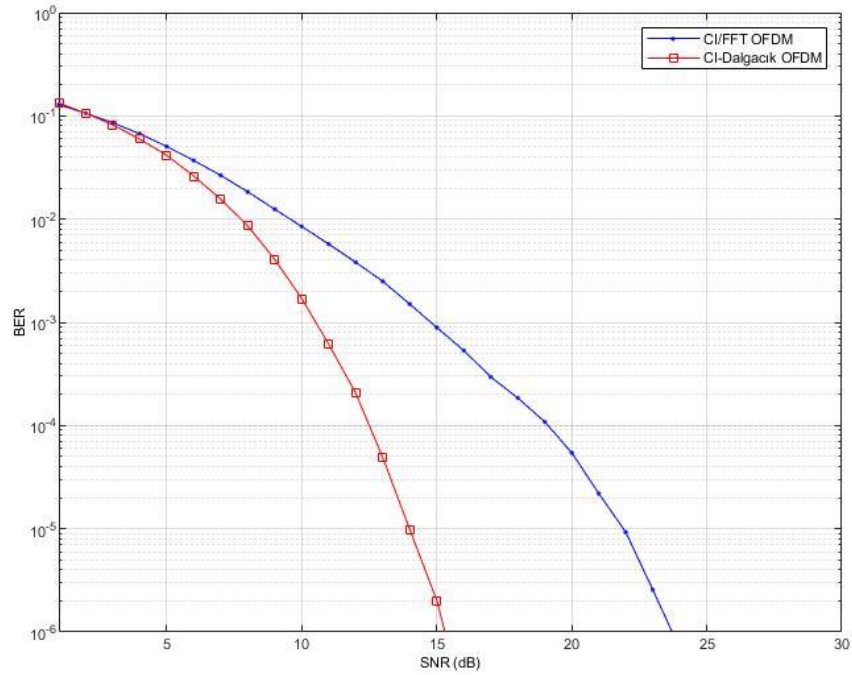
Yukarıdaki ifadede bulunan s sembolü, ölçek faktörü olarak isimlendirilir, dönüşüm faktörü ise τ ile gösterilmiştir. $s^{1/2}$ ifadesi ise enerji normalizasyonu sağlayabilmek için farklı ölçekler ile birlikte kullanılır.

Dalgacık dönüşümleri hem frekans analizi hem de frekans bileşeninin gerçekleşme anının analizini gerçekleştirebilme özellikleri sayesinde oldukça yararlı dönüşümlerdir. Şekil 4.13'te dalgacık dönüşümlerinin FFT yerine kullanıldığı bir taşıyıcı interferometri dalgacık OFDM sistem modeli gösterilmektedir.

Aşağıda gösterilmekte olan benzersiz modelin performansının FFT kullanılan sisteme kıyasla daha üstün olduğu [47] bilinmektedir. Aşağıda yer alan modelde kullanılan yöntemde gönderilen işaret verici tarafında OFDM için önce IFFT'ye tabi tutulmaktadır. Daha sonra taşıyıcı interferometri yayılımı gerçekleştirmek için IFFT uygulanmış bu işaret tekrar dalgacık dönüşümüne ya da dalgacık yayılımına tabi tutulmaktadır [47]. Alıcıdaki durum incelenecek olursa alınan işaretin öncelikle dalgacık toplama işlemine tabi tutulduğu daha sonra OFDM gereği FFT dönüşümüne tabi tutulduğu görülmektedir.

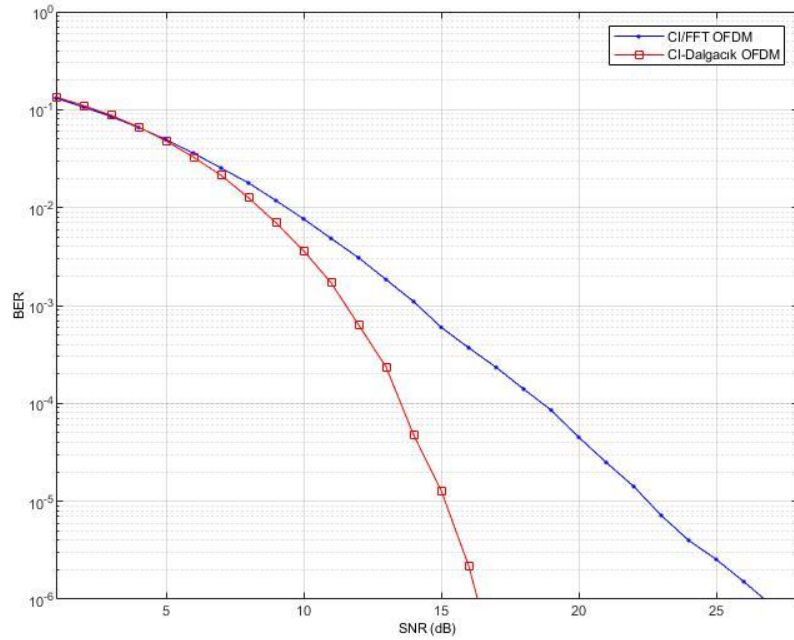


Şekil 4.13. Taşıyıcı İnterferometri - Dalgacık OFDM Sistem Modeli



Şekil 4.14. CI – Dalgacık OFDM Sistem ile CI – FFT OFDM Sistemin BER Parametresi ile Kıyaslanması (Kanal: Rayleigh)

Şekil 4.13'te önerilen dalgacık dönüşümü tabanlı taşıyıcı interferometri OFDM sistemin BER performansı Rayleigh kanal için Şekil 4.14'te yer alan grafikte gösterilmektedir.



Şekil 4.15. CI – Dalgacık OFDM Sistem ile CI – FFT OFDM Sistemin BER Parametresi ile Kıyaslanması (Kanal: Rician)

Şekil 4.15’de sunulan grafikte ise önerilen dalgacık dönüşümü tabanlı taşıyıcı interferometri OFDM sistemin BER performansı Rician kanal için gösterilmektedir. Her iki şekilden de görüldüğü üzere dalgacık dönüşümü tabanlı taşıyıcı interferometri OFDM sistemi Fourier tabanlı taşıyıcı interferometri OFDM sistemine karşı üstündür.

Bu bölümde taşıyıcı interferometri işaret yapısı takdim edilmiştir. Daha sonra taşıyıcı interferometri kodlarının OFDM sistemlerde yayma kodu olarak kullanıldığı yayma tekniği tanıtılmıştır. Taşıyıcı interferometri OFDM sisteminin, taşıyıcı interferometri kodları yerine hızlı Fourier dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilebildiği bilinmektedir. Dalgacık dönüşümü, hızlı Fourier dönüşümü yerine kullanılabilen, işaretin sadece frekans bileşenlerini değil aynı zamanda zaman bileşenlerini de analiz etmeye yarayan başarılı bir tekniktir. CI-FFT OFDM sisteminde, FFT yerine dalgacık dönüşümünün kullanılabileceği bu bölümde önerilmiş ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistem için Dalgacık Tabanlı Taşıyıcı İnterferometri OFDM (CI-Dalgacık OFDM) adı önerilmektedir.

CI-Dalgacık OFDM sistemi, MatLab ortamında simüle edilmiştir. Benzetim çalışmalarında Rayleigh ve Rician kanal modelleri kullanılmıştır. BER parametresi açısından her iki sistem aynı düzlem üzerinde kıyaslanmıştır. Elde edilen benzetim

sonuçlarına göre CI-Dalgacık OFDM sistemi, CI-FFT OFDM sisteminden BER performansı açısından daha üstündür. CI-Dalgacık OFDM sistemi, Rayleigh kanalda, 10^{-6} BER seviyesini yaklaşık 16 dB SNR ile yakalayabilmektedir. Buna karşılık aynı şartlar altında CI-FFT OFDM sistemi 10^{-6} BER seviyesini yaklaşık 27 dB SNR ile yakalayabilmektedir. Daha düşük SNR ile daha iyi bir BER oranı yakalayan CI-Dalgacık OFDM sistemi daha üstün performans sergilemektedir. Bu bölümde tanıtılan dalgacık dönüşümü tabanlı taşıyıcı interferometri OFDM sistemi bir sonraki bölümde işbirlikli bir ağda gerçekleştirilmektedir.



5. BÖLÜM

İŞBİRLİKLİ BİR AĞDA DALGACIK TABANLI TAŞIYICI İNERFEROMETRİ OFDM SİSTEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ VE PERFORMANS ANALİZİ

5.1 Önerilen Sistem Modeli

Bu bölümde, bir önceki bölümde takdim edilen dalgacık dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilen taşıyıcı interferometri OFDM sistemi, bir kaynak, bir aktarıcı ve bir alıcı içeren temel bir kablosuz işbirlikli ağda, çeşitleme kazancı elde etmek maksadı ile kullanılmakta ve sistemin performans analizi yapılmaktadır.

Önerilen sistem girişinde yer alan işaret öncelikle QPSK modülasyonuna tabi tutulmaktadır. Ardından OFDM için IFFT uygulanmakta, daha sonra işarete taşıyıcı interferometri yayılımı sağlamak için dalgacık dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Gerçekte kablosuz mobil haberleşme kanalını başarılı şekilde modelleyen, özellikle kalabalık şehirlerdeki kablosuz haberleşme kanalı modellemesi açısından oldukça başarılı olan ve literatürde sıklıkla kullanılan [37], [41] Rayleigh sönümlü kanal modeli bu çalışmada kullanılmıştır. Vericiden çıkan ve Rayleigh sönümlü kanal üzerinden geçen işaret daha sonra alıcıya ulaşmaktadır. Alıcı tarafta işaret, taşıyıcı interferometrinin toparlanması için tekrar dalgacık dönüşümüne ardından da OFDM demodülasyonu için FFT ve QPSK demodülasyonuna tabi tutulmaktadır.

Benzetim çalışmalarında kullanılan taşıyıcı interferometri işareti k 'nıncı set için aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$CI_k = \left\{ e^{j\left\{\left(\frac{2\pi}{N}\right).0.k+0.\Delta\theta\right\}}, e^{j\left\{\left(\frac{2\pi}{N}\right).1.k+1.\Delta\theta\right\}}, e^{j\left\{\left(\frac{2\pi}{N}\right).2.k+2.\Delta\theta\right\}}, \dots, \right. \\ \left. e^{j\left\{\left(\frac{2\pi}{N}\right).(N-1).k+(N-1).\Delta\theta\right\}} \right\} \quad (5.1)$$

Burada, N taşıyıcı sayısını ifade etmektedir. $\Delta\theta$ değeri işaretlerin birbirleri ile minimum ilişkisel olmalarını sağlayacak şekilde seçilmelidir.

Önerilen taşıyıcı interferometri OFDM sistemde k'nıncı sembol için gönderilen işaret şu şekilde yazılır:

$$s_k(t) = A \cdot \text{Re} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} a_k^n e^{j(2\pi f_c t + 2\pi f_i t + \frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot i)} \right\} \quad (5.2)$$

Bu denklemde a_k^n k'nıncı sembol seti içerisindeki n'inci sembolü ifade etmektedir. $\frac{2\pi}{N} \cdot k \cdot i$ ise dikgen taşıyıcı interferometri kodları üretebilmek için gerekli olan faz kayması bileşenini ifade etmektedir. Alıcıya Rayleigh sönümlemeli kanal üzerinden ulaşan işaret ise şu şekilde yazılır:

$$r(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \text{Re} [\alpha_i \alpha_k e^{j(2\pi f_c t + 2\pi i \Delta f t + i \Delta \theta_k + \phi_i)}] + n(t) \quad (5.3)$$

Burada α_i i'ninci taşıyıcı için sönümleme kazancını ve ϕ_i ise aynı taşıyıcı için faz kaymasını ifade etmektedir. $n(t)$ ile gösterilen gürültü bileşeni ise AWGN'dir.

Sistem performansı çıkıştaki işaretin girişteki işaret ile mümkün olduğunca aynı olması yani bozulmadan iletilmesi ile ölçülür. Bunun için de bit hata oranı (BER) analizi yapılmaktadır. Bu çalışmada giriş ve çıkıştaki işaretler BER analizine tabi tutulmuştur. BER analizinde sistem çıkışından temin edilen işaret, gönderilen işaret ile benzerlik analizine tabi tutulmaktadır. Alınan işaret ile gönderilen işaret arasındaki farklılıklar tespit edilmektedir. Bu farklılıklar sistem için hata demektir. Elde edilen hatalı işaret miktarı gönderilen işaret miktarına oranlanır. Bu sayede hatalı bitlerin oranı tespit edilmiş olur. Başarılı sistemlerin BER değerlerinin sıfıra yakın olması yani hatasız iletim yapıyor olması beklenir. BER oranı düştükçe sistemin performansının arttığı söylenebilir [41].

Şekil 5.1'de gösterilen, bu tez çalışması kapsamında önerilen dalgacık dönüşümü kullanılarak gerçekleştirilen taşıyıcı interferometri OFDM sistem modeli, Şekil 5.2'de yer alan bir alıcı, bir aktarıcı ve bir vericiden oluşan kablosuz bir işbirlikli ağ modelinde uygulanmaktadır.

İşbirlikli ağda yer alan verici, aktarıcı ve alıcı arasında toplamda üç kanal olduğu Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılan bu modelde yer alan üç kanalın tamamında Şekil 5.1’de yer alan iletişim modeli uygulanmaktadır. Modelin uygulandığı üç kanalı şu şekilde açıkça belirtelim:

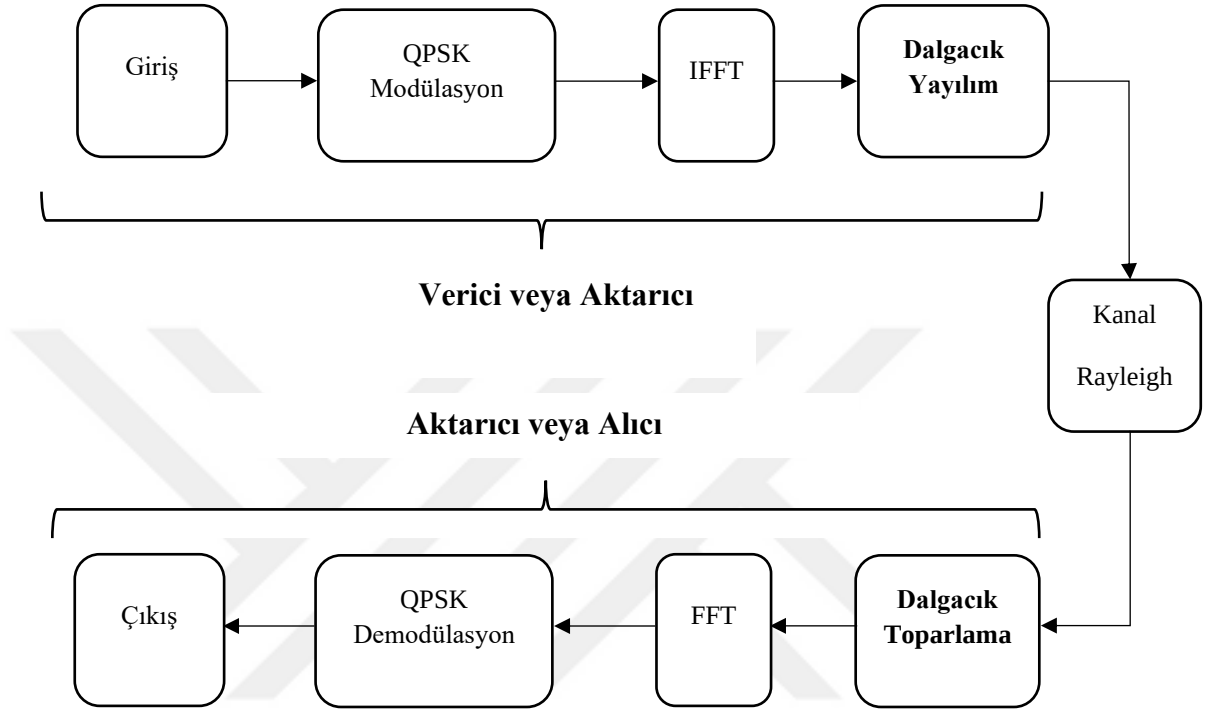
1. Verici ile Alıcı arasındaki kanal
2. Verici ile Aktarıcı arasındaki kanal
3. Aktarıcı ile Alıcı arasındaki kanal

İşbirlikli ağda dalgacık dönüşümleri kullanılarak taşıyıcı interferometri OFDM sisteminin gerçekleştirilmesi ilk defa bu tez kapsamında önerilmektedir. Benzetim çalışmalarını gerçekleştirmek için yazılan MatLab kodu şu şekilde çalışmaktadır. Kodun başlangıcında sistemin benzetim çalışması süresince kullanacağı parametreler belirlenmektedir. Bu parametrelerin ne olduğu ve her bir benzetim çalışması için nasıl seçildikleri ilgili benzetim çalışmaları sunulurken tablolar halinde verilmektedir. Parametreler seçildikten sonra benzetim süreci başlamaktadır. Modülasyon türüne uygun olarak işaret üretilmektedir. Alıcıya gönderilmek üzere üretilen bu işaret daha sonra alınan işaret ile kıyaslanmak ve BER hesabı yapılmak üzere saklanmaktadır. İşaret sıra ile seriden paralele dönüştürülmekte, OFDM modülasyonu için IFFT uygulanmaktadır. Bu aşamada işarette taşıyıcı interferometri yayılımı etkisi sağlamak için dalgacık dönüşümü uygulanmaktadır. Üretilen bu bilgi daha sonra sıra ile doğrudan alıcıya, aktarıcıya, aktarıcı üzerinden alıcıya Rayleigh sönümlü kanal modeli üzerinden ve seçilen aktarma stratejisine uygun olarak gönderilmektedir. Bu aşamada ayrıca gerekli olması halinde faz kaymaları da giderilmektedir.

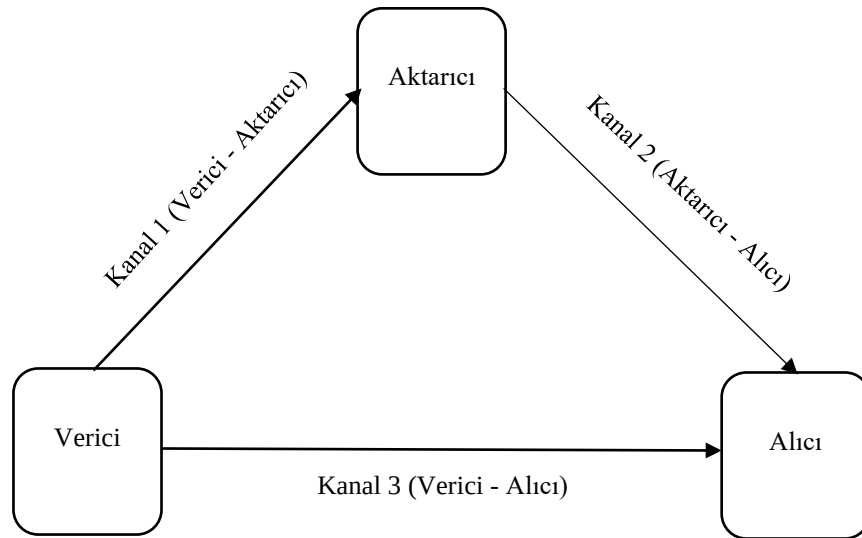
Bu işlemlerin ardından işbirlikli ağ yapısından dolayı alıcıya farklı kanallar üzerinden ulaşan işaretler bulunmaktadır. Alıcı kendisine ulaşan işaretlere sırası ile dalgacık toplama ve FFT işlemlerini uygulamaktadır. Alıcının çeşitleme kazancı sağlayabilmesi için ulaşan bu işaretler, seçilen birleştirme yöntemine göre birleştirilmektedir. Nihai olarak işaret demodülasyona tabi tutulmakta ve gönderilen işaret ile alınan işaret kıyaslanarak BER analizi gerçekleştirilmektedir.

Tepe Ortalama Güç Oranı (PAPR) analizi yapmak için ise MatLab iletişim araç kiti kullanılarak alınan işarete tamamlayıcı kümülatif dağılım fonksiyonu (CCDF) analizi uygulanmaktadır. Bu analiz gerçekleştirilirken, taşıyıcı interferometri OFDM

kullanılmayan sistemin çıkışında elde edilen işaret ile taşıyıcı interferometri dalgacık dönüşümlü sistemin çıkışındaki işaret karşılaştırılmaktadır.



Şekil 5.1. Önerilen Sistem Modeli



Şekil 5.2. Önerilen Modelin Uygulandığı İşbirlikli Ağ Modeli

5.2 MATLAB’de Dalgacık Dönüşümleri

MatLab programında dalgacık dönüşümü uygulamak için,

$$[C, L] = \text{wavedec}(X, N, \text{'dalgacık'}) \quad (5.4)$$

şeklinde gösterilen bir komut kullanılmaktadır. Burada;

X : Dalgacık dönüşümüne tabi tutulan işareti göstermektedir.

N : Dönüşümün seviyesini göstermektedir. N değeri pozitif bir tam sayıdır. $N = \log_2(\text{size}(x))$

Dalgacık : Dönüşüm esnasında tatbik edilecek dalgacık filtresidir.

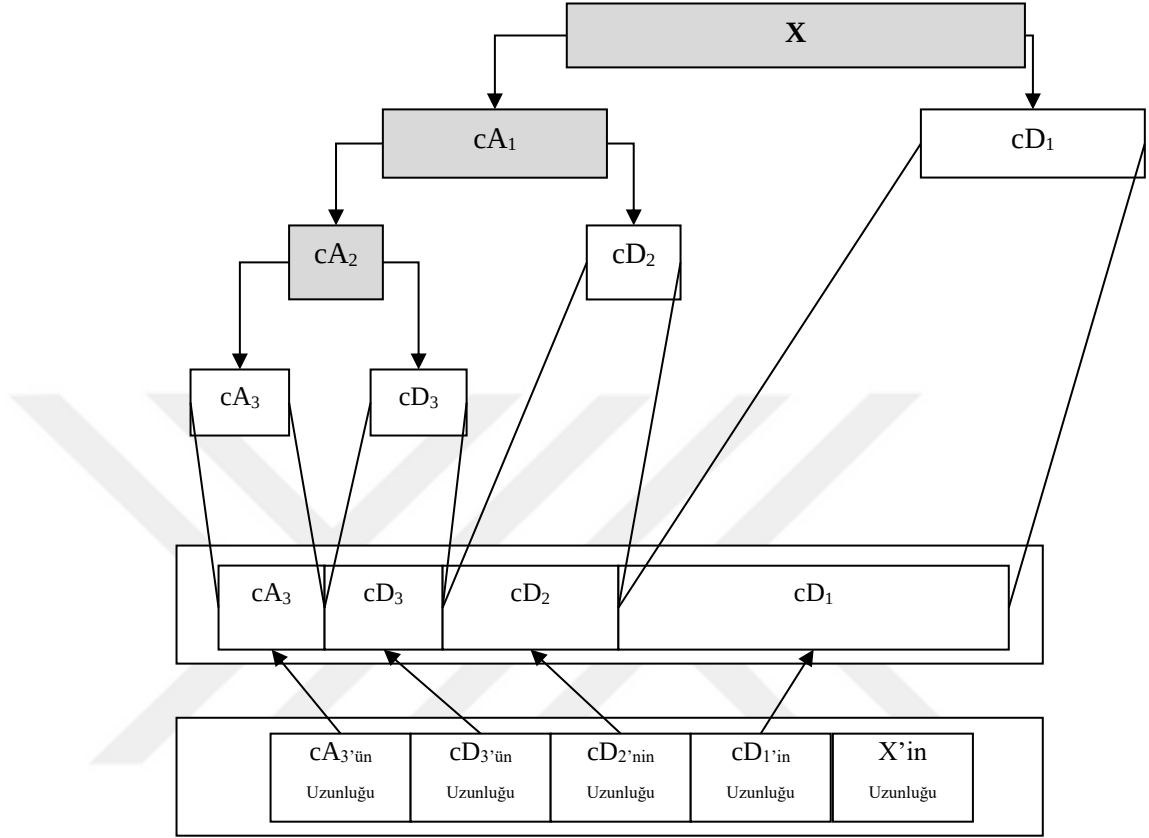
MatLab’de halihazırda var olan dalgacık dönüşüm filtreleri aşağıda yer almaktadır.

Tablo 5.1. Dalgacık Dönüşümü Filtreleri

Dalgacık Grubu	Dalgacık
Daubechies	‘db1’ veya ‘haar’, ‘db2’, ... , ‘db10’, ... , ‘db45’
Coiflets	‘coif1’, ... , ‘coif5’
Symlets	‘sym2’, ... , ‘sym8’, ... , ‘sym45’
Discrete Meyer	‘dmey’
Biorthogonal	‘bior1.1’, ‘bior1.3’, ‘bior1.5’ ‘bior2.2’, ‘bior2.4’, ‘bior2.6’, ‘bior2.8’ ‘bior3.1’, ‘bior3.3’, ‘bior3.5’, ‘bior3.7’ ‘bior3.9’, ‘bior4.4’, ‘bior5.5’, ‘bior6.8’
Reverse Biorthogonal	‘rbio1.1’, ‘rbio1.3’, ‘rbio1.5’ ‘rbio2.2’, ‘rbio2.4’, ‘rbio2.6’, ‘rbio2.8’ ‘rbio3.1’, ‘rbio3.3’, ‘rbio3.5’, ‘rbio3.7’ ‘rbio3.9’, ‘rbio4.4’, ‘rbio5.5’, ‘rbio6.8’

Yukarıda anlatılmakta olan wavedec komutu sayesinde çok seviyeli tek boyutlu dalgacık dönüşümü ve analizi, uygulamaya has olarak kullanıcı tarafından seçilen dalgacık filtresi kullanılarak gerçekleştirilir. Komutun çalışmasının ardından C simgesi ile gösterilen bir

dalgacık dönüşüm vektörü ve buna ilave olarak L ile gösterilen konum belirleme vektörü elde edilir.



Şekil 5.3. Dalgacık Dönüşüm Tablosu

Bir dalgacık dönüşümünün tersine dönüşümü ise aşağıda yer alan komut ile gerçekleştirilir;

$$X = \text{waverec}(C, L, \text{'dalgacık'}) \quad (5.5)$$

Yukarıda anlatılan ve dalgacık dönüşümü esnasında elde edilen C ve L ifadeleri, daha sonra waverec komutunda asıl işareti elde etmek için kullanılırlar.

5.3 Benzetim Çalışması Parametreleri

Önerilen sistemin performansı bit hata olasılığı ve tepe ortalama güç oranı parametreleri açısından incelenmiştir. Bunu sağlayabilmek için önerilen sistem modeli MatLab ortamında gerçekleştirilmiş ve benzetim çalışmalarına tabi tutulmuştur. Yapılan benzetim

çalışmaları neticesinde önerilen sistemin taşıyıcı interferometri yayma kullanmayan sisteme göre belirgin bir biçimde daha iyi performans sergilediği ortaya konulmuştur. Fakat işlemsel karmaşıklık açısından önerilen sistem dezavantajlı konumda bulunmaktadır. Dalgacık dönüşümlerinin meydana getirdiği ekstra işlem yükü hem zaman hem de işlem yükü kaybına neden olmaktadır. Yani sistem kazanca karşılık başka bir noktada kayba uğramaktadır. Benzetim çalışmaları esnasında farklı modülasyon tipleri, farklı aktarım stratejileri, farklı birleştirme yöntemleri ve farklı dalgacık filtreleri kullanılmıştır. Sistem performansı bu farklı parametrelere bağlı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca aktarıcının konumunun sistem performansı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Benzetim çalışmaları kapsamında kullanılan tüm sistem parametreleri aşağıda yer alan Tablo 5.2’de gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	QPSK ve BPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlmeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	AAF ve DAF
Birleştirme Yöntemleri	ERC, FRC, SNRC ve ESNRC
Dalgacık Filtreleri	db5, rbio3.1, bior3.1, dmey, haar, sym3

5.4 Aktarım Stratejisi Performans Analizi

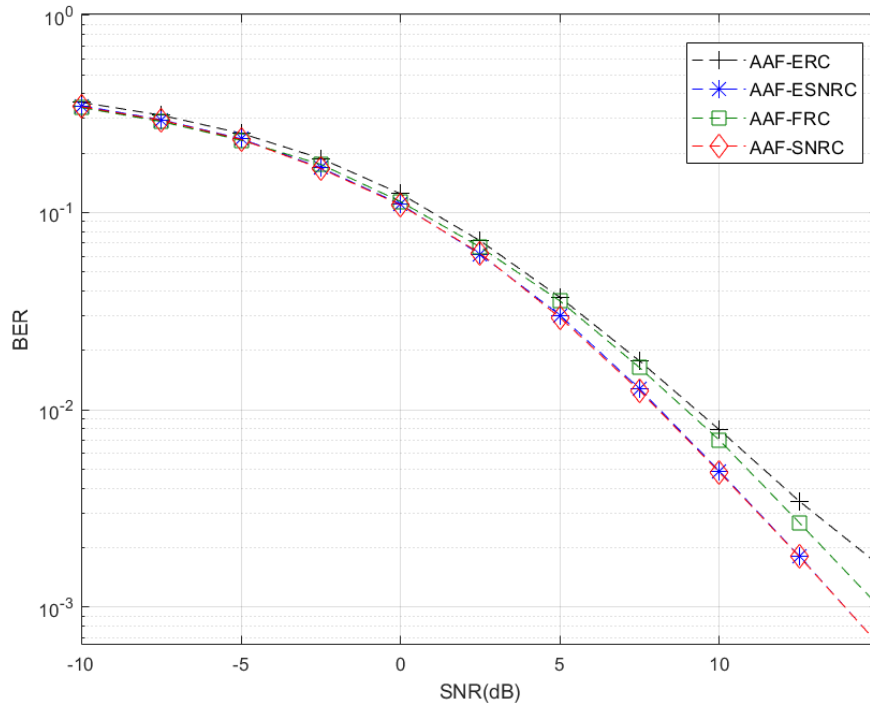
Klasik bir işbirlikli ağda ve bu çalışma kapsamında önerilen işbirlikli kablosuz ağda bulunan aktarıcıda kullanılan aktarım stratejisinin sistem performansı üzerindeki etkisi bu bölümde incelenmektedir. Aktarıcıda, kuvvetlendir ve aktar (AAF) tipi aktarım stratejisi ile çöz ve aktar (DAF) tipi aktarım stratejisi ayrı ayrı benzetim çalışmalarına konu edilmiştir.

Benzetim çalışmaları QPSK ve BPSK modülasyon şemalarına göre ayrı ayrı yapılmıştır. Benzetim çalışmaları ile sistemin performansı BER parametresi açısından ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları neticelerine göre hem klasik sistem için hem de önerilen sistem için DAF stratejisi AAF stratejisine göre daha iyi performans

sergilemiştir. Önerilen sistemin performansının her iki aktarım stratejisi için de klasik sisteme göre daha üstün olduğu tespit edilmiştir.

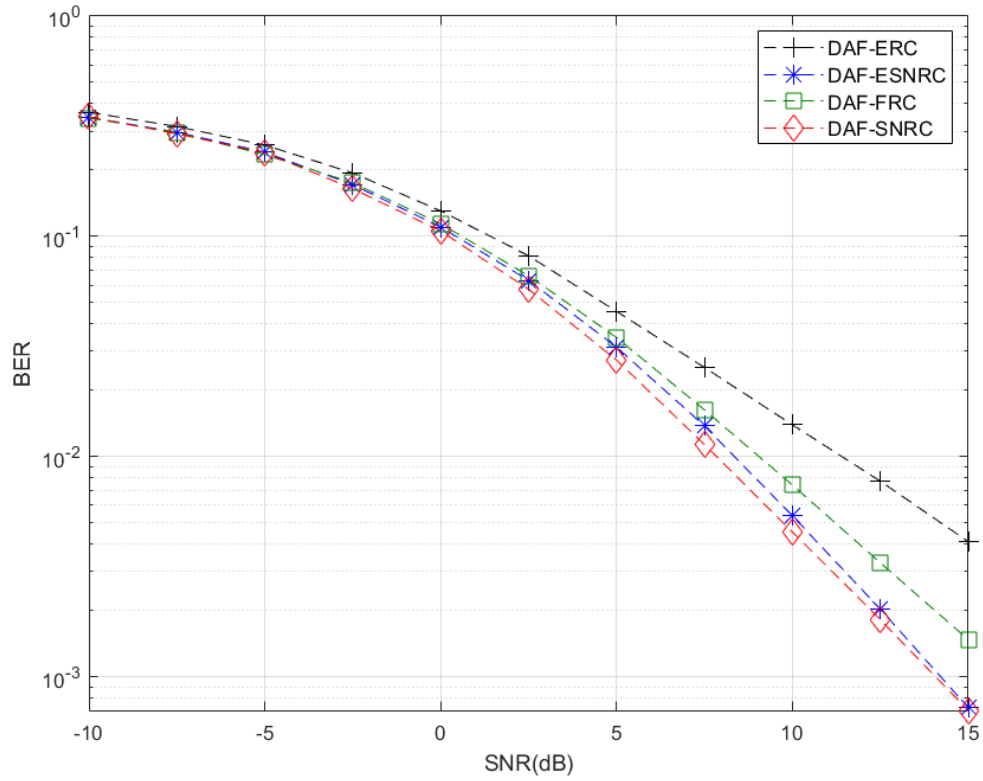
Aşağıda öncelikle klasik bir işbirlikli ağın aktarıcı performansı bit hata olasılığı cinsinden analiz edilecek ardından önerilen sistemin aktarıcı performans analizi yapılacaktır.

5.4.1 Klasik İşbirlikli Ağın Aktarım Stratejisi Performans Analizi



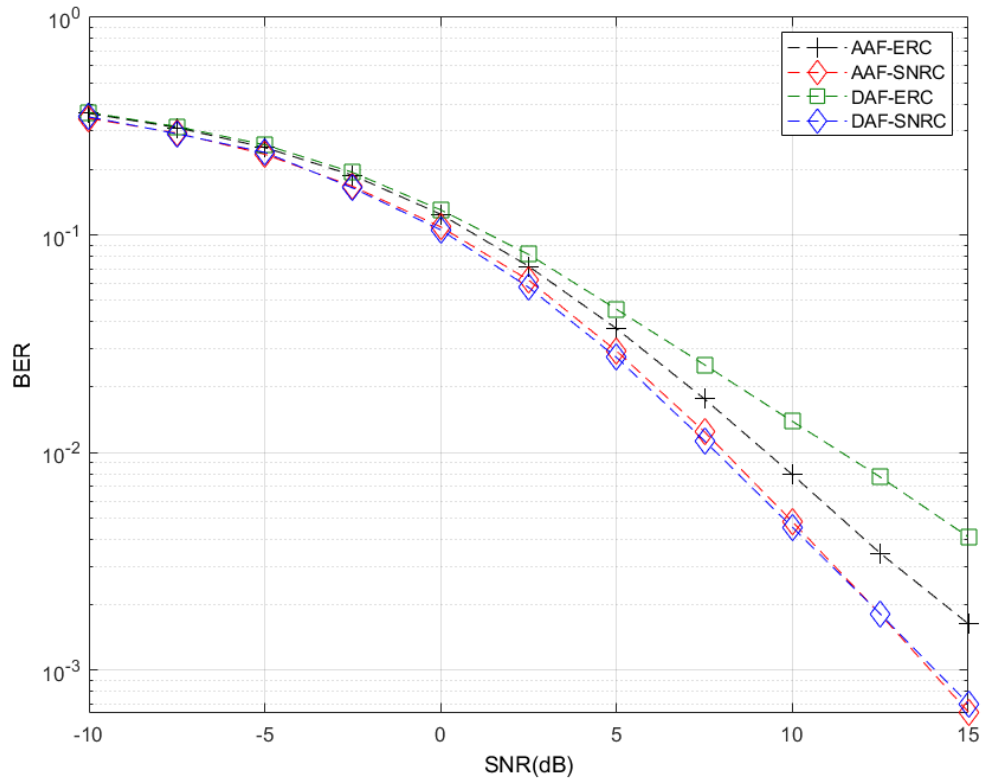
Şekil 5.4. Klasik Bir İşbirlikli Ağın AAF Kullanımında Farklı Birleştiriciler İçin BER Performans Grafiği (QPSK Modülasyonu İçin)

Şekil 5.4'te klasik bir işbirlikli ağda Kuvvetlendir ve Aktar tipi aktarma stratejisinin kullanımı ve farklı türden (ERC, FRC, SNRC, ESNRC) birleştiricilerin kullanımı sonucu oluşan sistemin performansı bit hata olasılığı cinsinden gösterilmektedir. SNR'nin 12,5 dB olması durumunda eşit oran birleştiricisinin bit hata olasılığı 0,00344 olarak gerçekleşmektedir, aynı SNR seviyesi için sabit oran birleştiricisinin bit hata olasılığı 0,00267 olarak gerçekleşmektedir. Sonuç olarak klasik bir işbirlikli ağda kuvvetlendir ve aktar aktarım stratejisi kullanımında FRC birleştirme metodu ERC metodundan daha başarılı bit hata olasılığı performansı göstermektedir.



Şekil 5.5. Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF Kullanımında Farklı Birleştiriciler İçin BER Performans Grafiği (QPSK Modülasyonu İçin)

Şekil 5.5'te klasik bir işbirlikli ağda Çöz ve Aktar tipi aktarma stratejisinin kullanımı ve farklı türden (ERC, FRC, SNRC, ESNRC) birleştiricilerin kullanımı sonucu oluşan sistemin performansı bit hata olasılığı cinsinden gösterilmektedir. SNR'nin 12,5 dB olması durumunda eşit oran birleştiricisinin bit hata olasılığı 0,00771 olarak gerçekleşmektedir, aynı SNR seviyesi için sabit oran birleştiricisinin bit hata olasılığı 0,00328 olarak gerçekleşmektedir. Sonuç olarak klasik bir işbirlikli ağda çöz ve aktar aktarım stratejisi kullanımında FRC birleştirme metodu ERC metodundan daha başarılı bit hata olasılığı performansı göstermektedir.



Şekil 5.6. Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF ile AAF Stratejisi Kullanımındaki BER Performans Grafiği (QPSK Modülasyonu İçin)

Şekil 5.6’da QPSK modülasyonu kullanılan klasik bir işbirlikli ağın iki farklı aktarım stratejisi kullanımındaki bit hata olasılığı performansı incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler Tablo 5.4’te verilmiştir. Grafikte AAF ve DAF aktarım stratejileri ile birlikte ERC ve SNRC birleştirme yöntemleri de analiz edilmiştir. 10 dB SNR değeri göz önüne alındığında DAF ve SNRC birleşimi ile oluşan klasik sistemin BER performansı 0,00453 olarak gerçekleşmiştir, aynı SNR değeri için AAF ve SNRC birleşimi ile oluşan klasik sistemin BER performansı 0,00481 olarak gerçekleşmiştir. Tablo 5.3’te kullanılan SNR değerlerine karşılık elde edilen tüm BER sonuçları yer almaktadır.

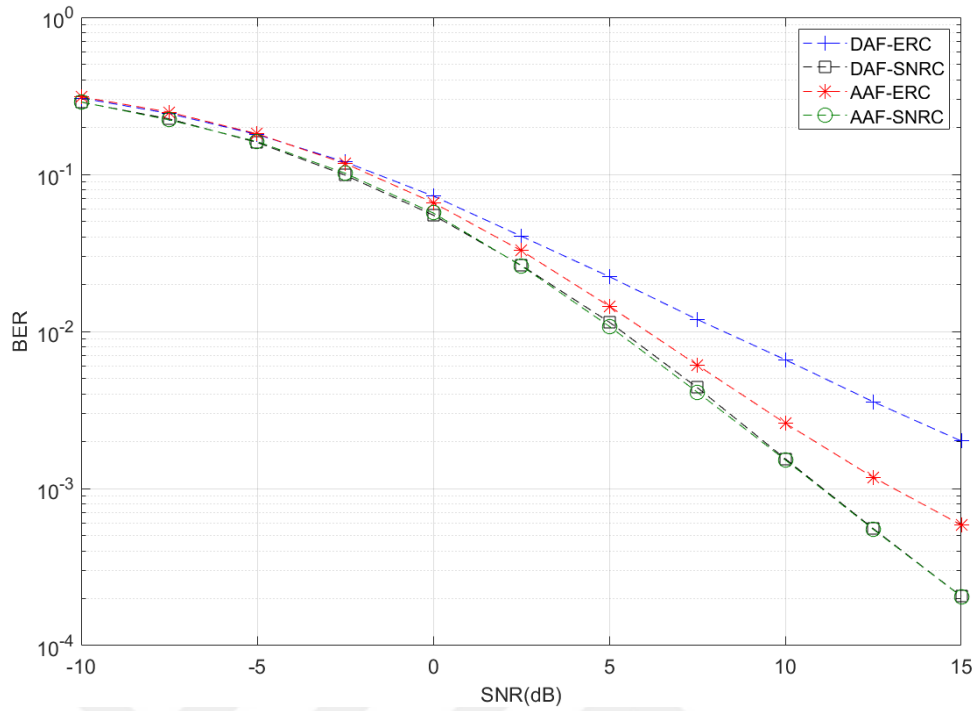
Grafikten açıkça görüleceği üzere işaret-gürültü birleştiricisi (SNRC) haricindeki tüm birleştiriciler için AAF, DAF’tan daha iyi neticeler üretmiştir. Ayrıca bir diğer bulgu olarak eşit şartlar altında DAF, düşük performanslı birleştiricilerde AAF’dan daha kötü bir performans sergilerken yüksek performanslı birleştiricilerde DAF, AAF’dan daha iyi performans sergilemiştir. En iyi performans DAF aktarım stratejisi ve SNRC birleştiricisi kombinasyonu ile sağlanmıştır.

Tablo 5.3. Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF ile AAF Stratejisi Kullanımındaki BER Performans Verileri (QPSK Modülasyonu İçin)

SNR (dB)	BİT HATA OLASIĞI (BER) - QPSK			
	AAF-ERC	AAF-SNRC	DAF-ERC	DAF-SNRC
-10	0,361942998	0,343615302	0,365342882	0,348599138
-7,5	0,311248779	0,293686811	0,314941406	0,291877298
-5	0,252178486	0,234816778	0,259508635	0,239591273
-2,5	0,187931941	0,167124603	0,193780637	0,164371745
0	0,124542623	0,109049479	0,130403646	0,105594758
2,5	0,071813247	0,062042623	0,081445313	0,05744015
5	0,03713908	0,029305647	0,045575945	0,027387518
7,5	0,017648635	0,012475804	0,025350146	0,011330164
10	0,007914063	0,004817383	0,013920885	0,004539063
12,5	0,003444336	0,001806641	0,00771582	0,0018125
15	0,001636719	0,000643555	0,004103516	0,000702148

Tablo 5.4. Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	QPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlmeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	AAF ve DAF
Birleştirme Yöntemleri	ERC, FRC, SNRC ve ESNRC



Şekil 5.7. Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF ile AAF Stratejisi Kullanımındaki BER Performans Grafiği (BPSK Modülasyonu İçin)

Şekil 5.7’de bir verici, bir aktarıcı ve bir alıcıdan oluşan BPSK modülasyonu kullanan bir işbirlikli kablosuz ağın bit hata olasılığı cinsinden performans analizi gösterilmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler Tablo 5.6’da verilmektedir. Şekil 5.7’deki grafikten açıkça görüldüğü üzere tüm birleştiriciler için AAF, DAF’tan daha iyi neticeler üretmiştir. Belirli SNR değerleri için sistemin BER performans verileri Tablo 5.5’te verilmiştir. Örneğin 10 dB SNR seviyesi için AAF – ERC kombinasyonunun BER değeri 0,00260 olmaktadır. Aynı SNR seviyesi için DAF – ERC kombinasyonunun BER değeri 0,00660 olarak gerçekleşmektedir.

Tablo 5.5. Tablo Klasik Bir İşbirlikli Ağın DAF ile AAF Stratejisi Kullanımındaki BER Performans Verileri (BPSK Modülasyonu İçin)

BİT HATA OLASILIĞI (BER) - BPSK				
SNR	AAF-ERC	AAF-SNRC	DAF-ERC	DAF-SNRC
-10	0,311645508	0,289033778	0,306121826	0,281640625
-7,5	0,248974609	0,222167969	0,244045351	0,219900174
-5	0,181206597	0,1618052	0,179190341	0,152809495
-2,5	0,117222377	0,101582635	0,119986185	0,094257061
0	0,066102724	0,056788245	0,072822627	0,050649692

2,5	0,032703412	0,026179186	0,040414353	0,023201459
5	0,014493405	0,010790692	0,022340539	0,009612797
7,5	0,006107023	0,004108212	0,011925972	0,003728829
10	0,002603299	0,001521752	0,006607985	0,001401435
12,5	0,00117755	0,000549902	0,003565166	0,000517188
15	0,000585352	0,000205371	0,002005663	0,000187988

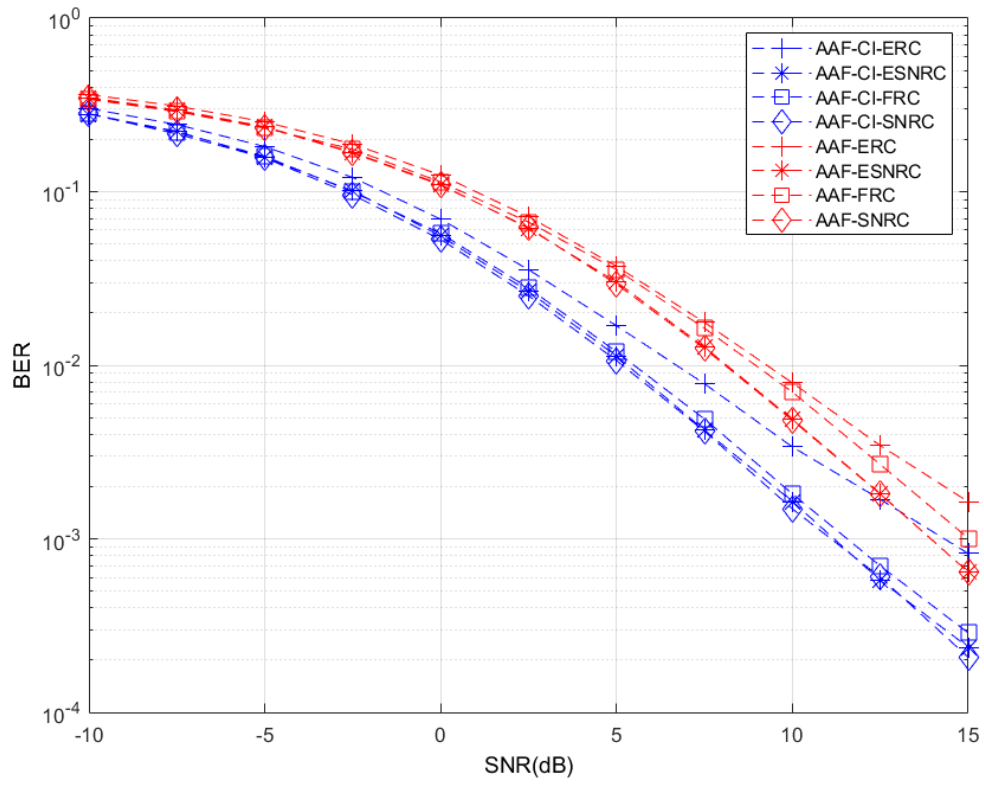
Tablo 5.6. Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	BPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlemeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	AAF ve DAF
Birleştirme Yöntemleri	ERC, FRC, SNRC ve ESNRC

5.4.2 Önerilen Sistemin Aktarım Stratejisi Performans Analizi

Bir önceki bölümde bir verici, bir aktarıcı bir alıcıdan oluşan klasik bir işbirlikli ağın farklı aktarım stratejileri performansı analiz edilmiştir. Bu bölümde ise tez çalışması kapsamında önerilen sistemin aktarım stratejisi performansı bit hata olasılığı cinsinden performansı analiz edilmektedir.

Şekil 5.8’de önerilen sistemin performansı klasik sistem ile kıyaslanmaktadır. Benzetim çalışmaları kapsamında kullanılan parametreler Tablo 5.11’de sunulmaktadır. Her iki sistemde de kuvvetlendir – aktar tipi aktarım stratejisi kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucu elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 5.7 ve Tablo 5.8’de verilmektedir. Şekil 5.8’de sunulan bit hata olasılığı grafiği incelendiğinde, AAF aktarım stratejisi ve SNRC birleştiricisi kombinasyonu kullanımında, 5 dB SNR değeri için önerilen sistemin 0,01064 BER değeri ürettiği görülmektedir. Aynı şartlar altında klasik sistem 0,02931 BER değeri üretmektedir. Bu sonuç açıkça göstermektedir ki; önerilen sistem, AAF stratejisi kullanımında klasik sisteme göre daha üstün bir performans sergilemektedir. Grafikte yer alan mavi çizgiler önerilen sistemi gösterirken, kırmızı çizgiler klasik sistemi göstermektedir. Önerilen sistem tüm birleştiriciler için AAF aktarım stratejisinde daha başarılıdır.



Şekil 5.8. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin AAF Performans Grafiği

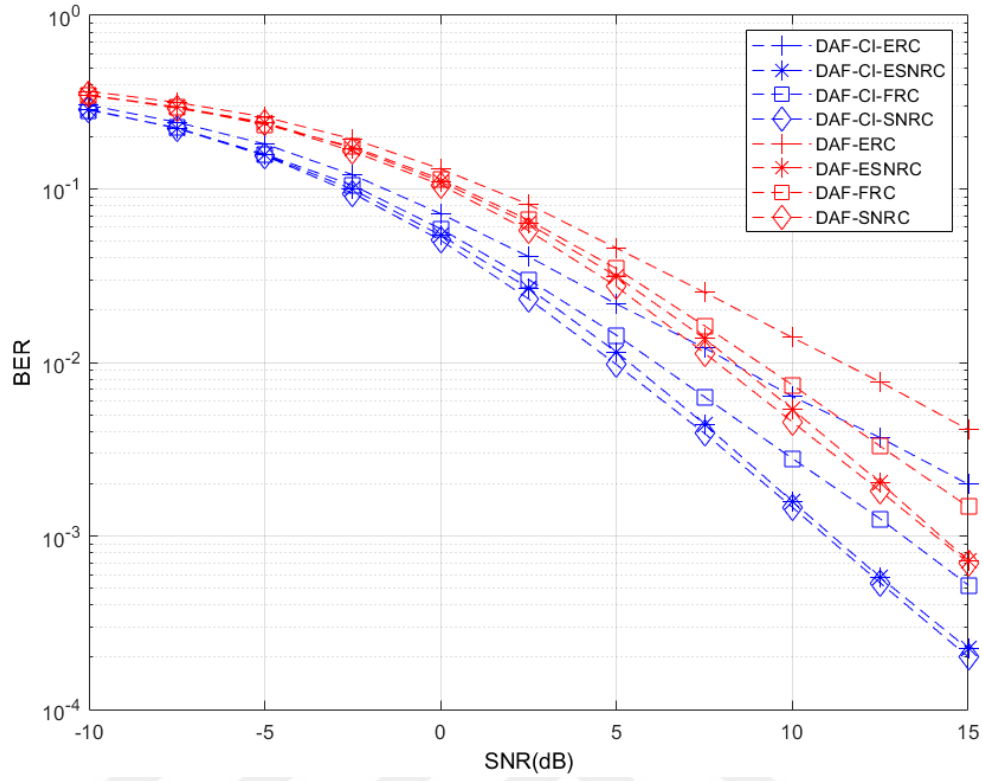
Tablo 5.7. Önerilen Sistemin AAF Stratejisi BER Performans Verileri

BİT HATA OLASIĞILI (BER) ÖNERİLEN SİSTEM (AAF-QPSK)				
SNR (dB)	ERC	FRC	SNRC	ESNRC
-10	0,30143	0,28122	0,28058	0,27946
-7,5	0,2435	0,22016	0,21506	0,22259
-5	0,18177	0,15978	0,15659	0,15709
-2,5	0,12071	0,09969	0,09583	0,10096
0	0,06939	0,05735	0,05301	0,05552
2,5	0,03551	0,02787	0,02511	0,02659
5	0,01688	0,01194	0,01064	0,01129
7,5	0,00782	0,0049	0,00417	0,00422
10	0,00338	0,00182	0,00149	0,00164
12,5	0,00169	0,0007	0,0006	0,00058
15	0,00082	0,00029	0,00021	0,00024

Tablo 5.8. Klasik Sistemin AAF Stratejisi BER Performans Verileri

	BİT HATA OLASIĞILI (BER) KLASİK SİSTEM (AAF-QPSK)			
SNR (dB)	ERC	FRC	SNRC	ESNRC
-10	0,36194	0,34045	0,34362	0,34769
-7,5	0,31125	0,28921	0,29369	0,29524
-5	0,25218	0,23222	0,23482	0,23661
-2,5	0,18793	0,17536	0,16712	0,16856
0	0,12454	0,11359	0,10905	0,11015
2,5	0,07181	0,06673	0,06204	0,06128
5	0,03714	0,03559	0,02931	0,03016
7,5	0,01765	0,01633	0,01248	0,01273
10	0,00791	0,007	0,00482	0,00488
12,5	0,00344	0,00268	0,00181	0,00182
15	0,00164	0,00101	0,00064	0,00064

Şekil 5.9’da önerilen sistemin performansı klasik sistem ile kıyaslanmaktadır. Benzetim çalışmaları kapsamında kullanılan parametreler Tablo 5.11’de sunulmaktadır. Her iki sistemde de çöz ve aktar tipi aktarım stratejisi kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucu elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 5.9 ve Tablo 5.10’da verilmektedir. Şekil 5.9’da sunulan bit hata olasılığı grafiği incelendiğinde, DAF aktarım stratejisi ve SNRC birleştiricisi kombinasyonu kullanımında, 5 dB SNR değeri için önerilen sistemin 0,00972 BER değeri ürettiği görülmektedir. Aynı şartlar altında klasik sistem 0,02739 BER değeri üretmektedir. Bu sonuç açıkça göstermektedir ki; önerilen sistem, DAF stratejisi kullanımında klasik sisteme göre daha üstün bir performans sergilemektedir. Grafikte yer alan mavi çizgiler önerilen sistemi gösterirken, kırmızı çizgiler klasik sistemi göstermektedir. Önerilen sistem tüm birleştiriciler için DAF aktarım stratejisinde daha başarılıdır. En iyi netice DAF ve SNRC yöntemlerinin kombinasyonu ile önerilen sistemin kullanımı neticesinde elde edilmiştir.



Şekil 5.9. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin DAF Performans Grafiği

Tablo 5.9. Önerilen Sistemin DAF Stratejisi Performans Verileri

BİT HATA OLASIĞILI (BER) ÖNERİLEN SİSTEM (DAF-QPSK)				
SNR (dB)	ERC	FRC	SNRC	ESNRC
-10	0,30365	0,2841	0,28549	0,28725
-7,5	0,24228	0,22463	0,22334	0,22337
-5	0,18139	0,15823	0,15537	0,15658
-2,5	0,12049	0,10484	0,09437	0,09926
0	0,07196	0,05886	0,05062	0,05404
2,5	0,04071	0,03002	0,02322	0,02684
5	0,02168	0,01435	0,00972	0,01146
7,5	0,01214	0,00634	0,00391	0,00442
10	0,00637	0,0028	0,00146	0,00158
12,5	0,00368	0,00125	0,00054	0,00058
15	0,00199	0,00052	0,0002	0,00022

Tablo 5.10. Klasik Sistemin DAF Stratejisi Performans Verileri

	BİT HATA OLASIĞILI (BER) KLASİK SİSTEM (DAF-QPSK)			
SNR (dB)	ERC	FRC	SNRC	ESNRC
-10	0,36534	0,34412	0,3486	0,34708
-7,5	0,31494	0,29575	0,29188	0,29673
-5	0,25951	0,23465	0,23959	0,24085
-2,5	0,19378	0,17486	0,16437	0,17145
0	0,1304	0,11401	0,10559	0,11008
2,5	0,08145	0,06614	0,05744	0,06304
5	0,04558	0,03469	0,02739	0,03136
7,5	0,02535	0,01627	0,01133	0,01376
10	0,01392	0,00742	0,00454	0,00538
12,5	0,00772	0,00329	0,00181	0,00203
15	0,0041	0,00147	0,0007	0,00072

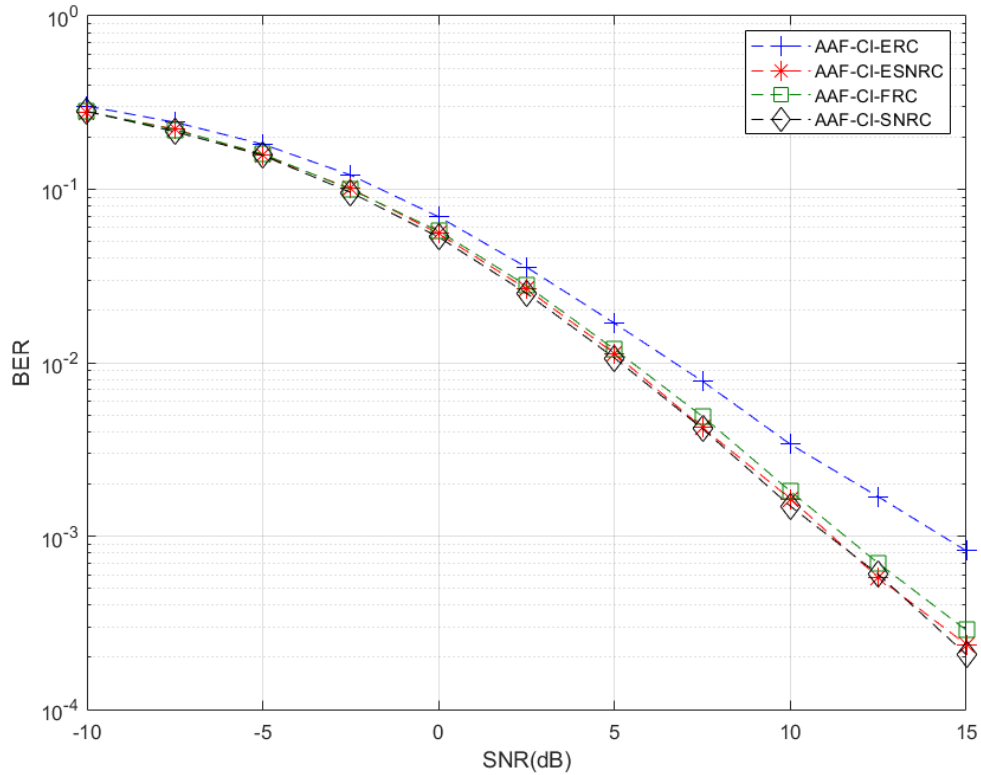
Tablo 5.11. Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	QPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlemeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	AAF ve DAF
Birleştirme Yöntemleri	ERC, FRC, SNRC ve ESNRC
Dalgacık Filtre	rbio1.5

5.5 Birleştiricinin Önerilen Sistem Performansı Üzerindeki Etkisinin Analizi

Alıcı kendisine ulaşan işaretleri farklı birleştirme metotları ile birleştirerek uzaysal çeşitleme kazancı elde edebilmektedir. Bu bölümde alıcının kendisine ulaşan işaretleri birleştirme yöntemlerindeki farklılıklar göz önüne alınarak farklı birleştiriciler için sistem performansı analiz edilmiştir. Benzetim çalışmalarında AAF ve DAF aktarım stratejileri ve ERC, FRC, SNRC ve ESNRC birleştirme yöntemleri kullanılmıştır. Benzetim çalışmasına kullanılan diğer parametreler Tablo 5.12’de verilmiştir.

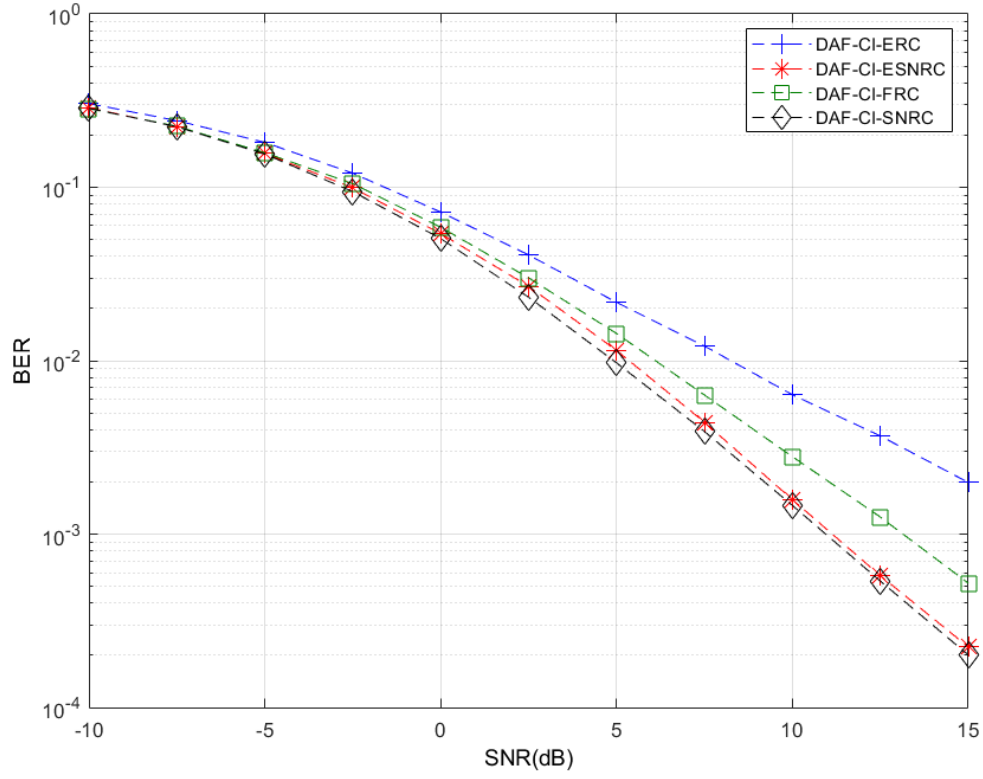
Şekil 5.10'da önerilen sistemin AAF aktarım stratejisi kullanılması durumunda ERC, ESNRC, FRC ve SNRC birleştiricileri için BER performansı verilmektedir. Grafik incelendiğinde 15 dB SNR değeri için eşit oran birleştiricisinin BER performansı 0,00082 olarak gerçekleşirken, aynı şartlar altında işaret gürültü oranı birleştiricisinin BER performansı 0,00020 olarak gerçekleşmektedir. Yani SNRC birleştiricisi aynı şartlar altında önerilen sistemde kullanılması durumunda daha iyi bir performans sergilemektedir. Önerilen sistemde AAF aktarım stratejisi ile kullanılması durumunda en kötü birleştirici performansı ERC tarafından ortaya konulmaktadır.



Şekil 5.10. Önerilen Sistemin AAF Kullanımında Farklı Birleştiriciler İçin Performans Grafiği

Şekil 5.11'de önerilen sistemin DAF aktarım stratejisi kullanılması durumunda ERC, ESNRC, FRC ve SNRC birleştiricileri için BER performansı verilmektedir. Grafik incelendiğinde 15 dB SNR değeri için eşit oran birleştiricisinin BER performansı 0,00198 olarak gerçekleşirken, aynı şartlar altında işaret gürültü oranı birleştiricisinin BER performansı 0,00020 olarak gerçekleşmektedir. Yani SNRC birleştiricisi aynı şartlar altında önerilen sistemde kullanılması durumunda daha iyi bir performans

sergilemektedir. Önerilen sistemde DAF aktarım stratejisi ile kullanılması durumunda en kötü birleştirici performansı yine ERC tarafından ortaya konulmaktadır.



Şekil 5.11. Önerilen Sistemin DAF Kullanımında Farklı Birleştiriciler İçin Performans Grafiği

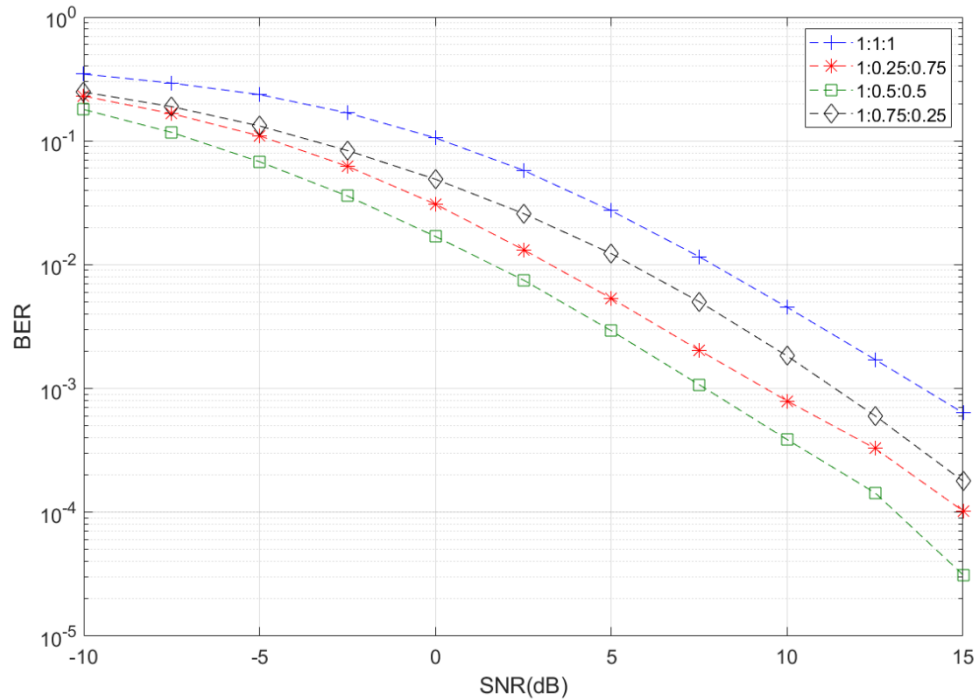
Tablo 5.12. Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	QPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlmeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	DAF
Birleştirme Yöntemleri	ERC, FRC, SNRC ve ESNRC
Dalgacık Filtre	bior1.5

Sonuç olarak önerilen sistem tüm birleştiriciler için ayrı ayrı daha iyi performans sergilemektedir. En iyi performans SNRC ve ESNRC birleştirme metotları ile elde edilmiştir. Bu metotların, birleştirme sürecinde, işaretin SNR değerini bir çarpan olarak kullanıyor olmaları, üçüncü bölümde de ifade edildiği üzere birleştirme işleminin daha doğru olmasını sağlamaktadır.

5.6 Aktarıcı Konumunun Klasik ve Önerilen Sistem Performansına Etkisinin Analizi

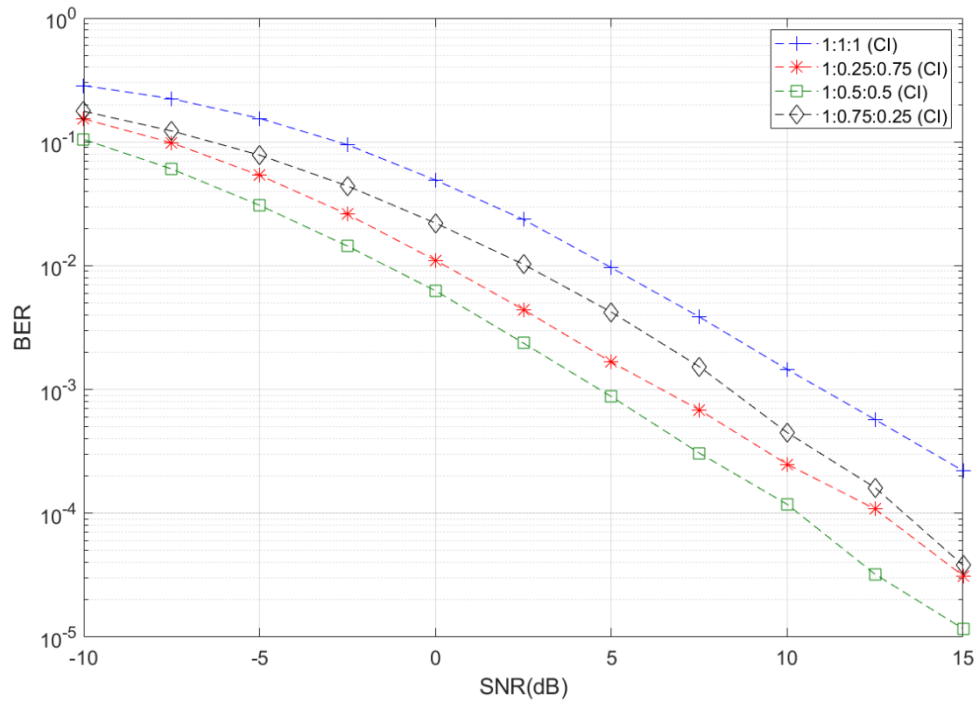
Aktarıcının konumunun hem klasik hem de önerilen sistem performansı üzerine olan etkisi aşağıda sunulan grafikler ile incelenmektedir. Aktarıcının tam ortada olduğu, alıcıya ya da vericiye daha yakın olduğu tüm senaryolar aşağıda hem klasik sistem için hem de önerilen sistem için ayrı ayrı incelenmiştir. Benzetim çalışması esnasında kullanılan tüm parametreler Tablo 5.14’te verilmektedir.



Şekil 5.12. Aktarıcının Konumunun Klasik Bir İşbirlikli Ağda Sistem Performansı Üzerindeki Etkisi

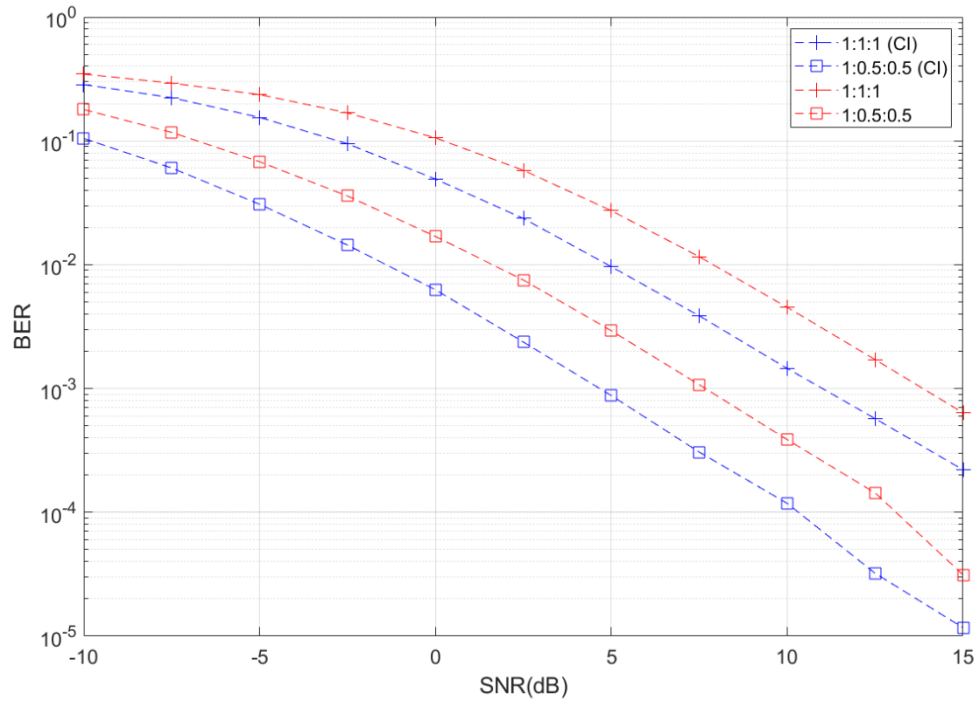
Şekil 5.12’de klasik bir işbirlikli ağda aktarıcı konumunun sistem performansı üzerindeki etkisi BER grafiği olarak gösterilmektedir. Şekil 5.15’te aktarıcının konumunun grafikte nasıl gösterildiği ayrıca açıklanmaktadır. Şekil 5.12’deki grafik dikkatle incelendiğinde

10 dB SNR için verici, alıcı ve aktarıcının birbirine eşit mesafede olduğu durumda (mavi çizgi) BER değeri 0,00452 olarak gerçekleşmektedir. Aynı şartlar altında aktarıcının alıcı ile vericinin tam orta noktasında yer aldığı durumda (yeşil çizgi) BER değeri 0,00038 olarak gerçekleşmektedir. Bu sayısal sonuçlardan yola çıkarak klasik sistemde en iyi BER performansının aktarıcının alıcı ile vericinin tam orta noktasında konumlanması ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.13. Aktarıcının Konumunun Önerilen Sistem Performansı Üzerindeki Etkisi

Şekil 5.13'te önerilen sistemde aktarıcı konumunun sistem performansı üzerindeki etkisi BER grafiği olarak gösterilmektedir. Şekil 5.13'teki grafik dikkatle incelendiğinde 10 dB SNR için verici, alıcı ve aktarıcının birbirine eşit mesafede olduğu durumda (mavi çizgi) BER değeri 0,00145 olarak gerçekleşmektedir. Aynı şartlar altında aktarıcının alıcı ile vericinin tam orta noktasında yer aldığı durumda (yeşil çizgi) BER değeri 0,00011 olarak gerçekleşmektedir. Bu sayısal sonuçlardan yola çıkarak önerilen sistemde en iyi BER performansının, klasik sistemde olduğu gibi aktarıcının alıcı ile vericinin tam orta noktasında konumlanması ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.14. Aktarıcının Konumunun Sistem Performansı Üzerine Etkisi (Klasik Sistem ile Önerilen Sistemin Kıyaslanması)

Şekil 5.14’te önerilen sistem ve klasik sistemde aktarıcı konumunun sistem performansı üzerindeki etkisi BER grafiği olarak karşılaştırmalı bir şekilde gösterilmektedir. Benzetim çalışmaları neticesinde elde edilen sayısal veriler Tablo 5.13’te verilmektedir.

Şekil 5.14’teki grafik dikkatle incelendiğinde; önerilen sistemin 10 dB SNR değeri için verici, alıcı ve aktarıcının birbirine eşit mesafede olduğu durumda BER değeri 0,00145 olarak gerçekleşmektedir. Aynı şartlar altında klasik sistemin yine verici, alıcı ve aktarıcının birbirine eşit mesafede olduğu durumda BER değeri 0,00452 olarak gerçekleşmektedir.

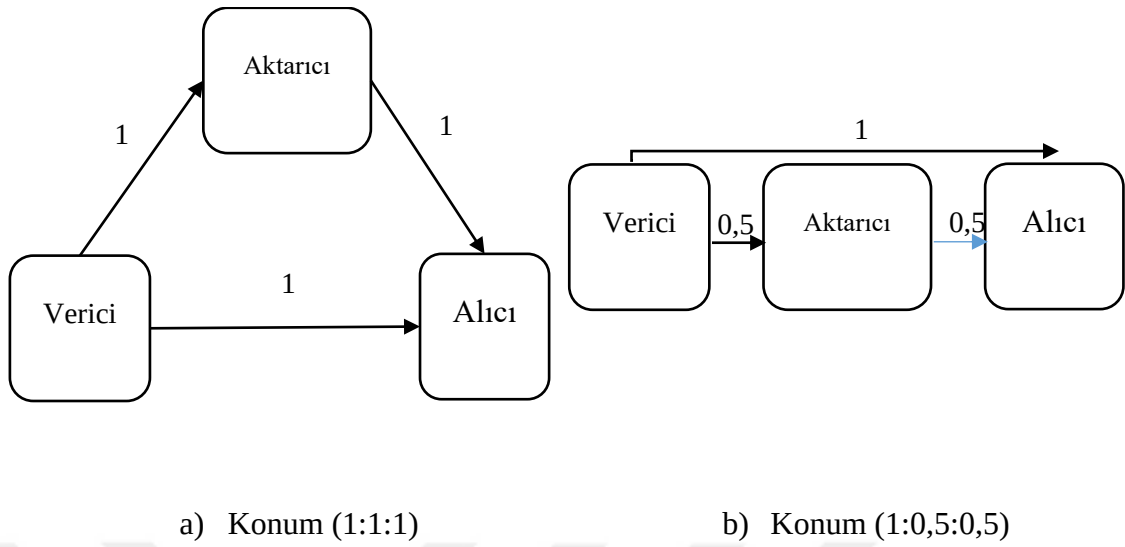
Bu sonuçlar göstermektedir ki önerilen sistem alıcı ve verici arasındaki konum ne olursa olsun karşılaştırmalı olarak klasik sistemden daha üstün bir performans sergilemektedir. Sistem, en iyi performansı aktarıcının, alıcı ile vericinin tam orta noktasına konumlanmasıyla sergilemektedir. Aktarıcı vericiden uzaklaştıkça sistemin performansı da düşmektedir.

Tablo 5.13. Aktarıcının Konumunun Sistem Performansı Üzerine Etkisi BER Verileri

	BİT HATA OLASILIĞI (ÖNERİLEN SİSTEM)		BİT HATA OLASILIĞI (KLASİK SİSTEM)	
SNR (dB)	1,1,1	1,0.5,0.5	1,1,1	1,0.5,0.5
-10	0,28496	0,10456	0,34621	0,17921
-7,5	0,22334	0,06043	0,29294	0,11708
-5	0,15482	0,03077	0,23637	0,06785
-2,5	0,0948	0,01441	0,16827	0,03587
0	0,04917	0,00627	0,10561	0,01691
2,5	0,02362	0,00237	0,05792	0,00752
5	0,00964	0,00088	0,02728	0,00293
7,5	0,00386	0,00031	0,0116	0,00107
10	0,00145	0,00012	0,00452	0,00039
12,5	0,00057	3,22E-05	0,00171	0,00014
15	0,00022	1,17E-05	0,00064	3,13E-05

Tablo 5.14. Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	QPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlemeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	DAF
Birleştirme Yöntemleri	SNRC
Dalgacık Filtre	db5
Konum (a:b:c)	a: Verici ile Alıcı Arasındaki Mesafe b: Verici ile Aktarıcılı Arasındaki Mesafe c: Aktarıcılı ile Alıcı Arasındaki Mesafe



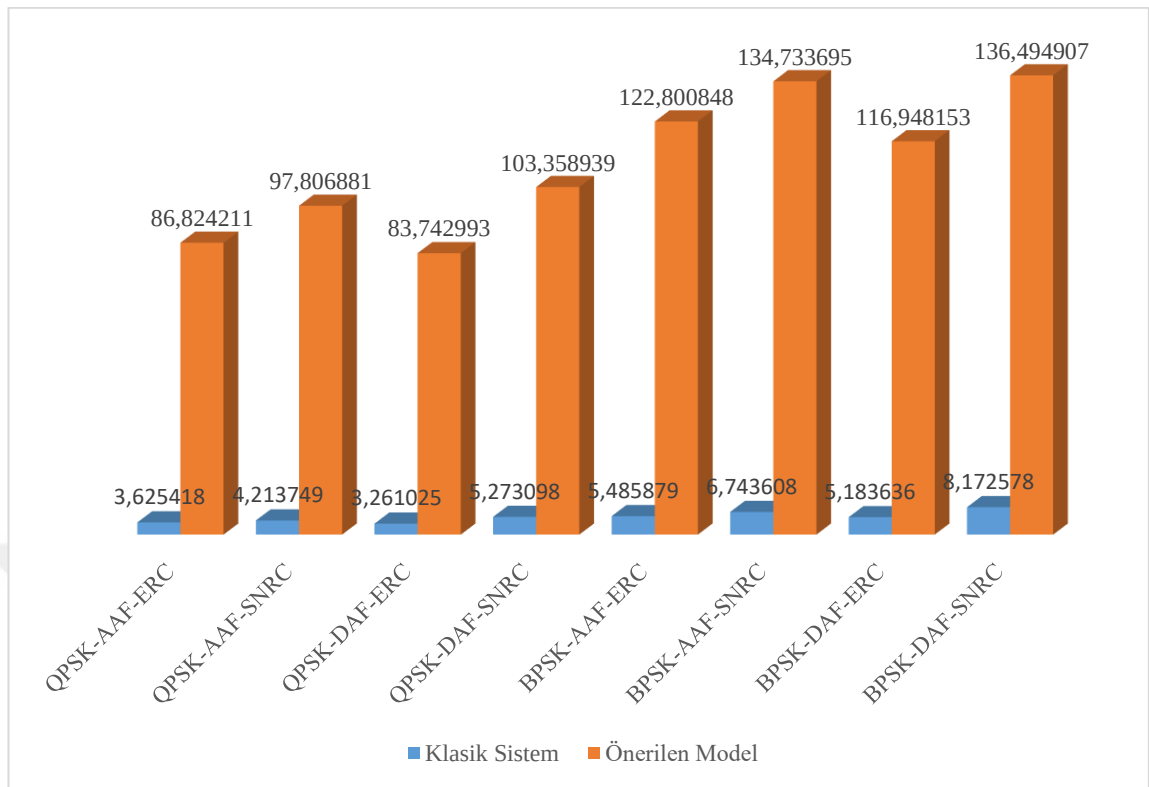
Şekil 5.15. Benzetim Çalışmalarında Kullanılan Aktarıcı Konumu Modeli

Yukarıda yer alan Şekil 5.15-a'da aktarıcının alıcı ve vericiye eşit mesafede olduğu durum gösterilmektedir, Şekil 5.15-b'de ise aktarıcının alıcı ile vericinin tam orta noktasında yer aldığı durum gösterilmektedir. Benzetim çalışmaları esnasında bu modeller kullanılmıştır.

5.7 İşlemsel Karmaşıklık Analizi

Önerilen sistemin oluşturduğu sistem yükünün anlaşılabilmesi için aşağıdaki gibi işlemsel yük analizi yapılmıştır. Dalgacık dönüşümlerinin işlemsel yük oluşturacağı aşıkardır, aşağıda elde edilen neticeler göstermektedir ki performans kazanımına karşın bir işlemsel yük artışı yani enerji tüketiminde bir artış söz konusudur.

Önerilen sistemin işlemsel karmaşıklık analizi Şekil 5.16'da grafik olarak, Tablo 5.15'te ise sayısal veri olarak sunulmaktadır. Veriler klasik sistem ile kıyaslanarak saniye biriminde işlem süresi temel alınarak gösterilmektedir. Eşit şartlar altında farklı aktarım ve birleştirme metotları için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Önerilen sistem, daha önce de ifade edildiği gibi dalgacık dönüşümleri içerdiği için klasik sistemden daha karmaşık bir sistemdir. Bunun doğal bir sonucu olarak işlemsel karmaşıklık açısından önerilen sistem daha düşük performans sergilemektedir. Bu durum yüksek enerji tüketimi ve ebat olarak daha büyük cihazlara gereksinim duyulmasına yol açacaktır. Önerilen modelin döngüsünü tamamlaması klasik modele göre yaklaşık 21 kat daha fazla süre gerektirmektedir.



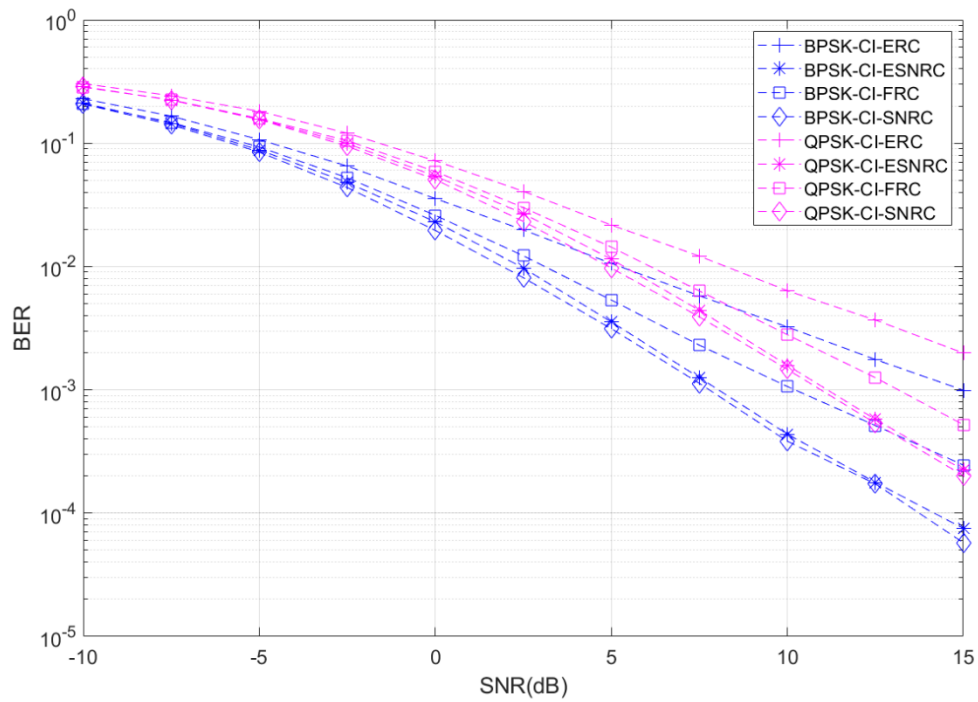
Şekil 5.16. Önerilen Sistemin İşlemsel Karmaşıklık Analizi (Saniye)

Tablo 5.15. İşlemsel Karmaşıklık Sonuçları

Parametreler	Klasik Sistem	Önerilen Model
QPSK-AAF-ERC	3,625418	86,824211
QPSK-AAF-SNRC	4,213749	97,806881
QPSK-DAF-ERC	3,261025	83,742993
QPSK-DAF-SNRC	5,273098	103,358939
BPSK-AAF-ERC	5,485879	122,800848
BPSK-AAF-SNRC	6,743608	134,733695
BPSK-DAF-ERC	5,183636	116,948153
BPSK-DAF-SNRC	8,172578	136,494907
Ortalama (sn)	5,25	110,34

5.8 Farklı Modülasyon Türlerinin Önerilen Sistem Performansı Üzerindeki Etkisinin Analizi

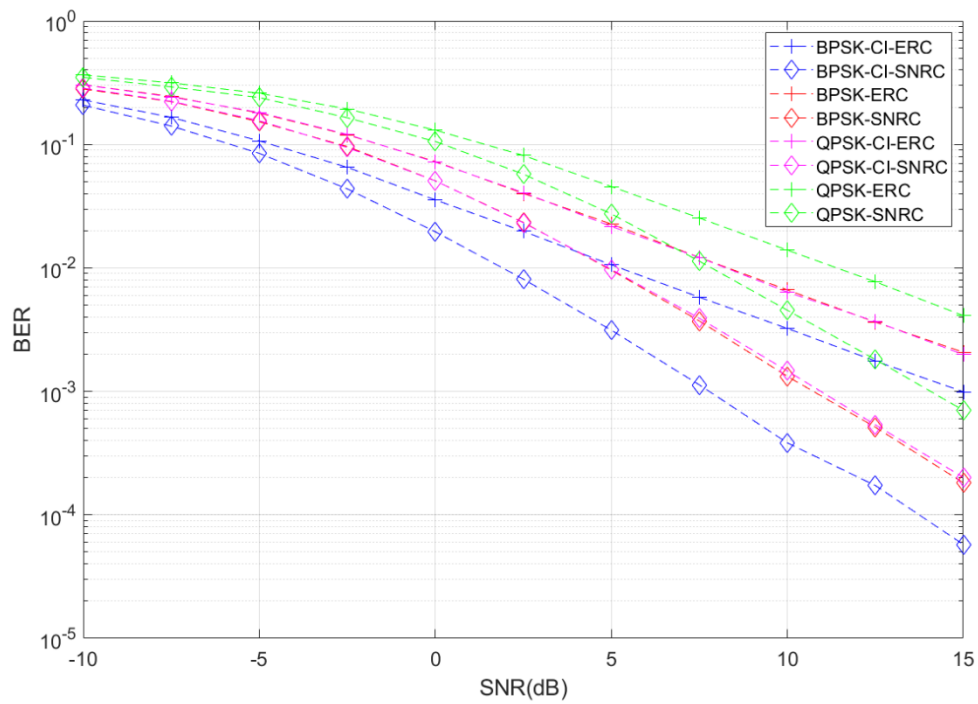
Önerilen sistemin QPSK ve BPSK modülasyon şemalarındaki performansı bu bölümde incelenmektedir. Önerilen sistem ve klasik sistem bu aşamada aynı modülasyon şemaları ile simülasyona tabi tutulmuştur. Ortaya çıkan neticeler aşağıda yer alan grafiklerde gösterilmektedir.



Şekil 5.17. Önerilen Sistemin BPSK ve QPSK Modülasyonları İçin BER Grafiği

Önerilen sistemin farklı modülasyon türlerindeki performansını analiz etmek için bir dizi benzetim çalışması yapılmıştır. Önerilen sistemin BPSK ve QPSK modülasyon şemalarındaki BER analizi Şekil 5.17’de yer alan grafikte gösterilmektedir. Benzetim çalışmasında kullanılan parametreler Tablo 5.18’de sunulmaktadır. Şekil 5.17’deki grafik incelendiğinde 10 dB SNR değeri için QPSK modülasyonlu eşit oran birleştiricili önerilen sistem modeli 0,00636 BER değeri üretmektedir. Aynı şartlar altında BPSK modülasyonlu sistem ise 0,00323 BER değeri üretmektedir. BPSK modülasyonlu sistemlerin QPSK modülasyonlu sistemlere göre daha başarılı neticeler ürettiği bilinmektedir. Benzetim çalışması neticelerine göre QPSK modülasyonlu sistem, BPSK modülasyonlu sistemden daha kötü bir performans sergilemektedir.

Aşağıda yer alan Şekil 5.18’de ise önerilen sistemin modülasyon şeması performans analizi klasik sistem ile kıyaslanarak analiz edilmiştir. Benzetim çalışması neticesinde elde edilen veriler ise Tablo 5.17 ve Tablo 5.18’de sunulmaktadır. SNR değerinin 5 dB olduğu durumda, QPSK modülasyonlu, ERC birleştiricili klasik sistem 0,04558 BER değerine sahip olmaktadır. Aynı şartlar altında önerilen sistem ise 0,02168 BER değeri üretmektedir. Benzetim sonuçları göstermektedir ki modülasyon şeması ne olursa olsun önerilen sistem klasik sistemden daha yüksek bir BER performansı sergilemektedir.



Şekil 5.18. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin BPSK ve QPSK Modülasyonları İçin BER Grafiği

Tablo 5.16. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin QPSK Modülasyonu İçin BER Verileri

SNR (dB)	BİT HATA OLASILIĞI (ÖNERİLEN SİSTEM) (QPSK)		BİT HATA OLASILIĞI (KLASİK SİSTEM) (QPSK)	
	ERC	SNRC	ERC	SNRC
-10	0,30365	0,28549	0,36534	0,3486
-7,5	0,24228	0,22334	0,31494	0,29188
-5	0,18139	0,15537	0,25951	0,23959
-2,5	0,12049	0,09437	0,19378	0,16437

0	0,07196	0,05062	0,1304	0,10559
2,5	0,04071	0,02322	0,08145	0,05744
5	0,02168	0,00972	0,04558	0,02739
7,5	0,01214	0,00391	0,02535	0,01133
10	0,00637	0,00146	0,01392	0,00454
12,5	0,00368	0,00054	0,00772	0,00181
15	0,00199	0,0002	0,0041	0,0007

Tablo 5.17. Önerilen Sistem ile Klasik Sistemin BPSK Modülasyonu İçin BER Verileri

SNR (dB)	BİT HATA OLASILIĞI (ÖNERİLEN SİSTEM) (BPSK)		BİT HATA OLASILIĞI (KLASİK SİSTEM) (BPSK)	
	ERC	SNRC	ERC	SNRC
-10	0,22924	0,20752	0,30392	0,2808
-7,5	0,16557	0,14086	0,24485	0,22201
-5	0,10676	0,08463	0,17951	0,15254
-2,5	0,06523	0,04363	0,11959	0,09614
0	0,03551	0,01963	0,07269	0,05068
2,5	0,01979	0,00811	0,04008	0,02336
5	0,01059	0,00313	0,02268	0,00959
7,5	0,00579	0,00113	0,01215	0,00371
10	0,00323	0,00038	0,00663	0,00132
12,5	0,00176	0,00017	0,00364	0,00051
15	0,00099	5,76E-05	0,00208	0,00018

Tablo 5.18. Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	QPSK ve BPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlmeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	DAF
Birleştirme Yöntemleri	ERC, FRC, SNRC, ESNRC
Dalgacık Filtre	haar

Önerilen sistem klasik sisteme göre her iki modülasyon türünde de daha iyi performans sergilemiştir. En iyi performans BPSK modülasyonlu önerilen sistem ile temin edilmiştir.

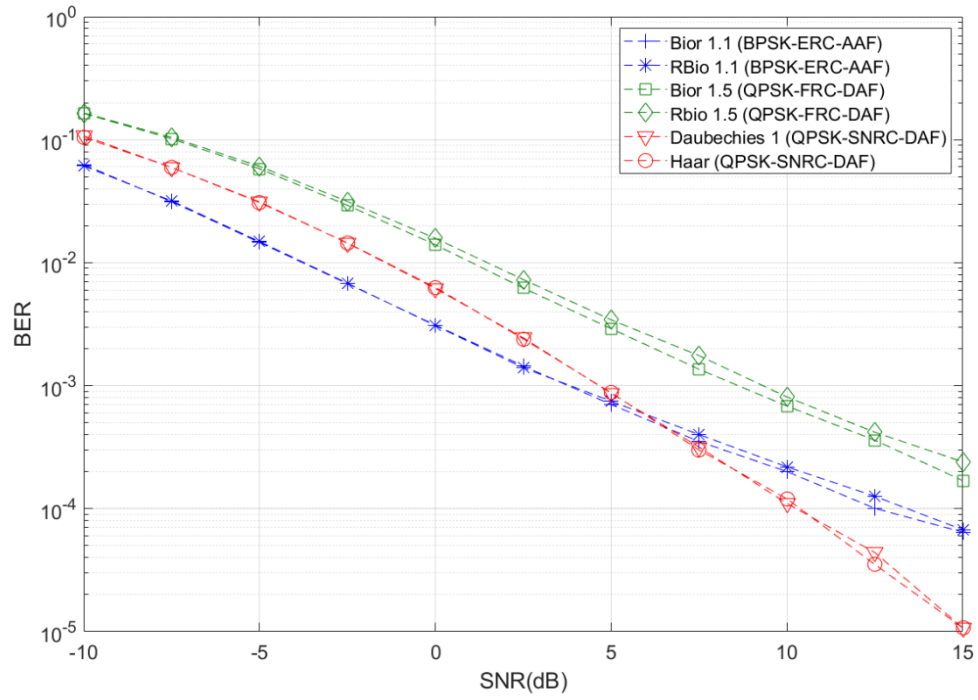
5.9 Farklı Dalgacık Filtrelerinin Önerilen Sistem Performansı Üzerindeki Etkisinin Analizi

Bu bölümde önerilen sistemin farklı dalgacık filtreleri açısından performansı ele alınmaktadır. Dalgacık dönüşümlerinde sıklıkla kullanılan filtreler bu bölümde ayrı ayrı benzetim çalışması kapsamında ele alınmıştır.

Tablo 5.19 . Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	QPSK ve BPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlmeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	DAF
Birleştirme Yöntemleri	ERC
Dalgacık Filtreleri	db5, rbio3.1, bior3.1, dmey, haar, sym3, bior1.1, rbio1.1, db1

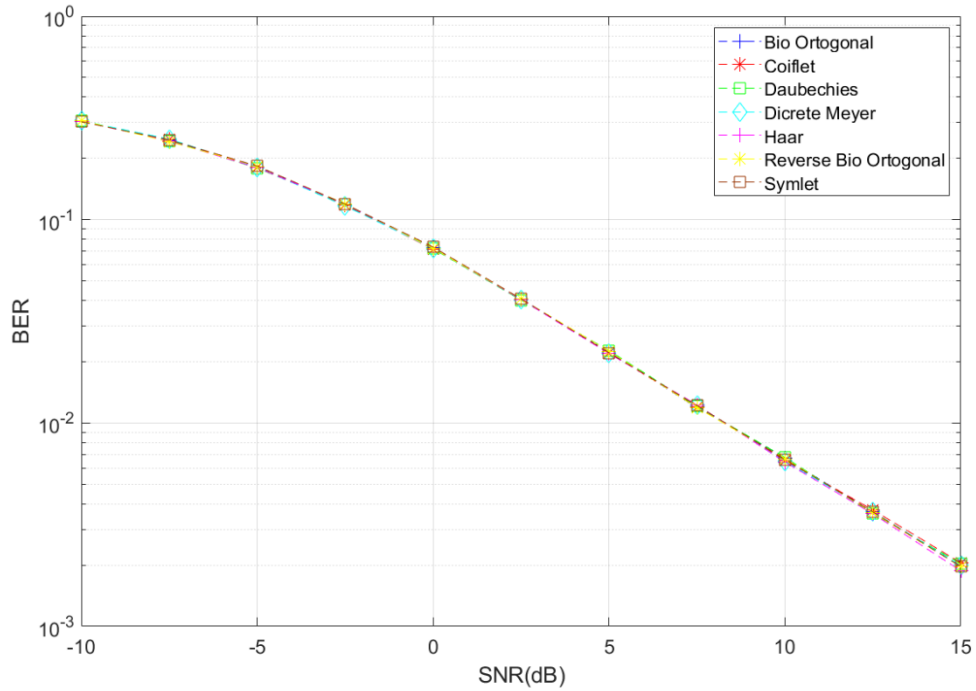
Benzetim çalışmaları kapsamında kullanılan parametreler Tablo 5.19’da verilmektedir. Şekil 5.19’da ise farklı modülasyon türleri, birleştirici ve aktarma stratejileri kullanılarak farklı dalgacık filtreleri için BER performans analizi gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucu elde edilen veriler ise Tablo 5.20’de sunulmaktadır. Şekil 5.19’daki BER grafiği dikkatle incelendiğinde, SNR değerinin 7.5 dB olarak seçilmesi durumunda BPSK modülasyonlu ERC birleştiricili ve AAF aktarma stratejili sistemi bior1.1 filtresi 0,00035 BER değeri oluşturmaktadır. Aynı şartlar altında rbio1.1 filtresi ile 0,00040 BER değeri oluşturmaktadır. İki değer kıyaslandığında birbirlerine oldukça yakın oldukları görülmektedir. Bu durum dalgacık filtrelerinin önerilen sistemin BER performansı üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olmadıklarını göstermektedir.



Şekil 5.19. Önerilen Sistemin Farklı Dalgacık Filtreleri BER Grafiği

Tablo 5.20. Önerilen Sistemin Farklı Dalgacık Filtreleri İçin BER Verileri

SNR (dB)	BİT HATA OLASILIĞI					
	Bior 1,1	Rbio 1,1	Bior 1,5	Rbio 1,5	Daubechies 1	Haar
-10	0,06277	0,06118	0,16346	0,16479	0,10762	0,10444
-7,5	0,03133	0,03182	0,10168	0,10460	0,05945	0,05949
-5	0,01460	0,01487	0,05800	0,06079	0,03122	0,03083
-2,5	0,00675	0,00681	0,02927	0,03144	0,01442	0,01447
0	0,00311	0,00308	0,01399	0,01579	0,00617	0,00629
2,5	0,00145	0,00140	0,00622	0,00729	0,00245	0,00240
5	0,00070	0,00075	0,00291	0,00343	0,00087	0,00088
7,5	0,00035	0,00040	0,00136	0,00175	0,00032	0,00030
10	0,00020	0,00022	0,00068	0,00081	0,00011	0,00012
12,5	0,00010	0,00013	0,00036	0,00042	0,00004	0,00004
15	0,00006	0,00007	0,00017	0,00024	0,00001	0,00001

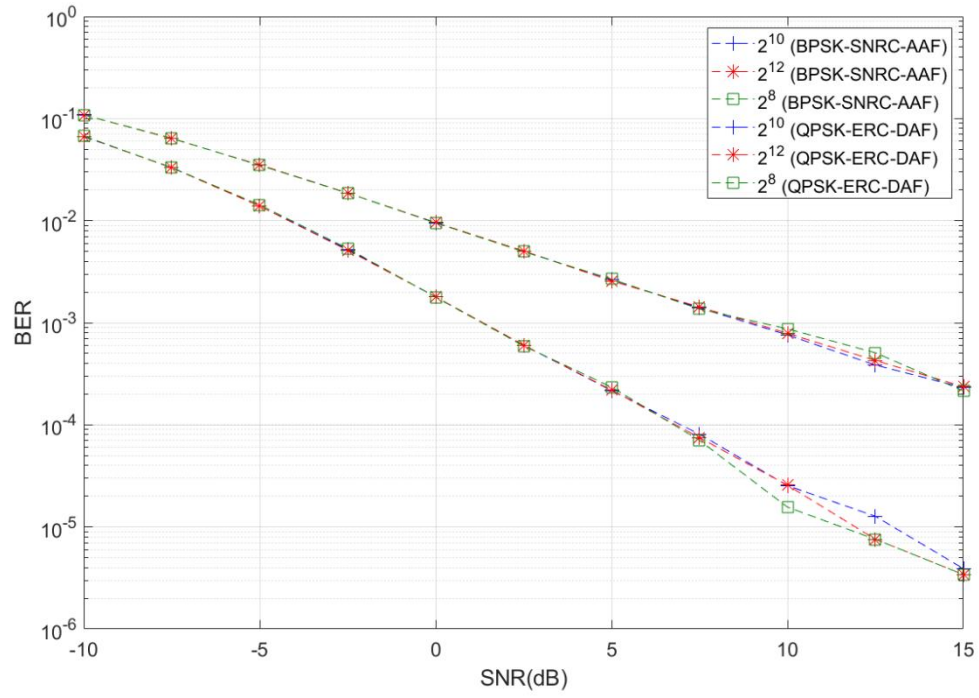


Şekil 5.20. Önerilen Sistemin Farklı Dalgacık Filtreleri İçin BER Grafiği

Şekil 5.20’de önerilen sistemin aynı modülasyon türü, aynı aktarım stratejisi ve aynı birleştirici için farklı dalgacık filtreleri kullanımı durumunda sergilediği performans incelenmiştir. Grafikten de görüleceği üzere dalgacık filtrelerinin önerilen sistemin BER performansı üzerine etkisi kayda değer seviyede değildir.

5.10 Önerilen Sistemin Farklı Veri Büyüklükleri İçin Performans Analizi

Önerilen sistemin farklı veri büyüklüklerinde sergilediği performans bu bölümde analiz edilmektedir. Benzetim çalışmalarının sonuçları Şekil 5.21’de BER grafiği olarak verilmektedir. Elde edilen sayısal veriler ise bir tablo halinde Tablo 5.21’de sunulmaktadır. Benzetim çalışmaları esnasında 2^8 , 2^{10} ve 2^{12} bit büyüklüğünde veri setleri ayrı ayrı kullanılmıştır. Her bir veri seti iki farklı sistemde (BPSK, SNRC, AAF ve QPSK, ERC, DAF) benzetime tabii tutulmuştur. Örneğin SNR’nin 2,5 dB olarak seçildiği durumda BPSK, SNRC, AAF kombinasyonuna sahip sistemin sırayla 2^8 , 2^{10} ve 2^{12} bit büyüklükleri için BER değeri 0,00060, 0,00061 ve 0,00059 olarak gerçekleşmektedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki veri büyüklüğü ile sistem performansı arasında herhangi bir ilişki bulunmamaktadır.



Şekil 5.21. Önerilen Sistemin Farklı Veri Büyüklükleri İçin BER Grafiği

Tablo 5.21. Önerilen Sistemin Farklı Veri Büyüklükleri İçin BER Verileri

SNR (dB)	BİT HATA OLASILIĞI					
	BPSK - SNRC - AAF			QPSK - ERC - DAF		
	2^{10}	2^{12}	2^8	2^{10}	2^{12}	2^8
-10	0,06647	0,06701	0,06738	0,10882	0,10866	0,10869
-7,5	0,03322	0,03294	0,03306	0,06386	0,06367	0,06415
-5	0,01385	0,01386	0,01425	0,03505	0,03521	0,03486
-2,5	0,00522	0,00512	0,00534	0,01864	0,01869	0,01862
0	0,00180	0,00180	0,00178	0,00950	0,00959	0,00953
2,5	0,00060	0,00061	0,00059	0,00501	0,00505	0,00496
5	0,00022	0,00022	0,00023	0,00265	0,00257	0,00268
7,5	0,00008	0,00007	0,00007	0,00140	0,00143	0,00136
10	0,00003	0,00002	0,00002	0,00076	0,00079	0,00087
12,5	0,00001	0,00001	0,00001	0,00038	0,00043	0,00051
15	0,00001	0,00001	0,00002	0,00023	0,00024	0,00021

5.11 Önerilen Sistemin Tepe - Ortalama Güç Oranı (PAPR) Analizi

OFDM sistemlerde iletilen işarete IFFT operasyonu ile çok sayıda alt taşıyıcının sinyale eklenmesinden kaynaklı zaman ekseninde yüksek tepe değerleri görülmektedir. Bu durumdan dolayıdır ki OFDM sistemleri yüksek PAPR problemi sergilemektedirler [31], [44]. OFDM sistemlerin performansı analiz edilirken PAPR değeri çok önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır [31], [42].

Bu çalışmada PAPR analizi, x eksenini dB ve y eksenini tamamlayıcı kümülatif dağılım fonksiyonu (CCDF) kullanılarak gösterilmektedir. İşaretin kümülatif dağılım fonksiyonu şu şekilde yazılabilir [43]:

$$\begin{aligned}
 Prob\{PAPR\{s(n)\} < y^2\} \\
 &= Prob\left\{\frac{|s(0)|^2}{mean|s(n)|^2} < y^2, \frac{|s(1)|^2}{mean|s(n)|^2} \right. \\
 &\quad \left. < y^2, \dots, \frac{|s(N-1)|^2}{mean|s(n)|^2} < y^2\right\} \\
 &= \left(Prob\left\{\frac{|s(n)|^2}{mean|s(n)|^2} < y^2\right\} \right)^N
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

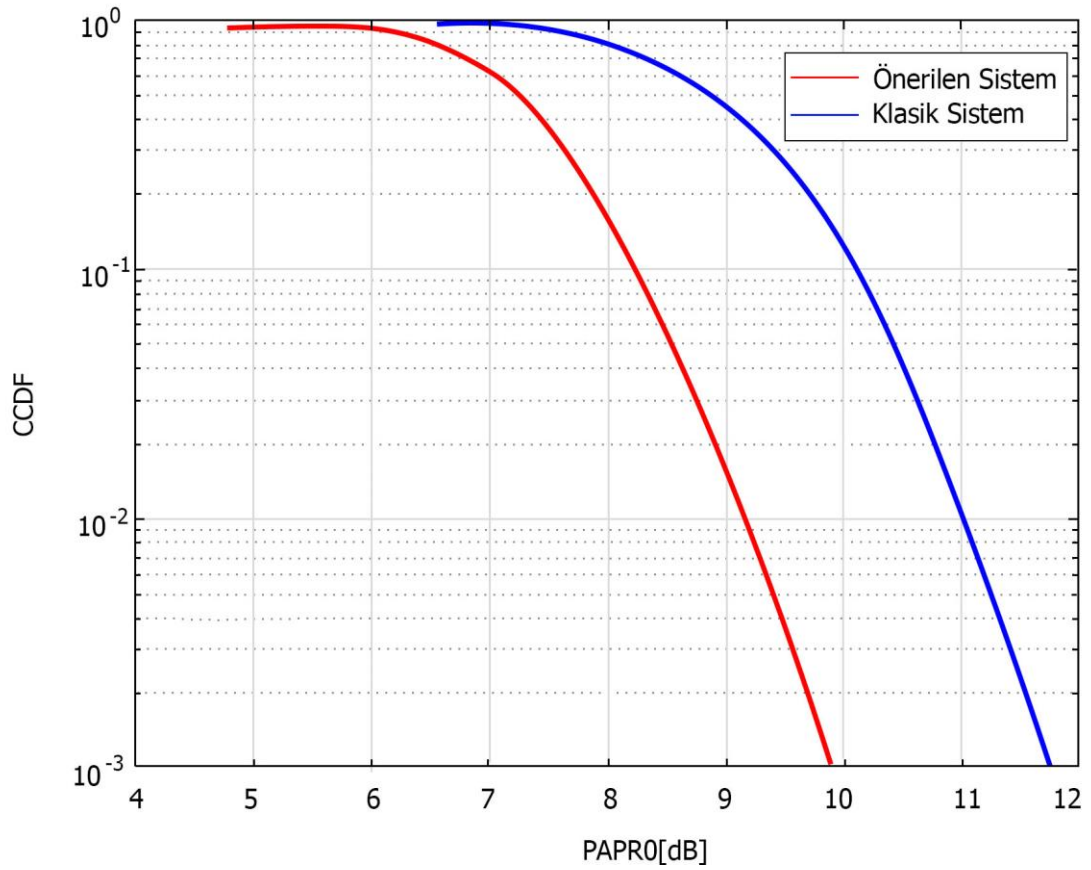
Bu eşitliklerde, N alt taşıyıcı sayısını ve y ise gözlemlenen PAPR seviyesini ifade etmektedir. CCDF ifadesi ise şu şekilde gösterilir:

$$CCDF = 1 - \left(Prob\left\{\frac{|s(n)|^2}{mean|s(n)|^2} < y^2\right\} \right)^N \tag{5.7}$$

Bu çalışma kapsamında önerilmekte olan dalgacık tabanlı taşıyıcı interferometri – OFDM işbirlikli iletişim modeli performansı MatLab ortamında PAPR açısından incelenmiş ve klasik bir işbirlikli sistemin PAPR performansı ile Şekil 5.22’de kıyaslanmıştır. Benzetim çalışmalarında kuvvetlendir ve aktar stratejisi kullanılmıştır. Birleştirme yöntemi olarak ise işaret – gürültü oranı birleştiricisi tercih edilmiştir. Kullanılan parametrelerin tamamı ise Tablo 5.22’de verilmiştir.

Tablo 5.22. Benzetim Çalışması Parametreleri

Modülasyon Tipi	QPSK
Kanal Tipi	Rayleigh Sönümlmeli Kanal
Gönderilen Bit Sayısı	2^{10}
Aktarım Stratejileri	AAF
Birleştirme Yöntemi	SNRC



Şekil 5.22. Önerilen Sistemin PAPR Performansı

Sonuç incelenecek olursa önerilen sistemin PAPR performansı açısından 10^{-3} CCDF değeri için yaklaşık 2 dB daha üstün olacak şekilde, klasik sisteme kıyasla başarılı bir performans sergilediği açıkça görülmektedir.

6. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Tartışma

Kablosuz işbirlikli ağlar özellikle sağladıkları çeşitleme kazancı, güvenli iletişim alt yapısı gibi avantajları sayesinde son zamanlarda dikkatleri üzerine çekmektedir. Kablosuz işbirlikli ağlarda en az bir verici, bir aktarıcı ve bir alıcının bulunması gereklidir. Bu durumda aslında temel bir kablosuz işbirlikli ağda en az üç kanal üzerinden iletişim gerçekleşmektedir. Kablosuz işbirlikli ağlarda çoklu kanallar üzerinden kurulan iletişimin modeli sistemin toplam performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu çalışmada, bu kanallar üzerinden kurulan iletişimin dalgacık dönüşümü tabanlı taşıyıcı interferometri OFDM ile gerçekleşmesi durumunda sistem performansına olan etkisi incelenmiştir. Bu durum ele alınırken yenilik olarak taşıyıcı interferometri yayma yöntemi olan dalgacık dönüşümleri ilk defa bu modelde kullanılmıştır. Modelin gerçek iletişim ortamı ile yakın neticeler üretmesi için kanal modeli olarak Rayleigh tercih edilmiştir.

MatLab ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmaları açık bir biçimde iletişim kalitesinin arttığını göstermiştir. Önerilen sistemin performansı BER ve PAPR analizi ile incelenmiş ve klasik sistem performansları ile kıyaslanmıştır. Farklı birleştiriciler, farklı dalgacık dönüşümleri gibi farklı parametreler kullanılarak sistemin birçok açıdan performansı incelenmiştir. Bununla birlikte aynı sistem üzerinde, aktarıcının konumunun sistem performansına olan etkisi de incelenmiştir. Aktarıcının konumunun işbirlikli ağlarda sistem performansı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Aktarıcının alıcı ve vericiye olan uzaklığı değiştirilerek sistemin performansı ölçülmüş ve kıyaslanmıştır.

6.2 Sonuç ve Öneriler

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda; dalgacık dönüşümleri kullanılarak taşıyıcı interferometri OFDM sistemi bir verici, bir aktarıcı ve bir alıcı içeren işbirlikli ağın tüm kanallarına uygulanmış ve sistemin performansı incelenmiştir.

Benzetim çalışmaları sonucu elde edilen bulgular göstermektedir ki önerilen sistemin performansı mevcut klasik işbirlikli ağın performansından açık şekilde üstün gerçekleşmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılan tüm birleştirme yöntemleri için ayrı ayrı olmak üzere önerilen sistem, klasik sistemden daha üstün BER performansı göstermektedir. İşbirlikli ağlarda sıklıkla kullanılan aktarım stratejileri yine benzetim çalışmalarında ele alınmıştır. Önerilen sistem aktarım stratejilerinin her ikisi (AAF ve DAF) için de daha üstün BER performansı sergilemektedir.

Önerilen sistem, kullanılan tüm aktarma ve birleştirme yöntemlerinde kendi içinde değerlendirilmek kaydı ile üstün performans göstermiştir. Farklı birleştirme ve aktarma metotlarının kombinasyonları için de benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu kombinasyonlar içerisinde en iyi netice DAF ve SNRC yöntemlerinin kombinasyonu ile önerilen sistemin entegrasyonu sonucu elde edilmiştir.

İşbirlikli ağlarda aktarıcının ağdaki fiziki konumunun sistem performansı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında aktarıcının konumunun önerilen sistemin performansı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Önerilen sistemin performansı klasik sistemin performansına kıyasla aktarıcının konumu nasıl olursa olsun daha üstündür. Sistem, en iyi performansı aktarıcının, alıcı ile vericinin tam orta noktasına konumlanmasıyla sergilemektedir. Aktarıcı vericiden uzaklaştıkça sistemin performansı da düşmektedir.

OFDM sistemlerde Fourier dönüşümünün kullanılmasından dolayı yüksek PAPR problemi meydana gelmektedir. Taşıyıcı interferometri yayılımının OFDM sistemlerde PAPR oranını düşürdüğü bilinmektedir. Benzetim çalışmaları kapsamında önerilen sistemin PAPR kazancı açısından performansı da incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre önerilen sistem beklendiği üzere PAPR oranını klasik sisteme kıyasla belirgin bir şekilde düşürmektedir.

Önerilen sistemin iletişim kalitesini artırdığı BER ve PAPR performans artışından anlaşılmaktadır. Ancak elde edilen performans kazanımına karşın işlemsel yükte ciddi bir artış söz konusu olmuştur. Dalgacık dönüşümleri, benzetim çalışmaları esnasında Fourier dönüşümlerine daha fazla işlem yükü oluşturmaktadırlar. Önerilen sistemde dalgacık dönüşümlerinin kullanılıyor olması beklendiği üzere işlemsel yükü artırmaktadır. Sistem performansında elde edilen nitelikli artışa rağmen işlemsel yükteki ciddi artış aslında sistemin toplam enerji tüketiminin artmasına neden olmaktadır. Fakat günümüzde gittikçe gelişen batarya teknolojileri sayesinde bu konu önemli bir problem olarak görülmeyebilir. Sistemin sağladığı kaliteli iletişime karşılık aşırı enerji tüketimi makul bir takas olarak kabul edilebilir.

Tez çalışması süresince elde edilen ve yukarıda özetlenen bulgular dokuz farklı bilimsel yayın olarak gerek uluslararası hakemli dergilerde gerekse konferans, kongre ve sempozyumlarda yayınlanmıştır.

Daha verimli bir PAPR düşürme elde edilmesi amacıyla yapay arı kolonisi, paralel yapay arı kolonisi, tabu araştırma, paralel tabu araştırma, karınca koloni optimizasyonu ve paralel karınca koloni optimizasyonu algoritmaları gibi zeki optimizasyon tekniklerinden faydalanmak mümkündür. İlerleyen dönemde bu algoritmaların önerilen sistem ile kullanılması planlanmaktadır. Ayrıca önerilen sistemin yeni nesil farklı iletişim sistemlerinde PAPR düşürülmesi amacıyla kullanılması da ayrı bir araştırma konusudur.

İşlemsel karmaşıklığın temel nedeni dalgacık dönüşümlerinin çok sayıda çarpıcı ve toplayıcı içermesi ve bunun sonucunda daha yoğun bir aritmetik karmaşıklık oluşturmaktadır. Aritmetik karmaşıklığın giderilmesi için algoritmaların optimize edilmesi gerekmektedir, ilerleyen dönem de bu husus da bir çalışma sahası oluşturmaktadır. Ayrıca önerilen modelin, gerçek iletişim ortamındaki performansının analizi için pratik uygulamalar gerçekleştirilmesi de planlanmıştır.

KAYNAKÇA

1. Fitzek, F. H., Katz, M. D., 2006. Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications, Chapter 1, Cooperation in Nature and Wireless Communication. Springer, Netherland.
2. Uysal, M., 2010. Cooperative Communications for Improved Wireless Network Transmission: Framework for Virtual Antenna Array Applications, Information Science Reference.
3. Wilkinson, G. 1984. Reciprocal food sharing in the vampire bat. **Nature**, **308**: 181–184. <https://doi.org/10.1038/308181a0>
4. Li, X., Xing C., Wu Y., Chan S. C., 2010. Timing estimation and resynchronization for amplify-and-forward communication systems, **IEEE Transactions on Signal Processing**, **58** (4): 2218-2229. doi: 10.1109/TSP.2009.2039837.
5. Kay, S., M., 1993. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Estimation Theory. Prentice Hall, Signal Processing Series.
6. Glisic, S., Lorenzo, B., 2009. Advanced Wireless Networks, Cognitive, Cooperative and Opportunistic 4G Technology, John Wiley & Sons Ltd.
7. Sendonaris, A., Erkip E., Aazhang B., 2003. User cooperation diversity. Part II. Implementation aspects and performance analysis, **IEEE Transactions on Communications**, **51** (11): 1939-1948. doi: 10.1109/TCOMM.2003.819238.
8. Laneman, J. N., Tse D. N. C., Wornell G. W., 2004. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior, **IEEE Transactions on Information Theory**, **50** (12): 3062-3080. doi: 10.1109/TIT.2004.838089.
9. Rahimi, R., Shahbazpanahi, S., 2018. Asynchronous two-way MIMO relaying: a multi-relay scenario, **IEEE Transactions on Wireless Communications**, **17** (7): 4270-4287. doi: 10.1109/TWC.2018.2822274.
10. Moulika, V., Shahain, N., J., Bhagyalakshmi, L., 2019. Performance investigation of cooperative diversity techniques for 5G wireless

- networks, 1-5. *2019 IEEE 1st International Conference on Energy, Systems and Information Processing (ICESIP)*, 2019, Chennai, India, IEEE. doi: 10.1109/ICESIP46348.2019.8938347.
11. Bletsas A., Khisti A., Reed D. P., Lippman A., 2006. A simple Cooperative diversity method based on network path selection, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, **24** (3): 659-672. doi: 10.1109/JSAC.2005.862417.
 12. Huang, C., Zhang, X., 2013. Performances of Amplify-and-Forward Cooperative Relay Networks with Different Topologies. **Wireless Personal Communications**, **69**: 561–577. <https://doi.org/10.1007/s11277-012-0590-x>
 13. Meyr, H., Moeneclaey, M., S., Fechtel, A., 1997. Digital Communication Receivers: Synchronization, Channel Estimation, and Signal Processing. Wiley-InterScience, John Wiley & Sons, Inc.
 14. Parker, P. A., Mitran P., Bliss D. W., Tarokh V., 2008. On Bounds and Algorithms for Frequency Synchronization for Collaborative Communication Systems, **IEEE Transactions on Signal Processing**, **56** (8): 3742-3752. doi: 10.1109/TSP.2008.924799.
 15. Li, X., Wu Y., Serpedin, E., 2009. Timing Synchronization in Decode-and-Forward Cooperative Communication Systems, **IEEE Transactions on Signal Processing**, **57** (4): 44-1455. doi: 10.1109/TSP.2008.2011834.
 16. Dang, S., Coon, J. P. Chen, G., 2017. Outage performance of two-hop OFDM systems with spatially random decode-and-forward relays, **IEEE Access**, **5**: 27514-27524. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2773658.
 17. Fitzek, F. H., Katz M. D., 2006. Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications, Chapter 2, Cooperative Communicatios, Fundamental Limits and Practical Implementation, Springer, Netherland.
 18. Uysal, M., 2010. Cooperative Communications For Improved Wireless Network Transmission: Framework For Virtual Antenna Array Applications, New York, Chapter 1: Information Theoretical Limits on Cooperative Communications, Yüksel M., Erkip E., 1-28.
 19. Ray, K. J. L., Sadek A. K., Su W. Kwasinski A., 2008., Cooperative Communications and Networking, Cambridge, pp. 119-150, 2008.

20. Isomaki P., Isoaho J., 2008. On Diversity Combining, TUCS Technical Report, No 884, Nisan 2008.
21. Fitzek, F. H., Katz, M. D., 2006. Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications, Frank H. Fitzek, Marcos D. Katz, Chapter 6, Cooperative Diversity, Models, Algorithms and Architectures, Springer, Netherland, pp. 163-183.
22. Mei, Y., Hua, Y., Swami A., Daneshrad, B., 2005. Combating synchronization errors in cooperative relays, 369 – 372. *IEEE International Conference on Acoustics Proceedings (ICASSP '05)*, 2005., Philadelphia, IEEE. doi: 10.1109/ICASSP.2005.1415723.
23. Bu, X., Liu, C., Yu, Q., Yin, L., Tian, F., 2020. Optimization on cooperative communications based on network coding in multi-hop wireless networks, 384 – 387. *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2020, Limassol, Cyprus. doi: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148060.
24. Laneman, J. N., Wornell, G. W. 2002. Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks, 77 – 81. *Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM '02*. 2002. Taipei, Taiwan, IEEE, , pp. 77-81. doi: 10.1109/GLOCOM.2002.1188045.
25. Djapic R., van der Veen, A., Tong, L., 2005. Synchronization and packet separation in wireless ad hoc networks by known modulus algorithms, **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, **23** (1) : 51 – 64. doi: 10.1109/JSAC.2004.837367.
26. Fang, Y., Noel, A., Yang, N., Eckford, A. W. Kennedy, R. A., 2019. Symbol-by-symbol maximum likelihood detection for cooperative molecular communication, **IEEE Transactions on Communications**, **67** (7): 4885 - 4899, doi: 10.1109/TCOMM.2019.2910265.
27. Panda, M., Mishra, S., 2017. Performance analysis of concomitant synchronization algorithms for OFDM and non-contiguous OFDM systems, 1 – 6. *2nd International Conference on Man and Machine Interfacing (MAMI)*, 2017, Bhubaneswar, IEEE. doi: 10.1109/MAMI.2017.8307879.

28. Kumar, A., Saha, S., Abhiranjan, Bhattacharya, R., 2020. Neural network based joint carrier frequency offset and sampling frequency offset estimation and compensation in mimo ofdm-oqam systems., 1-4. *XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science*, Rome, Italy, IEEE. doi: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232207.
29. Garcia, N., Wymeersch, H., Larsson, E. G., Haimovich, A. M., Coulon, M., Direct localization for massive MIMO, 2017. **IEEE Transactions on Signal Processing**, 65 (10): 2475-2487. doi: 10.1109/TSP.2017.2666779.
30. Heidarpour, A. R., Ardakani, M., Tellambura, C., 2017. Generalized relay selection for network-coded cooperation systems, **IEEE Communications Letters**, 21 (12): 2742-2745. doi: 10.1109/LCOMM.2017.2743175.
31. Arvola, A., Tölli, A. Gesbert, D., 2017. Rate maximization via PAPR reduction in MIMO-OFDM uplink: A user cooperation approach, 1-6, *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, Paris. IEEE. doi: 10.1109/ICC.2017.7997123.
32. Xiong, Y., Wu, N., Shen, Y., Win, M. Z. 2018. Cooperative network synchronization: asymptotic analysis, **IEEE Transactions on Signal Processing**, 66 (3): 757 – 772. doi: 10.1109/TSP.2017.2759098.
33. Chalapathi, G. S. S., Etzlinger, B., Gurunarayanan, S., Springer, A., 2019. Integrated cooperative synchronization for wireless sensor networks, **IEEE Wireless Communications Letters**, 8 (3): 701-704. doi: 10.1109/LWC.2018.2885471.
34. Gao, J., Zhang, Y., Liu, Y., 2018. A novel diversity receiver design for cooperative transmission system, **IEEE Access**, 6: 27176-27182. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2832189.
35. Heidarpour, A. R., Ardakani, M. Tellambura, C., 2019. Multiuser diversity in network-coded cooperation: outage and diversity analysis, **IEEE Communications Letters**, 23 (3): 550-553. doi: 10.1109/LCOMM.2019.2895631.

36. Heidarpour, A. R., Ardakani, M., Tellambura, C., Di Renzo, M., 2019. Relay selection in network-coded cooperative MIMO systems, **IEEE Transactions on Communications**, 67 (8): 5346-5361. doi: 10.1109/TCOMM.2019.2911276.
37. Rappaport, T. S., 1996. Wireless Communications, Principles and Practice, Prentice Hall.
38. Wang, Z., Dang, S., Kennedy D. T, 2018. Multi-Hop index modulation-aided OFDM with decode-and-forward relaying, **IEEE Access**, 6: 26457-26468. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2836186.
39. Uysal, M., 2010. Cooperative Communications For Improved Wireless Network Transmission: Framework For Virtual Antenna Array Applications, Murat Uysal, New York, Chapter 2: Overview of Amplify-and-Forward Relaying, Ioannis Krikidis, John S. Thompson pp. 29-61.
40. Meier, A., 2004. Cooperative Diversity in Wireless Networks, Edinburgh University, Yüksek Lisans Tezi, Birleşik Krallık.
41. Loyka, S., 2013. Wireless Communications Fundamentals, Lecture 11.
42. Natarajan, B., 2002. Carrier Interferometry For Next Generation CDMA and TDMA Wireless Systems: A Multicarrier Framework, Doktora Tezi, Colorado State University.
43. Anwar, K., 2005. Peak-to-Average Power Ratio Reduction of OFDM Signals Using Carrier Interferometry Codes and Iterative Processing, Yüksek Lisans Tezi, Nara Institute of Science and Technology.
44. Wiegandt, D., 2003. Spread OFDM Via Carrier Interferometry Spreading Codes: Performance, Throughput and PAPR Enhancement, Doktora Tezi, Colorado State University.
45. Hasan, S., 2003. Performance Evaluation of Synchronous MC-CDMA In Fading Channel Incorporating Carrier Interferometry Codes, Yüksek Lisans Tezi, The University of Texas at El Paso.
46. Anwar, K., Yamamoto, H., 2006. A new design of carrier interferometry OFDM with FFT as spreading codes, 543 – 546. *IEEE Radio and Wireless Symposium*, 2006, San Diego, IEEE. doi: 10.1109/RWS.2006.1615214.

47. Yazlık, B., 2008. Dalgacık Dönüşümü Kullanılarak Taşıyıcı İnterferometri OFDM Sisteminin Gerçekleştirilmesi ve Bit Hata Oranı Başarımının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Bilgin YAZLIK
 Uyruğu: Türkiye
 Doğum Tarihi ve Yeri: 9 Haziran 1983, Van
 Medeni Durumu: Evli
 Tel: +90 505 659 17 78
 E-Posta: bilginyazlik@yyu.edu.tr
 Yazışma Adresi: Bardakçı Mah. Ahşap Küme Evler Sokak No: 15 Tuşba/VAN

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Doktora	ERÜ Fen Bilimleri Enstitüsü	2021
Yüksek Lisans	ERÜ Fen Bilimleri Enstitüsü	2008
Lisans	ERÜ Elektrik-Elektronik Müh.	2005
Lise	Atatürk Lisesi, Van	2001

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019- Halen	Van YYÜ / Van Teknokent	Öğretim Görevlisi / Genel Müdür
2005- 2019	Erciyes Üniversitesi / Erciyes Teknopark	Uzman / Genel Müdür

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

1. Teknoparklar ve Mühendislik Fakültelerinin Teknoparklar Üzerindeki Etkileri, II. Ulusal Mühendislik Kongresi, Zonguldak, 11-13 Mayıs 2006, 11 Mayıs 2006
2. Türkiye’de Teknoparklar ve Sorunları, XI. Türkiye’de İnternet Konferansı, 10 Haziran 2006
3. Havacılıkta Nümerik Problem Çözümlemeleri İçin İşlemsel Gridlerin Kullanımı, HaSeM'06 Kayseri VI. Havacılık Sempozyumu 12-14 Mayıs 2006, Nevşehir, 14 Mayıs 2006
4. Kayseri Ekonomisinin Bugünü ve Yarını İçin Ar-Ge'nin Önemi, Ar-Ge Kültürünün Gelişimi İçin Teknoparkların Önemi, Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, 1 Haziran 2014

5. A New Approach to Business Incubation: Sera, 34th Annual World Conference of International Association of Science Parks and Areas of Innovation (IASP), 26-29 September 2017, İstanbul.
6. A New Approaching for Licesing, Technology Transfer Book of Knowledge with Turkish TTO Good Practises, TTA Turkey Project, pp. 105-109, 10 Nov 2017.
7. Bütüncül Koruma ve Tanıtım Çalışmalarında Koramaz Vadisi Örneği, Innovation and Global Issues In Social Sciences, 26 Nisan 2018, Patara, Antalya.
8. Die Untergrund-Christen-Isbidin Kaya Kilisesi, eine stark gefährdete Höhlenkirche in Kappadokien, Mitt. Verb. Dt. Höhlen- u. Karstforscher, pp. 25-29, 2019.
9. Kayseri'nin En Büyük Yer Altı Şehri Aymanlı'nın Keşif Hikayesi, Şehir Kültür Sanat 30. Sayı Sayfa: 32-39, Kayseri Büyükşehir Belediyesi, Eylül 2019.
10. Koramaz Vadisi Columbarium Mezarları, Turkish Studies International Academic Journals Historical Analysis, Volume 14 Issue 3, 2019, p. 669-733, DOI: 10.29228/TurkishStudies.30269, 30.09.2019.
11. Koramaz Vadisi'ndeki Son Turanlı, Son Dimitreli Hüseyin Emmi, Şaban Aksoy, Kitap Bölümü, ISBN: 978-605-68246-1-6, Temmuz 2020.

SCOPUS INDEKSLERİNE GİREN DERGİLERDE YAYINLAR

1. Ciflikli, C., Yazlık, B., 2019. On the effect of relay position in carrier interferometry OFDM for cooperative diversity by wavelet transform, **Universal Journal of Mechanical Engineering**, 7 (4): 240 - 246. doi: 10.13189/ujme.2019.070413

ULUSLARARASI HAKEMLİ DERGİLERDE YAYINLAR

1. Ciflikli, C., Yazlık, B., 2017. On the performance of carrier interferometry OFDM by wavelet transform, **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, 04 (11): 480 - 484.
2. Ciflikli, C., Yazlık, B., 2018. Kablosuz işbirlikli ağlarda farklı birleştirme tekniklerinin performans üzerindeki etkisinin incelenmesi, **Journal of New Results in Engineering and Natural Science**. 8: 137 - 147 . <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jrens/issue/49735/637753>

SCI İNDEKSLİ KONFERANS YAYINLARI

1. Çiflikli, C., Yazlık, B., 2015. Realization of carrier interferometry OFDM systems by wavelet transform, *2015 International Conference On Applied Mechanics And Mechatronics Engineering (AMME 2015)*, 456 – 463, 2015, Bangkok, Thailand.

SCOPUS İNDEKSLİ KONFERANS YAYINLARI

1. Ciflikli, C., Yazlık, B., 2020. Realization of carrier interferometry OFDM for cooperative diversity by wavelet transform, *2020 2nd International Conference on Information Technology and Computer Communications (ITCC 2020)* 50–54. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, doi: 10.1145/3417473.3417482 12-14.
2. Ciflikli, C., Yazlık, B., 2020. PAPR performance of CI OFDM by Wavelet Transform in cooperative relay networks, *Journal of Physics: Conference Series, Volume 1710, The 2nd International Conference on Electronics Communication Technologies (ICECT) 2020*, 9-11 October 2020, Thessaloniki, Greece. doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1710/1/012002>

DİĞER ULUSLARASI KATILIM KONFERANS BİLDİRİLERİ

1. Ciflikli, C., Yazlık, B., 2013. İşbirlikli kablosuz ağlarda senkronizasyon, V. *Communication Technologies National Symposium*, 16 Mayıs 2013, Türkiye.
2. Ciflikli, C., Yazlık, B., 2017. Kablosuz işbirlikli ağlarda farklı birleştirme metotlarının sistem performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi, *International Symposium on Multidisciplinary Studies on Innovative Technologies (ISMSIT 2017)*, 2-4 November 2017, Tokat.
3. Ciflikli, C., Yazlık, B., 2019. Kablosuz İşbirlikli Ağlarda Aktarım Stratejilerinin Sistem Performansı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, 2. *Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, 256-266, 27-29 Eylül 2019.