



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzey Destekli Masif
Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemlerin Milimetre Dalga
Bandında Performans Analizi**

Yüksek Lisans Tezi

Beyza Önal

Temmuz 2023



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzey Destekli Masif
Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemlerin Milimetre Dalga
Bandında Performans Analizi**

Yüksek Lisans Tezi

Beyza Önal

Danışman

Prof. Dr. Nihat Kabaoğlu

Temmuz 2023

TEZ JÜRİSİ ONAYI

Beyza Önal tarafından hazırlanan "Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzey Destekli Masif Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemlerin Milimetre Dalga Bandında Performans Analizi" başlıklı bu Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmış ve jürimiz tarafından kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Nihat Kabaoğlu
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Üyeler:

Prof. Dr. Hacı İlhan
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdoğan Aydın
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 5/ Temmuz / 2023

BEYANLAR

Yazım ve Kaynak Gösterme Kılavuzu Beyanı

Danışmanlığımda yazılan bu tezin APA yazım ve kaynak gösterme kılavuzunda belirtilen kurallara uygun olarak yapılandırıldığı ve bu kılavuzun metin içi kaynak gösterme standartlarının bu tezde tutarlı olarak uygulandığı tarafımdan incelenerek teyit edilmiştir.

İmza

Prof. Dr. Nihat Kabaoğlu

Etik İlkeler Sadakat Beyanı

Hazırladığım bu tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığımı ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

İmza

Beyza Önal

ÖZET

Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzey Destekli Masif Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemlerin Milimetre Dalga Bandında Performans Analizi

Önal, Beyza

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nihat Kabaoğlu

Temmuz 2023

İletişim teknolojilerindeki muazzam gelişmeler, yeni nesil iletişim sistemlerinin hız, güvenilirlik, maliyet, enerji tüketimi, spektral verimlilik ve sürdürülebilirlik gibi özellikler açısından en uygun şekilde tasarlanmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, milimetre dalga (mmDalga) masif çok-girişli çok-çıkışlı (ÇGÇÇ) sistemler umut verici alternatif bir teknik olmuştur. Ayrıca, bu sistemlere hibrit huzmeleme (HH) tekniğinin uygulanmasıyla sistemdeki yüksek güç tüketimi ve donanım maliyeti azaltılmıştır. Diğer yandan, HH'nin tamamen sayısal olana kıyasla yaşattığı performans kaybını telafi etmek ve donanım maliyetini daha da azaltmak için indis modülasyonu kullanılmıştır. Bunlarla birlikte, mmDalga bandında yüksek yol kaybından kaynaklanan performans kaybı hala büyük bir pratik sorun olmaya devam etmektedir. Yeni nesil ağların kilit teknolojisi haline gelen yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzey (YYAY) teknolojisi, telsiz haberleşme kanalının sönmüleme etkisini azaltmada etkin bir rol oynadığından bu performans kaybını iyileştirmek için cazip bir çözüm olarak görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, aşağı bağlantı mmDalga iletişimi için çok kullanıcı masif ÇGÇÇ sistemlere çoklu YYAY şemasının entegre edildiği yeni bir sistem modeli tanıtılmıştır. Çoklu-YYAY-HH olarak adlandırılan bu sistemde, doğrudan iletişime yardımcı olmak için baz istasyonu ve gezgin istasyonlar arasına birden fazla YYAY yerleştirilmiştir. Yansıtılan sinyal, YYAY aracılığıyla, alıcıya doğrudan ulaşan sinyalin fazına hizalanmakta ve böylece alıcıdaki sinyal gücünde artış gerçekleşmektedir. Sistemin spektral verimliliğini artırmak için veri sembolü, anten indisi ve YYAY indisi bilgilerinin birlikte taşınmasına olanak veren uzaysal modülasyon tekniğinden yararlanılmıştır. Sonuç olarak, çoklu anten dizilerinden ve çoklu YYAY'lerden yalnızca biri aktif olduğu için, antenler ve YYAY'ler arasında eş zamanlama ihtiyacı ortadan kalkmakta ve kullanıcılar arası girişim büyük ölçüde önlenmektedir. Böylece, yüksek bit hata oranı performansı, yüksek veri hızı ve yüksek spektral verimlilik elde edilebilmektedir. Önerilen sistemin ön kodlayıcı, huzme yapılandırıcı ve birleştirici tasarımına ek olarak teorik bit hata oranı ve ulaşılabilir hız ifadeleri elde edilmiştir. Ayrıca, ulaşılabilir hız için bir üst sınır türetilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen sistem modelinin performansının, performans metriklerinin teorik sınırlarına yakın olduğunu ve indis

modülasyonuna dayalı benzer bir modele göre üstünlüğünü açıkça göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Milimetre dalga, masif çok-girişli çok-çıkışlı sistemler, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzey, hibrit huzme yapılandırma, indis modülasyonu.

ABSTRACT

Performance Analysis of Intelligent Reconfigurable Surface Assisted Massive Multi-Input Multi-Output Systems in Millimeter Wave Band

Önal, Beyza

Master's Thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nihat Kabaoğlu

July 2023

The tremendous developments in communication technologies require next generation communication systems to be optimally designed in terms of rate, reliability, cost, energy consumption, spectral efficiency and sustainability. In this context, millimeter-wave (mmWave) massive multi-input multi-output (MIMO) systems have been a promising alternative technique. Moreover, the application of the hybrid beamforming (HB) technique to these systems has reduced the high power consumption and hardware cost. On the other hand, index modulation has been used to compensate for the performance loss of HB compared to the purely digital one and to further reduce the hardware cost. However, the performance loss due to high path loss in the mmWave band is still a major practical problem. Intelligent reconfigurable surface (IRS) technology, which has become a key technology of next generation networks, has been considered as an attractive solution to improve this performance loss since it plays an active role in reducing the fading effect of the radio communication channel.

In this thesis, a new system model for downlink mmWave communication is introduced in which a multi IRS scheme is integrated into multi-user massive MIMO system. In this system, referred as Multi-IRS-HB, multiple IRSs are deployed between the base station and mobile stations to aid direct communication. The reflected signal is aligned to the phase of the signal that reaches the receiver directly through the IRS, thereby increasing the signal strength at the receiver. In order to increase the spectral efficiency of the system, the spatial modulation technique is used, which allows the data symbol, antenna index and IRS index information to be carried together. As a result, since only one of the multiple antenna arrays is active together with only one of the multiple IRSs, the need for synchronization between antennas and IRSs is eliminated and inter-user interference is largely avoided. Thus, high bit error rate performance, high data rate and high spectral efficiency can be achieved. In addition to the precoder, beamformer and combiner design of the proposed system, theoretical bit error rate and achievable rate expressions are obtained. Furthermore, an upper limit for the achievable rate is derived. The simulation results clearly show that the performance of the proposed system model is close to the theoretical bounds of the

performance metrics and is superior to a similar model based on index modulation.

Keywords: Millimeter wave, massive MIMO, reconfigurable intelligent surface, hybrid beamforming, index modulation.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak bana yol gösteren, bilimsel çalışmalarla birlikte manevi anlamda kattığı değerlerle de farklı bakış açısı kazandıran değerli tez danışmanım, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Nihat KABAOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca beni her zaman destekleyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Beyza ÖNAL

Temmuz 2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	ii
ABSTRACT.....	iv
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvi
TABLO LİSTESİ.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti	1
1.2. Tezin Amacı	7
1.3. Tezin Literatüre Katkıları.....	8
1.4. Tezin Genel Akışı.....	8
2. YENİ NESİL İLETİŞİM SİSTEMLERİ	10
2.1. Gezgin İletişim Sistemlerinin Gelişim Süreci	10
2.2. Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemler	14
2.2.1. Çeşitleme Kavramı.....	15
2.2.2. Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistem Özellikleri.....	17
2.2.3. Tek Kullanıcılı ve Çok Kullanıcılı Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemler.....	20
2.3. Yeni Nesil İletişim Ağları	21
2.3.1. Beşinci Nesil Ağlar	21
2.3.2. Altıncı Nesil ve Ötesi Ağlar.....	24
2.4. Yeni Nesil İletişim Ağ Teknolojileri.....	27
2.4.1. Milimetre Dalga Haberleşmesi	27
2.4.2. Masif Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemler	29
2.4.3. Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzey Teknolojisi	32
3. ANTEN DİZİLERİ VE HUZME YAPILANDIRMA	35
3.1. Düzgün Anten Dizileri	35
3.1.1. Düzgün Doğrusal Dizi	36
3.1.2. Düzgün Düzlemsel Dizi	36
3.1.3. Düzgün Dairesel Dizi.....	37

3.2.	Huzme Yapılandırma	38
3.2.1.	Analog Huzme Yapılandırma	39
3.2.2.	Sayısal Huzme Yapılandırma	39
3.2.3.	Hibrit Huzme Yapılandırma	40
4.	AŞAĞI BAĞLANTI MİLİMETRE DALGA HABERLEŞMESİ İÇİN ÇOKLU YYAY DESTEKLİ ÇOK KULLANICILI MASİF ÇGÇÇ SİSTEMİ.....	42
4.1.	Sistem Modeli	42
4.1.1.	Analog Huzme Yapılandırma, Sayısal Birleştirici ve Sayısal Ön Kodlayıcı Tasarımı	46
4.1.2.	Alıcı Yapısı	47
4.2.	Teorik Performans Analizleri.....	48
4.2.1.	Bit Hata Olasılığı Analizi.....	48
4.2.2.	Ulaşılabilir Hız Analizi	51
4.3.	Benzetim Sonuçları	53
4.3.1.	Yol Kaybının Dikkate Alınmadığı Senaryo İçin Benzetim Sonuçları.....	53
4.3.2.	Yol Kaybının Dikkate Alındığı Senaryo İçin Benzetim Sonuçları.....	59
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	64
	KAYNAKLAR	66
	ÖZGEÇMİŞ	77

KISALTMALAR

1N	Birinci Nesil
2N	İkinci Nesil
3N	Üçüncü Nesil
4N	Dördüncü Nesil
5N	Beşinci Nesil
6N	Altıncı Nesil
7N	Yedinci Nesil
ASD	Analog Sayısal Dönüştürücü
Bİ	Baz İstasyonu
BHO	Bit Hata Oranı
BPSK	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase Shift Keying)
ÇGÇÇ	Çok-Girişli Çok-Çıkışlı
ÇK-ÇGÇÇ	Çok Kullanıcıli Çok-Girişli Çok-Çıkışlı
dB	Desibel
dBi	Desibel İzotropik
DFBÇ	Dikey Frekans Bölmeli Çoğullama
DG	Doğrudan Görüş
DOG	Doğrudan Olmayan Görüş
EBO	En Büyük Olabilirlik Kestirimi
FBÇE	Frekans Bölmeli Çoklu Erişim
Gb/s	Saniyede Gigabit
GHz	Gigahertz
Gİ	Gezgin İstasyon
HH	Hibrit Huzmeleme
Hz	Hertz
İM	İndis Modülasyonu
kb/s	Saniyede Kilobit

KBÇE	Kod Bölmeli Çoklu Erişim
μs	Mikrosaniye
m	Metre
Mb/s	Saniyede Megabit
mmDalga	Milimetre Dalga
ms	Milisaniye
$M - QAM$	M seviyeli Karesel Genlik Modülasyonu ($M -$ ary Quadrature Amplitude Modulation)
OÇYHO	Ortalama Çift Yönlü Hata Olasılığı
QAM	Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
RF	Radyo Frekansı
SAD	Sayısal Analog Dönüştürücü
SGO	Sinyal Gürültü Oranı
Tb/s	Saniyede Terabit
THz	Terahertz
TK-ÇGÇÇ	Tek Kullanıcılı Çok-Girişli Çok-Çıkışlı
UM	Uzaysal Modülasyon
YYAY	Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzey
ZBÇE	Zaman Bölmeli Çoklu Erişim

SİMGELER

f_c	Taşıyıcı frekansı
λ	Dalga boyu
M	Modülasyon derecesi
N_T	Verici anten sayısı
N_R	Alıcı anten sayısı
X	YYAY sayısı
N_S	YYAY'deki yansıtıcı yüzey elemanı sayısı
N_U	DDD sayısı
C	Kullanıcı sayısı
R	Faz kaydırıcının çözünürlük değeri
k	Hedeflenen kullanıcı
b_t	İletilen bit sayısı
η	Kanal kullanımı başına bit (bit per channel use, bpcu)
a_v	Seçilen DDD
a_x	Seçilen YYAY
$\mathbf{a}$	Anten dizilimi (yönlendirme vektörü)
$\mathbf{r}_k$	k 'nci kullanıcıda alınan sinyal
$\mathbf{s}$	Semboller vektörü
$\mathbf{n}_k$	Dairesel simetrik karmaşık Gauss gürültü vektörü
P	Toplam iletim gücü
P_k	k 'nci kullanıcının gücü
$\mathbf{D}_{a_v,k}$	a_v 'inci DDD ile k 'nci kullanıcı arasındaki doğrudan kanal matrisi
$\mathbf{H}_{a_x,k}$	a_x 'inci YYAY ile k 'nci kullanıcı arasındaki kanal matrisi

$\mathbf{G}_{a_v, a_x}$	a_v 'inci DDD ile a_x 'inci YYAY arasındaki kanal matrisi
Θ_{a_x}	a_x 'inci YYAY'nin faz kaydırma matrisi
$\mathbf{f}_{a_v, v}$	a_v 'inci DDD'den v 'inci kullanıcıya olan iletimin analog huzme yapılandırma vektörü
$\mathbf{p}_{a_v, v}$	a_v 'inci DDD'den v 'inci kullanıcıya olan iletimin ön kodlama vektörü
$\mathbf{Y}_{a_v, a_x, k}$	Bİ-Gİ arasındaki toplam birleşik kanal
θ_{n_s}	n_s 'inci YYAY elemanın faz kaz kayması
L_D	Bİ-Gİ arasındaki toplam yol sayısı
L_G	Bİ-YYAY arasındaki toplam yol sayısı
L_H	YYAY-Gİ arasındaki toplam yol sayısı
l_d	Bİ-Gİ arasındaki yollardan biri
l_g	Bİ-YYAY arasındaki yollardan biri
l_h	YYAY-Gİ arasındaki yollardan biri
$\alpha_{a_v, k}^{l_d}$	a_v 'inci DDD ile k 'ıncı kullanıcı arasındaki l_d 'inci yolun karmaşık yol kazancı
$\alpha_{a_v, a_x}^{l_g}$	a_v 'inci DDD ile a_x 'inci YYAY arasındaki l_g 'inci yolun karmaşık yol kazancı
$\alpha_{a_x, k}^{l_h}$	a_x 'inci YYAY ile k 'ıncı kullanıcı arasındaki l_h 'inci yolun karmaşık yol kazancı
ν_{l_d}	l_d yolunun ayrılış açısı
β_{l_g}	l_g yolunun ayrılış açısı
γ_{l_h}	l_h yolunun ayrılış açısı
χ_{l_d}	l_d yolunun varış açısı
λ_{l_g}	l_g yolunun varış açısı

δ_{l_h}	l_h yolunun varış açısı
$\mathbf{a}_{R_{a_v,k}}(\chi_{l_d})$	a_v 'inci DDD ile k 'inci kullanıcı arasındaki l_d 'inci yol için χ_{l_d} açısına göre oluşturulmuş alıcı dizi yanıtı vektörü
$\mathbf{a}_{R_{a_v,a_x}}(\lambda_{l_g})$	a_v 'inci DDD ile a_x 'inci YYAY arasındaki l_g 'inci yol için λ_{l_g} açısına göre oluşturulmuş alıcı dizi yanıtı vektörü
$\mathbf{a}_{R_{a_x,k}}(\delta_{l_h})$	a_x 'inci YYAY ile k 'inci kullanıcı arasındaki l_h 'inci yol için δ_{l_h} açısına göre oluşturulmuş alıcı dizi yanıtı vektörü
$\mathbf{a}_{T_{a_v,k}}(\nu_{l_d})$	a_v 'inci DDD ile k 'inci kullanıcı arasındaki l_d 'inci yol için ν_{l_d} açısına göre oluşturulmuş verici dizi yanıtı vektörü
$\mathbf{a}_{T_{a_v,a_x}}(\beta_{l_g})$	a_v 'inci DDD ile a_x 'inci YYAY arasındaki l_g 'inci yol için β_{l_g} açısına göre oluşturulmuş verici dizi yanıtı vektörü
$\mathbf{a}_{T_{a_x,k}}(\gamma_{l_h})$	a_x 'inci YYAY ile k 'inci kullanıcı arasındaki l_h 'inci yol için γ_{l_h} açısına göre oluşturulmuş alıcı dizi yanıtı vektörü
d_{DDD}	DDD anten elemanları arasındaki uzaklık
$PL_{k_{l_d}}^{BG}$	k 'inci kullanıcı için Bİ-Gİ arasındaki l_d yolunun yol kaybı katsayısı
$PL_{k_{l_g}}^{BY}$	k 'inci kullanıcı için Bİ-YYAY arasındaki l_g yolunun yol kaybı katsayısı
$PL_{k_{l_h}}^{YG}$	k 'inci kullanıcı için YYAY-Gİ arasındaki l_h yolunun yol kaybı katsayısı
$\mathbf{PL}_k^{BG}$	k 'inci kullanıcı için Bİ-Gİ arasındaki tüm yollardan oluşan yol kaybı vektörü
$\mathbf{PL}_k^{BY}$	k 'inci kullanıcı için Bİ-YYAY arasındaki tüm yollardan oluşan yol kaybı vektörü
$\mathbf{PL}_k^{YG}$	k 'inci kullanıcı için YYAY-Gİ arasındaki tüm yollardan oluşan yol kaybı vektörü
$d_{k_{l_d}}$	k 'inci kullanıcı için Bİ-Gİ arasındaki l_d yolunun uzaklığı
$d_{k_{l_g}}$	k 'inci kullanıcı için Bİ-YYAY arasındaki l_g yolunun uzaklığı

d_{k_h}	k 'ıncı kullanıcı için YYAY-Gİ arasındaki l_h yolunun uzaklığı
$\mathbf{d}_k^{BG}$	k 'ıncı kullanıcı için Bİ-Gİ arasındaki tüm yollardan oluşan uzaklık vektörü
$\mathbf{d}_k^{BY}$	k 'ıncı kullanıcı için Bİ-YYAY arasındaki tüm yollardan oluşan uzaklık vektörü
$\mathbf{d}_k^{YG}$	k 'ıncı kullanıcı için YYAY-Gİ arasındaki tüm yollardan oluşan uzaklık vektörü
$\mathbf{f}_t$	Kod sözcüğü vektörü
$\mathbf{F}_T$	Kod çizelgesi matrisi
$\mathbf{F}$	Analog huzme yapılandırma matrisi
$\mathbf{W}_k$	k 'ıncı kullanıcının sayısal birleştiricisi
$\mathbf{Y}_{et}$	Etkin kanal matrisi
$\mathbf{P}$	Ön kodlama vektörü
$\mathcal{E}$	Ortalama güç kısıtlaması
a_k	k 'ıncı kullanıcı için seçilen DDD
x_k	k 'ıncı kullanıcı için seçilen YYAY
s_k	k 'ıncı kullanıcıya iletilen sembol
$\hat{a}_k$	k 'ıncı kullanıcıda kestirilen DDD
$\hat{x}_k$	k 'ıncı kullanıcıda kestirilen YYAY
$\hat{s}_k$	k 'ıncı kullanıcıda kestirilen sembol
s_i	M 'li sembol alfabesinden seçilen i 'inci sembol
$\mathbf{w}_{a,x,k}$	a 'ıncı DDD'den k 'ıncı kullanıcıya x 'inci YYAY aracılığıyla gerçekleşen iletimin sayısal birleştiricisi

y_k	Birleştirme işleminden sonra k 'ıncı kullanıcıda alınan sinyal
R_k	k 'ıncı kullanıcının ulaşılabilir hızı
R_k'	k 'ıncı kullanıcının ulaşılabilir hız üst sınırı
R_{top}	Toplam ulaşılabilir hız
$f_{y_k}(y_k)$	y_k sinyalinin olasılığı
$\mathcal{O}$	İşlemsel karmaşıklık
$\text{Re}\{.\}$	Reel bileşen
$\text{Im}\{.\}$	Sanal bileşen
σ^2	Varyans
μ	Ortalama değer
$E(.)$	Beklenen değer
$ \cdot $	Mutlak değer işleci
$\ \cdot\ $	Norm işleci
$P(a \rightarrow \hat{a})$	a iletildiğinde $\hat{a}$ değerine yanlış karar verme olasılığı
$(.)^T$	Transpoze işleci
$(.)^H$	Eşlenik transpoze işleci
$tr(.)$	Matrisin izi
$(.)^\dagger$	Sözde matris tersi

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Rayleigh sönümlemeli kanalda aynı çeşitlilik derecesinde Alamouti ve MRC şemalarının BPSK için BHO performans eğrilerinin karşılaştırılması.	17
Şekil 2.2 TGTÇ, ÇGTÇ, TGÇÇ ve ÇGÇÇ sistem modelleri.	19
Şekil 2.3 ÇGÇÇ sistemi için UM şeması blok şeması.	20
Şekil 2.4 TK-ÇGÇÇ ve ÇK-ÇGÇÇ sistem modelleri.	20
Şekil 2.5 5N uygulama alanları.	22
Şekil 2.6 5N iletişim ağlarının genel özellikleri ve gereksinimleri.	23
Şekil 2.7 6N ağların temel gereksinimleri, özellikleri ve uygulama alanları.	26
Şekil 2.8 Geleneksel ÇGÇÇ ve masif ÇGÇÇ sistemler.	30
Şekil 2.9 YYAY yapısı.	33
Şekil 3.1 Düzgün anten dizilerinin geometrik yapıları: (a) düzgün doğrusal dizi, (b) düzgün düzlemsel dizi, (c) düzgün dairesel dizi.	36
Şekil 3.2 Tek elemanlı, iki elemanlı ve dört elemanlı huzme yapılandırma.	38
Şekil 3.3 Analog huzme yapılandırma blok şeması.	39
Şekil 3.4 Sayısal huzme yapılandırma blok şeması.	40
Şekil 3.5 Hibrit huzme yapılandırma blok şeması.	41
Şekil 3.6 Hibrit huzme yapılandırmasına sahip mmDalga masif ÇGÇÇ sisteminin blok şeması.	41
Şekil 4.1 Çoklu-YYAY-HH sistem modeli.	43
Şekil 4.2 Çoklu-YYAY-HH, YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin, $K = 2$, $N_R = 1$, $N_U = 4$ ve 4-QAM için BHO performanslarının karşılaştırılması.	54
Şekil 4.3 Çoklu-YYAY-HH sisteminin farklı yol sayıları için BHO performans eğrileri.	55
Şekil 4.4 Çoklu-YYAY-HH sisteminin farklı R değerleri için BHO performans eğrileri.	56
Şekil 4.5 Çoklu-YYAY-HH sisteminin $N_R = 1$ ve $N_U = 4$ iken farklı X ve N_S değerleri için BHO performans eğrileri.	57
Şekil 4.6 Çoklu-YYAY-HH sisteminin $X = 2$ ve $N_S = 32$ iken farklı N_U ve N_R değerlerine bağlı BHO performans eğrileri.	57

Şekil 4.7 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin $K = 2$, $N_T = 16$, $N_R = 1$, $N_U = 4$, $R = 6$ ve 4 – QAM için teorik ve benzetim BHO performanslarının karşılaştırılması.	58
Şekil 4.8 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin $K = 2$, $N_T = 8$, $N_R = 1$, $N_U = 2$, $R = 4$ ve 4 – QAM için toplam ulaşılabilir hız performanslarının karşılaştırılması.	59
Şekil 4.9 Frekans değerine bağlı DG ve DOG yol kaybı performansları.	60
Şekil 4.10 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin dış mekan yol kaybı altında farklı f_c değerleri için BHO performanslarının karşılaştırılması.	61
Şekil 4.11 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin dış mekan yol kaybı altında $f_c = 28\text{GHz}$ 'de teorik ve benzetim BHO performanslarının karşılaştırılması.....	62
Şekil 4.12 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin iç mekan yol kaybı altında farklı f_c değerleri için BHO performanslarının karşılaştırılması.	63

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Nesillere göre telsiz ağların karşılaştırılması.....	14
--	----

1. GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Telsiz iletişim ağları için ilk gelişmeler, 1980'lerde kullanılmaya başlanan birinci nesil (1N) analog teknoloji ile başlamıştır. Ardından, ikinci nesil (2N) sayısal hücreli ağlar ve daha sonra çoklu ortam desteği sağlayan üçüncü nesil (3N) iletişim ağları geliştirilmiştir (Anju & Gawas, 2015). 2009'da hayatımıza giren dördüncü nesil (4N) hücreli ağların temel amacı, kullanıcılara yüksek hız ve yüksek kapasitede iletim sağlamak ile birlikte kaynak maliyetini azaltmak ve güvenilirliği artırmaktır (Agrawal et al., 2015; Prinima & Pruthi, 2016). Bu bağlamda, 4N'de çok-girişli çok-çıkışlı (ÇGÇÇ) ve dikey frekans bölmeli çoklama (DFBC) teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Beşinci nesil (5N) hücreli ağlar ile birlikte hayatımıza milimetre dalga (mmDalga) ve büyük ölçekli ÇGÇÇ diğer bir deyişle masif ÇGÇÇ kavramları girmiş ve yapay zeka, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, nanoteknoloji, bulut sistemleri, nesnelerin interneti, akıllı otonom sistemler gibi birçok teknoloji yaygınlaşmıştır (Ahmad et al., 2020; Alraih et al., 2022; Mihret & Haile, 2021). İnsan merkezli hizmeti vurgulayan altıncı nesil (6N) iletişim ağları, 5N'deki uygulamaları daha ileriye taşımaya yanı sıra mikrosaniyelik (μs) gecikme süresi, akıllı ev-şehir teknolojisi, terahertz (THz) iletişim gibi yeni teknolojilere de odaklanmaktadır (Giordani et al., 2020; W. Hong et al., 2021).

Günümüzün vazgeçilmez bir parçası haline gelen telsiz ağ teknolojileri, her geçen gün hızla gelişmeye devam etmektedir. Özellikle son yıllarda gezgin iletişim ağlarında büyük bir değişim yaşanmıştır. Gelecekteki 5N, 6N ve ötesi ağların, 2030 yılına kadar milyarlarca telsiz cihaza hizmet vereceği öngörülmektedir (Khiadani, 2020). Bu cihazların her biri için, gezgin veri trafiği de kaçınılmaz olarak artacaktır. Bu gelişmeler göz önüne alındığında, daha hızlı ve etkin bir kullanıcı hizmeti sunmak için haberleşme teknolojileri özel olarak tasarlanmalıdır. Bu yönde, araştırmacılar tarafından geçmişten günümüze yüksek başarılı birçok yöntem tanıtılmış ve geliştirilmeye devam edilmektedir.

Yüksek performans başarımı elde etmek için en etkili yöntemlerden biri de telsiz kanalın olumsuz özelliklerini en düşük seviyeye indirmektir. Telsiz iletişimin kalitesini düşüren ve güvenliği tehdit eden problemlerin başında, kanalda maruz kalınan sönümlenme gelir (Aydın

et al., 2014; Bölcskei, 2006; Larsson & Stoica, 2003). Bir yayılma ortamında, sönümlemenin etkisiyle kanal kazancı çok küçük değerlerde olabilmektedir. Böyle bir kanaldan iletilen sinyalin alıcıda doğru kestiriminin yapılması oldukça zordur. Bu sorunu çözmenin en etkili yollarından biri, bilgiyi birbirinden bağımsız olarak zayıflatan birden fazla kanal üzerinden iletmeye temeline dayanan çeşitlilik teknikleri kullanmaktır (J. Kim et al., 2006). Anten çeşitlemesi, çoğu saçılma ortamında çok yöllü sönümlemenin etkisini azaltmak için tercih edilen pratik ve etkili bir yöntemdir (Alamouti, 1998). Alıcıyı veya vericiyi birden çok antenle donatarak anten çeşitliliği sağlanabilir. Çeşitleme teknikleri kullanılarak, daha iyi bir bağlantı bütçesi sağlanabilmekte ve aynı zamanda ortak kanal girişimine karşı duyarlılık oluşturularak yüksek performans kazancı elde edilebilmektedir (Aydın et al., 2014; Larsson & Stoica, 2003). Telsiz yerel alan ağ için, baz istasyonu (Bİ) tarafında verici çeşitlemesi kullanılması ilgi çekmiştir. Bunun sebebi hareketli terminale (örneğin cep telefonu) pil kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle fazladan antenler eklenememesidir. Çeşitlemenin Bİ’de gerçekleştirilmesiyle, fazla güç tüketimi ve yüksek karmaşıklık meydana gelmeden performans artışı mümkün hale gelmektedir (Alamouti, 1998; Larsson & Stoica, 2003).

Sönümlemenin etkisini azaltmak ve frekans spektrumu kısıtlamalarından kaynaklanan hız ihtiyacını karşılamak için kullanılan yöntemlerin başında, ortaya çıktığı zamandan itibaren birçok çalışmada yaygın olarak kullanılan ÇGÇÇ tekniği yer almaktadır (Di Renzo et al., 2014; Mesleh et al., 2008; Younis et al., 2010). ÇGÇÇ sistemler, aynı sinyalin kopyalarını birden fazla kanal üzerinden ileterek her sinyalin alıcı antene farklı bir yoldan ulaşmasını sağlar. Böylece veriler daha güvenilir bir şekilde iletilir. ÇGÇÇ teknolojisi, uzaysal çoğullama kazancı ile yüksek spektral verimlilik sağlarken uzaysal çeşitleme kazancı ile de gelişmiş bağlantı güvenilirliği sunmaktadır (Bölcskei, 2006).

Telsiz yerel ağ bağlantısı ve hücresel telefon gibi uygulamalar için, tek bir baz istasyonunun birçok kullanıcıyla aynı anda iletişim kurmasını gerektiren ortamlar oluşabilmektedir. Bu nedenle, çok kullanıcılı ÇGÇÇ (ÇK-ÇGÇÇ) sistemlerin incelenmesi önemli bir araştırma konusudur. Tek kullanıcılı ÇGÇÇ (TK-ÇGÇÇ) sistemler, çoklu veri akışını aynı anda yalnızca bir cihaza iletebilirken, ÇK-ÇGÇÇ sistemler bu veri akışını aynı anda birden fazla cihaza iletebilme yeteneğine sahiptir. Böylece, çok antenli erişim noktaları, birden fazla telsiz kullanıcı ile iletişim kurarak potansiyel olarak daha yüksek verim, daha fazla çeşitlilik ve daha az girişim sağlayabilir (Spencer et al., 2004). ÇGÇÇ sistemlerde, genel olarak

huzmeleme tekniği kullanılarak girişim azaltılmakta ve doğrusal birleştirme yoluyla bağlantı gúvenilirliđi artırılmaktadır (J. Kim et al., 2006; Xiao et al., 2017). Yúysek yónlú huzmeler, kullanıcı ekipmanları arasındaki uzaysal ayrımı artırarak önemli performans kazanımları sağlayabilmektedir.

İletişim sistemlerinin ana bileşenleri olan iletim antenleri ve alt taşıyıcılar gibi indisler yoluyla bilgi iletimini esas alan indis modúlasyonu (İM), geleneksel işaret dizisiyle birlikte ek veri iletmek için anten indisini kullanan ve bir İM tekniği olan uzaysal modúlasyon (UM), ÇGÇÇ sistemler için literatúrdeki mevcut yöntemlere alternatif oluşturan ve umut vadeden çalışmalardır (Basar et al., 2017; X. Cheng et al., 2018; Mesleh et al., 2008; Wen et al., 2017). ÇGÇÇ sistemlerin, bu iletim teknikleriyle bütúnleřtiđi uzun senelerdir süregelen birçok çalışma mevcuttur (Basar et al., 2017; Z. Chen et al., 2014; Di Renzo et al., 2014; Mesleh et al., 2008; Younis et al., 2010).

Gúnümüz dúnyası, çok yúysek veri hızlı internet erişimine ihtiyaç duymaktadır ve mevcut iletişim sistemleri hızla gelişen ağ teknolojileri karşısında yetersiz kalmaktadır. Bu durum, araştırmacıları daha iyi performans özelliklerine sahip yeni nesil ağlar için çalışmaya motive etmiştir. Araştırmalar, ilk aşamada genel olarak 5N gezgin ağların geliştirilmesine ve geniş bant hizmetlerinin çoğalması úzerine yónelmiřtir. Bu ağların, son derece hızlı bağlantı sunması, kesintisiz kapsama alanı sağlaması ve çok çeşitli performans gereksinimlerini karşılaması beklenmektedir (Abdel Hakeem et al., 2022; Bangerter et al., 2014; Ferreira et al., 2023). 5N, mevcut birçok mimariyi korurken ağ işletimi açısından önemli değişiklikler getirerek yúysek verimlilik ve çok yónlúluk taleplerini karşılamayı amaçlamaktadır (Bangerter et al., 2014; Shafi et al., 2017). 5N telsiz haberleşmesinin günümüz şebekelerine kıyasla en büyük avantajları, Gb/s seviyesinde veri hızı, müthiş kapasite artışı ve hizmet kalitesinde önemli derecede artış sağlamasıdır (Haneda et al., 2016; Zhang et al., 2019). 5N, bahsedilen bu gereksinimleri büyük ölçúde karşılaması beklenen mmDalga iletişimi ve masif ÇGÇÇ teknolojileri úzerinde yoğunlaşmıştır ve beraberinde getirdiği bu yeni teknolojiler ile önceki nesillere kıyasla önemli bir fark yaratmaktadır (Busari et al., 2018; Dilli, 2022; Sun et al., 2018).

6GHz frekans bandı altındaki spektrum kısıtlaması ve mevcut spektrum kaynaklarının artan talepleri karşılayamaması, mmDalga bantlarına başvurmayı gerektirmiştir (Dilli, 2022; K. Kim et al., 2022; Koc & Le-Ngoc, 2022). mmDalga iletişimi, telsiz ağlara 30-300GHz gibi

oldukça geniş bir spektrum alanı kullanabilme imkanı sağlamaktadır (Dilli, 2021). Artırılmış bant genişliği, çok büyük miktarda verinin son derece yüksek hızlarda iletilmesini sağlayarak mmDalga iletişimini, çağdaş uygulamaların sürekli artan veri taleplerini karşılamak için umut verici bir çözüm haline getirmektedir. Ayrıca bu ek bantlar, bağlantı kabiliyetini ve verimliliğini artırmaktadır (Abdel Hakeem et al., 2022). Bu avantajlarının yanı sıra mmDalga iletişim sistemlerinde, daha düşük taşıyıcı frekansları kullanan diğer iletişim sistemleriyle karşılaştırıldığında ciddi bir yol kaybı sorunu ortaya çıkmaktadır (S. H. Hong et al., 2022; Lu et al., 2014; Niu et al., 2015). Dolayısıyla, milimetre kanal ortamında çalışmak, saçılmayı ve sinyalde büyük bir zayıflamaya sebep olan sönmeyi beraberinde getirmektedir. mmDalga frekanslarında, küçük dalga boyları sayesinde çok fazla sayıda anteni küçük alanlara sığdırma fikrine dayanan masif ÇGÇÇ sistemlerin uygulanması, yüksek anten kazancı sağlayarak yüksek yol kaybı sorununu büyük oranda çözmektedir (Dilli, 2021; S. H. Hong et al., 2022). Huzme yapılandırması kullanılarak, alıcıya odaklanmış şekilde iletilen sinyal, sönmeye en az oranda maruz kalmakta ve yüksek bir iletim gücüne sahip olmaktadır. Aynı zamanda masif ÇGÇÇ sistemlerin baz istasyonundaki çok sayıdaki anten, enerjiyi daha küçük alanlara odaklamaya yardımcı olduğundan enerji verimli bir şekilde kullanılır. Hem spektral verimliliği hem de enerji verimliliğini artırma kapasitesi, onu 5N hücreli ağlar için kilit teknolojilerden biri haline getirmektedir (Busari et al., 2018; H. V. Cheng et al., 2017).

Masif ÇGÇÇ ile ilgili ilk çalışmalar, birden fazla antene sahip iki cihazın birbiriyle iletişim kurduğu noktadan noktaya ÇGÇÇ bağlantılarına odaklanırken, son yıllarda odak noktası ÇK-ÇGÇÇ sistemlere evrilmiştir (Lu et al., 2014). Birden fazla antene sahip Bİ, aynı anda bir dizi tek antenli kullanıcıya hizmet etmekte ve çoğullama kazancı tüm kullanıcılar tarafından paylaşılabilmektedir. Bu şekilde, pahalı ekipmana sadece bağlantının Bİ ucunda ihtiyaç duyulurken kullanıcı terminalleri nispeten ucuz tek antenli cihazlar olabilmektedir. Ayrıca ÇK-ÇGÇÇ sistemler, noktadan noktaya ÇGÇÇ sistemlere kıyasla yüksek çoğullama kazancı elde etmektedir. Masif ÇGÇÇ teknolojisi, telsiz sistemlerin kapasitesini ve güvenilirliğini önemli ölçüde artırdığından, birçok telsiz standardına yaygın şekilde uygulanmaktadır (Lu et al., 2014).

Masif ÇGÇÇ ve mmDalga iletişiminin ortak yeteneklerinden yararlanmak amacıyla bu iki teknolojiyi birleştiren mmDalga masif ÇGÇÇ kavramı ortaya atılmıştır (Busari et al., 2018; Gao et al., 2016; Pi & Khan, 2012; Swindlehurst et al., 2014). mmDalga frekanslarının

müthiş bant genişliğinden ve masif ÇGÇÇ sistemlerin uzaysal çoğullama yeteneğinden faydalanan mmDalga masif ÇGÇÇ sistemler, yüksek veri hızları ve artırılmış ağ kapasitesi sunarak iletişim sistemlerinin performanslarını ileriye taşımaktadır (Busari et al., 2018; Dilli, 2022; Mir et al., 2019).

mmDalga masif ÇGÇÇ sistemler üzerine yapılan araştırmalar genellikle analog, sayısal ve hibrit huzmeleme (HH) mimarileri, donanım uygulama zorlukları ve performans değerlendirmeleri gibi çeşitli konuları ele almıştır (Bogale & Le, 2014; J. C. Chen, 2017; Molisch et al., 2017). mmDalga masif ÇGÇÇ sistemler, yapısı gereği çok sayıda radyo frekans (RF) zincirine sahiptir ve bu nedenle yüksek güç tüketimi açısından oldukça maliyetlidir (Gong et al., 2023; S. H. Hong et al., 2022; Z. Li et al., 2022; Zhu et al., 2021). HH tekniği, yüksek spektral ve enerji verimliliği sağlamanın yanı sıra sinyaller arası girişimi ortadan kaldırma yeteneğine sahiptir ve mmDalga masif ÇGÇÇ sistemlerin donanım maliyetini ve güç tüketimini büyük ölçüde azaltmaktadır (Daghari et al., 2021; Thurpati & Muthuchidambaranathan, 2022). Bu bağlamda, HH tekniği bu iletişim sistemlerinin ayrılmaz bir bileşeni olarak kabul edilmiştir (Daghari et al., 2021; Dilli, 2022; S. H. Hong et al., 2022). Diğer taraftan, hibrit huzmelemenin doğası gereği tamamen sayısal huzmeleme yapılmamasının sonucu olarak maliyetten kazanç sağlansa da bir performans düşüşü meydana gelmektedir (J. C. Chen, 2017; Molisch et al., 2017). Bu performans kaybını telafi etmek ve donanım maliyetini daha da azaltmak için, (Elbir et al., 2021)'de ve (Yüzgeçcioğlu & Jorswieck, 2017)'de İM tabanlı çalışmalar önerilmiştir. (Yüzgeçcioğlu & Jorswieck, 2017)'de yazarlar, uzaysal modülasyonlu hibrit huzme yapılandırmaya dayalı HBF-SM (hybrid beamforming with spatial modulation) olarak adlandırılan yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem, klasik UM tekniğine kıyasla daha yüksek spektral verimlilik ve BHO performansı sağlamaktadır. Ancak, mmDalga bandında yüksek yol kaybından kaynaklanan performans kaybı hala büyük bir pratik sorun olmaya devam etmektedir. Bu bağlamda, akıllı yansıtıcı yüzey olarak da bilinen yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzey (YYAY) teknolojisi, bu performans kaybını iyileştirmek için umut verici bir çözüm olmuştur (Gong et al., 2022; He & Yuan, 2020; Yang et al., 2021; Yildirim et al., 2022). YYAY'ler, düşük maliyetli pasif yansıtma elemanları aracılığıyla telsiz ağlardaki enerji tüketimini azaltan ve iletişim sistemlerinin performansını önemli ölçüde artıran yenilikçi bir teknoloji olarak önerilmiştir (S. H. Hong et al., 2022).

YYAY destekli mmDalga masif ÇGÇÇ iletişim sistemleri son zamanların kilit mimarisi haline gelmiştir (Daghari et al., 2021; He & Yuan, 2020; Zhu et al., 2021). Özellikle son çalışmalar, YYAY yansıma matrisi ve hibrit huzme yapılandırıcıların ortak tasarımına odaklanmış ve bu çalışmalar tek YYAY'ye sahip bir model için noktadan noktaya iletişimi ele almıştır (Gong et al., 2022, 2023; S. H. Hong et al., 2022; Yang et al., 2021).

(S. H. Hong et al., 2022)'de HH mimarisine sahip YYAY destekli bir mmDalga ÇGÇÇ sistem için, YYAY yansıma matrisi ve hibrit huzme yapılandırıcının ortak tasarımı geliştirilmiş ve dikgen frekans bölmeli çoklu erişim (OFBÇE) modülasyonuna sahip geniş bant ÇGÇÇ sistemlerine genelleştirilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen ortak tasarımın sistemlerin spektral verimliliğini önemli ölçüde artırabildiğini ve mevcut tasarımlara göre üstün performans elde edebildiğini göstermektedir. (Gong et al., 2023)'de yazarlar, pratik faz kaydırıcılar ile hibrit alıcı-verici ve YYAY yansıma katsayılarını birlikte eniyileyerek ortalama kare hatasını en aza indiren ve YYAY destekli noktadan noktaya mmDalga ÇGÇÇ sistemlerin spektral verimliliğini en üst düzeye çıkaran bir algoritma önermektedir. (Daghari et al., 2021)'de makine öğreniminden ilham alan enerji verimli hibrit ön kodlama şemasına sahip bir YYAY destekli mmDalga masif ÇGÇÇ önerilmiştir. Benzetim sonuçları, önerilen sistemin muadillerinden daha iyi performans sağladığını ve hem enerji verimliliği hem de ulaşılabilir toplam hız performansında iyileşmeler sağladığını göstermektedir. (Yang et al., 2021), YYAY destekli telsiz verici ile çok kullanıcıli iletim için huzmeleme tasarımını araştırmış ve kullanıcıların sinyal-girişim-artı-gürültü oranı kısıtlamaları altında toplam iletim gücünü en aza indirmek için iletim gücü ve YYAY kontrolünün ortak bir eniyileme problemi olarak ortaya konmuştur. Benzetim sonuçları, önerilen şemanın, diğer huzme şekillendirme teknikleri ile karşılaştırıldığında toplam iletim gücünün azaltılabileceğini ortaya koymuştur. (Gong et al., 2022)'de, hibrit ön kodlayıcıları ve YYAY yansıma matrisini birlikte eniyileyerek YYAY destekli mmDalga TK-ÇGÇÇ ve ÇK-ÇGÇÇ sistemleri için toplam ortalama kare hatasını en aza indiren bir algoritma önerilmiştir. (Yildirim et al., 2022), mmDalga masif ÇGÇÇ sistemler için YYAY destekli ve açısal tabanlı hibrit huzme yapılandırma tekniği önermektedir. Aynı çalışmada, YYAY ve HH teknolojilerinin birbiriyle uyum içinde çalıştığı en verimli mimariyi bulmak için sistem, ulaşılabilir hız performansı açısından incelenmiş ve YYAY'nin etkili bir şekilde konumlandırılmasıyla ulaşılabilir hız performansında dikkate değer bir artışın sağlandığı sayısal sonuçlarla gösterilmiştir.

1.2. Tezin Amacı

Günümüzde, internet uygulamaları ve çoklu ortam hizmetleri gibi iletişim teknolojilerinde yaşanan olağanüstü gelişmeler, kullanıcı sayısında ve veri boyutlarında büyük bir artışa yol açmaktadır. Bu durum, verimsiz ve kalitesiz bir iletişime neden olabilmektedir. Ayrıca, çağdaş teknolojilerin sürekli ilerlemesiyle birlikte, milyarlarca cihazın birbiriyle bağlantılı olduğu yeni bir dünya gelişecek ve gezgin cihazlar arasındaki iletişim giderek yaygınlaşacaktır. Yüksek veri aktarım hızı ve yüksek veri taşıma kapasitesi gibi talepler her geçen gün daha da artmaktadır. Bu talepler ve ihtiyaçlar doğrultusunda gelişen ve değişen haberleşme sistemleri ile birlikte hayatımıza yeni nesil teknolojiler girmektedir. Mevcut cihazlar halen 4N/4.5N teknolojisini desteklemektedir. Ticarileşme süreci devam eden 5N haberleşme teknolojilerinden elde edilen deneyimler, daha hızlı, son derece güvenilir, uygun maliyetli, enerji tüketimi düşük, ekosisteme uygun ve sürdürülebilir telsiz ağlarının önemini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, bu özelliklere sahip iletişim ağları kurmak amacıyla yeni nesil haberleşme teknolojileri araştırılmaya başlanmıştır.

Yeni nesil teknolojiler, daha yüksek veri aktarım hızı ve veri taşıma kapasitesi gibi avantajlara sahip mmDalga masif ÇGÇÇ sistemler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu sistemlerin güç tüketimi ve donanım maliyetleri HH tekniği kullanılarak azaltılmış ve HH'den kaynaklanan performans kaybı da İM tekniğiyle büyük ölçüde giderilmiştir. Bu sistemler, yeni nesil telsiz sistemlerin yüksek spektral verimlilik ve yüksek veri hızı gibi taleplerini büyük oranda geliştirmiş olsa da yol kaybı sorunu halen büyük bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. 6N'nin en önemli teknolojilerinden biri olan YYAY teknolojisi, sönmlemeyi azaltmak ve performans kısıtlamalarını karşılamak için umut verici bir çözüm olarak bu alandaki araştırmalarda yerini almıştır. Bahsedilen yöntemlerin uyumlu şekilde bütünleştirilmesiyle oluşturulacak yeni bir sistem mimarisinin, gelecek nesil ağlar için kullanıcı taleplerinin karşılamasına önemli bir katkı sunacağı beklenmektedir.

Bu tezin amacı; mmDalga iletişimi için çok kullanıcılı masif ÇGÇÇ sistemlerin huzme yapılandırmasında YYAY teknolojisini kullanarak benzer çalışmaların özelliklerini daha ileriye taşımak ve literatüre veri hızı, spektral verimliliği ve bit hata performansı iyileştirilmiş yeni bir sistem modeli kazandırmaktır.

1.3. Tezin Literatüre Katkıları

Literatürde, masif ÇGÇÇ sistemler ve bu sistemlerde YYAY kullanılmasına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Fakat bu çalışmalar genellikle tek bir YYAY'ye sahip bir model için noktadan noktaya iletişimi ele almıştır. Literatürde, mmDalga iletişimi için ÇK-ÇGÇÇ sistemlerde huzme yapılandırma amacıyla YYAY kullanımı ve bunun masif ÇGÇÇ sistemlere uygulanması üzerine yapılan çok sınırlı çalışma bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, aşağı bağlantı mmDalga iletişimi için çok kullanıcılı masif ÇGÇÇ sistemlerin huzme yapılandırmasında çoklu YYAY yapısının kullanıldığı ve Çoklu-YYAY-HH olarak adlandırılan yüksek performanslı yeni bir haberleşme sistemi önerilmiştir. Önerilen şemada, düşük karmaşıklık yapısı ve yüksek spektral verimlilik avantajlarından istifade etmek için UM tekniğinden yararlanılmıştır. Böylelikle, veri hızında artış sağlanırken aynı zamanda kullanıcılar arası girişim azaltılmış ve sistemin hata performansı iyileştirilmiştir. Önerilen sistem için, sayısal ön kodlayıcı, analog huzme yapılandırıcı ve sayısal birleştirici tasarımlarına ilave olarak, ulaşılabilir hız oranı ile onun üst sınırı ve bit hata oranı analizleri teorik olarak elde edilmiş; benzetim sonuçları ile performans analizlerinin doğruluğu test edilmiş ve (Yüzgeçcioğlu & Jorswieck, 2017)'deki benzer çalışmaya olan üstünlüğü gösterilmiştir.

1.4. Tezin Genel Akışı

Bu tez çalışması, beş bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde, çalışmanın motivasyonundan bahsedilmiş, ele alınan problem ile ilgili literatürde bulunan ilgili çalışmalara değinilmiş ve kullanılan teknikler temel olarak tanıtılmıştır. İkinci bölümde, yeni nesil telsiz iletişim sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu başlık altında öncelikle telsiz iletişim sistemlerinin gelişim sürecinden bahsedilmiştir. Devamında, 4N ile kullanılmaya başlanan ve geliştirildiğinden bu yana yaygın olarak kullanılan ÇGÇÇ sistemler ile 5N, 6N ve ötesi ağlar anlatılmıştır. Akabinde, bu tez çalışmasının temellerini oluşturan ve yeni nesil telsiz iletişim sistemleri için oldukça önem taşıyan mmDalga haberleşmesi, masif ÇGÇÇ sistem mimarisi ve YYAY teknolojileri hakkında bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, anten dizileri ve huzme yapılandırma kavramları açıklanmıştır. Tez çalışmasında ele alınan yöntem için gerekli alt yapı sağlandıktan sonra dördüncü bölümde, önerilen çoklu YYAY destekli çok kullanıcılı mmDalga masif ÇGÇÇ sistemi tanıtılmıştır. Aynı başlık altında, sistem modeli detaylıca açıklanmış ve sistemin teorik performans analizleri ile bilgisayar

benzetim sonuçları sunulmuştur. Beşinci bölümde ise tez kapsamında elde edilen genel sonuçlar ve değerlendirmelere yer verilerek tez sonlanmaktadır.

2. YENİ NESİL İLETİŞİM SİSTEMLERİ

Telsiz ağ teknolojileri olağanüstü bir hızla değişmekte ve gelişmektedir. Bu gelişmelerle birlikte, internet kullanımı ve gezgin cihaz sayısı katlanarak artmaktadır. Cep telefonu, tablet vb. gezgin cihazların taşınabilirlik ve kullanım kolaylığı gibi faydaları da kullanıcı sayısının artmasında etkili faktörlerdir. Artan kullanıcı sayısı ve veri trafiği neticesinde, veri hızı ve spektrum kullanımına yönelik talepler artmıştır. Geliştirilen her yeni nesil ağda, bu gereksinimleri karşılamak ve daha iyi hizmet kalitesi sunmak için yeni teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. 1980'lerde tanıtılan analog özellikteki ilk iletişimden itibaren neredeyse her on yılda bir, bir öncekinden daha iyi özelliklere sahip yeni nesil iletişim sistemleri geliştirilmiştir. Bu bölümde, bu değişimlere kılavuzluk eden gezgin iletişim ağlarının geçmişten günümüze gelişimi incelenmiş ve gelecek yeni nesil ağlara değinilmiştir. Dördüncü nesilden bu yana telsiz iletişim sistemlerinin temeli haline gelen ÇGÇÇ sistemi açıklanmış ve bu başlık altında çeşitleme kavramından bahsedilmiştir. Yeni nesil telsiz iletişim sistemlerinin gözde teknolojileri haline gelen ve tezde önerilen yöntemlerin temel yapı taşlarını oluşturan mmDalga iletişimi, masif ÇGÇG ve YYAY teknolojisi tanıtılmıştır. Tez kapsamında, önerilen sistemlere kronolojik sıra dikkate alınarak yer verilmesi konu bütünlüğü bakımından önem arz etmektedir.

2.1. Gezgin İletişim Sistemlerinin Gelişim Süreci

Telsiz ağların gelişimi 19. yüzyılın sonlarında, ilk radyo sinyallerinin ortaya çıkmasıyla başlamış ve günbegün gelişen teknolojilerle bugünkü kullandığımız haline gelmiştir. Hücresel telsiz nesil kavramı, yoğunlukla sistemin hızındaki, frekansındaki ve teknolojisindeki bir değişikliği ifade eder. Her nesil, onu bir öncekinden daha ileriye taşıyan farklı standartlara, kapasitelere, tekniklere ve yeni özelliklere sahiptir.

İlk hücresel haberleşme sistemi, 1980'lerde kurulan 1N sistemlerdir. Veri iletim hızı 2.4kb/s'dir ve dar bantlı analog bir teknolojidir. 1N, yalnızca ses iletmek için tasarlanmıştır ve veri iletimi sunmamaktadır. En popüler 1N iletişim standartları şunlardır: Gelişmiş Gezgin Telefon Sistemi (Advanced Gezgine Phone System, AMPS), Toplam Erişim İletişim Sistemi (Total Access Communication System, TACS) ve İskandinav Gezgin Telefon (Nordic Gezgine Telephone, NMT) sistemi (Gani et al., 2009; Gupta & Jha, 2015; Nirmal Lourdh Rayan, 2014; Spencer et al., 2004). Bu standartlar ses sinyalleri için frekans

bölmeli çoklu erişim (FBÇE) yöntemi kullanır (X. Li et al., 2009; Prinima & Pruthi, 2016). FBÇE’de, kullanıcı sinyalleri frekans alanında ayrıktır ve her kullanıcı, toplam mevcut bant genişliğinin yalnızca bir kısmını kullanır (Baier, 1994).

1N iletişim sistemlerinin ardından 1990’lı yılların başlarında, 2N iletişim sistemleri tanıtılmıştır. 2N, 64kb/s veri hızı sağlar ve sayısal bir teknolojidir. Ses hizmetlerine ek olarak kısa mesaj servisleri (short message service, SMS) ve çoklu ortam mesaj servisleri (multimedia messaging service, MMS) de sunmaktadır (Anju & Gawas, 2015). Analog sistemlerden sayısal sistemlere geçişle beraber kullanılabilir kapasite artırılmış ve daha iyi kapsama alanı sağlanmıştır. Ayrıca 2N ile beraber ses kalitesi geliştirilmiş, güvenli ve verimli bir haberleşme kanalı sağlanmıştır. 2N, zaman bölmeli çoklu erişim (ZBÇE) ve kod bölmeli çoklu erişim (KBÇE) gibi sayısal modülasyon şemaları kullanmıştır (X. Li et al., 2009; Prinima & Pruthi, 2016). ZBÇE’de zaman paylaşımli tek bir kanal vardır ve iletim, diğer kullanıcıların aktif olduğu periyodik zaman dilimleriyle sınırlıdır. KBÇE şeması, bir verici için bilgi sinyalini bir yayılma kodu kullanarak geniş bir frekans bandında yayar ve eş zamanlı iletme izin vererek çoklu erişim sağlar. Böylece, bant genişliği yeniden kullanılır ve girişim azaltılır. FBÇE ve KBÇE’de, ZBÇE’nin aksine sürekli iletim gerçekleşir. Kullanıcı sinyalleri, FBÇE şemasında farklı frekanslara; KBÇE şemasında ise farklı FBÇE kodlarına sahip taşıyıcılar ile iletimi özel kılmaktadır. Bunlarla beraber, en popüler 2N telsiz teknolojisi olarak bilinen Küresel Gezgin İletişim Sistemleri (Global System for Mobile Communications, GSM) kullanıcılara daha güvenli ve kaliteli bir iletişim hizmeti sunar ve uluslararası seyahat serbestliği sağlar (Baier, 1994; Y. Zhou et al., 2014).

Daha iyi hizmet verebilmek için GSM teknolojisinin sürekli olarak iyileştirilmesi, 2.5 Nesil (2.5N) ve 2.75 Nesil (2.75N) sistemlerinin gelişmesini sağlamıştır. GSM şebekelerinde hem veri hizmeti sağlamak hem de veri hızını artırmak için bazı standartlar geliştirilmiştir. Temel 2.5N teknolojileri şunlardır: Genel Paket Radyo Servisi (General Packet Radio Service, GPRS), Yüksek Hızda Devre Anahtarlama Veri (High-Speed Circuit-Switched Data, HSCSD), GSM Evrimi İçin Geliştirilmiş Veri Hızı (Enhanced Data Rates for GSM Evolution, EDGE) ve Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access, CDMA)-2000 (Baier, 1994; Gupta & Jha, 2015; X. Li et al., 2009). 2.5N olarak da adlandırılan GPRS 115kb/s’ye kadar veri hızı sağlarken, 2.75N olarak adlandırılan EDGE 236.8kb/s’ye kadar veri hızı sağlamaktadır (Nirmal Lourdh Rayan, 2014).

2000 yılında piyasaya sürülen 3N, gezgin iletişim dünyasına büyük bir değişim getirmiştir. 3N telsiz sistemleri, 2Mb/s'ye kadar veri hızı sağlar. Daha iyi internet erişimiyle beraber elektronik posta (e-posta), televizyon/videolara erişim, sesli/görüntülü arama, dosya aktarımı, küresel konumlandırma sistemi (Global Positioning System, GPS), çevrimiçi oyun ve birçok çoklu ortam hizmetlerine olanak tanır (Gani et al., 2009; Nirmal Lourdh Rayan, 2014; Prinima & Pruthi, 2016). 3N gezgin sistemler, Uluslararası Telekomünikasyon-2000 (International Mobile Telecommunications-2000, IMT-2000) kapsamındaki Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU) standart ailesini temel alır ve IMT-2000 standartlarını karşılayan 3.Nesil Ortaklık Projesi (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) adlı kuruluş tarafından tanımlanmıştır (Anju & Gawas, 2015; Nirmal Lourdh Rayan, 2014). 3N, geniş bantlı CDMA (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA) teknolojisini kullanmıştır. WCDMA, Uluslararası Gezgin Telekomünikasyon Sistemleri (Universal Mobile Telecommunications System, UMTS) ve CDMA-2000 en popüler 3N standartlarıdır [1], [12], [13].

4N iletişim sistemi, 2009 yılında hizmete sunulmuştur. Tamamen internet protokol tabanlı bir ağ sistemidir ve gezgin cihazlara son derece geniş bant ağ erişimi sağlamaktadır (Agrawal et al., 2015). 4N sistemler, yüksek çözünürlüklü gezgin televizyon, video konferans, oyun hizmetleri gibi uygulamaları desteklemektedir (Anju & Gawas, 2015; Mihret & Haile, 2021). ITU tarafından, 4N standartları için veri hızı yüksek gezgin (cep telefonu vb.) iletişimlerde 100Mb/s, düşük gezgin (sabit kullanıcılar vb.) iletişimlerde ve telsiz ağlarda 1Gb/s olarak belirlenmiştir (Mihret & Haile, 2021). 4N için iki önemli teknoloji mevcuttur: Uzun Vadeli Gelişim (Long Term Evolution, LTE), Mikrodalga Erişimi için Dünya Çapında Birliktelik (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) teknolojisi. LTE teknolojisi OFBÇE tekniği kullanarak yüksek veri hızları sağlar (Anju & Gawas, 2015; Gupta & Jha, 2015; Prinima & Pruthi, 2016).

LTE, pazar talebini karşılamak için 3GPP ile standartlaştırılmıştır (Roslan et al., 2015) . LTE, 3GPP'nin bir parçası olarak geliştirilmiştir, WiMAX ise Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)'nin bir parçası olarak geliştirilmiştir. Uydu bağlantılarında LTE, uydu-yer hattı için OFBÇE ve yer-uydu hattı için tek taşıyıcılı FBÇE teknolojisi kullanılmaktadır. WiMAX ise hem uydu-yer hattı için hem de yer-uydu hattı için OFBÇE teknolojisini kullanmaktadır (Srikanth et

al., 2012). 4N, toplam kapsama alanı, kesintisiz dolaşım ve en iyi bağlantılı hizmetleri sağlayabilen tüm erişim ağlarını ve 3N'yi sabit internet ile entegre eder (Gani et al., 2009). 4N, daha iyi kalitede internet üzerinden akış, yüksek güvenilirlik, yüksek hizmet kalitesi, esnek spektrum kullanımı, azaltılmış gecikme süreleri, yüksek çözünürlük kalitesinde görüntülü aramalar, uygun kaynak maliyeti sağlamaktadır.

4N ağları, hedefledikleri yüksek kapasite ve yüksek hızlı veri hızına ulaşmak için başlıca ÇGÇÇ sistemleri kullanmaktadır (Hussain et al., 2017; Roslan et al., 2015). ÇGÇÇ teknolojisi hem alıcıda hem de vericide birden fazla anten kullanılması temeline dayanan ve ekstra güç veya bant genişliğine ihtiyaç duymadan iletim hızını ve kalitesini arttıran bir teknolojidir. 4N ile adını duyuran ve sağladığı muhteşem özelliklerle uluslararası telsiz haberleşme sistemlerinin en önemli teknolojilerinden biri haline gelen ÇGÇÇ Bölüm (2.2)'de ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Sadece ses iletimini destekleyen 1N sistemlerden, sayısız internet hizmeti sağlayan 4N sistemlere kısa sayılabilecek bir sürede geçilmesi insan yaşamında büyük değişimler meydana getirmiştir. Telsiz teknolojiler, kullanıcıların artan iletişim taleplerini karşılayabilmek için günden güne gelişmeye devam etmektedir. 5N teknolojileri, dünya çapında yayılırken, 6N ve ötesi teknolojiler araştırılmaya başlanmıştır. 5N hücresele ağlar, öncelikli olarak kapasite artışı, düşük maliyet, daha düşük uçtan uca gecikme süresi, büyük çapta bağlanabilirlik ve çok çeşitli servis hizmeti verilmesi gereksinimlerine odaklanmaktadır (Gupta & Jha, 2015; Hikmaturokhman et al., 2021). 5N gezgin iletişim sistemlerinin temel amacı herkes ve her şey (insan-makine, makine-makine) için kesintisiz ve kapsamlı bir iletişim gerçekleştirmek, kısacası tüm dünyayı birbirine bağlamaktır (Bangerter et al., 2014; Shafi et al., 2017). 6N telsiz gezgin iletişim ağları ise gezgin kullanıcılara ağ konumu, hava durumu bilgisi, çoklu ortam ve internet bağlantısı gibi hizmetleri sağlamak ve küresel kapsama alanı elde etmek için uydu ağlarını entegre etmeyi amaçlamaktadır (Anju & Gawas, 2015; Mihret & Haile, 2021).

Genel olarak 5N, sınırsız gerçek bir telsiz dünyayı hedeflemekte, 6N küresel kapsama alanı için 5N'yi uydu ağlarıyla entegre etmekte ve 7N ise uzay dolaşımı ile ilgilenmektedir (Anju & Gawas, 2015; Mihret & Haile, 2021). 5N, 6N ve ötesi yeni nesil teknolojilerin kullanımı ile gezgin şebeke servislerinin kullandığı enerji maliyetleri azalacaktır (Gupta & Jha, 2015;

Khutey et al., 2015). Bölüm (2.3)'te 5N, 6N ve ötesi ağlar detaylıca açıklanmıştır. Tablo 2'de, gezgin iletişim ağlarının nesillere göre karşılaştırılması ele alınmıştır.

Tablo 2.1 Nesillere göre telsiz ağların karşılaştırılması.

Özellikler	1N	2N	3N	4N	5N	6N
Yıl	1980	1990	2000	2009	2020	2030
Standartlar-Teknolojiler	AMPS, TACS, NMT	GSM, GPRS, EDGE	UMTS, HSPA, WCDMA	LTE, WiMAX	eMBB, URLLC, mMTC, mmDalga	Blok Zinciri
İletim Hızı	2.4kb/s	64kb/s	2Mb/s	1Gb/s	10Gb/s	1Tb/s+
Temel Uygulamalar-Hizmetler	Sesli arama	Sesli arama, veri aktarma (SMS, MMS)	Yüksek kaliteli ses, gezgin internet, görüntülü arama, GPS	Yüksek hızlı uygulamalar, giyilebilir teknoloji	Sanal gerçeklik uygulamaları, IoT	VLC, Terahertz/ Uydu iletişimi
İnternet Hizmeti	-	Dar Bant	Geniş Bant	Çok Yüksek Geniş Bant	WWWW	5N+
Mimari	TGTÇ	TGTÇ	TGTÇ	ÇGÇÇ	Masif ÇGÇÇ	Akıllı Yüzeyler

(HSPA: Yüksek Hızlı Paket Erişimi (High Speed Packet Access), eMBB: Gelişmiş Mobil Geniş Bant (Enhanced Mobile Broadband), URLLC: Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim (Ultra-Reliable and Low-Latency Communications), mMTC: Masif Makine Tipi İletişim (Massive Machine Type Communication), IoT: Nesnelerin İnterneti (Internet of Things), VLC: Görünür Işık İletişimi (Visible Light Communication), WWWW: Telsiz Dünya Çapında İnternet (Wireless World Wide Web)).

2.2. Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemler

Telsiz iletişim sistemlerinde karşılaşılan başta çok yollu sönümleme olmak üzere, girişim, gölgeleme, atmosferik yansıma, kırılma ve yol kaybı gibi faktörler haberleşme kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Telsiz haberleşme kanalından iletilen bir sinyal, çok yollu sönümlemeye maruz kalır ve dolayısıyla sinyal, genlik ve fazında değişimler meydana gelerek alıcıya ulaşır. Sistem performansını önemli ölçüde azaltan bu faktörleri en az düzeye indirmek için en etkin yollarından biri çeşitleme tekniği kullanmaktır (Nabeel et al., 2017; Sendonaris et al., 2003; Zhao & Li, 2007). Çeşitleme teknikleri çoklu anten teknolojileri ile beraber kullanılır. Çoklu anten teknolojilerinden biri olan ve hem vericide hem alıcıda birden fazla anten kullanan ÇGÇG sistemler, uzaysal çeşitleme oluşturarak çok yollu sönümlemenin etkisini azaltmakta ve iletişimin kalitesini artırarak hata başarımını iyileştirmektedir (Nabeel et al., 2017; Zhao & Li, 2007). Bu bölümde öncelikle çeşitleme kavramı ele alınacak, daha sonra ÇGÇÇ sistemler hakkında detaylı bilgiler verilecektir.

2.2.1. Çeşitleme Kavramı

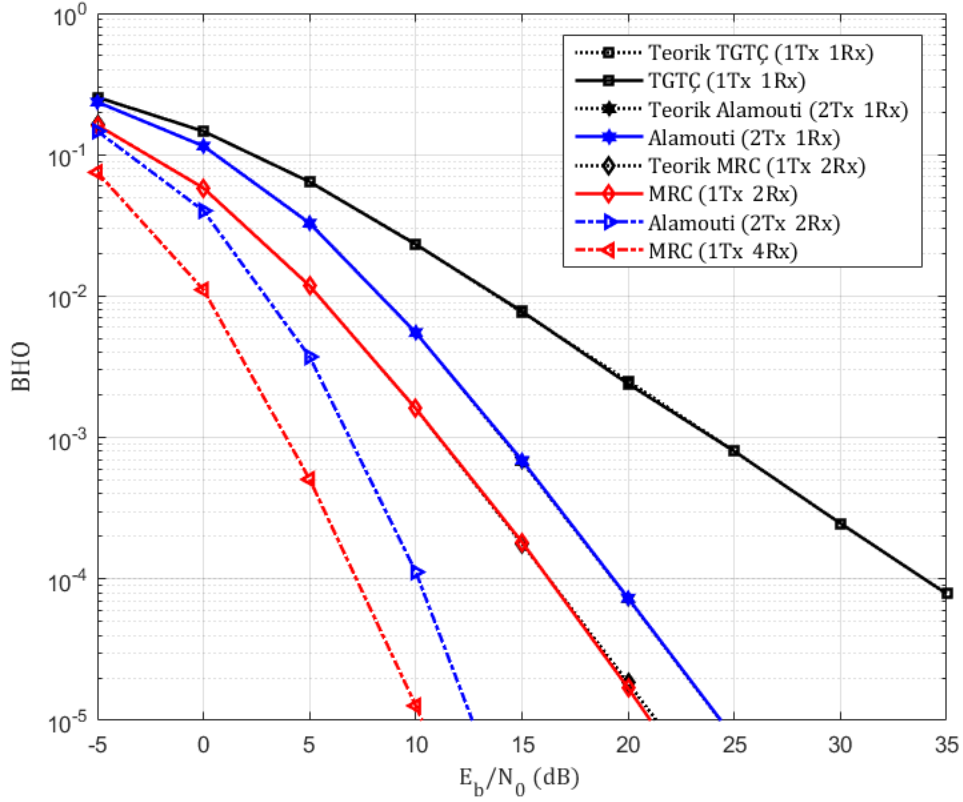
Çeşitleme, sinyalin birden fazla kopyasının farklı yollar üzerinden alıcıya gönderilmesi ile gerçekleşir. Böylece gönderilen sinyal, birbirinden bağımsız sönümlenmelere maruz kalır. Bazı sinyaller ciddi şekilde sönümlenirken bazıları daha az sönümlemeye uğrar ve bunun sonucunda güvenilir bir iletişim sağlanır. Aynı bilgi birden çok kanal üzerinden iletilerek, alıcının bilgiyi kurtarması için sinyal çeşitliği sağlanır. Çeşitleme, sönümlenme etkisini azaltmanın yanı sıra iletim için gereken gücü artırmadan ve bant genişliğinden ödün vermeden iletimin kalitesini artırır (Larsson & Stoica, 2003; Sendonaris et al., 2003). Ayrıca çeşitleme, sınırlı bir girişim sistemi oluşturarak kapsama alanını iyileştirir ve daha fazla kullanıcıya hizmet verebilme imkanı sağlar.

En yaygın çeşitleme teknikleri şunlardır: Zaman çeşitlemesi, açı çeşitlemesi, frekans çeşitlemesi, polarizasyon çeşitlemesi ve anten/uzay çeşitlemesidir. Verici ve/veya alıcıda birden fazla anten kullanılarak oluşturulan uzay çeşitlemesi, diğer adıyla anten çeşitlemesi en önemli çeşitleme tekniklerinden biridir (Katiyar et al., 2011; Nabar et al., 2004). Bu çeşitleme tekniğinde, sönümlemeli kanallar arasında bir ilişki olmaması ve antenlerin farklı sönümlemelere maruz kalabilmesi için antenler arasında yeterince bir mesafe olması gerekmektedir. Antenler arası mesafe, frekans, yayılma ortamı ve anten yüksekliğine bağlı olarak değişirken çoğunlukla bu mesafe sinyalin dalga boyunun yarısı olarak seçilir (Salz & Winters, 2009). Zaman ve frekans çeşitlemelerinin aksine uzay çeşitlemesinde bant genişliği bakımından bir kayıp yoktur ve bu sayede, telsiz iletişimde yüksek veri hızlarına çıkmak mümkündür (Mishra et al., 2013; Paulraj et al., 2004). Anten çeşitlemesi, antenlerin iletim veya alım için kullanılmasına bağlı olarak sırasıyla verici ve alıcı çeşitlemesi olmak üzere ikiye ayrılır. Verici çeşitlemesinde, vericide birden fazla anten kullanılarak alıcıya aynı mesaj işaretinin kopyaları gönderilmektedir. Alıcı çeşitlemesinde ise, alıcıda birden fazla anten kullanılarak vericiden gelen mesaj işaretinin birbirinden bağımsız kopyaları elde edilir. Sonra alıcıda alınan işaretler çeşitli birleştirme yöntemleri sayesinde işaret gürültü oranını (İGO) yükseltecek biçimde birleştirilir. Birleştirme yöntemleri genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir: En büyük oran birleştirme (maximum ratio combining, MRC), seçici birleştirme (selection combining, SC), eşit kazanç birleştirme (equal gain combining, EGC) (Aydin et al., 2014; Ngo et al., 2013). MRC tekniğı, birleştirme teknikleri içerisinde en iyi performans gösterenlerden biridir. Fakat, MRC devresinin çıkış işareti tüm alınan

işaretlerin ağırlıklandırılmış kopyalarının doğrusal birleşimi olduğundan bütün kanallara ait sönümlenme parametrelerinin bilinmesi gerekir ve bu da hesaplama karmaşıklığını artırır.

Alıcı anten çeşitlemesi yıllardır bilinen ve kullanılan bir yöntemdir ancak gezgin birimlerin her birine birden fazla alıcı anten yerleştirmek oldukça zordur. Bununla beraber gezgin birimde çoklu anten kullanımı boyut ve güç sınırlamaları nedeniyle de pratik değildir (Alamouti, 1998; Dalton et al., 2005; Tarokh, 1999). Bu nedenle çok antenli karmaşık yapının vericide (baz istasyonu) oluşturulması tercih edilir. Vericide birden çok anten kullanmak üzere tasarlanmış bir kodlama tekniği olan uzay-zaman kodlama (space-time coding, STC), sinyali uzaysal ve zaman alanı boyunca eş zamanlı olarak ileterek bant genişliğini artırmadan çeşitlilik kazancı elde eder. Birden fazla verici ve alıcı anten kullanılarak daha yüksek veri hızı elde edilebilir. Verici anten çeşitlemesinin faydalarından yararlanmak üzere ayrıca uzay-zaman blok kodlaması (space time block coding, STBC) önerilmiştir (Larsson & Stoica, 2003; Tarokh, 1999). STBC, bir veri akışının birden fazla kopyasını birkaç anten üzerinden ileten ve verilerin çeşitli versiyonlarını alarak veri aktarımının güvenilirliğini artıran bir tekniktir. Kısaca farklı zamanlarda ve farklı antenlerde birbiriyle ilişkili işaretler üretir. Kapasite, veri hızı, bant genişliği ve güç açısından verimli bir iletişim yöntemidir. Alamouti kodlaması, geliştirilen ilk uzay-zaman kodlarından birisidir (Alamouti, 1998; Mishra et al., 2013). Alamouti yapısı, iki verici antenli basit bir işaret işleme tekniğine dayanır ve alıcıdan vericiye hiçbir geri beslemeye gerek duymadan iletişimi düşük hesaplama karmaşıklığıyla gerçekleştirir. Bu teknikle elde edilen çeşitleme düzeyi maksimum oran birleştirmenin iki alıcı antenle uygulanmasıyla elde edilen çeşitleme düzeyine eşittir.

Şekil 2.1’de, ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) modülasyonu için aynı çeşitlilik altında Alamouti ve MRC tekniklerinin bit hata oranı (BHO) performansları karşılaştırılmıştır. Grafikten görüldüğü üzere, alıcı ve verici anten sayısı arttıkça çeşitlilik de arttığından daha iyi performans başarımı elde edilmektedir. Aynı çeşitlilik derecesi için, MRC şeması, Alamouti şemasından daha iyi hata performansı gösterirken, çeşitliliğin olmadığı TGTÇ sistemi en kötü hata performansına sahiptir. Bu grafikten, çeşitliliğin sistem performansında oldukça iyi bir iyileşme sağladığı sonucu çıkarılabilir.



Şekil 2.1 Rayleigh sönümlmeli kanalda aynı çeşitlilik derecesinde Alamouti ve MRC şemalarının BPSK için BHO performans eğrilerinin karşılaştırılması.

Güç, boyut, donanım karmaşıklığı ve maliyet gibi kısıtlamalardan dolayı birden fazla anten yerleştirilemeyen gezgin birimler için anten çeşitlemesi, işbirlikli/röleli haberleşme tekniği ile sağlanmaktadır (Aydın et al., 2014; D. Chen & Laneman, 2004; Nabar et al., 2004). Temel olarak işbirlikli sistemlerde kaynak ile hedef arasındaki iletişim, röle verilen ek bir birim yardımıyla gerçekleştirilir. İşbirlikli çeşitlilik, birden çok telsiz radyonun antenlerini etkili bir şekilde paylaşmasına ve sanal bir anten dizisi oluşturmaya olanak tanır ve böylece ÇGÇÇ anten sistemlerinin uzaysal çeşitlilik avantajlarından yararlanır (D. Chen & Laneman, 2004; Laneman et al., 2001; Nabar et al., 2004). İşbirliğine dayalı bir iletişim sistemi, sınırlı bir girişim alanı oluşturarak kapsama alanını iyileştirir, bağlantı güvenilirliğini artırır, iletim gücünü azaltır ve daha uzun pil ömrü sağlar (X. Chen et al., 2015; Katiyar et al., 2011).

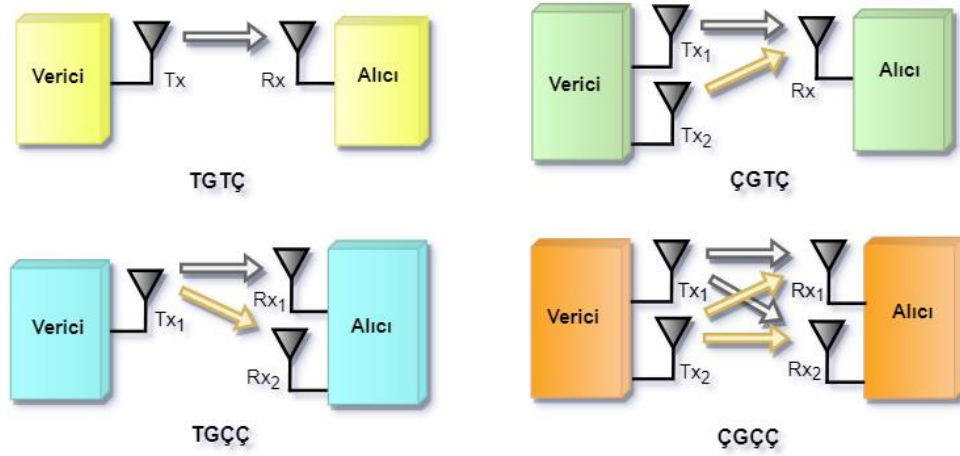
2.2.2. Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistem Özellikleri

Telsiz iletişim sistemlerinde karşılaşılan temel zorluk, yüksek hizmet kalitesinde yüksek veri hızlı telsiz erişim sağlayabilmektir. Spektrumun sınırlı bir kaynak olması, yayılma, çok

yollu sönümleme, diğer kullanıcıların neden olduğu girişim gibi olumsuz etkenler iletişim performansının kalitesini düşürmektedir. Bu bağlamda, spektral verimliliğinin artırılması ve bağlantı güvenilirliğinin büyük ölçüde iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu ihtiyaçları karşılamak için ve diğer yandan alıcı ve vericideki tek anten sisteminden kaynaklanabilecek sorunları çözmek amacıyla çoklu anten yapısına sahip ÇGÇÇ sistemler geliştirilmiştir (Bölcskei, 2006; Pappa et al., 2018). ÇGÇÇ sistemler, aynı verileri aynı bant genişliğindeki yollardan ve birden fazla anten üzerinden ileterek her sinyalin alıcı antene farklı bir yoldan ulaşmasını sağlar. Böylece sönümlemenin etkisinin azaltılarak güvenilir iletim gerçekleşir. Aynı zamanda ÇGÇÇ sistemler, kanal kapasitesi önemli ölçüde artırır, bant sınırlı kanallarda yüksek hızlarda kaliteli iletim sağlar ve bunu iletimde harcanan gücü artırmadan gerçekleştirir (Mishra et al., 2013).

ÇGÇÇ haberleşme sistemleri genellikle, uzaysal çoğullama ve uzaysal çeşitleme teknikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda, ÇGÇÇ sistemlerinin performans iyileştirmesi, çeşitlilik kazancı ve uzaysal çoğullama kazancı kullanılarak değerlendirilebilir. Sistemden beklenen sonuç, bant genişliğini attırmadan verimi çokça artırmak ise uzaysal çoğullama, sönümleme ile mücadele ederek güvenilirliği artırmak ise uzaysal çeşitleme gerçekleştirilir. Uzaysal çoğullamada, iletim antenlerinin her biri üzerinden farklı veri akışları aynı frekans bandını kullanarak iletilir ve alıcıda bu akışlar uzaysal demodülasyon kullanılarak birbirinden ayrılır. Böylece bant genişliği artırılmadan veri hızı artışı gerçekleşir. Uzaysal çeşitlemede ise iletim antenlerinin her biri üzerinden farklı veri akışları iletdikten sonra alıcıda tüm verici antenlerden gelen sinyallerin toplamından oluşan bir sinyal alınır. Burada daha iyi çeşitlilik kazancı elde etmek için çeşitlilik kodlaması kullanılabilir. Çeşitlilik kodlama yönteminde sinyal, vericide STC uygulanarak iletilir.

Antenlerin verici ve alıcı tarafta tekli ve çoklu olmasına göre bu sistemler farklı şekilde isimlendirilir. Şekil 2.2’de; verici ve alıcıda tek anten kullanılarak oluşturulan TGTÇ sistem, vericide çok ve alıcıda tek antene sahip Çok-Girişli Tek-Çıkışlı (TGÇÇ) sistem, vericide tek ve alıcıda çok antenli olan Tek-Girişli Çok-Çıkışlı (TGÇÇ) sistem, hem vericide hem alıcıda çok antene sahip olan ÇGÇÇ sistem tasarımları verilmiştir.

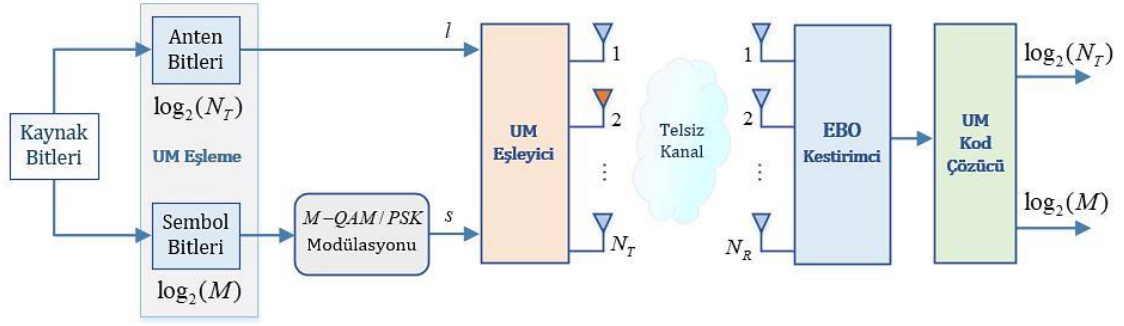


Şekil 2.2 TGTC, ÇGTÇ, TGÇÇ ve ÇGÇÇ sistem modelleri.

ÇGÇÇ teknolojisi uzun yıllardan beri geliştirilmekte olan bir sistemdir. Veri hızını artırmak ve sönümlenme etkisini engellemek için ÇGÇÇ sistemlerle birleştirilen UM yöntemi, günümüz haberleşme sistemleri açısından oldukça önemlidir. Uzak-alan iletimi açısından UM, spektral verimliliği arttırmak ve kanallar arası girişimin üstesinden gelmek için (Mesleh et al., 2008)'de önerilen yeni bir ÇGÇÇ tekniğidir (Younis et al., 2010). UM, antenlerin aynı anda iletme geçtiği çok antenli telsiz iletişim sistemleri üzerinde uzaysal çoğullama gösteren dikey Bell laboratuvarları katmanlı uzay-zaman (Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time, V-BLAST) sistemlerinden daha iyi performans gösteren alternatif bir tekniktir (Jeganathan et al., 2008; Wolniansky et al., 1998).

UM'nin temel ilkesi, bilgi bitlerinin geleneksel M 'li sembol kümelerinin elemanlarıyla birlikte anten indislerine de eşlenmesine dayanmaktadır (Jeganathan et al., 2008; Younis et al., 2010). Böylece bilgi sadece taşıyıcının genlik ya da faz değerleriyle değil aynı zamanda anten indisleriyle de taşınmaktadır. UM, her zaman diliminde yalnızca tek bir anteni etkinleştirmekte ve iletişim için telsiz kanalın benzersizlik ve rastgelelik özelliklerinden yararlanmaktadır (Wen et al., 2017). İletim için sadece bir anten etkin olduğundan kanallar arası girişim problemleri büyük ölçüde ortadan kalkmaktadır.

UM tekniğinde, verici anten biti ve sembol biti olmak üzere veri taşıyan iki bölüm bulunur: Vericiye gelen bilgi bitlerinin ilk kısmı, sembol iletimini gerçekleştirecek 1 anten indisini belirlerken diğer kısım, M 'li sembol alfabesinden iletilecek s sembolünü belirler. Bu anlatımı karşılayan, UM temelli bir ÇGÇÇ sistemi blok şeması, Şekil 2.3'te verilmiştir.

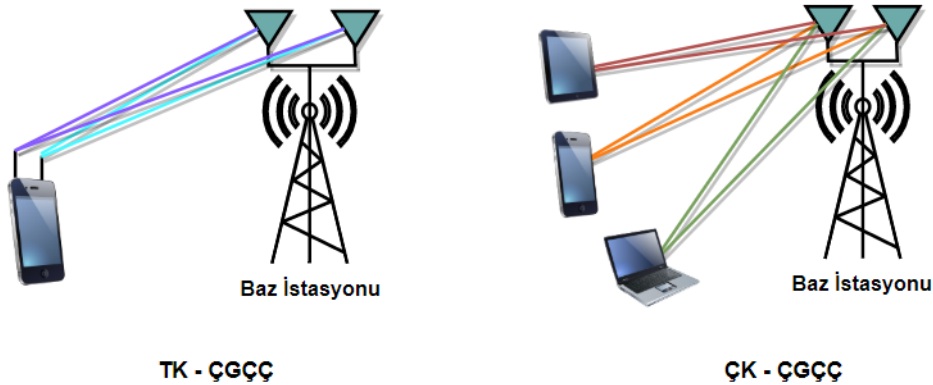


Şekil 2.3 ÇGÇÇ sistemi için UM şeması blok şeması.

N_T verici anten sayısı ve M modülasyon derecesi olmak üzere, UM'nin kanal kullanımı başına bit (bit per channel use, bpcu) cinsinden spektral verimliliği $\eta = \log_2(M) + \log_2(N_T)$ [bpcu] ile gösterilir ve burada, verimliliğinin verici anten sayısı ile logaritmik olarak arttığı ve böylece yüksek enerji verimliliği sağlandığı söylenebilir (Mesleh et al., 2008).

2.2.3. Tek Kullanıcı ve Çok Kullanıcı Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemler

TK-ÇGÇÇ sistemler, bir verici ve bir alıcı terminalin bulunduğu çok antenli ÇGÇÇ sistemleri ifade eder. Basit olarak yalnızca tek kullanıcı çoklu alımı ve gönderimi hedefler. TK-ÇGÇÇ çoklu veri akışını seri olarak iletir diğer bir deyişle aynı anda yalnızca bir cihaz arasında veri alıp göndermektedir. ÇK-ÇGÇÇ sistemler ise geleneksel ÇGÇÇ ile elde edilebilecek yüksek kapasiteyi alan bölmeli çoklu erişimin faydalarıyla birleştirir ve bu çoklu veri akışlarını paralel olarak aynı anda farklı cihazlara iletir. Başka bir ifadeyle birden çok kullanıcı çoklu alımı ve gönderimi hedefler. Şekil 2.4'te, tek ve çok kullanıcı ÇGÇÇ sistem yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.4 TK-ÇGÇÇ ve ÇK-ÇGÇÇ sistem modelleri.

ÇK-ÇGÇÇ, her biri tek ya da daha fazla anten üzerinden telsiz sinyal gönderen birden fazla kullanıcı ya da terminalin birbirleriyle iletişim kurduğu bir ÇGÇÇ telsiz iletişim teknolojisi. ÇK-ÇGÇÇ’de, bir Bİ, aynı zaman-frekans kaynakları üzerinde birden fazla kullanıcı ile aynı anda iletişim kurabilmektedir (Molisch et al., 2017). Çok antenli erişim noktaları, birden fazla telsiz kullanıcıyla iletişim kurarken toplam kapasite ve çeşitlilik artar ve girişim azalır (Spencer et al., 2004). Burada her aktif terminal tüm zaman frekans aralığını kullandığından kaynak tahsis basitleştirilir (Larsson et al., 2014). Aynı kaynak, farklı kullanıcılara tahsis edilirken huzmeleme yöntemi kullanılarak birbirlerine müdahale etmesi önlenir.

2.3. Yeni Nesil İletişim Ağları

Son birkaç yıldır gezgin veri trafiğinde çok ciddi bir artış yaşanmıştır. Akıllı cihazlardaki kullanıcı sayısının ve nesneler arası haberleşmeye dayanan teknolojilerin de yaygınlaşması ile birlikte yakın gelecekte özellikle gezgin internetin çok önemli bir yer tutacağı öngörülmektedir. Bunlarla beraber yakın gelecekte ele alınması gereken başlıca hedefler ve talepler, artan kapasite, iyileştirilmiş veri hızı, azalan gecikme süresi ve daha iyi hizmet kalitesi olarak söylenebilir. Bunları karşılamak için hücresel ağ mimarisinde ciddi iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Bu durum, gelecek nesil 5N, 6N ve ötesi haberleşme teknolojilerinden yeni beklentilerin oluşmasına sebep olmaktadır. Günümüzde 5N telsiz ağlar küreselleşirken araştırmacılar 6N ağlar üzerine araştırmalara başlamışlardır (Khiadani, 2020). Bu bağlamda tezin bu bölümünde, 5N, 6N ve ötesi iletişim ağları, özellikleri, uygulamaları, gereksinimleri açısından ele alınacaktır.

2.3.1. Beşinci Nesil Ağlar

Son zamanlarda elektronik cihazların ve bilgisayar bilimlerinin hızlı gelişimi ile yaygınlaşan birçok uygulama, telsiz ağların veri hacminde önemli bir artış yaşattır (Xiao et al., 2017). Büyük veri hacmine ek olarak, cihaz sayısı ve veri hızları katlanarak artmaya devam etmektedir. Günümüzde telsiz sistem geliştiricilerinin ilgisi, endüstri ile bütünleşmiş şekilde geniş kullanım alanı bulan 5N telsiz haberleşme teknolojisine doğru yönelmiştir. 5N’nin temel motivasyonu, gezgin veri trafiğindeki devasa artışı desteklemektir (Andrews et al., 2014). 5N iletişim sistemleri, hizmet, yer ve zaman fark etmeksizin kesintisiz ve kapsamlı bir iletişim gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır (Bangerter

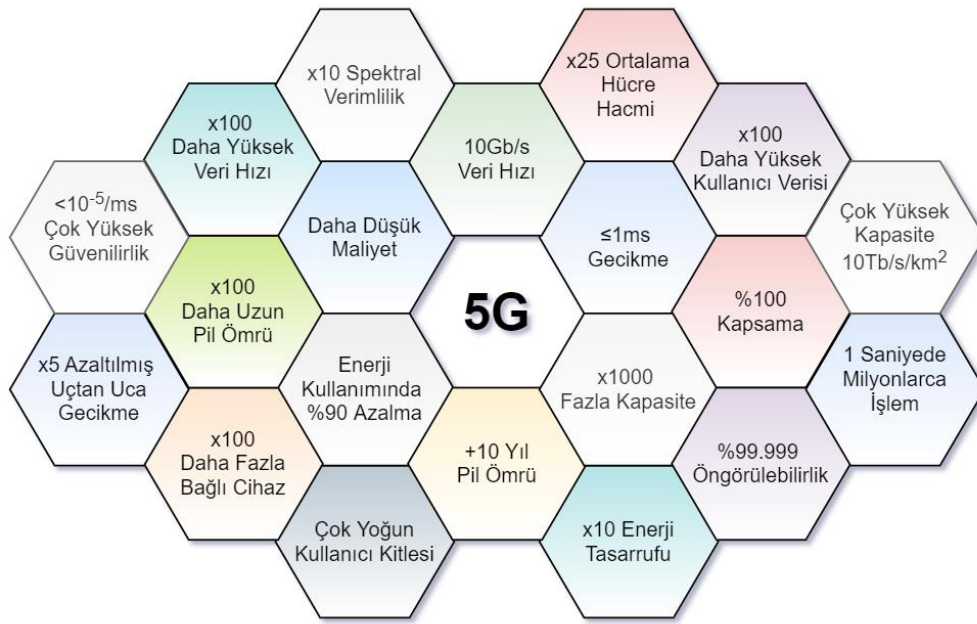
et al., 2014). Bu kapsamda, akıllı şebekeler, e-sağlık, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, otonom nakliye, cihazdan cihaza iletişim, makineden makineye iletişim, uzaktan dokunmatik kontrol ve cerrahi sistemler, nesnelerin interneti gibi yeni hizmetler için gecikme süresi, güvenilirlik ve veri hızı gibi önemli gereksinimler vurgulanmaktadır (Series, 2020; Shafi et al., 2017; Tariq et al., 2020). Şekil 2.5'te, 5N iletişiminin başlıca hizmet ve uygulama alanları verilmiştir.



Şekil 2.5 5N uygulama alanları.

5N, muazzam bant genişliği, çok fazla sayıda anten ve çok yüksek taşıyıcı frekansları içeren bir telsiz iletişim ağ modelidir. 5N, önceki dört neslin aksine bütünleştirici özelliktedir ve evrensel olarak yüksek oranlı kapsama alanı ve kusursuz bir kullanıcı deneyimi sağlaması amaçlamaktadır (Andrews et al., 2014). 4N'den 5N ağlara geçişte, 2N'den 3N'ye geçişe benzer şekilde gecikme süresi daha da azalmakta ve veri hızı artmaktadır (Khiadani, 2020). 5N telsiz ağlar, mmDalga iletişimi ve masif ÇGÇÇ sistemler gibi yeni teknolojileri kullanmaya olanak vererek yüksek kapasiteli ve yüksek hızlı hizmet ihtiyaçlarını karşılayabilmektedir. (T. Zhou et al., 2021). Masif ÇGÇÇ sistemler, 5N hücresel ağlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Andrews et al., 2014; Larsson et al., 2014). Mevcut olandan daha fazla ağ kapasitesi talebine ek olarak 5N'yi ilgi çekici kılan bir diğer faktör mmDalga spektrumuna geçiştir. Yüksek frekanslarda çalışmak, çok sayıda küçük hücrelerin çalışmasını gerektirir ve aralarındaki iletişimin de çok sık gerçekleşmesi gerekir. Nesnelerin interneti, robot teknolojileri ve tıbbi uygulamalar için çok sayıda çok küçük

hücre kullanmak oldukça önemlidir. Diğer bir deyişle, gezgin ağ üzerinden verinin canlı olarak sanal gerçeklik akışı, makinelerin ve aletlerin yüksek duyarlı bir şekilde uzaktan kontrol edilebildiği dokunsal internet gibi gelecek uygulamalar için daha düşük gecikme sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır (Andrews et al., 2014). Bu bağlamda, 5N'nin sağladığı en önemli yeniliklerden biri, 1ms'ye kadar düşen gecikme süresi ve kullanıcılara 20Gb/s'ye kadar varan yüksek veri iletim hızları sağlayabilmesidir (Zhang et al., 2019). Şekil 2.6'da, 5N'nin 4N'ye kıyasla avantajları ve hedeflenen temel gereksinimleri yer almaktadır.



Şekil 2.6 5N iletişim ağlarının genel özellikleri ve gereksinimleri.

5N teknolojisinin ortaya çıkışı, farklı seviyelerde performans ve bağlantı gereksinimleri talep eden birkaç kullanım durumu ortaya çıkarmıştır. ITU, 5N çerçevesindeki çeşitli uygulamaları ve hizmetleri eMBB, mMTC ve uRLLC olmak üzere üç temel kategoriye ayırmıştır (Xiao et al., 2017). Bu kategorilerin özellikleri ve belli başlı ilgilendiği uygulamalar aşağıdaki gibi açıklanabilir (Dahlman et al., 2020; Popovski et al., 2018):

- eMBB, 5N ağlarında önceki nesil gezgin ağlara kıyasla önemli ölçüde daha yüksek veri hızları, artırılmış kapasite ve geliştirilmiş kullanıcı deneyimleri sunmayı amaçlayan iletişim hizmetlerini ifade eder. Yüksek veri hızları ve gelişmiş ağ kapasitesi sunmaya odaklanarak kullanıcılar için kusursuz çoklu ortam deneyimi sağlamaktadır.

- mMTC, 5G ağlarında büyük sayıda bağlı cihazı desteklemek amacıyla tasarlanmış iletişim kategorisini ifade eder. mMTC, verimli kaynak tahsisi ve düşük güç tüketimini vurgulayarak çok sayıda IoT cihazının bağlantı ihtiyaçlarını karşılar. Bu cihazlar genellikle düşük veri hızı gereksinimlerine sahiptir ve düşük güç tüketimi gerektirirler. mMTC, kaynak tahsisini en iyilemeye ve büyük ölçekli IoT cihazlarının ölçeklenebilir bağlantısına odaklanmaktadır.
- uRLLC, 5N ağlarında son derece güvenilir ve düşük gecikmeli bağlantılara ihtiyaç duyulan iletişim hizmetlerini ifade eder. Bu hizmetler, iletişimdeki gecikme veya kesintilerin ciddi sonuçlar doğurabileceği kritik uygulamalar için önemlidir. Örnek uRLLC uygulamaları arasında otonom araçlar, uzaktan cerrahi ve endüstriyel otomasyon sistemleri bulunur. uRLLC, kesintisiz ve gerçek zamanlı iletişimi sağlamak için aşırı düşük gecikme, yüksek güvenilirlik ve katı hizmet kalitesi gereksinimlerine öncelik verir.

2030 yılına kadar 5N kapasitesinin nihai sınırına ulaşacağı tahmin edilmektedir (Tariq et al., 2020). Bu nedenle, 5N'nin sunduklarına kıyasla kullanıcı ihtiyaçlarının aşırı büyümesi, 6N iletişimi gerektirecektir ve araştırmacılar artık 5N'nin ötesinde yeni modeller aramaya ve 6N telsiz iletişim konusunda geniş çaplı araştırmalara başlamıştır. 5N gerçek bir telsiz dünya fikrini öne çıkarırken 6N, küresel kapsama alanı için 5N'yi uydu ağlarıyla entegre etmeyi önermektedir (X. Li et al., 2009). 6N çalışmaları kapsamında, telsiz ağlarda köklü bir dönüşüm gerçekleştirilerek önceki nesillerden önemli farklılıklar göstermesi beklenen sistemlerin tasarlanması hedeflenmektedir.

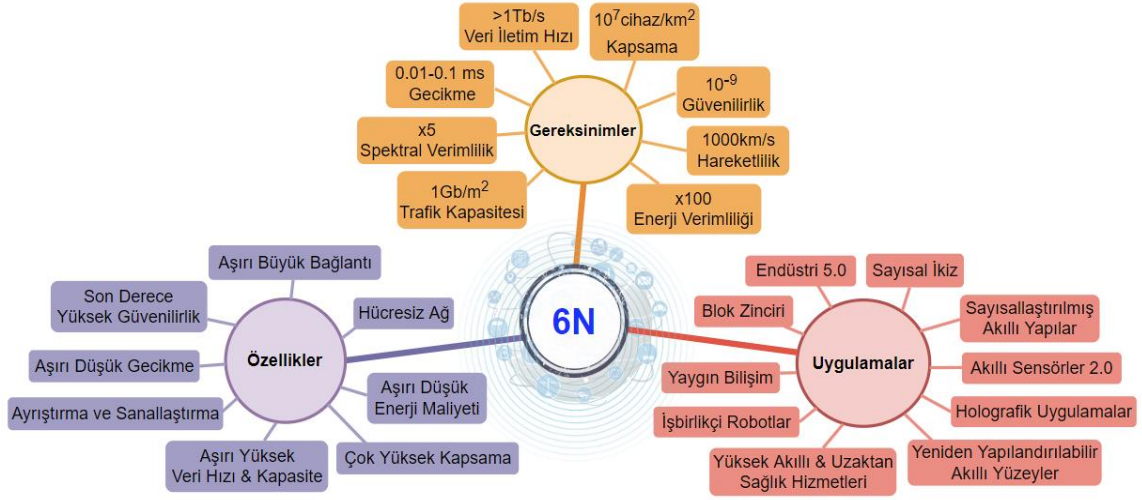
2.3.2. Altıncı Nesil ve Ötesi Ağlar

5N vizyonu üzerine kurulan 6N, süper akıllı ve çok sayıda otonom hizmetle şehirleri tamamen bağlantılı olacak şekilde güçlendirmeyi hedeflemekte ve 5N'yi takip ederek onu daha eksiksiz hale getirmeye çalışmaktadır (Khiadani, 2020; Tariq et al., 2020). Çok az insan müdahalesi ile karar verme yeteneğine sahip insansı robotların ve akıllı cihazların yaygın bir şekilde çoğalması insan yaşamına yeni bir boyut getirecektir (Tariq et al., 2020). Bu bağlamda, sağlık, ulaşım, eğlence, akıllı şehirler gibi insan yaşamıyla bağlantılı kilit alanların, hizmet kalitesini yükseltmesi gerekmektedir.

6N sistemlerinin temel özellikleri, yüksek sistem kapasitesi, yüksek veri hızı, düşük gecikme süresi, çok yüksek spektrum ve enerji verimliliği, yüksek güvenlik ve yüksek

hizmet kalitesi sağlamak olarak söylenebilir (Khiadani, 2020; Series, 2020). 6N telsiz iletişim sistemlerinde, çok fazla performans gerektiren dış merkezli uygulamaları desteklemek için yüksek frekanslarda geniş spektrum kullanılması gerekir (Huang et al., 2021). Bu sistemlerde en düşük veri hızı 1Tb/s'dir ve bunun 10Tb/s'ye kadar çıkması beklenmektedir (Boulogeorgos et al., 2018). Bu hızlara ulaşmak için 1THz'in üzerinde sinyaller iletilmelidir (Khiadani, 2020). Bu yüksek veri hızı ve yeni spektrum bantlarına yönelik artan talebi karşılamak için THz (0.1–10THz) bant iletişimi, aşırı yüksek hızlı ve düşük gecikmeli iletişim sağlayan gelecek vaat eden teknolojilerden biri olarak kabul edilmiştir (Huang et al., 2021). 5N için genel olarak GHz aralığında olan frekanslar, 6N'de THz seviyesine çıkmaktadır. Bu frekans spektrumunu kullanmak, frekansın doğası gereği, yeni bilgi işlem mimarileri, yeni çip tasarımı ve enerji kaynakları hakkında kapsamlı araştırma gerektirir ve neticede yeni bir alıcı-verici mimarisi tasarımı gereklidir (Huang et al., 2021; Khiadani, 2020; Zhang et al., 2019).

6N sistemleri genel olarak yeşil iletişim, akıllı ağlar, konum tanımlayıcısı, radar, navigasyon, kontrol ve algılama, gezgin kullanıcılar için hava durumu bilgi hizmetleri gibi uygulamalar üzerinde yoğunlaşmaktadır (X. Li et al., 2009; Tariq et al., 2020). Bunlarla birlikte 6N, akıllı yüzeyler, holografik huzme yapılandırma, lazer ve görünür ışık iletişimi, blok zinciri tabanlı spektrum paylaşımı, kuantum iletişimi, moleküler ve nano iletişim dahil olmak üzere umut vaat eden birçok teknolojiyle ilgilenmektedir (Hewa et al., 2020; Zhang et al., 2019). 6N, süper yüksek tanımlı videoları, düşük güç tüketimi ile yerleştirilebilir nano cihazlar ve nano sensörler tarafından elde edilen akıllı giyilebilir cihazları, vücut içi iletişim aracılığıyla nano nesnelerin internetini, su altı ve uzay iletişimini destekler ve masif internet gibi dikey 5N uygulamalarını geliştirir (Zhang et al., 2019). Ayrıca 6N'de, AI kavramı küresel olarak ele alındığından, cihazların tasarım, çalışma, boyut ve çip mimarisi açısından önemli bir model değişikliği yaşatması beklenmektedir (Khiadani, 2020; Tariq et al., 2020). Şekil 2.7'de, 6N sistemlerinin temel gereksinimleri, özellikleri ve uygulama alanları yer almaktadır.



Şekil 2.7 6N ağların temel gereksinimleri, özellikleri ve uygulama alanları.

Son zamanlarda ilgi, daha çok fiziksel kaynakların/altyapının sanallaşmasına ve yazılımsallaşmasına kaymıştır (Huang et al., 2021; Tariq et al., 2020). Böylece, içeriklerin akıllıca düzenlenmesi ve ağın ucunda kullanılabilir hale getirilmesi için gecikme süresi ve enerji verimliliği açısından çok büyük iyileştirmeler sağlanabilmektedir (Tariq et al., 2020). 6N, yüksek hızlı trenler ve uçaklar gibi yüksek hareket kabiliyetine sahip sistemler için oldukça düşük gecikme süresine (10-100 μ s) sahiptir (Khiadani, 2020; Tariq et al., 2020). Diğer yandan uzaktan ameliyat gibi uzaktan kontrol edilebilen uygulamaların gerçekleştirilebilmesi için gecikme süresi bu değerlerin altına düşmemelidir. Bu kapsamda, özellikle endüstriyel internet, sağlık hizmet uygulamaları ve dokunsal uygulamalar için verilerin neredeyse gerçek zamanlı olarak işlenmesi gerekmektedir (Zhang et al., 2019).

6N, ek bir serbestlik derecesi sağlayan akıllı meta malzeme tabanlı yapıları sayesinde, geleneksel telsiz kanalların aksine programlanabilir ve kontrol edilebilir bir telsiz ortamı yaratarak haberleşme sektöründe büyük bir değişim yaratmıştır (Tariq et al., 2020). YYAY olarak adlandırılan bu teknoloji, insan yapımı akıllı yüzeyler aracılığıyla yansıyan dalgaları işleyerek telsiz kanalın akıllı bir verici varlığa dönüştürülmesine izin verir (Yildirim et al., 2021). Böylece güçlü bir iletişim gerçekleşir, bağlantı kalitesi iyileşir, girişim büyük ölçüde önlenir ve gizlilik ve güvenlik artırılır.

5N, Dünya çapında hızla yayılırken, 6N konusunda çalışmaların başlanması yakın gelecekte 7N ve ötesi yeni nesil iletişim teknolojilerinin de günlük yaşama gireceği anlamına gelir (Mihret & Haile, 2021). Değişken teknolojiler ve standartlar nedeniyle, 6N

aktarımı/dolaşımı ileride bir sorun oluşturabilir. Ayrıca, frekans değiştirme/dolaşım, herhangi iki ağ ile sistem ve teknoloji arasındaki boşlukta gerçekleşmelidir ve navigasyon uyduları farklı ülkeler tarafından geliştirildiğinden, bu da uzay geçişini ve dolaşımını zorlaştırmaktadır (X. Li et al., 2009). Bu durum, uzayda dolaşımı amaçlayan 7N gezgin iletişim ağlarının oluşmasını sağlayacaktır (Ilya & Vyacheslav, 2021).

7N, küresel navigasyon uydusu sistemi, telekomünikasyon uydusu sistemi, dünya görüntü uydusu sistemi ve 6N hücresel sistem tarafından desteklenebilecektir. Küresel trafik uydusu sistemleri esas olarak bir kullanım konumunu belirlemekte; telekomünikasyon uydusu sistemi, kullanıcının iletişim gereksinimi için ses ve multimedya verilerini sağlamakta; Dünya görüntü uydusu sistemi, gezgin kullanıcılar için ekstra hizmet olarak hava durumu bilgilerini içermekte; 6N hücresel ağ sistemi, yerel ses ve multimedya veri hizmetleri sağlamak için bir telsiz yerel ağ sistemi olmaktadır (X. Li et al., 2009).

6N ve ötesi gelecek nesil telsiz ağların, veri hızları, gecikme süresi, cihaz bağlantısı, enerji verimliliği ve gelişmekte olan uygulamalar için sınırlarını genişletmesi bekleniyor. Bununla birlikte, gelecek nesillerin belirli özellikleri ve yetenekleri teknolojiye gelişmelere, endüstri gereksinimlerine ve toplumsal ihtiyaçlara bağlı olarak değişecektir.

2.4. Yeni Nesil İletişim Ağ Teknolojileri

Yüksek veri hızı ve spektrum kullanımına yönelik artan taleplerle birlikte, geleceğin telsiz sistemleri için yeni teknolojilere ve yeni tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Yeni nesil teknolojilerin sorunsuz bir şekilde uygulanabilmesi, çok daha yüksek veri hızlarında ve spektral etkinlikte iletişim hizmeti sunan yeni nesil haberleşme sistemlerinin geliştirilmesine bağlıdır. Robotikten yapay zekaya, akıllı otomasyondan nanoteknolojiye hayatı kolaylaştıracak her şey yeni nesil iletişim teknolojileri ile desteklenecektir. Bu bölümde, yeni nesil iletişim ağları için umut verici önemli teknolojilerden olan mmDalga iletişimi, masif ÇGÇÇ ve YYAY teknolojileri ele alınmıştır.

2.4.1. Milimetre Dalga Haberleşmesi

Telsiz veri trafiğindeki olağanüstü artış ve bunun sonucunda meydana gelen yetersiz bant genişliği sorunu, öngörülen gereksinimleri karşılaması için nispeten sıkışık olmayan daha yüksek frekans bantlarına başvurmayı gerekli kılmıştır (S. H. Hong et al., 2022). Hücresel

ağlar birkaç sene öncesine kadar sıkışık 6GHz altı mikrodalga frekans bantlarında çalışmaktaydı. Bu bantlar, elverişli yayılma özelliklerine sahip olsalar da yeni nesil gezgin hizmetlerin ve uygulamaların trafik talebini desteklemek için yetersiz kalmıştır (Chin et al., 2014; Q. C. Li et al., 2014; Rappaport et al., 2013). Dolayısıyla mevcut spektrumun artan kullanıcı talebini karşılayamaması, daha az kullanılan yüksek frekans bantlarında çalışmayı gerektirmiş ve bunların ışığında, mmDalga iletişimi, araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür (Ahmed et al., 2018; Q. C. Li et al., 2014).

mmDalga iletişim sistemleri, sundukları gigabit veri hızları ile 5N hücreli sistemler için mühim teknolojilerin başında gelmektedir (Alkhateeb et al., 2014) ve Gb/s veri hızlarına ulaşmak için son derece yüksek frekans olarak adlandırılan 30-300GHz gibi büyük bir bant genişliği kullanılabildiğinden, 5N'nin sunduğu birçok yeni uygulamayı ve hizmeti gerçekleştirebilmektedir (Niu et al., 2015; Xiao et al., 2017).

mmDalga iletişimi, çok sayıda antenin bir baz istasyonuna veya bir erişim noktasına konumlanmasına izin veren taşıyıcı dalga boyunun önemli ölçüde azalması olarak da tanımlanabilir (Tan et al., 2017). Çünkü, mmDalga sinyallerinin dalga boyu 6GHz'in altındaki frekanslarda çalışan geleneksel mikrodalga iletişim sinyallerinden çok daha kısadır (Xiao et al., 2017). Bu durum, mmDalga frekanslardaki antenlerin fiziksel boyutlarının çok küçük olması avantajını beraberinde getirir. Kısa dalga boyu sayesinde, küçük bir fiziksel alana çok sayıda anten yerleştirilebilir. (Z. Li et al., 2022). Bu sayede, üretim ve kurulum basit ve pratik bir hale gelmekte ve maliyet açısından da büyük kazanç sağlanmaktadır.

Çok sayıda anten kullanmanın diğer bir avantajı da yüksek kazançlarla verici ve alıcı için huzme yapılandırmayı mümkün kılmasıdır (Pi & Khan, 2011). Bu sayede, mmDalga haberleşmesi yüksek güvenlik ve gizlilik sağlamaktadır. Çünkü iletim aralığı sınırlı hale gelir ve dar bir ışın genişliğine sahiptir (Gao et al., 2016). Diğer ifadeyle, dalga boyunun azalması ile ışın şekillendirilebilir ve bu sayede kazançta artış yaşanabilir. Ayrıca, mmDalgaların bu özelliği onları radar ve haberleşme sistemleri için cazip hale getirmiştir (Pierucci, 2015).

Bunlarla birlikte, mmDalga sinyalleri mikrodalga sinyallerine kıyasla, daha yüksek frekanslarda çalışmanın bir sonucu olarak daha fazla zayıflamakta ve ciddi bir yol kaybına uğramaktadır (Busari et al., 2018; Gupta & Jha, 2015; Rappaport et al., 2013). Bu

bağlamda, mmDalga iletişim sistemlerinin en önemli dezavantajı, yüksek yol kaybına ve zayıflamaya maruz kalmasıdır (Niu et al., 2015). Bu olumsuz etkileri önlemek için hem vericide hem de alıcıda büyük anten dizileri kullanma fikrine dayanan masif ÇGÇÇ sistemler kavramı ortaya atılmıştır (Ahmed et al., 2017). Bu sistemler, mmDalga sinyallerinin yüksek yol kaybıyla mücadele etmek ve birden çok sinyalin eş zamanlı iletilmesi ile önemli kapasite kazancı elde etmek için umut verici bir çözüm olarak görülmüştür (Ahmed et al., 2018). Bu bağlamda, telsiz ağların kapsamını iyileştiren ve huzmeleme kazancını artıran bir teknolojidir (Dilli, 2022). Bu sistemler, yönlü iletişim özellikleriyle mmDalga iletişimindeki şiddetli yayılma kaybı ve girişimi büyük ölçüde önler ve böylece daha yüksek verim ve daha iyi enerji verimliliği sağlar (Gupta & Jha, 2015; Rappaport et al., 2013). Aynı zamanda masif ÇGÇÇ sistemleri, bir telsiz iletişim bağlantısının verici ve alıcısında büyük anten dizileri kullanarak yüksek spektral verimliliğe izin verir. Bu bağlamda, masif ÇGÇÇ tekniğini mmDalga iletişimi ile birleştiren mmDalga masif ÇGÇÇ adlı yeni bir tasarım sunulmuştur (Busari et al., 2018; Gao et al., 2016; Mir et al., 2019). Bu sistem, mmDalga bant genişliği ile diğer masif ÇGÇÇ anten dizilerinden elde edilen kazançları birleştiren yenilikçi bir teknolojidir.

2.4.2. Masif Çok-Girişli Çok-Çıkışlı Sistemler

Bir telsiz iletişim sisteminde, anten sayısı arttıkça teorik olarak sistem kapasitesi de artırmaktadır. Ekstra antenler, sinyali daha küçük bölgelere odaklayarak sinyal gücünde ve enerji verimliliğinde artış sağlamaktadır (Larsson et al., 2014). Fakat geleneksel ÇGÇÇ sistemler, sınırlı anten sayısındaki yapılarından ötürü 5N sistemlerin başarımlarını gereksinimlerinden biri olan yüksek çoğullama kazancını gerçekleştirememektedir. Bu bağlamda, hücre baz istasyonlarını çok sayıda antenle donatma temeline dayanan masif ÇGÇÇ, ağ kapasitesini ve kullanıcının 5N deneyimini geliştiren önemli bir teknolojidir. Masif ÇGÇÇ, ÇGÇÇ'ye dikey bir boyut kazandırmakta ve uzayda üç boyutlu huzme yapılandırmaktadır. Diğer bir deyişle masif ÇGÇÇ sistemler çok yönlü huzmeleme avantajına sahiptir.

Masif ÇGÇÇ teknolojisi, 5N'nin çok yüksek veri hızı, yüksek kapsama alanı, yüksek kapasite ve düşük gecikme süresine yönelik taleplerini karşılamak için en umut veren çözümlerden biridir ve 5N gezgin iletişim ağları için enerji ve spektrum açısından daha yüksek güvenlik, kararlılık ve verimlilik sunmayı amaçlamaktadır. Genel olarak, masif

ÇGÇÇ, enerji açısından verimli, güvenli ve spektrumu verimli bir şekilde kullanacak olan gelecekteki geniş bant ağların geliştirilmesi için bir kolaylaştırıcıdır. Bu nedenle, geleceğin dijital toplum altyapı yapısı için bir kolaylaştırıcı olarak görülmektedir (Larsson et al., 2014).

Masif ÇGÇÇ sistemler, büyük anten dizileri sayesinde aynı zaman ve frekans aralığında çok sayıda kullanıcıya hizmet edebilme yeteneğine sahiptir (H. V. Cheng et al., 2017). Şekil 2.8’de gösterildiği gibi geleneksel ÇGÇÇ sisteminden farklı olarak masif ÇGÇÇ sistemi, yayılan radyo sinyallerini antenleri kontrol ederek dar bir huzmede yoğunlaştırmakta ve belirlenen bir kullanıcıya odaklamaktadır. Böylece kullanıcılar arasındaki girişim azalırken spektral ve enerji verimliliği önemli derece iyileştirilmektedir.



Şekil 2.8 Geleneksel ÇGÇÇ ve masif ÇGÇÇ sistemler.

Masif ÇGÇÇ, doğası gereği huzmeleme, çeşitleme ve çoğullama açısından çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bu sistemler, yol kaybıyla mücadele etmek için önemli dizi kazanımları sağlamakta ve güvenilir iletişim bağlantıları kurmaktadır. Masif ÇGÇÇ, çok sayıda antenden kaynaklanan yüksek serbestlik derecelerini kullanarak spektral verimliliği artırabilmekte ve yüksek çözünürlüklü huzmeleme yardımıyla enerjiyi yalnızca istenen terminallere yönlendirerek girişimi bastırabilmektedir (Larsson et al., 2014). Böylece telsiz kanaldaki sönümlenme ve gecikme azaltılabilmektedir (Busari et al., 2018).

Masif ÇGÇÇ sistemler, yüksek güç kazancı sağlayarak aynı zamanda alınan sinyalin gücünü önemli derecede artırmaktadır. Bir masif ÇGÇÇ sisteminde, Bİ'deki mevcut alandan yararlanmak için, yaygın olarak düzgün anten dizilimlerinden yararlanılmaktadır (Tan et al., 2017; X. Wu et al., 2017). Büyük anten dizileri sayesinde, anten sayısı arttıkça

iletim gücü azalmakta ve aynı zamanda hizmet kalitesi korunmaktadır (Ngo et al., 2013). Bu sistemlerde, anten elemanları son derece düşük güç kullanır ve düşük güç gereksinimi sayesinde bu sistemler pahalı ekipman gerektirmezler (Gupta & Jha, 2015; Larsson et al., 2014). Böylece yüksek frekanslarda çalışan gezgin sistemlerin gerçekleştirilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Bu sistemlerin enerji verimliliğindeki potansiyel kazançları ve önemli ölçüde güç tasarrufu sağlaması onu cazip kılan başlıca özellikleridir. Enerji verimliliğindeki artış, çok sayıda antenle, enerjinin küçük bölgelere oldukça keskin bir şekilde odaklanabilmesiyle elde edilir (Larsson et al., 2014). Masif ÇGÇÇ'nin sağladığı bu kazançlar, mmDalga frekanslarında karşılaşılan ciddi yol kayıplarının üstesinden gelmek için kullanılabilir (Dilli, 2021; Sun et al., 2018). Bu bağlamda, mmDalga bantları için masif ÇGÇÇ sistemleri çok önemlidir ve gelişmiş bağlantı güvenilirliği için birbirlerine kolayca entegre edilebilir (Gao et al., 2016; Molisch et al., 2017).

Bİ ve gezgin istasyonun (Gİ), düzgün doğrusal dizi (DDD) ile donatıldığı bir mmDalga masif ÇGÇÇ iletişim sistemini ele aldığımızda, Bİ ile k 'ıncı kullanıcı arasındaki $\mathbf{H}_k$ kanalı, Saleh-Valenzuela (SV) kanal modeline göre aşağıdaki gibi modellenenebilir (Bahingayi & Kyungchun, 2023; Ge et al., 2022; X. Wu et al., 2017):

$$\mathbf{H}_k = \sqrt{\frac{N_T N_R}{L_k}} \sum_{l=1}^{L_k} \alpha_l^k \mathbf{a}_R(\varphi_l^k) \mathbf{a}_T^H(\theta_l^k), \quad (2.1)$$

burada, N_T ve N_R sırasıyla verici ve alıcı anten sayısını gösterir. Hedeflenen k kullanıcıyı Gİ olarak varsayarsak: L_k , Bİ ile Gİ arasındaki toplam yol sayısını, α_l^k , Bİ-Gİ arasındaki l 'inci yolun karmaşık yol kazancını, $\theta_l^k \in [0, 2\pi)$ ve $\varphi_l^k \in [0, 2\pi)$ sırasıyla Bİ-Gİ arasındaki l 'inci yolun ayrılış ve varış açılarını temsil eder. $\mathbf{a}_T(\theta_l^k)$ ve $\mathbf{a}_R(\varphi_l^k)$ sırasıyla Bİ-Gİ arasındaki l 'inci yol için θ_l^k ve φ_l^k açılara göre oluşturulmuş verici ve alıcı dizi yanıtını diğer ifadeyle yönlendirme vektörünü ifade eder ve şu şekilde elde edilir (Ayach et al., 2014; Gampala & Reddy, 2016; Ge et al., 2022; Thurpati & Muthuchidambaranathan, 2022):

$$\begin{aligned}\mathbf{a}_T(\theta_l^k) &= \frac{1}{\sqrt{N_T}} \left[1, e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta_l^k)}, \dots, e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} (N_T-1) \sin(\theta_l^k)} \right]^T, \\ \mathbf{a}_R(\varphi_l^k) &= \frac{1}{\sqrt{N_R}} \left[1, e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\varphi_l^k)/\lambda}, \dots, e^{j\frac{2\pi d}{\lambda} (N_R-1) \sin(\varphi_l^k)} \right]^T,\end{aligned}\tag{2.2}$$

burada, λ dalga boyunu, d ise anten elemanları arası uzaklığı ifade eder ve genellikle λ , $d=\lambda/2$ seçilir (Ge et al., 2022).

Birçok avantajına rağmen mmDalga masif ÇGÇÇ sistemlerin uygulanması bazı zorlukları beraberinde getirir. Bu sistemlerin gerçekleştirilmesinde uygulanabilirlik ve maliyet açısından bazı kısıtlamalar vardır. 6GHz altı sistemlerde, ÇGÇÇ dizileri tamamen sayısaldır ve her bir anten elemanı bir RF zincirine bağlıdır (Ahmed et al., 2017; Xiao et al., 2017). Çok sayıda RF zinciri, maliyeti ve enerji tüketimini artırmaktadır (Z. Li et al., 2022; Molisch et al., 2017; Pi & Khan, 2011). Büyük anten dizilerine sahip mmDalga masif ÇGÇÇ sistemleri, tamamen sayısal huzmeleme kullanmak için geleneksel telsiz iletişim sistemlerine kıyasla çok daha fazla analog sayısal dönüştürücü (ASD) ile sayısal analog dönüştürücü (SAD) kullanır ve çok sayıda RF zinciri gerektirir, bu nedenle sistemin hem maliyeti artmakta hem de yüksek güç tüketimi ihtiyacı doğmaktadır (Ahmed et al., 2017; Molisch et al., 2017). Bu sorunun üstesinden gelmek için ise hibrit huzmeleme tekniği önerilmiştir (Ahmed et al., 2017, 2018; Dilli, 2022). mmDalgasordum masif ÇGÇÇ sistemlerde, hibrit ön kodlama/birleştirme şeması kullanılarak, donanım karmaşıklığı, enerji tüketimi ve maliyeti azaltılmaktadır (Dilli, 2022). HH, sayısal huzmeleme ve analog huzmeleme tekniklerini birleştirerek RF zincirlerinin sayısını önemli ölçüde azaltarak enerji verimliliğinde büyük artış sağlamaktadır (Ahmed et al., 2018; Bogale & Le, 2014; Elbir et al., 2021). Bu bağlamda, HH, mmDalga iletişiminin uygulama maliyetlerini azaltmak için kilit bir teknolojidir. Ayrıca HH, tamamen sayısal huzmelemeye çok yakın bir spektral verimliliğe sahiptir. HH'nin masif ÇGÇÇ sistemlerdeki amacı, tam sayısal huzmeleme sistemi performansına yaklaşabilecek toplam hızı en üst düzeye çıkarmaktır (Dilli, 2022). Hibrit huzmeleme kavramı Bölüm (3.2.3)'te ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

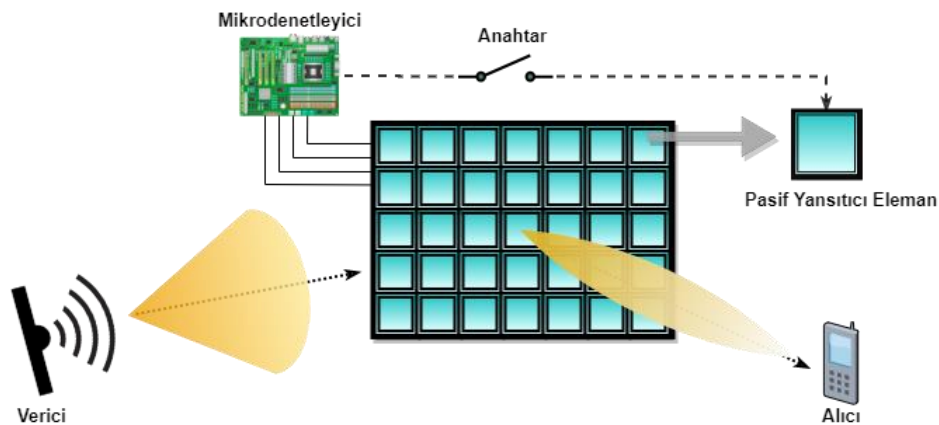
2.4.3. Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzey Teknolojisi

6N'nin beraberinde getirdiği önemli teknolojilerin başında YYAY teknolojisi yer almaktadır. YYAY, minimum enerji tüketimi ile telsiz ağların iletişim kalitesini artıran ve

gelecek telsiz iletişim ağılar için umut verici yenilikçi bir teknolojidir (Yan et al., 2020). YYAY, telsiz iletişimdeki maliyet ve enerji tüketimi sorunlarını çözmekte etkin bir rol oynamaktadır (Dang et al., 2020; T. Zhou et al., 2021). Aynı zamanda sürdürülebilirlik, ekonomik ve çevresel açıdan sağladığı avantajlarla da son yıllarda hem akademide hem endüstride oldukça ilgi çekmiştir (He & Yuan, 2020).

YYAY kavramı ilk olarak Hu ve arkadaşları tarafından (Hu et al., 2018)'de önerilmiştir. Yazarlar, telsiz sistemlerin verimliliğini ve kapasitesini artırmak için ayarlanabilir özelliklere sahip geniş yüzeyleri kullanma fikrini araştırmışlardır. Yansıtıcı elemanları akıllıca yapılandırarak, YYAY'nin sinyal yayılımını etkili bir şekilde kontrol edebildiğini, girişimi azaltabildiğini ve kapsama alanını iyileştirebildiğini göstermişlerdir.

Şekil 2.9'da gösterildiği gibi bir YYAY, mikrodenetleyici vb. akıllı bir kontrolörden ve çok sayıda düşük maliyetli neredeyse pasif yeniden yapılandırılabilir yansıtıcı elemanlardan oluşan elektromanyetik iki boyutlu bir yüzeydir (Q. Wu & Zhang, 2020). Meta yüzey olarak adlandırılan bu yansıtıcı yüzeyler, elektromanyetik dalgaların genliğini, fazını ve kutuplanmasını kontrol ederek huzme yönlendirme gerçekleştirmek için tasarlanan yapay malzemelerdir (Ayanoglu et al., 2022). YYAY sistemlerde, mikrodenetleyici, yansıyan sinyalin fazını ayarlamak için her bir elemanı ortaklaşa kontrol etmektedir. Böylece, yansıyan sinyal istenen yönde eş fazlı bir şekilde iletilir ve üç boyutlu pasif huzme yapılandırması gerçekleşir (T. Zhou et al., 2021). Bu sayede, alınan sinyal enerjisi artar, kapsama alanını genişler ve sönmüleme büyük oranda azalır. Dolayısıyla telsiz ağların iletişim kalitesi artar.



Şekil 2.9 YYAY yapısı.

YYAY teknolojisi, telsiz iletişimde çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ayanoglu et al., 2022; Wang et al., 2023; Q. Wu & Zhang, 2020) :

- Herhangi bir RF zinciri iletimine ihtiyaç duymazlar. Standart RF alıcı-vericiler ile karşılaştırıldığında, daha düşük maliyet, boyut, ağırlık ve güç tüketimi ile uygulanırlar ve telsiz ortamı, akıllı programlanabilir bir yapıya dönüştürürler. Ayrıca, her YYAY elemanının ayrı ayrı kontrolü için gerekli olan yoğun kablolama ve sinyal yollarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır ve böylece donanımda önemli bir azalma sağlarlar.
- Telsiz ortamlardaki engellerin getirdiği sınırlamaların üstesinden gelme yeteneğine sahiptirler; sinyalleri akıllıca yeniden yönlendirip yansıtarak bina, ağaç vb. diğer fiziksel engelleri etkili bir şekilde atlayabilirler. Bu yeteneği, özellikle yüksek yoğunluklu dağıtımların olduğu kentsel ortamlarda faydalıdır. Böylece, daha önce ulaşılması zor olan alanlarda geliştirilmiş kapsama alanı sağlar ve yüksek sinyal gücü sağlayarak kullanıcılar için daha güvenilir ve sorunsuz bir iletişim gerçekleştirirler.
- Telsiz ağların kapasitesini önemli ölçüde artırabilirler. Yayılma ortamını yöneterek, ek uzaysal boyutlar yaratabilir ve çok kullanıcı girişi sağlarlar. Bu uzaysal çoğullama yeteneği, birden fazla kullanıcının aynı frekans kaynakları üzerinden aynı anda veri iletmeye ve almasına izin vererek ağ kapasitesinin artmasına yol açar.
- Yüksek enerji verimliliği sağlarlar; sinyal yayılımını akıllıca kontrol ederek iletişim için gereken güç tüketimini azaltırlar. Sinyal kayıplarını en aza indirerek telsiz bağlantı kalitesini en iyi duruma getirirler ve böylece telsiz cihazların enerji tüketimini azaltabilirler. Bu özellik, telsiz ağların sürdürülebilirliği ve iletişim altyapısının genel enerji verimliliği için oldukça önemlidir.
- Pratik iletişim senaryolarında esnek bir şekilde uygulanabilirler; örneğin bina cephelerine, dış mekan veya iç mekan duvarlara kolayca yerleştirilebilirler.

3. ANTEN DİZİLERİ VE HUZME YAPILANDIRMA

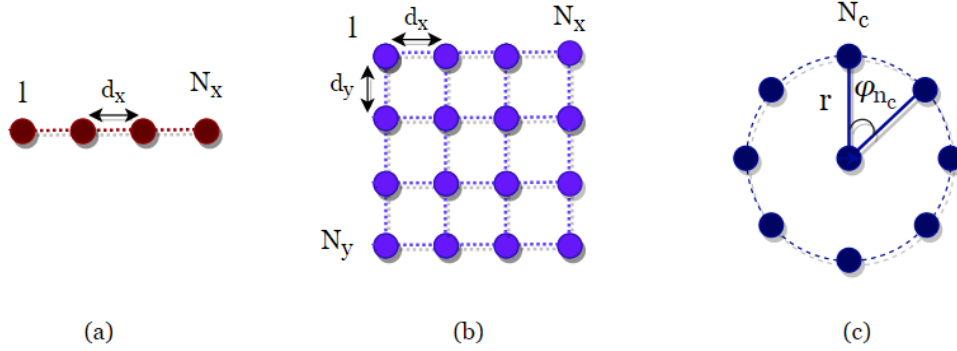
Bu bölümde, düzgün dağılımlı anten dizileri ve huzme yapılandırma teknikleri açıklanmıştır. Bu teknikler, yeni nesil ağ teknolojilerinin ayrılmaz bir parçası olarak görülmektedir (Dilli, 2022). mmDalga masif ÇGÇÇ sistemlerin baz istasyonundaki mevcut alandan yararlanmak için, anten elemanlarının tekdüze düzenlenmesi gerekir; bu da farklı şekillerde anten dizilimi tasarımlarına yol açar (Tan et al., 2017). Bununla beraber, huzme yapılandırma tekniğinde, yönlü sinyal iletimi ve alımı için, bahsedilen bu anten dizileri yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1. Düzgün Anten Dizileri

Antenler, elektronik sinyalleri çok düşük kayıpla elektromanyetik dalgalara verimli bir şekilde dönüştüren telsiz iletişim sistemlerinin önemli bir parçasıdır (Constantine A. Balanis, 2008). Anten dizileri ise radyo dalgalarını iletmekte ve almakta kullanılan, farklı akımlarda yaratacak şekilde birbirine bağlanan bir dizi ayrık antenden oluşur. Anten dizisi, anten elemanlarından ayrı ayrı elde edilenden daha iyi yön özelliği ile tek bir anten gibi hareket eder, diğer deyişle huzme şekillendirme sağlar ve dolayısıyla daha yüksek anten kazancı elde edilir (Busari et al., 2018; Constantine A. Balanis, 2008). Anten dizileri, değişken ışıma örüntüsü, yüksek kazanç ve yönlülük yeteneklerine sahip olmalarının yanı sıra uygun maliyetli taşınabilir olmalarından dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Taşıtlara, uydulara ve baz istasyonlarına kolayca monte edilebilir ve telsiz iletişimin artan kanal ihtiyacının karşılanmasında önemli bir rol oynamaktadırlar.

Telsiz iletişim sistemlerindeki temel anten yapılandırmaları, düzgün doğrusal dizi, düzgün düzlemsel dizi ve düzgün doğrusal diziler olarak üçe ayrılır (Tan et al., 2017; X. Wu et al., 2017). Şekil 3.1’de, bu anten dizilerinin geometrik yapıları verilmiştir. Bu diziler, huzme yapılandırma ve gelişmiş yönlülüğün faydalarından yararlanarak, telsiz iletişim teknolojilerinin ilerlemesine önemli ölçüde katkıda bulunmuşlardır ve aynı zamanda verimli ve güvenilir iletişim sağlamaktadırlar (Ayach et al., 2014; X. Wu et al., 2017). Anten dizileri tasarlanırken, eleman aralığı, eleman sayısı, çalışma frekansı, radyasyon modeli gereksinimleri gibi etkenlere dikkat edilmelidir, bunun sebebi farklı anten elemanları arasındaki mesafenin, ışının yönünü ve kazancını değiştirebilmesidir (Hemadneh et al., 2018). Ayrıca bir iletişim sisteminde kullanılacak olan dizinin türü, istenen radyasyon

modeli, iki boyutlu huzme oluşturma ihtiyacı ve mevcut fiziksel alan gibi uygulamanın özel gereksinimlerine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.1 Düzgün anten dizilerinin geometrik yapıları: (a) düzgün doğrusal dizi, (b) düzgün düzlemsel dizi, (c) düzgün dairesel dizi.

3.1.1. Düzgün Doğrusal Dizi

Düzgün doğrusal dizi, antenlerin birbirinden eşit uzaklıkta ve düz bir çizgide tekdüze şekilde düzenlendiği bir anten dizisi türüdür (Constantine A. Balanis, 2008; Ge et al., 2022; X. Wu et al., 2017). DDD'ler, ışın biçimlendirme ve yönlülük için dizi boyunca doğrusal olarak değişen bir faz sağlamaktadırlar. Bu diziler, radar sistemlerinde, telsiz iletişim sistemlerinde ve radyo astronomisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

DDD'ler tasarlanırken, tek boyutlu bir anten dizisi olmaları sebebiyle yatay açı (θ) ve dikey açıdan (φ) yalnızca biri dikkate alınmaktadır. Elemanlar arasındaki mesafe d_x ve dalga boyu λ olmak üzere, N elemanlı bir DDD aşağıdaki gibi modellenmektedir (Alkhateeb et al., 2014; Ayach et al., 2014; Busari et al., 2018):

$$\mathbf{a}(\theta) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1, \dots, e^{jn_x \frac{2\pi d_x \sin(\theta)}{\lambda}}, \dots \right]^T, \quad (3.1)$$

burada, n_x , bir anten elemanının indisidir ve $0 \leq n_x \leq N_x - 1$ ile sınırlıdır.

3.1.2. Düzgün Düzlemsel Dizi

Düzgün düzlemsel dizi, bir dizi anten elemanının iki boyutlu bir düzlemde düzenlendiği bir anten dizisi yapılandırmasıdır. Anten elemanları hem yatay hem de dikey yönde düzgün bir şekilde dağılmıştır (Constantine A. Balanis, 2008; X. Wu et al., 2017). Antenlerin düz bir

çizgide düzenlendiği bir DDD'nin aksine bir düzgün düzlemsel dizi, huzme oluşturma açısından ek serbestlik dereceleri sunmaktadır. Bununla birlikte, masif ÇGÇÇ sistemlerde uzamsal çoğullama ve daha yüksek kapasite sağlamaktadır. Bu diziler, daha çok uydu iletişim sistemleri, aşamalı dizi radarlar ve kablosuz iletişim ağları gibi huzme oluşturma veya uzamsal filtreleme gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Kabaoğlu et al., 2003).

x ve y eksenlerindeki anten elemanları sırasıyla N_x ve N_y olan ve bunlara karşılık gelen anten aralıkları d_x ve d_y olan bir düzgün düzlemsel dizi şu şekilde modellenmektedir (Ayach et al., 2014; Hemadeh et al., 2018; Zhu et al., 2021) :

$$\mathbf{a}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{N_x N_y}} \left[1, \dots, e^{j[n_x \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin(\theta) \cos(\varphi) + n_y \frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin(\theta) \cos(\varphi)], \dots \right]^T, \quad (3.2)$$

burada, $\frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin(\theta) \cos(\varphi)$ ve $\frac{2\pi}{\lambda} d_y \sin(\theta) \cos(\varphi)$ sırasıyla anten dizisinin yatay ve dikey bileşenlerini temsil eder. Toplam anten sayısı $N = N_x N_y$ 'dir. n_x ve n_y , sırasıyla x ve y eksenlerindeki anten elemanı indisleridir ve $0 \leq n_x \leq N_x - 1$ ve $0 \leq n_y \leq N_y - 1$ olarak sınırlıdır.

3.1.3. Düzgün Dairesel Dizi

Düzgün dairesel dizi, bir dizi anten elemanının dairesel bir şekilde düzenlendiği bir anten dizisi yapılandırmasıdır (Constantine A. Balanis, 2008; X. Wu et al., 2017) . Anten elemanları, dairenin çevresi boyunca eşit olarak dağılmıştır. Bu diziler, çok yönlü kapsama gerektiren uygulamalarda ve telsiz iletişim sistemlerinde, gezgin ağlarda ve uydu iletişim sistemlerinde yön bulma amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır.

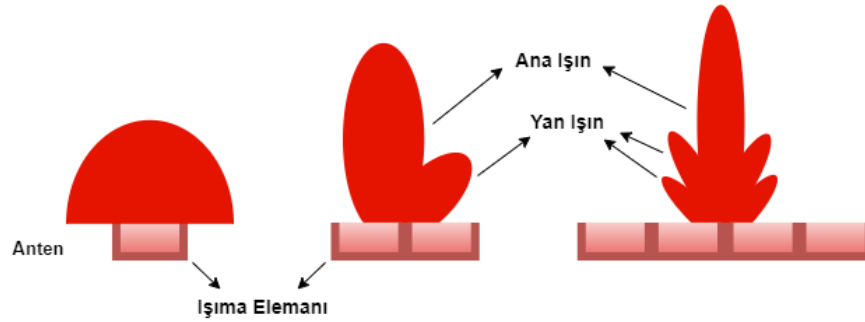
Düzgün dairesel dizilerde ise diğer iki yöntemin aksine daha farklı bir geometriye sahiptir. N_c adet anten elemanlarının r yarıçaplı bir daire üzerinde φ_{n_c} açısıyla eşit aralıklarla dağıtıldığı bir düzgün dairesel dizi şu şekilde modellenmektedir (Hemadeh et al., 2018; X. Wu et al., 2017):

$$\mathbf{a}(\theta, \varphi) = \frac{1}{\sqrt{N_c}} \left[\dots, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r \sin(\theta) \cos(\varphi - \varphi_{n_c})}, \dots \right]^T, \quad (3.3)$$

burada, $\varphi_{n_c} = \frac{2\pi}{N_c}(n_c - 1)$ 'dir ve $0 \leq n_c \leq N_c - 1$ kısıtlamasına tabiidir.

3.2. Huzme Yapılandırma

Huzme yapılandırma, bir sinyali aynı dalga boyu ve fazda iletirken belirli bir yöne doğru şekillendirme temeline dayanır. Sinyalin enerjisini belirli bir yöne odaklayarak, sinyal gücünü artırmakta, girişimi azaltmakta ve genel sistem performansını iyileştirmektedir (Dahlman et al., 2020; Swindlehurst et al., 2014). Genellikle telsiz ağlarda bağlantının kalitesini ve güvenilirliğini artırmak için kullanılır. Geleneksel telsiz iletişim sistemlerinde huzme yapılandırma, istenen bir alıcıya veya hedefe yönlendirilebilen odaklanmış ışınlar oluşturmak için birden fazla anten kullanılır.



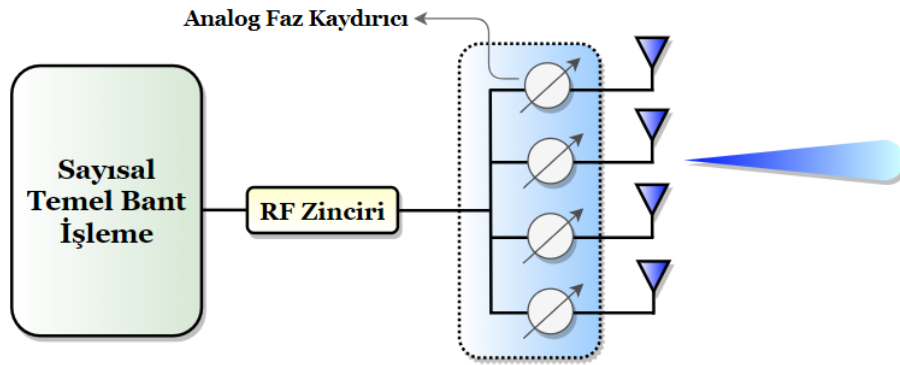
Şekil 3.2 Tek elemanlı, iki elemanlı ve dört elemanlı huzme yapılandırma.

Şekil 3.2'den görüldüğü üzere, huzme yapılandırmada hedefe yönelik bir akış oluşturmak için birden fazla ışıma elemanı bir araya gelir ve artan ışıma elemanı ile sinyal daha dar bir huzme (ışın) ile iletilir. Burada, ana ışınlar ek olarak yan ışınlar da vardır; yan ışınlar, ana ışını farklı yönlerde oluşturan, sinyalin istenmeyen ışıınımları olarak tanımlanabilir. Ayrıca, anteni oluşturan ışıma eleman sayısının arttıkça ana huzmenin de o oranla odaklandığı ve yan lobların zayıfladığı şekilden çıkarılabilecek farklı bir sonuçtur (Constantine A. Balanis, 2008; Xiao et al., 2017).

Huzme yapılandırması temelde analog, sayısal ve hibrit huzme yapılandırması olmak üzere üçe ayrılır. Bir sistemde hangi tür huzme yapılandırmasının kullanılacağı, oluşturulacak sistemin özel gereksinimlerine ve istenen performans hedeflerine göre seçilmektedir.

3.2.1. Analog Huzme Yapılandırma

Analog huzme yapılandırmasındaki temel fikir, her bir anten tarafından iletilen sinyalin fazını ve genliğini bir analog faz kaydırıcı aracılığıyla kontrol etmektir (Alkhateeb et al., 2014; Ayach et al., 2014). Basitliği ve düşük hesaplama gereksinimleri ile analog huzme yapılandırma tekniği, çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır (Bogale & Le, 2014). Şekil 3.3'ten görüldüğü üzere analog yapılandırması, bir veri akışını iletmek için yalnızca tek RF zinciri kullanır. Bu bağlamda, tamamen analog mimari kullanmak, düşük donanım maliyeti ve az enerji tüketimi gibi avantajlar sağlamaktadır.



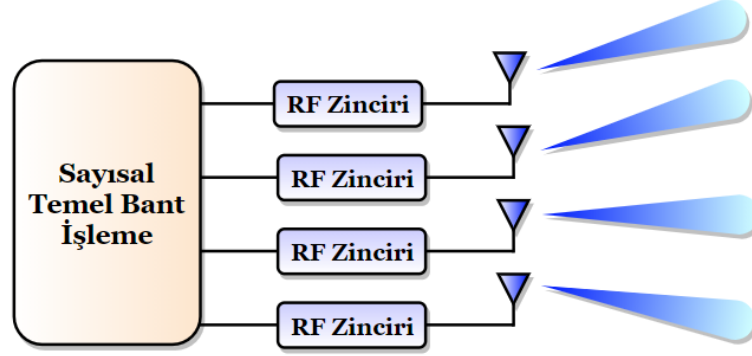
Şekil 3.3 Analog huzme yapılandırma blok şeması.

Analog huzme yapılandırma, cazip avantajlarının yanı sıra sınırlı uyarlanabilirliğe sahiptir ve bir faz kaydırıcının genliği sabit olduğundan, performansı sayısal olandan daha düşüktür (Ayach et al., 2014; Hemadeh et al., 2018). Çünkü analog faz kaydırıcılar, RF huzme yapılandırıcılarındaki elemanların sabit genliği ve değişen fazların yalnızca nicemlenmiş değerleriyle ilgilendiğinden, sinyalleri kısmen ayarlayabilmekte ve daha fazla sinyal işleme olanağını sınırlamaktadırlar (Dilli, 2022; Z. Li et al., 2022). Dolayısıyla ışını kanal koşullarına ayarlamak zorlaştığından bu durum performans kaybına yol açar.

3.2.2. Sayısal Huzme Yapılandırma

Sayısal huzme yapılandırma, birden fazla anten elemanı ve karmaşık sinyal işleme algoritmaları kullanarak ışınlar oluşturur ve yönlendirir (Ahmed et al., 2017; Bogale & Le, 2014). Gelişmiş sinyal işleme algoritmaları kullanarak analog huzme yapılandırmaya kıyasla daha fazla uyarlanabilirlik ve esneklik sağlar (Ahmed et al., 2017; Constantine A. Balanis, 2008). Şekil 3.4'te sayısal huzme yapılandırma şeması verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, sayısal huzme yapılandırmasında her anten elemanı başına bir RF zinciri

kullanılır. Her antenin özel bir RF-temel bant zincirine sahip olmasını gerektiren sayısal huzme yapılandırma, güç tüketimi ve donanım maliyeti yüksek bir tekniktir (Dilli, 2022; Hemadeh et al., 2018; Molisch et al., 2017).

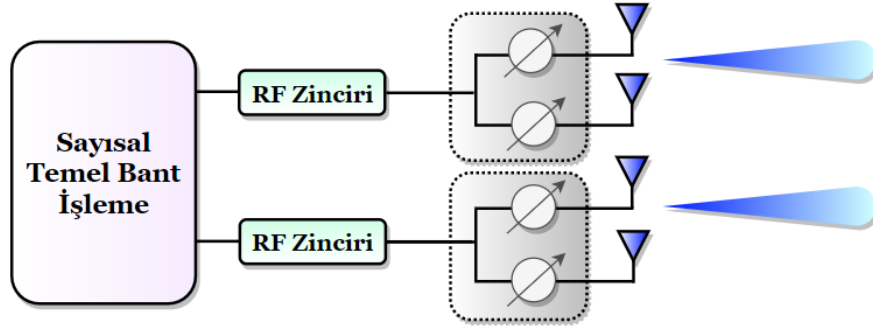


Şekil 3.4 Sayısal huzme yapılandırma blok şeması.

Güç tüketimi, maliyeti ve karmaşıklığı yüksek olan sayısal huzme yapılandırma, masif ÇGÇÇ gibi büyük anten dizileri kullanan sistemler için cazip bir yöntem değildir (Z. Li et al., 2022). Bu bağlamda, analog ve sayısal huzme yapılandırma tekniklerinin bir araya getirilmesiyle oluşan ve böylece her iki yöntemin faydalarını birleştiren hibrit huzme yapılandırması kavramı doğmuştur (Ahmed et al., 2017, 2018; Dilli, 2022; Molisch et al., 2017).

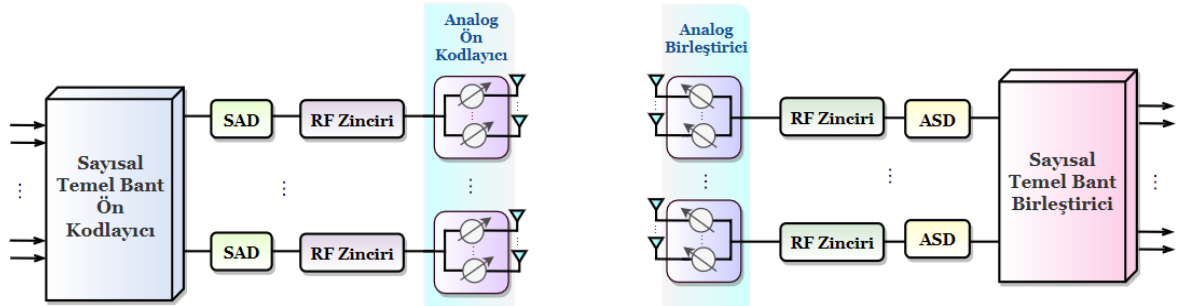
3.2.3. Hibrit Huzme Yapılandırma

Hibrit huzme yapılandırma, Şekil 3.5'te görüldüğü üzere, analog RF huzme yapılandırıcı ile temel bant sayısal huzme yapılandırıcısının ortak tasarımına dayanır ve bu tasarım, RF zincirlerinin sayısını azaltmayı amaçlar (Ahmed et al., 2018; Alkhateeb et al., 2014; Molisch et al., 2017; Tan et al., 2017). Az sayıda RF zinciri ile oluşturulan sayısal huzme yapılandırıcı, girişimi azaltmak için kullanılırken; çok sayıda RF faz kaydırıcıdan oluşan analog huzme yapılandırıcı, anten dizisi kazancını iyileştirmek için kullanılır (J. C. Chen, 2017). Böylece hibrit huzme yapılandırma, tamamen sayısal ve yalnızca analog huzme yapılandırma teknikleri ile karşılaştırıldığında, performans ve tüketim arasında denge sağlar ve en iyiye yakın performans gerçekleştirir (Dilli, 2022; Z. Li et al., 2022). Ayrıca daha fazla sayıda veri akışını destekleyerek spektral verimlilik önemli ölçüde artırılabilir (Ahmed et al., 2017; Dilli, 2022).



Şekil 3.5 Hibrit huzme yapılandırma blok şeması.

Hibrit analog ve sayısal huzme yapılandırma mimarileri, çok sayıda RF zincirinden kaynaklanan yüksek maliyet ve güç tüketimini azaltma potansiyelleri nedeniyle, mmDalga masif ÇGÇÇ sistemleri için uygun maliyetli bir alternatif olarak önerilmiştir (Ahmed et al., 2018; J. C. Chen, 2017; Xiao et al., 2017). Geleneksel mikrodalga mimarisinden farklı olarak, hibrit huzme yapılandırma mimarisi mmDalga iletişimi için daha uygulanabilir özelliktedir, çünkü huzme yapılandırma RF analog alanda gerçekleştirilir ve birden fazla huzme seti, az sayıda ASD'ye ve SAD'ye bağlanabilir (Ahmed et al., 2018).



Şekil 3.6 Hibrit huzme yapılandırmasına sahip mmDalga masif ÇGÇÇ sisteminin blok şeması.

Şekil 3.6'dan görüldüğü üzere, bir mmDalga masif ÇGÇÇ hibrit huzmeleme sistemi, vericide hibrit ön kodlama ve alıcıda birleştirmeyi vurgular (Dilli, 2022). Hibrit alıcı-vericiler, RF alanında analog huzme yapılandırıcılar ve temel bant alanında sayısal huzme yapılandırıcılar kullandıklarından, verici anten elemanlarının sayısına kıyasla daha az RF zincirlerinden oluşur.

4. AŞAĞI BAĞLANTI MİLMETRE DALGA HABERLEŞMESİ İÇİN ÇOKLU YYAY DESTEKLİ ÇOK KULLANICILI MASİF ÇGÇÇ SİSTEMİ

Bu bölümde, aşağı bağlantı mmDalga haberleşmesi için çok kullanıcıli masif ÇGÇÇ sistemlerin hibrit huzme yapılandırmasına çoklu YYAY şemasının eklendiği yeni bir sistem modeli tanıtılmıştır. Çoklu-YYAY-HH olarak adlandırılan bu sistemde, doğrudan iletişime yardımcı olmak için Bİ ve Gİ arasına birden fazla YYAY yerleştirilmiştir. Bİ'den Gİ'ye yansıtılan sinyal, YYAY'ler aracılığıyla alıcıya doğrudan ulaşan sinyalin fazına hizalanmakta ve böylece alıcıdaki sinyal gücü artırılmaktadır. Sistemin spektral verimliliğini, dolayısıyla veri hızını en üst düzeye çıkarmak için UM şeması kullanılmıştır ve veri sembolü, anten indisi ve YYAY indisi bilgileri birlikte taşınmaktadır. Sistemde, birden fazla sayıdaki DDD'lerden ve YYAY'lerden yalnızca biri aktif olduğu için, DDD'ler ve YYAY'ler arasında eş zamanlamaya ihtiyaç duyulmamakta ve kullanıcılar arasındaki girişim önemli oranda engellenmektedir. Önerilen sistem modeli, sırasıyla dış ve iç mekan olmak üzere 5G UMi-Street Canyon ve 5G InH Indoor-Office yol kaybı modelleri altında incelenerek gerçeğe yakın bir iletim senaryosu oluşturulması hedeflenmiştir. Kanallar, Saleh-Valenzuela (S-V) modeli kullanılarak çok yollu sönmüleme etkisi için yol kaybı katsayıları hesaba katılarak oluşturulmuştur. Çoklu-YYAY-HH sisteminin sayısal ön kodlayıcı, analog huzme yapılandırıcı ve sayısal birleştirici tasarımları verilmiştir. Sistemin teorik ulaşılabilir hızı ile ulaşılabilir üst sınır analizi ve teorik bit hata oranı performans analizleri sunulmuştur. Benzetim sonuçları, Çoklu-YYAY-HH sisteminin, (Yüzgeçcioğlu & Jorswieck, 2017)'de ele alınan HBF-SM sistemine kıyasla daha iyi bit hata oranı ve spektral verimlilik performansına sahip olduğunu göstermektedir.

4.1. Sistem Modeli

Önerilen sistem modeli Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Burada, her biri N_T verici antenden oluşan N_U adet DDD'ye sahip bir Bİ'den, N_R alıcı antene sahip C adet kullanıcıdan ve her biri N_S sayıda yansıtıcı elemandan oluşan X adet YYAY'den oluşan bir masif ÇGÇÇ telsiz sistemi ele alınmıştır. Önerilen sistemde semboller, M modülasyon seviyeli karesel genlik modülasyonu (quadrature amplitude modulation, QAM) kullanılarak üretilmiştir. Bu

C bit akışları, Bİ'nin iletim zincirlerine geldikten sonra her kullanıcı için, DDD ve YYAY indisi belirlenir. Daha sonra Bİ, sayısal ön kodlayıcıyı oluşturur ve analog huzme yapılandırıcıyı belirler. k 'nci kullanıcıda alınan sinyal şu şekilde ifade edilebilir:

burada, $\mathbf{D}_{a_v,k} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_T}$, a_v ’inci DDD ile k ’ıncı kullanıcı arasındaki doğrudan kanalı, $\mathbf{G}_{a_v,a_x} \in \mathbb{C}^{N_S \times N_T}$, a_v ’inci DDD ile a_x ’inci YYAY arasındaki kanalı ve $\mathbf{H}_{a_x,k} \in \mathbb{C}^{N_R \times N_S}$, a_x ’inci YYAY ile k ’ıncı kullanıcı arasındaki kanalı ifade etmektedir. $\mathbf{\Theta}_{a_x} = \text{diag}([e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_{N_S}}]) \in \mathbb{C}^{N_S \times N_S}$ faz kaydırma matrisidir ve $\theta_{n_s} \in [0, 2\pi)$, $n_s \in \{1, \dots, N_S\}$ olmak üzere n_s ’inci YYAY elemanının faz kaymasını gösterir. Bu matris, Bİ’den Gİ’ye yansıtılan sinyalin doğrudan kanal ile eş fazlı hale getirilmesinde kullanılır.

Kaynaktan hedefe toplam birleşik kanal, $\mathbf{Y}_{a_v, a_x, k} = \mathbf{D}_{a_v, k} + \mathbf{H}_{a_x, k} \mathbf{\Theta}_{a_x} \mathbf{G}_{a_v, a_x}$ şeklinde ifade edilebilir. $\mathbf{P}$, toplam iletim gücünü temsil eder ve her kullanıcıya eşit güç tahsis edildiği varsayılır. $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{C \times 1}$, semboller vektörüdür ve $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{N_R \times 1} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ dairesel simetrik karmaşık Gauss gürültüsüdür. $\mathbf{p}_{a_v, v} \in \mathbb{C}^{1 \times C}$ ve $\mathbf{f}_{a_v, v} \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ sırasıyla a_v 'inci DDD'den v 'inci kullanıcıya olan iletim için sayısal ön kodlama ve analog huzme yapılandırma vektörleridir. Kanallar Saleh-Valenzuela modeline göre şu şekilde oluşturulmaktadır (Bogale & Le, 2014):

$$\mathbf{D}_{a_v, k} = \sqrt{\frac{N_T N_R}{PL_{k_{l_d}}^{BG} L_D}} \sum_{l_d}^{L_D} \alpha_{a_v, k}^{l_d} \mathbf{a}_{R_{a_v, k}}(\chi_{l_d}) \mathbf{a}_{T_{a_v, k}}^H(\nu_{l_d}), \quad (4.2)$$

$$\mathbf{G}_{a_v, a_x} = \sqrt{\frac{N_T N_S}{PL_{k_{l_g}}^{BY} L_G}} \sum_{l_g}^{L_G} \alpha_{a_v, a_x}^{l_g} \mathbf{a}_{R_{a_v, a_x}}(\lambda_{l_g}) \mathbf{a}_{T_{a_v, a_x}}^H(\beta_{l_g}), \quad (4.3)$$

$$\mathbf{H}_{a_x, k} = \sqrt{\frac{N_S N_R}{PL_{k_{l_h}}^{YG} L_H}} \sum_{l_h}^{L_H} \alpha_{a_x, k}^{l_h} \mathbf{a}_{R_{a_x, k}}(\delta_{l_h}) \mathbf{a}_{T_{a_x, k}}^H(\gamma_{l_h}). \quad (4.4)$$

Denklemlerden görüldüğü üzere, sistem çok yollu sönümlemeli bir kanal modeline sahiptir ve $l_d = \{1, \dots, L_D\}$, $l_g = \{1, \dots, L_G\}$, $l_h = \{1, \dots, L_H\}$ şeklindedir. L_D , L_G ve L_H sırasıyla Bİ-Gİ, Bİ-YYAY ve YYAY-Gİ arasındaki yolların sayısını ifade eder. $\alpha_{a_v, k}^{l_d}$, $\alpha_{a_v, a_x}^{l_g}$ ve $\alpha_{a_x, k}^{l_h}$ dairesel simetrik karmaşık Gauss dağılımını takip eden yol kazançlarıdır. ν_{l_d} , β_{l_g} ve γ_{l_h} ilgili yolun ayrılış açısı; χ_{l_d} , λ_{l_g} ve δ_{l_h} ilgili yolun varış açısıdır ve hepsi düzgün dağılıma ($U(0, 2\pi]$) sahiptir. $\mathbf{a}_{R_{a_v, k}}(\chi_{l_d})$ ve $\mathbf{a}_{T_{a_v, k}}(\nu_{l_d})$ sırasıyla a_v 'inci DDD ile k 'ıncı kullanıcı arasındaki l_d 'inci yol için alıcı ve verici dizi yanıtını; $\mathbf{a}_{R_{a_v, a_x}}(\lambda_{l_g})$ ve $\mathbf{a}_{T_{a_v, a_x}}(\beta_{l_g})$ sırasıyla a_v 'inci DDD ile a_x 'inci YYAY arasındaki l_g 'inci yol için alıcı ve verici dizi yanıtını; $\mathbf{a}_{R_{a_x, k}}(\delta_{l_h})$ ve $\mathbf{a}_{T_{a_x, k}}(\gamma_{l_h})$ sırasıyla a_x 'inci YYAY ile k 'ıncı kullanıcı arasındaki l_h 'inci yol için alıcı ve verici dizi yanıtını ifade eder ve aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mathbf{a}_{R_{a_v, k}}(\chi_{l_d}) = \sqrt{\frac{1}{N_R}} [1, e^{j\pi \sin \chi_{l_d}}, \dots, e^{j\pi (N_R - 1) \sin \chi_{l_d}}]^T, \quad (4.5)$$

$$\mathbf{a}_{T_{a_v,k}}(\nu_d) = \sqrt{\frac{1}{N_T}} [1, e^{j\pi \sin \nu_d}, \dots, e^{j\pi (N_T-1) \sin \nu_d}]^T, \quad (4.6)$$

$$\mathbf{a}_{R_{a_v,a_x}}(\lambda_g) = \sqrt{\frac{1}{N_X}} [1, e^{j\pi \sin \lambda_g}, \dots, e^{j\pi (N_X-1) \sin \lambda_g}]^T, \quad (4.7)$$

$$\mathbf{a}_{T_{a_v,a_x}}(\beta_g) = \sqrt{\frac{1}{N_T}} [1, e^{j\pi \sin \beta_g}, \dots, e^{j\pi (N_T-1) \sin \beta_g}]^T, \quad (4.8)$$

$$\mathbf{a}_{R_{a_v,k}}(\delta_{l_h}) = \sqrt{\frac{1}{N_R}} [1, e^{j\pi \sin \delta_{l_h}}, \dots, e^{j\pi (N_R-1) \sin \delta_{l_h}}]^T, \quad (4.9)$$

$$\mathbf{a}_{T_{a_x,k}}(\gamma_{l_h}) = \sqrt{\frac{1}{N_X}} [1, e^{j\pi \sin \gamma_{l_h}}, \dots, e^{j\pi (N_X-1) \sin \gamma_{l_h}}]^T, \quad (4.10)$$

burada, DDD anten elemanlarının ve YYAY elemanlarının yarım dalga boyu ile ayrıldığı diziler dikkate alınmıştır. Yani $d_{DDD} = \lambda / 2$ olarak seçilmiştir.

Denklem (4.3), (4.4) ve (4.5)'teki $PL_{k_{l_d}}^{BG}$, $PL_{k_{l_g}}^{BY}$ ve $PL_{k_{l_h}}^{YG}$ parametreleri, ilgili yolun yol kaybı katsayısını ifade eder. Bir bağlantı yolu boyunca maruz kalınan yol kayıpları, $\mathbf{PL}_k^{BG} = [PL_{k_{l_{d1}}}^{BG}, \dots, PL_{k_{l_D}}^{BG}]$, $\mathbf{PL}_k^{BY} = [PL_{k_{l_{g1}}}^{BY}, \dots, PL_{k_{l_G}}^{BY}]$ ve $\mathbf{PL}_k^{YG} = [PL_{k_{l_{h1}}}^{YG}, \dots, PL_{k_{l_H}}^{YG}]$ şeklinde vektörel olarak gösterilebilir. Sistemdeki yol kayıpları, 5G UMi-Street Canyon ve 5G InH Indoor-Office modeli dikkate alınarak oluşturulmuştur. f_c , GHz cinsinden taşıyıcı frekansını ve d ise metre (m) cinsinden istasyonlar arası uzaklığı temsil etmek üzere, 5G UMi-Street Canyon modeline göre doğrudan görüş (DG) ve doğrudan olmayan görüş (DOG) için yol kayıpları şu şekilde gösterilebilir (Rappaport et al., 2017):

$$PL_{DG} = 21 \log_{10}(d) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c), \quad (4.11)$$

$$PL_{DOG} = 31.7 \log_{10}(d) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c). \quad (4.12)$$

5G InH Indoor-Office modeline göre ise DG ve DOG yol kayıpları aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir (Rappaport et al., 2017):

$$PL'_{DG} = 17.3 \log_{10}(d) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c), \quad (4.13)$$

$$PL'_{DOG} = 38.3 \log_{10}(d) + 17.30 + 24.9 \log_{10}(f_c). \quad (4.14)$$

Bu denklemler göz önüne alınarak, Çoklu-YYAY-HH sistemi için yol kaybı ifadeleri şu şekilde modellenir:

$$PL_{k_{DG}}^{SD} = 21 \log_{10}(d_{k_{i_d}}) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) \quad \text{eğer } l_d = 1, \quad (4.15)$$

$$PL_{k_{DOG}}^{SD} = 31.7 \log_{10}(d_{k_{i_d}}) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) \quad \text{eğer } l_d = \{2, \dots, L_D\}, \quad (4.16)$$

$$PL_{k_{DG}}^{SR} = 21 \log_{10}(d_{k_{i_g}}) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) \quad \text{eğer } l_g = 1, \quad (4.17)$$

$$PL_{k_{DOG}}^{SR} = 31.7 \log_{10}(d_{k_{i_g}}) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) \quad \text{eğer } l_g = \{2, \dots, L_G\}, \quad (4.18)$$

$$PL_{k_{DG}}^{RD} = 21 \log_{10}(d_{k_{i_h}}) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) \quad \text{eğer } l_h = 1, \quad (4.19)$$

$$PL_{k_{DOG}}^{RD} = 31.7 \log_{10}(d_{k_{i_h}}) + 32.4 + 20 \log_{10}(f_c) \quad \text{eğer } l_h = \{2, \dots, L_H\}. \quad (4.20)$$

Burada, (4.15) ve (4.16) Bİ-Gİ bağlantısını, (4.17) ve (4.18) Bİ-YYAY bağlantısını, (4.19) ve (4.20) ise YYAY-Gİ bağlantısını ifade eder. Denklemler incelendiğinde, ilk yolların ($l_{d_1}, l_{g_1}, l_{h_1}$) DG olarak (4.15, 4.17, 4.19) kabul edildiği ve diğer yolların ise DOG (4.16, 4.18, 4.20) olarak kabul edildiği görülmektedir. Bağlantı uzaklıkları $d_{k_{i_d}}$, $d_{k_{i_g}}$ ve $d_{k_{i_h}}$ olarak ifade edilir ve $\mathbf{d}_k^{SD} = [d_{k_{i_{d_1}}}, \dots, d_{k_{i_{d_{L_D}}}}]$, $\mathbf{d}_k^{SR} = [d_{k_{i_{g_1}}}, \dots, d_{k_{i_{g_{L_G}}}}]$ ve $\mathbf{d}_k^{RD} = [d_{k_{i_{h_1}}}, \dots, d_{k_{i_{h_{L_H}}}}]$ uzaklık vektörleridir.

4.1.1. Analog Huzme Yapılandırma, Sayısal Birleştirici ve Sayısal Ön Kodlayıcı Tasarımı

Analog huzme yapılandırma vektörünü oluşturmak için, $(0, 2\pi]$ arasında nicemlenmiş açılara göre üretilen bir huzme yönlendirme kod çizelgesinden ($\mathbf{F}_T$) yararlanılır. Faz kaydırıcının çözünürlüğü R için, $\mathbf{F}_T$, $T = 2^R$ adet kod sözcüğünden oluşur.

$\mathbf{f}_t \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$, $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ olmak üzere $\mathbf{f}_t$ kod sözcüğü $\mathbf{f} = \sqrt{\frac{1}{N_T}} [1, e^{j\pi \sin(\theta)}, \dots, e^{j\pi (N_T-1) \sin(\theta)}]^T$

modeliyle oluşturulur. Burada, $\theta = \frac{2\pi t}{T}$ nicemlenmiş açıları ifade eder ve $t = \{0, 1, \dots, T-1\}$ şeklindedir. Analog huzme yapılandırma vektörü, $\mathbf{f}_t$, seçilen anten dizisi (a) ile hedeflenen kullanıcı (k) arasındaki $\mathbf{Y}_{a,x,k}$ bağlantısının sinyal gürültü oranını (SGO) en büyükleyecek şekilde seçilir. Bİ, her kullanıcı için huzme yapılandırma vektörünü $\mathbf{f}_{a,k} = \arg \max_{\forall \mathbf{f}_t \in F_T} \|\mathbf{Y}_{a,x,k} \mathbf{f}_t\|^2$ işlemiyle hesaplar. Böylece tüm kullanıcılar için analog huzme yapılandırma matrisi $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_{a_1,1}, \dots, \mathbf{f}_{a_C,C}] \in^{N_T \times C}$ elde edilir. Ayrıca her anten dizisi-kullanıcı çifti için, $\{\mathbf{f}_{1,k}, \dots, \mathbf{f}_{N_U,k}\}$, en iyi RF huzme yapılandırıcılar belirlenir.

Bİ, sayısal birleştiriciyi hesaplamak için öncelikle her kullanıcı için $\mathbf{Y}_k = [\mathbf{Y}_{1,k} \mathbf{f}_{1,k}, \mathbf{Y}_{2,k} \mathbf{f}_{2,k}, \dots, \mathbf{Y}_{N_U,k} \mathbf{f}_{N_U,k}]$ matrisini üretir. Daha sonra, iletilen sembolü başarılı bir şekilde yeniden oluşturmak için k 'nci kullanıcının sayısal birleştiricisi $\mathbf{W}_k = [\mathbf{w}_{1,k} \dots \mathbf{w}_{N_U,k}] = (\mathbf{Y}_k^\dagger)^H$ oluşturulur. Verici, kullanıcılar arası girişimi ortadan kaldırmak için sayısal ön kodlayıcıyı hesaplamak üzere aşağıdaki denkleme göre etkin kanal matrisini yapılandırır:

$$\mathbf{Y}_{et} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_{a_1,1}^H \mathbf{Y}_{a_1,1} \mathbf{f}_{a_1,1} & \dots & \mathbf{w}_{a_1,1}^H \mathbf{Y}_{a_C,1} \mathbf{f}_{a_C,C} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{w}_{a_C,C}^H \mathbf{Y}_{a_1,C} \mathbf{f}_{a_1,1} & \dots & \mathbf{w}_{a_C,C}^H \mathbf{Y}_{a_C,C} \mathbf{f}_{a_C,C} \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

Her kullanıcı için ön kodlama vektörü $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_{a_1,1}^T \dots \mathbf{p}_{a_C,C}^T]^T = \varepsilon \mathbf{Y}_{et}^\dagger$ olarak elde edilir ve $\mathbf{p}_{a_C,C} \in \mathbb{C}^{1 \times C}$, c . kullanıcının a_C . DDD için ön kodlayıcı vektörüdür. ε katsayısı, ortalama

güç kısıtlamasıdır ve $\varepsilon = E \left\{ \sqrt{\frac{C}{\text{tr}(\mathbf{Y}_{et}^\dagger (\mathbf{Y}_{et}^\dagger)^H)}} \right\}$ şeklinde hesaplanır.

4.1.2. Alıcı Yapısı

Alınan sinyal, RF zincirleri yardımıyla birleştiriciye iletilir ve bu sembolü doğru bir şekilde yeniden oluşturmak için işlenir. Sembol, DDD ve YYAY indisinin birlikte tespit edilebilmesi için en büyük olabilirlik (EBO) algılayıcısı kullanılır (Kabaoğlu et al., 2003):

$$[\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{s}_k] = \arg \min_{\substack{a \in \{1, \dots, N_U\} \\ x \in \{1, \dots, X\} \\ i \in \{1, \dots, M\}}} \left\| \frac{1}{\mathcal{E}} \mathbf{w}_{a,x,k}^H \mathbf{r}_k - s_i \right\|^2, \quad (4.22)$$

burada, $\mathbf{w}_{a,x,k} \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$, a 'ıncı anten dizisinden k 'ıncı kullanıcıya x 'inci YYAY aracılığıyla gerçekleşen iletimin sayısal birleştiricisidir. s_i , M 'li sembol alfabesinden i 'inci sembolü temsil eder. $\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{s}_k$ ise sırasıyla kestirilen DDD, YYAY ve sembol parametreleridir. EBO algılayıcısının işlemsel karmaşıklığı $\mathcal{O}(2N_x N_U N_R M)$ şeklindedir; bu işlemsel karmaşıklığın bataryadan beslenen taşınabilir cihazlar için bile oldukça düşük olduğu söylenebilir. Birleştirme işleminden sonra k 'ıncı kullanıcıda alınan sinyal şu şekilde elde edilir:

$$y_k = \mathbf{w}_{a_k, a_x, k}^H \sqrt{P} \sum_{v=1}^C \mathbf{Y}_{a_v, a_x, k} \mathbf{f}_{a_v, v} \mathbf{p}_{a_v, v} \mathbf{s} + \mathbf{w}_{a_k, a_x, k}^H \mathbf{n}_k. \quad (4.23)$$

Diğer kullanıcılardan gelen girişim, vericide bir ön kodlayıcı kullanılarak engellendiğinden, k 'ıncı kullanıcıya ulaşan nihai sinyal aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$y_k = \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, a_x, k}^H \mathbf{Y}_{a_k, a_x, k} \mathbf{f}_{a_k, k} s_k + \mathbf{w}_{a_k, a_x, k}^H \mathbf{n}_k, \quad (4.24)$$

burada, P_k , k 'ıncı kullanıcının gücüdür.

4.2. Teorik Performans Analizleri

4.2.1. Bit Hata Olasılığı Analizi

Bu bölümde, ortalama çift yönlü hata olasılığı (OÇYHO) analizi kullanılarak önerilen sistemin teorik BHO performansı sunulmuştur. Doğru diğer ifadeyle esas DDD, YYAY ve sembol sırasıyla a_k , x_k ve s_k ; algılananlar ise $\hat{a}_k$, $\hat{x}_k$ ve $\hat{s}_k$ olmak üzere, k 'ıncı alıcıda alınan (4.24)'teki y_k sinyali için sistemin OÇYHO ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} & P(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{s}_k\} | \{a_k, x_k, s_k\}) \\ &= P\left(\left|y_k - \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} s_k\right|^2 > \left|y_k - \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, k}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, k} \mathbf{f}_{\hat{a}_k, k} \hat{s}_k\right|^2\right). \end{aligned} \quad (4.25)$$

Sistemin OÇYHO analizi dört farklı durum için göz önüne alınır: i) DDD ve YYAY doğru seçilir: $(\hat{a}_k = a_k, \hat{x}_k = x_k)$, ii) DDD doğru, YYAY yanlış seçilir: $(\hat{a}_k = a_k, \hat{x}_k \neq x_k)$, iii) DDD yanlış, YYAY doğru seçilir: $(\hat{a}_k \neq a_k, \hat{x}_k = x_k)$, iv) DDD ve YYAY yanlış seçilir: $(\hat{a}_k \neq a_k, \hat{x}_k \neq x_k)$.

A. Durum 1 $(\hat{a}_k = a_k, \hat{x}_k = x_k)$

Bu senaryo için, $\left| y_{\hat{k}} - \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}} \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k \right|^2$ ifadesi şu şekildedir:

$$\begin{aligned} & \left| \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} s_k + \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{n}_k - \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} \hat{s}_k \right|^2 \\ &= \left| \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} (s_k - \hat{s}_k) + \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{n}_k \right|^2. \end{aligned} \quad (4.26)$$

OÇYHO ifadesi $P(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{a_k, x_k, \hat{s}_k\} | \{a_k, x_k, s_k\}) = P(\gamma < 0)$ olarak hesaplanır.

Burada, $\gamma = 2 \operatorname{Re} \left\{ \mathbf{n}_k^H \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{w}_{a_k, x_k, k} \mathbf{n}_k \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} (s_k - \hat{s}_k) \right\} + \left| \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} (s_k - \hat{s}_k) \right|^2$ olarak tanımlanmıştır ve $\gamma \sim \mathcal{CN}(\mu_\gamma, \sigma_\gamma^2)$ dağılımına sahiptir. Ortalaması $\mu_\gamma = \left| \mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} (s_k - \hat{s}_k) \right|^2$ ve varyansı $\sigma_\gamma^2 = 2\sigma^2 \left\| \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} (s_k - \hat{s}_k) \right\|^2$ şeklindedir.

İstatistik hesaplarından sonra OÇYHO ifadesi:

$$P(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{a_k, x_k, \hat{s}_k\} | \{a_k, x_k, s_k\}) = Q \left(\sqrt{\frac{\left\| \mathbf{Y}_{a_k, x_k, k} \mathbf{f}_{a_k, k} (s_k - \hat{s}_k) \right\|^2}{2\sigma^2}} \right), \quad (4.27)$$

olarak elde edilir.

B. Durum 2 $(\hat{a}_k = a_k, \hat{x}_k \neq x_k)$

Bu senaryo için, $\left| y_{\hat{k}} - \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}} \mathbf{f}_{a_k, \hat{k}} \hat{s}_k \right|^2$ ifadesi şu şekildedir:

$$\left| \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}} (\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{a_k, \hat{k}} \hat{s}_k) + \mathbf{w}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k \right|^2. \quad (4.28)$$

Bu durumda OÇYHO ifadesi:

$$\begin{aligned}
& P\left(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{a_k, \hat{x}_k, \hat{s}_k\} \middle| \{a_k, x_k, s_k\}\right) \\
& = P\left(\left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}} \left(\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{a_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right) + \mathbf{w}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k\right|^2 - \left|\mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{n}_k\right|^2 < 0\right), \tag{4.29}
\end{aligned}$$

olarak bulunur. $\dot{\beta}_1 = \left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}} \left(\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{a_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right)\right|^2 + \left|\mathbf{w}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k\right|^2$, $\dot{\beta}_2 = \left|\mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{n}_k\right|^2$,

$\dot{Chi}_1 \triangleq \frac{2\dot{\beta}_1}{\sigma^2}$ ve $\dot{Chi}_2 \triangleq \frac{2\dot{\beta}_2}{\sigma^2}$ olmak üzere $\dot{Chi}_1$ 'in merkezi olmama parametresi

$\dot{\lambda} = \frac{2\left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{a_k, \hat{x}_k, \hat{k}} \left(\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{a_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right)\right|^2}{\sigma^2}$ olan 2 serbestlik dereceli bir ki-kare dağılımı

olduğu görülür. Benzer şekilde $\dot{Chi}_2$ de 2 serbestlik dereceli merkezi bir ki-kare dağılımına sahiptir. Sonuç olarak OÇYHO ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$P\left(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{a_k, \hat{x}_k, \hat{s}_k\} \middle| \{a_k, x_k, s_k\}\right) = P\left(\dot{Chi}_1 < \dot{Chi}_2\right) = \frac{1}{2} e^{-\frac{\dot{\lambda}}{4}}. \tag{4.30}$$

C. Durum 3 ($\hat{a}_k \neq a_k, \hat{x}_k = x_k$)

Bu senaryo için, $\left|y_{\hat{k}} - \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}} \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right|^2$ ifadesi şu şekildedir:

$$\left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}} \left(\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right) + \mathbf{w}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k\right|^2. \tag{4.31}$$

Bu durumda OÇYHO ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
& P\left(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{\hat{a}_k, x_k, \hat{s}_k\} \middle| \{a_k, x_k, s_k\}\right) = \\
& P\left(\left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}} \left(\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right) + \mathbf{w}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k\right|^2 - \left|\mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{n}_k\right|^2 < 0\right). \tag{4.32}
\end{aligned}$$

(B)'deki analize benzer şekilde, $\ddot{\beta}_1 = \left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}} \left(\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right)\right|^2 + \left|\mathbf{w}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k\right|^2$,

$\ddot{\beta}_2 = \left|\mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{n}_k\right|^2$, $\ddot{Chi}_1 \triangleq \frac{2\ddot{\beta}_1}{\sigma^2}$, $\ddot{Chi}_2 \triangleq \frac{2\ddot{\beta}_2}{\sigma^2}$ ve $\ddot{Chi}_1$ 'in merkezi olmama parametresi

$\ddot{\lambda} = \frac{2\left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, x_k, \hat{k}} \left(\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right)\right|^2}{\sigma^2}$ olmak üzere OÇYHO ifadesi şu şekildedir elde

edilir:

$$P\left(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{\hat{a}_k, x_k, \hat{s}_k\} \mid \{a_k, x_k, s_k\}\right) = P\left(\tilde{Chi}_1 < \tilde{Chi}_2\right) = \frac{1}{2} e^{-\frac{\tilde{\lambda}}{4}}. \quad (4.33)$$

D. Durum 4 ($\hat{a}_k \neq a_k, \hat{x}_k \neq x_k$)

Bu senaryo için, $\left|y_{\hat{k}} - \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}} \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k\right|^2$ ifadesi şu şekildedir:

$$\left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}} (\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k) + \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k\right|^2. \quad (4.34)$$

OÇYHO ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$P\left(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{s}_k\} \mid \{a_k, x_k, s_k\}\right) = P\left(\left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}} (\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k) + \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k\right|^2 - \left|\mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{n}_k\right|^2 < 0\right). \quad (4.35)$$

Önceki analizlere benzer şekilde, $\tilde{\beta}_1 = \left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}} (\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k)\right|^2 + \left|\mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{n}_k\right|^2$,

$\tilde{\beta}_2 = \left|\mathbf{w}_{a_k, x_k, k}^H \mathbf{n}_k\right|^2$, $\tilde{Chi}_1 \triangleq \frac{2\tilde{\beta}_1}{\sigma^2}$, $\tilde{Chi}_2 \triangleq \frac{2\tilde{\beta}_2}{\sigma^2}$ ve $\tilde{Chi}_1$ 'in, merkezi olmama parametresi

$\tilde{\lambda} = \frac{2 \left|\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}}^H \mathbf{Y}_{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{k}} (\mathbf{f}_{a_k, k} s_k - \mathbf{f}_{\hat{a}_k, \hat{k}} \hat{s}_k)\right|^2}{\sigma^2}$ olmak üzere OÇYHO ifadesi şu şekilde elde edilir:

$$P\left(\{a_k, x_k, s_k\} \rightarrow \{\hat{a}_k, \hat{x}_k, \hat{s}_k\} \mid \{a_k, x_k, s_k\}\right) = P\left(\tilde{Chi}_1 < \tilde{Chi}_2\right) = \frac{1}{2} e^{-\frac{\tilde{\lambda}}{4}}. \quad (4.36)$$

BHO performans analizi, bu dört durumun OÇYHO analizi kullanılarak tamamlanır.

4.2.2. Ulaşılabilir Hız Analizi

İletilen ve alınan semboller arasındaki karşılıklı bilgi $I(y_k; x_k) = H(y_k) - H(y_k | x_k)$ şeklinde ifade edilmektedir. Burada, x_k , YYAY, DDD ve sembol indisini içeren bilgi sembolünü temsil eder. Alınan y_k sinyali, bir Gauss karışım dağılımına sahiptir ve Gauss karışımının entropisi için kapalı formda bir çözüm yoktur. Bu nedenle, bilgi teorisi tabanlı yerine SGO

tabanlı hız analizi kullanmak daha iyi bir seçim olarak düşünülmüştür. k 'ncü kullanıcı için ulaşılabilir hız ifadesi şu şekilde hesaplanabilir:

$$R_k = \log_2 \left(1 + \frac{P_k \left| \mathbf{w}_{a_k, a_x, k}^H \mathbf{Y}_{a_k, a_x, k} \mathbf{f}_{a_k, k} \right|^2}{\sigma^2} \right). \quad (4.37)$$

Sonuç olarak sistemin ulaşılabilir toplam hızı $R_{top} = \sum_{k=1}^C R_k$ şeklinde hesaplanır. Sonlu varyansa sahip herhangi bir rastgele değişkenin diferansiyel entropisi, aynı varyansa sahip bir Gauss rastgele değişkeninin diferansiyel entropisinden küçük veya ona eşittir (Csiszár & Shields, 2004). Bu durumda, ulaşılabilir hız oranı için bir üst sınır elde etmek mümkündür. Aynı girdi sembolleri ile k 'ncü kullanıcı için ulaşılabilir hız $R_k \leq R_k'$ olarak ifade edilebilir. R_k' , y_k ile aynı varyansa sahip bir Gauss rastgele değişkeninin ulaşılabilir hızının üst sınırıdır. Alınan sinyalin olasılığı $f_{Y_k}(y_k)$ aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$f_{Y_k}(y_k) = \sum_{m=1}^M \sum_{z=1}^{N_U} \sum_{t=1}^X f_{y_k}(y_k | x=t, a=z, s=s_m) P(x=t, a=z, s=s_m). \quad (4.38)$$

DDD ve YYAY indisleri ve sembol kestirimi bağımsız olaylardır ve karmaşık Gauss dağılımının ortalaması t, z, m indislerinin seçimiyle değişmektedir. Ortalamanın genel ifadesi $\sqrt{P_k} \mathbf{w}_{z,t,k}^H \mathbf{Y}_{z,t,k} \mathbf{f}_{z,k} s_m$ olmak üzere (4.38)'deki denklem:

$$f_{Y_k}(y_k) = \frac{1}{\sigma \pi X N_U M} \sum_{m=1}^M \sum_{z=1}^{N_U} \sum_{t=1}^X e^{-\frac{|y_k - \sqrt{P_k} \mathbf{w}_{z,t,k}^H \mathbf{Y}_{z,t,k} \mathbf{f}_{z,k} s_m|^2}{\sigma^2}}, \quad (4.39)$$

şeklinde yeniden düzenlenir. Sonuç olarak, ulaşılabilir hızın üst sınır ifadesi:

$$\begin{aligned} R_k = \log_2 \pi e & \left(\sigma^2 + \frac{P_k}{CM N_U X} \sum_{m=1}^M \sum_{z=1}^{N_U} \sum_{t=1}^X \left| \mathbf{w}_{z,t,k}^H \mathbf{Y}_{z,t,k} \mathbf{f}_{z,k} s_m \right|^2 \right. \\ & - \frac{P_k}{CM^2 N_U^2 X^2} \left[\sum_{m=1}^M \sum_{z=1}^{N_U} \sum_{t=1}^X \text{Re} \{ \mathbf{w}_{z,t,k}^H \mathbf{Y}_{z,t,k} \mathbf{f}_{z,k} s_m \} \right]^2 \\ & \left. - \frac{P_k}{CM^2 N_U^2 X^2} \left[\sum_{m=1}^M \sum_{z=1}^{N_U} \sum_{t=1}^X \text{Im} \{ \mathbf{w}_{z,t,k}^H \mathbf{Y}_{z,t,k} \mathbf{f}_{z,k} s_m \} \right]^2 \right) - \log_2 (\pi e \sigma^2), \end{aligned} \quad (4.40)$$

olarak elde edilir. Denklemdaki $\log_2(\pi e \sigma^2)$ gürültüyü ifade etmektedir.

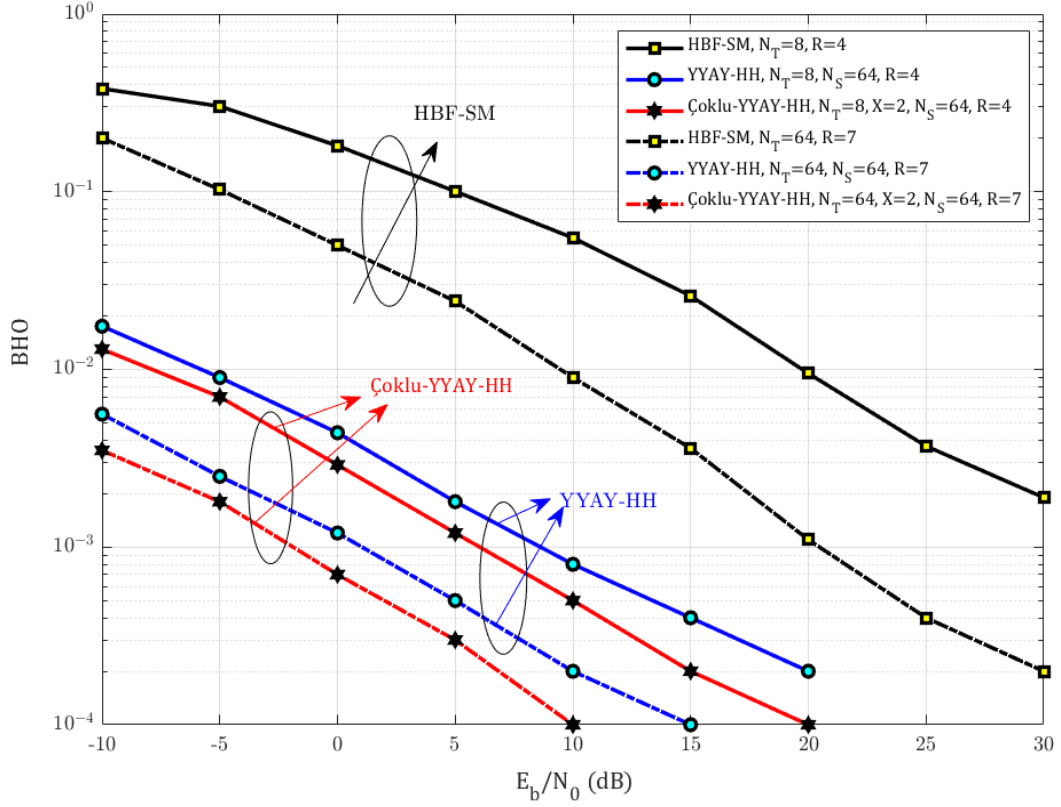
4.3. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, yol kaybının dikkate alınmadığı (yol kaybı katsayısının 1 kabul edildiği) ve 5G UMi-Street Canyon ile 5G InH Indoor-Office modellerine göre yol kaybının göz önüne alındığı iki farklı senaryo için bilgisayar benzetim sonuçları sunulmuştur.

4.3.1. Yol Kaybının Dikkate Alınmadığı Senaryo İçin Benzetim Sonuçları

Bu başlık altında, Çoklu-YYAY-HH sistemi ve HBF-SM yönteminin, BHO ve ulaşılabilir hız açısından performans karşılaştırmaları verilmiştir. Ayrıca Çoklu-YYAY-HH sisteminin, X , N_S , N_U , N_R , R ve yol sayılarına bağlı hata performans eğrileri incelenmiştir. Tüm grafikler için $L_D = 3$, $L_G = 3$ ve $L_H = 1$ seçilmiştir.

Şekil 4.2’de, Çoklu-YYAY-HH sisteminin, tek YYAY şemasının (YYAY-HH) ve HBF-SM yönteminin, $N_T = 8$ ve $N_T = 64$ verici anten sayıları için BHO performansları karşılaştırılmıştır. Burada, kullanıcı sayısı $K = 2$, alıcı anten sayısı $N_R = 1$, DDD sayısı $N_U = 4$ olarak seçilmiş ve modülasyon derecesi $M = 4$ için QAM modülasyonlu semboller dikkate alınmıştır. YYAY’li modeller için, YYAY’deki yansıtıcı eleman sayısı $N_S = 64$ seçilmiştir. Bu sistem için, en uygun bit çözünürlükleri deneysel olarak $N_T = 8$ için $R = 4$ ve $N_T = 64$ için $R = 7$ olarak belirlenmiştir.



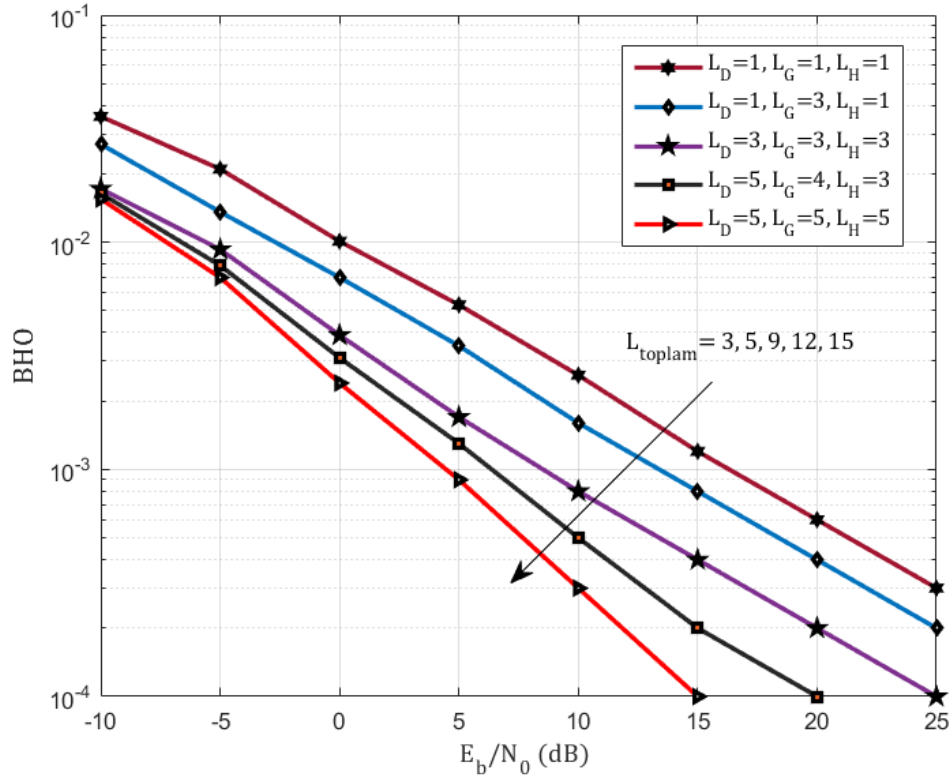
Şekil 4.2 Çoklu-YYAY-HH, YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin, $K = 2$, $N_R = 1$, $N_U = 4$ ve 4 – QAM için BHO performanslarının karşılaştırılması.

Şekilden görüldüğü üzere Çoklu-YYAY-HH sistemi, YYAY-HH modelinden ve HBF-SM yönteminden daha iyi performans göstermektedir. $N_S = 64$ için, Çoklu-YYAY-HH sırasıyla $N_T = 64$ ve $N_T = 8$ için HBF-SM'ye kıyasla yaklaşık 22 – 25dB kazanç sağlamaktadır. Ayrıca şekilden, verici anten sayısı arttıkça BHO performansının önemli ölçüde arttığı görülür. Çünkü ışın daha iyi yönlendirilebildiğinden alıcıya daha güçlü bir sinyal ulaşmaktadır.

Çoklu-YYAY-HH sistemindeki R bit çözünürlüğü, YYAY'nin sahip olduğu N_S yansıtıcı eleman sayısı ve istasyonlar arası L_D, L_G, L_H yol sayılarının artırılmasıyla Şekil 4.2'deki sistemin performansı da doğrusal olarak artacaktır. Bu değerlere bağlı Çoklu-YYAY-HH performans eğrileri, Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te ele alınmıştır.

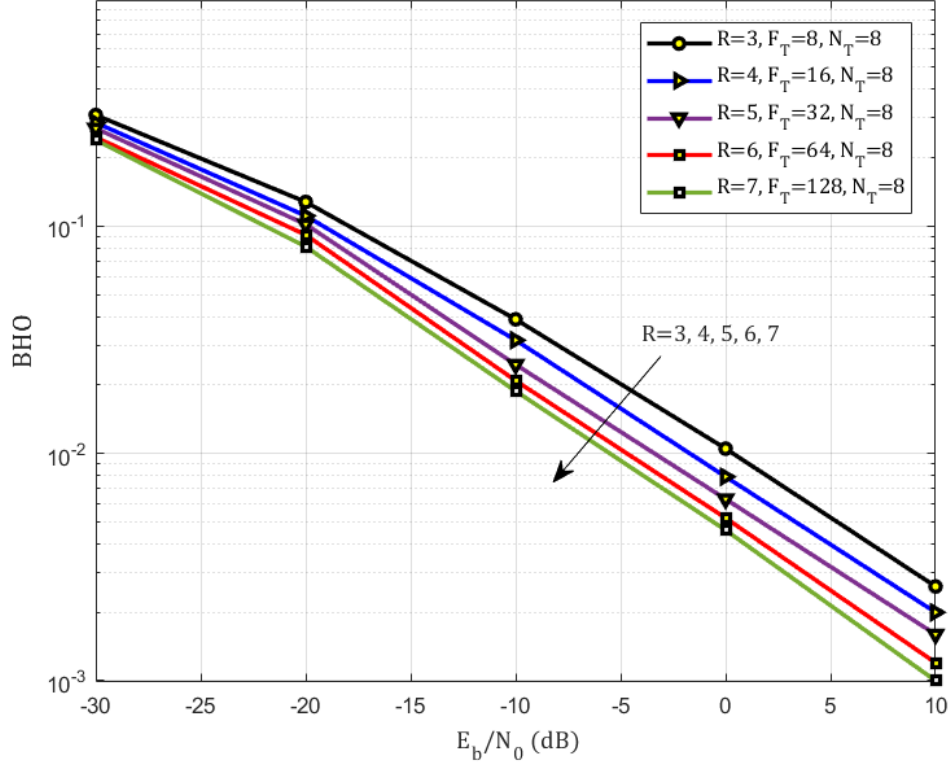
Şekil 4.3'te, sabit $K = 2$, $N_T = 8$, $N_R = 1$, $N_U = 4$, $X = 2$, $N_S = 32$, $R = 4$ ve 4 – QAM için L_D , L_G ve L_H değerleri değişmektedir. Şekilden görüldüğü üzere, artan yol sayısı için hata performansı iyileşmektedir. Bunun sebebi, bir sistemdeki yol sayısının arttıkça

çeşitliliğin artmasıdır. Bu da şu anlama gelir; her yol farklı sönümlenme ve gürültü özelliklerine sahip olduğu için bazı yollar bu bozulmalara daha çok eğilimli olabilirken, bazıları daha güvenilir bir şekilde iletilebilmektedir. Sonuç olarak çeşitli yollara sahip olmak, sistemin veri iletmek için mevcut en iyi seçeneği seçmesini sağlayarak genel hata oranını azaltmaktadır.



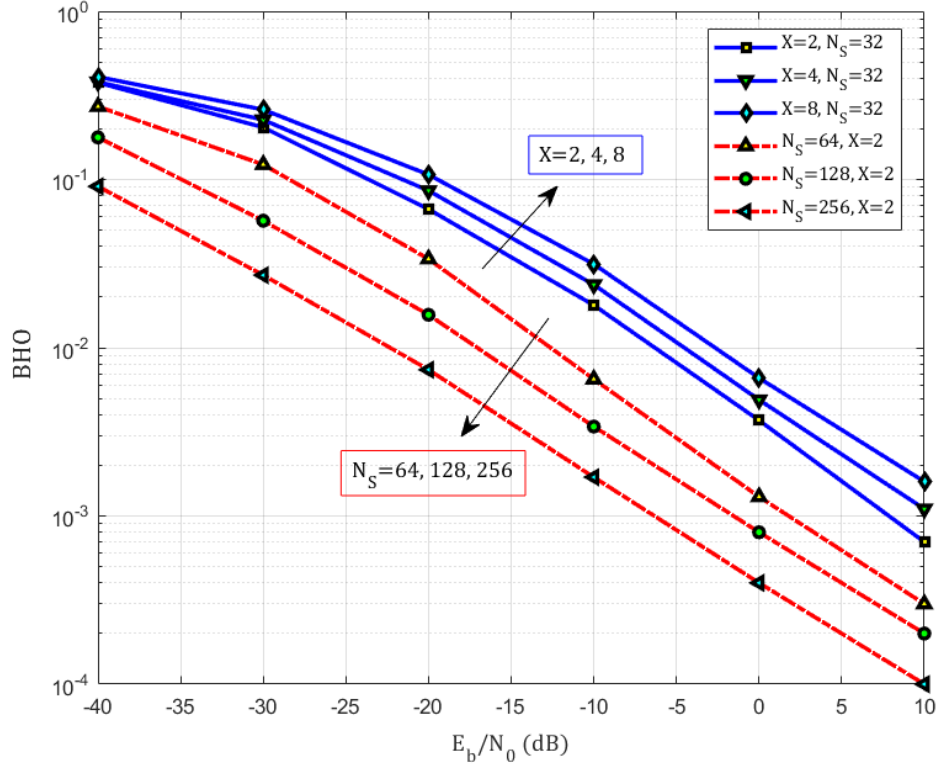
Şekil 4.3 Çoklu-YYAY-HH sisteminin farklı yol sayıları için BHO performans eğrileri.

Şekil 4.4'te, faz kaydırıcıların çözünürlük değerinin Çoklu-YYAY-HH sisteminin performansına etkisi incelenmiştir. Grafikte, $K = 2$, $N_T = 8$, $N_R = 1$, $N_U = 4$, $X = 2$, $N_S = 32$ ve 4-QAM için çözünürlük $R = 3, 4, 5, 6, 7$ şeklinde değişmektedir. Şekilde, artan bit çözünürlük sayısı için bit hata performansının iyileştiği görülmektedir. Bunun nedeni, sistemdeki R bit çözünürlük değerinin arttıkça nicemleme hatasının azalması ve bunun sonucunda da hata performansının iyileşmesidir. En yüksek çözünürlük değerini seçmek, maliyet ve pratik uygulanabilirlik nedeniyle mümkün değildir ve Çoklu-YYAY-HH sistemi için en uygun çözünürlük sayıları deneysel olarak Şekil 4.2'deki gibi belirlenmiştir.

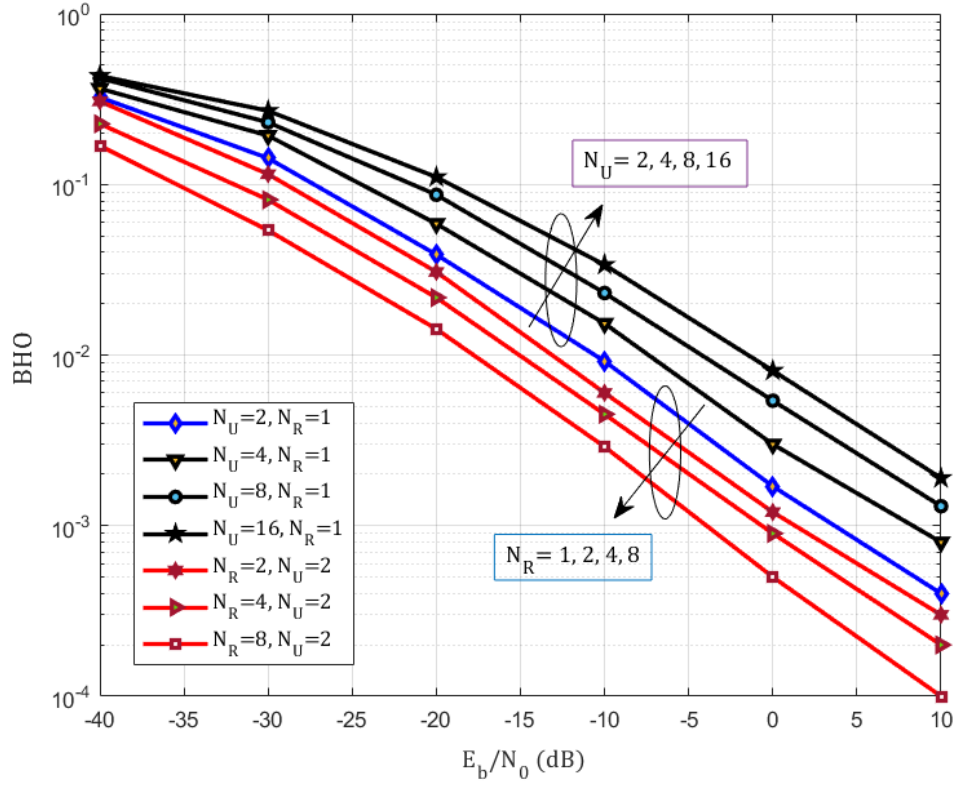


Şekil 4.4 Çoklu-YYAY-HH sisteminin farklı R değerleri için BHO performans eğrileri.

Şekil 4.5'te, farklı X ve N_s , Şekil 4.6'da, farklı N_U ve N_R değerlerinin BHO eğrisine etkisi incelenmiştir. Bu grafiklerde, $K = 2$, $N_T = 16$, $R = 5$ sabit tutulmuş ve $M = 2$ (BPSK) modülasyonu dikkate alınmıştır. Grafiklerden görüldüğü üzere, BHO, N_U ve X sayıları ile ters orantılı ile değişirken N_R ve N_s sayıları ile doğru orantılı olarak değişim göstermektedir.

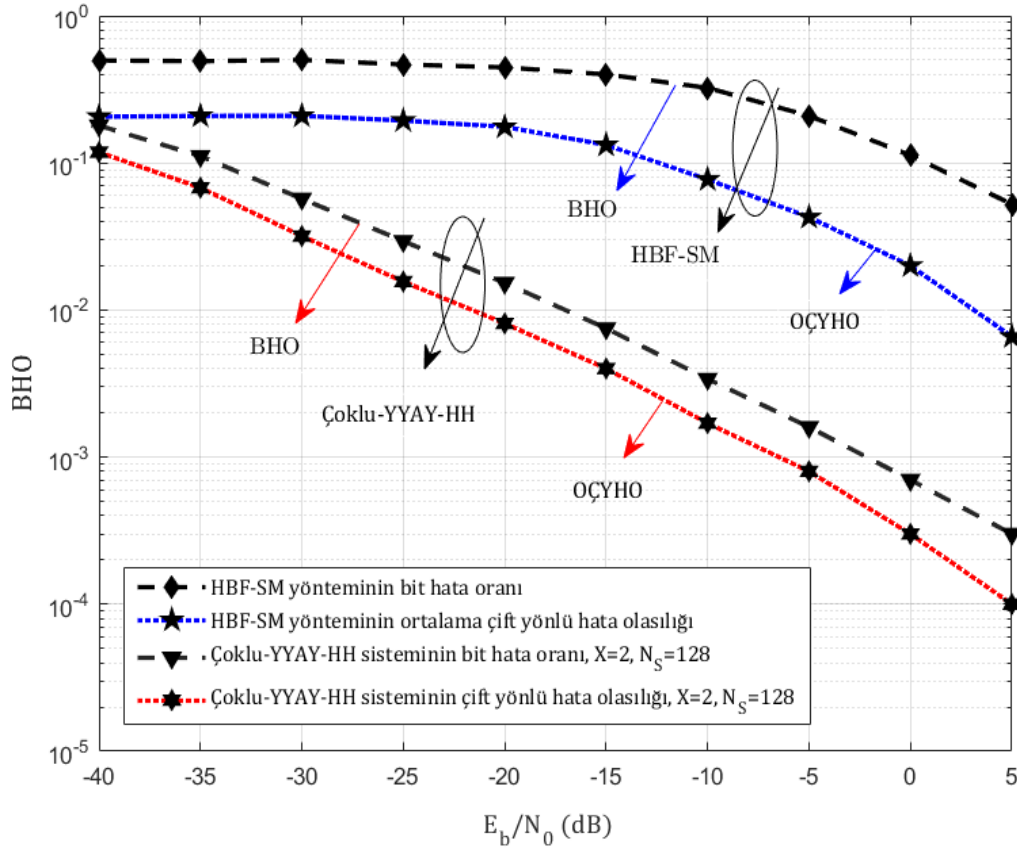


Şekil 4.5 Çoklu-YYAY-HH sisteminin $N_R = 1$ ve $N_U = 4$ iken farklı X ve N_S değerleri için BHO performans eğrileri.



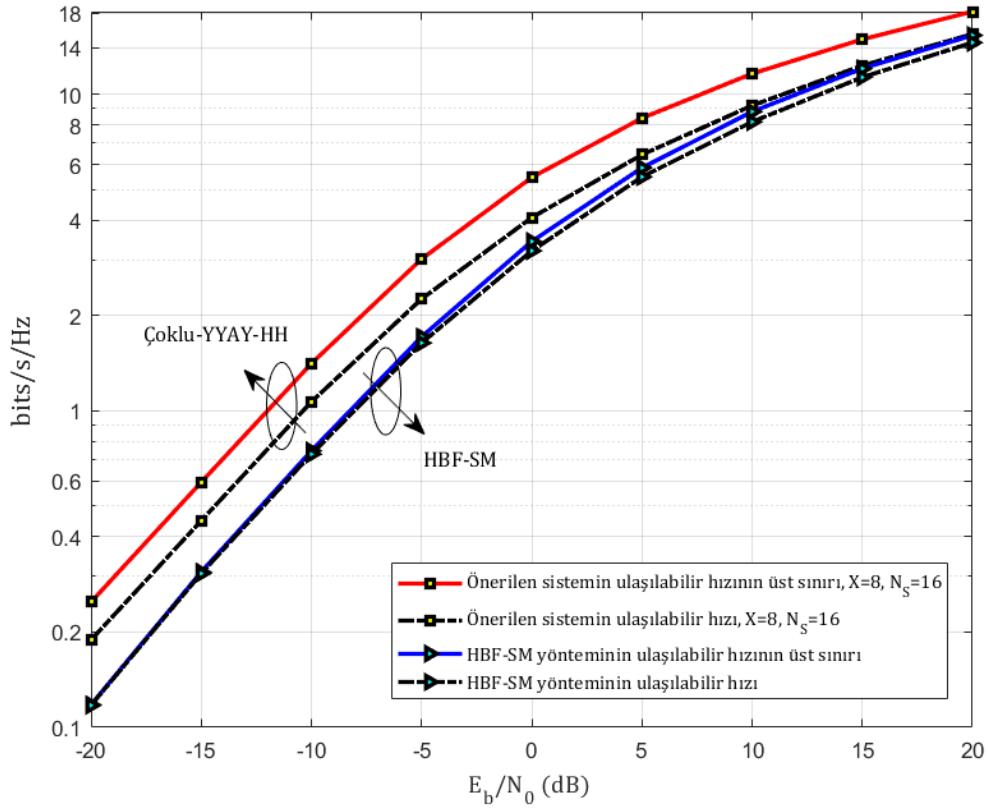
Şekil 4.6 Çoklu-YYAY-HH sisteminin $X = 2$ ve $N_S = 32$ iken farklı N_U ve N_R değerlerine bağlı BHO performans eğrileri.

Şekil 4.7’de, Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin teorik BHO eğrilerine ulaşım ulaşılmadığı gösterilmiştir. Bu grafik, Çoklu-YYAY-HH sisteminin BHO performansının, teorik olarak elde edilen BHO eğrisine oldukça yakın olduğunu ve HBF-SM’ye kıyasla daha iyi bir hata performansına sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.7 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin $K = 2$, $N_T = 16$, $N_R = 1$, $N_U = 4$, $R = 6$ ve 4 – QAM için teorik ve benzetim BHO performanslarının karşılaştırılması.

Şekil 4.8’de, Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin toplam ulaşılabilir hız performansları karşılaştırılmıştır. Bu şekil, Çoklu-YYAY-HH sisteminin daha iyi hız performansı gösterdiğini ve dolayısıyla daha yüksek spektral verimliliğe sahip olduğunu ifade eder.



Şekil 4.8 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin $K = 2$, $N_T = 8$, $N_R = 1$, $N_U = 2$, $R = 4$ ve 4 – QAM için toplam ulaşılabilir hız performanslarının karşılaştırılması.

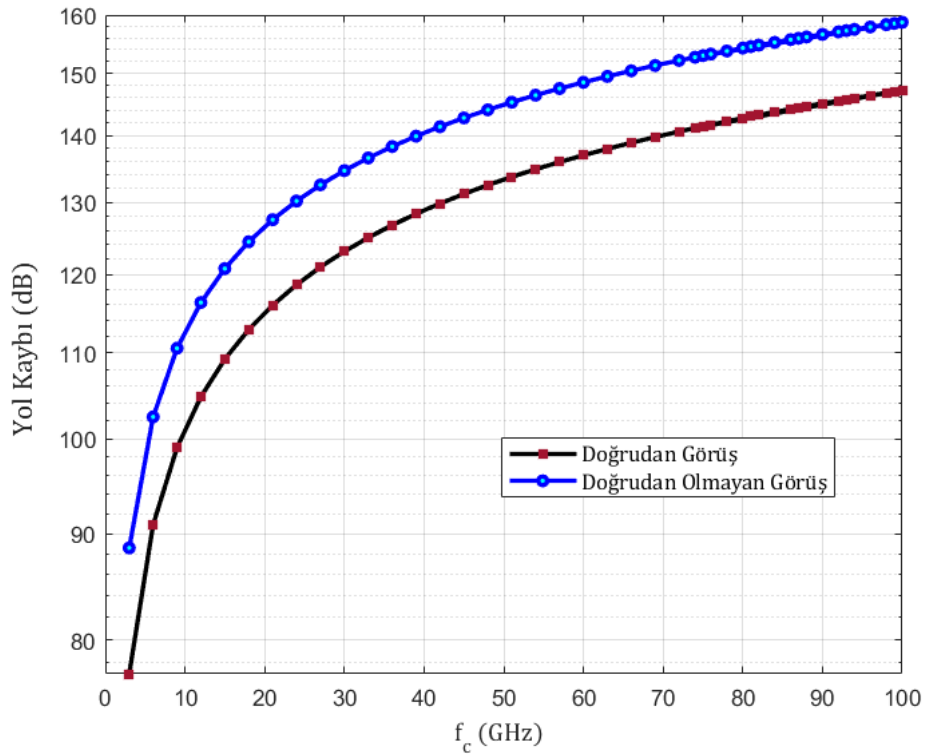
Bunlarla birlikte, veri hızının kanal kullanımı başına bit cinsinden ifadesi, Çoklu-YYAY-HH sistemi için $\eta = \log_2(M) + \log_2(N_U) + \log_2(X)$ [bpcu] ve HBF-SM yöntemi için ise $\eta' = \log_2(M) + \log_2(N_U)$ [bpcu] olarak gösterilebilir. Bu eşitliklerden, spektral verimliliğin, YYAY ve DDD sayısı ile logaritmik olarak artacağı açıkça görülmektedir.

4.3.2. Yol Kaybının Dikkate Alındığı Senaryo İçin Benzetim Sonuçları

Bu alt başlıkta, ilk olarak taşıyıcı frekansının yol kaybına etkisi incelenmiştir; daha sonra Bölüm (4.3.1)'deki önerilen sistem ile HBF-SM yöntemi performans karşılaştırmaları, dış mekan ve iç mekan senaryoları için 5G UMI-Street Canyon ve 5G InH Indoor-Office yol kaybı modelleri altında yol kaybı katsayıları hesaba katılarak elde edilmiştir.

Şekil 4.9'da, frekans değerinin yol kaybına etkisi gözlemlenmiştir. (4.11) ve (4.12) eşitlikleri kullanılarak, uzaklık değeri $d = 12\text{m}$ sabit tutulmak üzere DG ve DOG yol kaybı değerleri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Yol kaybı, sinyalin uzayda yayılırken sinyal gücündeki azalmayı ifade eder ve grafiğe bakıldığında frekansın arttıkça yol kaybının

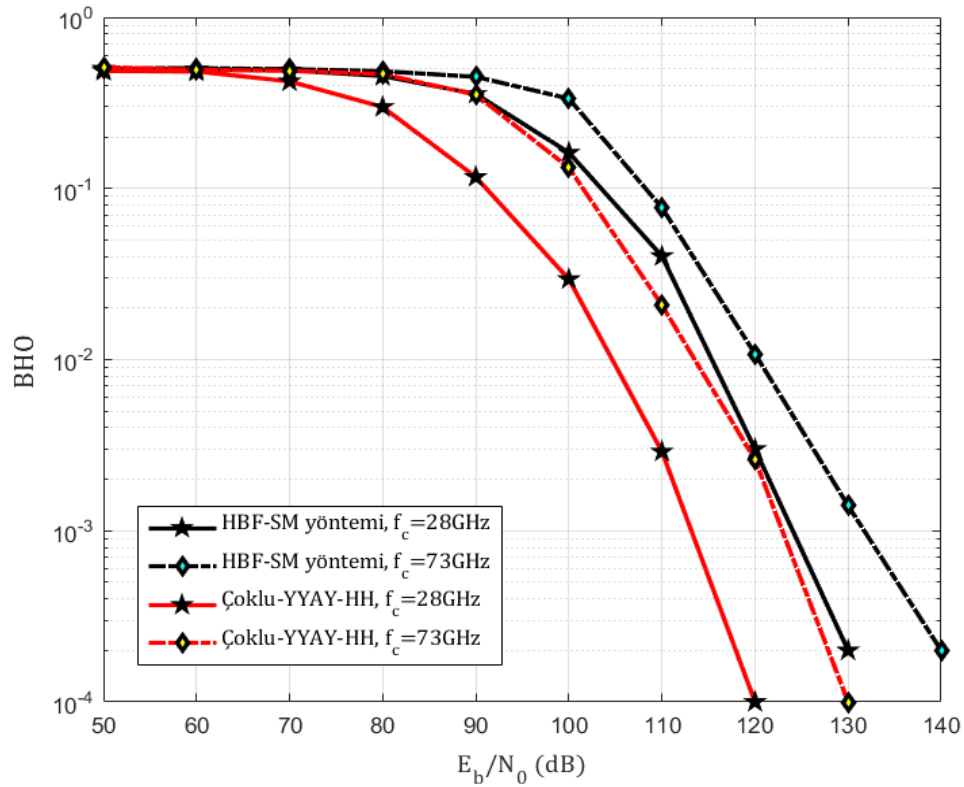
arttığı görülür. Dolayısıyla yüksek frekanslarda sinyal gücünün giderek azaldığı söylenebilir. Grafiğe bakıldığında çıkarılabilecek bir diğer sonuç ise DOG'un yol kaybı değerinin DG'ye göre daha yüksek olduğudur. Bunun sebebi, bir DG senaryosunda, verici ve alıcı arasında net ve engelsiz bir görüş hattı var iken buna karşılık bir DOG senaryosunda, verici ve alıcı arasındaki doğrudan görüş hattını engelleyen binalar, ağaçlar gibi bazı engellerin var olmasıdır. Bahsedilen engeller, çoklu yol etkileri ve kırınım gibi olumsuz faktörler nedeniyle DOG koşulları genellikle DG koşullarına kıyasla daha yüksek yol kaybına neden olur ve neticede daha yüksek bir sinyal gücü kaybına yol açar.



Şekil 4.9 Frekans değerine bağlı DG ve DOG yol kaybı performansları.

Şekil 4.10'da, Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin dış mekan senaryosu için 5G UMi-Street Canyon yol kaybı modeli altında 28GHz ve 73GHz'de BHO performans eğrileri karşılaştırılmıştır. Sistem parametreleri, $K = 2$, $N_T = 32$, $N_R = 1$, $N_U = 2$, 4-QAM, $X = 2$, $N_s = 1024$, $R = 6$, $L_D = 2$, $L_G = 2$ ve $L_H = 2$ şeklindedir. Taşıyıcı frekansı f_c sırasıyla 28GHz ve 73GHz olarak seçilmiştir ve uzaklıklar dış mekan senaryosuna göre belirlenmiştir (Project et al., 2018). Burada, HBF-SM, yalnızca L_D yolunu dikkate alırken YYAY'li modeller L_D yoluna ek olarak L_G ve L_H olmak üzere

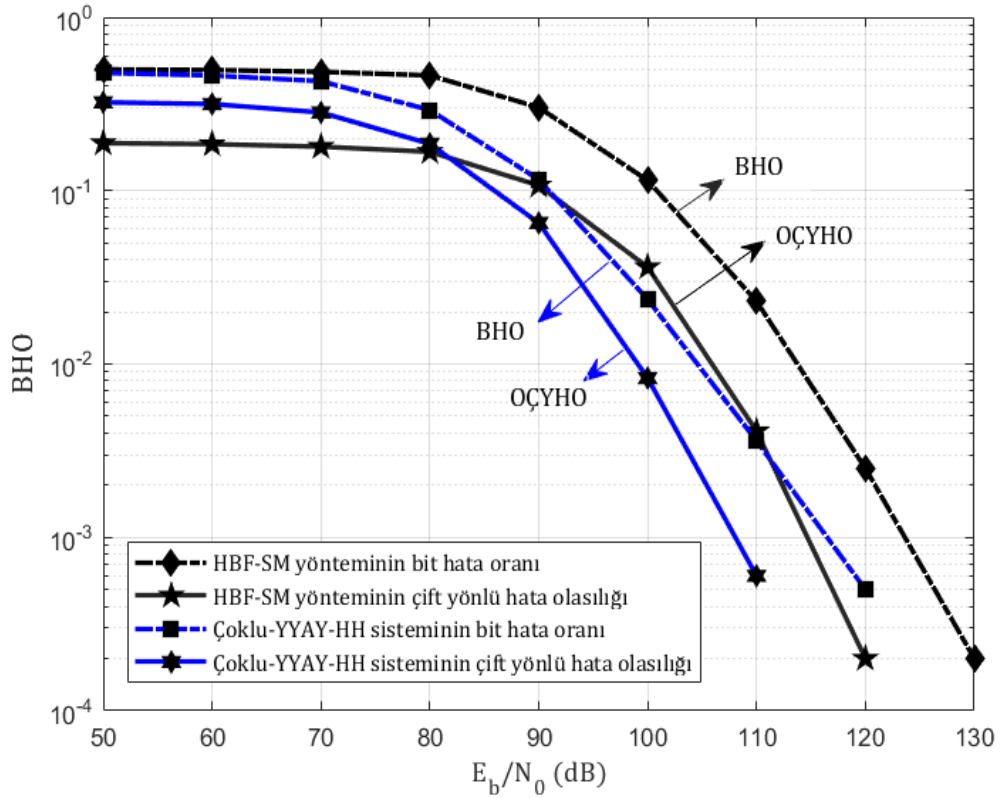
toplam üç yol bağlantını dikkate alır. Sistemde, iki farklı kullanıcı (C_1, C_2) olduğundan uzaklıklar her iki kullanıcı için ayrı ayrı oluşturulmalıdır. GI_1 'nin birinci gezgin istasyonu ve GI_2 'nin ikinci gezgin istasyonu temsil ettiği varsayımı altında, uzaklıkların birimi m olmak üzere: L_D için, Bİ- GI_1 arasındaki yolların uzaklıkları $I_{d_{GI_1}} = [23 \ 25]$ ve Bİ- GI_2 arasındaki yolların uzaklıkları $I_{d_{GI_2}} = [27 \ 29]$ şeklinde vektörel olarak gösterilebilir. Burada, ilk sütun, ilk uzaklığı (l_{d_1}) gösterir aynı zamanda DG mesafesini ifade eder; ikinci sütun, ikinci uzaklığı (l_{d_2}) gösterir ve DOG uzaklığını ifade eder. L_G için, Bİ-YYAY arasındaki mesafe $I_g = [10 \ 11]$ seçilmiştir ve iki kullanıcı için de bu uzaklık vektörü aynıdır. L_H için, YYAY- GI_1 arasındaki yolun uzaklığı $I_{h_{GI_1}} = [13 \ 14]$ ve YYAY- GI_2 arasındaki yolun uzaklığı $I_{h_{GI_2}} = [15 \ 16]$ olarak belirlenmiştir. YYAY'nin alışı ve verişi yönündeki anten kazançları 5dBi seçilmiştir (Ellingson, 2021; Yildirim et al., 2021).



Şekil 4.10 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin dış mekan yol kaybı altında farklı f_c değerleri için BHO performanslarının karşılaştırılması.

Şekilden görüldüğü üzere, frekans değeri arttıkça her iki yöntem için de BHO performans eğrisi giderek kötüleşmektedir. Ayrıca yol kaybı modeli altında önerilen Çoklu-YYAY-HH sistemi HBF-SM'ye kıyasla daha performans göstermekte ve 28GHz 'de yaklaşık 11dB ve 73GHz 'de yaklaşık 7dB civarı bir kazanç sağlamaktadır.

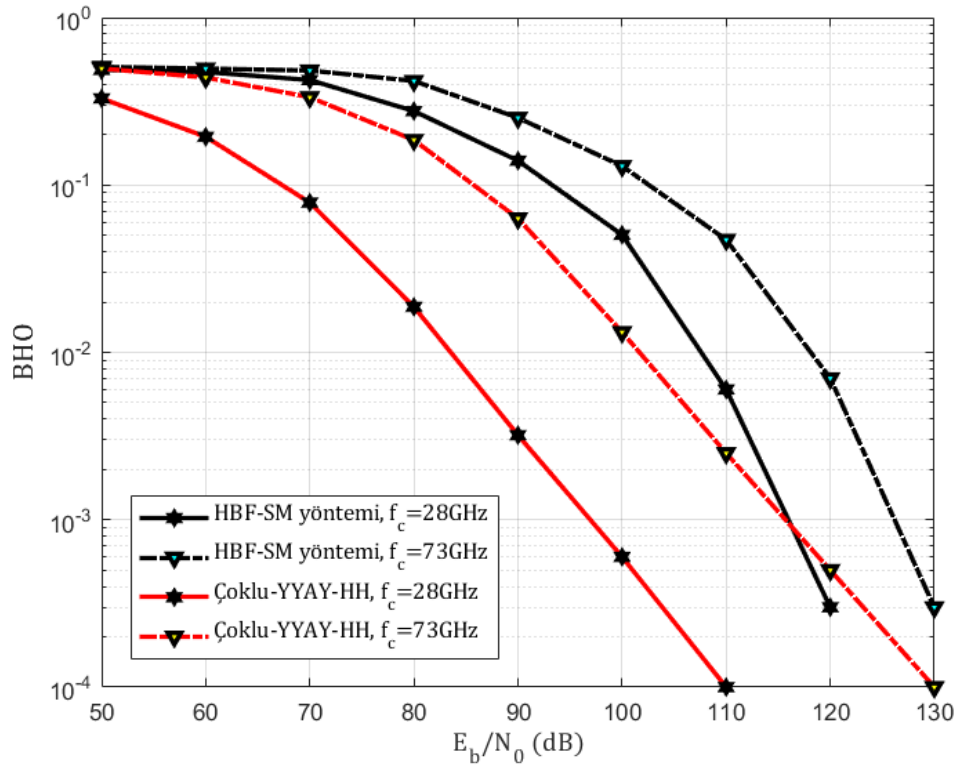
Şekil 4.11, 5G UMi-Street Canyon yol kaybı modeli altında 28GHz 'de önerilen sistemin teorik BHO ve benzetim sonuçlarının birbirine ne kadar yakınsadığını göstermektedir. Sistem parametreleri ve uzaklık değerleri Şekil 4.10'daki değerler ile aynıdır. Şekilden görüldüğü üzere, yol kaybının dikkate alındığı durum için de önerilen sistemin OÇYHO eğrisi BHO eğrisine yakınsamakta ve HBF-SM'ye kıyasla daha iyi bir hata performansı göstermektedir.



Şekil 4.11 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin dış mekan yol kaybı altında $f_c = 28\text{GHz}$ 'de teorik ve benzetim BHO performanslarının karşılaştırılması.

Şekil 4.12'de, iç mekan bir senaryo için 5G InH Indoor-Office yol kaybı modeli altında 28GHz ve 73GHz 'de Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin BHO performans eğrileri karşılaştırmaları sunulmuştur. Sistem parametreleri; $K = 2$, $N_T = 4$, $N_R = 1$, $N_U = 2$, 4-QAM, $X = 2$, $N_s = 512$, $R = 4$, $L_D = 2$, $L_G = 2$ ve $L_H = 2$ olarak

tanımlıdır ve uzaklıklar ise birimleri m olmak üzere şu şekilde belirlenmiştir: L_D için, Bİ- $G\dot{I}_1$ arasındaki yolların uzaklıkları $\mathbf{l}_{d_{G\dot{I}_1}}=[4\ 5]$ ve Bİ- $G\dot{I}_2$ arasındaki yolların uzaklıkları $\mathbf{l}_{d_{G\dot{I}_2}}=[6\ 8]$; L_G için, Bİ-YYAY $_1$ arasındaki mesafe ilk kullanıcı (C_1) için $\mathbf{l}_{g_{C_1}}=[1.5\ 2]$ ve ikinci kullanıcı (C_2) için Bİ-YYAY $_2$ arasındaki mesafe $\mathbf{l}_{g_{C_2}}=[2.5\ 3]$; L_H için, YYAY- $G\dot{I}_1$ arasındaki yolun uzaklığı $\mathbf{l}_{h_{G\dot{I}_1}}=[2\ 2.5]$ ve YYAY- $G\dot{I}_2$ arasındaki yolun uzaklığı $\mathbf{l}_{h_{G\dot{I}_2}}=[3\ 3.5]$ olarak belirlenmiştir. Burada, YYAY'nin alışı ve veriş yönündeki anten kazançları 3dBi seçilmiştir.



Şekil 4.12 Çoklu-YYAY-HH ve HBF-SM yöntemlerinin iç mekan yol kaybı altında farklı f_c değerleri için BHO performanslarının karşılaştırılması.

Şekilden görüldüğü üzere, önerilen Çoklu-YYAY-HH sistemi, HBF-SM yöntemine kıyasla 28GHz 'de yaklaşık 25dB ve 73GHz 'de yaklaşık 18dB kazanç sağlayarak daha iyi performans göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Son yıllarda gezgin ağ teknolojilerinin hızlı gelişimi ile hayatımıza giren çeşitli uygulamalar ve artan geniş bant hizmetleri, veri trafiğinde ciddi bir artışa neden olmuştur. Kullanıcı sayısındaki ve gezgin veri trafiğindeki bu artışları karşılamak için mevcut ağ mimarileri yetersiz kalmıştır. Araştırmacılar, daha iyi performans özelliklerine sahip yeni nesil teknolojiler için araştırmalarına ağırlık vermiş ve özellikle mmDalga iletişimine yönelmişlerdir. mmDalga teknolojisi, büyük bant genişliği sayesinde daha yüksek veri hızlarına ulaşabilmekte ve yüksek sistem kapasitesi sağlamaktadır. mmDalga iletişiminde çalışmak beraberinde birçok yeni teknolojiyi kullanmayı gerektirmiştir. Çünkü yüksek frekanslarda çalışmanın bir sonucu olarak sinyal ciddi bir sönmülemeye uğramaktadır. Buradaki performans kayıpları, masif ÇGÇÇ teknolojisiyle büyük ölçüde azaltılmıştır. Çeşitli avantajlara sahip hibrit huzmeleme ve indis modülasyon tekniklerinin masif ÇGÇÇ sistemlere uygulanması, bu sistemlerin donanım ve spektral verimliliği nispeten iyileştirilmiş olsa da sönmülemeye maruz kalmanın sonucu olarak performans kaybı hala yaşanmaktadır. Bahsedilen özelliklere sahip, (Yüzgeçcioğlu & Jorswieck, 2017)'de önerilen HBF-SM yönteminin performansının daha da iyileştirilebileceği öngörülmüştür ve bu bağlamda, akıllı bir radyo yayılma ortamı gerçekleştirerek sönmüleme etkisini asgari düzeye indirmek için sisteme çoklu YYAY teknolojisinin uyumlu bir şekilde bütünleştirilmesi düşünülmüştür.

Bu tez çalışmasında, çok kullanıcı mmDalga masif ÇGÇÇ ağlarda çoklu YYAY şeması kullanan yeni nesil bir haberleşme sistemi için aşağı bağlantı iletimi önerilmiştir. Sistemde, baz istasyonu ile gezgin istasyon arasına yerleştirilen YYAY'ler aracılığıyla alıcıya ulaşan sinyalin gücü artırılır ve bu da hata performansını olumlu yönde etkiler. Ayrıca sistem modeline uzaysal modülasyon dahil edilerek sembol, YYAY ve DDD indisleri sinyalde birlikte taşınmaktadır. Bu sayede, HBF-SM yönteminin hata performansını iyileştirmenin yanı sıra spektral verimliliğinde de artış sağlanmıştır. Kanallar, Saleh-Valenzuela modeli ile oluşturulmuş ve çok yollu sönmülemenin etkisi 5G UMi-Street Canyon ve 5G InH Indoor-Office yol kaybı modelleri altında incelenmiştir. Sistem modelinin sayısal ön kodlayıcı, analog huzme yapılandırıcı ve sayısal birleştirici tasarımları verilmiştir. Önerilen Çoklu-YYAY-HH sisteminin teorik bit hata oranı ve ulaşılabilir hız analizleri sunulmuş ve benzetim sonuçlarıyla teorik bulgular doğrulanmıştır. Benzetim sonuçları iki bölüm altında incelenmiştir; Bölüm (4.3.1)'de yol kaybı katsayılarının 1 olduğu kabulü altındaki

performans karşılaştırmaları verilirken Bölüm (4.3.2)'de bahsedilen yol kaybı modelleri altında sönümleme katsayıları için performans sonuçları verilmiştir. Benzetim sonuçlarında, Çoklu-YYAY-HH'nin HBF-SM'ye kıyasla daha üstün bir performansa sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, değişen verici anten sayısı, alıcı anten sayısı, düzgün doğrusal dizi sayısı, YYAY sayısı, YYAY'deki yansıtıcı eleman sayısı, yol sayısı ve bit çözünürlük değeri gibi parametrelerin hata performansına etkisi incelenmiştir. Bunlarla beraber frekans değerine bağlı yol kaybı grafiği oluşturulmuştur. Genel olarak sonuçlar, mmDalga masif ÇGÇÇ sistemlere çoklu YYAY'nin dahil edilmesiyle oluşturulan sistem modelimizin iletişim performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir.

Tez çalışmasının devamı olarak gelecekte, yol kaybından kaynaklanan performans düşüşünü iyileştirmek için mevcut sistem tasarımına kod indis modülasyon yapısının eklenmesi planlanmaktadır. Ayrıca, ön kodlayıcı, huzme yapılandırıcı ve birleştirici tasarımı, kanal kestirimi ve güç eniyileme süreçlerinde makine öğrenmesi yöntemleri kullanılabilir. Bunlarla birlikte, yukarı bağlantı iletişimi için performans incelemesi yapılarak bütün bir sistem tasarımı önerilebilir ve bu sistem yapısı yazılım tanımlı ağ teknolojisi ile iş birliği yapacak şekilde yapılandırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abdel Hakeem, S. A., Hussein, H. H., & Kim, H. W. (2022). Vision and research directions of 6G technologies and applications. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(6), 2419–2442. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.03.019>
- Agrawal, J., Patel, R., Mor, P., Dubey, P., & Keller, J. M. (2015). International Journal of Multidisciplinary and Current Research Evolution of Mobile Communication Network: from 1G to 4G. *J. of Multidisciplinary and Current Research*, 3, 1100–1103. <http://ijmcr.com>
- Ahmad, W. S. H. M. W., Radzi, N. A. M., Samidi, F. S., Ismail, A., Abdullah, F., Jamaludin, M. Z., & Zakaria, M. N. (2020). 5G Technology: Towards Dynamic Spectrum Sharing Using Cognitive Radio Networks. *IEEE Access*, 8, 14460–14488. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2966271>
- Ahmed, I., Khammari, H., & Shahid, A. (2017). Resource Allocation for Transmit Hybrid Beamforming in Decoupled Millimeter Wave Multiuser-MIMO Downlink. *IEEE Access*, 5, 170–182. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2634096>
- Ahmed, I., Member, S., Khammari, H., Shahid, A., Member, S., Musa, A., Kim, K. S., Member, S., Poorter, E. De, & Moerman, I. (2018). A Survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G : Architecture and System Model Perspectives. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(4), 3060–3097. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2843719>
- Alamouti, S. M. (1998). A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(8), 1451–1458. <https://doi.org/10.1109/49.730453>
- Alkhateeb, A., Member, S., Ayach, O. El, Leus, G., & Heath, R. W. (2014). *Channel Estimation and Hybrid Precoding for Millimeter Wave Cellular Systems*. 8(5), 831–846.
- Alraih, S., Shaye, I., Behjati, M., Nordin, R., Abdullah, N. F., Abu-Samah, A., & Nandi, D. (2022). Revolution or Evolution? Technical Requirements and Considerations towards 6G Mobile Communications. *Sensors*, 22(3). <https://doi.org/10.3390/s22030762>
- Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What will 5G be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 32(6), 1065–1082. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098>
- Anju, M., & Gawas, U. (2015). An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks : 1G-6G. *Ijritcc.Org*, 3(5), 3130–3133.
- Ayach, O. El, Rajagopal, S., Abu-Surra, S., Pi, Z., & Heath, R. W. (2014). Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13(3), 1499–1513. <https://doi.org/10.1109/TWC.2014.011714.130846>

- Ayanoglu, E., Capolino, F., & Lee Swindlehurst, A. (2022). Wave-Controlled Metasurface-Based Reconfigurable Intelligent Surfaces. *IEEE Wireless Communications*, 29(4), 86–92. <https://doi.org/10.1109/MWC.005.2100401>
- Aydin, E., Ilhan, H., & Özdemir, Ö. (2014). Antenna Selection for Decode and Forward Based MIMO Cooperative Networks. *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2014 - Proceedings, Siu*, 433–436. <https://doi.org/10.1109/SIU.2014.6830258>
- Bahingayi, E. E., & Kyungchun, L. (2023). *Joint hybrid-precoding design for MU-MISO systems with a subconnected architecture*.
- Baier, P. W. (1994). CDMA or TDMA? CDMA for GSM? *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 4, 1280–1284. <https://doi.org/10.1109/WNCMF.1994.529459>
- Bangerter, B., Talwar, S., Arefi, R., & Stewart, K. (2014). Networks and devices for the 5G era. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 90–96. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736748>
- Basar, E., Wen, M., Mesleh, R., Di Renzo, M., Xiao, Y., & Haas, H. (2017). Index Modulation Techniques for Next-Generation Wireless Networks. *IEEE Access*, 5, 16693–16746. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2737528>
- Bogale, T. E., & Le, L. B. (2014). Beamforming for multiuser massive MIMO systems: Digital versus hybrid analog-digital. *2014 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2014*, 4066–4071. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7037444>
- Bölcskei, H. (2006). MIMO-OFDM wireless systems: Basics, perspectives, and challenges. *IEEE Wireless Communications*, 13(4), 31–37. <https://doi.org/10.1109/MWC.2006.1678163>
- Boulogeorgos, A. A. A., Alexiou, A., Merkle, T., Schubert, C., Elschner, R., Katsiotis, A., Stavrianos, P., Kritharidis, D., Chartsias, P. K., Kokkonen, J., Juntti, M., Lehtomaki, J., Teixeira, A., & Rodrigues, F. (2018). Terahertz Technologies to Deliver Optical Network Quality of Experience in Wireless Systems beyond 5G. *IEEE Communications Magazine*, 56(6), 144–151. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700890>
- Busari, S. A., Huq, K. M. S., Mumtaz, S., Dai, L., & Rodriguez, J. (2018). Millimeter-Wave Massive MIMO Communication for Future Wireless Systems: A Survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(2), 836–869. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2787460>
- Chen, D., & Laneman, J. N. (2004). Cooperative diversity for wireless fading channels without channel state information. *Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2, 1307–1312. <https://doi.org/10.1109/acssc.2004.1399364>
- Chen, J. C. (2017). Hybrid Beamforming with Discrete Phase Shifters for Millimeter-Wave Massive MIMO Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(8), 7604–7608. <https://doi.org/10.1109/TVT.2017.2670638>

- Chen, X., Lei, L., Zhang, H., & Yuen, C. (2015). Large-Scale MIMO Relaying Techniques for Physical Layer Security: AF or DF? *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(9), 5135–5146. <https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2433291>
- Chen, Z., Fan, P., & Letaief, K. Ben. (2014). Opportunistic stable two-way relaying: With or without direct link. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(8), 3700–3714. <https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2303193>
- Cheng, H. V., Björnson, E., & Larsson, E. G. (2017). Optimal Pilot and Payload Power Control in Single-Cell Massive MIMO Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 65(9), 2363–2378. <https://doi.org/10.1109/TSP.2016.2641381>
- Cheng, X., Zhang, M., Wen, M., & Yang, L. (2018). *Index Modulation for 5G : Striving to Do More with Less*. April, 126–132.
- Chin, W. H., Fan, Z., & Haines, R. (2014). *EMERGING TECHNOLOGIES AND RESEARCH CHALLENGES FOR 5G WIRELESS NETWORKS*. April, 106–112.
- Constantine A. Balanis. (2008). “Antenna theory; Analysis And Design” New Jersey: Jhon Wiley & Sons. In *Proceedings of the IEEE* (Vol. 72, Issue 7).
- Csiszár, I., & Shields, P. C. (2004). Information Theory and Statistics: A Tutorial. In *Foundations and TrendsTM in Communications and Information Theory* (Vol. 1, Issue 4). <https://doi.org/10.1561/01000000004>
- Daghari, N. K., Elganimi, T. Y., & Rabie, K. M. (2021). Energy-Efficient Hybrid Precoding Schemes for RIS-Assisted Millimeter-wave Massive MIMO. *2021 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking, MeditCom 2021*, 294–299. <https://doi.org/10.1109/MeditCom49071.2021.9647463>
- Dahlman, E., Parkvall, S., & Johan, S. (2020). *5G NR — The Next Generation Wireless Access Technology*.
- Dalton, L. A., Member, S., & Georghiades, C. N. (2005). A full-rate, full-diversity four-antenna quasi-orthogonal space-time block code. 4(2), 363–366.
- Dang, S., Amin, O., Shihada, B., & Alouini, M. S. (2020). What should 6G be? *Nature Electronics*, 3(1), 20–29. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6>
- Di Renzo, M., Haas, H., Ghrayeb, A., Sugiura, S., & Hanzo, L. (2014). Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation. *Proceedings of the IEEE*, 102(1), 56–103. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2287851>
- Dilli, R. (2021). Performance analysis of multi user massive MIMO hybrid beamforming systems at millimeter wave frequency bands. *Wireless Networks*, 27(3), 1925–1939. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02546-w>
- Dilli, R. (2022). Hybrid Beamforming in 5G NR Networks Using Multi User Massive MIMO at FR2 Frequency Bands. In *Wireless Personal Communications* (Vol. 127, Issue 4). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s11277-022-09952-z>
- Elbir, A. M., Coleri, S., & Mishra, K. V. (2021). Federated dropout learning for hybrid

- beamforming with spatial path index modulation in multi-user MMWave-MIMO systems. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, 2021-June*, 8213–8217.
<https://doi.org/10.1109/ICASSP39728.2021.9414120>
- Ellingson, S. W. (2021). Path Loss in Reconfigurable Intelligent Surface-Enabled Channels. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 2021-Septe*, 829–835.
<https://doi.org/10.1109/PIMRC50174.2021.9569465>
- Ferreira, T., Figueiredo, A., Raposo, D., Luis, M., Rito, P., & Sargento, S. (2023). Millimeter-Wave Feasibility in 5G Backhaul: A Cross-Layer Analysis of Blockage Impact. *IEEE Access*, 11, 5178–5192.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3236100>
- Gampala, G., & Reddy, C. J. (2016). Design of millimeter wave antenna arrays for 5G cellular applications using FEKO. *2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology, ICWITS 2016 and System and Applied Computational Electromagnetics, ACES 2016 - Proceedings*.
<https://doi.org/10.1109/ROPACES.2016.7465426>
- Gani, A., Li, X., Yang, L., Zakaria, O., & Anuar, N. B. (2009). Multi-bandwidth data path design for 5G wireless mobile internets. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 6(2), 159–168.
- Gao, Z., Dai, L., Mi, D., Wang, Z., Imran, M. A., & Shakir, M. Z. (2016). *MmWave Massive MIMO Based Wireless Backhaul for 5G Ultra-Dense Network*. 22(December).
- Ge, X., Shen, W., Xing, C., Zhao, L., & An, J. (2022). Training Beam Design for Channel Estimation in Hybrid mmWave MIMO Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3155157>
- Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., & Zorzi, M. (2020). Toward 6G Networks : Use Cases and Technologies. *IEEE Communications Magazine*, 58(3), 55–61.
- Gong, S., Xing, C., Liu, H., Zhao, X., Wang, J., An, J., & Quek, T. Q. S. (2023). Hardware-Impaired RIS-assisted mmWave Hybrid Systems: Beamforming Design and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 1–17.
<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3241328>
- Gong, S., Xing, C., Yue, P., Zhao, L., & Quek, T. Q. S. (2022). Hybrid Analog and Digital Beamforming for RIS-assisted mmWave Communications. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22(3), 1537–1554.
<https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3205322>
- Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. *IEEE Access*, 3, 1206–1232.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2461602>
- Haneda, K., Tian, L., Asplund, H., Li, J., Wang, Y., Steer, D., Li, C., Balercia, T., Lee, S., Kim, Y., Ghosh, A., Thomas, T., Nakamurai, T., Kakishima, Y., Imai, T.,

- Papadopoulos, H., Rappaport, T. S., Maccartney, G. R., Samimi, M. K., ... Ghosh, A. (2016). Indoor 5G 3GPP-like channel models for office and shopping mall environments. *2016 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC 2016*, 694–699. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2016.7503868>
- He, Z. Q., & Yuan, X. (2020). Cascaded Channel Estimation for Large Intelligent Metasurface Assisted Massive MIMO. *IEEE Wireless Communications Letters*, 9(2), 210–214. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2948632>
- Hemadeh, I. A., Satyanarayana, K., El-Hajjar, M., & Hanzo, L. (2018). Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(2), 870–913. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783541>
- Hewa, T., Gur, G., Kalla, A., Ylianttila, M., Bracken, A., & Liyanage, M. (2020). The role of blockchain in 6G: Challenges, opportunities and research directions. *2nd 6G Wireless Summit 2020: Gain Edge for the 6G Era, 6G SUMMIT 2020*, iv. <https://doi.org/10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083784>
- Hikmaturokhman, A., Deiny Mardian, R., Ramli, K., Suryanegara, M., & Rohman, I. K. (2021). 5G spectrum valuation of milimeter wave technology: A case study of Indonesia industrial area for acceleration of broadband development. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 99(5), 1209–1218.
- Hong, S. H., Park, J., Kim, S. J., & Choi, J. (2022). Hybrid Beamforming for Intelligent Reflecting Surface Aided Millimeter Wave MIMO Systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 21(9), 7343–7357. <https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3157880>
- Hong, W., Jiang, Z. H., Yu, C., Hou, D., Wang, H., Guo, C., Hu, Y., Kuai, L., Yu, Y., Jiang, Z., Chen, Z., Chen, J., Yu, Z., Zhai, J., Zhang, N., Tian, L., Wu, F., Yang, G., Hao, Z.-C., & Zhou, J. Y. (2021). The Role of Millimeter-Wave Technologies in 5G/6G Wireless Communications. *IEEE Journal of Microwaves*, 1(1), 101–122. <https://doi.org/10.1109/jmw.2020.3035541>
- Hu, S., Rusek, F., & Edfors, O. (2018). Beyond Massive MIMO: The Potential of Data Transmission with Large Intelligent Surfaces. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 66(10), 2746–2758. <https://doi.org/10.1109/TSP.2018.2816577>
- Huang, C., Yang, Z., Alexandropoulos, G. C., Xiong, K., Wei, L., Yuen, C., Zhang, Z., & Debbah, M. (2021). Multi-Hop RIS-Empowered Terahertz Communications: A DRL-Based Hybrid Beamforming Design. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(6), 1663–1677. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3071836>
- Hussain, R., Alreshaid, A. T., Podilchak, S. K., & Sharawi, M. S. (2017). Compact 4G MIMO antenna integrated with a 5G array for current and future mobile handsets. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 11(2), 271–279. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.0738>
- Ilya, L., & Vyacheslav, V. (2021). Atmospheric propagation of SubTHz waves and space, 6G & 7G communications. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2015/1/012084>

- Jeganathan, J., Ghayeb, A., & Szczecinski, L. (2008). Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis. *IEEE Communications Letters*, 12(8), 545–547. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2008.080739>
- Kabaoğlu, N., Çirpan, H. A., Çekli, E., & Paker, S. (2003). Deterministic maximum likelihood approach for 3-D near field source localization. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 57(5), 345–350. <https://doi.org/10.1078/1434-8411-54100183>
- Katiyar, H., Rastogi, A., & Agarwal, R. (2011). Cooperative communication: A review. *IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)*, 28(5), 409–417. <https://doi.org/10.4103/0256-4602.85974>
- Khiadani, N. (2020). Vision, Requirements and Challenges of Sixth Generation (6G) Networks. *6th Iranian Conference on Signal Processing and Intelligent Systems, ICSPIS 2020, December 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICSPIS51611.2020.9349580>
- Khutey, R., Rana, G., Dewangan, V., Tiwari, A., & Dewamngan, A. (2015). Future of Wireless Technology 6G & 7G. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 3(2), 583–585. www.researchpublish.com
- Kim, J., Kim, H., Park, C. S., & Lee, K. B. (2006). On the performance of multiuser MIMO systems in WCDMA/HSDPA: Beamforming, feedback and user diversity. *IEICE Transactions on Communications*, E89-B(8), 2161–2169. <https://doi.org/10.1093/ietcom/e89-b.8.2161>
- Kim, K., Kwak, J., & Seok, W. (2022). Milimeter Wave Short Distance Communication for Scientific Research Equipment. *APNOMS 2022 - 23rd Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium: Data-Driven Intelligent Management in the Era of beyond 5G*. <https://doi.org/10.23919/APNOMS56106.2022.9919946>
- Koc, A., & Le-Ngoc, T. (2022). Intelligent Non-Orthogonal Beamforming With Large Self-Interference Cancellation Capability for Full-Duplex Multiuser Massive MIMO Systems. *IEEE Access*, 10, 51771–51791. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3173618>
- Laneman, J. N., Wornell, G. W., & Tse, D. N. C. (2001). Anefficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks. *IEEE International Symposium on Information Theory - Proceedings*, 294. <https://doi.org/10.1109/ISIT.2001.936157>
- Larsson, E. G., Edfors, O., Tufvesson, F., & Marzetta, T. L. (2014). Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*, 52(2), 186–195. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6736761>
- Larsson, E. G., & Stoica, P. (2003). Space-time block coding for wireless communications. In *Cambridge university press*. <https://doi.org/10.1109/49.753730>
- Li, Q. C., Niu, H., Papathanassiou, A. T., & Wu, G. (2014). 5G Network Capacity. *March*, 71–78.
- Li, X., Gani, A., Salleh, R., & Zakaria, O. (2009). The future of mobile wireless communication networks. *Proceedings of the 2009 International Conference on*

- Communication Software and Networks, ICCSN 2009*, 554–557.
<https://doi.org/10.1109/ICCSN.2009.105>
- Li, Z., Chen, T., & Hu, X. (2022). Hybrid beamforming for millimeter-wave massive MIMO heterogeneous networks. *Digital Signal Processing*, 130, 103738.
<https://doi.org/10.1016/j.dsp.2022.103738>
- Lu, L., Li, G. Y., Swindlehurst, A. L., Ashikhmin, A., & Zhang, R. (2014). An overview of massive MIMO: Benefits and challenges. *IEEE Journal on Selected Topics in Signal Processing*, 8(5), 742–758. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2014.2317671>
- Mesleh, R. Y., Haas, H., & Sinanovi, S. (2008). *Spatial Modulation*. 57(4), 2228–2241.
- Mihret, E. T., & Haile, G. (2021). 4G, 5G, 6G, 7G and Future Mobile Technologies. *J Comp Sci Info Technol*, 9(2), 3–9.
- Mir, T., Siddiqi, Z., Mir, U., Mackenzie, R., & Hao, M. (2019). One-bit hybrid precoding for wideband millimeter-wave massive MIMO systems. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2019-April*. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2019.8746542>
- Mishra, P., Singh, G., Vij, R., & Chandil, G. (2013). BER analysis of Alamouti space time block coded 2×2 MIMO systems using Rayleigh dent mobile radio channel. *Proceedings of the 2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference, IACC 2013, July*, 154–158. <https://doi.org/10.1109/IAdCC.2013.6514212>
- Molisch, A. F., Ratnam, V. V., Han, S., Li, Z., Nguyen, S. L. H., Li, L., & Haneda, K. (2017). Hybrid Beamforming for Massive MIMO: A Survey. *IEEE Communications Magazine*, 55(9), 134–141. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600400>
- Nabar, R. U., Bölcskei, H., & Kneubühler, F. W. (2004). Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 22(6), 1099–1109. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.830922>
- Nabeel, M., Bloessl, B., & Dressler, F. (2017). Low-complexity soft-bit diversity combining for ultra-low power wildlife monitoring. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*. <https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925504>
- Ngo, H. Q., Larsson, E. G., & Marzetta, T. L. (2013). Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems. *IEEE Transactions on Communications*, 61(4), 1436–1449. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.020413.110848>
- Nirmal Lourdh Rayan, C. K. (2014). A Survey on Mobile Wireless Networks. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(1), 685.
- Niu, Y., Li, Y., Jin, D., Su, L., & Vasilakos, A. V. (2015). A survey of millimeter wave communications (mmWave) for 5G: opportunities and challenges. *Wireless Networks*, 21(8), 2657–2676. <https://doi.org/10.1007/s11276-015-0942-z>
- Pappa, M., Ramesh, C., & Kumar, M. N. (2018). Performance comparison of massive MIMO and conventional MIMO using channel parameters. *Proceedings of the 2017 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking, WiSPNET 2017, 2018-Janua*, 1808–1812.
<https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2017.8300073>

- Paulraj, A. J., Gore, D. A., Nabar, R. U., Bölcskei, H., & Member, S. (2004). *An Overview of MIMO Communications — A Key to Gigabit Wireless*. 92(2).
- Pi, Z., & Khan, F. (2011). An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. *IEEE Communications Magazine*, 49(6), 101–107.
<https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783993>
- Pi, Z., & Khan, F. (2012). A millimeter-wave massive MIMO system for next generation mobile broadband. *Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 693–698. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2012.6489100>
- Pierucci, L. (2015). The quality of experience perspective toward 5G technology. *IEEE Wireless Communications*, 22(4), 10–16.
<https://doi.org/10.1109/MWC.2015.7224722>
- Popovski, P., Trillingsgaard, K. F., Simeone, O., & Durisi, G. (2018). 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view. *IEEE Access*, 6, 55765–55779. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781>
- Prinima, & Pruthi, J. (2016). Evolution of Mobile Communication Network: from 1G to 5G. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 4(4), 224–227.
http://www.ijircce.com/upload/2016/etiete/37_prinima.pdf
- Project, G. P., Specification, T., Radio, G., & Network, A. (2018). *3GPP TR 38.901 - Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz*. 0(Relase 15).
- Rappaport, T. S., Sun, S. H. U., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., & Gutierrez, F. (2013). Millimeter Wave Mobile Communications for 5G Cellular : It Will Work ! *IEEE Access*, 1, 335–349.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813>
- Rappaport, T. S., Xing, Y., MacCartney, G. R., Molisch, A. F., Mellios, E., & Zhang, J. (2017). Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks-With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(12), 6213–6230.
<https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2734243>
- Roslan, S. F., Kamarudin, M. R., Khalily, M., & Jamaluddin, M. H. (2015). An MIMO F-shaped dielectric resonator antenna for 4G applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 57(12), 2931–2936. <https://doi.org/10.1002/mop.29473>
- Salz, J., & Winters, J. H. (2009). Effect of fading correlation on adaptive arrays in digital mobile radio. *Adaptive Antennas for Wireless Communications*, 43(4), 435–443.
<https://doi.org/10.1109/9780470544075.ch3>
- Sendonaris, A., Erkip, E., & Aazhang, B. (2003). User Cooperation Diversity - Part I: System Description. *IEEE Transactions on Communications*, 51(11), 1927–1938.
<https://doi.org/10.1109/TCOMM.2003.818096>
- Series, M. (2020). *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond M Series*. 0.

- Shafi, M., Molisch, A. F., Smith, P. J., Haustein, T., Zhu, P., De Silva, P., Tufvesson, F., Benjebbour, A., & Wunder, G. (2017). 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(6), 1201–1221. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2692307>
- Spencer, Q. H., Peel, C. B., Swindlehurst, A. L., & Haardt, M. (2004). An introduction to the multi-user MIMO downlink. *IEEE Communications Magazine*, 42(10), 60–67. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2004.1341262>
- Srikanth, S., Murugesu Pandian, P. A., & Fernando, X. (2012). Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: A comparison. *IEEE Communications Magazine*, 50(9), 153–161. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6295726>
- Sun, H., Wei, Z., Yang, J., Li, N., & Yang, D. (2018). A low complexity millimeter wave multi-path channel estimation algorithm exploiting directional energy elimination. *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT, 2017-Octob*, 266–271. <https://doi.org/10.1109/ICCT.2017.8359643>
- Swindlehurst, A., Ayanoglu, E., Heydari, P., & Capolino, F. (2014). Millimeter-wave massive MIMO: The next wireless revolution? *IEEE Communications Magazine*, 52(9), 56–62. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6894453>
- Tan, W., Jin, S., Wen, C. K., & Jiang, T. (2017). Spectral efficiency of multi-user millimeter wave systems under single path with uniform rectangular arrays. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2017(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0966-4>
- Tariq, F., Khandaker, M. R. A., Wong, K. K., Imran, M. A., Bennis, M., & Debbah, M. (2020). A Speculative Study on 6G. *IEEE Wireless Communications*, 27(4), 118–125. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.1900488>
- Tarokh, V. (1999). Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criteria in the presence of channel estimation errors, mobility, and multiple paths. *IEEE Transactions on Communications*, 47(2), 199–207. <https://doi.org/10.1109/26.752125>
- Thurpati, S., & Muthuchidambaranathan, P. (2022). Design of Hybrid Precoder for mm-Wave MIMO System Based on Generalized Triangular Decomposition Method. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 68(3), 519–525. <https://doi.org/10.24425/ijet.2022.141269>
- Wang, R., Ren, H., Pan, C., Fang, J., Dong, M., & Dobre, O. A. (2023). Channel Estimation for RIS-aided mmWave Massive MIMO System Using Few-bit ADCs. *IEEE Communications Letters*, 27(3), 961–965. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2023.3240499>
- Wen, M., Cheng, X., & Yang, L. (2017). *Index Modulation for 5G Wireless Communications*. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-51355-3>
- Wolniansky, P. W., Foschini, G. J., Golden, G. D., & Valenzuela, R. A. (1998). V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. *Conference Proceedings of the International Symposium on Signals, Systems and Electronics*, 295–300.

<https://doi.org/10.1109/issse.1998.738086>

- Wu, Q., & Zhang, R. (2020). Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network. *IEEE Communications Magazine*, 58(1), 106–112. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900107>
- Wu, X., Beaulieu, N. C., & Liu, D. (2017). On Favorable Propagation in Massive MIMO Systems and Different Antenna Configurations. *IEEE Access*, 5, 5578–5593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2695007>
- Xiao, M., Mumtaz, S., Huang, Y., Dai, L., Li, Y., Matthaiou, M., Karagiannidis, G. K., Bjornson, E., Yang, K., Chih-Lin, I., & Ghosh, A. (2017). Millimeter Wave Communications for Future Mobile Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(9), 1909–1935. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2719924>
- Yan, W., Yuan, X., He, Z. Q., & Kuai, X. (2020). Passive Beamforming and Information Transfer Design for Reconfigurable Intelligent Surfaces Aided Multiuser MIMO Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38(8), 1793–1808. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.3000811>
- Yang, Z., Xu, W., Huang, C., Shi, J., & Shikh-Bahaei, M. (2021). Beamforming Design for Multiuser Transmission through Reconfigurable Intelligent Surface. *IEEE Transactions on Communications*, 69(1), 589–601. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3028309>
- Yildirim, I., Koc, A., Basar, E., & Le-ngoc, T. (2022). RIS-Aided Angular-Based Hybrid Beamforming Design in mmWave Massive MIMO Systems. *GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference*, 120, 5267–5272.
- Yildirim, I., Uyrus, A., & Basar, E. (2021). Modeling and Analysis of Reconfigurable Intelligent Surfaces for Indoor and Outdoor Applications in Future Wireless Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 69(2), 1290–1301. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3035391>
- Younis, A., Serafimovski, N., Mesleh, R., & Haas, H. (2010). Generalised spatial modulation. *Conference Record - Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1498–1502. <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2010.5757786>
- Yüzgeçcioğlu, M., & Jorswieck, E. (2017). Hybrid beamforming with spatial modulation in multi-user massive MIMO mmWave networks. *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292710>
- Zhang, Z., Xiao, Y., Ma, Z., Xiao, M., Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G. K., & Fan, P. (2019). 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(3), 28–41. <https://doi.org/10.1109/MVT.2019.2921208>
- Zhao, Q., & Li, H. (2007). Differential modulation for cooperative wireless systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(5 II), 2273–2283. <https://doi.org/10.1109/TSP.2006.890922>
- Zhou, T., Xu, K., Xie, W., Shen, Z., Wei, C., Liu, J., & Sun, L. (2021). Aerial intelligent

reflecting surface-enhanced cell-free massive MIMO for high-mobility communication: joint Doppler compensation and power optimization. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2021(1). <https://doi.org/10.1186/s13634-021-00781-z>

Zhou, Y., Liu, L., Du, H., Tian, L., Wang, X., & Shi, J. (2014). An overview on intercell interference management in mobile cellular networks: From 2G to 5G. *2014 IEEE International Conference on Communication Systems, IEEE ICCS 2014*, 1, 217–221. <https://doi.org/10.1109/ICCS.2014.7024797>

Zhu, Q., Li, H., Liu, R., Li, M., & Liu, Q. (2021). Hybrid Beamforming and Passive Reflection Design for RIS-Assisted mmWave MIMO Systems. *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops, ICC Workshops 2021 - Proceedings*, 0–5. <https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473829>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Beyza Önal

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Elektronik Mühendisliği	İstanbul Medeniyet Üniversitesi	2020

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2021-...	İstanbul Medeniyet Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLAR

Makale

1. Onal, B., Cogen, F., & Aydin, E. (2021). Differential Chaos Shift Keying-Assisted Media-Based Modulation. *Electrica*, 21(1), 66-74.

Bildiri

1. Onal, B., Cogen, F., Aydin, E., & Kabaoglu, N. (2021, November). Reconfigurable Intelligent Surface Empowered Differential Chaos Shift Keying Assisted Media-Based Modulation over Nakagami-m Fading Channels. In *2021 13th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 1-5). IEEE.