

T.C.
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ
İÇİN GELİŞMİŞ İNDİS MODÜLASYON SİSTEMLERİNİN
PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BURAK AHMET ÖZDEN

KASIM 2022

T.C.
İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ
İÇİN GELİŞMİŞ İNDİS MODÜLASYON SİSTEMLERİNİN
PERFORMANS ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BURAK AHMET ÖZDEN

DANIŞMAN

Doç. Dr. ERDOĞAN AYDIN

KASIM 2022

ONAY

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrencisi olan Burak Ahmet Özden'in hazırladığı ve jüri önünde savunduğu "Gelecek Nesil Kablosuz Haberleşme Sistemleri İçin Gelişmiş İndis Modülasyon Sistemlerinin Performans Analizi" başlıklı tez başarılı kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Erdoğan AYDIN

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Üyeler:

Prof. Dr. Nihat KABAOĞLU

Kurumu: İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Prof. Dr. Hacı İLHAN

Kurumu: Yıldız Teknik Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 18.11.2022

BİLDİRİM

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

Burak Ahmet ÖZDEN

Danışmanlığını yaptığım işbu tezin tamamen öğrencinin çalışması olduğunu, akademik ve etik kuralları gözeterek çalıştığını taahhüt ederim.

Doç. Dr. Erdoğan AYDIN

TEŞEKKÜR

Kendisiyle çalışabildiğim için büyük mutluluk duyduğum, bu zamana kadar desteklerini sakınmayıp daima yanımda olan değerli hocam Doç. Dr. Erdoğan AYDIN'a ve katkılarından dolayı Arş. Gör. Fatih ÇÖGEN'e teşekkür ediyorum. Ayrıca bu süreçte yanımda olan sevgili aileme de teşekkür ediyorum.

Kasım 2022,

Burak Ahmet ÖZDEN

İÇİNDEKİLER

ONAY	iii
BİLDİRİM.....	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR	xv
ŞEKİLLER LİSTESİ	xix
TABLolar LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxii
ABSTRACT	xxiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Özeti	1
1.2. Tezin Amacı.....	5
1.3. Hipotez ve İzlenen Yol	6
2. KABLOSUZ HABERLEŞMEYE DAİR TEMEL BİLGİLER	9
2.1. Çok Yollu Sönümlleme.....	9
2.2. Kablosuz Haberleşmede Kullanılan Kanal Modelleri	10
2.2.1. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü (AWGN) Kanal Modeli	11
2.2.2. Rayleigh Sönümllemeli Kanal Modeli	12
2.2.3. Rician Sönümllemeli Kanal Modeli	15
2.2.4. Nakagami- m Sönümllemeli Kanal Modeli	17
3. MIMO SİSTEMLER	20

3.1. Uzaysal Çoğullama	22
3.2. Uzaysal Çeşitleme	23
4. İNDİS MODÜLASYONU	25
4.1. Uzaysal Modülasyon Tekniği	27
4.2. Ortam Tabanlı Modülasyon Tekniği	30
4.3. Kod İndis Modülasyonu	34
5. AYARLANABİLİR AKILLI YÜZEY TEKNOLOJİSİ	38
6. MIMO SİSTEMLER İÇİN KOD İNDİS MODÜLASYON DESTEKLİ UZAYSAL ORTAM TABANLI MODÜLASYON SİSTEMİ	41
6.1. CIM-SMBM Sistem Modeli	41
6.1.1. CIM-SMBM Sisteminin Verici Yapısı	41
6.1.2. CIM-SMBM Sisteminin Alıcı Yapısı	45
6.1.3. Karmaşıklık Analizi	48
6.2. Performans Analizleri	52
6.2.2. CIM-SMBM Sisteminin ABER Analizi	52
6.2.3. Kod İndis Kestiriminin Ortalama Hata Olasılığı	53
6.2.4. Aktif Anten İndisi, Aktif MAP İndisi ve Modüle Edilmiş Sembolün Bit Hata Olasılığı	56
6.3. Enerji Verimliliği, Çıktı ve Veri Hızı Analizleri	57
6.3.2. CIM-SMBM Sisteminin Enerji Verimliliği Analizi	57
6.3.3. CIM-SMBM Sisteminin Çıktı ve Veri Hızı Analizleri	58
6.4. Simülasyon Sonuçları	60
7. MISO SİSTEMLER İÇİN AYARLANABİLİR AKILLI YÜZEY İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇİFT UZAYSAL MODÜLASYON SİSTEMİ	67

7.1. DSM-RIS Sistem Modeli	67
7.2. Simülasyon Sonuçları	73
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	94

SEMBOL LİSTESİ

σ	Standart sapma
σ^2	Varyans
μ	Ortalama değer
$f(.)$	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
$F(.)$	Birikimli dağılım fonksiyonu
$I_0(.)$	Sıfırıncı dereceden ve birinci türden Bessel fonksiyonunu
$\exp(.)$	Üstel fonksiyon
$\Gamma(m)$	Gamma fonksiyonu
m	Nakagami $-m$ dağılımının parametresi
N_T	Verici anten sayısı
N_R	Alıcı anten sayısı
$\mathbf{H}$	Kanal matrisi
$\mathbf{w}$	AWGN gürültü vektörü
$\mathbf{y}$	Alınan sinyal vektörü
n_{rf}	RF ayna sayısı
$\max(.)$	Maksimum operatörü
$\min(.)$	Minimum operatörü
N_C	Walsh Hadamard kod sayısı
n_C	Yayıcı kod indislerinde taşınan bit miktarı
n_s	Simgede taşınan bit miktarı

$\mathbf{b}$	Veri biti vektörü
η	Spektral verimlilik sembolü
I	Eş-evreli bileşen
Q	Dik-evreli bileşen
Υ	Toplam MAP sayısı
n_{sm}	Aktif verici anten indislerinde taşınan bit miktarı
T_s	Sembol periyodu
$\mathbf{r}_{I,p}$	I bileşeni için alınan p 'inci gürültülü çip sinyal vektörü
$\mathbf{r}_{Q,p}$	Q bileşeni için alınan p 'inci gürültülü çip sinyal vektörü
$\mathbf{c}_{i_{\Re}}$	Reel bileşen için seçilen yayıcı kod
$\mathbf{c}_{i_{\Im}}$	Sanal bileşen için seçilen yayıcı kod
$\mathbf{h}_{\ell,k}$	CIM-SMBM sisteminin kanal vektörü
$\mathbf{w}_I$	I bileşeni için AWGN gürültü vektörü
$\mathbf{w}_Q$	Q bileşeni için AWGN gürültü vektörü
$x_{\Re}$	M -QAM karmaşık sembolü x 'in reel bileşeni
$x_{\Im}$	M -QAM karmaşık sembolü x 'in sanal bileşeni
$\mathcal{R}_I$	I bileşeni için alınan sinyal matrisi
$\mathcal{R}_Q$	Q bileşeni için alınan sinyal matrisi
$\mathbf{W}_I$	I bileşeni için AWGN gürültü matrisi
$\mathbf{W}_Q$	Q bileşeni için AWGN gürültü matrisi
$\mathbf{x}_{\Re}$	CIM-SMBM sisteminin reel bileşenin iletim vektörü
$\mathbf{x}_{\Im}$	CIM-SMBM sisteminin sanal bileşenin iletim vektörü

ℓ	Aktif verici anten indisi
k	Aktif MAP indisi
$i_{\Re}$	Reel bileşenin yayıcı kod indisi
$i_{\Im}$	Sanal bileşenin yayıcı kod indisi
$\hat{\mathbf{b}}$	Kestirilen bit dizisi vektörü
$\hat{x}$	Kestirilen M -QAM sembolü
$\hat{i}_{\Re}$	Kestirilen reel bileşenin yayıcı kod indisi
$\hat{i}_{\Im}$	Kestirilen sanal bileşenin yayıcı kod indisi
$\hat{\ell}$	Kestirilen aktif verici anten indisi
$\hat{k}$	Kestirilen MAP indisi
$\mathbf{c}_i$	Yayıcı kod vektörü
E_c	Ortalama sembol enerjisi
P	Yayıcı kod uzunluğu
$ \cdot $	Mutlak değer operatörü
$(\cdot)^*$	Eşlenik operatörü
$\mathcal{O}$	Hesaplama karmaşıklık simgesi
$\mathcal{P}_{\text{CIM-SMBM}}$	CIM-SMBM sisteminin toplam ortalama BER ifadesi
$\mathcal{P}_1$	Yayıcı kod indislerine eşlenen bitlerin BEP ifadesi
$\mathcal{P}_2$	Aktif MAP indislerine eşlenen bitlerin BEP ifadesi
$\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\Re}}$	Reel bileşene ait yayıcı kod indisinin kestirim olasılığı
$\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\Im}}$	Sanal bileşene ait yayıcı kod indisinin kestirim olasılığı
$\ \cdot\ $	Norm operatörü

N_0	Gauss rastgele değişkeninin varyansı
σ_Ω^2	Ω rastgele değişkeninin varyansı
$\mathcal{P}_e(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}})$	$\mathbf{x}$ ileildiğinde $\hat{\mathbf{x}}$ ifadesine yanlış karar vermenin hata olasılığı
P_{SMBM}	SMBM sisteminin toplam BER ifadesi
$e(g, z)$	CIM-SMBM sistemi için hatalı bitlerin sayısı
$\mathcal{E}_{\text{sav}}$	Enerji tasarrufu yüzdesi
E_b	Bit enerjisi
n_b	CIM-SMBM sistemiyle kıyaslanan sistemlerin spektral verimliliği
M	Modölasyon seviyesi
$\mathcal{T}$	CIM-SMBM sisteminin çıktı değeri
T_s	Sembol süresi
SNR (dB)	dB cinsinden SNR ifadesi
N	Yansıtıcı yüzey sayısı
φ_{opt}	DSM-RIS sistemindeki ikinci sembol için optimum döndürme açısı
$\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2$	DSM-RIS sisteminin iletim vektörleri
ℓ_1, ℓ_2	DSM-RIS sisteminin aktif anten indisleri
x_1	DSM-RIS sisteminde iletilen birinci sembol
$x_2 e^{j\varphi}$	DSM-RIS sisteminde fazı φ_{opt} kadar döndürülen iletilen ikinci sembol
$[\cdot]^T$	Transpoze operatörü
r	DSM-RIS sisteminde alınan sinyal ifadesi

h_{n_1, ℓ_1}	Birinci sembolün iletildiği verici ile RIS arasındaki kanal katsayısı
h_{n_2, ℓ_2}	İkinci sembolün iletildiği verici ile RIS arasındaki kanal katsayısı
g_{n_1}	Birinci sembolün iletildiği RIS ile alıcı arasında kanal katsayısı
g_{n_2}	İkinci sembolün iletildiği RIS ile alıcı arasında kanal katsayısı
$\mathbf{H}_1$	Birinci sembolün iletildiği verici ile RIS arasındaki kanal matrisi
$\mathbf{H}_2$	İkinci sembolün iletildiği verici ile RIS arasındaki kanal matrisi
$\mathbf{g}_1$	Birinci sembolün iletildiği RIS ile alıcı arasında kanal vektörü
$\mathbf{g}_2$	İkinci sembolün iletildiği RIS ile alıcı arasında kanal vektörü
Φ_1	Birinci RIS elemanının düzeltme fazı matrisi
Φ_2	İkinci RIS elemanının düzeltme fazı matrisi
w	AWGN gürültüsü
γ	Anlık SNR ifadesi
θ_{n_1, ℓ_1}	Birinci sembolün iletildiği verici ile RIS arasındaki kanal fazı
θ_{n_2, ℓ_2}	İkinci sembolün iletildiği verici ile RIS arasındaki kanal fazı
ψ_{n_1}	Birinci sembolün iletildiği RIS ile alıcı arasında kanal fazı
ψ_{n_2}	İkinci sembolün iletildiği RIS ile alıcı arasında kanal fazı
ϕ_{n_1}	Birinci RIS elemanının ayarlanabilir düzeltme fazı
ϕ_{n_2}	İkinci RIS elemanının ayarlanabilir düzeltme fazı
$\hat{x}_1, \hat{x}_2$	DSM-RIS sisteminde kestirilen birinci ve ikinci sembol değerleri
$\hat{\ell}_1, \hat{\ell}_2$	DSM-RIS sisteminde kestirilen aktif anten indisleri

$\mathbf{x}_k$ MBM sisteminin iletim vektörü

$\mathbf{x}_\ell$ SM sisteminin iletim vektörü

KISALTMALAR

ABER	Ortalama bit hata oranı (average bit error rate)
APEP	Ortalama çiftsel hata olasılığı (average pairwise error probability)
AWGN	Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise)
BEP	Bit hata olasılığı (bit error probability)
BER	Bit hata oranı (bit error rate)
bps	Saniye başına bit (bits per second)
bpcu	Kanal kullanımı başına bitler (bits per channel use)
BPSK	İkili karesel faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying)
CDF	Birikimli dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function)
CDMA	Kod bölmeli çoklu erişim (code division multiple access, CDMA)
CIM	Kod indis modülasyonu (code index modulation)
CIM-SM	Kod indis modülasyonlu uzaysal modülasyon (code index modulation based spatial modulation)
CIM-SMBM	Kod indis modülasyon destekli uzaysal ortam tabanlı modülasyon (code index modulation aided spatial media based modulation)
CIM-QSM	Kod indis modülasyonu tabanlı dikgen uzaysal modülasyon (code index modulation aided quadrature spatial modulation)
DB-ML	Geri yayma tabanlı ML (despreading-based ML)
DSM	Çift uzaysal modülasyon (double spatial modulation)

DS-SS	Doğrudan dizilimli yayılı izge (direct-sequence spread-spectrum)
DSM-RIS	Ayarlanabilir akıllı yüzey ile güçlendirilmiş çift uzaysal modülasyon (reconfigurable intelligent surface-empowered double spatial modulation)
ELC	Gelişmiş düşük karmaşıklık (enhanced low complexity)
FDM	Frekans bölmeli çoğullama (frequency division multiplexing)
GCIM	Genelleştirilmiş kod indis modülasyonu (generalized code index modulation)
GCIM-SM	Genelleştirilmiş kod indis modülasyonu tabanlı uzaysal modülasyon (generalized code index modulation based spatial modulation)
GSM	Genelleştirilmiş uzaysal modülasyon (generalised spatial modulation)
HQAM	Altıgen karesel genlik modülasyonu (hexagonal quadrature amplitude modulation)
Hz	Hertz
I	Eş-evreli (inphase)
ICI	Kanallar arası girişim (inter-channel interference)
IM	İndis modülasyonu (index modulation)
LOS	Görüş hattı (line of sight)
MBM	Ortam-tabanlı modülasyon (media-based modulation)
MBM-RIS	Ayarlanabilir akıllı yüzey destekli ortam tabanlı modülasyon (reconfigurable intelligent surface aided media-based modulation)
MIMO	Çok-girişli çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output)
MISO	Çok-girişli tek-çıkışlı (multiple-input single-output)

ML	En büyük olabilirlik (maximum likelihood)
M -QAM	M seviyeli dikgen genlik modülasyonu (M -ary quadrature amplitude modulation)
NOMA	Dik olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access)
OFDM	Dik frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing)
PDF	Olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function)
PSK	Faz kaydırmalı anahtarlama (phase shift keying)
Q	Dik-evreli (quadrature)
QAM	Karesel genlik modülasyonu (quadrature amplitude modulation)
QCM	Karesel kanal modülasyonu (quadrature channel modulation, QCM)
QSM	Dikgen uzaysal modülasyon (quadrature spatial modulation)
QSM-RIS	Ayarlanabilir akıllı yüzey destekli dikgen uzaysal modülasyon (reconfigurable intelligent surface aided quadrature spatial modulation)
RA	Ayarlanabilir anten (reconfigurable antenna)
RIS	Ayarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface)
RF	Radyo frekansı (radio frequency)
RM _s	Gerçel çarpımlar (real multiplications)
SIMO	Tek-girişli çok-çıkışlı (single-input multiple-output)
SISO	Tek-girişli tek-çıkışlı (single-input single-output)
SM	Uzaysal modülasyon (spatial modulation)
SMBM	Uzaysal ortam tabanlı modülasyon (spatial media-based modulation)

SM-RIS	Ayarlanabilir akıllı yüzey destekli uzaysal modülasyon (reconfigurable intelligent surface aided spatial modulation)
SNR	Sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio)
SSK	Uzay Kaydırmalı Anahtarlama (space shift keying)
STBC	Uzay-zaman blok kod (orthogonal space-time block code)
STC	Uzay-zaman kodlaması (space-time coding)
STIM	Uzay-zaman indis modülasyonu (space-time index modulation)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Kablosuz Haberleşme Ortamındaki Yansıma, Kırınım ve Saçılma Durumları.	10
Şekil 2.2 AWGN Kanal Modeli.	12
Şekil 2.3 Rayleigh Sönümlmeli Kablosuz Kanal Modeli.....	13
Şekil 2.4 Farklı σ değerleri için Rayleigh dağılımının PDF ifadesi.	14
Şekil 2.5 Rician Sönümlmeli Kablosuz Kanal Modeli.....	15
Şekil 2.6 $\sigma = 1$ ve farklı K değerleri için Rician dağılımının PDF ifadesi.....	17
Şekil 2.7 Farklı m değerleri için Nakagami-m dağılımının PDF ifadesi.....	19
Şekil 3.1 MIMO Sistem Modeli.....	21
Şekil 4.1 Uzaysal Modülasyon Sistem Modeli.	28
Şekil 4.2 Ortam Tabanlı Modülasyon Sistem Modeli.....	31
Şekil 4.3 Kod İndis Modülasyonu Sistem Modeli.	35
Şekil 5.1 Ayarlanabilir Akıllı Yüzey Sistem Modeli.	39
Şekil 6.1 CIM-SMBM Sistem Modeli.	42
Şekil 6.2 Hesaplamalı Karmaşıklık ve Spektral Verimlilik Karşılaştırmaları.	50
Şekil 6.3 CIM-SMBM Sisteminin $P = 32$ ve $N_R = 4$ iken M , N_T , n_{rf} ve N_C Değişen Değerleri için Performans Eğrileri.....	61
Şekil 6.4 DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM ve CIM-SMBM (üç farklı dedektör için) Sistemlerinin $P = 32$, $N_R = 4$ ve $\eta = 9$ için Performans Kıyaslaması.	62
Şekil 6.5 CIM-SMBM Sisteminin $P = 32$, $N_T = 4$, $n_{rf} = 2$ ve $N_R = 4$ için Performans Eğrileri.	63

Şekil 6.6 DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM, CIM-QSM ve CIM-SMBM Sistemlerinin $P = 32$, $N_R = 4$ ve $\eta = 12$ için Performans Kıyaslaması.....	64
Şekil 6.7 CIM-SMBM Sisteminin $P = 128$, $M = 16$, $N_T = 4$ ve $N_R = 4$ için Performans Eğrileri.	65
Şekil 7.1 DSM-RIS Sistem Modeli.	68
Şekil 7.2 DSM-RIS Sisteminin Verici Anten Sayısına Bağlı Performans Eğrisi.	73
Şekil 7.3 DSM-RIS Sisteminin Yansıtıcı Yüzey Sayısına Bağlı Performans Eğrisi.	74
Şekil 7.4 DSM-RIS Sisteminin DSM, SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS Sistemlerine göre $\eta = 8$ ve $N = 128$ Değerleri için Performans Kıyaslaması. .	75
Şekil 7.5 DSM-RIS Sisteminin DSM, SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS Sistemlerine göre $\eta = 10$ ve $N = 256$ Değerleri için Performans Kıyaslaması.	76

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 6.1 Hesaplamalı Karmaşıklık Karşılaştırması.	51
Tablo 6.2 CIM-SMBM Sisteminin Diğer Sistemlere Göre Yüzde Cinsinden Enerji Tasarruf Kıyaslaması ($\mathcal{E}_{\text{sav}}$ %).	58
Tablo 6.3 DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM, CIM-QSM ve CIM- SMBM Sistemlerinin Veri Hızı Karşılaştırılması [bpcu]..	59
Tablo 6.4 Sistem Parametreleri ve Değerleri Listesi.	60
Tablo 7.1 DSM-RIS, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS Sistemlerinin Veri Hızlarının Karşılaştırılması [bits/s/Hz].	69

ÖZET

GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN GELİŞMİŞ İNDİS MODÜLASYON SİSTEMLERİNİN PERFORMANS ANALİZİ

ÖZDEN, Burak Ahmet

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-
Elektronik Mühendisliği Programı

Danışman: Doç. Dr. Erdoğan AYDIN

Kasım, 2022. 96 Sayfa.

Kablosuz haberleşmede, daha hızlı ve daha kaliteli veri iletimi, düşük gecikmeli haberleşme, yüksek spektral verimlilik ve düşük enerji tüketimi gibi önemli parametrelere olan bireysel ve endüstriyel talepler her geçen gün hızla artmaya devam etmektedir. Bu nedenle bu talepleri karşılamayı hedefleyen haberleşme sistemleri daha da önem kazanmaktadır.

İndis modülasyon (index modulation, IM) tekniği, haberleşmede rol oynayan parametrelerin indisleri aracılığıyla veri bitlerinin iletilmesini mümkün kılmaktadır. IM tabanlı haberleşme sistemleri yüksek spektral verimlilik, yüksek enerji verimliliği, yüksek veri hızı ve yüksek hata başarımı sağlamaktadır. Ancak yukarıda sıralanan talepleri karşılamada mevcut IM tabanlı sistemler yetersiz kalmakta ve yeni yüksek başarılı kablosuz haberleşme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tezde yer alan ilk çalışmada, yüksek veri hızı, yüksek spektral verimlilik, yüksek hata başarımı ve düşük enerji tüketimi sağlanması için kod indis modülasyonu (code index modulation, CIM), uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) ve ortam-tabanlı modülasyon (media-based modulation, MBM) tekniklerinin birleştirildiği ve kısaca CIM-SMBM olarak adlandırılan yeni yüksek başarılı bir kablosuz haberleşme sistemi önerilmiştir. Önerilen CIM-SMBM sisteminde, veri bitleri üç indiste ve iletilen sembollerde taşınır. Bu üç indis; SM tarafından seçilen aktif anten indisi, MBM ile belirlenen yayılma modeline bağlı olarak değişen farklı kanal durum indisi ve CIM tarafından belirlenen yayıcı kod indisleridir. CIM-SMBM sistemi için üç farklı dedektör sunulmuştur. İlk olarak CIM-SMBM sistemi için ML dedektör önerilmiştir.

Sonrasında, ML dedektörün karmaşıklığını azaltmak için yayıcı kod indislerini geri yayma prensibine göre kestiren geri yayma tabanlı ML (despreading-based ML, DB-ML) dedektör önerilmiştir. Son olarak DB-ML dedektörünün karmaşıklığını daha da azaltmak için ML dedektöre yakın hata performansı sağlayan gelişmiş düşük karmaşıklık (enhanced low complexity, ELC) dedektör önerilmiştir. Önerilen CIM-SMBM sisteminin ortalama bit hata oranı (average bit error rate, ABER), çıktı (throughput, TP), enerji verimliliği ve hesaplamalı karmaşıklık analizleri, M seviyeli dikgen genlik modülasyonu (M -ary quadrature amplitude modulation, M -QAM) ve Rayleigh sönümlemeli kanallar için sunulmuştur. Ayrıca CIM-SMBM sistemi için elde edilen sonuçlar literatürdeki önemli IM teknikleriyle karşılaştırılmış ve önerilen CIM-SMBM sisteminin karşılaştırılan sistemlere göre daha yüksek veri hızı, daha yüksek enerji verimliliği ve daha iyi hata başarımı sağladığı görülmüştür.

Son zamanlarda oldukça popüler hâle gelen ve kablosuz haberleşme kanalının bozucu sönümleme etkisini azaltabilen ayarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface, RIS) teknolojisi önemli haberleşme sistemleri arasında yerini almıştır. RIS teknolojisi, entegre edildiği haberleşme sistemlerinin performansını artırmaktadır. Bu bağlamda bu tezde yer alan ikinci çalışmada, geleneksel SM tekniğinin veri hızını ikiye katlayan çift SM (double SM, DSM) sistemi ile RIS teknolojisinin bir haberleşme sistemi bünyesinde birleştirildiği kısaca DSM-RIS olarak adlandırılan yeni bir sistem önerilmiştir. Önerilen DSM-RIS sisteminin performans analizleri, Rayleigh sönümlemeli kanallar üzerinde M -QAM modülasyonu için elde edilmiştir. Önerilen DSM-RIS sisteminin veri hızı ve performans analizi sonuçları, RIS tabanlı SM (RIS based SM, SM-RIS), RIS ile güçlendirilmiş ortam-tabanlı modülasyon (RIS-empowered media-based modulation, MBM-RIS) ve dikgen SM tabanlı RIS (quadrature SM-RIS, QSM-RIS) gibi önemli emsal sistemler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen DSM-RIS sisteminin karşılaştırılan sistemlerden daha iyi hata başarımı ve daha yüksek spektral verimlilik sağladığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kod indis modülasyonu, ortam-tabanlı modülasyon, uzaysal modülasyon, çift uzaysal modülasyon, ayarlanabilir akıllı yüzey, indis modülasyonu.

ABSTRACT

PERFORMANCE ANALYSIS OF ADVANCED INDEX MODULATION SYSTEMS FOR NEXT GENERATION WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS

ÖZDEN, Burak Ahmet

Master Thesis, Electrical and Electronics Engineering Department, Electrical and
Electronics Engineering Program

Supervisor: Assoc. Prof. Erdoğan AYDIN

November, 2022. 96 Pages.

In wireless communication, individual and industrial demands on essential parameters such as faster and better quality data transmission, low-latency communication, high spectral efficiency, and low energy consumption continue to increase rapidly day by day. Therefore, communication systems aiming to meet these demands are becoming more important.

The index modulation (IM) technique makes it possible to transmit data bits through indices of parameters that play a role in communication. IM-based communication systems provide high spectral efficiency, high energy efficiency, high data rate, and high error performance. However, existing IM-based systems are insufficient to meet the demands listed above, and new high-performance wireless communication systems are needed.

In the first study in this thesis, a new high-performance wireless communication system called CIM-SMBM, which combines code index modulation (CIM), spatial modulation (SM), and media-based modulation (MBM) techniques, is proposed to provide high data rate, high spectral efficiency, high error performance, and low energy consumption. In the proposed CIM-SMBM system, data bits are carried in three indices and transmitted symbols. These three indices are; the active antenna index selected by the SM, the different channel state index that changes depending on the propagation pattern determined by the MBM, and the spreading code indices determined by the CIM. Three different detectors have been proposed for the CIM-SMBM system. First, the ML detector is proposed for the CIM-SMBM system.

Afterward, to reduce the ML detector complexity, a despreading-based ML (DB-ML) detector which estimates the spreading code indices according to the despreading principle is proposed. Finally, to further reduce the complexity of the DB-ML detector, an enhanced low complexity (ELC) detector providing error performance close to the ML detector is proposed. Average bit error rate (ABER), throughput (TP), energy efficiency, and computational complexity analyzes of the proposed CIM-SMBM system are presented for M -ary quadrature amplitude modulation (M -QAM) and Rayleigh fading channels. Also, the results obtained for the CIM-SMBM system are compared with the important IM systems in the literature and it has been seen that the proposed CIM-SMBM system provides a higher data rate, higher energy efficiency, and better error performance than the compared systems.

Reconfigurable intelligent surface (RIS) technology, which has become very popular recently and can reduce the disruptive fading effect of the wireless communication channel, has taken its place among the important communication systems. RIS technology increases the performance of the communication systems into which it is integrated. In this context, in the second study in this thesis, a new system called DSM-RIS, in which a double SM (double SM, DSM) system, which doubles the data rate of the traditional SM technique, and RIS technology is combined within a communication system is proposed. Performance analyzes of the proposed DSM-RIS system are obtained for M -QAM modulation on the Rayleigh fading channels. The data rate and performance analysis results of the proposed DSM-RIS system are compared with important counterpart systems such as RIS-based SM (SM-RIS), RIS-empowered media-based modulation (MBM-RIS), and quadrature SM-RIS (QSM-RIS). According to the results obtained, it has been seen that the proposed DSM-RIS system provides better error performance and higher spectral efficiency than the compared systems.

Keywords: Code index modulation, media-based modulation, spatial modulation, double spatial modulation, reconfigurable intelligent surface, index modulation.

1. GİRİŞ

1.1. Literatür Özeti

Günümüzde hızla gelişen teknoloji ve sürekli artan talepler neticesinde telsiz haberleşme sistemlerinin yüksek veri hızı, daha kaliteli iletişim, düşük gecikme ve düşük güç tüketimi gibi zorlayıcı ihtiyaçlara cevap vermekte güçlük çekmesi büyük bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. İnternete bağlı cihazların, mobil kullanıcı sayısının ve veri trafiğinin de büyük bir ivmeyle artması durumu daha da aşılması güç bir boyuta taşımaktadır. Kablosuz haberleşmenin, 2030 yılları civarında anında ve sınırsız bir kablosuz bağlantı ile veri iletişimine odaklı bir hale geleceği öngörülmektedir. Ayrıca 6G'nin 5G'den 100 ila 1000 kat daha yüksek veri hızları sağlaması beklenmektedir [1]. Tüm bunlar dikkate alındığında, yukarıda sıralanan talepleri karşılayabilecek ve ileri nesil ağlarının koyduğu zorlayıcı hedefleri gerçekleştirebilecek yüksek veri hızlı, yüksek enerji verimlilikli, yüksek güvenilirlikli, düşük gecikmeli ve düşük karmaşıklık içeren yeni haberleşme sistemlerinin geliştirilmesi zorunlu bir hale gelmiştir.

Kablosuz iletişimin kalitesini düşüren en büyük etkenlerden olan sönümlemeli kanalın bozucu etkisi ve yetersiz veri hızı kablosuz haberleşmedeki en büyük problemlerdendir. Bu sebeple önerilen haberleşme sistemleri genel olarak bu iki problemin çözümüne odaklanmaktadır. Günümüz kablosuz haberleşme sistemlerinin temelini oluşturan çok-girişli çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemler, verici ve alıcıda çoklu antenler kullanarak çeşitleme tekniği ile bir yandan sönümlemeli kanalın bozucu etkisini azaltırken diğer yandan çoğullama tekniği ile de sistem performansını artırmaktadır [2], [3]. Ancak MIMO sistemlerde çoklu anten kullanımı kablosuz haberleşme sistemlerine ciddi avantajlar sağlaması yanında bazı dezavantajların da ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bu dezavantajlardan bazıları yüksek karmaşıklık, kanallar arası girişim (inter-channel interference, ICI), yüksek enerji tüketimi ve ciddi maliyet artışlarıdır [4], [5]. MIMO sistemlerine indis modülasyon (index modulation, IM) teknikleri entegre edildiğinde, eldeki kaynakların

optimum kullanımı ve akılcı iletim yöntemleri sayesinde bu dezavantajlar en aza indirilebilmektedir.

IM tekniği, veri iletimini ileri boyutlara taşıyan yenilikçi ve akılcı bir tekniktir. IM tekniklerine, endüstri ve akademik kesimlerin ilgisi sürekli olarak artmaktadır. Bu hala artarak devam eden ilgi ve talep IM ailesinin çok büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. IM tekniği, geleneksel olarak sembolde taşınan bilgiye ek olarak haberleşmede rol oynayan parametrelerin indislerinde de bilgi taşınmasını mümkün kılmaktadır [6]. IM teknikleri aynı zaman aralığında iletilen bilgi miktarını büyük oranda artırdığı için entegre edildikleri sistemlerin enerji ve spektral verimliliklerini önemli ölçüde artırırılar. IM tekniğinde, iletilecek olan bilginin bir kısmı iletilen sinyale gömülü olarak iletilmektedir. Bu nedenle indislerde bilgi taşımak veri hızını artırmasının yanı sıra maliyetleri ve enerji tüketimlerini de düşürür.

Uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) tekniği kullanım kolaylığı ve sağladığı önemli avantajlar ile en çok dikkat çeken IM tekniklerinden biridir. SM tekniği, geleneksel olarak taşıyıcı sinyalin genlik, faz veya frekansında taşınan bilgi bitlerine ek olarak verici anten indislerini de iletimde kullanarak veri hızını artıran akılcı bir tekniktir [7], [8]. SM tekniğinde her bir sembol iletim süresi boyunca sadece bir antenin aktif olması ICI ve antenlerin senkronize edilme ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Ayrıca, alıcı karmaşıklığını azaltması, verici yapısının tek bir radyo frekansı (radio frequency, RF) zinciri içermesi ve buna bağlı olarak karmaşıklığı, iletimde harcanan güç tüketimini ve maliyeti ciddi oranda düşürmesi, yüksek enerji verimliliği ve yüksek spektral verimlilik sağlaması SM tekniğinin diğer önemli avantajları arasında yer almaktadır [9]–[13]. Mesleh ve arkadaşları tarafından [14] numaralı yayında geleneksel SM yöntemine göre fazladan uzaysal boyut kullanılarak spektral verimliliği arttıran dik SM (quadrature SM, QSM) olarak adlandırılan özgün bir sistem önerilmiştir. [15]'te SM ve uzay-zaman blok kod (space-time block code, STBC) sistemlerini birleştirerek kısaca STBC-SM olarak adlandırılan ve geleneksel SM yöntemine göre daha yüksek spektral verimlilik ve yüksek başarımlı sağlayan yeni bir teknik önerilmiştir. Ayrıca son zamanlarda literatüre eklenen geleneksel SM tekniğinden farklı olarak vericide bir yerine iki antenin aktif edildiği ve bu aktif antenler üzerinden de farklı simgelerin iletildiği gelişmiş SM tekniği olan ve kısaca çift SM (double SM, DSM) olarak adlandırılan yeni bir haberleşme sistemi [16]'da

önerilmiştir. DSM sisteminde, bir simge iletim süresi boyunca birden fazla verici antenin aktif edilmesi geleneksel SM sistemine göre iki kat daha fazla veri hızı sağlanmasına neden olmaktadır. Ayrıca DSM sisteminin geleneksel SM sistemine göre daha iyi hata başarımına da sahip olduğu gösterilmiştir.

Son yıllarda ortaya atılan ve kablosuz haberleşme sistemlerine sağladığı ciddi avantajları sayesinde kısa sürede araştırmacıların büyük ilgisini çeken ortam-tabanlı modülasyon (media-based modulation, MBM) tekniği, IM ailesinin en tanınmış ve en çok dikkat çeken üyelerinden biridir. MBM tekniği ilk olarak 2013 yılında [17]'de yer alan yayında Dr. Khandani tarafından kablosuz haberleşmede çığır açacak yeni bir kablosuz iletim yöntemi olarak önerilmiştir. MBM tekniği, IM tekniğinin yeniden ayarlanabilir bir antenin (reconfigurable antenna, RA) RF aynalarının durum değişiklikleri için gerçekleştirilmesidir. RF aynası, iletilecek olan bilgi bitlerine göre RA'nın yansıma örüntüsünü bünyesinde bulunan PIN diyotun açık/kapalı olma durumuna göre değiştirebilir. RF aynalarının açık/kapalı olma durumlarının RA'nın yansıma örüntüsünü değiştirmesi farklı kanal sönmlemelerine neden olmaktadır. MBM tekniğinde, ortaya çıkan bu farklı kanal gerçeklemelerinin indisleri kullanılarak sembolde iletilen bilgiye ek olarak fazladan bilgi iletimi mümkün olmaktadır. Birçok IM tekniğinde, iletilen bilgi miktarı logaritmik olarak artmaktadır. Ancak MBM tekniğinde, indiste taşınan bilgi miktarı RF aynalarının sayısına bağlı doğrusal olarak artmaktadır. Bunun anlamı, RF aynalarının sayısındaki ufak artışlar iletilen bilgi miktarını büyük ölçüde artırmaktadır. Bu durum MBM tekniğini yüksek spektral verimlilikli bir yöntem haline getirmektedir. Aynı zaman aralığında iletilen bilgi miktarını artırmak için makul sayıda elaman yeterli olacağı için düşük maliyet ve düşük enerji tüketimi ile bilgi iletimi mümkün olmaktadır [18]–[20]. Popüler IM üyelerinden olan QSM ve MBM tekniklerini bir MIMO sistem bünyesinde birleştirerek elde edilen yüksek başarılı ve yüksek veri hızlı yeni bir sistem [21]'de önerilmiştir. [22]'de geleneksel MBM sistemine altıgen QAM (hexagonal QAM, HQAM) tekniği entegre edilerek yüksek enerji verimlilikli ve yüksek hızlı kısaca HQAM-MBM olarak adlandırılan yeni bir sistem önerilmiştir.

Kod indis modülasyonu (code index modulation, CIM), sinyalde taşınan bilgilere ek olarak bilgi iletimi için yayıcı kodların indislerini de kullanan ve entegre edildiği kablosuz haberleşme sistemlerine ciddi avantajlar sağlayan önemli bir IM tekniğidir

[23]–[25]. CIM tekniği, bant genişliğinde herhangi bir değişiklik olmaksızın geleneksel kablosuz haberleşme tekniklerine göre daha az enerji kullanması ve yüksek spektral verimlilik sağlaması gibi ilgi çekici avantajları ile dikkat çekmektedir. Ayrıca CIM, sisteme ek donanım karmaşıklığı getirmeden iletilen bilgi miktarını, spektral verimliliği ve enerji verimliliğini artırır [26], [27]. Doğrudan dizilimli yayılı izge (direct sequence spread spectrum, DS-SS) sistemleri için genelleştirilmiş kod indis modülasyon (generalized code index modulation, GCIM) tekniği [27]’de önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen sistemin, veri hızı, enerji tüketimi ve karmaşıklık açısından mevcut DS-SS iletişim sisteminden daha iyi performans sergilediği gösterilmiştir. CIM tekniğinde, semboller ile yayıcı kodlar çarpılarak alıcı terminale iletilir. Bu sayede, iletim enerjisi azalır ve iletilen sinyal gürültü ve parazit gibi bozucu etkilerden daha az etkilenir [28], [29]. Kablosuz haberleşme sistemlerine önemli katkılar sağlayan CIM tekniği ile IM tekniğinin önde gelen yeleri olan SM ve MBM tekniklerinin birleştirilmesi haberleşme sistemlerinin performansını büyük ölçüde artırır. [28]’de, CIM ve SM teknikleri birleştirilerek CIM destekli genelleştirilmiş SM tekniği (GCIM-SM) tanıtılmış ve ele alınan sistemin yüksek veri hızı sağladığı grlmştir. CIM-SM tekniği Nakagami- m sönümlemeli kanalları üzerinde ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) modülasyonu için [29]’da önerilmiştir. [30]’da ise kısaca CIM-QSM olarak adlandırılan QSM destekli CIM sistemi sunulmuştur. Sunulan sistemin yüksek spektral ve yüksek enerji verimliliği sağladığı gözlemlenmiştir.

Son zamanlarda telsiz haberleşme teknolojilerinin arasına katılan ayarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface, RIS) teknolojisi sağladığı avantajlar ile büyük bir umut vadetmektedir. RIS teknolojisi, kablosuz sönümlemeli kanalın bozucu etkisini en aza indirerek kablosuz haberleşme sistemlerinin performansını dikkate değer ölçüde artırmaktadır. RIS’ler düşük maliyetli pasif elemanlardan elde edilen yüzeylerine çarpan elektromanyetik dalgaları yönlendirebilme yeteneğine sahip yapay akıllı yüzeylerdir [31], [32]. RIS’ler yansıtıcı yüzeylerine çarpan sinyalleri belirli oranlarda kontrol ederek sinyal kalitesinde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. RIS teknolojisi, düşük maliyetli olması, sinyal kalitesini artırması, ekstra enerji kaynağına ihtiyaç duymaması ve binalar, trafik ışıkları ve insan kıyafetleri gibi birçok yzeeye konuşlandırılmasının mümkün olması gibi ciddi avantajlar sağlamaktadır [33]–[35].

RIS'ler bu üstün özellikleri nedeniyle birçok haberleşme sistemine eklenmeye devam etmektedir. Örneğin [36]'da uzay kaydırmalı anahtarlama (space shift keying, SSK) sistemine RIS teknolojisi entegre edilerek kısaca RIS-SSK olarak adlandırılan yeni bir sistem önerilmiştir. Önerilen RIS-SSK sisteminin geleneksel SSK sistemine göre daha yüksek enerji verimliliği ve daha iyi hata başarımı sağladığı görülmüştür. RIS-SM sistemine göre daha yüksek sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) kazancı sağlayan RIS tabanlı bir IM sistemi [37]'de önerilmiştir. [38]'de RIS tabanlı dik olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access, NOMA) sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemin ortogonal emsal sistemlerinden daha iyi performans sağladığı gösterilmiştir. [39]'da ise RIS tabanlı uzay-zaman blok kodlama tekniği ve alıcıda SM tekniğinin birleştirildiği yeni bir sistem sunulmuştur.

Bu tez çalışmaları kapsamında RIS teknolojisinin kullanılması, önerilen sistemin performansını artırmakta ve bunu oldukça düşük maliyet ve karmaşıklık ile sağlayabilmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Tez kapsamında ele alınan ilk çalışmada, yüksek veri hızlı, yüksek başarım ve düşük enerji tüketimli yeni bir yöntem olan CIM destekli uzaysal ortam-tabanlı modülasyon (code index modulation aided spatial media-based modulation, CIM-SMBM) sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem popüler IM şemalarından olan CIM, SM ve MBM tekniklerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur ve kablosuz haberleşme sistemlerine ciddi faydalar sağlama potansiyeline sahiptir. CIM-SMBM sistemi literatürde önemli bir yer tutan CIM-QSM, GCIM-SM, SMBM, MBM, QSM, SM ve DS-SS gibi birçok sistemle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, CIM-SMBM sisteminin karşılaştırılan bütün sistemlere göre daha iyi hata başarımı, daha yüksek spektral verimlilik, daha yüksek enerji verimliliği ve daha yüksek veri hızı sağladığı gözlemlenmiştir.

Tez kapsamında ele alınan ikinci çalışmada ise geleneksel SM tekniğine göre hem daha yüksek hata başarımı hem de daha yüksek veri hızı sağlayan DSM tekniği ile kablosuz kanalın bozucu sönmüleme etkisini azaltan RIS teknolojisi bir çok-girişli tek-çıkışlı (multiple-input single-output, MISO) sistem bünyesinde birleştirilerek elde

edilen kısaca DSM-RIS olarak adlandırılan yeni yüksek başarımlı bir haberleşme sistemi önerilmiştir. Önerilen DSM-RIS sistemi, SM tabanlı RIS (SM aided RIS, SM-RIS), RIS ile güçlendirilmiş MBM (RIS-empowered MBM, MBM-RIS) ve RIS destekli QSM (RIS aided QSM, QSM-RIS) sistemi gibi oldukça önemli ve popüler olan RIS tabanlı indis modülasyon sistemleriyle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre DSM-RIS sisteminin karşılaştırılan diğer sistemlere göre aynı spektral verimlilik için daha iyi bir hata başarımlı sağladığı görülmüştür. Ayrıca yapılan veri hızı analizlerine göre de DSM-RIS sisteminin SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS sistemlerinden daha yüksek veri hızı sağladığı gözlemlenmiştir.

1.3. Hipotez ve İzlenen Yol

Tezde yer alan ilk çalışma olan CIM-SMBM isimli çalışmanın katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- SM ve MBM tekniklerinin birleşimi olan SMBM şemasındaki çoklu RF zinciri yapısından ve CIM tekniğinden yararlanılarak veri hızını, spektral verimliliği, hata performansını ve enerji verimliliğini daha da iyileştirmek için CIM-SMBM sistemi önerilmiştir.
- Önerilen CIM-SMBM sisteminde iletilen verilerin çoğunun indislerde taşınması donanımsal maliyetleri ve enerji tüketimini büyük oranda azaltmaktadır.
- CIM-SMBM sistemi için bu çalışmada, en büyük olabilirlik (maximum likelihood, ML) dedektör, geri yayma tabanlı ML (despreading-based ML, DB-ML) dedektör ve daha sonra karmaşıklığı daha da azaltmak için gelişmiş düşük karmaşıklık (enhanced low complexity, ELC) dedektör olmak üzere toplamda üç dedektör önerilmiştir. Daha sonra önerilen dedektörlerin CIM-SMBM sistemi için hesaplamalı karmaşıklık analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

- Önerilen CIM-SMBM sisteminin ortalama bit hata oranı (average bit error rate, ABER) analizi elde edilmiştir. Elde edilen ABER sonuçlarının simülasyon tabanlı sonuçlara oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- CIM-SMBM, GCIM-SM, CIM-QSM, SMBM, MBM, QSM ve SM sistemleri için enerji verimliliği, karmaşıklık ve veri hızı analizleri yapılmış ve karşılaştırmalı sonuçlar yorumlanmıştır.
- Önerilen CIM-SMBM sisteminin GCIM-SM, CIM-QSM, SMBM, MBM, QSM, SM ve DS-SS sistemlerine göre veri hızı, hata başarımı ve enerji verimliliği açısından daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Tezde yer alan ikinci çalışma olan DSM-RIS isimli çalışmanın ise katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Önerilen DSM-RIS sisteminde, DSM tekniği sayesinde veri hızı, RIS teknolojisi sayesinde ise hata başarımı artırılmıştır. Bu iki önemli tekniğin avantajlarının tek bir sistem bünyesinde toplanması sayesinde emsal haberleşme sistemlerine göre hem daha yüksek veri hızı hem de daha iyi hata başarımı sağlayan yeni bir sistem ortaya konmuştur.
- Önerilen sistemin performans analizleri Rayleigh sönümlmeli kanallar üzerinde Monte Carlo simülasyon yöntemi ile MATLAB ortamında elde edilmiştir. Önerilen DSM-RIS sisteminin performansı kullanılan verici anten sayısına ve kullanılan yansıtıcı yüzey sayısına göre nasıl değiştiği gözlemlenmiş ve yorumlanmıştır.
- Önerilen DSM-RIS sisteminin performansı farklı spektral verimlilik ve farklı parametreler altında SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS sistemleriyle karşılaştırılmıştır. Ele alınan tüm durumlar için DSM-RIS sisteminin diğer sistemlere göre çok daha yüksek SNR kazancı sağladığı görülmüştür.
- DSM-RIS, SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS sistemlerinin veri hızı analizleri gerçekleştirilmiş ve önerilen DSM-RIS sisteminin diğer sistemlere göre daha yüksek veri hızı sağladığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasının sonraki bölümleri sırasıyla aşağıda verildiği gibi devam etmektedir:

Bölüm 2’de kablosuz haberleşme ile ilgili temel bilgiler ve sık kullanılan sönümlmeli kanallar ile ilgili özet bilgiler verilmiştir. Bölüm 3’te kablosuz haberleşme sistemlerinin temeli olan MIMO sistemler; Bölüm 4’te İndis Modülasyonu Tekniği ve bu başlık altında Uzaysal Modülasyon, Ortam Tabanlı Modülasyon ve Kod İndis Modülasyonu; Bölüm 5’te Ayarlanabilir Akıllı Yüzey Teknolojisi; Bölüm 6’da tezde sunula ilk çalışma olan CIM-SMBM sistemi ve Bölüm 7’de ise tezde sunulan ikinci çalışma olan DSM-RIS sistemi yer almaktadır. Son olarak Bölüm 8’te Sonuç ve Tartışma bölümü ile tez sonlanmaktadır.

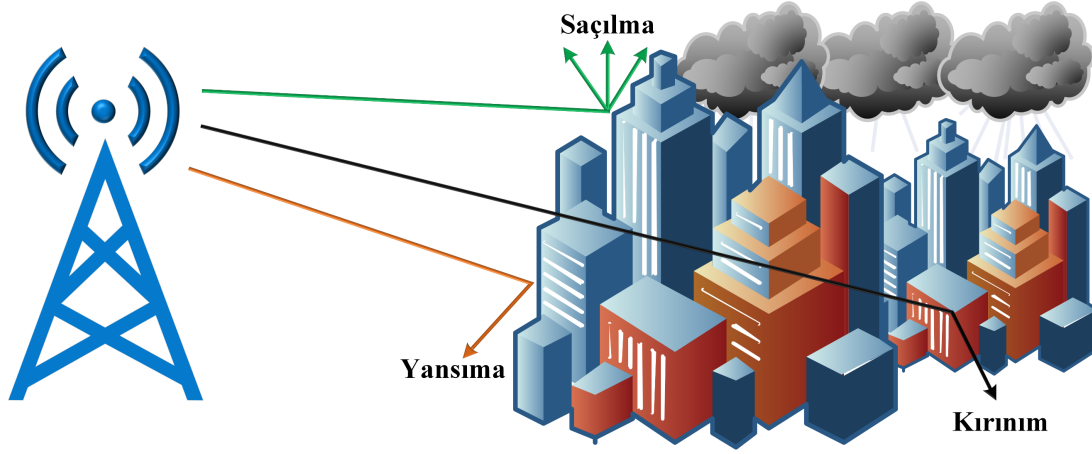
2. KABLOSUZ HABERLEŞMEYE DAİR TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde genel olarak kablosuz haberleşmedeki bazı temel bilgilere değinilmiştir. Öncelikle temel olarak kablosuz haberleşmede sinyalin çok yollu yayılımından ve sönümlmeli kanal modellerinden bahsedilecektir. Sönümlmeli kanalların hangi durumlarda kullanılacağına ve bu kanalların matematiksel modellemelerine yer verilecektir. Daha sonraki bölümde ise kablosuz haberleşme sistemlerinin temeli olan MIMO sistemlerinden kısaca bahsedilecektir.

2.1. Çok Yollu Sönümleme

Kablosuz iletişim kalitesini olumsuz etkileyen birçok faktör vardır. Çok yollu sönümleme etkisi en büyük bozucu etken olmasıyla birlikte ICI, gölgeleme ve yol kaybı gibi unsurlar da diğer ciddi bozucu faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Vericiden yollanan sinyal, kablosuz haberleşme ortamındaki nesnelerden yansıyarak, nesnelere çarpıp saçılarak veya nesnelerin köşelerinden kırılarak alıcıya ulaşır. Bu kablosuz ortamda, sinyalin ortamdaki nesnelerle olan olumsuz etkileşimini ifade eden kırılma, yansıma ve saçılma gibi bozucu etkiler iletilen sinyalin sönümlenmesine neden olur [40]–[42]. Bahsedilen sönümlenme etkisi, sinyalin genliği veya fazı gibi özelliklerinde bozulma olarak karşımıza çıkabilir. Sonuç olarak bu çok yollu yayılımdan kaynaklanan bozucu sönümleme etkisine maruz kalan sinyalin kalitesi büyük ölçüde düşer. Bu nedenle iletişim kalitesini en çok etkileyen faktörlerden olan çok yollu sönümleme ile mücadele etmek oldukça önemli bir konudur.

Bozucu sönümleme etkisine neden olan çok yollu yayılım aynı zamanda faydalanılabilecek bir alandır. İleride bahsedilecek olan MIMO sistemlerde kullanılan uzaysal çoğullama tekniği ile çok yollu yayılımdan istifade edilerek sistemin veri hızı artırılabilir.



Şekil 2.1 Kablosuz Haberleşme Ortamındaki Yansıma, Kırınım ve Saçılma Durumları.

Şekil 2.1’de kablosuz bir ortamdan iletilmek istenen bir sinyalin ortamdaki nesnelerle olan etkileşimlerini içeren yansıma, saçılma ve kırınım gibi bozucu etkileri görselleştirilmiştir.

2.2. Kablosuz Haberleşmede Kullanılan Kanal Modelleri

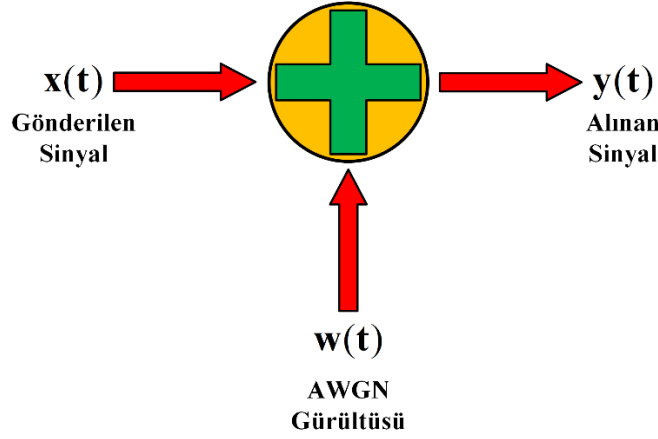
Bu bölümde kablosuz haberleşmede en çok ele alınan kanal modellerinden bahsedilmiştir. Kablosuz haberleşmede alıcı ve verici arasındaki ortamda yol alan sinyaller bazı bozucu etkilere maruz kalırlar. Bir kablosuz iletim ortamında iletilmek istenen bir sinyal alıcı ve verici arasında doğrudan görüş hattı (line of sight, LoS) olmadığı durumda alıcıya birçok farklı yoldan geçerek ulaşacaktır. Yani, alıcıya birçok farklı yollardan geçerek kırılan, yansıyan ve saçılan sinyallerin kombinasyonu ulaşacaktır. Bu sebeple bu kablosuz kanal ortamlarının modellenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu tez çalışmasında Rayleigh sönümlemeli kablosuz kanal kullanıldığı için, bu bölümde sönümlemeli kanallardan en sık karşılaşılan kanallar olan Rayleigh, Rician ve Nakagami- m sönümlemeli kanal modellerinden bahsedilecektir. Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise, AWGN) kanalı kablosuz kanal olmamasına rağmen bu bölüme dahil edilmiştir. Çünkü çalışmada ele alınan sistemde gürültü, AWGN gürültüsü olarak ele alınmıştır.

2.2.1. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü (AWGN) Kanal Modeli

Kablosuz iletişimde sinyal kalitesini olumsuz etkileyen bozucu faktörlerden biri de gürültü etkisidir. Gürültü, sinyal iletimini ve ölçümünü olumsuz olarak etkileyen istenmeyen bir unsur olarak tanımlanır [43]. Haberleşme sistemlerinde, vericiden iletilen sinyalin üzerine gürültü eklenmiş hâli alıcıya ulaşır. Bu nedenle iletilen sinyalin alıcıda demodüle edilebilmesi için AWGN kanal modeli oldukça önemlidir. AWGN ifadesindeki ilk kısaltmada yer alan toplamsal kelimesinden de anlaşılacağı üzere sinyale doğrudan eklenen toplamsal bir etkidir. Yani bu kanal modelinde iletilen sinyal, alıcıda gürültü ile iletilen sinyalin toplamı şeklinde alınır. Bunun anlamı sinyalin genliği ya da fazı değişmez; sadece üzerine gürültü eklenir. AWGN ifadesindeki beyaz terimi ise gürültünün güç spektral yoğunluğunun frekans spektrumu üzerine eşit olarak dağıldığını yani frekanstan bağımsız olarak güç yoğunluğunun her frekans bileşeninde aynı olduğunu ifade eder. Beyaz ışığın tüm renkleri eşit olarak içermesi gibi beyaz gürültünün spektrumu da tüm frekansları eşit oranda içerir [44]. Şekil 2.2’de AWGN kanalın genel yapısı verilmiştir. AWGN kanalda gürültü rastlantısaldır ve gürültü rastgele değişkeni Gauss dağılımlıdır. Aşağıda bu gürültü rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) verilmektedir [45]:

$$f(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left(-\frac{(n-\mu_n)^2}{2\sigma_n^2}\right), \quad -\infty < n < \infty \quad (2.1)$$

Burada, n dağılımın rastgele değişkenidir, μ_n ortalama σ_n^2 ise varyansı temsil etmektedir.



Şekil 2.2 AWGN Kanal Modeli.

Tez çalışması boyunca yapılan analizlerde gürültü bu bölümde ifade edilen AWGN gürültüsü olarak kullanılmıştır.

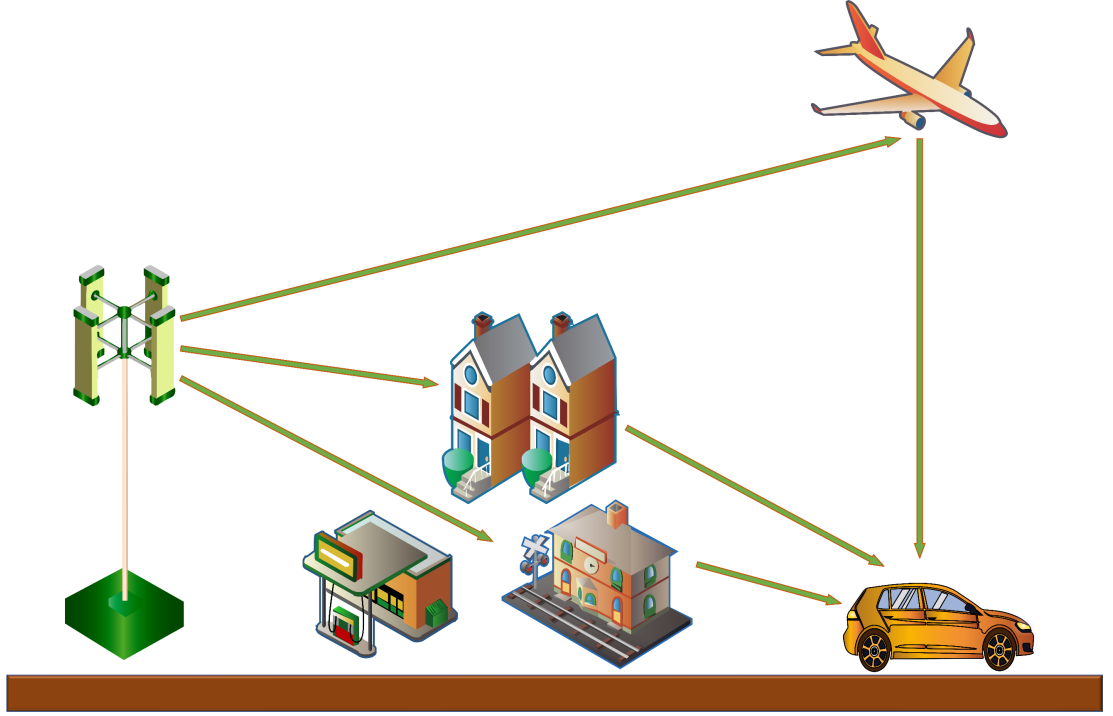
2.2.2. Rayleigh Sönümlmeli Kanal Modeli

Bir kablosuz iletim ortamında iletilmek istenen bir sinyal, alıcı ve verici arasında doğrudan görüş hattı (line-of-sight, LOS) olmadığı durumda alıcıya birçok farklı yoldan geçerek ulaşacaktır. Yani alıcıya birçok farklı yollardan geçerek kırılan, yansıyan ve saçılan sinyallerin kombinasyonu ulaşacaktır. Böyle bir kanal modeli Rayleigh dağılımı ile modellenmek için uygun bir kanal modelidir.

Rayleigh sönümlmeli kanal, kablosuz ortamdaki nesneler yüzünden sinyalin yansıma, saçılma ve kırınım gibi bozucu etkiler ile sönümlenmesine neden olan çok yollu ortamları modellemek için yaygın olarak kullanılan kanal modelidir. Rayleigh kanal modelinde, kablosuz kanaldan geçen sinyalin genliğinin Rayleigh dağılımına göre rastgele değişeceği ve sönümleneceği varsayılır. Bu kanal modelinde alıcı ve verici arasında doğrudan görüş hattı yoktur. Yani, alıcıya sinyalin sadece yansımaları ulaşır.

Şekil 2.3'te Rayleigh kablosuz kanal yapısı görselleştirilmiştir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi vericiden çıkan sinyal kablosuz bir haberleşme ortamında ilerlemektedir. Verici

ve alıcı terminallerinin birbirini görmediği, alıcı ve verici arasındaki iletişimin nesnelerden yansıyarak ilerleyen sinyallerce sağlandığı görülmektedir.

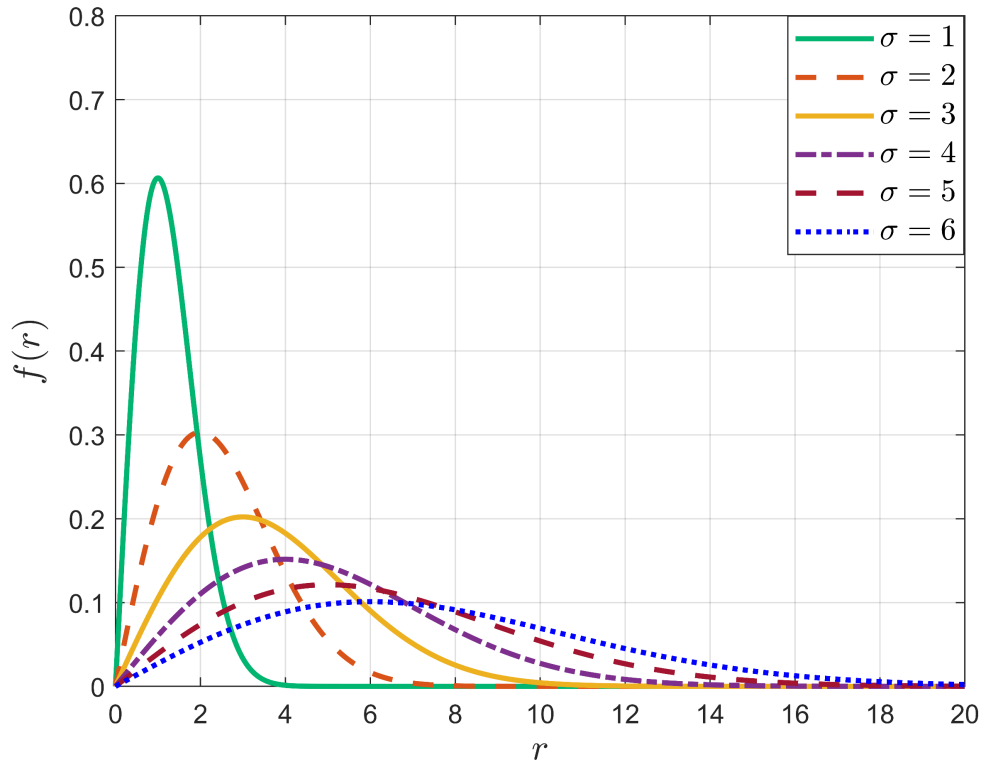


Şekil 2.3 Rayleigh Sönümlmeli Kablosuz Kanal Modeli.

Merkezi limit teoremine göre yeterince fazla sayıda bağımsız ve aynı dağılıma sahip rastgele değişkenlerin toplamı yaklaşık olarak Gauss dağılımına yakınsar [46]. Bu nedenle, alıcıya ulaşan sinyalin yansımaları yeterince fazla olduğunda, kanal katsayısının gerçel ve sanal bölümleri Gauss rastgele değişkenine yakınsar. Bu durumda kanal katsayısının zarfı Rayleigh dağılımlı olur [47]. Rayleigh dağılımının PDF'si aşağıdaki gibi ifade edilir [48] :

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), \quad r \geq 0 \quad (2.2)$$

burada, r dağılımının rastgele değişkenini, σ^2 ise varyansı ifade etmektedir. Şekil 2.4’de Rayleigh dağılımının PDF ifadesi, farklı σ parametreleri için verilmiştir. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi σ parametresinin değeri arttıkça PDF ifadesi yayılmakta azaldıkça ise daralmaktadır.



Şekil 2.4 Farklı σ değerleri için Rayleigh dağılımının PDF ifadesi.

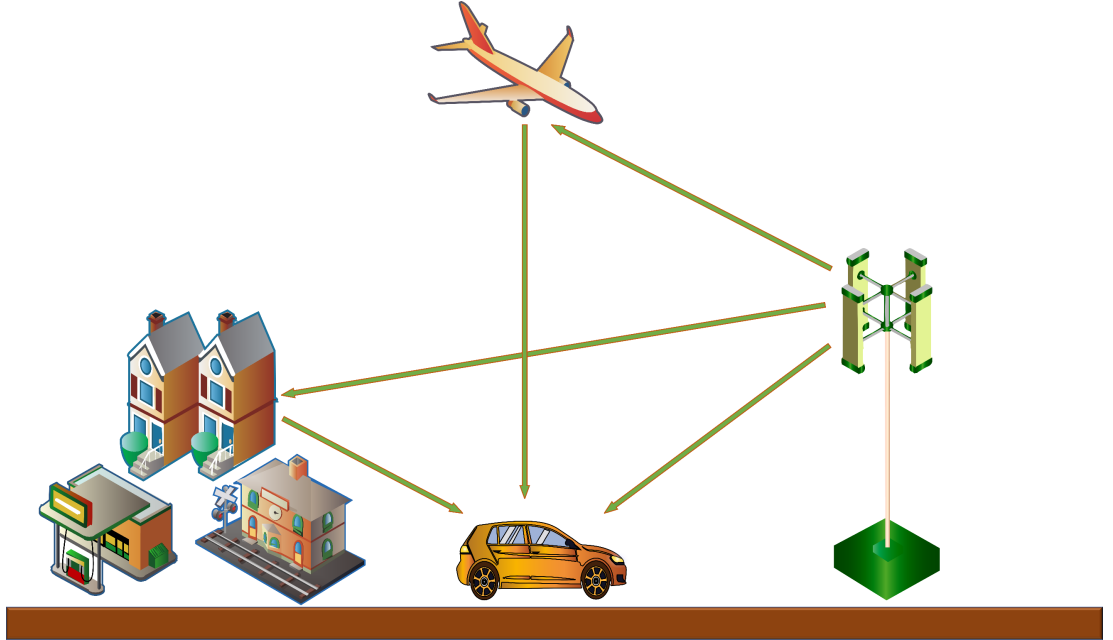
Ayrıca, (2.2) denkleminde verilen Rayleigh dağılımının PDF’nin $-\infty \rightarrow r$ aralığında integrali alınarak aşağıda verilen birikimli dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) elde edilir:

$$F(r) = \int_{-\infty}^r f(x) dx = \int_0^r \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx = 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.3)$$

2.2.3. Rician Sönümlmeli Kanal Modeli

Rayleigh kanal modelinden farklı olarak, bu kanal modelinde verici ve alıcı arasında doğrudan görüş hattı vardır. Bu kanal modelinde farklı yollardan, farklı açılardan yansiyarak gelen rastgele çok yollu bileşenler doğrudan görüş hattından gelen baskın sinyal üzerine biner. En az bir adet doğrudan görüş hattının bulunduğu ve doğrudan görüş hattından alıcıya gelen sinyalin diğer yansiyarak ve saçılarak alıcıya gelen sinyallere göre daha baskın olduğu durum Rician sönümlmeli kanal olarak modellenir. Rician kanal modelinde baskın olan doğrudan görüş hattı bileşeni sönümlendiğinde Rayleigh kanal modeli ortaya çıkar [49]–[51].

Şekil 2.5’te Rician kanal modeli verilmiştir. Şekil 2.5’te görüldüğü gibi iletilen sinyal ve alıcı arasında doğrudan iletim hattı ve doğrudan olmayan iletim hattı bulunmaktadır. Rayleigh sönümlmeli kanal modelinden farklı olarak Rician kanal modelinde alıcı ve verici arasında doğrudan iletim hattı bulunmaktadır.



Şekil 2.5 Rician Sönümlmeli Kablosuz Kanal Modeli.

Rician dağılımının PDF ifadesi aşağıdaki gibi verilir [52]:

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + G^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rG}{\sigma^2}\right), \quad G, r \geq 0 \quad (2.4)$$

Burada, $I_0(\cdot)$ sıfırıncı dereceden ve birinci türden Bessel fonksiyonunu, G ise doğrudan görüş hattından gelen bileşenin zarfını ifade eder.

Rician dağılımı genellikle doğrudan görüş hattından gelen bileşenin gücünün, saçılarak ve yansyarak gelen diğer bileşenlerin gücüne oranı olarak tanımlanan K parametresi cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K = \frac{G^2}{2\sigma^2} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'te yer alan ifade dB cinsinden yeniden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$K(dB) = 10 \log\left(\frac{G^2}{2\sigma^2}\right) \text{ dB} \quad (2.6)$$

Kanalın ortalama gücü ise aşağıdaki gibi verilir:

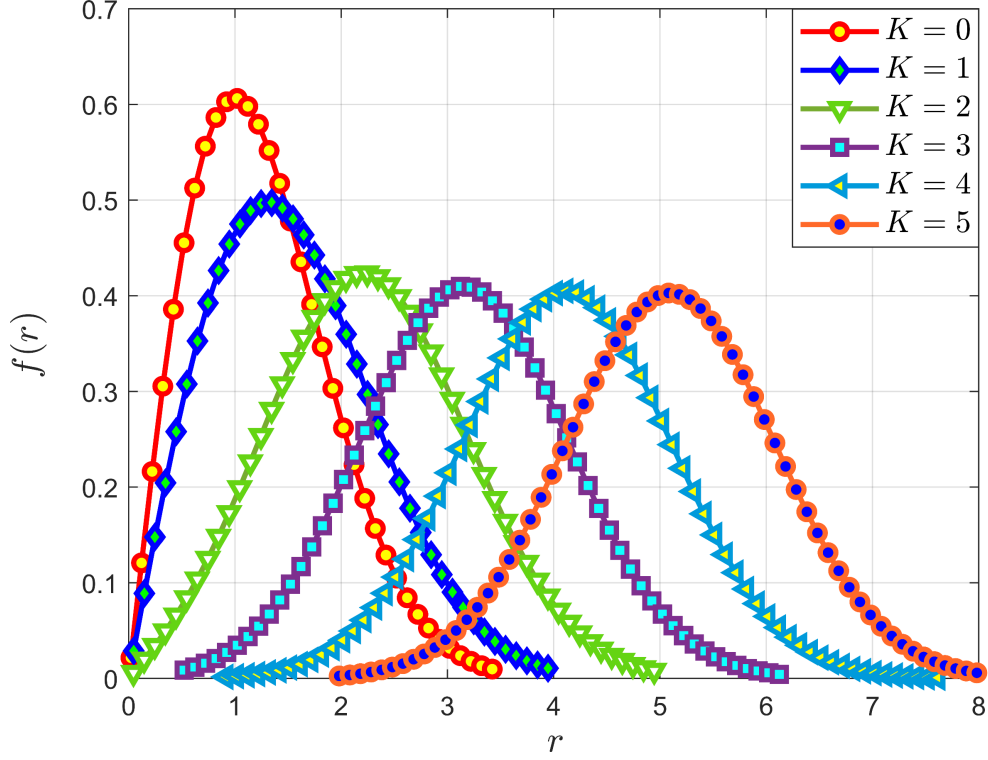
$$\Omega = E\{r^2\} = G^2 + 2\sigma^2 = 2\sigma^2(1 + K) \quad (2.7)$$

Bu ifadeler ve denklemler kullanılarak Rician dağılımının PDF ifadesi aşağıdaki gibi K parametresi cinsinden yeniden ifade edilebilir:

$$f(r) = \frac{2r(K+1)}{\Omega} \exp\left(-K - \frac{r^2(K+1)}{\Omega}\right) I_0\left(2r\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}\right), \quad r \geq 0 \quad (2.8)$$

Burada, $K=0$ için Rician dağılımının Rayleigh dağılımına dönüşeceği görülmektedir. Aynı zamanda K parametresine bağlı olarak sönümlenme etkisi değişmektedir. K parametresinin değerinin büyümesi sönümlenme etkisinin azalmasına neden olmaktadır. Çünkü K parametresinin artması demek doğrudan görüş hattı bileşeninin daha güçlü olduğunu göstermektedir. Bu durumda doğal olarak sönümlenmenin azalmasıyla sonuçlanacaktır. Bu nedenle K parametresi sonsuza gittiğinde Rician kanal, ideal durum olan AWGN kanala yakınsamaktadır. K parametresi sıfır ile sonsuz arasında değer aldığı anda ancak Rician dağılımından söz

edilebilir. Ayrıca bu durumu Şekil 2.6’da $\sigma = 1$ için verilen Rician dağılımının PDF ifadesinde de görülebilir. Rician dağılımının $K = 0$ olduğunda Şekil 2.4’te yer alan Rayleigh dağılımına yakınsadığı gözlemlenmektedir.



Şekil 2.6 $\sigma = 1$ ve farklı K değerleri için Rician dağılımının PDF ifadesi.

2.2.4. Nakagami- m Sönümlemeli Kanal Modeli

İlk olarak 1960’ta Minoru Nakagami tarafından [53]’de yer alan yayında önerilen Nakagami- m dağılımı çok yollu iletimde hızlı sönümleme etkisinin modellenmesi için ortaya atılan bir dağılımdır. Rayleigh dağılımı şehir iletim ortamını modellenmek için kullanılırken Rician ise daha çok kırsal iletim ortamlarını modellemek için ve uydu haberleşmesinde sıklıkla tercih edilmektedir. Nakagami- m dağılımı ise daha çok iyonosferik radyo iletim ortamları için ele alınmaktadır. Nakagami- m dağılımı birçok farklı sönümleme ortamlarını modelleyebilen genelleştirilmiş oldukça kapsamlı bir dağılımdır. Nakagami- m dağılımı, Rayleigh ve Rician dağılımlarını da kapsayan ve

çoğunlukla doğrudan görüş hattı içermeyen sönümlenme senaryolarını modellemek için kablosuz haberleşmede sıklıkla kullanılmaktadır.

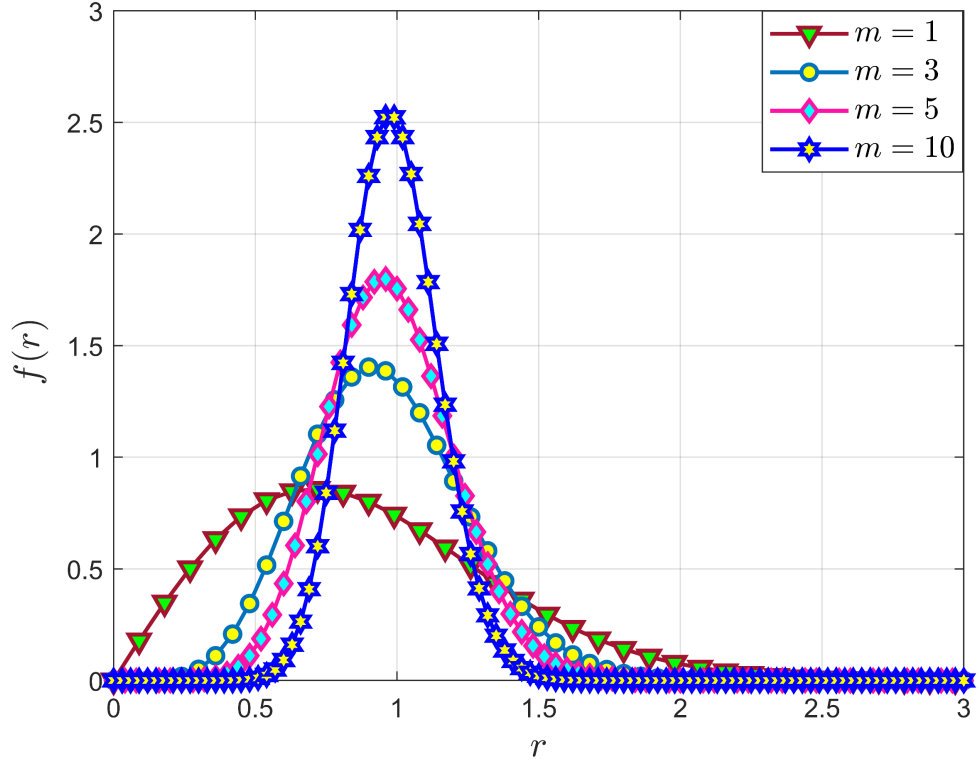
Nakagami- m dağılımının PDF ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir [54]:

$$f(r) = \frac{2r^{2m-1}}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\lambda}} \right)^m \exp\left(\frac{-mr^2}{\bar{\lambda}} \right), \quad r \geq 0, \quad m \geq \frac{1}{2} \quad (2.9)$$

Burada, m dağılımın parametresini, $\bar{\lambda} = E\{r^2\}$ ortalama gücü, $\Gamma(m)$ ise Gamma fonksiyonunu temsil etmektedir. Rician ve Nakagami- m dağılımlarının arasındaki benzerliği vurgulamak için iki dağılımın parametrelerinin arasındaki ilişki aşağıda verilmektedir [55]:

$$m = \frac{(K+1)^2}{(2K+1)}, \quad (2.10)$$

burada, m parametresi sönümlemenin şiddetini işaret etmektedir. Rician dağılımında $K=0$ olduğunda Rayleigh dağılımına yakınsadığı ifade edilmişti. (2.10)'dan görülebileceği üzere $K=0$ olduğunda $m=1$ olmaktadır. O halde buradan Nakagami- m dağılımının $m=1$ olduğu durumda Rayleigh dağılımına yakınsadığı anlaşılmaktadır. Aynı şekilde $m \rightarrow \infty$ olduğu durumda ise sönümlenme ortadan kalkar ve Nakagami- m kanalı AWGN kanala yakınsar. Şekil 2.7'de verilen Nakagami- m dağılımının PDF grafiğinde $m=1$ olduğunda Rayleigh dağılımına yakınsadığı görülmektedir.

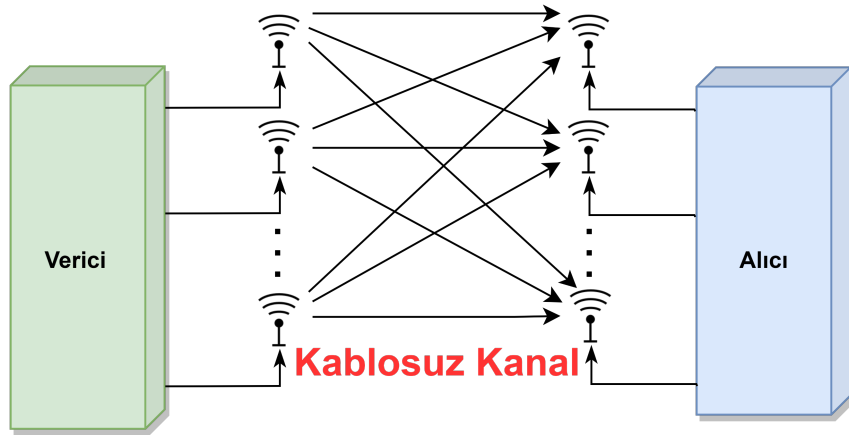


Şekil 2.7 Farklı m değerleri için Nakagami- m dağılımının PDF ifadesi.

3. MIMO SİSTEMLER

Alınan sinyalin kalitesini ciddi oranda olumsuz etkileyen sönümlleme etkisi kablosuz haberleşmede karşılaşılan en büyük problemlerden biridir. MIMO sistemler, sönümlleme etkisi ile etkili bir şekilde başa çıkarak bit hata oranı (bit error rate, BER) performansını iyileştirmekte ve aynı zamanda veri hızını artırmaktadır [56]. Verici ve alıcıda çoklu anten kullanıldığı zaman bu haberleşme sistemi MIMO sistem olarak adlandırılır. Ancak verici ve alıcıdaki antenlerin çoklu olup olmamasına göre sistem farklı isimler alır. Vericide ve alıcıda tekli anten bulunduran geleneksel sistemler tek-girişli tek-çıkışlı (single-input single-output, SISO), vericide çoklu ancak alıcıda tekli anten bulunduran sistemler çok-girişli tek-çıkışlı (multiple-input single-output, MISO) ve son olarak vericide tekli ancak alıcıda çoklu anten bulunduran sistemler ise tek-girişli çok-çıkışlı (single-input multiple-output, SIMO) sistemler olarak adlandırılır.

MIMO sistemler, kablosuz veri iletimi için verici ve alıcıda çoklu anten kullanımı esasına dayanan kablosuz haberleşmenin temel ve öncü teknolojilerindendir. MIMO sistemlerde, çoklu alıcı antenlerin kullanımı sayesinde haberleşme kalitesini artıran çeşitlilik kazancı ortaya çıkmaktadır. Vericiden farklı antenlerden gönderilen aynı sinyalin kopyaları farklı yollar izleyerek dolayısıyla farklı sönümlleme etkilerine maruz kalarak alıcıya ulaşmaktadır. Bu farklı sönümlleme etkilerine maruz kalan sinyaller alıcıda belirli yöntemler ile birleştirilerek orijinal sinyal elde edilmektedir. Sinyalin bağımsız yollardan farklı sönümlleme etkilerine maruz kalarak alıcıya ulaşması alınan sinyal kalitesini iyileştirmektedir.



Şekil 3.1 MIMO Sistem Modeli.

Şekil 3.1’de çoklu verici ve alıcı antene sahip klasik bir MIMO sistem modeli görülmektedir. Vericideki anten sayısına N_T ve alıcıdaki anten sayısına N_R denildiğinde sönümlenmeli kanal matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix}_{N_R \times N_T} \quad (3.1)$$

Şekil 3.1’deki gibi birbirlerinden bağımsız konumlandırılan verici antenlerden farklı sinyaller gönderilerek aynı zaman aralığında iletilen bilgi miktarı artırılabilir. Diğer bir seçenek ise aynı sinyalin birden fazla verici anten üzerinden gönderilmesidir. Bu durumda ise iletilen sinyaller farklı sönümlenme etkilerine maruz kalacağı için hata başarımları iyileşmektedir. Bu iki durum, ileride detaylı olarak üzerinde durulacak olan uzaysal çoğullama ve uzaysal çeşitleme kavramlarını doğurmaktadır.

MIMO sistemlerinde uzaysal çoğullama, uzaysal çeşitleme veya akıllı antenler kullanılmasıyla aşağıdaki faydalar sağlanabilir [57]–[59]:

- Yüksek kanal kapasitesi
- Çoğullama kazancı ile elde edilen yüksek veri hızı
- Çeşitleme kazancı ile elde edilen yüksek hata başarımları
- Sağladığı uzaysal boyut ile yeni tekniklerin önünü açması

MIMO sistemler birçok avantajının yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. MIMO tekniğinde, çoklu anten kullanımının neden olduğu birtakım dezavantajlar da mevcuttur. Bu dezavantajlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır [60]–[62]:

- Yüksek donanım karmaşıklığı içermesi
- Kanallar arası girişimin ortaya çıkması
- Her bir antenin yüksek maliyetli RF modülüne ihtiyaç duyması
- Çoklu anten kullanımının güç tüketimini artırması ve donanımsal kaynakların maliyetleri büyük oranda artırması

Bu dezavantajlar MIMO sistemlerine indis modülasyon tekniklerinin entegre edilmesiyle en aza indirilebilmektedir.

3.1. Uzaysal Çoğullama

Çok yollu yayılım yukarıda bahsedildiği gibi birçok bozucu etkinin ortaya çıkmasına neden olduğu için haberleşme sistemlerinin performansını olumsuz etkiler. Ancak çok yollu yayılımdan akılcı bir şekilde belli sistem ve teknikler kullanılarak yararlanılabilir. İşte bu tekniklerden en temel olanı uzaysal çoğullama tekniğidir. Çok yollu bir ortamda yayılırken sinyal, kablosuz kanalda yer alan çeşitli nesnelere çarpması sonucunda alıcıya saçılan ve yansıyan kopyaları ulaşır. Anten konumları uygun belirlendiğinde alıcıya ulaşan sinyallerin her biri birbirinden farklıdır ve bağımsız bir şekilde sönümlenmiştir. Bu sayede alıcı da bu zengin ve birbirinden bağımsız sinyaller belli teknikler ile birleştirilerek veya seçim yapılarak vericiden iletilen veri bitleri yeniden elde edilebilir [63].

Uzaysal çoğullama kavramı vericideki farklı antenlerden farklı sinyallerin bir kablosuz kanal üzerinden iletilmesi sayesinde bir sembol iletim süresi boyunca daha fazla veri bitinin iletilmesini mümkün kılan teknik olarak ifade edilebilir [64], [65]. Birden fazla sinyalin aynı zaman diliminde eş zamanlı olarak aynı frekansta iletilmesi sistemin veri hızını önemli ölçüde artırır. Uzaysal çoğullama tekniğinde her bir sinyal iletimi için farklı uzaysal kanal tahsis edilerek kanal kapasitesinin artırılması sağlanır. Yani uzaysal çoğullama tekniği sayesinde birim hücre içerisinde hizmet verilebilecek

kullanıcı sayısı artar. Uzaysal çoğullamanın sağladığı en önemli avantaj ilave güç ve bant genişliğine ihtiyaç duymadan veri hızını artırabilmesidir.

Uzaysal çoğullamada bütün kanallardan ayrı ayrı bilgi gönderilmek zorunda değildir. Çünkü asıl önemli olan nokta mevcut kanalların en verimli şekilde kullanılmasıdır, zira tüm kanallar kullanıldığında girişim meydana gelebilir ve bu durumda elde edilen veri miktarı düşebilir. Bu nedenle mevcut duruma göre en uygun kanalların optimum bir şekilde kullanılması en doğrusudur. Uzaysal çoğullamada ana hedef hata performansını iyileştirmek değildir. Uzaysal çoğullama, sistemin veri hızını artırmaya odaklanır. Uzaysal çoğullama ile uzaysal çeşitlemenin aralarındaki en önemli fark budur. Ayrıca, uzaysal çoğullamada hata performansının kabul edilebilir seviyede olduğu varsayılır.

3.2. Uzaysal Çeşitleme

Çok yollu sönmüleme etkisiyle etkin bir şekilde mücadele eden uzaysal çeşitleme tekniği MIMO sistemlerde kullanılan önemli tekniklerdendir. Uzaysal çeşitleme, kablosuz iletişiminin güvenilirliğini ve kalitesini artırmak için ortaya koyulmuş olan önemli kablosuz haberleşme tekniklerinden biridir. Bu teknikte, çok yollu yayılımın getirdiği uzaysal boyuttan faydalanılarak hata başarımı artırılır. Uzaysal çeşitleme tekniği, iletilmek istenen sinyalin farklı kopyalarının birbirinden bağımsız olarak konumlandırılmış farklı antenlerden iletilmesi ve bu sayede her bir kopyanın bağımsız olarak sönmülenmesi ilkesine dayanır. Bu bağımsız olarak sönmülenen kopyalar alıcıda akılcı teknikler ile birleştirilerek veya içerisinden performansı artıracak şekilde seçim yapılarak hata başarımının artırılması sağlanır [66], [67].

Uzaysal çeşitleme tekniğini bir örnek üzerinden açıklamaya çalışalım. Örneğin, vericide dört tane anten olsun. İletilmek istenen verinin birbirinden bağımsız kopyaları oluşturulur ve sonuç olarak aynı veri bu dört antenden de alıcıya iletilir. Bu sayede sinyallerden birkaçı çok yollu sönmüleme etkisiyle sönmülense bile diğer sinyal kopyaları alıcıya ulaşabilir. Daha sonra, alıcıda hata oranını düşürmek için bu kopyalar akılcı bir şekilde belli teknikler yardımıyla birleştirilir ve orijinal veri yeniden elde edilir. Böylelikle sinyal kalitesi artırılır ve iletilmek istenen bilgi korunmuş olur.

Frekans eşitlemesi, zamansal çeşitleme, polarizasyon çeşitlemesi ve uzaysal çeşitleme gibi birçok çeşitleme tekniği kablosuz haberleşme sistemlerinde kullanılır. Sinyal kopyalarının alıcıda birleştirilmesi için kullanılan bazı birleştirme tekniklerine ise; seçici birleştirme, eşit kazançlı birleştirme, en büyük oranlı birleştirme vb. örnek olarak verilebilir [63].

Eldeki kaynaklar göz önünde bulundurularak uzaysal çeşitleme ve uzaysal oğullama arasında bir ödünleşim yapmak oldukça önemlidir.

4. İNDİS MODÜLASYONU

IM tekniği, kablosuz bir ortamdan bilgi aktarımı için yeni bir iletim metodu olarak ortaya çıktığından beri entegre edildiği haberleşme sistemlerine ciddi avantajlar sağlamaktadır. IM, haberleşme sisteminde kullanılan belirli kaynakların aktivasyon durumlarına bilgi gömmek için kullanılan ileri modülasyon tekniklerinden biridir. Bilginin gömüleceği kaynaklara anten, zaman dilimi, sinyal takım yıldızı, anten etkinleştirme sırası, RF aynalarının açık kapalı durumları, uzay-zaman matrisi ve alt taşıyıcı örnek olarak verilebilir [68], [69].

IM tekniğinin en önemli avantajı iletilecek olan bilginin bir bölümünün iletilen sinyale gömülü olmasıdır [70]. Bu sayede, fazladan bilgi iletimi için ekstra enerji harcanması ihtiyacı ortadan kaldırılmış olur. Bu nedenle IM tekniği kullanan haberleşme sistemleri yüksek enerji verimlilikli sistemlerdir. IM tekniğinde, her seferinde eldeki kaynakların belirli bir kısmı aktif edildiği için vericideki donanımsal maliyetleri büyük oranda azalmaktadır. Aynı zamanda, bu durum alıcıda ilgili parametrelerin kestirilmesini kolaylaştırarak alıcı karmaşıklığını azaltmaktadır. Entegre edildikleri haberleşme sistemlerinin, veri hızını artırmaları, hata başarımını iyileştirmeleri ve enerji tüketimini azaltmaları IM tekniklerinin başlıca avantajları arasında yer almaktadır [71]–[73]. Aynı zamanda bütün bu avantajları sisteme fazladan donanım karmaşıklığı eklemeyen sağlayabilmeleri, IM tekniklerini daha da önemli kılmaktadır.

IM tekniği; genlik, faz ve frekans modülasyonu gibi geleneksel modülasyon tekniklerine göre çok sayıda indis uzayı kullanarak geleneksel yollarla iletilen bilgi miktarını büyük oranda artırmaktadır. Ayrıca IM tekniğinin haberleşme sistemlerine olan entegrasyonu oldukça esnektir. Çünkü neredeyse her haberleşme sisteminde pasif ve aktif edilebilen parametreler mevcuttur. IM tekniği, bu parametrelerin durum değişikliklerini bilgi bitlerini eşlemek için bir modülasyon uzayı olarak kullanır. Yukarıda sıralanan önemli avantajları nedeniyle IM tabanlı sistemler her geçen gün artarak literatüre eklenmeye devam etmektedir. IM tabanlı dik frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) sistemi [74]’te yer alan yayında sunulmuştur. Önerilen sistemin geleneksel OFDM sistemine göre daha iyi bir BER performansı sağladığı gösterilmiştir. [75]’te uzay-zaman indis

modülasyonu (space-time index modulation, STIM) olarak adlandırılan bilgi iletimi için anten indislerini ve zaman dilimi indislerini kullanan yeni bir çok boyutlu uzaysal indis modülasyon şeması önerilmiştir. Önerilen STIM tekniğinin aynı spektral verimlilikte OFDM tekniğine göre daha iyi bir hata başarımı sağladığı gözlemlenmiştir. [76]'da yeni bir IM tekniği olan MBM ve DSM sistemlerinin birleştirilmesinden elde edilen kısaca DSMBM olarak adlandırılan yüksek başarımli bir haberleşme sistemi sunulmuştur. Ayrıca önerilen DSMBM sisteminin DSM ve QSM gibi önemli indis modülasyon tekniklerinden daha yüksek SNR kazancı sağladığı gösterilmiştir. [77]'de eş zamanlı olarak iki adet simgenin reel ve sanal kısımlarının farklı antenler üzerinden iletilebildiği ve geleneksel QSM sistemine göre daha yüksek spektral verimlilik sağlayan yeni bir teknik olan çift QSM (double QSM, DQSM) tekniği önerilmiştir.

IM tekniğinde veri iletimi, bilgi bitlerine göre seçilen verici anten indislerinde taşındığında SM, RF aynalarının açık/kapalı olma durumlarına göre ortaya çıkan farklı kanal gerçeklemelerinde taşındığında MBM, birbirine dik olan yayıcı kod indislerinde taşındığında ise ilgili sistem CIM olarak adlandırılır. SM, MBM ve CIM dışında daha birçok indis modülasyon sistemi olmasına rağmen bu üç indis modülasyon şeması sağladıkları avantajlar ile öne çıkmaktadır. Bu tezde sunulan ilk çalışma bu popüler IM teknikleri olan SM, MBM ve CIM tekniklerinin bir MIMO sistem bünyesinde birleştirildiği yeni bir haberleşme sistemi önerilmektedir. Ayrıca yeni bir IM sistemi olan geleneksel SM tekniğine göre iki kat daha fazla veri hızı sağlayan DSM sistemi de sağladığı avantajlar ile dikkat çekmektedir. DSM sisteminin geleneksel SM ve geleneksel QSM tekniklerine göre daha iyi bir hata başarımı sağladığı [16]'da yer alan yayında gösterilmiştir. Dolayısıyla hem yüksek spektral verimlilikli hem de yüksek hata başarımli olan DSM sistemi entegre edildiği haberleşme sistemlerinin performansını büyük oranda artırmaktadır. Bu tezde sunulan ikinci çalışmada, bu yüksek performanslı IM tekniği olan DSM tekniği ve RIS teknolojisinin birleştirildiği kısaca DSM-RIS olarak adlandırılan yeni bir haberleşme sistemi önerilmiştir.

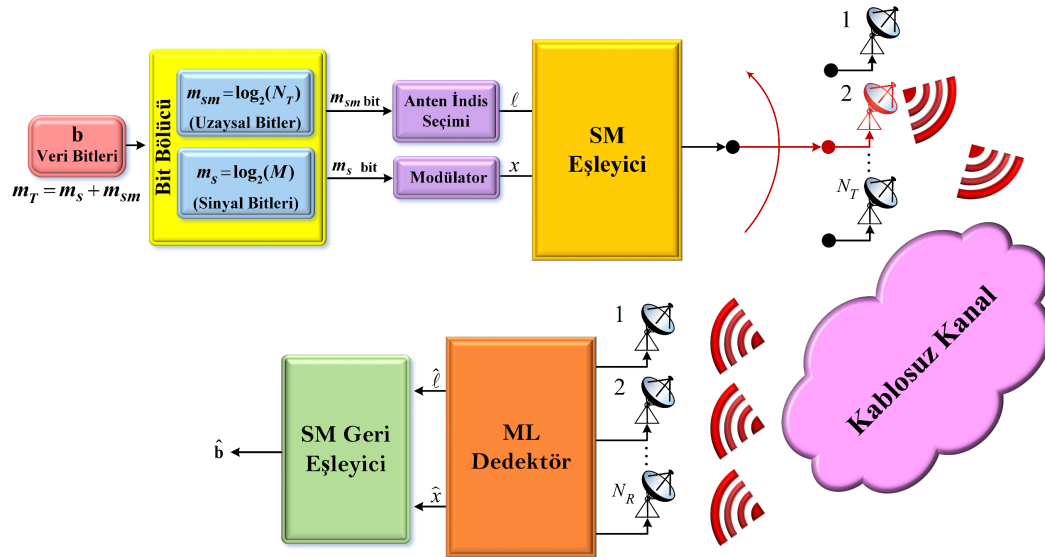
4.1. Uzaysal Modülasyon Tekniği

Oldukça popüler bir IM tekniği olan SM ile ilgili ilk çalışmalar, Mesleh tarafından [78] ve [79]'da yer alan yayınlarda yeni bir iletim yöntemi olarak 21.yüzyılın başlarında sunulmaya başlanmıştır. Ancak SM tekniğine olan asıl ilgi 2008 yılından sonra başlamış ve çok hızlı bir şekilde SM tabanlı bir çok sistem ve survey literatüre girmeye başlamıştır. SM tekniği, sağladığı avantajlar ve uygulanma basitliği nedeniyle bir çok araştırmacının ilgisini çekmiş ve çok sayıda haberleşme sistemine entegre edilerek literatürde çok önemli bir yer almıştır. Geleneksel MIMO sisteminde veri hızını artırmak için çok sayıda anten kullanmak ve bu antenlerin hepsini aktif etmek gerekir. Bu durum, hem enerji tüketimini artırır hem de semboller arası ve kanallar arası girişime neden olacağı için hata başarımını büyük oranda düşürür. SM tekniğinde, gelen bilgi bitlerine göre vericideki antenlerden sadece biri aktif edilir. Bilgi bitleri bu aktif edilen verici antenlerin indislerinde taşınır. Bu sayede geleneksel olarak sembolde taşınan bitlere ek olarak verici anten indislerinde de bilgi iletimi gerçekleştirildiği için sistemin veri hızı artmaktadır. Ayrıca, her seferinde vericideki tüm antenlerin içerisinde sadece bir anten aktif olduğu için de girişim ortadan kalkmaktadır.

Tek bir RF zincirine sahip olan SM tekniği birçok avantaj sağlamaktadır. Bunlardan en önemlileri; yüksek spektral verimlilik, yüksek enerji verimliliği ve düşük alıcı karmaşıklığı sağlaması, girişimi ortadan kaldırması, anten senkronizasyonu gerektirmemesi ve geleneksel MIMO sistemlerine göre çok daha iyi hata başarımı sağlamasıdır [9], [10], [80], [81]. Özellikle vericideki anten kümesi içerisinde tek bir antenin aktif olması ilkesine dayanarak bilgi iletiminin sağlanması için tek bir RF zincirinin yeterli olması enerji tüketimini büyük oranda azaltacak ve donanımsal maliyetleri en aza indirecektir.

Literatürde SM tabanlı yüksek başarılı ve yüksek spektral verimlilikli birçok önemli çalışma yer almaktadır. Örneğin, [82]'de aynı sayıda verici anten ile daha fazla spektral verimlilik sağlanmasını mümkün kılan yeni bir teknik olan genelleştirilmiş uzaysal modülasyon (generalised spatial modulation, GSM) tekniği önerilmiştir. [83]'te yer alan yayında geleneksel SM tekniğine göre modülasyon için fazladan uzaysal boyut kullanılarak iletilen veri miktarını artıran önemli bir teknik sunulmuştur.

Ayrıca önerilen sistemin geleneksel SM tekniğine göre daha yüksek veri hızları sağlamasının yanı sıra yayında elde edilen sonuçlara göre daha iyi bir BER başarımı da sağladığı gözlemlenmiştir. Literatür de önemli yer tutan yöntemlerden olan uzay zaman blok kod (space-time block coding, STBC) ve SM tekniğinin birleştirilmesiyle elde edilen yüksek başarılı kısaca STBC-SM olarak adlandırılan yeni bir sistem [84]'te önerilmiştir. Önerilen STBC-SM sisteminin aynı spektral verimlilik için geleneksel SM ve ortogonal STBC sistemlerinden daha yüksek hata başarımı sağladığı gösterilmiştir. Literatürde buna benzer daha birçok SM tabanlı sistemler bulunmakta [85]–[90] ve her geçen gün yenileri eklenmektedir.



Şekil 4.1 Uzaysal Modülasyon Sistem Modeli.

Şekil 4.1'de yer alan sistem modelin vericide N_T alıcıda ise N_R adet anten bulunan bir SM sistem yapısı verilmiştir. Burada $\mathbf{b}$ olarak ifade edilen veri bitleri bit bölücüden geçerek $\log_2(M)$ ve $\log_2(N_T)$ olmak üzere iki parçaya ayrılır. Burada, $\log_2(M)$ bit M -QAM uzayından seçilen sembole, $\log_2(N_T)$ bit ise vericideki aktif anten indisine eşlenerek iletilir. Seçilen sembol x ve aktif olan ℓ . verici anten indisini içeren iletim vektörü aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\mathbf{x}_{\ell,m} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & \underset{\substack{\uparrow \\ \ell.\text{pozisyon}}}{x_m} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (4.1)$$

burada, (4.1)'den anlaşılabileceği gibi, bilgi bitlerine göre M -QAM sembol uzayından seçilen sembol ℓ . aktif antenden iletilmektedir. Kablosuz sönümlemeli kanaldan geçerek alıcıya ulaşan sinyal aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H} \mathbf{x}_{\ell,m} + \mathbf{w} \\ &= \mathbf{h}_\ell x_m + \mathbf{w}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

burada, $N_R \times N_T$ boyutlu olan $\mathbf{H}$ ifadesi sıfır ortalamalı birim varyanslı Rayleigh dağılımlı kanal matrisini, $\mathbf{w}$ sıfır ortalamalı N_0 varyanslı AWGN gürültü vektörünü ve $\mathbf{h}_\ell$ ise $\mathbf{H}$ kanal matrisinin sütun vektörünü ifade etmektedir. $\mathbf{H}$ kanal matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,N_T} \end{bmatrix}_{N_R \times N_T}. \quad (4.3)$$

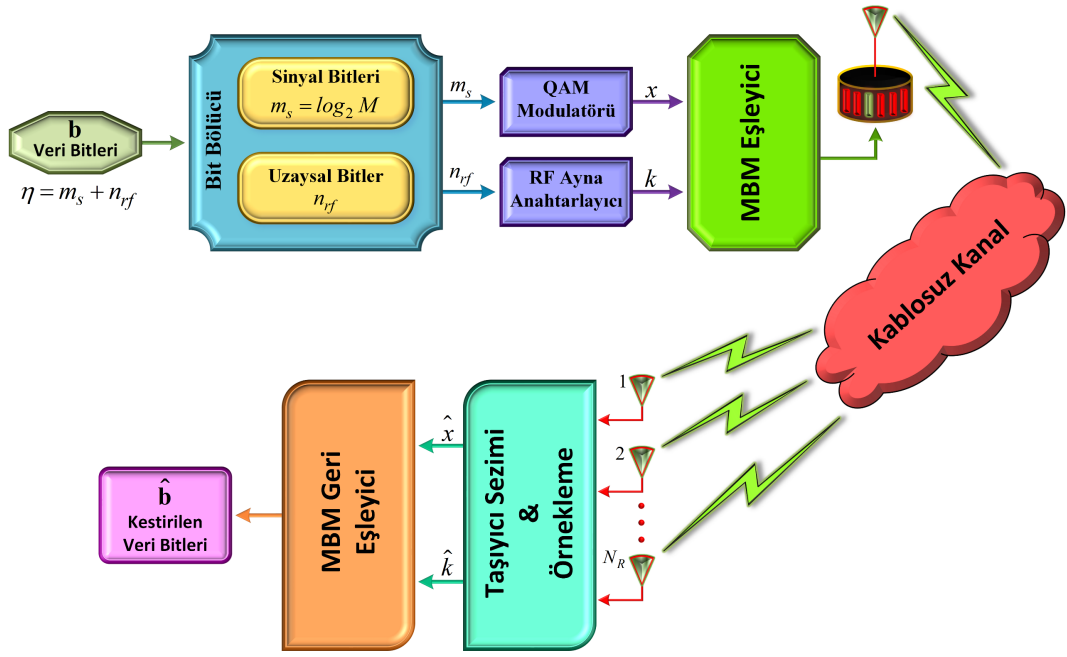
Alıcıya ulaşan gürültülü sinyal ML dedektör yardımıyla vericide seçilen sembol ve aktif anten indisi aşağıdaki gibi kestirilir:

$$(\hat{\ell}, \hat{x}) = \arg \min_{\ell,m} \left\{ \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_\ell x_m\|^2 \right\} \quad (4.4)$$

burada, $\ell \in \{1, 2, \dots, N_T\}$ ve $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ şeklinde ifade edilir.

4.2. Ortam Tabanlı Modülasyon Tekniği

Bir IM tekniği olan MBM tekniği sağladığı önemli avantajlar ile literatüre sunulduğundan bu yana çok sayıda araştırmacının ilgisini çekip MBM tabanlı yeni sistemler geliştirilmesine yol açmıştır. MBM tekniği, ilk olarak IM tabanlı özgün bir iletim yöntemi olarak 2013 yılında Khandani tarafından [91]'de yer alan yayında önerilmiştir. MBM tekniğinde verici antene konuşturılan RF aynalarının açık/kapalı olma durumlarına göre yayılım örüntüsü değiştirilebilir. Bu durumda RF aynalarının açık/kapalı olma kombinasyonu kadar farklı kanal durumu ortaya çıkar. Dolayısıyla RF ayna sayısına n_{rf} dersek $2^{n_{rf}}$ adet farklı kanal durumu ortaya çıkmaktadır. MBM tekniği literatürde ayna aktivasyon örüntüleri (mirror activation patterns, MAPs) olarak adlandırılan farklı kanal durumlarını modülasyon uzayı gibi kullanarak bu kanal durumlarının indislerinde bilgi iletilmesini mümkün kılmaktadır. RF aynalarının açık/kapalı olma durumları iletilmek istenen bilgi bitlerine göre belirlenir. Basit bir örnek olması açısından, vericide iki adet RF aynası ($n_{rf} = 2$) olduğu ve [10] bilgi bitlerinin iletilmek istendiği varsayalım. Bu durumda iki adet RF aynasından, ikisi de açık, ilki açık ikincisi kapalı ve ilki kapalı ikincisi açık ve ikisi de kapalı olabilir. Yani dört adet durum karşımıza çıkmaktadır. Her bir durum farklı bir kanal durumuna karşılık gelmektedir. Eşleme tablosuna göre, bitlerin sırası [00], [01], [10], [11] olarak kabul edilirse; o halde [10] bilgi bitinin iletimi için üçüncü durum olan RF aynalarının ilki kapalı ikincisi açık durumu gerçekleşir. Dolayısıyla, bu [10] bilgi bitinin iletimi için üçüncü durumun ortaya çıkardığı kanal durumu kullanılır.



Şekil 4.2 Ortam Tabanlı Modülasyon Sistem Modeli.

MBM sisteminin spektral verimliliği aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta = \log_2(M) + n_{rf} \text{ [bits/s/Hz]}. \quad (4.5)$$

Şekil 4.2’de verilen MBM sistem modelinde görüldüğü gibi iletilmek istenen bit dizisi içerisinde $\log_2(M)$ adet bit M -QAM modülasyon uzayından seçilen sembole eşlenerek iletilir. Geriye kalan n_{rf} adet bit ise aktif olan MAP indisine eşlenerek iletilmektedir. Seçilen sembol x aktif olan MAP indisi ise k olarak isimlendirildiğinde vericiden gönderilecek olan iletim vektörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{x}_{k,m} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & x_m & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.6)$$

$\uparrow$
 k . pozisyon

İletimde her seferinde bilgi bitlerine göre sadece k 'inci MAP aktif olur ve M -QAM sembol uzayından bir sembol seçilir. Seçilen x sembolü k 'inci MAP üzerinden gönderildiğinde alıcıya ulaşan gürültülü sinyal aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned}\mathbf{y} &= \mathbf{H} \mathbf{x}_{k,m} + \mathbf{w} \\ &= \mathbf{h}_k x_m + \mathbf{w}\end{aligned}\quad (4.7)$$

burada, $N_R \times 2^{n_{rf}}$ boyutlu olan $\mathbf{H}$ ifadesi sıfır ortalamalı birim varyanslı Rayleigh dağılımlı kanal matrisini, $\mathbf{w}$ sıfır ortalamalı N_0 varyanslı AWGN gürültü vektörünü ve $\mathbf{h}_k$ ise $\mathbf{H}$ kanal matrisinin k 'inci sütun vektörünü ifade etmektedir. $\mathbf{H}$ kanal matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,2^{n_{rf}}} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,2^{n_{rf}}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1} & h_{N_R,2} & \cdots & h_{N_R,2^{n_{rf}}} \end{bmatrix}_{N_R \times 2^{n_{rf}}} \quad (4.8)$$

Alıcıya ulaşan bu gürültülü ve sönmülmüş alınan sinyal üzerinden bilgi bitlerini kestirmek için ML dedektör kullanılmaktadır. MBM sistemi için ML dedektör denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$(\hat{k}, \hat{x}) = \arg \min_{k,m} \left\{ \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_k x_m\|^2 \right\} \quad (4.9)$$

burada, $k \in \{1, 2, \dots, 2^{n_{rf}}\}$ ve $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ şeklinde ifade edilir.

MBM tekniğinde makul sayıda anten sayısı ile sadece RF ayna sayısı artırılarak oldukça düşük maliyetle spektral verimlilik ciddi oranda artırılır. MBM tekniğinde spektral verimlilik lineer olarak artar. Dolayısıyla, MBM tekniği entegre edildiği haberleşme sisteminin veri hızını önemli ölçüde artırır. Kanalları arası girişimi ortadan kaldırması, donanım maliyetlerini düşürmesi, düşük alıcı karmaşıklığına sahip olması, düşük enerji tüketimli olması, yüksek spektral verimlilik sağlaması ve geleneksel sistemlere göre oldukça yüksek hata başarımına sahip olması MBM sisteminin en önemli avantajları arasında yer almaktadır [92]–[94].

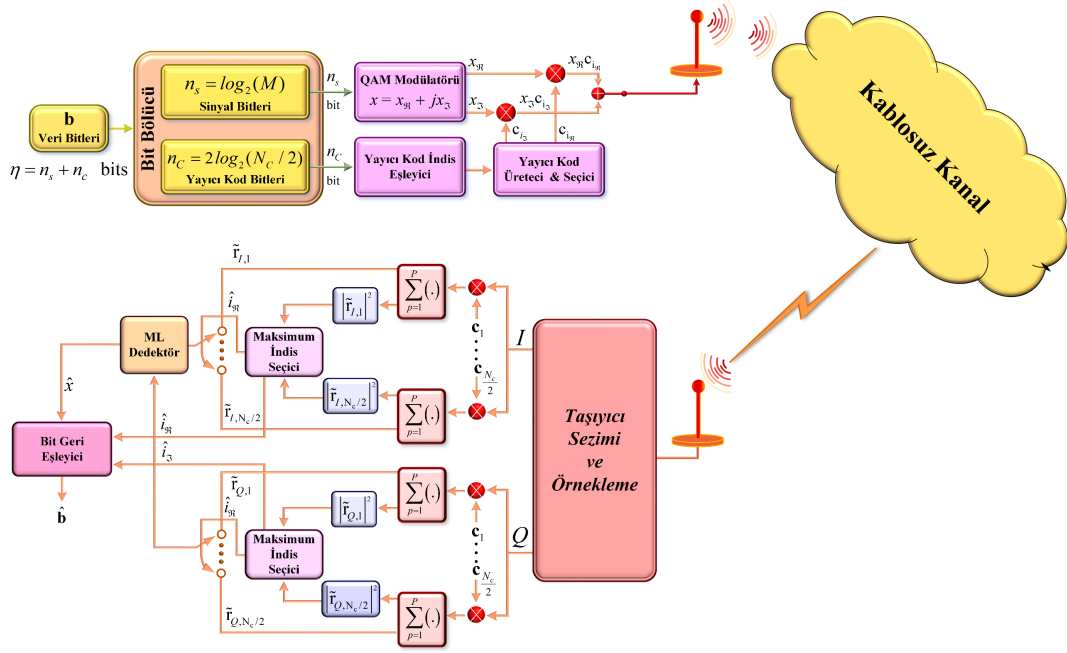
Literatürde MBM tekniği ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. [95]'te QSM ve MBM tekniklerinin birleştirilmesinden oluşan kısaca QSM-MBM olarak adlandırılan sistem sunulmuştur. Önerilen sistemin yüksek spektral verimlilik sağladığı ve literatürde var olan MBM şemalarına göre daha iyi bir hata performansı sağladığı gösterilmiştir. [96]'da yeni bir uzay zaman kodlama tabanlı IM sistemi olan uzay zaman kodlama tabanlı MBM sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemin teorik çıkarımları yapılmış ve simülasyon sonuçları geleneksel teknikleri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen sistemin karşılaştırılan sistemlerden daha iyi bir BER başarımı sağladığı gözlemlenmiştir. [97]'de yüksek veri hızlı ve yüksek enerji verimlilikli altıgen karesel genlik modülasyonu tabanlı MBM sistemi önerilmiştir. Kısaca HQAM-MBM olarak adlandırılan önerilen sistemin QAM-MBM sistemine göre daha düşük iletim enerjisi harcadığı gösterilmiştir. Önden gelen IM şemalarından olan MBM ve QSM tekniklerinin birleştirilmesiyle elde edilen kısaca karesel kanal modülasyonu (quadrature channel modulation, QCM) olarak adlandırılan özgün bir sistem [21]'de önerilmiştir. Önerilen sistemin yüksek veri hızı sağladığı ve geleneksel MBM ve QSM tekniklerine göre daha iyi bir hata başarımı sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, [98]'de geleneksel SSK tekniğinin hata performansını iyileştirmek için SSK ve MBM tekniklerini bir MIMO sistem bünyesinde birleştirilmesiyle oluşturulan yeni bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemin analizleri Rician kanallar üzerinde gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar SSK tekniği ile karşılaştırılmıştır. Önerilen sistemin geleneksel SSK sistemine göre ciddi hata başarımı sağladığı görülmüştür.

4.3. Kod İndis Modülasyonu

Daha önce de vurgulandığı gibi, IM teknikleri bilgi iletimi için güçlü bir alternatif sunmalarıyla öne çıkmaktadır. Araştırmacıların büyük ilgisini çeken bu IM ailesine yeni ve yüksek başarımlı üyeler eklenmeye devam etmektedir.

Son zamanlarda büyük ilgi gören CIM tekniği, geleneksel olarak sembolde taşınan bilgiye ek olarak yayıcı kod indislerinde de bilgi iletimini mümkün kılan yüksek spektral ve enerji verimlilikli IM tekniklerinden biridir. CIM tekniğinde, iletilmek istenen semboller birbirine dik olan yayıcı kodlar ile çarpılarak iletilir. Bu sayede semboller gürültüden daha az etkileneyeceği için hata başarımları artar [24].

CIM tekniği, DS-SS tabanlı bir tekniktir. DS-SS sistemlerinde, iletilmek istenen temel bant verileri bir yayıcı kod üretici tarafından rastgele üretilen yayıcı kod dizisi ile çarpılarak spektruma yayılırlar. DS-SS sisteminde, veri akışı çip olarak isimlendirilen yayıcı kodlar yardımıyla iletilir. Bu sayede herhangi bir bozucu etken yüzünden bazı veriler zarar gördüğünde diğer veriler üzerinden orijinal veriler yeniden elde edilebilir. Bu durum, veri kaybına karşı koruma sağlayıp sinyalin parazit, gürültü vs. gibi olumsuz etkenlere karşı daha dirençli olmasını sağlar. DS-SS tekniğinde, iletilmek istenen veri simgeleri 1 ve -1 elemanlarından oluşan dizileri temsil eden ve çip olarak adlandırılan bit dizisi ile çarpılır. Yayılma oranı olarak adlandırılan çiplerin veriye olan oranı ne kadar büyük olursa sinyal bozucu etkilerden o kadar az etkilenir [99]. DS-SS, esasında bir kod bölmeli çoklu erişim (code division multiple access, CDMA) tekniğidir. Bu nedenle CDMA tekniğinin saydığı avantajlar DS-SS tekniği için de geçerlidir. Yüksek güvenilirlik, yüksek enerji verimliliği, aynı frekansın tüm iletim hücrelerinde kullanılabilmesi, aynı frekansın tekrar tekrar kullanılabilmesi, daha çok kullanıcıya hizmet verilebilmesi ve daha iyi sinyal kalitesi bu avantajlardan bazılarıdır [100]–[102]. Böylece, bant genişliğinden taviz vermeden düşük enerji tüketimi ve yüksek veri hızı sağlayan DS-SS tabanlı CIM tekniği birçok haberleşme sistemine entegre edilmeye devam etmektedir.



Şekil 4.3 Kod İndis Modülasyonu Sistem Modeli.

CIM tekniğinin sistem modeli yapısı Şekil 4.3'te verilmiştir. Sistem modelinde, yarısı I diğ er yarısı ise Q bileşenlerinde olmak üzere N_c adet Walsh Hadamard yayıcı kod kullanılmaktadır. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi kaynaktan gelen veri bit vektörü $\mathbf{b}$, bit bölücüye girerek $n_s = \log_2(M)$ ve $n_c = 2\log_2(N_c / 2)$ olmak üzere iki parçaya ayrılmaktadır. Bunun anlamı, $\mathbf{b}$ bit dizisi içerisinde n_s bit seçilen sembole geri kalan n_c bit ise yayıcı kod indislerine eşlenmektedir. Dolayısıyla CIM sisteminin spektral verimliliği kanal kullanımı başına bitler (bits per channel use, bpcu) cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta = \log_2(M) + 2\log_2(N_c / 2) \text{ [bpcu]}. \quad (4.10)$$

Burada, η değeri bir sembol iletim süresi boyunca CIM sisteminde iletilen bilgi miktarı olarak tanımlanır. Daha sonra birbirine dik olan yayıcı kodlar ile çarpılan iletilen sinyal bileşenlerinin reel ve sanal kısımları eş-evreli (I) ve dik-evreli (Q) bileşenlerine ayrılır. I/Q bileşenlerinden ayrı ayrı kablosuz bir kanal üzerinden alıcıya iletilen sinyaller, alıcı tarafta “Taşıyıcı Sezimi ve Örnekleme” bloğundan

geçerek tekrar I / Q bileşenlerine ayrılmış olur. Alıcı terminale ulaşan gürültülü p 'inci çip sinyali I ve Q bileşenleri için sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$r_{I,p} = x_{\Re} c_{i_{\Re},p} h + w_I, \quad (4.11)$$

$$r_{Q,p} = x_{\Im} c_{i_{\Im},p} h + w_Q, \quad (4.12)$$

burada, $x_{\Re}$ ve $x_{\Im}$, M -QAM karmaşık sembolü x 'in sırasıyla reel ve sanal bileşenleridir. $c_{i_{\Re},p}$ ve $c_{i_{\Im},p}$ ifadeleri sırasıyla $\mathbf{c}_{i_{\Re}}$ ve $\mathbf{c}_{i_{\Im}}$ yayıcı kodların p 'inci çipini ifade etmektedir. $i_{\Re}$ ve $i_{\Im}$ yayıcı kod indisleri n_C bit dizisinden seçilen yayıcı kod indisleridir ve $c_{i_{\Re},p}, c_{i_{\Im},p} \in \pm 1$ 'dir. P kod uzunluğu olmak üzere $p \in \{1, 2, \dots, P\}$ şeklinde ifade edilir. $h \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ ise kablosuz sönmülemeli kanal olarak ifade edilmekte olup $h \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ dağılımlıdır. $w_I \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ ve $w_Q \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ ifadeleri sırasıyla I ve Q bileşenleri için AWGN gürültüsünün reel ve sanal bileşenini temsil etmekte olup $w_I, w_Q \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ dağılımlarına sahiptirler.

Alıcı terminaline gelen ve daha sonra I ve Q bileşenlerine ayrılan alınan sinyal ifadeleri Şekil 4.3'te görüldüğü gibi yayıcı kodlarla çarpılarak T_c çip süresi olmak üzere $T_s = PT_c$ sembol süresi boyunca toplanır. Bu işlem, geri yayma işlemi olarak adlandırılır. Kod indis modülasyonunda, ML dedektörünün karmaşıklığını azaltmak için önce yayıcı kod indisleri kestirilir. Önerilen sistem modelinde, kullanılan yayıcı kodlar birbirine dik olduğu için alınan sinyalin norm karesi ancak yayıcı kod indislerinin birbirine eşit olduğu durumda maksimum değerini alır. Bu nedenle sinyalin norm karesini maksimize eden yayıcı kod indisleri kestirilen değer olarak seçilir. Sonuç olarak yayıcı kod indisleri, I ve Q bileşenleri için geri yayma işlemi yapılmış alınan sinyaller olan $\tilde{r}_{I,i}$ ve $\tilde{r}_{Q,i}$ ifadelerinin mutlak kareleri üzerinden aşağıdaki gibi kestirilir:

$$\hat{i}_{\Re} = \arg \max_i \left\{ |\tilde{r}_{I,i}|^2 \right\}, \quad (4.13)$$

$$\hat{i}_{\mathcal{I}} = \arg \max_i \left\{ \left| \tilde{\mathbf{r}}_{\mathcal{Q},i} \right|^2 \right\}. \quad (4.14)$$

Yayıcı kod indisleri denklem (4.13) ve (4.14)'te tespit edildikten sonra Şekil 4.3'teki sistem modelinin alıcı yapısında görüldüğü gibi iletilen sembol ML dedektör ile kestirilir. Son olarak, kestirilen yayıcı kodlar ve sembol değerleri kullanılarak alıcıda kestirilen bit dizisi $\hat{\mathbf{b}}$ elde edilmektedir.

5. AYARLANABİLİR AKILLI YÜZEY TEKNOLOJİSİ

Kablosuz iletişimde sönümlenme etkisi iletişim kalitesini olumsuz olarak etkileyen en büyük faktör olarak bilinmektedir. Kablosuz yayılım ortamında bulunan nesneler ve rastgele değişimler, bu kablosuz ortamdan iletmek istenen sinyalin sönümlenerek bozulmasına neden olmaktadır. Ortamdaki nesneler ile etkileşime giren sinyal yansıma, kırınım ve saçılım gibi birçok bozucu etkiye maruz kalarak olumsuz etkilenir. Dolayısıyla, bu bozucu etkenler sonucunda sinyal kalitesi düşer. Ancak son zamanlarda ortaya çıkan ve kontrol edilebilen nesneler yardımıyla kablosuz yayılımın bozucu etkileri ile mücadele edebilmeyi sağlayan ayarlanabilir akıllı yüzey isimli teknoloji büyük bir potansiyel taşımaktadır.

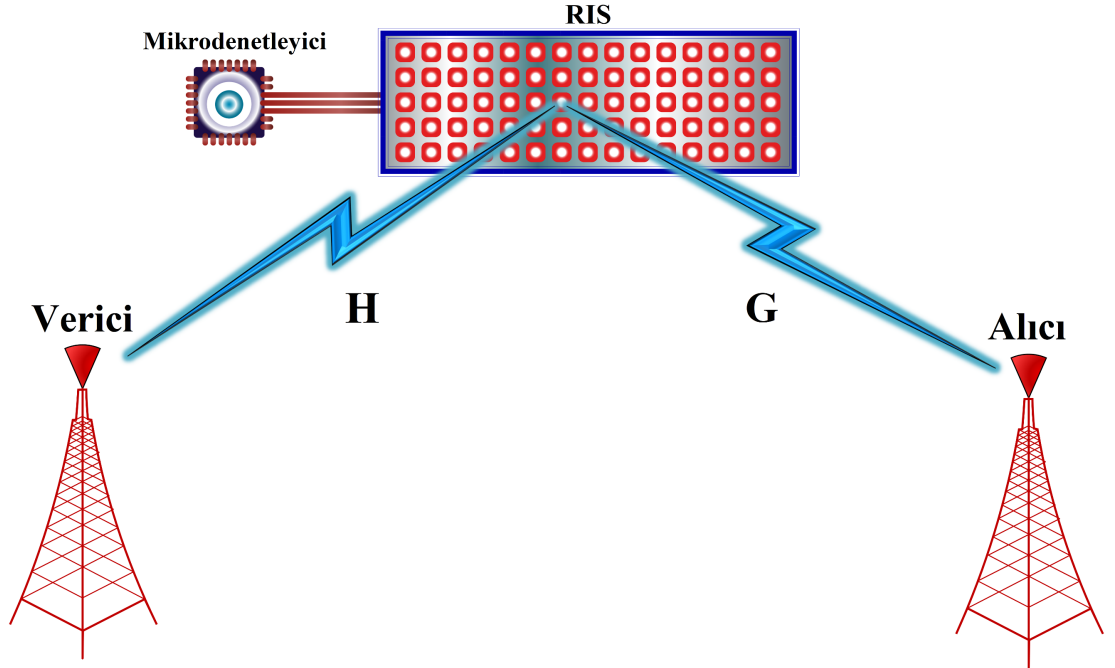
Fiziksel özellikleri doğada bulunan malzemelerden oldukça farklı olan ve eşsiz elektriksel ve manyetik özellikleri ile dikkat çeken metamalzemeler insan yapımı yapay malzemelerdir. Metamalzemeler özelliklerini bileşiminden değil, yapısından alan malzemeler olarak tanımlanır. Ayrıca metamalzemeler, periyodik veya periyodik olmayan tekrarlı kalıplar hâlinde belirli elemanların mikroskobik boyutlarda birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak da tanımlanırlar [103]–[105]. Metayüzeyler, yüzeylerine yansıyan elektromanyetik sinyalleri istenen yönde yayılmasını sağlayarak kontrol edebilen iki boyutlu ince metamalzeme katmanlarıdır. Metayüzeyler, küçük boyutlu ve hafif olmaları bu nedenle entegrasyonlarının oldukça kolay olması, düşük maliyetli olmaları, oldukça düşük kayıpla elektromanyetik dalgaları yönlendirebilmeleri, düşük soğurmaya sahip olmaları, üretimlerinin kolay olması ve yüksek verimli olmaları gibi önemli özellikleriyle öne çıkmaktadırlar [106], [107]. Temelde bir metayüzey olan RIS’ler de metayüzeylerin sağladığı tüm avantajlara ortaklırlar.

RIS’ler mikrodenetleyici gibi bir takım elektronik cihazlar ile kontrol edilebilen ve sinyal yayılımını belli oranlarda kontrol edebilen elektromanyetik malzemeden elde edilen yapay yüzeylerdir [108], [109]. RIS teknolojisi, elektromanyetik dalgaların kablosuz yayılım ortamında maruz kaldıkları yansıma, kırınım ve saçılma gibi bozucu etkileri kontrol edebilmemizi sağlar. Herhangi bir kodlama, kod çözme ya da sinyal işleme gibi işlemlere ihtiyaç duyulmadan RIS teknolojisi sayesinde iletilen sinyalin;

genlik, faz ve frekans gibi özelliklerinin kontrol edilebilmesi iletişim performansını artırma konusunda büyük bir umut vadetmektedir.

RIS'ler kablosuz ağlarda kullanılan diğer haberleşme teknolojilerine göre aşağıda sıralanan önemli ayırt edici avantajlara sahiptirler [110]–[121]:

- Yüzeylerine yansıyan elektromanyetik dalgayı kontrol edilebilme yeteneğine sahiptirler.
- Neredeyse tamamen pasif malzemelerden elde edildikleri için dışarıdan herhangi bir enerji kaynağına ihtiyaç duymazlar.
- Düşük maliyetlidirler.
- Analog/dijital ve dijital/analog dönüştürücülere ve güç yükselteçlerine ihtiyaç duymazlar.
- Alıcı gürültüsünden etkilenmezler.
- Oldukça küçük boyutlarda üretilebilirler.
- İç mekânlar, bina cepheleri, elektrik direkleri ve insan kıyafetleri gibi herhangi bir yüzeye kolayca konuşlandırabilirler.



Şekil 5.1 Ayarlanabilir Akıllı Yüzey Sistem Modeli.

Şekil 5.1’de genel bir RIS sistem yapısı verilmiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi vericiden gönderilen elektromanyetik sinyali bir mikrodenetleyici tarafından kontrol edilen RIS elemanı, yansıtıcı yüzeyleri sayesinde alıcıya yönlendirmektedir. Sistem modelinde, verici ve RIS arasındaki kanal $\mathbf{H}$ ile RIS ve alıcı arasındaki kanal ise $\mathbf{G}$ ile sembolize edilmiştir.

Bu tez çalışmasında sunulan RIS tabanlı sistemde, RIS elemanı iletilen sinyalin anlık SNR değerini maksimum yapacak şekilde faz ayarlaması yapar. Bunun için RIS elemanının kanal fazlarını bildiği varsayımı altında sinyalin maruz kaldığı kanal katsayılarının fazlarını RIS elemanı sıfırlayarak anlık SNR değerinin maksimum değerini alması sağlanabilmektedir. En önemli performans kriterlerinden olan SNR değeri arttıkça hata başarımının iyileştiği bilinmektedir. Bu nedenle, RIS teknolojisi entegre edildiği haberleşme sistemlerinin hata başarımlarını artırır ve dolayısıyla daha kaliteli iletişimi mümkün hâle getirir.

6. MIMO SİSTEMLER İÇİN KOD İNDİS MODÜLASYON DESTEKLİ UZAYSAL ORTAM TABANLI MODÜLASYON SİSTEMİ

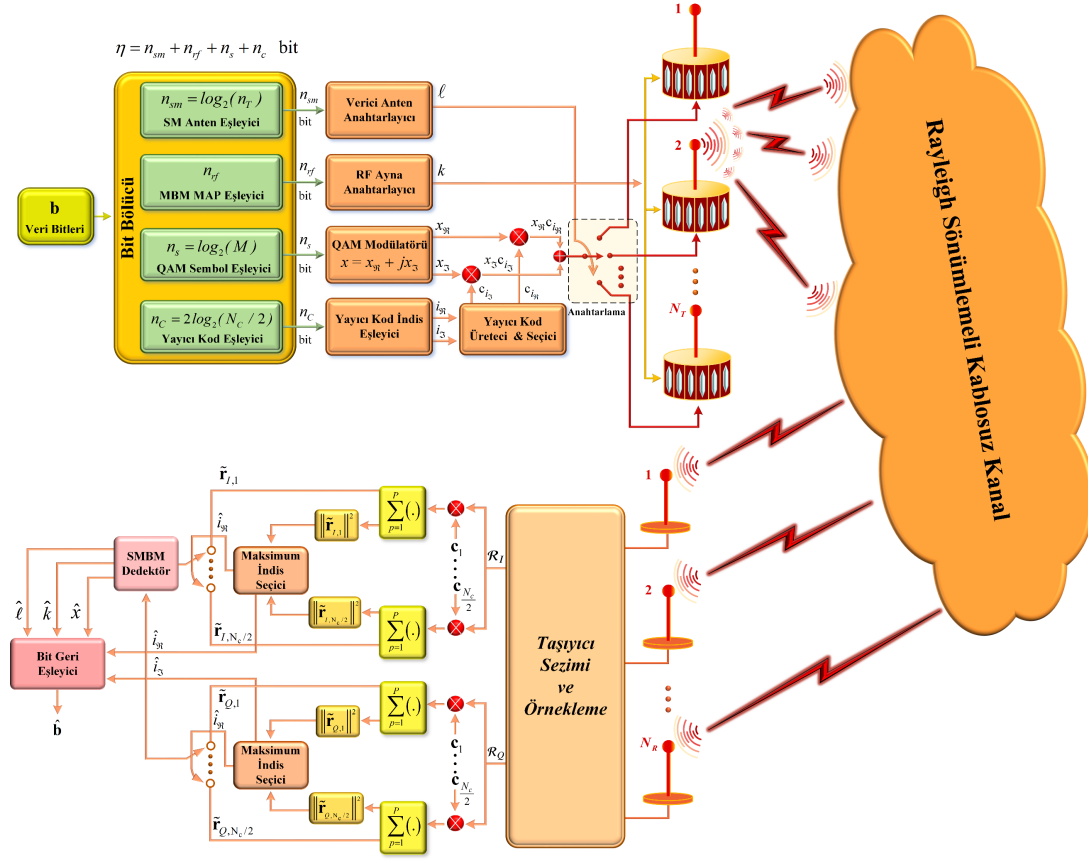
6.1. CIM-SMBM Sistem Modeli

Bu tez çalışmasında, CIM, SM ve MBM tekniklerinin birleşiminden oluşan kısaca CIM-SMBM olarak adlandırılan, yüksek performanslı ve yüksek veri hızlı yeni bir haberleşme sistemi önerilmiştir. Önerilen CIM-SMBM sisteminin analizleri Rayleigh sönümlmeli kanallar üzerinde M -QAM modülasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde önerilen sistem modelinin verici ve alıcı yapıları detaylı olarak açıklanacaktır.

6.1.1. CIM-SMBM Sisteminin Verici Yapısı

Önerilen sistem modeli Şekil 6.1’de sunulmuştur. Bu sistem modelinde verici tarafta N_T adet anten ve alıcı tarafta ise N_R adet anten bulunmaktadır. Ayrıca önerilen sistemde, I/Q bileşenleri için N_C adet Walsh Hadamard kodu kullanılır. Bu N_C adet Walsh Hadamard kodundan $N_C/2$ tanesi I bileşeni, geri kalan $N_C/2$ tanesi ise Q bileşeni için kullanılmaktadır. Buna ek olarak, her verici antene konuşlandırılan n_{rf} adet RF aynası bulunmaktadır. Bu RF aynalarının açık/kapalı durumu bilgi bitlerine göre değişir. RF aynalarının değişen açık/kapalı durumu, her verici anten için farklı ayna aktivasyon örüntülerinin (different mirror activation patterns, MAPs) ortaya çıkmasına neden olur. Bu durumda, her bir verici anten için toplam MAP sayısı $\Upsilon = 2^{n_{rf}}$ olmak üzere, toplam Υ adet farklı kanal gerçekleştirme sayısı elde edilir. Şekil 6.1’de sunulan sistem modelinde $\mathbf{b}$ vektörü, bit bölücüye gelen ve T_s sembol periyodu boyunca iletilecek olan veri bitlerini temsil etmektedir. Burada $\mathbf{b}$ vektörü, sembol periyodu başına η adet bit içerir. Daha sonra bu η bit, bit bölücüden geçirilerek ilgili indislere eşleme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlemde, $n_s = \log_2(M)$ bit

seçilen sembole, $n_{sm} = \log_2(N_T)$ bit aktif verici anten indisine, n_{rf} bit aktif MAP indisine ve $n_c = 2\log_2(N_C/2)$ bit ise I/Q bileşenleri için kullanılan yayıcı kodların indislerine eşlenerek iletilir.



Şekil 6.1 CIM-SMBM Sistem Modeli.

Burada, N_C ifadesi I/Q bileşenleri için kullanılan toplam yayıcı kod sayısı olarak tanımlanır. İletim I/Q bileşenlerinde ayrı ayrı gerçekleştirildiği için yayıcı kod indislerinde taşınan bilgi miktarı ikiye katlanır. Önerilen CIM-SMBM sisteminin veri hızı [bpcu] cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\eta = \log_2(M) + \log_2(N_T) + 2\log_2(N_C/2) + n_{rf} \quad [\text{bpcu}]. \quad (6.1)$$

CIM-SMBM sisteminde sembolde taşınan veriye ek olarak veri iletimi üç indis kullanılarak gerçekleştirilir. Bu üç indis; yayıcı kod indisleri, verici anten indisi ve MAP indisidir. Örnek olarak önerilen sistemde, $M = 2$, $N_T = 4$, $n_{rf} = 2$ ve $N_C = 8$ değerleri için bir sembol periyodu boyunca iletilen bilgi miktarı $\log_2(M) + \log_2(N_T) + 2\log_2(N_C/2) + n_{rf} = 9$ [bpcu] olarak hesaplanır.

Önerilen sistemde, sembolde iletilen verilere ek olarak, üç indis kullanılarak da veri iletiminin sağlanması veri hızını büyük oranda arttırmaktadır. Aşağıda CIM-SMBM sisteminin genişletilmiş kanal matrisi verilmiştir:

$$\mathbf{H} = \left[\underbrace{\overbrace{\mathbf{h}_{1,1}}^{\ell=1}, \overbrace{\mathbf{h}_{1,2}}^{\ell=2}, \dots, \overbrace{\mathbf{h}_{1,N_T}}^{\ell=N_T}}_{k=1} \mid \underbrace{\overbrace{\mathbf{h}_{2,1}}^{\ell=1}, \overbrace{\mathbf{h}_{2,2}}^{\ell=2}, \dots, \overbrace{\mathbf{h}_{2,N_T}}^{\ell=N_T}}_{k=2} \mid \dots \mid \underbrace{\overbrace{\mathbf{h}_{Y,1}}^{\ell=1}, \overbrace{\mathbf{h}_{Y,2}}^{\ell=2}, \dots, \overbrace{\mathbf{h}_{Y,N_T}}^{\ell=N_T}}_{k=Y} \right] \quad (6.2)$$

Alıcı tarafından alınan p 'inci gürültülü çip sinyali sırasıyla I ve Q bileşenleri için vektör formunda aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{r}_{I,p} = x_{\Re} c_{i_{\Re},p} \mathbf{h}_{\ell,k} + \mathbf{w}_I, \quad (6.3)$$

$$\mathbf{r}_{Q,p} = x_{\Im} c_{i_{\Im},p} \mathbf{h}_{\ell,k} + \mathbf{w}_Q, \quad (6.4)$$

burada, $\mathbf{r}_{I,p} = [r_{I,p}^1, r_{I,p}^2, \dots, r_{I,p}^{N_R}]^T \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ ve $\mathbf{r}_{Q,p} = [r_{Q,p}^1, r_{Q,p}^2, \dots, r_{Q,p}^{N_R}]^T \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ 'dir. $c_{i_{\Re},p}$ ve $c_{i_{\Im},p}$ ifadeleri sırasıyla $\mathbf{c}_{i_{\Re}}$ ve $\mathbf{c}_{i_{\Im}}$ yayıcı kodlarının p 'inci çipini temsil etmektedir. Burada, $i_{\Re}$ ve $i_{\Im}$ indisleri n_C bit dizisi kullanılarak seçilen yayıcı kod indisleridir ve $c_{i_{\Re},p}$, $c_{i_{\Im},p} \in \pm 1$ 'dir. $\mathbf{h}_{\ell,k} = [h_{\ell,k}^1, h_{\ell,k}^2, \dots, h_{\ell,k}^{N_R}]^T \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ ise Rayleigh sönümlmeli kanal vektörü olarak ifade edilir ve $\mathbf{h}_{\ell,k} \sim \mathcal{CN}(0,1)$ dağılımlıdır. Ayrıca, $x = x_{\Re} + jx_{\Im}$ şeklindedir ve burada $x_{\Re}$ ve $x_{\Im}$, M -QAM karmaşık sembolü x 'in sırasıyla reel ve sanal bileşenleridir. Ek olarak, $p \in \{1, 2, \dots, P\}$, $\ell \in \{1, 2, \dots, N_T\}$ ve $k \in \{1, 2, \dots, Y\}$ şeklindedir. Son olarak $\mathbf{w}_I \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ ve $\mathbf{w}_Q \in \mathbb{C}^{N_R \times 1}$ ifadeleri sırasıyla I ve Q bileşenleri için AWGN gürültü vektörünü temsil etmektedirler ve $\mathbf{w}_I, \mathbf{w}_Q \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ dağılımlarına sahiptirler.

CIM-SMBM sisteminin alınan sinyal modeli vektör-matris formunda aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_I &= \mathbf{H}\mathbf{x}_{\mathcal{R}}\mathbf{c}_{i_{\mathcal{R}}}^T + \mathbf{W}_I, \\ &= x_{\mathcal{R}}\mathbf{h}_{\ell,k}\mathbf{c}_{i_{\mathcal{R}}}^T + \mathbf{W}_I,\end{aligned}\tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_Q &= \mathbf{H}\mathbf{x}_{\mathcal{J}}\mathbf{c}_{i_{\mathcal{J}}}^T + \mathbf{W}_Q, \\ &= x_{\mathcal{J}}\mathbf{h}_{\ell,k}\mathbf{c}_{i_{\mathcal{J}}}^T + \mathbf{W}_Q,\end{aligned}\tag{6.6}$$

burada, $\mathcal{R}_I = [\mathbf{r}_{I,1}, \dots, \mathbf{r}_{I,P}] \in \mathbb{C}^{N_R \times P}$ ve $\mathcal{R}_Q = [\mathbf{r}_{Q,1}, \dots, \mathbf{r}_{Q,P}] \in \mathbb{C}^{N_R \times P}$, $\mathbf{r}_{I,p}$ ve $\mathbf{r}_{Q,p}$ sırasıyla $\mathcal{R}_I$ ve $\mathcal{R}_Q$ matrislerinin p 'inci sütunlarını ifade etmektedir. $\mathbf{c}_{i_{\mathcal{R}}}$ ve $\mathbf{c}_{i_{\mathcal{J}}}$ ifadeleri $P \times 1$ boyutlu seçilen Walsh Hadamard yayıcı kodlarıdır. $\mathbf{W}_I \in \mathbb{C}^{N_R \times P}$ ve $\mathbf{W}_Q \in \mathbb{C}^{N_R \times P}$ ise sırasıyla I ve Q bileşenleri için AWGN gürültü matrisini ifade etmektedir. $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_R \times YN_T}$ genişletilmiş kanal matrisini ifade eder ve (6.2)'de verilmiştir. $\mathbf{x}_{\mathcal{R}}$ ve $\mathbf{x}_{\mathcal{J}} \in \mathbb{C}^{YN_T \times 1}$, CIM-SMBM sisteminin iletim vektörleridir ve sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilirler:

$$\mathbf{x}_{\mathcal{R}} = \left[0 \cdots 0 \mid \cdots \mid \underbrace{0 \cdots 0 \quad x_{\mathcal{R}} \quad 0 \cdots 0}_{k'inci \text{ MAP Durumu}} \mid \cdots \mid 0 \cdots 0 \right]^T, \tag{6.7}$$

$\ell'inci \text{ pozisyon}$
 $\downarrow$
 $x_{\mathcal{R}}$

$$\mathbf{x}_{\mathcal{J}} = \left[0 \cdots 0 \mid \cdots \mid \underbrace{0 \cdots 0 \quad x_{\mathcal{J}} \quad 0 \cdots 0}_{k'inci \text{ MAP Durumu}} \mid \cdots \mid 0 \cdots 0 \right]^T, \tag{6.8}$$

$\ell'inci \text{ pozisyon}$
 $\downarrow$
 $x_{\mathcal{J}}$

Önerilen sistem modelinin çalışma prensibinin daha iyi anlaşılabilmesi için bir örnek ele alınacak olursa; $M = 4$, $N_T = 4$, $n_{rf} = 2$ ve $N_C = 8$ değerleri için veri bit akışı vektörünün $\mathbf{b} = [0010110111]$ olduğu varsayılın. Burada, ilk 2 bit ($[00]$) 4-QAM sembolü $x = 1 + j$ ifadesine eşlenir. İkinci 2 bit ($[10]$) 3'üncü aktif verici anten indisine ($\ell = 3$) eşlenir. Üçüncü 2 bit ($[11]$) 4'üncü aktif MAP indisine ($k = 4$)

eşlenir. Geri kalan son 4 bit $([0111])$ ise yarısı I ve diğer yarısı ise Q bileşeninden iletilmek üzere seçilen yayıcı kod indislerine ($i_{\mathfrak{R}} = 2$ ve $i_{\mathfrak{J}} = 4$) eşlenir.

Bu örnek için ortaya çıkan iletim vektörleri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{x}_{\mathfrak{R}} = \left[\underbrace{0 \ 0 \ 0 \ 0}_{1'inci \ MAP} \mid \underbrace{0 \ 0 \ 0 \ 0}_{2'nci \ MAP} \mid \underbrace{0 \ 0 \ 0 \ 0}_{3'üncü \ MAP} \mid \underbrace{0 \ 0 \ 1 \ 0}_{\substack{\ell=3'üncü \\ 4'üncü \ MAP}} \right]^T, \quad (6.9)$$

$$\mathbf{x}_{\mathfrak{J}} = \left[\underbrace{0 \ 0 \ 0 \ 0}_{1'inci \ MAP} \mid \underbrace{0 \ 0 \ 0 \ 0}_{2'nci \ MAP} \mid \underbrace{0 \ 0 \ 0 \ 0}_{3'üncü \ MAP} \mid \underbrace{0 \ 0 \ j \ 0}_{\substack{\ell=3'üncü \\ 4'üncü \ MAP}} \right]^T. \quad (6.10)$$

6.1.2. CIM-SMBM Sisteminin Alıcı Yapısı

Bu bölümde CIM-SMBM sisteminin alıcı kısmında, aktif anten indisi, aktif MAP indisi, seçilen sembol ve aktif yayıcı kod indislerinin kestirimi için ML, DB-ML ve ELC dedektör olmak üzere üç farklı dedektör önerilmiştir. Bu üç dedektörün karmaşıklık analizleri elde edilmiş ve birbiriyle olan karşılaştırmaları yapılmıştır.

6.1.2.A CIM-SMBM Sistemi İçin ML Dedektör

ML detektör, modüle edilmiş sembolü, yayıcı kod indislerini, aktif verici anten indisini ve aktif MAP indisini kestirmek için tüm olası durumları ele alır. Daha sonra bu tüm olası durumlar içerisinde metrik değerini minimum yapan durumun parametrelerini kestirilen değer olarak atar. CIM-SMBM sisteminin ML dedektörü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\left[\hat{x}, \hat{i}_{\mathfrak{R}}, \hat{i}_{\mathfrak{J}}, \hat{\ell}, \hat{k} \right] = \arg \min_{x, i_{\mathfrak{R}}, i_{\mathfrak{J}}, \ell, k} \left\{ \left\| \mathcal{R} - E_c \left(\mathcal{A}_I + \mathcal{A}_Q \right) \right\|^2 \right\}, \quad (6.11)$$

burada, $\mathcal{A}_I = \mathbf{H}_{\mathbf{x}_{\mathfrak{R}}} \mathbf{c}_{i_{\mathfrak{R}}}^T$, $\mathcal{A}_Q = \mathbf{H}_{\mathbf{x}_{\mathfrak{J}}} \mathbf{c}_{i_{\mathfrak{J}}}^T$ ve $\mathcal{R} = \mathcal{R}_I + j\mathcal{R}_Q$ olarak ifade edilir. Daha sonra kestirilen $\hat{x}, \hat{i}_{\mathfrak{R}}, \hat{i}_{\mathfrak{J}}, \hat{\ell}$ ve $\hat{k}$ parametreleri kullanılarak kestirilen bit dizisi $\hat{\mathbf{b}}$ elde

edilir. Ancak ML dedektör tüm olası durumları aynı anda ele aldığı için karmaşıklığı diğer dedektörlere göre daha yüksektir.

6.1.2.B CIM-SMBM Sistemi İçin DB-ML Dedektör

Şekil 6.1’de verilen CIM-SMBM sistem modelinin alıcı bölümünde görüldüğü gibi, ilk olarak alıcı tarafta alınan gürültülü sinyal I ve Q bileşenlerine ayrılır. I ve Q bileşenleri için ayrı ayrı elde edilen alınan sinyal, daha sonra yayıcı kod indislerini, iletilen sembol indislerini, aktif anten indisini ve aktif MAP indisini hesaplamak için kullanılır $(\hat{x}, \hat{i}_R, \hat{i}_J, \hat{\ell}, \hat{k})$. CIM-SMBM sisteminin karmaşıklığını azaltmak için ilk önce yayıcı kod indisleri olan i_R ve i_J değerleri kestirilir. Daha sonra $\hat{x}$, $\hat{\ell}$ ve $\hat{k}$ değerleri kestirilir. Bu durum Şekil 6.1’de yer alan sistem modelinde de görülmektedir. I ve Q bileşenleri için i_R ve i_J değerleri alınan sinyalin norm karesi üzerinden maksimize edilerek kestirilir. Daha sonra ML tabanlı SMBM dedektör kestirilen kod indisleri ile ilişkili alınan sinyali kullanarak $\hat{x}$, $\hat{\ell}$ ve $\hat{k}$ değerlerini kestirir.

Sonuç olarak, I ve Q bileşenlerinde alınan sinyal vektörleri Şekil 6.1’de gösterildiği gibi $\mathbf{c}_i$ yayıcı kodlarıyla çarpılır ve $T_s = PT_c$ sembol iletim süresi üzerinden toplanır. Burada T_c chip süresi olarak tanımlanır.

I ve Q bileşenleri için i ’inci korelatör çıktısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tilde{\mathbf{r}}_{I,i} = \mathbf{R}_I \mathbf{c}_i = [\mathbf{r}_{I,1} \mathbf{r}_{I,2} \dots \mathbf{r}_{I,P}] \mathbf{c}_i, \quad (6.12)$$

$$\tilde{\mathbf{r}}_{Q,i} = \mathbf{R}_Q \mathbf{c}_i = [\mathbf{r}_{Q,1} \mathbf{r}_{Q,2} \dots \mathbf{r}_{Q,P}] \mathbf{c}_i, \quad (6.13)$$

burada, $i = 1, 2, \dots, N_C / 2$ olmakta olup $\tilde{\mathbf{r}}_{I,i}$ ve $\tilde{\mathbf{r}}_{Q,i}$ ifadelerinin ν ’inci elemanları sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned}
\tilde{r}_{I,i}^\nu &= \sum_{p=1}^P c_{i,p} r_{I,p}^\nu = \sum_{p=1}^P c_{i,p} (x_{\mathfrak{R}} c_{I,p} h_{\ell,k}^\nu + w_{I,p}), \\
&= \begin{cases} x_{\mathfrak{R}} h_{\ell,k}^\nu E_c + \tilde{w}_I, & \text{if } i = \hat{i}_{\mathfrak{R}} \\ \tilde{w}_I, & \text{if } i \neq \hat{i}_{\mathfrak{R}} \end{cases} \quad (6.14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{r}_{Q,i}^\nu &= \sum_{p=1}^P c_{i,p} r_{Q,p}^\nu = \sum_{p=1}^P c_{i,p} (x_{\mathfrak{I}} c_{Q,p} h_{\ell,k}^\nu + w_{Q,p}), \\
&= \begin{cases} x_{\mathfrak{I}} h_{\ell,k}^\nu E_c + \tilde{w}_Q, & \text{if } i = \hat{i}_{\mathfrak{I}} \\ \tilde{w}_Q, & \text{if } i \neq \hat{i}_{\mathfrak{I}} \end{cases} \quad (6.15)
\end{aligned}$$

burada, $\nu \in \{1, 2, \dots, N_R\}$ ve $i \in \{1, 2, \dots, N_C / 2\}$ şeklindedir. Her bir sembolün ortalama enerjisi ise E_c olarak ifade edilir. Burada, $E_c = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P c_{i,p}^2$ olarak ifade edilir. Şekil 6.1’de görüldüğü gibi I ve Q bileşenleri için yayıcı kod indisleri kestirilirken, önce alınan sinyal vektörünün norm karesi hesaplanır. Daha sonra bu norm kare değerini maksimize eden yayıcı kod indisleri belirlenir. Walsh Hadamard kodları birbirine dik olduğu için alınan sinyalin norm karesinin maksimum değeri yayıcı kod indislerinin birbirine eşit olduğu durumda gerçekleşir. Bu durum matematiksel olarak aşağıda ifade edilmiştir:

$$\sum_{p=1}^P c_{a,p} c_{b,p} = \begin{cases} 1, & \text{if } a = b \\ 0, & \text{if } a \neq b \end{cases} \quad (6.16)$$

Bu nedenle, yayıcı kod indisleri alınan sinyal vektörünün norm karesi üzerinden aşağıdaki gibi kestirilir:

$$\hat{i}_{\mathfrak{R}} = \arg \max_i \left\{ \|\tilde{\mathbf{r}}_{I,i}\|^2 \right\}, \quad (6.17)$$

$$\hat{i}_{\mathfrak{I}} = \arg \max_i \left\{ \|\tilde{\mathbf{r}}_{Q,i}\|^2 \right\}. \quad (6.18)$$

Yayıcı kod indisleri kestirildikten sonra, CIM-SMBM sistem modelinin alıcı tarafında ML tabanlı SMBM dedektör $\hat{x}$, $\hat{l}$ ve $\hat{k}$ değerlerini kestirmek için alınan sinyal üzerinden x , l ve k parametrelerinin tüm kombinasyonlarını dener. Sonuç olarak, yayıcı kod indisi kestirildikten sonra $\hat{x}$, $\hat{l}$ ve $\hat{k}$ parametrelerini kestiren CIM-SMBM sisteminin ML dedektörü aşağıdaki gibi verilir:

$$\left[\hat{x}, \hat{\ell}, \hat{k} \right] = \arg \min_{x, \ell, k} \left\{ \left\| \left(\tilde{\mathbf{r}}_{I, \hat{i}_{\Re}} + j \tilde{\mathbf{r}}_{Q, \hat{i}_{\Im}} \right) - E_c x \mathbf{h}_{\ell, k} \right\|^2 \right\}. \quad (6.19)$$

Daha sonra, kestirilen $\hat{x}, \hat{i}_{\Re}, \hat{i}_{\Im}, \hat{\ell}$ ve $\hat{k}$ değerleri kullanılarak kestirilen bit dizisi $\hat{\mathbf{b}}$ elde edilir.

6.1.2.C CIM-SMBM Sistemi İçin ELC Dedektör

ELC dedektörde de DB-ML dedektörde olduğu gibi ilk olarak yayıcı kod indisleri kestirilir. Ancak ELC dedektörde $\hat{x}, \hat{l}$ ve $\hat{k}$ değerleri kestirilirken daha düşük karmaşıklık bir ML dedektör kullanılır. [122]'de yer alan düşük karmaşıklık ML dedektörden ilham alınarak CIM-SMBM sisteminin ELC dedektörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

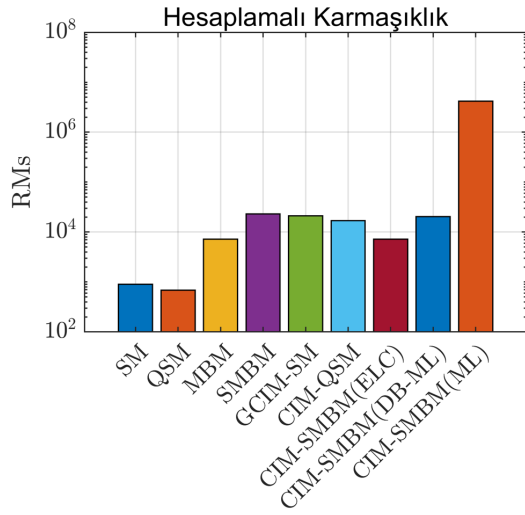
$$\left[\hat{x}, \hat{\ell}, \hat{k} \right] = \arg \max_{x, \ell, k} \left\{ 2\Re \left(\mathbf{h}_{\ell, k}^H \mathcal{D} x^* \right) - |x|^2 \left\| \mathbf{h}_{\ell, k} \right\|^2 \right\}, \quad (6.20)$$

burada, $\mathcal{D} = \tilde{\mathbf{r}}_{I, \hat{i}_{\Re}} + j \tilde{\mathbf{r}}_{Q, \hat{i}_{\Im}}$ iken x^* ise karmaşık sayı olan x 'in eşleniğidir. ELC detektör hem DB-ML detektörde olduğu gibi önce ayrı olarak yayıcı kod indislerini kestirirken hem de ikinci aşamada kullanılan ML detektörünün karmaşıklığını azaltarak daha düşük bir karmaşıklık sağlar.

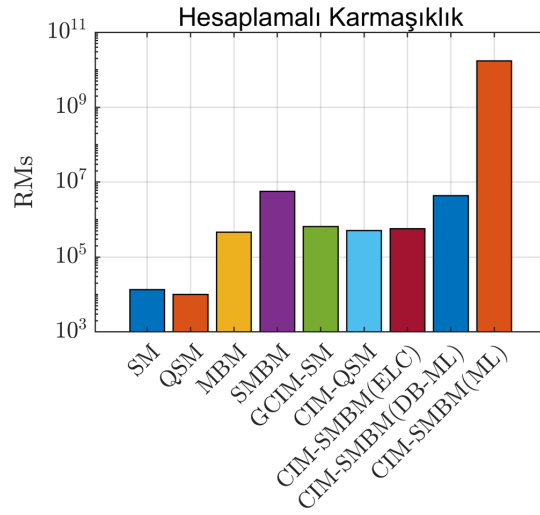
6.1.3. Karmaşıklık Analizi

Bu bölümde, [bpcu] cinsinden aynı spektral verimlilik için önerilen sistemin alıcı karmaşıklığı ve diğer sistemlerle olan karşılaştırılması sunulacaktır. CIM-SMBM

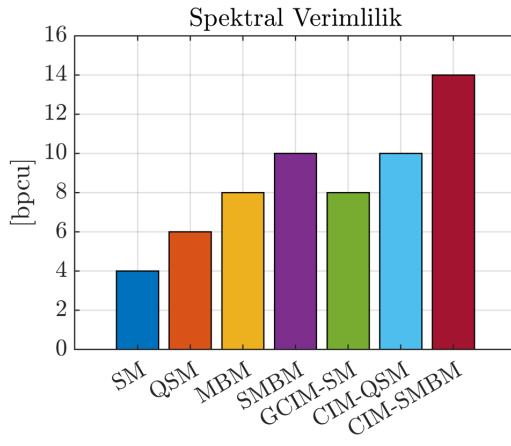
sistemi ve diğer kıyaslanan sistemlerin karmaşıklığı, dedekte etme sürecini gerçekleştirmek için gereken reel çarpımlar (real multiplications, RMs) sayısı ile hesaplanabilir. Karmaşıklık analizi sonuçları Tablo 6.1’de verilmiştir. ML dedektör tüm olası kombinasyonları birlikte ele aldığı için en yüksek karmaşıklığa sahip dedektördür. ML dedektör ile karşılaştırıldığında, DB-ML dedektörde önce yayıcı kod indisleri daha sonra diğer parametrelerin kestirilmesi şeklinde bir parçalama söz konusu olduğu için daha düşük karmaşıklık ortaya çıkmaktadır. DB-ML dedektör ise ELC dedektörü ile karşılaştırıldığında, ELC dedektörün daha az karmaşıklığa sahip olduğu açıktır, çünkü ELC dedektörün ikinci aşaması hesaplamadaki basit değişiklik nedeniyle RMs sayısını azaltır. Ayrıca önerilen sistemde veri iletiminde birçok indis kullandığı için aynı spektral verimde karşılaştırıldığında diğer sistemlerin toplam karmaşıklığının önerilen sisteme göre daha yüksek olduğu Tablo 6.1’de görülmektedir. Ayrıca, hesaplamalı karmaşıklık ve spektral verimliliğin nümerik örneklerini içeren grafikler Şekil 6.2’de sunulmuştur. Burada, (a) ve (b) durumu için $M = 4$, $N_T = 4$, $n_{rf} = 6$, $P = 16$, $N_C = 8$ ve $N_R = 2$ değerleri, (b) ve (d) durumu içinse $M = 8$, $N_T = 16$, $n_{rf} = 10$, $P = 64$, $N_C = 16$ ve $N_R = 4$ değerleri seçilmiştir. Şekil 6.2 incelendiğinde önerilen CIM-SMBM sisteminin karşılaştırılan tüm sistemlerden daha yüksek spektral verimlilik sağladığı görülmektedir. Ancak CIM-SMBM sistemi DS-SS tekniğine dayandığı için yayılı izgeden gelen çarpımsal işlemlerin karmaşıklığı, hem anten hem de MAP indislerinde veri iletilmesi sonucunda ortaya çıkan çarpımsal işlemlerin karmaşıklığı sistemin alıcı karmaşıklığını büyük oranda artırmaktadır. Özellikle CIM-SMBM (ML) sisteminin karmaşıklığı Şekil 6.2’de görüldüğü gibi oldukça yüksektir. Bu nedenle önerilen sistemin karmaşıklığını azaltmak için DB-ML dedektör önerilmiştir. Sonrasında karmaşıklığı daha da azaltmak için ELC dedektör önerilmiştir. CIM-SMBM (ML), CIM-SMBM (DB-ML) ve CIM-SMBM (ELC) sistemlerinin RMs cinsinden hesaplamalı karmaşıklık değerleri sırasıyla (a) durumu için 4194300, 20480 ve 7168 (b) durumu içinse 17179900000, 4325380 ve 573440’dır. Verilen değerlerden anlaşılabileceği gibi CIM-SMBM sisteminde ELC dedektörün önerilmesiyle sistemin karmaşıklığı büyük oranda düşmektedir.



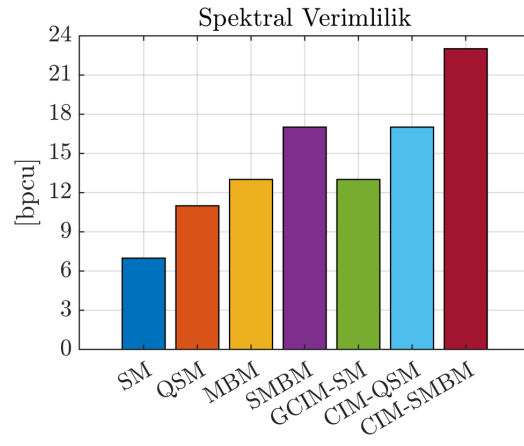
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.2 Hesaplamalı Karmaşıklık ve Spektral Verimlilik Karşılaştırmaları.

Tablo 6.1 Hesaplamalı Karmaşıklık Karşılaştırması.

Sistemler	Reel Çarpımlar (RMs)
$\mathcal{O}_{\text{CIM-SMBM}}$ (ML Dedektör)	$8N_R P 2^\eta$
$\mathcal{O}_{\text{CIM-SMBM}}$ (DB-ML Dedektör)	$8PN_C N_R^2 + 8N_R 2^{n_s+n_{sm}+n_{rf}}$
$\mathcal{O}_{\text{CIM-SMBM}}$ (ELC Dedektör)	$8PN_C N_R^2 + \left(6N_R + \frac{3M}{4} - 3\right) 2^{n_{sm}+n_{rf}}$
$\mathcal{O}_{\text{GCIM-SM}}$ [28]	$\left(16PN_C N_R^2 + 8N_R 2^{n_s+n_{sm}}\right) \left(1 + \frac{n_{rf}}{n_s + n_{sm}}\right)$
$\mathcal{O}_{\text{CIM-QSM}}$ [28]	$\left(16PN_C N_R^2 + 8N_R 2^{n_s+n_{sm}}\right) \left(1 + \frac{n_{rf}}{n_s + 2n_{sm}}\right)$
$\mathcal{O}_{\text{SM}}$ [14]	$8N_R 2^{n_s+n_{sm}} \left(1 + \frac{n_C + n_{rf}}{n_s + n_{sm}}\right)$
$\mathcal{O}_{\text{QSM}}$ [14]	$8N_R 2^{n_s+n_{sm}} \left(1 + \frac{n_C + n_{rf}}{n_s + 2n_{sm}}\right)$
$\mathcal{O}_{\text{MBM}}$	$8N_R 2^{n_s+n_{rf}} \left(1 + \frac{n_C + n_{sm}}{n_s + n_{rf}}\right)$
$\mathcal{O}_{\text{SMBM}}$	$8N_R 2^{n_s+n_{rf}+n_{sm}} \left(1 + \frac{n_C}{n_s + n_{rf} + n_{sm}}\right)$

6.2. Performans Analizleri

Bu bölümde, CIM-SMBM sisteminin ABER, veri hızı, çıktı ve enerji verimliliği analizleri yapılacaktır. Ayrıca bu analizler altında önerilen CIM-SMBM sistemi, CIM-QSM, GCIM-SM, SMBM, MBM, QSM, SM ve DS-SS gibi önemli sistemler ile karşılaştırılmıştır.

6.2.2. CIM-SMBM Sisteminin ABER Analizi

CIM-SMBM tekniğinin sistem modelinde gösterildiği gibi gelen veri bitleri dört parçaya ayrılır. $\mathcal{P}_{\text{CIM-SMBM}}$ olarak sembolize edilen önerilen sistemin toplam BER ifadesi iki hata olayının bit hata olasılığının (bit error probability , BEP) bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Yani, alıcıdaki toplam BER, yayıcı kod indislerine eşlenen bitlerin BEP ifadesi ($\mathcal{P}_1$) ile aktif anten indislerine, modüle edilmiş simgelere ve aktif MAP indislerine eşlenen bitlerin BEP ifadesinin ($\mathcal{P}_2$) toplamı olarak yazılabilir. Sonuç olarak CIM-SMBM sisteminin toplam ABER ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathcal{P}_{\text{CIM-SMBM}} = \frac{1}{\eta} \left[n_c \mathcal{P}_1 + (n_s + n_{sm} + n_{rf}) \mathcal{P}_2 \right]. \quad (6.21)$$

$\mathcal{P}_1$ ve $\mathcal{P}_2$ hata olayları, I ve Q bileşenleri için ortalama hatalı yayıcı kod indislerinin kestirim olasılıkları olan, $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}}$ ve $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{I}}}$ ifadelerine bağlıdır. Sonuç olarak, SMBM alıcısının modülasyonlu sinyalleri başarılı bir şekilde kestirebilmesi yayıcı kod indislerinin doğru hesaplanmasına bağlıdır. Dolayısıyla CIM-SMBM sisteminde iki farklı hata meydana gelebilir. İlk durumda, $\hat{i}_{\mathfrak{R}}$ ve $\hat{i}_{\mathfrak{I}}$ yayıcı kod indisleri doğru olarak kestirilir (yani bu durumda, yayıcı kod indislerine eşlenen bitlerde hata yoktur), ancak SMBM dedektör tarafından diğer parametreler hatalı olarak kestirilir. İkinci durumda ise $\hat{i}_{\mathfrak{R}}$ ve $\hat{i}_{\mathfrak{I}}$ yayıcı kod indisleri yanlış kestirilir ve SMBM dedektörü yanlış olarak seçilen yayıcı kodların sonucuna bağlı olarak bitleri tahmin eder ($\tilde{\mathbf{r}}_{I, i \neq \hat{i}_{\mathfrak{R}}}, \tilde{\mathbf{r}}_{Q, i \neq \hat{i}_{\mathfrak{I}}}$). Bu durumda artık alıcı doğru bir kestirim yapamadığı için bit hatası olasılığı 0.5 değerine

eşittir. Buna göre, aktif anten indisi, aktif MAP indisi ve modüle edilmiş sembol için BER ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\mathcal{P}_2 = \mathcal{P}_{\text{SMBM}}(1 - \mathcal{P}_c) + 0.5\mathcal{P}_c, \quad (6.22)$$

burada, $\mathcal{P}_{\text{SMBM}}$ ifadesi SMBM dedektörünün BEP ifadesidir ve $\mathcal{P}_c$ ise $\mathcal{P}_c = 0.5\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}} + 0.5\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{I}}}$ olarak ifade edilir. Yayıcı kod indislerine eşlenen bitler için BEP terimi $\mathcal{P}_1$, $\mathcal{P}_c$ ve n_c parametreleri ile açıklanabilir. Yayıcı kod indisleri $(\hat{i}_{\mathfrak{R}}, \hat{i}_{\mathfrak{I}})$ yanlış kestirilir, orijinal yayıcı kod indislerine eşlenen bitler de yanlış tahmin edilecektir. Sonuç olarak, bu yanlış eşleştirmeler, orijinal yayıcı kod indislerine eşlenen bitler içerisinde farklı sayıda yanlış bitin tahmin edilmesiyle sonuçlanacaktır. Sonuç olarak, $\mathcal{P}_1$ yayıcı kod indislerine eşlenen bitler için BER ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathcal{P}_1 = \frac{\mathcal{P}_c}{n_c}. \quad (6.23)$$

6.2.3. Kod İndis Kestiriminin Ortalama Hata Olasılığı

(6.17) ve (6.18)'de yer alan CIM-SMBM sisteminin I ve Q bileşenlerinin kod indis dedektörlerinde belirtildiği gibi; $\mathcal{P}_c$ ifadesi $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}}$ ve $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{I}}}$ ifadelerinin bir fonksiyonu olduğundan önce bu iki hata olasılığı bulunmalıdır. $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}}$ ve $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{I}}}$ olasılığı, en büyük norm değeri $\|\tilde{\mathbf{r}}_{I, \hat{i}_{\mathfrak{R}}}\|^2$ veya $\|\tilde{\mathbf{r}}_{Q, \hat{i}_{\mathfrak{I}}}\|^2$ olan bileşenin $\mathcal{R}_I$ veya $\mathcal{R}_Q$ kümelerindeki minimum norm değerinden küçük olma olasılığı olarak ifade edilebilir. Bu nedenle, eşit olasılığa sahip iletilen yayıcı kodlar için kanal katsayıları ve yayıcı kodlarına bağlı $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}}$ ve $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{I}}}$ olasılıkları aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}} = Pr \left(\|\tilde{\mathbf{r}}_{I, \hat{i}_{\mathfrak{R}}}\|^2 < \min_{i \in \left\{1, 2, \dots, \frac{N_c}{2}\right\}, i \neq \hat{i}_{\mathfrak{R}}} \left\{ \|\tilde{\mathbf{r}}_{I, i}\|^2 \right\} \mid \mathbf{c}_{i_{\mathfrak{R}}}, \mathbf{h}_{\ell, k} \right), \quad (6.24)$$

$$\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathcal{I}}} = Pr \left(\left\| \tilde{\mathbf{r}}_{Q, \hat{i}_{\mathcal{I}}} \right\|^2 < \min_{i \in \left\{1, 2, \dots, \frac{N_C}{2}\right\}, i \neq \hat{i}_{\mathcal{I}}} \left\{ \left\| \tilde{\mathbf{r}}_{Q, i} \right\|^2 \right\} \mid \mathbf{c}_{i_{\mathcal{I}}}, \mathbf{h}_{\ell, k} \right), \quad (6.25)$$

burada, $\tilde{\mathbf{r}}_{I, \hat{i}_{\mathcal{R}}} = E_c x_{\mathcal{R}} \mathbf{h}_{\ell, k} + \tilde{\mathbf{w}}_{I, \hat{i}_{\mathcal{R}}}$, $\tilde{\mathbf{r}}_{Q, \hat{i}_{\mathcal{I}}} = E_c x_{\mathcal{I}} \mathbf{h}_{\ell, k} + \tilde{\mathbf{w}}_{Q, \hat{i}_{\mathcal{I}}}$ ve $\tilde{\mathbf{r}}_{I, i} = \tilde{\mathbf{w}}_{I, i}$ ($i \neq \hat{i}_{\mathcal{R}}$), $\tilde{\mathbf{r}}_{Q, i} = \tilde{\mathbf{w}}_{Q, i}$ ($i \neq \hat{i}_{\mathcal{I}}$). Denklem (6.24) ve (6.25)'den, I ve Q bileşenlerinin yayıcı kod indisleri kestirimi için $\mathcal{P}_c = \mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathcal{R}}} = \mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathcal{I}}}$ olduğu görülebilir. Bu nedenle, I ve Q bileşenlerinden sadece bir tanesinin olasılığını hesaplamak yeterlidir. Bu nedenle, yalnızca hatalı I bileşeni için yayıcı kod indis kestiriminin saptanma olasılığı dikkate alınacaktır. Norm kare rastgele değişkenleri bağımsızdır, çünkü her gürültü örneği farklı bir yayıcı kodu ile çarpılır ve merkezi olmayan ki-kare dağılımını takip eder [123]. Sonuç olarak $\mathcal{P}_c$ terimini elde etmek için, sıra istatistikleri teorisi, I ve Q yayıcı kod indisi olasılıkları için kullanılabilir. Bu amaçla, Λ ve Ω ifadeleri aşağıdaki gibi temsil edilen iki rastgele değişken olarak kabul edilir:

$$\Lambda = \min_i \{ \Lambda_i \}, i \in \{1, 2, \dots, N_C / 2\}, i \neq \hat{i}_{\mathcal{R}}$$

$$\Omega = \left\| \tilde{\mathbf{r}}_{I, \hat{i}_{\mathcal{R}}} \right\|^2, \quad (6.26)$$

burada, $\Lambda_i = \left\| \tilde{\mathbf{r}}_i' \right\|^2$ şeklindedir. Ayrıca, Ω teriminin PDF ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$f_{\Omega}(\Omega) = \frac{1}{2\sigma_{\Omega}^2} \left(\frac{\Omega}{\chi_{i_{\mathcal{R}}}^2} \right)^{\frac{N_R-2}{4}} e^{-\frac{\chi_{i_{\mathcal{R}}}^2 + \Omega}{2\sigma_{\Omega}^2}} I_{\frac{N_R}{2}-1} \left(\frac{\chi_{i_{\mathcal{R}}}^2}{\sigma_{\Omega}^2} \sqrt{\Omega} \right), \Omega > 0 \quad (6.27)$$

burada $I_{\beta}(y) = \sum_{t=0}^{\infty} \frac{(y/2)^{\beta+2t}}{t! \Gamma(\beta+t+1)}$, $y \geq 0$ birinci tür modifiye edilmiş Bessel fonksiyonu olarak tanımlanabilir ve $\Gamma(x)$ ifadesi, $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} u^{x-1} e^{-u} du$ olarak

gösterilen gama fonksiyonudur. $\chi_{i_{\mathfrak{R}}} = \sqrt{\sum_{\nu=1}^{N_R} |E_c x_{\mathfrak{R}} h_{\nu, \ell_{\mathfrak{R}}} |^2}$, $\sigma_{\Lambda_i}^2 = 2N_R(E_c N_0)^2$ ve $\sigma_{\Omega}^2 = 2N_R(E_c N_0)^2 + 4E_c N_0 \chi^2$ [123].

Önerilen CIM-SMBM sisteminin ortalama hatalı kod indisi kestirim olasılığı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathcal{P}_c = \int_0^{\infty} \mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}} f_{\chi}(\chi_{i_{\mathfrak{R}}}) d\chi_{i_{\mathfrak{R}}}, \quad (6.28)$$

burada, hatalı kod indislerinin tespit edilme olasılığı $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}}$ aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}} &= \frac{1}{2\sigma_{\Omega}^2} \int_0^{\infty} \left[e^{-\frac{\Lambda_i}{2\sigma_{\Lambda_i}^2}} \sum_{m=0}^{z-1} \frac{1}{m!} \left(\frac{\Lambda_i}{2\sigma_{\Lambda_i}^2} \right)^m \right]^{\left(\frac{N_C}{2} - 1 \right)} \\ &\times \left(\frac{\Omega}{\chi_{i_{\mathfrak{R}}}^2} \right)^{\frac{N_R-2}{4}} e^{-\frac{\chi_{i_{\mathfrak{R}}}^2 + \Omega}{2\sigma_{\Omega}^2}} I_{\frac{N_R-1}{2}} \left(\frac{\chi_{i_{\mathfrak{R}}}}{\sigma_{\Omega}^2} \sqrt{\Omega} \right) d\Omega. \end{aligned} \quad (6.29)$$

$\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}}$ ifadesi $\chi_{i_{\mathfrak{R}}}$ 'in rastgele değişkenine bağlıdır. Bu nedenle, $\mathcal{P}_c$ ifadesini elde etmek için $\mathcal{P}_c^{\hat{i}_{\mathfrak{R}}}$ teriminin $\chi_{i_{\mathfrak{R}}}$ 'in PDF ifadesi üzerinden integrali alınmalıdır. O halde,

$\mathcal{D}_{\nu} \triangleq |x_{\mathfrak{R}} h_{\nu, \ell_{\mathfrak{R}}} E_c|$ bir rasgele değişken kabul edilsin. $\mathcal{D}_{\nu}$ rastgele değişkeninin ortalaması sıfır ve varyansı ise $\sigma_{\mathcal{D}_{\nu}}^2 = (x_{\mathfrak{R}} E_c)^2 \sigma_h^2$ şeklindedir. $\chi_{i_{\mathfrak{R}}} = \sqrt{\sum_{\nu=1}^{N_R} \mathcal{D}_{\nu}^2}$

olduğundan, $\chi_{i_{\mathfrak{R}}}$ 'in PDF ifadesi $f(\chi_{i_{\mathfrak{R}}}) = \frac{\chi_{i_{\mathfrak{R}}}^{N_R-1}}{2^{\frac{N_R-2}{2}} \sigma_{\mathcal{D}_{\nu}}^{N_R} \Gamma\left(\frac{N_R}{2}\right)} e^{-\chi_{i_{\mathfrak{R}}}^2 / 2\sigma_{\mathcal{D}_{\nu}}^2}$, $\chi_{i_{\mathfrak{R}}} \geq 0$ ile

genelleştirilmiş bir Rayleigh dağılımına sahiptir.

6.2.4. Aktif Anten İndisi, Aktif MAP İndisi ve Modüle Edilmiş Sembolün Bit Hata Olasılığı

Bu bölümde, veri iletiminde kullanılan aktif anten indisi, aktif MAP indisi ve modüle edilmiş sembolün yanlış kestirilmesi durumu için BEP analizi yapılacaktır. Bu analiz yapılırken (6.19)'da verilen aktif anten indisi, aktif MAP indisi ve modüle edilmiş sembolün BER ifadesini temsil eden $\mathcal{P}_2$ ifadesi kullanılacaktır. Hatalı kod indislerinin kestirim olasılığı ($\mathcal{P}_c$) zaten (6.28)'de türetilmiştir. Bu nedenle, $\mathcal{P}_2$ ifadesini elde etmek için sadece $\mathcal{P}_{\text{SMBM}}$ için ortalama BEP (average BEP, ABEP) hesaplanmalıdır. CIM-SMBM sistemi için ortalama çiftsel hata olasılığı (average pairwise error probability, APEP) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [124]:

$$\mathcal{P}_e(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp \left(\frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta + \frac{\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2}{4N_0}} \right)^{N_R} d\theta, \quad (6.30)$$

burada $\mathcal{P}_e(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}})$, $\mathbf{x}$ iletildiğinde $\hat{\mathbf{x}}$ ifadesine yanlış karar vermenin çiftsel hata olasılığını gösterir. $\mathbf{x}$ ifadesi, $\mathbf{x} = [0 \dots 0 \ x \ 0 \dots 0]^T$ olarak tanımlanır. Yani $\mathbf{x}$, M -QAM sembolü x 'in ℓ 'inci konuma ve k 'inci duruma yerleştirilmesiyle elde edilir. Ayrıca $\hat{\mathbf{x}}$, $\mathbf{x}$ 'in tahminini temsil eder.

Sonuç olarak, $\mathcal{P}_{\text{SMBM}}$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathcal{P}_{\text{SMBM}} \leq \frac{1}{2^n} \sum_{g=1}^{2^n} \sum_{z=1}^{2^n} \frac{\mathcal{P}_e(\mathbf{x}_g \rightarrow \mathbf{x}_z) e(g, z)}{n}, \quad (6.31)$$

burada $n = n_s + n_{sm} + n_{rf}$ terimi aktif anten indisi, aktif MAP indisi ve modüle edilmiş sembolde taşınan bitlerin sayısıdır. Ayrıca, ilgili çiftsel hata ile ortaya çıkan hatalı bitlerin sayısı $e(g, z)$ terimi ile ifade edilmektedir.

6.3. Enerji Verimliliği, Çıktı ve Veri Hızı Analizleri

Bu bölümde önerilen CIM-SMBM sistemi için sırasıyla enerji verimliliği, çıktı ve veri hızı analizleri yapılacaktır. İlk olarak, önerilen sistemin enerji tasarrufu yüzdesi analiz edilerek diğer sistemlerle karşılaştırılacaktır. İkinci olarak ise çıktı analizi ve önerilen sistemin karşılaştırılan diğer sistemlere göre ne kadarlık bir veri hızı avantajı sağladığı analiz edilecektir.

6.3.2. CIM-SMBM Sisteminin Enerji Verimliliği Analizi

Önerilen CIM-SMBM sisteminde n_s , n_C , n_{sm} ve n_{rf} bitleri sırasıyla modüle edilmiş sembol, yayıcı kodu indisleri, aktif verici anten indisi ve aktif MAP indisi üzerinden iletilir. Önerilen sistemde yayıcı kodlar, aktif verici anten ve MAP indislerinde bilgi iletildiğinde enerji tüketimi minimum olur. Çünkü indislerde bilgi taşındığında enerji tüketimi ya hiç olmaz ya da oldukça az olur. CIM-SMBM sisteminin diğer kıyaslanan sistemlere göre η başına sağladığı enerji tasarrufu ($\mathcal{E}_{sav}$) yüzdesi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\mathcal{E}_{sav} = \left(1 - \frac{n_b}{\eta}\right) E_b \%, \quad (6.32)$$

burada n_b , CIM-SMBM sistemiyle kıyaslanan diğer sistemlerin spektral verimliliğini temsil eder ve E_b ise bit enerjisidir. Tablo 6.2’de önerilen CIM-SMBM sisteminin, DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM ve CIM-QSM sistemlerine göre farklı M , N_T , n_{rf} ve n_C parametreleri için sağladığı enerji tasarruf değerleri yüzde olarak verilmiştir. Tablo 6.2’deki sonuçlar dikkate alındığında CIM-SMBM sisteminin önemli ölçüde enerji tasarrufu sağladığı görülmektedir. Tablo 6.2’de yer alan ilk durum $\eta = 10$ için, DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM ve CIM-QSM sistemlerine kıyasla CIM-SMBM sisteminin enerji tasarrufu yüzdesi $\mathcal{E}_{sav}$ değerleri sırasıyla %80, %70, %60, %50, %40, %30 ve %20 olduğu görülmektedir.

Tablo 6.2 CIM-SMBM Sisteminin Diğer Sistemlere Göre Yüzde Cinsinden Enerji Tasarruf Kıyaslaması ($\mathcal{E}_{sav}$ %).

M	N_T	n_{rf}	N_C	DS-SS	SM	QSM	MBM	SMBM	GCIM-SM	CIM-QSM
4	2	3	8	80	70	60	50	40	30	20
8	4	7	16	83.3	72.2	61.1	44.4	33.3	38.9	27.8
16	8	10	32	84	72	60	44	32	40	28

6.3.3. CIM-SMBM Sisteminin Çıktı ve Veri Hızı Analizleri

Çıktı, bir kablosuz iletişim sisteminde iletilen bitlerden doğru olarak elde edilebilen bit sayısı olarak tanımlanır. Bu nedenle sadece iletilen bilgi miktarı değil aynı zamanda ne kadarının alıcıda doğru olarak elde edilebildiği de büyük önem taşımaktadır. CIM-SMBM sisteminin çıktı ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir [125]:

$$\mathcal{T} = \frac{(1 - \mathcal{P}_{\text{CIM-SMBM}})}{T_s} \eta, \quad (6.33)$$

burada $(1 - \mathcal{P}_{\text{CIM-SMBM}})$, T_s sembol süresi boyunca alınan bitlere doğru karar verme olasılığını ifade etmektedir. Tablo 6.3'te, DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM, CIM-QSM ve CIM-SMBM sistemlerinin farklı M , N_T , n_{rf} ve N_C için veri hızı karşılaştırmaları [bpcu] cinsinden verilmiştir. Tablo 6.3'e bakıldığında, CIM-SMBM sisteminin bir sembol periyodu boyunca gönderilen bit miktarı diğer sistemlere göre oldukça fazla olduğundan CIM-SMBM sisteminin verim açısından çok avantajlı olduğu kolaylıkla görülebilir. Önerilen CIM-SMBM sistemi, kıyaslanan DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM ve CIM-QSM sistemlerinden bir sembol periyodu boyunca $M = 16$, $N_T = 8$, $n_{rf} = 10$ ve $N_C = 32$ değerleri için sırasıyla 21 bit, 18 bit, 15 bit, 11 bit, 8 bit, 10 bit ve 7 bit daha fazla bilgi biti iletimi gerçekleştirir.

Tablo 6.3 DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM, CIM-QSM ve CIM-SMBM Sistemlerinin Veri Hızı Karşılaştırılması [bpcu].

M	N_T	n_{rf}	N_C	DS-SS	SM	QSM	MBM	SMBM	GCIM-SM	CIM-QSM	CIM-SMBM
4	8	4	8	2	5	8	6	9	9	12	13
8	4	6	16	3	5	7	9	11	11	13	17
16	8	10	32	4	7	10	14	17	15	18	25

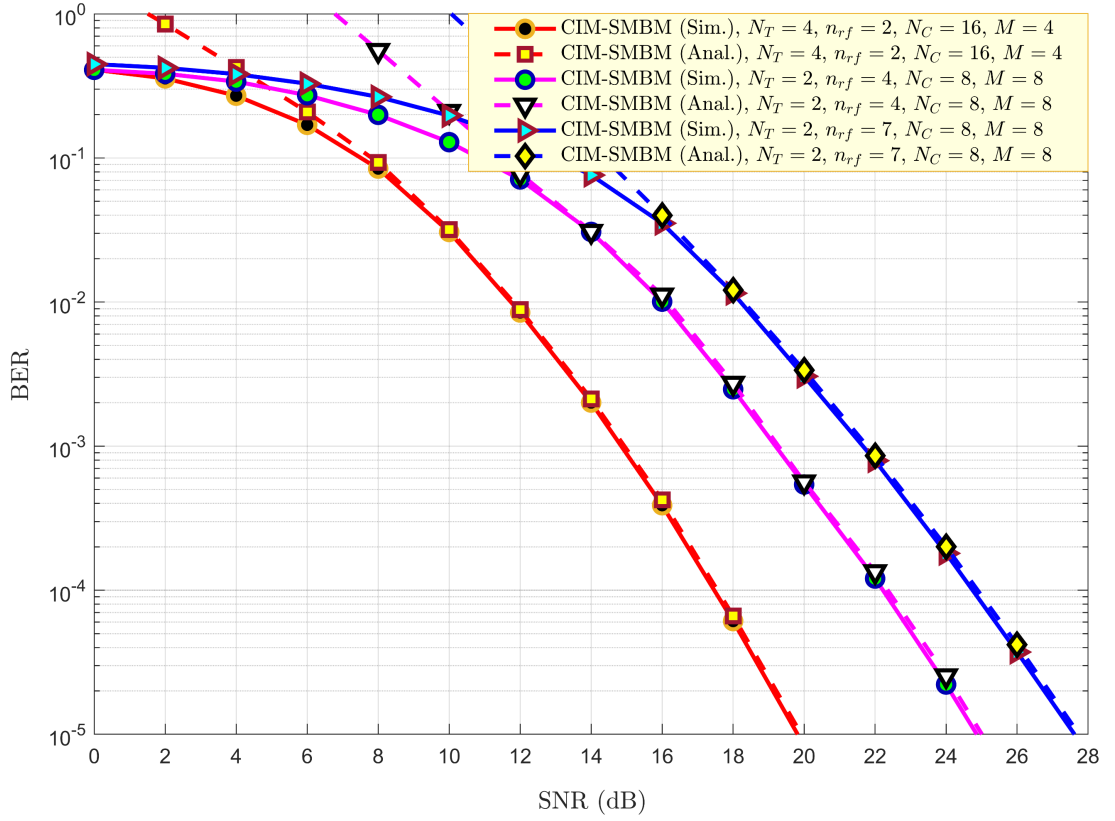
6.4. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, önerilen CIM-SMBM sisteminin simülasyon sonuçları ve bazı koşullar altında CIM-SMBM sisteminin diğer sistemlerle olan karşılaştırma sonuçları sunulmaktadır. Bu simülasyonlarda, DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM, CIM-QSM ve CIM-SMBM sistemlerinin Rayleigh sönümlemeli kanallar üzerinde performans analizleri elde edilmiştir. Alıcıdaki ilgili dedektör, iletilen sembolü ve indisleri algılamak için kullanılır. Bu bölümde analitik sonuçlara ek olarak sunulan simülasyon sonuçları, MATLAB simülasyon ortamında Monte Carlo yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sistem parametreleri ve değerleri listesi Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4 Sistem Parametreleri ve Değerleri Listesi.

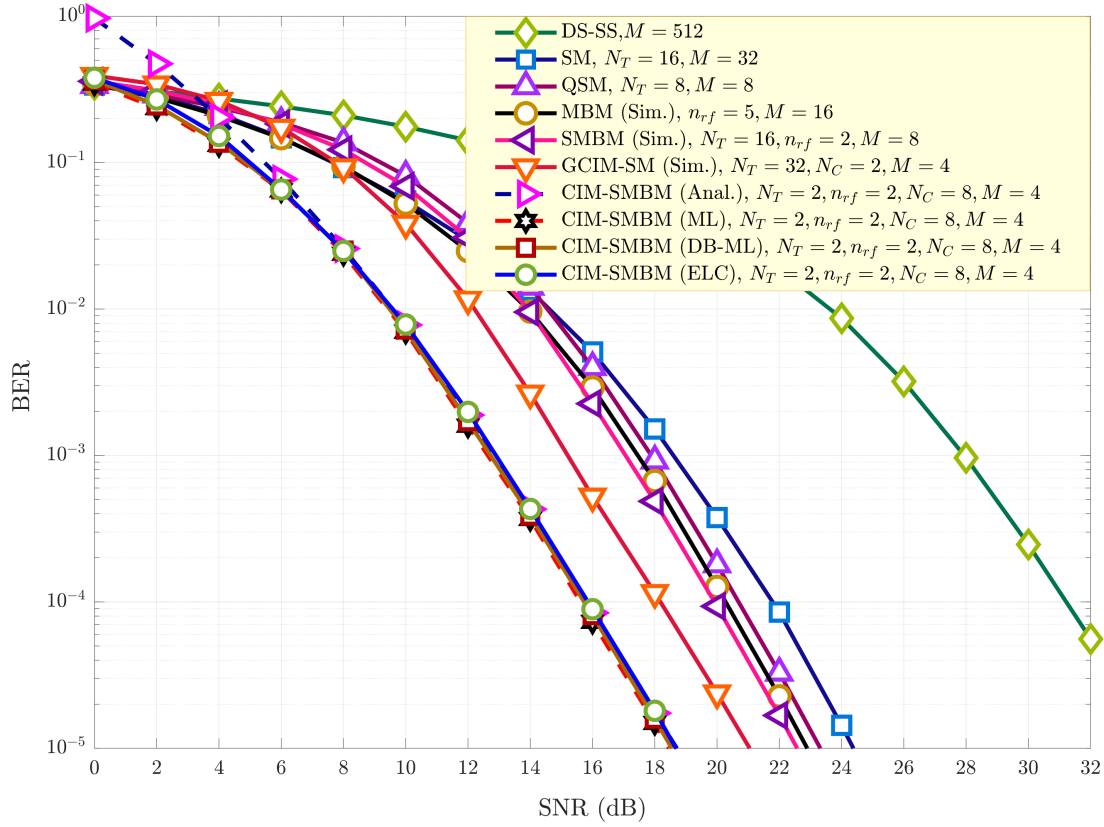
Parametreler	Değerleri
M	4, 8, 16, 32, 64, 128, 512, 4096
N_T	2, 4, 8, 16, 32
n_{rf}	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10
N_C	4, 8, 16, 32
P	16, 32, 64, 128
N_R	2, 4

Ayrıca, Walsh Hadamard kodları DS-SS sistemlerinde sağladığı avantajlar nedeniyle yaygın olarak tercih edilen ortogonal kodlar olduğundan, yayıcı kod olarak Walsh Hadamard kodları seçilmiştir. Ayrıca çalışmada yer alan simülasyonlarda kullanılan SNR parametresi şu şekilde ifade edilmektedir: $SNR(dB) = 10\log_{10}(E_s / N_0)$ ve buradaki E_s ifadesi $E_s = \sum_{p=1}^P (c_p / \sqrt{P})^2$ şeklinde ifade edilmektedir.



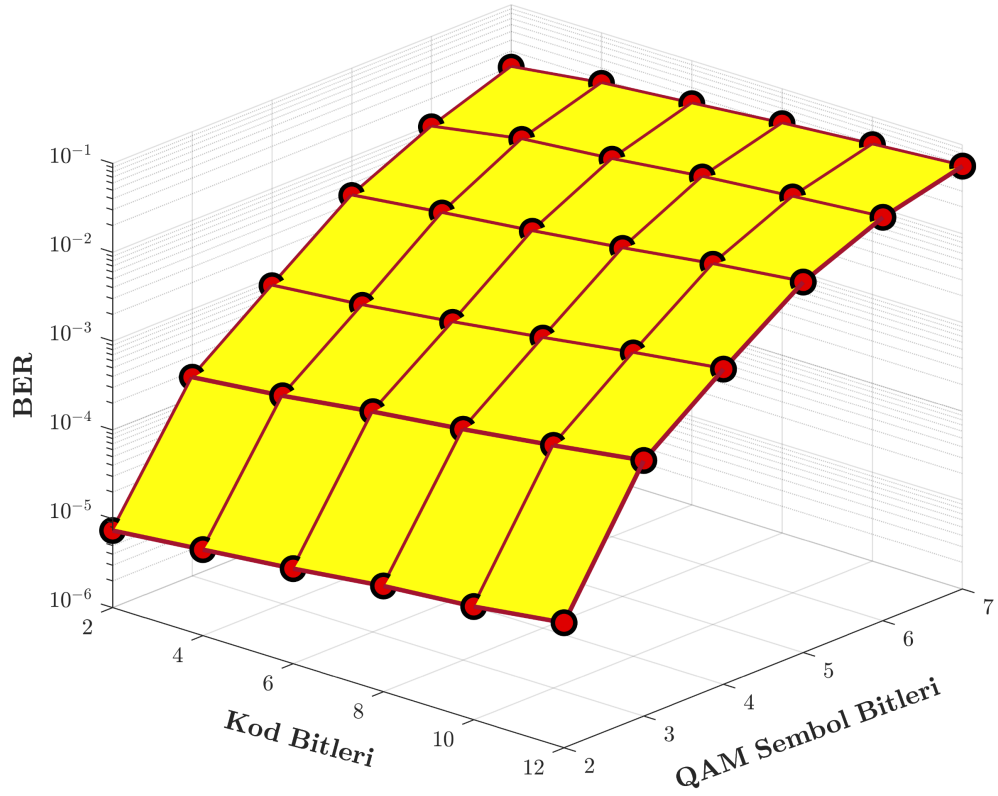
Şekil 6.3 CIM-SMBM Sisteminin $P = 32$ ve $N_R = 4$ iken M , N_T , n_{rf} ve N_C Değişen Değerleri için Performans Eğrileri.

CIM-SMBM sisteminin BER performans eğrileri, $P = 32$ ve $N_R = 4$ iken M , N_T , n_{rf} ve N_C değerlerinin değişimlerine bağlı olarak Şekil 6.3'te sunulmaktadır. Analitik ve simülasyon BER performans eğrilerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 6.3'te n_{rf} değeri arttıkça sistem performansının düştüğü, ancak önerilen sistemin veri iletim hızının ciddi oranda arttığı görülmektedir. Buradan anlaşılabileceği üzere n_{rf} değeri ile sistem performansı arasında bir ödünleşim vardır. Bu nedenle eldeki kaynaklar doğru değerlendirilerek n_{rf} sayısı uygun miktarda seçilmelidir. Ayrıca, $n_{rf} = 4$ seçilen eğri, $n_{rf} = 7$ seçilen eğriye göre 2.64 dB daha fazla SNR kazancı sağlamaktadır.



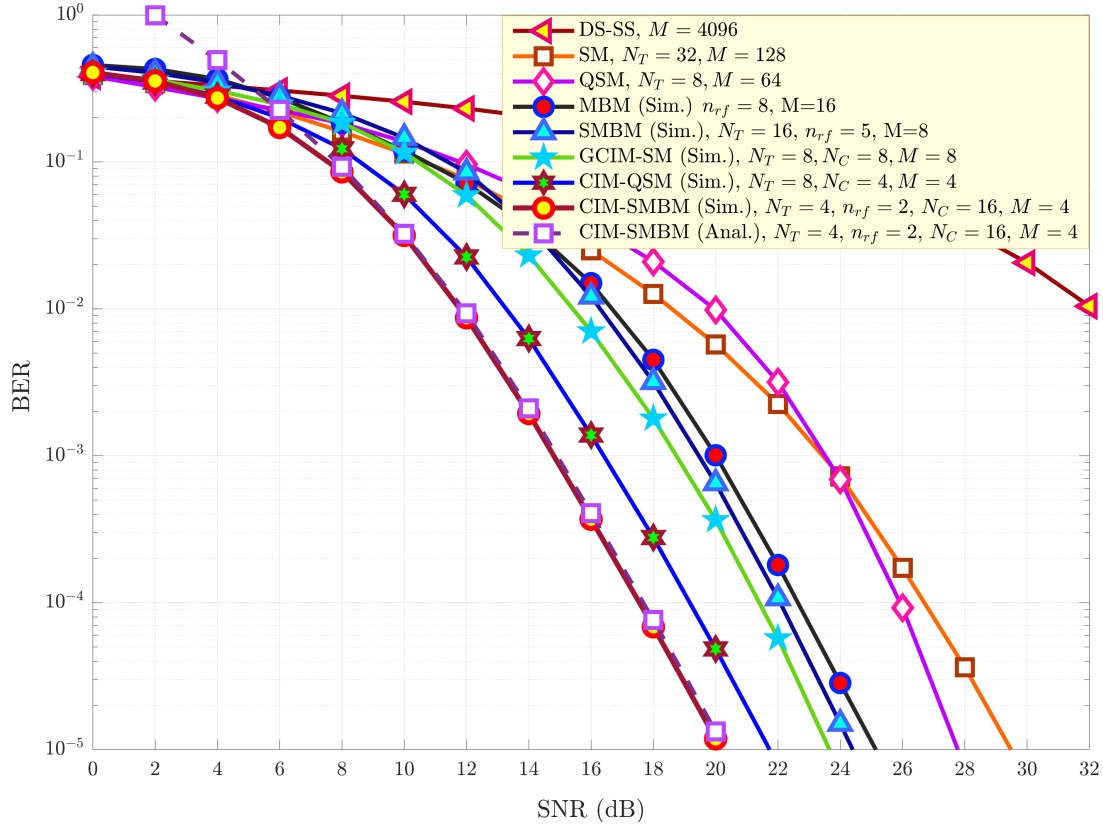
Şekil 6.4 DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM ve CIM-SMBM (üç farklı dedektör için) Sistemlerinin $P = 32$, $N_R = 4$ ve $\eta = 9$ için Performans Kıyaslaması.

Şekil 6.4'te önerilen CIM-SMBM sisteminin BER performans eğrileri ve DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM ve CIM-QSM sistemlerinin simülasyon BER performans eğrileri $N_R = 4$ ve $\eta = 9$ [bpcu] olduğu durum için sunulmaktadır. Önerilen CIM-SMBM sisteminin diğer sistemlere göre aynı spektral verimde SNR kazancı incelenmiştir. Şekil 6.4'ten kolayca görülebileceği gibi indislerde taşınan bit miktarının daha yüksek olduğu sistemlerde hata performansının daha iyi olduğu görülmektedir. Dolayısıyla Şekil 6.4'ten de anlaşılabileceği gibi, CIM-SMBM sistemi diğer tüm kıyaslanan sistemlerden daha iyi bir BER performansına sahiptir. Ayrıca önerilen CIM-SMBM sistemi, sırasıyla GCIM-SM, SMBM, MBM, QSM ve SM sistemlerine göre 2.50, 4.03, 4.35, 4.77 ve 5.83 dB SNR kazançlarına sahiptir.



Şekil 6.5 CIM-SMBM Sisteminin $P = 32$, $N_T = 4$, $n_{rf} = 2$ ve $N_R = 4$ için Performans Eğrileri.

Şekil 6.5'te, yayıcı kod indisinde taşınan bitlerin ($n_C = 2, 4, 6, 8$) ve M -QAM sembollerinde taşınan bitlerin ($n_s = 2, 3, 4, 5$) sayısına bağlı olarak değişen üç boyutlu bir BER performans eğrisi verilmiştir. Ayrıca bu simülasyonda, $N_T = 4$, $n_{rf} = 2$, $N_R = 4$, $P = 32$ ve $SNR = 20$ dB olarak seçilmiştir. Şekil 6.5'te, n_s ve n_C değerlerinin performansa etkisini gözlemleyebilmek için N_T , n_{rf} , N_R , P ve SNR değerleri sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre M -QAM sembolünde ve yayıcı kod indislerinde taşınan bitlerinin sayısı arttırıldığında önerilen sistemin BER performansının düştüğü; ancak önerilen sistemin veri iletim hızının önemli ölçüde arttığı görülmektedir.

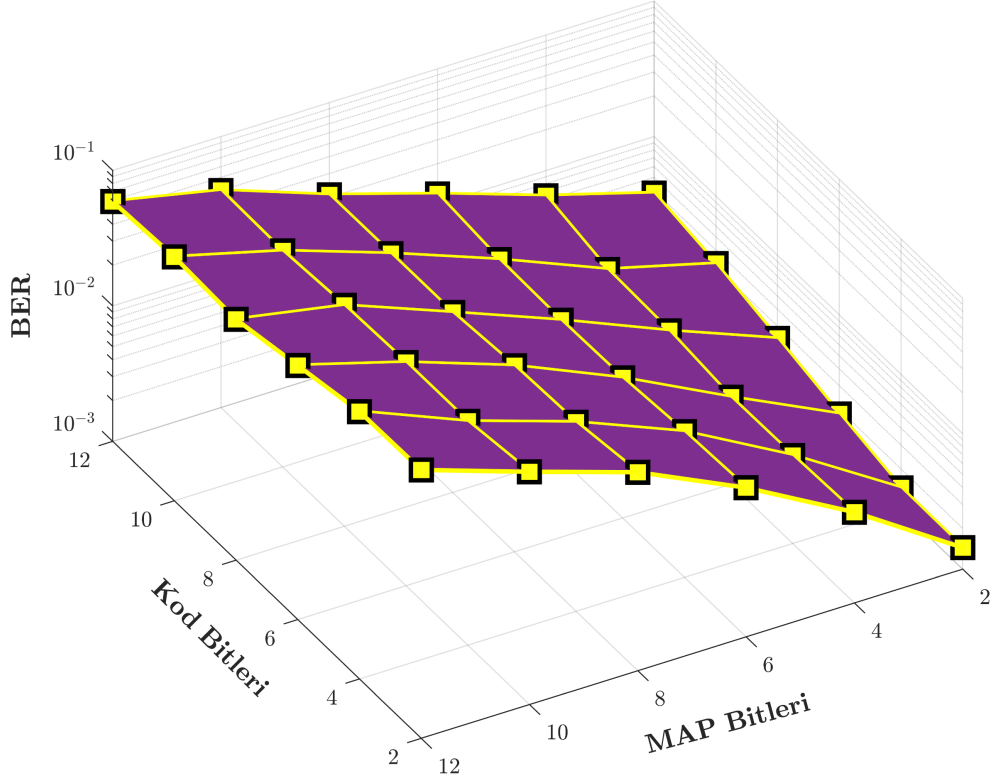


Şekil 6.6 DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM, CIM-QSM ve CIM-SMBM

Sistemlerinin $P = 32$, $N_R = 4$ ve $\eta = 12$ için Performans Kıyaslaması.

Önerilen CIM-SMBM sisteminin BER performans eğrilerini ve DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM ve CIM-QSM sistemleriyle olan karşılaştırmalı simülasyon BER performans eğrileri Şekil 6.6'da sunulmuştur. Bu simülasyonda karşılaştırmalar $N_R = 4$ ve $\eta = 12$ [bpcu] parametreleri için gerçekleştirilmiştir. CIM-SMBM sisteminin aynı spektral verimlilik $\eta = 12$ [bpcu] için diğer sistemlere göre ne kadar daha iyi BER performansı sağladığı sorgulanmıştır. Önerilen CIM-SMBM sisteminin, diğer kıyaslanan sistemlere göre daha iyi bir sistem performansına sahip olduğu açıkça görülmektedir. CIM-SMBM sistemi, CIM-QSM, GCIM-SM, SMBM, MBM, QSM ve SM sistemlerine göre sırasıyla 1.53, 3.46, 4.21, 4.95, 7.59 ve 9.29 dB SNR kazançlarına sahiptir. Şekil 6.6'dakine benzer grafik Şekil 6.4'te de verilmiştir. Ancak Şekil 6.5'te spektral verimlilik $\eta = 12$ olarak seçilmiştir. Şekil 6.4 ve Şekil

6.6'daki sonuçlar karşılaştırıldığında Şekil 6.4'te yer alan eğrilerin daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle, spektral verimlilik ve hata performansı arasında bir ödünleşim dolayısıyla bir ters orantı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.7 CIM-SMBM Sisteminin $P = 128$, $M = 16$, $N_T = 4$ ve $N_R = 4$ için Performans Eğrileri.

Şekil 6.7'de, Şekil 6.5'te yer alan grafiğe benzer şekilde, yayıcı kod indislerinde taşınan bitlerin ($n_C = 4, 6, 8, 10$) ve aktif MAP indislerinde taşınan bitlerin ($n_{rf} = 2, 4, 6, 8$) sayısına göre değişen üç boyutlu bir BER performans grafiği sunulmaktadır. $M = 16$, $N_T = 4$, $N_R = 4$, $P = 128$ ve $SNR = 15$ dB değerleri sabit olarak seçilmiştir. Şekil 6.7'de M , N_T , N_R , P ve SNR değerleri sabit tutularak n_C ve n_{rf} değerlerindeki değişimin hata performansı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Şekil 6.5'e benzer şekilde, Şekil 6.7'den de görülebileceği gibi aktif

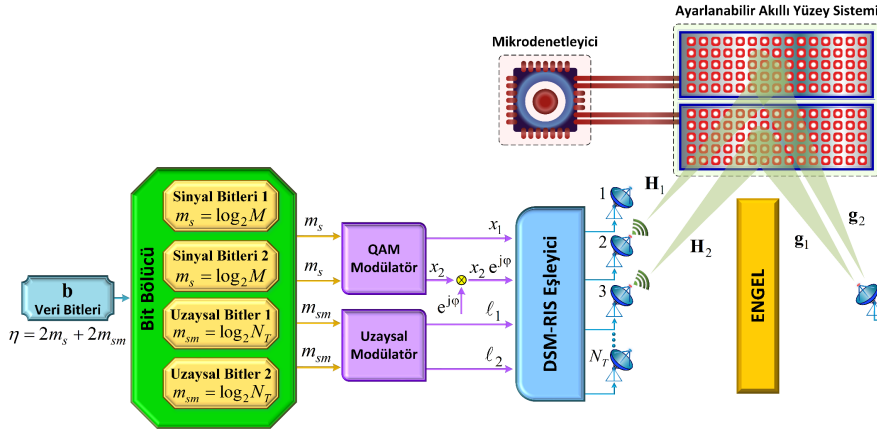
MAP ve yayıcı kod indislerinde taşınan bitlerin sayısı arttığında önerilen sistemin BER performansının düştüğünü, ancak önerilen sistemin veri iletim hızının ciddi olarak arttığı gözlemlenmektedir.

7. MISO SİSTEMLER İÇİN AYARLANABİLİR AKILLI YÜZEY İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇİFT UZAYSAL MODÜLASYON SİSTEMİ

Bu bölümde, geleneksel SM yöntemine göre vericide bir yerine iki anten aktif ederek ve bu aktif edilen antenler üzerinden farklı semboller göndererek iki kat yüksek veri hızı sağlayan çift SM (double SM, DSM) tekniği ve sönümlemeli kanalın bozucu etkilerini azaltarak sinyal kalitesini büyük oranda artıran RIS teknolojisinin birleştirildiği kısaca DSM-RIS olarak adlandırılan yeni bir haberleşme sistemi önerilmiştir. Önerilen DSM-RIS sisteminin performans analizleri Rayleigh sönümlemeli kanallar üzerinde M -QAM modülasyonu için gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca DSM-RIS sistemi, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS gibi önemli RIS tabanlı IM sistemleriyle ile hem hata başarımı hem de veri hızı yönünden karşılaştırılmıştır.

7.1. DSM-RIS Sistem Modeli

DSM-RIS sisteminin genel yapısını ifade eden sistem modeli Şekil 7.1’de sunulmuştur. Şekil 7.1’den görülebileceği gibi, önerilen sistemin verici bölümünde N_T adet verici anten bulunurken alıcı bölümünde ise bir adet alıcı anten bulunmaktadır. Buna ek olarak sistem modelinde, verici ve alıcı arasındaki bağlantıyı sağlayan toplamda N adet yansıtıcı yüzeye sahip RIS sistemi yer almaktadır. Şekil 7.1’de görüldüğü üzere N adet yansıtıcı yüzeylerin $N/2$ tanesini birinci RIS elemanı kalan $N/2$ tanesini ise ikinci RIS elemanı kullanmaktadır. Bir mikrodenetleyici üzerinden kontrol edilebilen bu RIS elemanları gelen sinyalin SNR değerini maksimum yapan faz döndürmesini yaparak sinyalin alıcıya iletimini sağlamaktadır.



Şekil 7.1 DSM-RIS Sistem Modeli.

DSM-RIS sisteminde veri bitleri aktif verici anten indisleri ve M -QAM simge uzayından seçilen simgeler üzerinden iletilmektedir. DSM-RIS sisteminde, geleneksel SM sisteminin aksine bir yerine iki adet verici anten aktif edilmektedir. Bu iki aktif verici anten üzerinden bilgi bitlerine göre M -QAM simge uzayından seçilen iki simge yollanmaktadır. Bu sayede, SM sistemine göre DSM sisteminin sağladığı veri hızı iki katına çıkmaktadır. Ancak DSM tekniğinde, simgeler eş zamanlı olarak iletildiği için simgeler arası girişim meydana gelebilmektedir. Bu bozucu etkiyi ortadan kaldırmak için iletilen iki simgeden birinin fazının döndürülmesi gereklidir. Buradan yola çıkılarak, DSM sisteminde iletilen simgelerden ikincisinin fazı φ_{opt} değeri kadar kaydırılmaktadır. Optimum açı değerleri modülasyon seviyesine göre belirlenmektedir. Modülasyon seviyesi $M = 2, 4, 8$ ve 16 için ikinci sembolün fazı sırasıyla $\varphi_{opt} = 90^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 70° kadar döndürülmelidir [126].

Tablo 7.1 DSM-RIS, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS Sistemlerinin Veri Hızlarının Karşılaştırılması [bits/s/Hz].

M	N_T	n_{rf}	SM-RIS	MBM-RIS	QSM-RIS	DSM-RIS
8	4	3	5	6	7	10
16	8	7	7	11	10	14
32	16	12	9	17	13	18

Önerilen sistemde vericide aktif olan iki antenden iletilecek olan iki iletim vektörü $\mathbf{s}_1 \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ ve $\mathbf{s}_2 \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\mathbf{s}_1 = [0 \cdots 0 \underbrace{x_1}_{\ell_1 \text{inci}} 0 \cdots 0]^T, \quad (7.1)$$

$$\mathbf{s}_2 = [0 \cdots 0 \underbrace{x_2 e^{j\varphi}}_{\ell_2 \text{inci}} 0 \cdots 0]^T, \quad (7.2)$$

Burada ℓ_1 ve ℓ_2 değerleri, $\ell_1, \ell_2 \in \{1, 2, \dots, N_T\}$ şeklinde değer almakta olup x_1 ve $x_2 e^{j\varphi}$ simgelerinin iletileceği aktif antenlerin indislerini temsil etmektedir.

DSM-RIS, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerinin [bits/s/Hz] cinsinden veri hızı karşılaştırılması Tablo 7.1’de verilmiştir. Tüm durumlar için önerilen DSM-RIS sisteminin MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerine göre daha yüksek veri hızı sağladığı görülmektedir.

Şekil 7.1’de yer alan DSM-RIS sisteminin verici bölümüne bakıldığında, gelen veri bitlerinden $\eta = 2\log_2(MN_T)$ uzunluklu bir $\mathbf{b}$ bit dizisi seçilmektedir. Sonrasında, $\mathbf{b}$ vektörü, bit bölücü tarafından iki adet $1 \times m_s$ boyutlu ve iki adet $1 \times m_{sm}$ boyutlu dört alt vektöre bölünmektedir. İki adet $1 \times m_s$ boyutlu bit vektörleri, x_1 ve x_2 M -QAM simgelerine eşlenirken, iki adet $1 \times m_{sm}$ boyutlu bit vektörleri ise aktif edilen ℓ_1 ve ℓ_2 indisli verici antenlerine eşlenir.

Örnek olarak, önerilen sistemde $M = 4$ ve $N_T = 8$ değerleri için $\mathbf{b} = [0011100111]$ bit dizisinin iletileceği varsayalım. Burada, $2\log_2(M) = 4$ bit $([0010])$ bilgi bitlerine göre M -QAM simge uzayından seçilen simgeler üzerinden geriye kalan $2\log_2(N_T) = 6$ bit $([100111])$ ise yine bilgi bitlerine göre aktif edilecek olan anten indisleri üzerinden iletilmektedir. Sembolde taşınacak $([0010])$ bitlerinden $[00]$ bitleri birinci simge olan $x_1 = -1 + j$ simgesine eşlenirken, geri kalan $[11]$ bitleri ise ikinci simge olan $x_2 = 1 - j$ simgesine eşlenmektedir. Ancak burada $M = 4$ olduğundan, ikinci simgenin fazının 45° kaydırılması gerekmektedir. Bu durumda, x_2 değeri $x_2 = (-1 + j)e^{j45^\circ} = 1.41j$ olarak yeniden hesaplanır. Aynı mantıkla, aktif anten indislerinde taşınacak olan $([100111])$ bitlerinden $[100]$ bitleri beşinci anten indisine ($\ell_1 = 5$) ve geri kalan $[111]$ bitleri ise sekizinci anten indisine ($\ell_2 = 8$) eşlenmektedir. Nihayetinde, vericide aktif edilen beşinci ve sekizinci verici antenleri üzerinden $x_1 = -1 + j$ ve $x_2 = 1.41j$ simgeleri iletilmektedir. Bu örnek durum için iletim vektörleri $\mathbf{s}_1$ ve $\mathbf{s}_2$ sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{s}_1 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \underbrace{-1+j}_{\ell_1 = \text{beşinci aktif anten}} \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T, \quad (7.3)$$

$$\mathbf{s}_2 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \underbrace{1.41j}_{\ell_2 = \text{sekizinci aktif anten}}]^T. \quad (7.4)$$

Vericiden gelen ve iki adet RIS elemanının yansıtıcı yüzeylerine çarparak alıcıya gelen sönümlenmeli ve gürültü alınan sinyal ifadesi $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ aşağıdaki gibi verilir:

$$\mathbf{r} = \sqrt{E_x} \left[\sum_{n_1=1}^{N/2} h_{n_1, \ell_1} e^{j\phi_{n_1}} \mathbf{g}_{n_1} x_1 + \sum_{n_2=1}^{N/2} h_{n_2, \ell_2} e^{j\phi_{n_2}} \mathbf{g}_{n_2} \tilde{x}_2 \right] + \mathbf{w}, \quad (7.5)$$

Burada, E_x sinyal enerjisini, $\tilde{x}_2$ ise x_2 simgesinin optimum faz açısı φ kadar fazının kaydırılmış halini ($\tilde{x}_2 = x_2 e^{j\varphi}$) ifade etmektedir. $\mathbf{w} \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ ifadesi ise sıfır

ortalomalı ve N_0 varyanslı AWGN vektörünü temsil etmektedir. $h_{n_1, \ell_1} = \alpha_{n_1, \ell_1} e^{-j\theta_{n_1, \ell_1}}$ ve $g_{n_1} = \beta_{n_1} e^{-j\psi_{n_1}}$ ifadeleri sırasıyla birinci simgenin iletildiği verici ile RIS ve RIS ile alıcı arasındaki, $h_{n_2, \ell_2} = \alpha_{n_2, \ell_2} e^{-j\theta_{n_2, \ell_2}}$ ve $g_{n_2} = \beta_{n_2} e^{-j\psi_{n_2}}$ ise sırasıyla ikinci simgenin iletildiği verici ile RIS ve RIS ile alıcı arasındaki kanal katsayısıdır.

(7.5)'te yer alan denklem matris-vektör formatında aşağıdaki gibi yeniden ifade edilebilir:

$$r = \sqrt{E_x} \left[(\mathbf{H}_1 \mathbf{s}_1)^T \boldsymbol{\Phi}_1 \mathbf{g}_1 + (\mathbf{H}_2 \mathbf{s}_2)^T \boldsymbol{\Phi}_2 \mathbf{g}_2 \right] + w, \quad (7.6)$$

burada yer alan $\boldsymbol{\Phi}_1$ ve $\boldsymbol{\Phi}_2$ ifadeleri, $\boldsymbol{\Phi}_1 = \text{diag}\{e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_{N/2}}\}$ ve $\boldsymbol{\Phi}_2 = \text{diag}\{e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_{N/2}}\}$ olarak ifade edilir. $\mathbf{g}_1$ ve $\mathbf{g}_2$ vektörleri ise $\mathbf{g}_1 = [g_1, g_2, \dots, g_{N/2}]^T$ ve $\mathbf{g}_2 = [g_1, g_2, \dots, g_{N/2}]^T$ şeklindedir. Ayrıca, $\mathbf{H}_1$ ve $\mathbf{H}_2$ kanal matrisleri de sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{1,1} & \cdots & \mathbf{h}_{1,N_T} \\ \mathbf{h}_{2,1} & \cdots & \mathbf{h}_{2,N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{N/2,1} & \cdots & \mathbf{h}_{N/2,N_T} \end{bmatrix}_{N/2 \times N_T}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{1,1} & \cdots & \mathbf{h}_{1,N_T} \\ \mathbf{h}_{2,1} & \cdots & \mathbf{h}_{2,N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_{N/2,1} & \cdots & \mathbf{h}_{N/2,N_T} \end{bmatrix}_{N/2 \times N_T}. \quad (7.7)$$

Önerilen sistemde, alıcıdaki anlık SNR ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\gamma = \frac{\sqrt{E_x} \left| \sum_{n_1=1}^{N/2} \alpha_{n_1, \ell_1} \beta_{n_1} e^{(j\phi_{n_1} - j\theta_{n_1, \ell_1} - j\psi_{n_1})} \right|^2}{N_0} + \frac{\sqrt{E_x} \left| \sum_{n_2=1}^{N/2} \alpha_{n_2, \ell_2} \beta_{n_2} e^{(j\phi_{n_2} - j\theta_{n_2, \ell_2} - j\psi_{n_2})} \right|^2}{N_0}. \quad (7.8)$$

(7.8)'den anlaşılacağı gibi alıcıdaki anlık SNR değerini maksimize etmek için kanal fazları sıfırlanmalıdır. Şekil 7.1'de yer alan RIS sistemi θ_{n_1, ℓ_1} , ψ_{n_1} , θ_{n_2, ℓ_2} ve ψ_{n_2} kanal fazlarının değerleri bilgisine sahiptir. RIS sistemi, ϕ_{n_1} ve ϕ_{n_2} ayarlanabilir faz değerlerini $\phi_{n_1} = \theta_{n_1, \ell_1} + \psi_{n_1}$ ve $\phi_{n_2} = \theta_{n_2, \ell_2} + \psi_{n_2}$ olarak belirleyip alıcıdaki SNR

değerini maksimum yaparak gelen sinyali alıcıya yönlendirir. Bu sayede alınan sinyalin kalitesi artırılmaktadır.

DSM-RIS sisteminde, ℓ_1 , ℓ_2 , x_1 ve x_2 ifadelerinin bütün olası kombinasyonları denenerek $\hat{x}_1$, $\hat{x}_2$ singeleri ve $\hat{\ell}_1$, $\hat{\ell}_2$ aktif verici anten indisleri ML dedektör ile kestirilir. Önerilen DSM-RIS sisteminin ML dedektörü aşağıda verilmiştir:

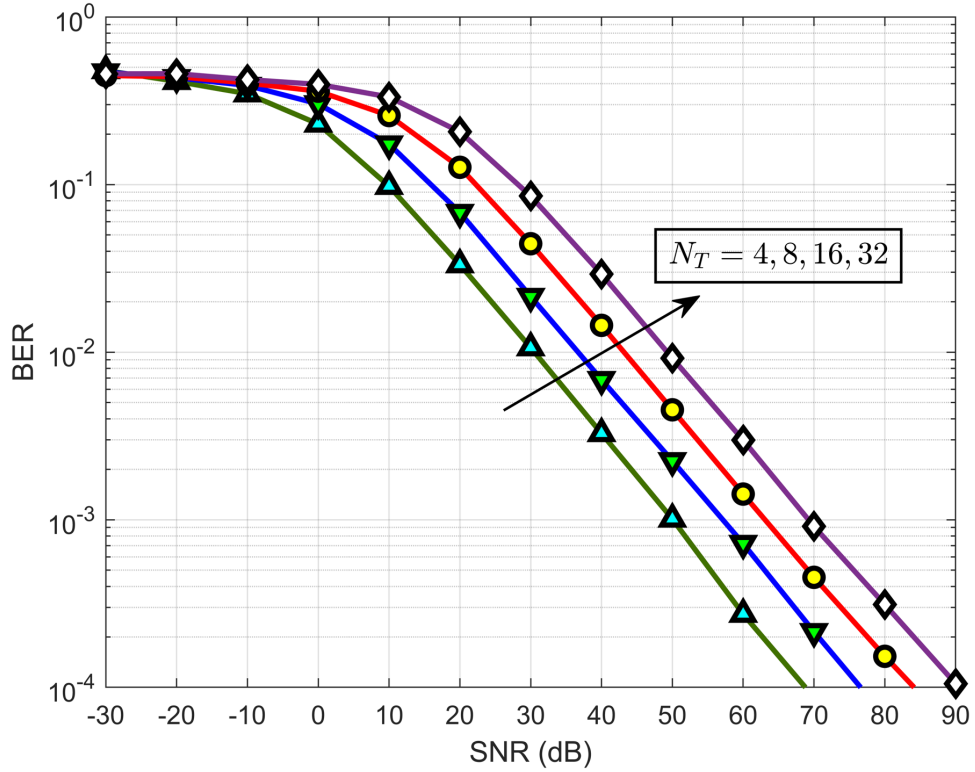
$$\left[\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{\ell}_1, \hat{\ell}_2 \right] = \arg \min_{x_1, x_2, \ell_1, \ell_2} \left| r - \left(\sum_{n_1=1}^{N/2} \alpha_{n_1, \ell_1} \beta_{n_1} x_1 + \sum_{n_2=1}^{N/2} \alpha_{n_2, \ell_2} \beta_{n_2} \tilde{x}_2 \right) \right|^2. \quad (7.9)$$

(7.9)'da görüldüğü gibi $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{\ell}_1$ ve $\hat{\ell}_2$ parametreleri ML dedektör tarafından kestirilmektedir. Bu parametreler kestirildikten sonra Şekil 7.1'de yer alan DSM-RIS sistem modelinde görüldüğü gibi DSM-RIS geri eşleyici ile kestirilen bit dizisi $\hat{\mathbf{b}}$ elde edilir.

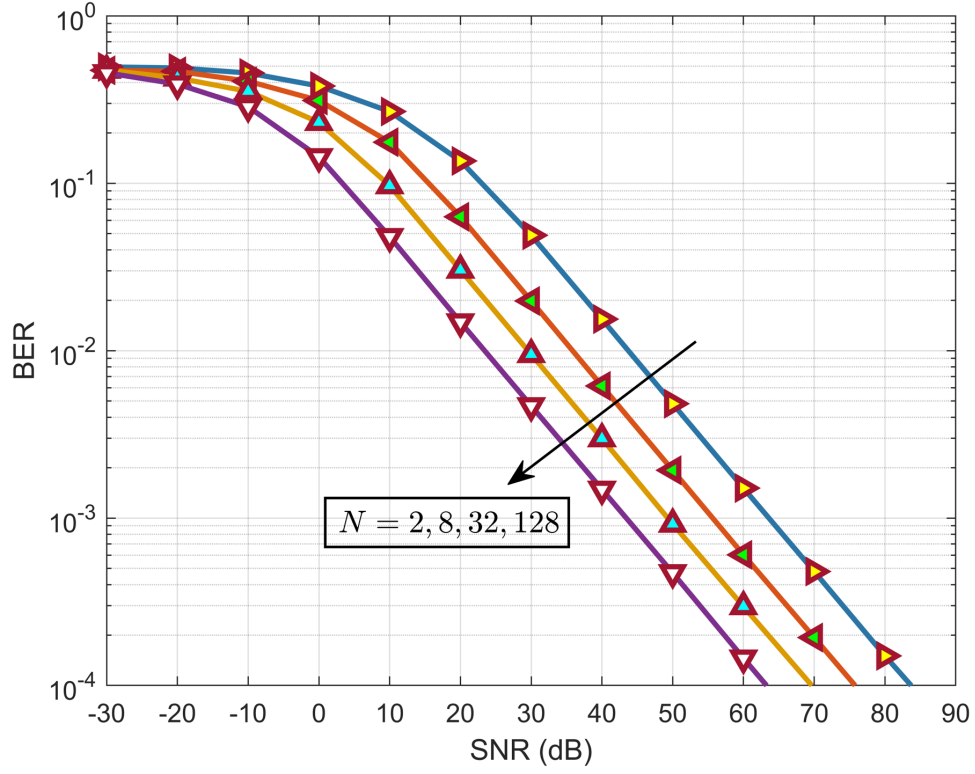
7.2. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, yüksek veri hızı ve yüksek hata başarımı sağlayan DSM-RIS sisteminin performans analizleri kablosuz Rayleigh sönümlmeli kanallar üzerinde M -QAM modülasyonu için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca DSM-RIS sisteminin performans sonuçları SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS sistemleriyle karşılaştırılmıştır.

Şekil 7.2’de verici anten sayısının değişimine bağlı olarak DSM-RIS sisteminin performansının nasıl etkilendiği gözlemlenmiştir. Her bir performans eğrisinde, verici anten sayısı $N_T = 4, 8, 16$ ve 32 gibi farklı değerler seçilirken $M = 4$ ve $N = 128$ değerleri ise sabit tutulmuştur. Şekil 7.2’den de görülebileceği gibi verici anten sayısını arttıkça sistem performansı kötüleşmektedir. Ancak verici anten sayısının artması sistemin spektral verimliliğinin artmasına neden olmaktadır. Buradan anlaşılabileceği gibi sistem performansı ve sistemin spektral verimliliği arasında bir ters orantı vardır.



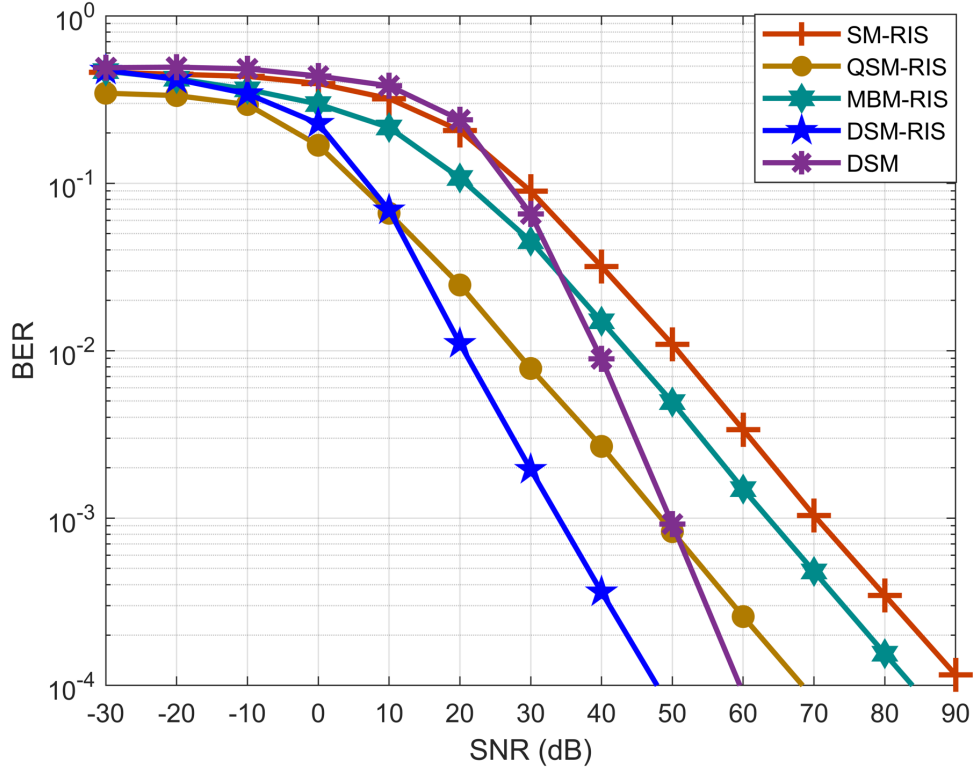
Şekil 7.2 DSM-RIS Sisteminin Verici Anten Sayısına Bağlı Performans Eğrisi.



Şekil 7.3 DSM-RIS Sisteminin Yansıtıcı Yüzey Sayısına Bağlı Performans Eğrisi.

Şekil 7.3'te ise yansıtıcı yüzey sayısına bağlı olarak DSM-RIS sisteminin performans eğrisi çizdirilmiştir. Burada, $M = 4$ ve $N_T = 2$ değerleri sabit tutulup yansıtıcı yüzey sayısının $N = 2, 8, 32$ ve 128 değerleri için performans analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.3'te görüldüğü gibi yansıtıcı yüzey sayısı arttıkça DSM-RIS sisteminin performansı iyileşmektedir. Bu nedenle, sadece yansıtıcı yüzey sayısı artırılarak başarımı artırmanın mümkün olduğu anlaşılmaktadır.

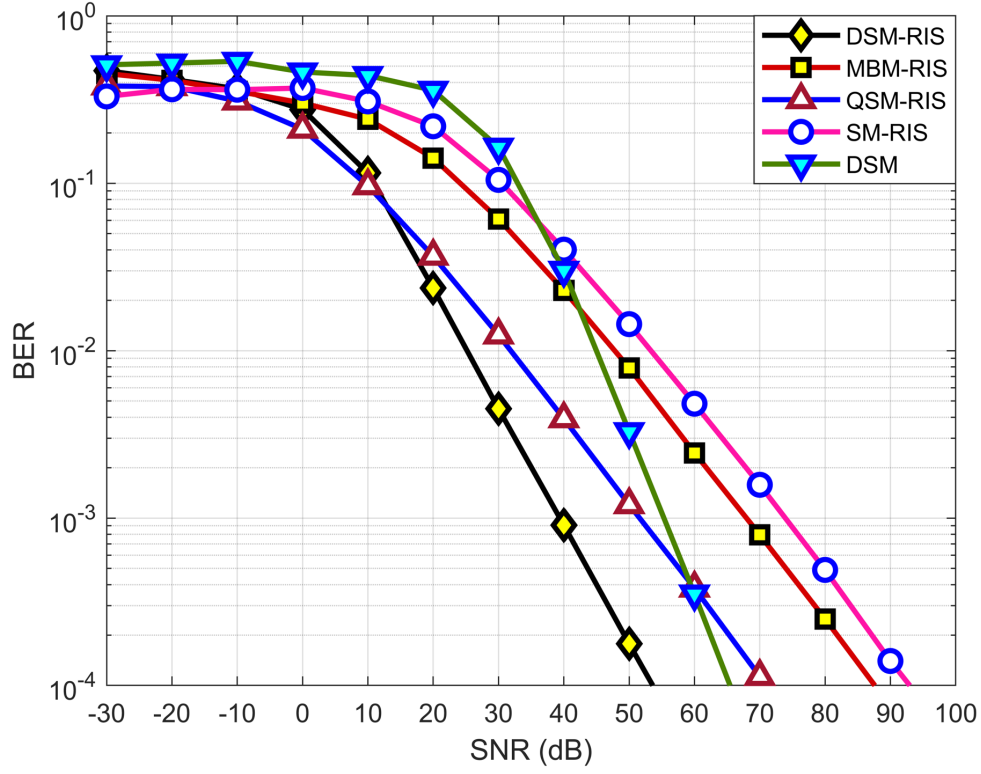
Tüm sistemler için spektral verimlilik $\eta = 8$ bit ve yansıtıcı yüzey sayısı $N = 128$ olarak seçilerek, DSM-RIS, DSM, SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS sistemlerinin performans kıyaslaması Şekil 7.4'te verilmiştir. Simülasyonda yer alan sistemler için kullanılan parametreler $(M = 8, N_T = 2)$, $(M = 4, n_{rf} = 6)$, $(M = 4, N_T = 8)$ ve $(M = 2, N_T = 128)$ şeklinde olup bu parametreler sırasıyla DSM-RIS/DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemleri için seçilmiştir.



Şekil 7.4 DSM-RIS Sisteminin DSM, SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS Sistemlerine göre $\eta = 8$ ve $N = 128$ Değerleri için Performans Kıyaslaması.

Şekil 7.4'te sunulan sonuçlara göre DSM-RIS sisteminin aynı spektral verimlilik için tüm sistemlerden daha iyi hata başarımı sağladığı görülmektedir. Ayrıca, 10^{-4} BER değerinde DSM-RIS sistemi sırasıyla SM-RIS, MBM-RIS, QSM-RIS ve DSM sistemlerine göre 43.55 dB, 36.06 dB, 20.55 dB 11.69 dB daha fazla SNR kazancı sağlamaktadır.

Şekil 7.5'te yine benzer şekilde DSM, DSM-RIS, SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS sistemlerinin performans kıyaslamaları verilmiştir. Fakat Şekil 7.4'ten farklı olarak burada ele alınan tüm sistemler için $\eta = 10$ bit ve yansıtıcı yüzey sayısı $N = 256$ olarak seçilmiştir. DSM-RIS/DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerinde sırasıyla $(M = 8, N_T = 4)$, $(M = 8, n_{rf} = 7)$, $(M = 4, N_T = 16)$ ve $(M = 4, N_T = 256)$ parametreleri kullanılmıştır.



Şekil 7.5 DSM-RIS Sisteminin DSM, SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS Sistemlerine göre $\eta = 10$ ve $N = 256$ Değerleri için Performans Kıyaslaması.

Şekil 7.5'ten anlaşılabileceği gibi yine önerilen DSM-RIS sistemleri diğer sistemlere göre daha yüksek hata başarımı sağlamaktadır. Son olarak, 10^{-4} BER değerinde DSM-RIS sistemi sırasıyla SM-RIS, MBM-RIS, QSM-RIS ve DSM sistemlerine göre 39.35 dB, 34 dB, 17.42 dB ve 11.84 dB SNR kazancına sahiptir.

Nihayetinde elde edilen sonuçlara göre, DSM-RIS sistemi kıyaslanan SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS sistemlerine göre hem daha yüksek hata başarımı hem de daha yüksek veri hızı sağlamaktadır.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, ilk olarak gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemleri için yüksek veri hızına, yüksek hata başarımına ve düşük enerji tüketimine sahip CIM-SMBM olarak adlandırılan yeni bir kablosuz haberleşme tekniği önerilmiştir. Önerilen sistemde, geleneksel M -QAM modülasyonlu sembole ek olarak aktif verici anten indisi, aktif MAP indisi ve yayıcı kodların indislerinde veri bitleri iletilir. Bu sayede, geleneksel sistemlere göre bir sembol periyodu boyunca iletilen bilgi miktarı ciddi oranda artırılmaktadır. Bu durum, CIM-SMBM sisteminin yüksek spektral verimlilik sağladığını göstermektedir. Çalışmada, CIM-SMBM sisteminin alıcı yapısı için üç farklı dedektör önerilmiştir. İlk olarak, önerilen CIM-SMBM sistemi için ML dedektör ve DB-ML dedektör önerilmiştir. DB-ML dedektörün, tüm olası kombinasyonları aynı anda ele alan ML dedektöre göre daha düşük karmaşıklık sağladığı görülmüştür. Sonrasında, DB-ML dedektörünün karmaşıklığını daha da azaltmak için ML dedektörüne yakın hata başarımına sahip olan ELC dedektör sunulmuştur. Ayrıca, CIM-SMBM sistemi için bu üç farklı dedektörün karmaşıklık analizlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. CIM-SMBM sistemi için elde edilen karmaşıklık analizi sonuçları SM, QSM, MBM, SMBM, GCIM-SM ve CIM-QSM gibi önde gelen IM sistemlerinin karmaşıklık analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

CIM-SMBM sisteminin performans analizi M -QAM modülasyonu için Rayleigh sönümlenmeli kanallar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, CIM-SMBM sisteminin enerji verimliliği, çıktı ve veri hızı analizleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarına göre önerilen CIM-SMBM sisteminin, DS-SS, SM, QSM, MBM, SMBM, CIM-QSM ve GCIM-SM sistemlerine göre daha iyi hata performansı, daha düşük enerji tüketimi ve daha yüksek veri hızı sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, CIM-SMBM sisteminin ABER analizleri kapsamlı bir şekilde ele alınıp ilgili denklemler türetilmiştir. Elde edilen ABER sonuçları, simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve sonuçların birbirine oldukça yakın çıktığı görülmüştür.

Bu tez kapsamında sunulan ikinci çalışmada ise emsal haberleşme sistemlerine göre daha yüksek spektral verimlilik ve daha iyi hata başarımı sağlayan DSM-RIS olarak adlandırılan yeni bir haberleşme sistemi sunulmuştur. DSM-RIS sisteminde veri

bitlerinin iletimi için verici anten indisleri ve M -QAM simge uzayından seçilen simgeler kullanılmaktadır. Ancak DSM-RIS sisteminde, geleneksel SM tekniğine göre aynı iletim süresi boyunca vericide bir yerine iki antenin aktif edilmesi ve bu aktif edilen her bir verici antenden farklı simgelerin yollanması veri hızını iki katına çıkarmaktadır. Aynı zamanda önerilen sistemin RIS teknolojisi ile desteklenmesiyle beraber sönümlemeli kanalın bozucu etkisiyle etkin bir şekilde mücadele edilerek sistem performansı da artırılmıştır.

DSM-RIS sisteminin performans analizleri kablosuz Rayleigh sönümlemeli kanallar üzerinde M -QAM modülasyonu için MATLAB simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Verici anten sayısı ve yansıtıcı yüzey sayısının DSM-RIS sisteminin performansına etkisi tartışılmıştır. DSM-RIS sisteminin SM-RIS, MBM-RIS ve QSM-RIS gibi popüler RIS tabanlı IM tekniklerine göre veri hızı analizleri ve hata başarımı sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen bütün sonuçlara göre DSM-RIS sisteminin karşılaştırılan diğer sistemlere göre daha yüksek veri hızı, daha yüksek spektral verimliliği ve daha iyi hata başarımı sağladığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, tez kapsamında elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, tezde ilk sunulan çalışma olan CIM-SMBM sisteminde iletilen veri bitlerinin çoğunun indislerde taşınıyor olması enerji tüketimini azaltmakta ve hata performansını iyileştirmektedir. Ayrıca tezde sunulan ikinci çalışma olan DSM-RIS sistemi, geleneksel SM tekniğine göre vericide bir yerine iki adet anten aktif ederek ve bu antenler üzerinden farklı simgeler ileterek veri hızını iki katına çıkarmakta ve RIS teknolojisi ile desteklenmesi sayesinde sistem performansını da iyileştirmektedir. Önerilen CIM-SMBM ve DSM-RIS sistemleri, birçok açıdan emsal kablosuz haberleşme sistemlerinden üstün olduğu için 6G gibi gelişmiş gelecek nesil kablosuz haberleşme ağlarına entegre edilmesi öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, “6G wireless communications: vision and potential techniques,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, Jul. 2019, doi: 10.1109/MNET.2019.1800418.
- [2] G. Lawton, “Is MIMO the future of wireless communications?,” *Computer (Long Beach Calif)*, vol. 37, no. 7, pp. 20–22, Feb. 2008, doi: 10.1109/MC.2004.57.
- [3] A. Burr, “MIMO wireless systems: Overcoming the problems of convenience,” *Proceedings - 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WCNM 2005*, vol. 1, pp. 155–160, 2005, doi: 10.1109/WCNM.2005.1544006.
- [4] F. Rusek *et al.*, “Scaling up MIMO : Opportunities and challenges with very large arrays,” *IEEE Signal Process Mag*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, 2013, doi: 10.1109/MSP.2011.2178495.
- [5] A. Salh, L. Audah, N. S. Mohd Shah, S. A. Hamzah, and H. S. Mir, “Antenna selection and transmission power for energy efficiency in downlink massive MIMO systems,” *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 27, no. 2, pp. 697–709, Jan. 2019, doi: 10.3906/elk-1711-356.
- [6] S. Sugiura, T. Ishihara, and M. Nakao, “State-of-the-art design of index modulation in the space, time, and frequency domains: Benefits and fundamental limitations,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 21774–21790, Oct. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2763978.
- [7] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanović, C. W. Ahn, and S. Yun, “Spatial modulation,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 57, no. 4, pp. 2228–2241, Jul. 2008, doi: 10.1109/TVT.2007.912136.
- [8] T. Datta and A. Chockalingam, “On generalized spatial modulation,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, pp. 2716–2721, 2013, doi: 10.1109/WCNC.2013.6554991.

- [9] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 8, pp. 545–547, 2008, doi: 10.1109/LCOMM.2008.080739.
- [10] M. Wen *et al.*, "A survey on spatial modulation in emerging wireless systems: Research progresses and applications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 9, pp. 1949–1972, Sep. 2019, doi: 10.1109/JSAC.2019.2929453.
- [11] M. di Renzo, H. Haas, and P. M. Grant, "Spatial modulation for multiple-antenna wireless systems: A survey," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 12, pp. 182–191, Dec. 2011, doi: 10.1109/MCOM.2011.6094024.
- [12] N. Agarwal, "Spatial modulation technique: Achievements and challenges," *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 810, pp. 441–448, 2018, doi: 10.1007/978-981-13-1513-8_46/COVER.
- [13] F. COGEN and E. AYDIN, "Transmit antenna selection for spatial modulation based on hexagonal quadrature amplitude modulation," *Journal of Innovative Science and Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 76–90, Dec. 2021, doi: 10.38088/JISE.829553.
- [14] R. Mesleh, S. S. Ikki, and H. M. Aggoune, "Quadrature spatial modulation," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 64, no. 6, pp. 2738–2742, Jun. 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2344036.
- [15] E. Basar, Ü. Aygölu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Space-time block coded spatial modulation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 3, pp. 823–832, Mar. 2011, doi: 10.1109/TCOMM.2011.121410.100149.
- [16] Z. Yigit and E. Basar, "Double spatial modulation: A high-rate index modulation scheme for MIMO systems," *Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems*, vol. 2016-October, pp. 347–351, Oct. 2016, doi: 10.1109/ISWCS.2016.7600927.

- [17] A. K. Khandani, "Media-based modulation: A new approach to wireless transmission," *IEEE International Symposium on Information Theory - Proceedings*, pp. 3050–3054, 2013, doi: 10.1109/ISIT.2013.6620786.
- [18] E. Basar, "Media-based modulation for future wireless systems: A tutorial," *IEEE Wirel Commun*, vol. 26, no. 5, pp. 160–166, Oct. 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800568.
- [19] Y. Naresh and A. Chockalingam, "On media-based modulation using RF mirrors," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 66, no. 6, pp. 4967–4983, Jun. 2017, doi: 10.1109/TVT.2016.2620989.
- [20] B. Shamasundar and A. Chockalingam, "Multiuser media-based modulation for massive MIMO systems," *IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC*, vol. 2017-July, pp. 1–5, Dec. 2017, doi: 10.1109/SPAWC.2017.8227731.
- [21] I. Yildirim, E. Basar, and I. Altunbas, "Quadrature channel modulation," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 790–793, Dec. 2017, doi: 10.1109/LWC.2017.2742508.
- [22] E. Aydin, "A new hexagonal quadrature amplitude modulation aided media-based modulation," *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, no. 17, p. e4994, Nov. 2021, doi: 10.1002/DAC.4994.
- [23] W. Xu, T. Huang, and L. Wang, "Code-shifted differential chaos shift keying with code index modulation for high data rate transmission," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 10, pp. 4285–4294, Oct. 2017, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2725261.
- [24] E. Aydin and F. Cogen, "Two-way code index modulation," *27th Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2019*, Apr. 2019, doi: 10.1109/SIU.2019.8806516.
- [25] K. Zhang, H. Hai, M. Wen, X. Q. Jiang, and R. Qiu, "Generalized space-code index modulation for high rate and energy-efficient MIMO transmission," *IEEE*

- Trans Veh Technol*, vol. 70, no. 12, pp. 12812–12820, Dec. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3120291.
- [26] G. Kaddoum, M. F. A. Ahmed, and Y. Nijasure, “Code index modulation: A high data rate and energy efficient communication system,” *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 175–178, Feb. 2015, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2385054.
 - [27] G. Kaddoum, Y. Nijasure, and H. Tran, “Generalized code index modulation technique for high-data-rate communication systems,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 65, no. 9, pp. 7000–7009, Sep. 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2498040.
 - [28] F. Cogen, E. Aydin, N. Kabaoglu, E. Basar, and H. Ilhan, “Generalized code index modulation and spatial modulation for high rate and energy-efficient MIMO systems on rayleigh block-fading channel,” *IEEE Syst J*, vol. 15, no. 1, pp. 538–545, Mar. 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.2993704.
 - [29] F. Cogen *et al.*, “Code index modulation and spatial modulation: A new high rate and energy efficient scheme for MIMO systems: A new high rate and energy efficient scheme for MIMO systems,” 2018, doi: 10.1109/TSP.2018.8441230.
 - [30] E. Aydin, F. Cogen, and E. Basar, “Code-index modulation aided quadrature spatial modulation for high-rate MIMO systems,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 68, no. 10, pp. 10257–10261, Oct. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2928378.
 - [31] E. Basar, M. di Renzo, J. de Rosny, M. Debbah, M. S. Alouini, and R. Zhang, “Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753–116773, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192.
 - [32] M. di Renzo *et al.*, “Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 798–807, 2020, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.3002955.

- [33] Y. Liu *et al.*, “Reconfigurable intelligent surfaces: principles and opportunities,” *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, Jul. 2021, doi: 10.1109/COMST.2021.3077737.
- [34] C. Pan *et al.*, “Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, Jun. 2021, doi: 10.1109/MCOM.001.2001076.
- [35] X. Yuan, Y. J. A. Zhang, Y. Shi, W. Yan, and H. Liu, “Reconfigurable-intelligent-surface empowered wireless communications: Challenges and opportunities,” *IEEE Wirel Commun*, vol. 28, no. 2, pp. 136–143, Apr. 2021, doi: 10.1109/MWC.001.2000256.
- [36] A. E. Canbilen, E. Basar, and S. S. Ikki, “Reconfigurable intelligent surface-assisted space shift keying,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 9, pp. 1495–1499, Sep. 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.2994930.
- [37] Y. Hussein, M. Assaad, and H. Sari, “Reconfigurable intelligent surface index modulation with signature constellations,” *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, vol. 2021-March, 2021, doi: 10.1109/WCNC49053.2021.9417461.
- [38] T. Hou, Y. Liu, Z. Song, X. Sun, Y. Chen, and L. Hanzo, “Reconfigurable intelligent surface aided NOMA networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2575–2588, Nov. 2020, doi: 10.1109/JSAC.2020.3007039.
- [39] F. Bayar, O. Salan, H. Ilhan, S. Member, and E. Aydin, “Space-time block coded reconfigurable intelligent surface-based received spatial modulation,” Mar. 2022, doi: 10.48550/arxiv.2203.14501.
- [40] M. S. Alouini and A. Goldsmith, “Capacity of Nakagami multipath fading channels,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 1, pp. 358–362, 1997, doi: 10.1109/VETEC.1997.596380.
- [41] H. Bai and M. Atiquzzaman, “Error modeling schemes for fading channels in wireless communications: A survey,” *IEEE Communications Surveys &*

- Tutorials*, vol. 5, no. 2, pp. 2–9, Dec. 2009, doi: 10.1109/COMST.2003.5341334.
- [42] B. Sklar, “Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems Part I: Characterization,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 7, pp. 90–100, Jul. 1997, doi: 10.1109/35.601747.
- [43] S. v Vaseghi, “Advanced digital signal processing and noise reduction”, John Wiley & Sons, 2008.
- [44] D. I. Crecraft and S. Gergely, “Signals and signal processing,” *Analog Electronics*, pp. 13–71, 2002, doi: 10.1016/B978-075065095-3/50002-7.
- [45] J. G. Proakis and Masoud. Salehi, “Digital communications,” p. 1150, 2008.
- [46] “Central Limit Theorem,” *The Concise Encyclopedia of Statistics*, pp. 66–68, Feb. 2008, doi: 10.1007/978-0-387-32833-1_50.
- [47] B. Sklar, “Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems Part I: Characterization,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 35, no. 7, pp. 90–100, Jul. 1997, doi: 10.1109/35.601747.
- [48] M. M. Siddiqui, “Some problems connected with Rayleigh distributions,” *JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards-D. Radio Propagation*, vol. 66, no. 2.
- [49] T. S. and others Rappaport, “Wireless Communications: Principles and Practice”, PTR New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [50] C. Tepedelenlioğlu, A. Abdi, and G. B. Giannakis, “The Ricean K factor: Estimation and performance analysis,” *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 2, no. 4, pp. 799–810, Jul. 2003, doi: 10.1109/TWC.2003.814338.
- [51] P. N. M. P. Narasimha Murthy, “A comparison of Rayleigh and Rician fading channels under frequency-selective fading,” *The IUP Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 44–50, 2010.

- [52] Z. Yu, T. T. Tjhung, and C. C. Chai, "PDF of the sum of Rician signals and Gaussian noise," *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 58, no. 1, pp. 21–25, 2003, doi: 10.1109/VETECF.2003.1284970.
- [53] M. NAKAGAMI, "The m -distribution—A general formula of intensity distribution of rapid fading," *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, pp. 3–36, Jan. 1960, doi: 10.1016/B978-0-08-009306-2.50005-4.
- [54] A. F. Molisch, "Wireless communications". Wiley, 2011.
- [55] E. Pajala, T. Isotalo, A. Lakhzouri, and E. S. Lohan, "An improved simulation model for Nakagami-m fading channels for satellite positioning applications".
- [56] A. Mohammadi and F. M. Ghannouchi, "MIMO wireless communications," pp. 9–26, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-27635-4_2.
- [57] G. Lawton, "Is MIMO the future of wireless communications?," *Computer (Long Beach Calif)*, vol. 37, no. 7, pp. 20–22, Feb. 2008, doi: 10.1109/MC.2004.57.
- [58] A. F. Molisch, M. Steinbauer, M. Toeltsch, E. Bonek, and R. S. Thomä, "Capacity of MIMO systems based on measured wireless channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 20, no. 3, pp. 561–569, Apr. 2002, doi: 10.1109/49.995515.
- [59] K. Yu and B. Ottersten, "Models for MIMO propagation channels: a review," *Wirel Commun Mob Comput*, vol. 2, no. 7, pp. 653–666, Nov. 2002, doi: 10.1002/WCM.78.
- [60] P. S. v MTech student and M. v Sathyanarayana Professor, "A Review on Mimo Systems with Antenna Selection", Accessed: Jul. 12, 2022. [Online]. Available: www.ijert.org
- [61] D. Kaur and N. Kumar, "Cost reduction and channel capacity enhancement of MIMO system using antenna selection techniques," *International Journal of Electronics and Telecommunications*, vol. Vol. 65, No. 2, no. 2, pp. 189–194, 2019, doi: 10.24425/IJET.2019.126300.

- [62] F. Rusek *et al.*, “Scaling up MIMO : Opportunities and challenges with very large arrays,” *IEEE Signal Process Mag*, vol. 30, no. 1, pp. 40–60, 2013, doi: 10.1109/MSP.2011.2178495.
- [63] J. R. Hampton, “Introduction to MIMO communications”, vol. 9781107042834, pp. 1–288, Jan. 2011, doi: 10.1017/CBO9781107337527.
- [64] A. Lozano and N. Jindal, “Transmit diversity vs. spatial multiplexing in modern MIMO systems,” *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 9, no. 1, pp. 186–197, Jan. 2010, doi: 10.1109/TWC.2010.01.081381.
- [65] M. Z. Siam and M. Krunz, “An overview of MIMO-oriented channel access in wireless networks,” *IEEE Wirel Commun*, vol. 15, no. 1, pp. 63–69, Feb. 2008, doi: 10.1109/MWC.2008.4454706.
- [66] E. Biglieri, R. Calderbank, A. Constantinides, A. Goldsmith, A. Paulraj, and H. V. Poor, “MIMO wireless communications,” *MIMO Wireless Communications*, vol. 9780521873284, pp. 1–323, Jan. 2007, doi: 10.1017/CBO9780511618420.
- [67] R. W. Heath Jr and A. Lozano, “Foundations of MIMO communication,” *Foundations of MIMO Communication*, Dec. 2018, doi: 10.1017/9781139049276.
- [68] S. Dogan Tusha, A. Tusha, E. Basar, and H. Arslan, “Multidimensional index modulation for 5G and beyond wireless networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 2, pp. 170–199, Feb. 2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3040589.
- [69] S. Lu, I. A. Hemadeh, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, “Compressed-sensing-aided space-time frequency index modulation,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 67, no. 7, pp. 6259–6271, Jul. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2818298.
- [70] X. Cheng, M. Zhang, M. Wen, and L. Yang, “Index modulation for 5G: Striving to do more with less,” *IEEE Wirel Commun*, vol. 25, no. 2, pp. 126–132, Apr. 2018, doi: 10.1109/MWC.2018.1600355.
- [71] T. Mao, Q. Wang, Z. Wang, and S. Chen, “Novel index modulation techniques: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 315–348, Jan. 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2858567.

- [72] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas, "Index modulation techniques for next-generation wireless networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16693–16746, Aug. 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2737528.
- [73] E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 7, pp. 168–175, Jul. 2016, doi: 10.1109/MCOM.2016.7509396.
- [74] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 22, pp. 5536–5549, 2013, doi: 10.1109/TSP.2013.2279771.
- [75] S. Jacob, T. L. Narasimhan, and A. Chockalingam, "Space-time index modulation," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, May 2017, doi: 10.1109/WCNC.2017.7925922.
- [76] R. Tsvaki, N. Pillay, and H. Xu, "Double spatial media-based modulation with RF mirrors," *Annales des Telecommunications/Annals of Telecommunications*, vol. 76, no. 11–12, pp. 813–825, Dec. 2021, doi: 10.1007/S12243-021-00841-3/FIGURES/4.
- [77] T. Holoubi, N. Muchena, and M. Mohaisen, "Double quadrature spatial modulation," *International Journal of Internet, Broadcasting and Communication*, vol. 11, no. 3, pp. 27–33, 2019, doi: 10.7236/IJIBC.2019.11.3.27.
- [78] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanović, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 57, no. 4, pp. 2228–2241, Jul. 2008, doi: 10.1109/TVT.2007.912136.
- [79] R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation - A new low complexity spectral efficiency enhancing technique," *First International Conference on Communications and Networking in China, ChinaCom '06*, 2006, doi: 10.1109/CHINACOM.2006.344658.

- [80] M. di Renzo, H. Haas, A. Ghayeb, S. Sugiura, and L. Hanzo, "Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 1, pp. 56–103, 2014, doi: 10.1109/JPROC.2013.2287851.
- [81] X. Wu, H. Claussen, M. di Renzo, and H. Haas, "Channel estimation for spatial modulation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 12, pp. 4362–4372, Dec. 2014, doi: 10.1109/TCOMM.2014.2366750.
- [82] A. Younis, N. Serafimovski, R. Mesleh, and H. Haas, "Generalised spatial modulation," *Conf Rec Asilomar Conf Signals Syst Comput*, pp. 1498–1502, 2010, doi: 10.1109/ACSSC.2010.5757786.
- [83] R. Mesleh, S. S. Ikki, and H. M. Aggoune, "Quadrature spatial modulation," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 64, no. 6, pp. 2738–2742, Jun. 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2344036.
- [84] E. Başar, U. Aygölü, ... E. P.-I. transactions on, and undefined 2010, "Space-time block coded spatial modulation," *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Aug. 28, 2022.
- [85] Y. Bian, X. Cheng, M. Wen, L. Yang, H. V. Poor, and B. Jiao, "Differential spatial modulation," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 64, no. 7, pp. 3262–3268, Jul. 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2348791.
- [86] R. Zhang, L. L. Yang, and L. Hanzo, "Generalised pre-coding aided spatial modulation," *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 12, no. 11, pp. 5434–5443, Nov. 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.100213.130848.
- [87] X. Zhu, Z. Wang, and J. Cao, "NOMA-based spatial modulation," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 3790–3800, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2688019.
- [88] X. Wang, J. Wang, L. He, and J. Song, "Spectral efficiency analysis for downlink NOMA aided spatial modulation with finite alphabet inputs," *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 66, no. 11, pp. 10562–10566, Nov. 2017, doi: 10.1109/TVT.2017.2737327.

- [89] E. Aydın, “EDAS/COAS based antenna selection for code index modulation aided spatial modulation,” *Electrica*, vol. 19, no. 2, pp. 113–119, 2019, doi: 10.26650/ELECTRICA.2019.19003.
- [90] J. Li, M. Wen, X. Cheng, Y. Yan, S. Song, and M. H. Lee, “Generalized precoding-aided quadrature spatial modulation,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 66, no. 2, pp. 1881–1886, Feb. 2017, doi: 10.1109/TVT.2016.2565618.
- [91] A. K. Khandani, “Media-based modulation: A new approach to wireless transmission,” *IEEE International Symposium on Information Theory - Proceedings*, pp. 3050–3054, 2013, doi: 10.1109/ISIT.2013.6620786.
- [92] N. Pillay and H. Xu, “Uncoded space-time labeling diversity - application of media-based modulation with RF mirrors,” *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 2, pp. 272–275, Feb. 2018, doi: 10.1109/LCOMM.2017.2770145.
- [93] F. Yarkin, I. Altunbas, and E. Basar, “Cooperative space shift keying media-based modulation with hybrid relaying,” *IEEE Syst J*, vol. 14, no. 1, pp. 500–509, Mar. 2020, doi: 10.1109/JSYST.2019.2899876.
- [94] A. James Bamisaye, T. Quazi, C. Ayodeji, and J. Bamisaye, “Two-way decode and forward quadrature media-based modulation for single-input multiple-output scheme,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 35, no. 11, p. e5186, Jul. 2022, doi: 10.1002/DAC.5186.
- [95] C. Li, L. Wang, and G. Nie, “Quadrature spatial modulation aided media-based modulation,” *IEEE Communications Letters*, 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3180353.
- [96] Z. Yigit and E. Basar, “Space-time media-based modulation,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 9, pp. 2389–2398, May 2019, doi: 10.1109/TSP.2019.2905836.
- [97] E. Aydın, “A new hexagonal quadrature amplitude modulation aided media-based modulation,” *International Journal of Communication Systems*, vol. 34, no. 17, p. e4994, Nov. 2021, doi: 10.1002/DAC.4994.

- [98] Z. Bouida, H. El-Sallabi, A. Ghayeb, and K. A. Qaraqe, "Reconfigurable antenna-based space-shift keying (SSK) for MIMO Rician channels," *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 15, no. 1, pp. 446–457, Jan. 2016, doi: 10.1109/TWC.2015.2474862.
- [99] I. Dubrawsky, "Wireless networks," *Eleventh Hour Security+*, pp. 77–88, 2010, doi: 10.1016/B978-1-59749-427-4.00006-X.
- [100] E. H. Dinan and B. Jabbari, "Spreading codes for direct sequence CDMA and wideband CDMA cellular networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 9, pp. 48–54, Sep. 1998, doi: 10.1109/35.714616.
- [101] L. B. Milstein, "Wideband code division multiple access," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 8, pp. 1344–1354, Aug. 2000, doi: 10.1109/49.864000.
- [102] K. S. Zigangirov, "Theory of code division multiple access communication". John Wiley & Sons, 2004.
- [103] T. J. Cui, R. Liu, and D. R. Smith, "Introduction to metamaterials," *Metamaterials: Theory, Design, and Applications*, pp. 1–19, 2010, doi: 10.1007/978-1-4419-0573-4_1/COVER.
- [104] S. S. Bukhari, J. Vardaxoglou, and W. Whittow, "A metasurfaces review: definitions and applications," *Applied Sciences 2019, Vol. 9, Page 2727*, vol. 9, no. 13, p. 2727, Jul. 2019, doi: 10.3390/APP9132727.
- [105] J. Yang *et al.*, "A review of metasurfaces: physics and applications," *Reports on Progress in Physics*, vol. 79, no. 7, p. 076401, Jun. 2016, doi: 10.1088/0034-4885/79/7/076401.
- [106] O. Quevedo-Teruel *et al.*, "Roadmap on metasurfaces," *Journal of Optics*, vol. 21, no. 7, p. 073002, Jul. 2019, doi: 10.1088/2040-8986/AB161D.
- [107] A. Li, S. Singh, and D. Sievenpiper, "Metasurfaces and their applications," *Nanophotonics*, vol. 7, no. 6, pp. 989–1011, Jun. 2018, doi: 10.1515/NANOPH-2017-0120.

- [108] L. You *et al.*, “Reconfigurable intelligent surfaces-assisted multiuser MIMO uplink transmission with partial CSI,” *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 20, no. 9, pp. 5613–5627, Sep. 2021, doi: 10.1109/TWC.2021.3068754.
- [109] A. M. Salhab and M. H. Samuh, “Accurate performance analysis of reconfigurable intelligent surfaces over Rician fading channels,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 1051–1055, May 2021, doi: 10.1109/LWC.2021.3056758.
- [110] S. Basharat, S. A. Hassan, H. Pervaiz, A. Mahmood, Z. Ding, and M. Gidlund, “Reconfigurable intelligent surfaces: Potentials, applications, and challenges for 6G wireless networks,” *IEEE Wirel Commun*, vol. 28, no. 6, pp. 184–191, Dec. 2021, doi: 10.1109/MWC.011.2100016.
- [111] M. di Renzo, F. H. Danufane, and S. Tretyakov, “Communication models for reconfigurable intelligent surfaces: From surface electromagnetics to wireless networks optimization,” *Proceedings of the IEEE*, pp. 1–0, Aug. 2022, doi: 10.1109/JPROC.2022.3195536.
- [112] R. Long, Y. C. Liang, Y. Pei, and E. G. Larsson, “Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications,” *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 20, no. 8, pp. 4962–4975, Aug. 2021, doi: 10.1109/TWC.2021.3064024.
- [113] R. Chen, M. Liu, Y. Hui, N. Cheng, and J. Li, “Reconfigurable intelligent surfaces for 6G IoT wireless positioning: A contemporary survey,” *IEEE Internet Things J*, pp. 1–1, Sep. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3203890.
- [114] J. Ye, J. Qiao, A. Kammoun, and M. S. Alouini, “Non-terrestrial communications assisted by reconfigurable intelligent surfaces,” *Proceedings of the IEEE*, 2022, doi: 10.1109/JPROC.2022.3169690.
- [115] A. C. Pogaku, D. T. Do, B. M. Lee, and N. D. Nguyen, “UAV-assisted RIS for future wireless communications: A survey on optimization and performance analysis,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 16320–16336, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3149054.

- [116] L. Dai *et al.*, “Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: Antenna design, prototyping, and experimental results,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 45913–45923, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2977772.
- [117] N. S. Perovic, L. N. Tran, M. di Renzo, and M. F. Flanagan, “Achievable rate optimization for MIMO systems with reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Trans Wirel Commun*, vol. 20, no. 6, pp. 3865–3882, Jun. 2021, doi: 10.1109/TWC.2021.3054121.
- [118] M. di Renzo *et al.*, “Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2450–2525, Nov. 2020, doi: 10.1109/JSAC.2020.3007211.
- [119] F. Costa and M. Borgese, “Electromagnetic model of reflective intelligent surfaces,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1577–1589, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3092217.
- [120] F. H. Danufane, M. di Renzo, J. de Rosny, and S. Tretyakov, “On the path-loss of reconfigurable intelligent surfaces: An approach based on Green’s theorem applied to vector fields,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 8, pp. 5573–5592, Aug. 2021, doi: 10.1109/TCOMM.2021.3081452.
- [121] E. Basar, “Reconfigurable intelligent Surface-Based Index Modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6G,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 5, pp. 3187–3196, May 2020, doi: 10.1109/TCOMM.2020.2971486.
- [122] Y. Vasavada and B. B. John, “Low Complexity Optimal and Suboptimal Detection at Spatial Modulation MIMO Receivers,” *IEEE Trans Veh Technol*, vol. 71, no. 4, pp. 3837–3850, Apr. 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3141520.
- [123] P. John and M. Salehi, “Digital communications hardcover,” 2007, Accessed: Sep. 17, 2022. [Online]. Available: <https://www.amazon.co.uk/Digital-Communications-John-Proakis/dp/0072957166>
- [124] M. K. Simon and M.-Slim. Alouini, “Digital communication over fading channels,” p. 900, 2005, Accessed: Sep. 17, 2022.

- [125] D. Tse and V. Pramod, “Fundamentals of wireless communication,” *Fundamentals of Wireless Communication*, vol. 9780521845274, pp. 1–564, Jan. 2005, doi: 10.1017/CBO9780511807213.
- [126] Z. Yigit and E. Basar, “Double spatial modulation: A high-rate index modulation scheme for MIMO systems,” *Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems*, vol. 2016-October, pp. 347–351, Oct. 2016, doi: 10.1109/ISWCS.2016.7600927.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Burak Ahmet ÖZDEN
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.01.1996 / Başakşehir-İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : burakahmetozden@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	İstanbul Medeniyet Üniversitesi	2020
Lisans	İşletme	Anadolu Üniversitesi	2018
Önlisans	Elektronik Haberleşme	İstanbul Üniversitesi	2016

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2021-...	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLAR

Makale

1. Ozden B. A., Aydin E., and Cogen F. (2022) “Code Index Modulation aided Spatial Media Based Modulation System for Future Wireless Networks”. *IEEE Syst. J.* (Minor revision)
2. Ozden B. A., Aydin E., and Cogen F. (2022) “A Novel Double Media-Based Index Modulation Scheme for High-Rate Communication Systems”. (Under Review)
3. Ozden B.A., E. Aydin, and Cogen F. (2022) “Reconfigurable Intelligent Surface Aided Spatial Media Based Modulation”. (Under Review)
4. Cogen F., Ozden B.A, E. Aydin, and N. Kabaoglu (2022) “Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered Code Index Modulation for High-Rate SISO Systems”. (Under Review)

Bildiri

1. Ozden B. A., Aydin, E., and Cogen, F. (2022) Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered Double Spatial Modulation for MISO Systems, Eleco 2022.
2. Ozden, B. A., Tuylu, M., & Erdogan, E. (2020, October). Performance Analysis of UAV Relaying Using Energy Harvesting. In 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.
3. Ozden B. A. , İpek S. (2019, November). Quantum Transport Properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Nanowires. NANOTR.
4. Ozden B. A. , İpek S. (2019, June) The Electronic Properties of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Nanowires. ICOLES.

Proje

1. Termal Olarak İyileştirilmiş Uygulamalar İçin Arayüzey Isı Transferi Üzerindeki Yüzey Eğriliği Etkilerinin Araştırılması, Uluslararası, Burslu, ARDEB, MFAG 2020-2021.