



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**UYARLANABİLİR AKILLI YÜZEY-
DESTEKLİ UZAYSAL MODÜLASYONUN
FARKLI SÖNÜMLENMELİ KANALLARDAKİ
PERFORMANS ANALİZİ**

Alper ATEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Alper Ateş tarafından hazırlanan “Uyarlanabilir Akıllı Yüzey-Destekli Uzaysal Modülasyonun Farklı Sönümlenmeli Kanallardaki Performans Analizi” adlı tez çalışması 30/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Seyfettin Sinan Gültekin

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hakkı SOY

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Alper ATEŞ

Tarih: 30/06/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

UYARLANABİLİR AKILLI YÜZEY-DESTEKLİ UZAYSAL MODÜLASYONUN FARKLI SÖNÜMLENMELİ KANALLARDAKİ PERFORMANS ANALİZİ

Alper ATEŞ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN

2022, 62 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN
Doç. Dr. Seyfettin Sinan Gültekin
Dr. Öğr. Üyesi Hakkı SOY

Her geçen gün gelişmekte olan teknolojiyle birlikte kablosuz iletişim cihazlarının kullanıcı sayısı da artmakta ve çok daha hızlı veri iletimine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak geleneksel radyo-frekans haberleşme yöntemleri ultra hızlı veri transferi ve yüksek bant genişliği gibi yeni nesil kablosuz haberleşme teknolojilerinin hedeflerini sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Hali hazırda kullanılan haberleşme tekniklerinin gerekli spektral verimliliği sağlayamaması yeni verici-alıcı yapılarının tasarlanmasını ve yenilikçi modülasyon tekniklerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

Bu tez çalışmasında; kablosuz haberleşme sistemlerinde kanallar arası girişim ve alıcı karmaşıklığı gibi sorunları giderebilmek amacıyla öne sürülen uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) teknikleri ve çok yönlü sönmelenmeli kablosuz ortamlarından kaynaklanan veri iletimindeki performans düşüklüğünü azaltmak amacıyla öne sürülen uyarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface, RIS) teknolojisinin birleştirilmesiyle ortaya atılan RIS – destekli SM (RIS-SM) şemaları Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ gibi farklı çok yönlü sönmelenmeli kanallar üzerinde ele alınmıştır. RISlerin kablosuz kanalı etkin biçimde kontrol etme ve değiştirme yeteneğinden yararlanarak, farklı kablosuz kanallar üzerindeki hata performans analizi bit hata oranı (bit error rate, BER) açısından yapılmıştır. Ele alınan tüm sistemlerin analizinde en yüksek olabilirlik (maximum likelihood, ML) sezimi metodu kullanılmıştır. Elde edilen hata performans sonuçları bilgisayar simülasyonları ile sunulmuştur.

Özet olarak bu tezin amacı, kablosuz haberleşme sistemlerinde RIS-SM teknikleri ile veri iletimi sağlayarak yüksek veri iletim hızlarına ulaşmak, antenler arası senkronizasyon sorununu çözmek, daha güvenilir bir iletim ortamı sağlamak ve RIS aracılığıyla kör noktada bulunan antenler arasında doğrudan görüş hattı sağlayarak iletim ortam kapasitesini artırmaktır.

Anahtar Kelimeler: Bit hata oranı (BER), en yüksek olabilirlik sezim metodu (ML), Rayleigh, Ricean, uyarlanabilir akıllı yüzey (RIS), uzaysal modülasyon (SM), uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK)

ABSTRACT

MS THESIS

PERFORMANCE ANALYSIS OF RECONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACE-ASSISTED SPATIAL MODULATION OVER DIFFERENT FADING CHANNELS

Alper ATEŞ

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics Engineering

Advisor: Asst. Prof. Dr. Ayşe Elif CANBİLEN

2022, 62 Pages

Jury

Assoc.Prof. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN

Asst. Prof. Ayşe Elif CANBİLEN

Asst. Prof. Hakkı SOY

With the day by day developing technology, the number of users of wireless communication devices is increasing and much faster data transmission is needed. However, traditional radio-frequency communication methods are insufficient to meet the goals of new generation wireless communication technologies such as ultra-fast data transfer and high bandwidth. The inability of currently used communication techniques to provide the required spectral efficiency has made it necessary to design new transmitter-receiver structures and to develop innovative modulation techniques.

In this thesis study; Spatial modulation (SM) techniques, which are proposed to eliminate problems such as inter-channel interference and receiver complexity in wireless communication systems, and adaptive intelligent surface (RIS) technology, which is proposed to reduce the performance degradation in data transmission caused by multi-path fading wireless environments. RIS-assisted SM (RIS-SM) schemes put forward by combining them are discussed on different multipath fading channels such as Rayleigh Ricean and κ - μ . By utilizing the ability of RISs to effectively control and change the wireless channel, error performance analysis on different wireless channels was performed in terms of bit error rate (BER). The highest likelihood (maximum likelihood, ML) detection method was used in the analysis of all the systems considered. The error performance results obtained are presented with computer simulations.

In summary, the aim of this thesis is to achieve high data transmission rates by providing data transmission with RIS SM techniques in wireless communication systems, to solve the synchronization problem between antennas, to provide a more reliable transmission environment and to increase the transmission medium capacity by providing a direct line of sight between the antennas in the blind spot through RIS.

Keywords: Bit error rate (BER), maximum likelihood (ML), Rayleigh, Ricean, reconfigurable intelligent surface (RIS), spatial modulation (SM), spatial shift keying (SSK).

ÖNSÖZ

Tüm çalışmalarımnda değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, araştırma ve geliştirme çabalarımnda yardımlarını esirgemeyen, danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN'e ve maddi ve manevi desteklerinden dolayı başta biricik annem Nermin ARSLAN, öğretmen ablalarım Eda YILMAZ, Elif ATEŞ ve Makine Mühendisi ağabeyim Bekir ATEŞ'e teşekkür ederim.

Alper ATEŞ
KONYA-2022



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kablosuz Haberleşme Teknolojisinin Gelişimi	3
2.2. Kablosuz MIMO Sistemleri ile İlgili Literatür Çalışmaları.....	5
2.3. Uzaysal Modülasyon (SM) Teknikleri ile İlgili Literatür Çalışmaları	6
2.4. Uzay Kaydırmalı Anahtarlama (SSK) Tekniği ile İlgili Literatür Çalışmaları	7
2.5. Uyarlanabilir Akıllı Yüzeyler (RISler) ile İlgili Literatür Çalışmaları.....	9
2.6. RIS – Destekli SM/SSK Şemaları ile İlgili Literatür Çalışmaları	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	15
3.1. Çok Girişli Çok Çıkışlı (MIMO) Haberleşme Sistemleri	15
3.2. MIMO Kablosuz Kanal Ortamı	16
3.2.1. Rayleigh Sönümlenmeli Kanal Modeli.....	17
3.2.2. Ricean Sönümlenmeli Kanal Modeli	18
3.2.3. Nakagami-m Sönümlenmeli Kanal Modeli	20
3.2.4. $\kappa - \mu$ Sönümlenmeli Kanal Modeli.....	21
3.3. Uzaysal Modülasyon (SM) Teknikleri	22
3.3.1. Uzaysal Modülasyon (SM)	23
3.3.2. Uzay Kaydırmalı Anahtarlama (SSK)	25
3.4. Uyarlanabilir Akıllı Yüzeyler (RISler)	27
3.5. RIS - Destekli SM Şemaları.....	29
3.5.1. RIS - Destekli RSM Şeması.....	31
3.5.2. RIS - Destekli RSSK Şeması	32
3.5.3. RIS Destekli TSSK İletim Şeması	33
3.6. En Yüksek Olabilirlik (ML) Sezimi Yöntemi	34
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	37
4.1. RIS-RSM Şemasının Farklı Kanallardaki Performans Analizi	37
4.1.1. RIS - Destekli RSM Şeması İçin ML Sezim Yöntemi	38
4.1.2. RIS - Destekli RSM Şeması için Performans Analiz Sonuçları	38
4.2. RIS-RSSK Şemasının Farklı Kanallardaki Performans Analizi.....	40
4.2.1. RIS - Destekli RSSK Şeması İçin ML Sezim yöntemi.....	40

4.2.2. RIS - Destekli RSSK Şeması için Performans Analiz Sonuçları.....	41
4.3. RIS-TSSK Şemasının Farklı Kanallardaki Performans Analizi	43
4.3.1. RIS Destekli TSSK Şeması için ML Sezim Yöntemi.....	43
4.3.2. RIS - Destekli TSSK Şemasının Ricean Sönümlenmeli Kanallardaki Performansının ML Sezim Yöntemi ile Teorik Analizi	43
4.3.3. RIS - Destekli TSSK Şeması için Performans Analiz Sonuçları.....	46
4.4. RIS-RSSK ve RSSK Şemasının Rayleigh ve Ricean Kanallardaki Performans Karşılaştırması	49
4.5. RIS-RSSK ve RIS-RSM Şemasının Performans Karşılaştırması.....	51
4.6. RIS-TSSK ve RIS-RSSK Şemasının Performans Karşılaştırması	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
5.1 Sonuçlar	56
5.2 Öneriler	57
KAYNAKLAR	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

b, c	: Bilgi bit vektör dizisi
$CN(\mu, \sigma^2)$: Ortalaması μ , varyansı σ^2 olan kompleks Gauss rastgele değişkeni
E	: Ortalama sinyal enerjisi
$E[\]$: Beklenen değer
H	: Kanal katsayıları matrisi
$I_0(\cdot)$: Sıfırıncı dereceden birinci tip modifiye edilmiş Bessel fonksiyonu
K	: Ricean şekil parametresi
M	: Sembol / yıldızküme diyagramı boyutu
M_λ	: λ 'nin moment üretme fonksiyonu
N_R	: Alıcı anten sayısı
N_T	: Verici anten sayısı
$P_e, P(x)$: İkili hata olasılığı
y, r	: Alıcıya ulaşan sinyal vektörleri
t	: Zaman
η	: Gürültü
σ	: Standart sapma
σ^2	: Varyans
ν	: Sönümlenme Şiddetinin Göstergesi
m	: Anten indisi
x	: Bilgi sinyali
λ	: Sembol diyagramında her noktanın taşıyabileceği bit sayısı
μ	: Ortalama değer
$q(k)$: Bilgi biti vektörü
θ, ϕ, φ	: Faz değerleri
x_j	: Sembol vektörü
α, β	: Kanal katsayıları genliği

Kısaltmalar

ABER	: Ortalama Bit Hata Oranı (Average Bit Error Rate)
AS	: Anten Seçimi (antenna selection,)
ASE	: Ortalama Spektral Verimlilik (Average Spectral Efficiency)
AR	: Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality)
AWGN	: Eklenebilir Beyaz Gauss Gürültü (Additive White Gaussian Noise)
BER	: Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BLAST	: Bell Labs Katmanlı Uzay Zamanı (Bell Laboratories Layer Space Time)
BPSK	: İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase Shift Keying)
BS	: Baz İstasyonu
CSI	: Kanal Durum Bilgisi (Channel State Information)
dB	: Desibel
DSM	: Diferansiyel Uzaysal Modülasyon (Differential Spatial Modulation)
DSSK	: Diferansiyel Uzay Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Spatial Shift Keying)
EM	: Elektromanyetik
FPGA	: Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi (Field-Programmable Gate Array)
GSSK	: Genelleştirilmiş Uzay Kaydırmalı Anahtarlama (Generalized Space Shift Keying)
HSPDA	: Yüksek Hızlı Paket Erişimi (High Speed Packet Access)
ICI	: Kanallar Arası Girişim (Inter-channel Interference)
i.i.d	: Bağımsız ve özdeş dağıtılmış (Independent and identically distributed)
IM	: İndis Modülasyonu (Index Modulation)
IQI	: Eş-Faz/Dik Faz- Dengesizliği (In-Phase (I) and Quadrature Phase (Q) Imbalance)
LOS	: Direkt Görüş Hattı (Line-of-Sight)
LTE	: Uzun Süreli Evrim (Long-Term Evolution)
MBM	: Ortama Bağlı Modülasyon (Media Based Modulation)
MIMO	: Çok-Girişli Çok-Çıkışlı (Multiple-Input Multiple-Output)
ML	: Maksimum Olabilirlik (Maximum Likelihood)
mmWave	: Milimetrik Dalga (Millimeter-Wave)
MRC	: En Yüksek Oranlı Birleşim (Maximum-Ratio Combining)

NLOS	: Doğrudan Görüş Hattı Olmayan (Non Line – of - Sight)
NOMA	: Ortogonal-Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access)
PDF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function)
PEP	: İkili Hata Olasılığı (Pairwise Error Probability)
PIN	: P tipi – öz –N tipi yarı iletken
PSK	: Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying)
RF	: Radyo Frekans (Radio Frequency)
RIS	: Uyarlanabilir Akıllı Yüzeyler (Reconfigurable Intelligent Surface)
Rx	: Alıcı Anten
SISO	: Tek-Girişli Tek-Çıkışlı (Single-Input Single-Output)
SM	: Uzaysal Modülasyon (Spatial Modulation)
SMT	: Uzak Modülasyon Teknikleri (Spatial Modulation Techniques)
SMX	: Uzaysal Çoğullama Sistemleri (Spatial Multiplexing)
SNR	: Sinyal-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)
STC	: Uzak Zaman Kodlaması (Space Time Coding)
SSK	: Uzak Kaydırmalı Anahtarlama (Space Shift Keying)
SVD	: Tekil Değer Ayrıştırma (Singular Value Decomposition)
V-BLAST	: Dikey Bell Lab Katmanlı Uzak-Zaman (Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time)
QAM	: Karese Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
Tx	: Verici Anten
UHD	: Ultra Yüksek Tanımlı (Ultra High Definition)
UM-MIMO	: Ultra Masif MIMO
VR	: Sanal Gerçeklik (Virtual Reality)
1G	: Birinci Nesil (1st Generation)
2G	: İkinci Nesil (2nd Generation)
3G	: Üçüncü Nesil (3rd Generation)
4G	: Dördüncü Nesil (4th Generation)
5G	: Beşinci Nesil (5th Generation)
6G	: Altıncı Nesil (6th Generation)

1. GİRİŞ

Günümüzde tüm veri iletişimi, mevcut frekans spektrum aralığında sağlanmaya çalışılmaktadır. Klasik haberleşme sistemleri; gün geçtikçe artan veri trafiği ile birlikte veri kapasite yönetimi, yüksek veri iletim hızı ve yüksek bant genişliği gibi hedefleri sağlamakta yetersiz kalmaktadır. Geleneksel radyo-frekans (radio frequency, RF) haberleşme tekniklerinin gerekli spektral verimliliği sağlayamaması, yenilikçi haberleşme tekniklerinin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya koymuştur. Bu sebeple yenilikçi haberleşme teknolojileri olarak çok - girişli çok - çıkışlı (multi - input multi - output, MIMO) haberleşme sistemleri, uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) teknikleri ve uyarlanabilir akıllı yüzey (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) gibi yeni çözümler önerilmiştir.

MIMO kablosuz haberleşme sistemleri, her bir veri iletimi anında sistemdeki tüm verici ve alıcı antenleri eş zamanlı olarak çalıştırarak artan veri ihtiyacını karşılamasının yanı sıra iletim esansında kullanılan aktif kablosuz kanal sayısını artırarak tüm sistemin kablosuz kanal kapasitesini veri iletimi için anlık olarak artırmaktadır. Tüm bu avantajlarına rağmen iletimdeki kablosuz kanal miktarındaki artıştan dolayı çok sayıda RF zinciriyle birlikte kanallar arası girişim (inter-channel interference, ICI), artan verici-alıcı sayısından kaynaklı olarak verinin iletileceği tarafta alıcı karmaşıklığı ve antenler arası senkronizasyon sorunu gibi problemler ortaya çıkmıştır. Bunların yanı sıra halihazırda önerilen MIMO haberleşme sistemleri, anten sayısına bağlı olarak enerji tüketiminde ve spektral verimlilikte yeterli performans sağlayamamaktadır.

Tüm avantajlarına rağmen kablosuz MIMO haberleşme sistemleri yukarıda belirtilen sistemsel eksikliklerinden dolayı kablosuz veri iletimindeki sorunları çözememiştir. MIMO sistemlerin dezavantajlarını giderebilmek için SM gibi yeni modülasyon teknikleri öne sürülmüştür. Klasik haberleşme teknikleri ve MIMO sistemlerinin aksine SM tekniği, verici antenlerde yalnızca bir adet RF zinciri oluşturarak antenler arası senkronizasyon ihtiyacını ortadan kaldırmış, verici anten maliyetini anlık olarak azaltmıştır. Ayrıca SM tekniğinde kablosuz kanallar arası girişimler önlenmekle birlikte klasik haberleşme tekniklerine göre daha yüksek spektral verimlilik sağlanmaktadır.

SSK, SM tabanlı modülasyon tekniklerinin temeli olarak da nitelendirilebilir ve en sade yapıya sahip SM tekniğidir. SSK tekniği, her bir veri iletimi anında yalnız bir aktif

verici anten üzerinden iletişim kurulmasına olanak verir. Bu tekniği diğer modülasyon tekniklerinden ayıran en önemli özelliği, yalnızca aktif verici antenin indisi ile veri iletimi sağlanmasıdır. Böylece, MIMO tekniklerinde karşılaşılan kanallar arası girişim, antenler arası senkronizasyon, alıcı karmaşıklığı gibi sorunlara karşı SSK ve diğer SM teknikleri ümit veren yeni nesil teknolojiler olmuştur.

RIS sistemleri ise 6. nesil (6th Generation, 6G) ve ötesi kablosuz ağların gerekliliklerini karşılayabilmek için spektral verimlilik açısından yüksek potansiyel sağlayan bir teknoloji olarak önerilmiştir. Veri iletimi esnasında iletimin sağlandığı kablosuz kanal ortamındaki çeşitli nesnelere, veri iletiminde performans düşüklüğüne neden olmaktadır. Kablosuz kanal performansında düşümlere sebep olan bu etkileri azaltmak, verici ve alıcı antenler arasına doğrudan bir görüş hattı (line-of-sight, LOS) oluşturmak için RIS destekli sistemler geliştirilmiştir. RISler mevcut sistemlere entegre edilerek; kablosuz kanalı etkin biçimde kontrol etme/değiştirme yeteneği ve anlık olarak faz yönlendirmesi ile sistem performansını artırma ve taşıyıcı sinyaller üzerinde doğrudan değişim yeteneği ile yüksek spektral verimlilik sağlamaktadır.

RIS ve SM tekniklerinin mevcut avantajları korunarak bu iki yöntem birleştirilmiş ve RIS - destekli SM (RIS-SM) adıyla yeni bir verici-alıcı anten teknolojisi olarak önerilmiştir. RIS-destekli SM tekniği henüz yeni bir teknoloji olarak önerildiğinden dolayı potansiyelinin tam olarak anlaşılabilmesi, geleneksel haberleşme yöntemlerinin sağlayamadığı yüksek spektral verimlilik, ultra veri hızı gibi ihtiyaçları karşılayabilmesi için daha detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Bu bağlamda bu tez çalışmasının amacı; özellikle son birkaç yılda oldukça popüler hale gelen RIS-SM şemalarının farklı kanal ortamlarındaki performansını analiz etmek ve yeni nesil kablosuz haberleşme sistemleri için potansiyelini belirlemektir.

Bu tezin materyal ve yöntem kısmında ilk bölümde MIMO sistemlerden bahsedilmiştir. İkinci bölümde kanal ortamları hakkında bilgi verilmiş, sönümlenmeli kanal modellerinden Rayleigh, Rician, Nakagami-m ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modelleri detaylı olarak incelenmiştir. Üçüncü bölümde SM ve SSK tekniklerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde RISler ve çalışma prensipleri hakkında genel bilgi verilmiştir. Beşinci bölümde ise RIS-SM şemaları ele alınmıştır. Ayrıca RIS-SM ve RIS-SSK şemalarında hata tahmini için ML detektörü kullanılarak performans analiz hesaplamaları detaylı olarak yapılmıştır. Son olarak tezin araştırma sonuçları ve tartışma kısmında ise RIS-SM şemalarının farklı sönümlenmeli kanal modelleri için bit hata oranı performans analizi uygulamaları yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, ilk olarak kablosuz haberleşme teknolojisindeki gelişmelerden bahsedilmiş, 5. nesil (5th generation, 5G) ve ötesi için haberleşme teknoloji hedefleri ele alınmıştır. Devamında MIMO haberleşme teknolojisi ile alakalı literatür çalışmalarına değinilmiştir. Ardından tez çalışmasında kullanılan SM tabanlı sistemlere (SM ve SSK) ait literatür çalışmaları alt başlıklar halinde verilmiş, daha sonrasında ise RIS teknolojisi ile alakalı olarak yapılan çalışmalara detaylı olarak yer verilmiştir. Son olarak RIS-SM ve RIS-SSK şemalarıyla ilgili literatür çalışmaları ele alınmıştır.

2.1. Kablosuz Haberleşme Teknolojisinin Gelişimi

Radyo ve televizyon yayıncılığının kullanıma sunulması ile gündeme alınan uydu iletişimi, kablosuz haberleşme sistemlerinin en eski uygulamaları olarak nitelendirilebilir. Bu teknolojilerin hizmete girmesiyle birlikte kablosuz haberleşme alanında olağanüstü gelişmeler yaşanmıştır. Son 50 yılda, neredeyse her on yılda bir en son yeniliklerle yeni nesil bir mobil teknoloji tanıtılmıştır. Mobil bant genişliği gereksinimleri, sesli arama ve mesajlaşma uygulamalarından ultra yüksek tanımlı (ultra high definition, UHD) videoya ve çeşitli artırılmış gerçeklik/sanal gerçeklik (augmented reality, AR / virtual reality VR) uygulamalarına evrilmiştir. Dünya çapındaki tüketiciler ve iş kullanıcıları, mobil ağlar için yeni talepler ve beklentiler üretmeye devam etmektedir. Bu süregelen eğilimin, yeni mobil uygulamaların benimsenmesi ve kullanılmasıyla yükselerek devam edeceği öngörülmektedir.

Günümüzde kablosuz iletişimin uygulanabildiği birçok sistem vardır. Ancak kablosuz iletişime olan ilgi daha çok 1980'lerin başında 1. nesil (1st generation, 1G) cep telefonlarının ortaya çıkması ile artmıştır. 1G kablosuz sistemler, iletimi analog olarak yalnızca ses hizmetleri için yapabilmekte iken; 1990'ların başında tanıtılan ikinci nesil (2nd generation, 2G) hücreli ağlar, veri iletimini dijital teknolojilere evirmiş ve sese ek olarak faks gönderimi ve düşük veri hızı sağlama (9,6 kbps'ye kadar) gibi hizmetleri kapsamıştır (Sarkar ve ark. 2006). Geliştirilmiş 2G sistemlerin sürümleri orta hızlı (100 kbps'ye kadar) devre ve paket anahtarlamalı veriler gibi daha gelişmiş hizmetleri desteklerken üçüncü nesil (3rd generation, 3G) mobil sistemler, hızlı hareket eden kullanıcılar için yüksek bit hızını (144–384 kbps) ve yavaş hareket eden kullanıcılar için

yaklaşık 2 Mbps'ye kadar bit hızlarını desteklemek üzere 2000 yılı civarında standartlaştırılmıştır. 3G sistemler yapılan geliştirmelerle birlikte uydu-yer bağlantı veri hızını 3,6 Mbps'ye kadar yükselten yüksek hızlı uydu-yer bağı paket erişimi (high speed downlink packet access, HSPDA) gibi genel olarak 3.5G olarak adlandırılan birkaç gelişmiş teknoloji önerilmiştir. Teknolojik cihazların gelişimi ile birlikte ses, görüntü, video içeriklerinin kullanıcılara ulaşımının kolaylaşması sonucu 3G sistemlerinin sağladığı veri hızları yeterli olamamış dördüncü nesil (4th generation, 4G) kablosuz standardını beraberinde getiren çok daha gelişmiş teknikler geliştirilmiştir (Mesleh ve Younis, 2018).

Beşinci nesil (5th generation, 5G) standartları, mevcut kablosuz teknolojilere kıyasla çok daha yüksek veri hızları vaat etmektedir. Cisco tarafından yayınlanan bir basın bülteninde 2023 yılına kadar küresel nüfusun yüzde 70'inden fazlasının (5,7 milyar kişi) mobil bağlantıya (2G, 3G, 4G veya 5G) sahip olacağı, dünya nüfusunun yüzde 66'sının (5,3 milyar kişi) internet kullanıcısı olacağı belirtilmiştir (Cisco, 2020a). Veri transferindeki ivmelenme açısından 2018'de 45,9 Mbps olan küresel sabit geniş bant hızlarının 2023'e kadar 110,4 Mbps'ye ulaşması beklenmektedir. Mobil (hücre) ağ bağlantı hızı 2018'de 13,2 Mbps iken bu değer 2023'te 43,9 Mbps'ye ulaşacağı öngörülmektedir. 5G teknolojisinin, 2023 yılına kadar dünyanın mobil bağlantılarının %10'undan fazlasını destekleyeceği, ortalama 5G hızının saniyede 575 Mbps başka bir ifadeyle halihazırda kullanılan ortalama mobil bağlantıdan 13 kat daha hızlı olacağı öngörülmüştür (Cisco, 2020a).

2020'de güncellenen Cisco Yıllık İnternet Raporuna göre ise 2023 yılına kadar küresel nüfusun yaklaşık üçte ikisi internet erişimine sahip olacaktır. Rakamsal ifadeyle 2018'de 3,9 milyar (dünya nüfusunun yüzde 51'i) olan toplam internet kullanıcı sayısının 2023 yılına kadar 5,3 milyara (küresel nüfusun yüzde 66'sı) ulaşması beklenmektedir. Cihaz ve bağlantı sayısına göre ise IP ağlarına bağlı cihaz sayısı 2023'e kadar küresel nüfusun üç katından fazla olacaktır. Mobil cihaz kullanımı ile mobilitedeki artışın ise 2023 yılına kadar küresel nüfusun yüzde 70'inden fazlasına ulaşacağı bildirilmektedir (Cisco, 2020b).

Gelişmiş performans yetenekleriyle 5G, yapay zeka ve otonom arabalar, akıllı şehirler, endüstri, sağlık, eğitim, hizmet sektörüyle birlikte ses, video, medya içerikleri ve daha fazlasını içeren yeni ortaya çıkan Nesnelerin İnterneti (internet of things, IoT) uygulamaları için daha dinamik mobil altyapılar sunacaktır. Bu kadar büyük veri hızı, yeni spektrum ve daha fazla enerji verimli fiziksel katman tekniklerine duyulan ihtiyacı

zorunlu kılmaktadır. 5G standardının yüksek veri hızı gereksinimlerinin yanı sıra iletişim gecikmesi, güç tüketimi, donanım karmaşıklığı ve maliyetleri de önemli ölçüde azaltılmalıdır. Daha fazla veri hızı ve daha kaliteli hizmetler için böylesine büyük bir taleple, 5G kablosuz standardının geliştirilmesi beklenmektedir. Gerek endüstriyel gerekse akademik alanda bu beklentiyi karşılamak için son yıllarda yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda 5G standardı için önerilen birkaç teknoloji arasında, küçük ve büyük ölçekli konfigürasyonlara sahip MIMO teknikleri önemli veri hızı kazanımları vaat etmektedir.

2.2. Kablosuz MIMO Sistemleri ile İlgili Literatür Çalışmaları

Milimetrik dalga (mmWave) iletişimi, bilişsel ve işbirlikçi iletişim ve serbest uzay optik iletişimleri, MIMO teknikleri gibi fiziksel katman tekniklerinin 5G ağları için potansiyeli günümüzde kapsamlı bir şekilde araştırılmaya devam edilmektedir. Mevcut teknolojiler arasında, MIMO sistemleri, birden fazla verici antenden alıcıya aynı anda veri ileterek spektral verimlilikte bir artış vaat etmektedir. Salz (1985), karşılıklı olarak çapraz bağlanmış doğrusal bir kanal üzerinde çalışan çok kullanıcılı bir veri iletişim sistemini bir MIMO kablosuz haberleşme sistemi olarak önermiştir. 1987'de Winters, Salz'ın bu çalışmasından esinlenerek, aynı bant genişliğinde çoklu eşzamanlı iletimi sağlamak için çok yollu yayılımdan yararlanan sistemler üzerindeki temel sınırları araştırmıştır. Wittneben (1991), MIMO sistemlerin bant genişliği açısından verimli ilk iletim çeşitleme şemasını önermiştir (Wittneben, 1991). Foschini, veri hızını artırmak için uzaysal çoğullamayı (spatial multiplexing, SMX) kullanan Bell Labs katmanlı uzay zamanı (bell laboratories layered space-time, BLAST) olarak adlandırılan çok katmanlı uzay-zaman mimarisini tanıtmıştır (Foschini, 1996). Wittneben'in 1991 yılında önerdiği ilk iletim şemanın çeşitleme (diversity) avantajının optimal olan iletim antenlerin sayısına eşit olduğu bir başka makalede kanıtlanmıştır (Winters, 1998).

1998 yılında, o zamana dek önerilen MIMO iletim tekniklerine göre daha yenilikçi ve basit bir iletim çeşitliliği tekniği olarak Tarokh ve ark. (1998) tarafından geliştirilen tekniğe uzay-zaman kodlaması (space time coding, STC) adı verilmiştir. STC teknikleri, güvenilir kod çözmeye izin vermek için bir veri akışının çoklu, artıklık (redundancy) alıcıya ileterek çeşitleme kazanımları elde etme prensibine

dayanmaktadır. STC'lerde, maksimum ulaşılabilir spektral verimlilik, aktif her bir kanal için bir semboldür ve sadece iki verici anten ile elde edilebilir (Tarokh ve ark., 1998).

MIMO sistemlerinin kapasite analizi Telatar (1999) tarafından rapor edilmiş ve MIMO kapasitesinin, tek verici ve alıcı antenli bir sisteme kıyasla, verici ve alıcı antenler arasındaki minimum sayı ile doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ancak tüm bu MIMO teknikleri ve performans analizlerine rağmen BLAST gibi SMX sistemlerinde, MIMO sistemlerin pratik uygulamalarını engelleyen çeşitli sınırlamalarla karşılaşmıştır. Örneğin, birden fazla verici antenden bağımsız verilerin eşzamanlı iletimi, alıcı girişinde yüksek hesaplama karmaşıklığının çözülmesini gerektiren yüksek ICI oluşturmaktadır (Goldsmith ve ark. 2003). Ek olarak, yüksek ICI'nın varlığının SMX MIMO sistemlerinin performansını düşürdüğü gözlemlenmiş, herhangi bir kanal kusuru bulunması halinde önemli performans düşüşleri yaşandığı rapor edilmiştir (Damen ve ark., 2001).

SMX sistemleri, çoklu iletim antenlerini paralel veri akışlarını iletmek için kullanılacak bağımsız bağlantılar olarak ele alır. Bu nedenle, daha yüksek güvenilirlikle daha yüksek veri hızlarında daha fazla kullanıcıyı barındırmaya olanak tanır (Hoydis ve ark., 2011). Bununla birlikte, daha fazla verici antenin yerleştirilmesiyle enerji tüketimi ile donanım karmaşıklığı ve maliyeti önemli ölçüde artmaktadır. Güç amplifikatörleri, modülatörler, filtreler vb. dahil olmak üzere her verici anten, eksiksiz bir iletim zinciri tarafından çalıştırılmalıdır. Daha yüksek spektral verimlilik, tipik olarak, artan güç tüketimi neticesinde enerji verimliliğindeki düşüş ile ilişkilidir. Bu nedenle hem daha yüksek enerji verimliliği hem de spektral verimlilik elde etmek, 5G sistemleri için çözülmesi gereken bir ödünleşim (trade off) olarak nitelendirilebilir (Ngo ve ark., 2013).

Bu bağlamda önemli veri hızı kazanımlarıyla birlikte güç tüketimini azaltarak enerji verimliliğini artıracak, 5G standardı için önerilen küçük ve büyük ölçekli konfigürasyonlara sahip SMX bulunmaktadır.

2.3. Uzaysal Modülasyon (SM) Teknikleri ile İlgili Literatür Çalışmaları

SM teknikleri, verici antenlerin uzaysal konumunda bilgi bitlerini kodlayan alternatif MIMO iletim şemalarıdır. Uzay modülasyon tekniklerinin (space modulation techniques, SMT) temeli Mesleh ve ark. (2006) tarafından atılmış, geliştirdikleri yöntem SM olarak adlandırılmıştır. Diğer tüm SMT'ler, SM'den türetilmiştir. Bu tür sistemlerde,

vericideki mevcut antenlerden bir veya daha fazlası iletim süresince etkinleştirilir ve bilgi bitlerini iletmek için aktif anten veya antenlerin indisi kullanılır. SM'de vericide tek bir RF zincirine ihtiyaç duyulması bir avantaj olarak değerlendirilebilir. Çünkü, tek bir RF zinciriyle MIMO uygulaması, MIMO sistemlerdeki vericinin maliyet, karmaşıklık ve enerji tüketimi gibi sorunlarını potansiyel olarak azaltmaktadır. Ek olarak ICI'nın önlenmesi nedeniyle, maksimum olabirlik (maximum likelihood, ML) alıcısının düşük karmaşıklıkta bir uygulamasının düşünülebilir olduğu gösterilmiştir (Mesleh ve ark. 2006).

SM, uzaysal takımyıldız (constellation) kavramını tanımlayan ilk şemadır ve bilgiyi iletmek için modüle edilen uzamsal sembollerin kullanımını önermektedir. İletim esnasında hiçbir veri sembolünün iletilmediği, iletimin sadece uzaysal semboller ile sağlandığı yenilikçi bir SM konsepti olan SSK'nın geleneksel MIMO sistemlere göre daha iyi hata başarımı sağlayabildiği bilinmektedir (Jeganathan, 2009). Önerilen SM ve SSK teknikleri üzerine yapılan diğer çalışmalar sonucu geliştirilmiş SM şemaları ortaya çıkmıştır (Younis, ve ark. 2010). Azaltılmış alıcı hesaplama karmaşıklığının yanı sıra SM tekniğinde çoğullama kazancının elde edebildiği ispatlanmış, ayrıca SM tekniği ile bit hatası olasılığı performansının SMX tekniğine göre arttığı gözlemlenmiştir (Younis ve ark. 2013). SM kavramı zamanla araştırmacıların ilgisini daha fazla çekmiş ve kısa zaman içerisinde bu tekniğin performansı farklı yönlerden ve oldukça geniş ölçekte incelenmiştir (Mesleh ve ark. 2017).

2.4. Uzay Kaydırmalı Anahtarlama (SSK) Tekniği ile İlgili Literatür Çalışmaları

SSK şeması, 2001 yılında gelecekteki kablosuz sistemlerin veri hızını artırmak amacıyla verici anten indisi kullanan yenilikçi bir SM yöntemi olarak sunulmuştur (Chau ve Yu, 2001). SSK tekniğinde, diğer SM tekniklerinden farklı olarak sembol bitleri kullanılmamakta, veri iletimi sadece aktif verici anten indisinden sağlanmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda çoklu verici – alıcı anten tasarımlarıyla iletim sağlayacak geliştirilmiş SSK (generalized space shift keying, GSSK) konsepti öne sürülmüştür (Jeganathan ve ark., 2008).

2010 yılına kadar SSK üzerine yapılan çalışmalarda, alıcıda kanal durum bilgisi (channel state information, CSI) olduğu varsayımı altında, sadece optimal veya sezgisel alıcı-vericiler araştırılmış ve performansları sönmülmeli kanallar üzerinden analiz edilmiştir. Alıcıda kısmi kanal durum bilgisinin olduğu durumlar için optimal ML sezim

yönteminin performansının incelendiği bir çalışma 2010 yılında yapılmıştır (Renzo ve Haas, 2010a). Bu araştırmada elde edilen sonuçlara göre; SSK modülasyonunun performansının sönümlenen kanalların özelliklerinden, örneğin kanal korelasyonundan, sönümleme şiddetinden ve özellikle verici-alıcı kablosuz bağlantılar arasındaki güç dengesizliğinden önemli ölçüde etkilendiği gözlemlenmiştir. Öte yandan normal modülasyon şemalarının aksine SSK şemasında, optimum alıcı tasarımı için alıcı faz bilgisinden yararlanılmadığı durumlarda önemli bir performans kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Sönümlenmeli kanallar üzerinde SSK modülasyonunun verimli çalışması için doğru ve güvenilir kanal tahmin mekanizmalarının önemi vurgulanmıştır (Renzo ve Haas, 2010a). Yine SSK modülasyonunun performansının, vericinin ortalama kanal durumu bilgisine sahip olmasını gerektiren uygun fırsatçı güç tahsis yöntemleri ile geliştirilebileceği ispatlanmıştır (Renzo ve Haas, 2010b).

Chang ve ark. (2012) Hamming kod tasarımını dikkate alan farklı bir GSSK sistemi ele almış ve geleneksel GSSK sistemine kıyasla performans artışı rapor etmiştir. SSK sisteminin spektral verimliliğini arttırmak için ortogonal sembollerin bir veya iki verici antenden aynı anda iletildiği Bi-SSK olarak adlandırılan alternatif bir SSK şeması önerilmiştir (Liang ve ark. 2012). SSK sistemiyle karşılaştırıldığında, ihmal edilebilecek küçük bir performans düşüşüne rağmen veri hızında iki kat artış olduğu tespit edilmiştir.

İki verici antenin durumunu ele alarak, ne vericinin ne de alıcının kanal durumu bilgisine erişimi olmadığı durumların varsayıldığı ele alındığı bir çalışmada diferansiyel SM/SSK (Differential SM/SSK, DSM/DSSK) şeması geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım, herhangi bir eşit enerji sinyali takımyıldızına uygulanarak DSM'nin SM üzerinden performans düşüşününün 3 dB 'den daha az olabileceği ve alıcı anten sayısı azaldıkça kaybın azaldığı gösterilmiştir (Bian ve ark. 2015)

2015 yılında SM/SSK MIMO sistemlerinin genelleştirilmiş $\alpha - \mu$ ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanalların yetersiz CSI durumu varsayılarak farklı sönümleme parametrelerine göre ortalama bit hata oranı (average bit error rate, ABER) cinsinden detaylı performans analizi yapılmıştır. Her iki sönümleme kanalında α ve κ sönümleme parametreleri arttıkça sistem performansının kötüleştiği gözlemlenmiş; α , κ ve μ değerleri arttıkça yığın küme başına çoklu yol sayısının da artacağı, bunun da korelasyonu artıracığı ve bu durumun ABER'i düşürdüğü tespit edilmiştir (Badarneh ve Mesleh 2015).

Kaynak ve hedef veri iletim noktaları olarak ifade edilen her düğümün birden fazla antene sahip olduğu çok atlamalı MIMO ağlar için SSK tekniğinin kullanıldığı iki

farklı çok sekmeli işbirliği sistemi önerilmiştir (Som ve Chockalingam 2015). SSK'nın ABER değerleri ile geleneksel PSK'nın karşılaştırmasını gösterilmiş ve SSK'nın Faz Kaydırmalı Anahtarlama'dan (phase-shift keying, PSK) daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir.

Başka bir çalışmada, veri iletiminde kullanılan SSK sembollerinin kaynak tarafında seçilen bir kuvvetlendir-ve-aktar röle düğümü aracılığıyla değiştirildiği, röle seçimli iki yönlü MIMO bir SSK şeması önerilmiştir (Yarkin ve ark., 2017). Önerilen sistemin, röle seçimi olmadan geleneksel iki yönlü SSK şemasından daha iyi performans gösterdiği gösterilmiştir.

2.5. Uyarlanabilir Akıllı Yüzeyler (RISler) ile İlgili Literatür Çalışmaları

RISler, akıllı yansıtıcı yüzeyler veya geniş akıllı yüzeyler olarak da bilinen modern yenilikçi bir kablosuz haberleşme teknolojisi olarak nitelendirilmektedir. RISler kablosuz yayılma ortamını akıllıca yeniden yapılandırarak kablosuz ağların kapasitesini ve kapsamını artırma potansiyellerinden dolayı önemli ilgi görmüştür. Bu nedenle, RISler 6G iletişim ağları için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Liu ve ark. 2020).

RISler, kablosuz sistemin performansını artırmak amacıyla yansıtılarak geri dönen elektromanyetik (EM) dalgayı ayarlanmış faz ile yönlendirebilir. RISlerin bu yeteneği, kablosuz kanalı zamanla değişen bir belirleyici kanaldan kontrol edebilmesinden ve değiştirebilmesinden kaynaklanmaktadır. Fakat tüm bunlara rağmen RISlerin oluşturduğu MIMO kablosuz kanalların tanımlanması, modellenmesi ve aktif kanalların tahmin edilmesinin, yapılan araştırmalar neticesinde kapsamlı çalışmalar gerektirdiği ve zor olduğu kabul edilmiştir.

Bu bağlamda, Zegrar ve ark. (2020), RIS kablosuz kanalını MIMO sistemlerinde tanımlamakla alakalı olarak RIS-MIMO kanalların basamaklı kanal bağlantılarını ayırmak ve her bir bağlantıyı ayrı ayrı tahmin etmek için tekil değerlere ayrıştırma (singular value decomposition, SVD) kullanılarak bir kanal tahmin çerçevesi önerilmiştir (Zegrar, S. ve ark. 2020). Sayısal sonuçlar ile önerilen tahmin yönteminin daha az hata sağlarken düşük zaman yüküne sahip olduğu görülmüştür.

Son zamanlarda, kablosuz ağlarda RIS kullanarak akıllı radyo ortamları oluşturulması üzerine yapılan araştırmalar giderek artmıştır. Akıllı bir radyo ortamında yüzeyler, elektromanyetik dalgalarının yayılmasını programlanabilir bir şekilde

manipüle edebilir. Böylece kablosuz kanal, genel sistem performansını artırmak için optimize edilebilen kontrol edilebilir bir sistem bloğuna dönüştürülür.

RIS destekli kablosuz iletişimdeki araştırmalar yeterli düzeye ulaşamamıştır; birçok pratik uygulama açısından tam olarak anlaşılmamıştır. Ancak yayılma ortamını değiştirme fikri sadece kavramsal olarak ilginç değil, aynı zamanda çeşitli senaryolarda da son derece faydalıdır. Bu sebepten ötürü bu yeni teknolojinin ileriye dönük potansiyelinin oldukça yüksek olduğu görölmektedir. RIS alışma prensiplerini meta yüzeyler ve yansıtma dizileri üzerinde ayrıntılı olarak ele alan bir çalışmada ElMossallamy ve ark. (2020), kablosuz yayılımı şekillendirme yeteneğinden kaynaklanan sistem performans kazanımlarını elde etmek için pratik optimizasyon tekniklerinin gerekli olduğu ortaya konulmuştur.

Geleneksel düşük frekanslı iletişimlerle karşılaştırıldığında, mmWave - ortogonal olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access, NOMA) iletişiminin önemli bir zorluğu, iletim sinyalinin genellikle ciddi bir yol kaybına uğramasıdır. Son zamanlarda, RISler, bu sorunları hafifletmek ve muhtemelen ortadan kaldırmak için umut verici bir teknoloji olarak önerilmiştir (Xiu, Y. ve ark. 2020).

RISler birim hücrelerinin yansıma katsayılarını periyodik olarak değiştirme yeteneği sayesinde, bilgi modölyasyonunu ve iletimini uygun maliyetli ve enerji verimli bir şekilde gerçekleştirebilen çekici bir paradigma olarak ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte, çoğu durumda sadece RISlerin faz EM tepkisi esnek bir şekilde manipüle edilebilir, bu da RIS tabanlı vericilerin iletim hızını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Bu bağlamda, RIS tabanlı vericinin iletişim hızını artırmak için karesel genlik modölyasyonu (quadrature amplitude modulation, QAM) ve MIMO iletimi tasarlanmıştır (Tang ve ark. 2020a). Sonuç olarak önerilen yöntemin RISlerin uygun donanım maliyeti ve güç tüketimi için umut verici bir mimari sağladığı gösterilmiştir.

RISler programlanabilir bir meta-yüzeyin birim hücrelerinin yansıma katsayılarını değiştirme yeteneği ile kablosuz iletim için uygun maliyetli, enerji verimli bilgi modölyasyonu elde etmek için büyük potansiyele sahip yeni bir paradigmadır. RISlerin EM tepkileri genellikle sadece faz ayarlanabilir, bu da RIS tabanlı vericilerin kapasite oranını önemli ölçüde sınırlamaktadır. Bu bağlamda MIMO QAM iletiminin tasarımını kolaylaştıran genlik ve faz değişken modölyasyonunu elde etmek için bir RIS mimarisi önerilmiştir (Tang ve ark. 2020b). RISlerin donanım kısıtlamaları ve bunların sistem tasarımı üzerindeki etkileri tartışılmış ve analiz edilmiştir. RISlerin ultra masif MIMO (ultra massive, UM-MIMO) ve holografik MIMO teknolojilerini

uygun fiyatlı donanım karmaşıklığı ile gerçekleştirmek için avantajlı bir mimari sağladığı gösterilmektedir.

2018'de tamamlanan ilk 5G standardı, mmWave ve çoklu ortogonal frekans bölmeli çoğullama numerolojilerini kullanarak fiziksel katmana daha fazla esneklik kazandırmış olsa da, araştırmacılar daha sonraki 5G sürümleri için alternatif teknolojilerin potansiyelini keşfetmeye başlamışlardır. Bu teknolojiler arasında indis modülasyon (index modulation IM), NOMA, alternatif/gelişmiş dalga formları, düşük maliyetli masif MIMO varyantları, tera-hertz iletişimi ve yeni anten teknolojileri bulunmaktadır. Bu bağlamda, RIS-SSK ve RIS-SM şemaları da önerilmiş, RIS destekli iletişim kavramı IM alanında ele alınmıştır. Alıcıdaki sinyal kalitesini artırmak için gelen dalgalarının yansıma / saçılma özelliklerini istenen şekilde kontrol eden RISler aracılığıyla iletim, gelecekteki kablosuz iletişim sistemleri için uygulanabilir bir yöntem olarak görülmektedir. IM tabanlı RISlerin genel konsepti, yeni nesil kablosuz ağlar için yeni bir masif MIMO paradigması olarak önerilmiştir. Önerilen RIS-SSK ve RIS-SM şemalarının, mevcut alıcı antenler için akıllı ve RIS destekli bir indisleme mekanizması aracılığıyla son derece düşük sinyal gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) değerlerinde önemli ölçüde yüksek spektral verimlilik sağlama potansiyeline sahip olduğu gözlemlenmiştir (Başar, 2020).

Mevcut masif MIMO sistemlerinde, hüzme biçimlendirme (beamforming) için geleneksel faz dizileri kullanılır ve bu, yüzlerce yüksek çözünürlüklü faz değiştirici ve karmaşık besleme ağı gerektirir. Bu faz değiştiricilerin ve karmaşık besleme ağlarının yüksek güç tüketimi ve donanım maliyeti, pratik masif MIMO sistemlerinde anten dizisi ölçeğini sınırlar. Bu nedenle, büyük MIMO şemalarının potansiyel avantajları tam olarak gerçekleştirilememektedir. Bu hususla alakalı olarak enerji verimliliği yüksek kablosuz iletişimi desteklemek için dünyanın ilk RIS tabanlı kablosuz iletişim prototipi olma özelliğine sahip kablosuz iletişim tabanlı RISler için anten tasarımı ve prototip çalışması yapılmış, 256x2 bitlik bir RIS tasarlanmış, inşa edilmiş ve test edilmiştir (Dai ve ark. 2020). Bu prototip ile geleneksel fazlı dizilerin güç tüketiminin ve donanım maliyetinin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Deneysel değerlendirmeler sonucunda, RISlerin kablosuz iletişimdeki fizibilitesi ve verimliliği ilk kez kanıtlanmıştır. Test sonuçları, 2.3 GHz'de önerilen RIS'nin 21.7 dB i anten kazancı ve 28.5 GHz'de 19.1 dB i anten kazancı elde edebileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, bu anten tasarımı ve prototip çalışması ile birlikte yakın gelecekte RISlerin karmaşık arazilerde (örneğin dağlar, karla kaplı araziler ve açık deniz alanları) kablosuz iletişim,

yüksek hızlı havadan yere ve havadan havaya veri iletimi gibi geniş bir uygulama yelpazesi bulacağı düşünülmektedir.

RISler, yayılma kanalını uygun bir şekilde dönüştürebilmesinden dolayı yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilmiştir. Bu nedenle, günümüzde hem endüstriden hem de akademiden önemli ilgi görmüştür. Uygulamada, veri iletim hızı, senkrozasyonu ve optimum enerji verimliliği açısından RISler genellikle hem verici hem de alıcıya direkt görüş hattı (line-of-sight, LOS) içinde sağlayacak şekilde bir konumda konuşlandırılmaktadır. Bu bağlamda haberleşme sistemleri için verici ve alıcı arasındaki doğrudan kanalı dikkate alarak Rician sönmülmeli kanallardaki RIS destekli tek-girişli tek-çıkışlı sistem (single-input single-output system, SISO) sistemlerin ayrıntılı bir performans analizi Tao (2020) tarafından sunulmuştur. RISlerin etkili SNR kazancı sağlayabileceği gösterilmiştir.

Kablosuz iletişimin geliştirilmesi için verim maksimizasyon problemini RISler için pratik bir güç maliyeti kısıtlaması ile araştırılmıştır (Zou ve ark. 2020). Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre önerilen sistemin, rastgele faz kayması şeması ve RIS olmadan alt sınır çizgisine (lower bound) kıyasla üstünlüğü doğrulanmaktadır.

2.6. RIS – Destekli SM/SSK Şemaları ile İlgili Literatür Çalışmaları

RISlerin yetenekleri, akım yoğunluğunun kontrol edilmesi, antenin fiziksel yapısının ve besleme yöntemlerinin değiştirilmesi gibi farklı yaklaşımlarla elde edilebilir. Kablosuz kanal yolu seçimi ise varaktörler, RF anahtarları ve ayarlanabilir malzemeler gibi farklı teknikler aracılığıyla dahili mekanizmalar olarak gerçekleştirilir. MIMO teknikleri de dahil olmak üzere kablosuz iletişim sistemlerinin performansını iyileştirmek için RISlerin bu ayarlanabilir özellikleri kullanılabilir.

SSK ve SM gibi MIMO tekniklerini RIS teknolojisiyle birleştirme fikri maliyet, karmaşıklık ve performans açısından çok umut verici görünmektedir. Bu bağlamda, SSK performansını sistem karmaşıklığı ve hata performansı açısından iyileştirmek amacıyla RISler ve yayılma kanalı arasındaki etkileşimden yararlanırken, anten durumu seçimi ile SSK kullanan bir dizi RIS-SSK şeması önerilmiştir (Bouida ve ark. 2015). Önerilen RIS-SSK şemasının ortalama spektral verimlilik (average spectral efficiency, ASE) ve ABER açısından incelendiğinde geleneksel SSK tekniğine göre performansının arttırdığı gösterilmiştir. SSK ile aynı ASE değerleri için, RIS-SSK şemasının çok daha

iyi hata performansı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda uygulama maliyetini ve genel sistem karmaşıklığını önemli ölçüde azalttığı vurgulanmıştır.

RISler, bir RF zincirinin kullanılmasına ve SSK uygulamasında potansiyel bir sorun olan RF anahtarlama olmaksızın durumların seçilmesine izin vermektedir. Bununla birlikte ABER performansını optimize eden durumların seçilmesine olanak tanıyan RISler, ASE ve/veya ABER'i geliştirmek için kullanılabilir şekilde daha fazla esneklik sağlar. Ayrıca, RIS-SM ve RIS-SSK performansları, alıcıdan vericiye kanal koşulları hakkında bazı bilgiler geri gönderilerek çok daha fazla gelişime açık bir konu olmuştur.

SM/SSK tekniklerinde ana fikir, her iletim sırasında tek bir RF zincirinin kullanılmasıdır. Böylece, veri iletimi sırasında yalnızca bir anten etkin kalır, bu da antenler arası senkronizasyondan kaçınma ve kanallar arası parazitleri ortadan kaldırma avantajlarıyla birlikte gelir. SM/SSK bu düşük genel sistem karmaşıklığını sunarken, bu modülasyon şemaları, bazı popüler MIMO teknikleri ile karşılaştırıldığında daha iyi hata performansı sunmaktadır. SM ve SSK teknikleri avantajlarından dolayı, akademik camiada önemli ölçüde ilgi görmüştür. Ancak, SM/SSK'daki temel pratik uygulama zorluklarından biri hızlı RF anahtarlama sürecidir. Özel kodlama mekanizmaları nedeniyle, SM/SSK'daki aktif verici anten, her kanal kullanımında değişmektedir. Sonuç olarak, bu modülasyon teknikleri, sembol hızında çalışan yeterince hızlı tek bir adet RF anahtarına ihtiyaç duymaktadır.

Bu bağlamda, SM ve SSK tekniklerindeki RF anahtarlama sorununu çözmek ve tek bir RF elemanı ile çoğullama kazanımlarını sağlamak için yeni çoklu anten tasarımları olarak RIS – SM/SSK şeması önerilmiştir (Bouida ve ark. 2016). Birçok RIS kullanılması sayesinde, SSK tekniğinin SM ile karşılaştırıldığında daha düşük güç tüketimiyle birlikte daha düşük algılama karmaşıklığına sahip olduğu ve daha izlenebilir, analitik sonuçlar vereceği bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre belirtilmiştir.

Önerilen RIS-SSK/SM şemaları için maksimum enerji tabanlı optimal altı (greedy) ve kapsamlı arama tabanlı optimal ML dedektörleri ile elde edilen analitik ve bilgisayar simülasyonlu ABER sonuçları klasik yöntemlere göre oldukça düşük hata oranlarıyla yüksek veri hızlarına olanak tanıyan RIS destekli SSK/SM şemalarının, çok girişli çok çıkışlı (MIMO) çözümler bağlamında gelecekteki kablosuz iletişim sistemleri için potansiyel bir aday olabileceğini ortaya koymaktadır (Başar, 2019b).

RIS ve SSK/SM tekniklerinin potansiyelleri göz önünde alınarak hem RISlerin hem de SSK'nın tüm doğal avantajlarını korumak için bir RIS tabanlı SSK şeması önerilmiştir (Canbilen ve ark. 2020). Spesifik olarak, ortalama bit hata oranının (ABER) hesaplanması için bir ML detektörü kullanılarak matematiksel bir çerçeve sunulmaktadır. Elde edilen sonuçlar, önerilen şemanın, artan alıcı karmaşıklığına rağmen klasik MIMO tekniklerine göre yüksek enerji verimliliği ile oldukça güvenilir bir iletimi mümkün kıldığını göstermiştir.

Hem verici hem de alıcı anten indisini kullanmak için bir başka çalışmada RIS-SM şemasının teorik ABER performans sınırı araştırılmıştır (Ma ve ark. 2020). RIS-destekli SM şeması çeşitlilik kazanımı elde etmek için anten seçimi (antenna selection, AS) senaryosuna genişletilmiş, AS destekli RIS-SM'nin geleneksel RIS-SM ile karşılaştırıldığında ABER açısından daha sağlam olduğu kanıtlanmıştır.

Bununla birlikte, hem fiziksel alıcı-verici hem de RISlerin, gerçek iletişim senaryolarında sistem performansını azaltabilecek göz ardı edilemez donanım kusurlarına sahip olmasına rağmen, literatürde genellikle ideal donanıma sahip durumları tartışılmaktadır. Bu bağlamda, doğrudan dönüşümlü alıcı-vericilerde önemli bir bozulma oluşturan baz istasyonunda (base station, BS) eş-faz/dik faz- dengesizliği (in-phase (I) and quadrature phase (Q) imbalance, IQI) varlığında bir RIS-SM şemasının performansını araştırılmıştır (Canbilen, 2021). Teorik bulguları doğrulayan kapsamlı bilgisayar simülasyon sonuçları, geleneksel SM şemalarının performansının RISler kullanılarak önemli ölçüde iyileştirilebileceğini gösterirken, alıcıda (Rx) ayarlanmış faz bilgisine sahip olmanın, enerji açısından önemli kazanç sağladığı kanıtlanmıştır.

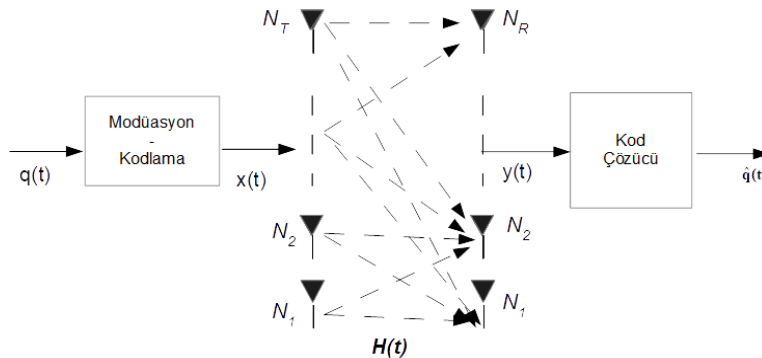
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, MIMO kablosuz haberleşme sistemleri, sönümlenmeli kablosuz kanal ortamları, tezde kullanılan SM teknikleri, RIS sistemleri, RIS-SM şemaları ve önerilen bu sistemlerin ML yöntemi ile hata olasılık hesaplamaları sırasıyla detaylı bir biçimde anlatılmıştır.

3.1. Çok Girişli Çok Çıkışlı (MIMO) Haberleşme Sistemleri

MIMO haberleşme sistemleri, aynı anda çoklu verici antenden çoklu alıcı antene veri iletimi sağlayarak spektral verimliliği artıran haberleşme sistemleridir. MIMO kablosuz haberleşme sistemlerin temel hedefi, maksimum miktarda verinin en az iletim hatasıyla iletimini gerçekleştirmek için yüksek veri iletim hızı sağlamak, iletim yapılan kanalın kapasitesini artırmak ve servis kalitesini artırmaktır.

Kablosuz haberleşmede verici anten ile alıcı anten, iletim kanalı olarak nitelendirilen ve farklı sönümlenme durumlarına göre karakteristiği değişebilen bir ortam aracılığıyla iletişim kurar. Verici ve alıcı antenler arasındaki boş alan ortamı (fiziksel ortam) yayılma ortamı olarak adlandırılır ve verici-alıcı arasında iletilen sinyalin yayılımını etkileyecek her türlü elemanı içerir. Yayılma ortamı, MIMO kanalın kapasitesini belirlemede çok önemli bir rol oynar. Dolayısıyla MIMO kablosuz kanalların gerçeğe yakın bir şekilde modellenmesi, bu alanda gerçekleştirilecek çalışmalar için ciddi bir önem arz etmektedir. MIMO kablosuz haberleşme sistemlerinde iletilecek veri, verici antenler vasıtasıyla iletim kanal ortamına giriş yapar ve kanal ortamından çıkan veri alıcı antenlere ulaşır. Şekil 3.1'de N_T verici antenli ve N_R alıcı antenli MIMO sistem modeli gösterilmektedir (Mesleh ve Alhasssi, 2018).



Şekil 3.1. Genel MIMO sistem modeli.

Bu sistem, ayrık zaman modeli ile Eşitlik 1'deki gibi temsil edilebilir:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{N_R} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1N_T} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N_R,1} & H_{N_R,2} & \cdots & H_{N_R,N_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T^1 \\ x_T^2 \\ \vdots \\ x_T^{N_T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_R} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada, \mathbf{x}_t , N_T uzunluğunda iletilen vektörü, n , alıcı girişinde görülen bir N_R uzunluklu eklenebilir beyaz Gauss gürültüsü (additive white gaussian noise, AWGN) vektörünü göstermektedir. H , N_T adet verici anten ve N_R adet alıcı anten arasındaki yol kazançlarını temsil eden bir $N_R \times N_T$ boyutlu kanal matrisidir. Ayrıca y , N_R uzunluklu olup alınan sinyali temsil etmektedir (Kumbhani ve Kshetrimayum 2017).

Eşitlik 1'de matematiksel ifadesi verilen bir MIMO sistem basitleştirilmiş olarak Eşitlik 2'deki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x}_t + \mathbf{n} \quad (2)$$

Verici anten kısmında kaynak bitleri olarak adlandırılan iletilecek veriler öncelikle belli modülasyon tekniklerine göre bir kodlayıcı aracılığıyla Şekil 1.1'de gösterildiği gibi \mathbf{x}_t sembol vektörüne dönüştürülür. Kodlayıcıdan çıkan modüleli sinyal, iletim kanalı olarak adlandırılan verici-alıcı anten arasındaki kablosuz kanal ortamında iletim boyunca kablosuz kanal ortamının doğal etkileri olan gürültü ve sönmüleden etkilenmektedir. Çeşitli etkilere maruz kalarak hedef nokta olarak ifade edebileceğimiz alıcıya ulaşan sinyal kod çözücü algoritmalar aracılığıyla gürültüden arındırılarak iletilen kaynak bitleri tahmin edilmektedir.

3.2. MIMO Kablosuz Kanal Ortamı

Vericiden yayılan sinyaller, çok yollu sönmülenmeli iletim kanalları üzerinden alıcıya ulaşır. Verici ve alıcı arasında iletimin sağlandığı yayılma kanalı, doğal iletim ortamının bir gereği olarak statik veya hareketli yansıtıcı nesnelere ve rastgele değişen bir ortama sebep olan dinamik saçıcı engellerden oluşmaktadır. Yayılma ortamı, MIMO kanalının kapasitesini belirlemede önemli bir etken olarak değerlendirilmektedir.

Çok yollu sönümleme; rastgele gecikmeli, yansıyan, saçılan ve kırılan sinyal bileşenlerinin yapıcı ve yıkıcı kombinasyonundan kaynaklanır. Bu tür sönümleme nispeten hızlıdır ve bu nedenle kısa vadeli sinyal değişimlerinden sorumludur. Radyo yayılım ortamının doğasına bağlı olarak, çok yollu sönümleme zarfının istatistiksel davranışını tanımlayan farklı modeller vardır (Mesleh ve Alhassi 2018).

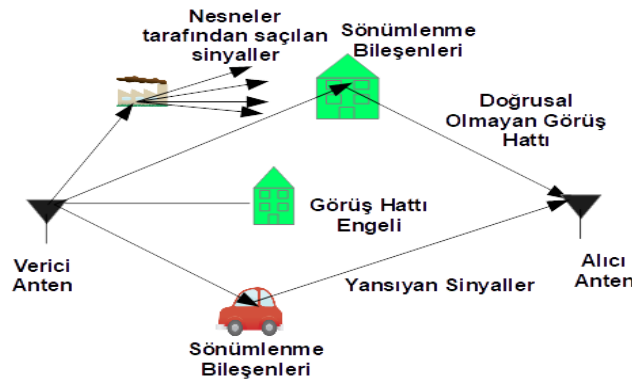
Bu bölümde Rayleigh, Ricean, Nakagami-m ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kablosuz kanal modelleri verilmiştir.

3.2.1. Rayleigh Sönümlenmeli Kanal Modeli

Verici ve alıcı arasında direkt görüş hattı olmayan (non-line-of-sight, NLOS) yayılım için, iletilen sinyal geniş yüzeylerden yansıyarak, keskin kenarlardan dolayı kırınımına uğrayarak ya da pürüzlü yüzeylerden saçılarak bina, ormanlar, tepeler gibi çeşitli engellerden geçerek alıcıya iletilir. Bu durumun, iletilen sinyalin çok sayıda kopyasının, farklı gecikmeler ve faz kaymaları ile farklı uzunluktaki yollardan alıcıya ulaşmasına neden olur ve genellikle karmaşık bir Gauss rastgele süreç olduğu varsayılmıştır (Kshetrimayum, 2017).

Rayleigh sönümlenmeli kanal modeli genellikle verici ve alıcının arasında LOS olmadığı düşünülür. Bu rastgele süreç için kanal katsayılarının zarfı dağılımı Rayleigh dağılımlı olarak modellenmiştir. Bu nedenle, alınan karmaşık sinyalin tüm saçılan ve yansıyan bileşenlerinin toplamı, $h \sim CN(0, 1)$ ile verilen sıfır ortalamalı karmaşık Gauss rastgele değişkeni olarak modellenir (Mesleh ve Alhassi, 2018).

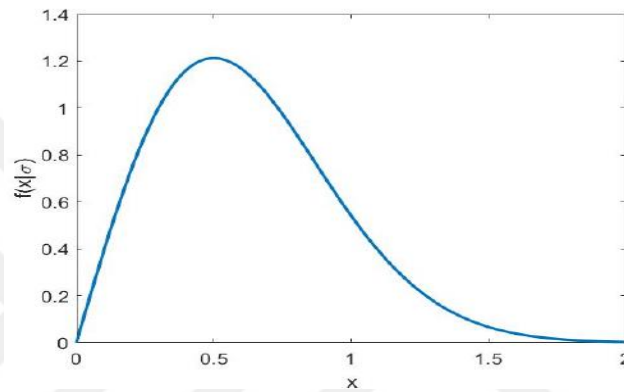
Rayleigh Sönümlenmeli kanal modeline ait örnek bir kablosuz kanal ortamı Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Rayleigh sönümlenmeli kanal modeli.

Bu modelde kanal bozulmalarının genellikle kompleks sayılarla ifade edildiğini dikkate alınarak, reel ve imajiner bileşenleri sıfır-ortalamalı bağımsız Gaussian değişkenler olan bir kanalın zarfının Rayleigh dağılımına sahip olduğu söylenebilir. Eğer x bir kanalın zarfını göstermek üzere Rayleigh dağılımına sahipse, σ^2 varyansı temsil etmek üzere, x 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) Şekil 3.3'teki gibi verilir ve matematiksel olarak Eşitlik 3'teki gibi ifade edilir (Canbilen, 2019).

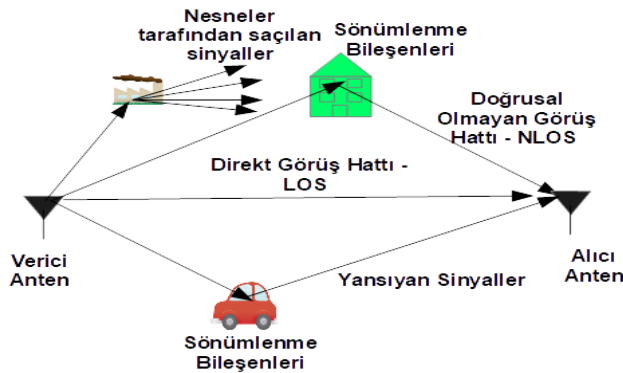
$$f(x|\sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$



Şekil 3.3 Rayleigh dağılımının PDF'si ($\sigma = 0.5$).

3.2.2. Ricean Sönümlenmeli Kanal Modeli

Verici ve alıcı birbirlerini bir LOS üzerinden görebiliyorsa, kanal genlik kazancı Ricean dağılımı ile karakterize edilir ve bu kablosuz kanal ortamı Ricean sönümlenmeli kablosuz kanal ortamı olarak ifade edilmektedir. Ricean Sönümlenmeli kanal modeline ait örnek bir kablosuz kanal ortamı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Ricean sönümlenmeli kanal modeli.

Genellikle bir güçlü LOS bileşeninden ve birçok rastgele daha zayıf bileşenden oluşan yayılma yollarını modellemek için kullanılır. Başka bir ifadeyle, Ricean sönümlenmeli kanal matrisi, bir LOS matrisinin ve bir Rayleigh Sönümlenmeli kanal matrisinin toplamı olarak Eşitlik 4'teki gibi modellenebilir (Mesleh ve Alhasssi, 2018):

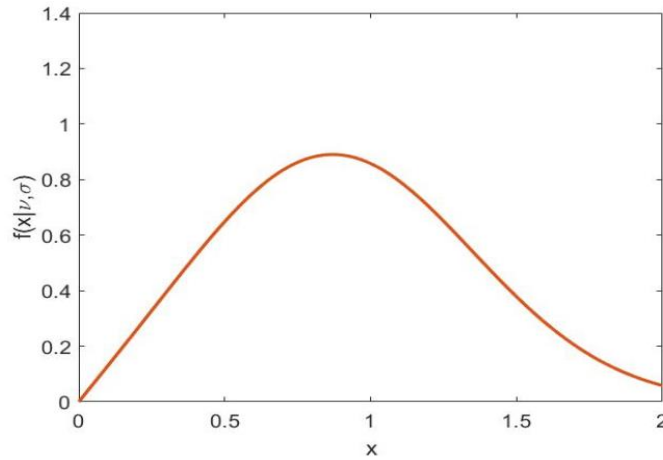
$$\mathbf{H}_{\text{ricean}} = \underbrace{\sqrt{\frac{K}{K+1}}}_{\text{LOS-Bileşenleri}} \bar{\mathbf{H}} + \underbrace{\sqrt{\frac{1}{K+1}}}_{\text{Sönümlenme Bileşenleri}} \mathbf{H} \quad (4)$$

Burada K Ricean faktörüdür; LOS ve saçılım gücü bileşenlerinin güçlerinin oranı olarak tanımlanır. I_0 sıfıncı dereceden birinci tip modifiye edilmiş Bessel fonksiyonunu temsil etmek üzere Ricean dağılımı matematiksel olarak Eşitlik 5'te verilmiş olup Ricean dağılımının PDF'si, Şekil 3.5'te verilmiştir.

$$f(x | \sigma, \nu) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x^2 + \nu^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{x\nu}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

Burada ν ve σ ; sönümlenme şiddetinin göstergesi olan ve Ricean faktörü olarak da adlandırılan K şekil parametresini kullanarak Eşitlik 6'daki gibi tanımlanmıştır (Canbilen, 2019).

$$\nu = \sqrt{\frac{K}{K+1}}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{2(K+1)}} \quad (6)$$



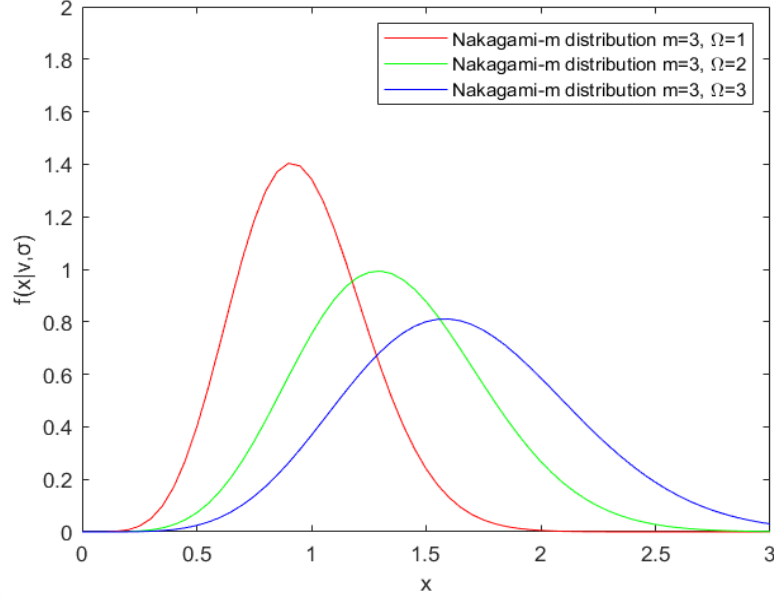
Şekil 3.5. Ricean dağılımının PDF'si ($\nu = 0.75$, $\sigma = 0.5$).

3.2.3. Nakagami-m Sönümlenmeli Kanal Modeli

Rayleigh ve Ricean dağılımları kablosuz haberleşmede sönümlenen bir kanalda alıcı tarafa ulaşan sinyallerin ya da tek bir bileşenin istatistiksel zamanla değişen yapısını tanımlamak için yaygın olarak kullanılır. Nakagami-m dağılımı ise birden çok kaynaktan gelen paraziti modellemek için 1940'ların başında Nakagami tarafından öne sürülmüş ve deneysel verilerle Rayleigh ve Ricean dağılımlarına göre kıyasla daha iyi bir eşleşme sağladığı gözlemlenmiştir. Birden çok bağımsız ve özdeş olarak dağıtılmış (independent and identically distributed, i.i.d.) Rayleigh sönümlü sinyallerin toplamı, Nakagami dağıtılmış sinyal genliğine sahiptir. Nakagami-m modeli, ortalama değerlerine yakın olarak Ricean sönümlenmeli kanal modeliyle eşleşmektedir. Nakagami-m sönümlemesi, deneysel veri katsayılarıyla elde edilen genel bir modeldir. Nakagami-m sönümlemenin avantajı, sönümleme parametresi m değişken değerleriyle çok çeşitli sönümleme istatistiklerini modelleyebilmesidir (Tarique ve Hasan, 2011). Nakagami-m dağılımı, çeşitli koşullarda (çoğunlukla LOS olmayan bir ortamda) sönümleme senaryosunu modellemek için kullanılır. Analizin basitliği nedeniyle araştırmacılar tarafından geniş çapta araştırılmaktadır. Alınan sinyalin sönümleme istatistiklerini modellemek için yaygın olarak kullanılır. m parametresi, farklı değerlerinin farklı sönümleme ortamlarını modelleyebileceği şekilde tanımlanır. m parametresi, farklı değerlerinin farklı sönümleme ortamlarını modelleyebileceği şekilde tanımlanır. Böylece Nakagami-m sönümleme modelinde $m=1$, Rayleigh sönümlemesine eşdeğer olan özel durumu temsil ederken One Sided Gaussian dağılımı $m = 1/2$ parametre değeriyle tanımlanır. $m \rightarrow \infty$ ise sönümlemesiz bir AWGN kanalını temsil etmektedir.

Ω , tamamlanmamış gama fonksiyonunu (incomplete gamma function) ve $\Gamma(\cdot)$, gama dağılımını ifade etmek üzere, Nakagami-m dağılımının PDF'si Eşitlik 7'de verilmiş olup Nakagami-m dağılımının PDF'si, Şekil 3.6'da verilmiştir. (Kumbhani ve Kshetrimayum 2017).

$$f(x|m, \Omega) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} e^{-\frac{mx^2}{\Omega}}; \quad \alpha \geq 0; \quad m \geq \frac{1}{2} \quad (7)$$



Şekil 3.6. Nakagami-m dağılımının PDF'si.

3.2.4. $\kappa - \mu$ Sönümlenmeli Kanal Modeli

$\kappa - \mu$ sönümlemesi, Nakagami - m dağılımından farklı olarak LOS ortamlarını modellemeye uygundur. Genelleştirilmiş sönümlenme dağılımı olarak önerildikten sonra, $\kappa - \mu$ sönümlenme dağılımı, kablosuz iletişim sistemlerinin analizi için araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmıştır. Nakagami-m sönümlenme gibi, $\kappa - \mu$ dağılımı da farklı fiziksel özelliklere sahip yansıtıcı engeller ve saçılma elemanlarından oluşan homojen olmayan ortamları içeren genelleştirilmiş bir sönümlenme senaryosunu modelleyebilir (Kumbhani ve Kshetrimayum 2017).

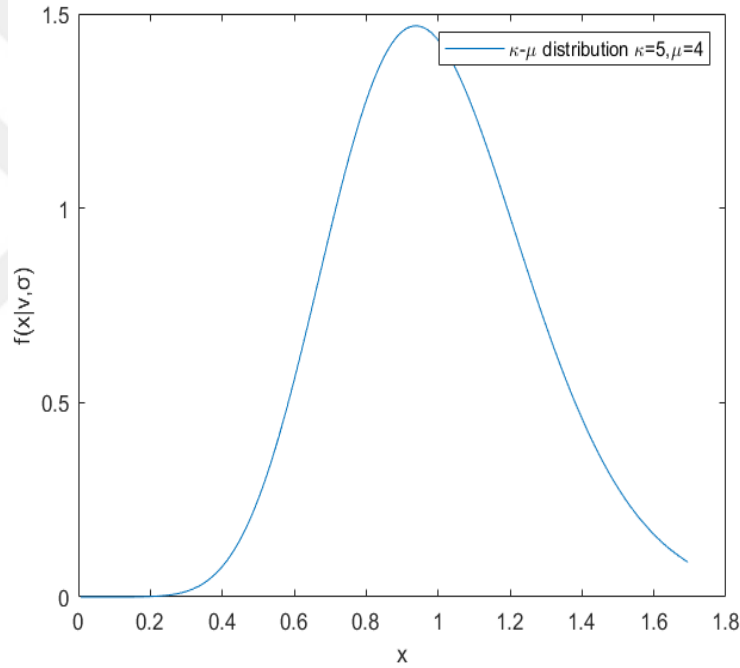
Nakagami - m sönümlenme modeline benzer şekilde, alınan sinyaldeki çok yollu bileşenlerin $\kappa - \mu$ dağılımında kümeler şeklinde olduğu varsayılır. Her kümenin bir dizi dağılık çok yollu bileşeni vardır. Farklı kümelerin gecikme yayılımı, her bir kümenin içerisindeki çok yollu bileşenlerin gecikme yayılımına göre daha büyüktür. Her kümenin aynı ortalama güce sahip olduğu varsayılır. $\kappa > 0$ olmak üzere κ parametresi, baskın bileşenin toplam gücü ile saçılan dalgaların toplam gücü arasındaki oranı temsil ederken; $\mu > 0$ olmak üzere μ , çok yollu kümelerin sayısıdır. Bu nedenle, bazı iyi bilinen sönümlenme dağılımlarını kapsamaktadır (Kshetrimayum 2017).

Bazı diğer sönümlenme dağılımları değişken κ ve μ parametre değerlerine göre $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modeli üzerinden elde edilmektedir. $\kappa = K$ ve $\mu = 1$ parametre değerleri için Ricean dağılımı elde edilirken, $\kappa \rightarrow 0$ ve $\mu = m$ parametre değerleri için

Nakagami-m dağılımı ve $\kappa \rightarrow 0$ ve $\mu=0.5$ parametre değerleri için tek taraflı Gaussian (One sided Gaussian) dağılımı elde edilmektedir. Tek taraflı Gaussian dağılımı, sıfır ortalama değere sahip sıradan bir normal dağılımın PDF olarak pozitif değerlerini aldığı bir dağılım olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca $\kappa =0$ ve $\mu=1$ parametre değerleri için Rayleigh dağılımı modellenmektedir (Mesleh, ve Alhassi, 2018).

$\Omega = E(x^2)$ olmak üzere alınan bir sinyaldeki $\kappa - \mu$ sönümlenme genliğinin PDF'si Eşitlik 8'de verilmiş olup $\kappa - \mu$ dağılımının PDF'si, Şekil 3.7'de verilmiştir.

$$f(x | \kappa, \mu) = \frac{2\mu(1+\kappa)^{\frac{\mu+1}{2}}}{\kappa^{\frac{\mu-1}{2}} e^{\mu\kappa} \Omega^{\frac{\mu+1}{2}}} x^{\mu} e^{-\frac{\mu(1+\kappa)x^2}{\Omega}} I_{\mu-1} \left(2\mu x \sqrt{\frac{\kappa(1+\kappa)}{\Omega}} \right), \quad x \geq 0 \quad (8)$$



Şekil 3.7. $\kappa - \mu$ dağılımının PDF'si.

3.3. Uzaysal Modülasyon (SM) Teknikleri

SM tekniklerinde; veri bitleri, modülasyon bitlerinin yanında SM bitleri de kullanılarak iletilir. Uzaysal bitler, MIMO bir sistemdeki çoklu verici antenlerden tüm alıcı antenlere giden farklı kanal yollarını temsil eden sembolleri oluştururken iken sinyal bitleri, önceden belirlenmiş bir takımyıldız diyagramına uygun şekilde QAM gibi klasik yöntemler kullanılarak modüle edilir. Genel olarak SM tekniği ile iletim

gerçekleştiren bir MIMO kablosuz haberleşme sisteminde her iletim anında, verici anten ile alıcı anten arası kanal yollarından biri veya daha fazlası sinyal sembolünü iletmek için kullanılır ve diğer tüm yollar etkisiz (pasif) kalır. Böylece kanallar arası girişim ve alıcı karmaşıklığı ciddi oranda azaltılmış, bazı tiplerinde tamamen engellenmiş olur.

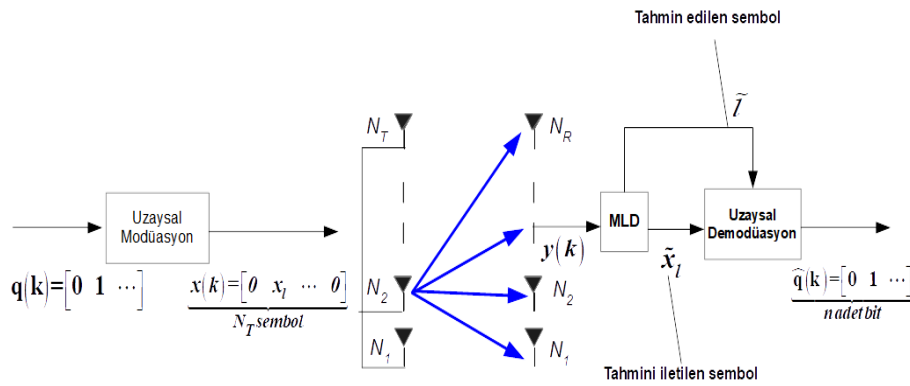
3.3.1. Uzaysal Modülasyon (SM)

SM, anten indisine bağlı modülasyon tekniklerinin temelidir ve mevcut yöntemlerin çoğu özel veya geliştirilmiş durumlar olarak SM'den türetilmiştir.

SM tekniklerinin temelini oluşturan klasik SM'de her bir iletim anında, yalnızca bir verici anten aktiftir. Bilgi bitleri, aktif verici antenin indisine (uzaysal sembol) ve aktif antenden iletilen sembole kodlanır. Bununla birlikte, SM yönteminin verici antenlere uygulandığı gibi alıcı antenler üzerinde uygulanması da mümkündür (Zou ve ark., 2020). SM tekniği için spektral verimliliğin matematiksel ifadesi N_T ve M sırasıyla verici anten sayısı ve modülasyon seviyesini ifade etmek üzere Eşitlik 9'da verilmiştir.

$$\text{Spektral verimlilik} = \log_2 (N_T M) \quad (9)$$

SM sistem modeli Şekil 3.8'te gösterilmektedir. Burada $q(k)$ iletilebilecek n adet bit vektörünü, x_l , l numaralı antenden iletilen sembolü, $x(k)$ ise $q(k)$ ile eşleştirilmiş sonuç vektörünü temsil etmektedir. Ayrıca $H(k)$ kanal katsayıları matrisini ve N_T verici anten sayısını ifade etmektedir (Mesleh ve ark. 2006).

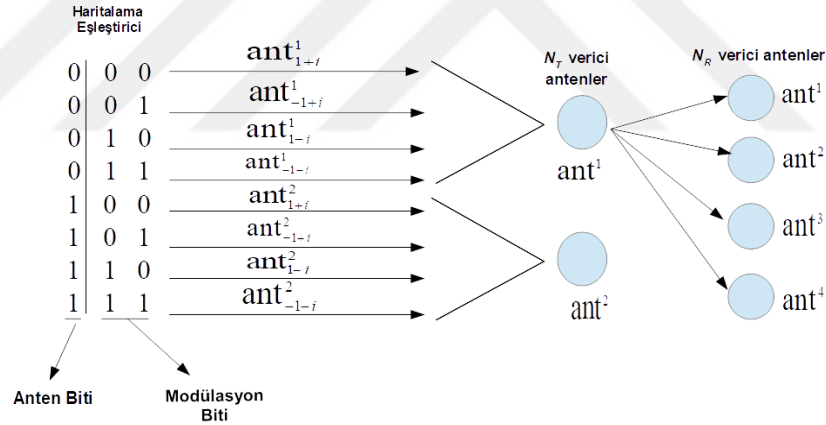


Şekil 3.8. SM sistem modeli.

Öncelikle gelen seri veri bitleri, seri/paralel kaydırmaya tabi tutulur ve veri bitleri iki gruba ayrılır. İlk grup $\log_2(N_T)$ adet bit içerir ve RF anahtarını kullanarak verici anten seti içinden bir anteni etkinleştirir. $\log_2(M)$ bitli ikinci grup herhangi bir klasik takımyıldız diyagramında bir sinyal takımyıldızı sembolüne haritalanmaktadır.

SM ile iletimi daha iyi açıklamak için verici anten sayısı $N_T = 2$, alıcı anten sayısı $N_R = 4$ anten yapılandırılmalı 4-QAM sembol iletimi kullanarak 3 bit verinin SM ile iletim örneği verilmiştir. İletim yapılacak kaynak bitlerimizi (0 1 1) olarak seçilirse giriş veri bitlerinin belirli bir zaman anında SM kullanılarak iletileceği varsayılacak olursa birinci grup veri biti "0" aktif anten indisini $\ell = 1$ olarak belirler. İkinci veri bitleri grubu "1 1" = $(-1 - i) \in S$ sembolünü seçer. $M = 4$ ve $N_T = 2$ olan SM için bir eşleme tablosu Şekil 3.9'da verilmiştir. $q(k)=[0,1,1]$ iletilecek bilgi biti vektörünün RF anahtarından sonra 4-QAM sembolüyle eşlenmesi ile elde edilen $x(k)$ sembol vektörü Eşitlik 10'daki gibi yazılabilir (Mesleh ve ark. 2006).

$$x(k) = [-1-i, 0]^T \quad (10)$$



Şekil 3.9. SM kodlama şeması.

İletim yapmayan anten sıfır enerjili olarak tanımlanır. $x(k)$ vektörünün iletimi için oluşan 4x2 boyutlu bir MIMO kanal vektörü Eşitlik 11'deki gibi olabilir (Mesleh ve ark. 2006).

$$H(k) = \begin{pmatrix} -0.5377 - 0.1229i & -0.6175 + 0.1516i \\ -0.5450 - 0.0964i & -0.3271 - 0.006i \\ 0.4624 - 0.2680i & 0.2058 + 0.3171i \\ 0.2854 - 0.1493i & -0.5190 + 0.2767i \end{pmatrix} \quad (11)$$

İletim sonrası alıcı anten tarafında oluşan vektör $y(k)$ olarak Eşitlik 12'deki gibi tanımlanır.

$$y(k) = x(k) * H(k) + n(k) \quad (12)$$

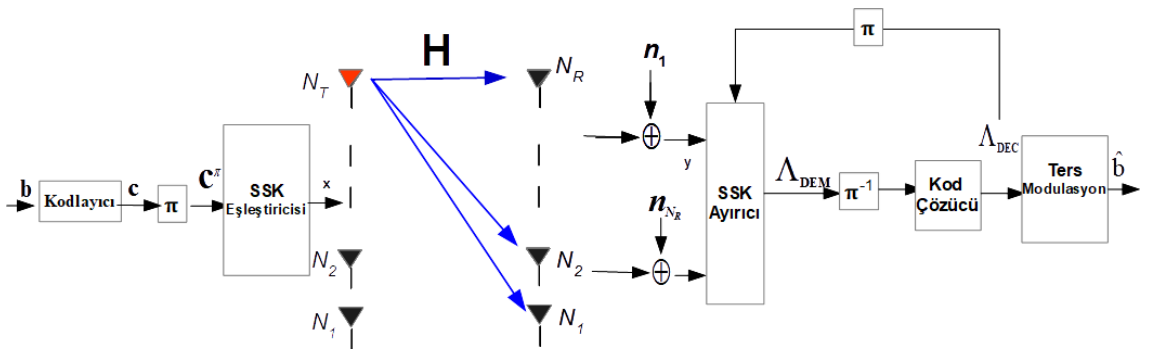
İletilecek olan $x(k)$ vektörü, $H(k)$ kanalından iletimi süresince $n(k)$ gürültü vektörü olmak üzere AWGN'den etkilenir. Bunun sonucunda alıcı tarafta oluşan $y(k)$ vektörü Eşitlik 13'teki gibi yazılabilir.

$$y(k) = [0.4149 + 0.6606i, 0.4486 + 0.6415i, -0.7304 - 0.1944i, 0.4348 - 0.1361i]^T \quad (13)$$

Sonuç olarak, SM tekniği çok sayıda bilgi bitini, tek bir bilgi sembolüne ve tek verici antenin fiziksel konumuna eşlemektedir. İletim tek verici anten üzerinden sağlandığı için vericide yalnızca tek bir RF zinciri oluşturur. Böylelikle verici antenler arasında hiçbir senkronizasyona gerek yoktur. Sadece bir verici anten iletim gerçekleştirdiği için verici maliyeti anlık olarak azalır. Ayrıca alıcı girişindeki kanallar arası girişim önlenmiş olur.

3.3.2. Uzak Kaydırmalı Anahtarlama (SSK)

SSK, diğer SM tekniklerine göre en basit yapıya sahip tekniktir. SSK sistem modeli Şekil 3.10'da gösterilmektedir (Jeganathan ve ark. 2009).



Şekil 3.10. SSK sistem modeli.

x , N_T verici anten sayısına göre oluşturulan takımyıldız vektörü olmak üzere y , iletim kanalı sonrası alıcıya ulaşan vektörü, N_R alıcı anten sayısını ve \mathbf{H} ise MIMO kanal matrisini ifade etmektedir.

SSK modülasyon sürecinde, k , kodlayıcı giriş sayısını temsil etmek üzere kanal kodlayıcıya giren rastgele bağımsız bilgi bit dizisi Eşitlik 14'deki gibi verilebilir.

$$\mathbf{b}=[b_1 \ b_2 \ \dots \ b_k] \quad (14)$$

n , kodlayıcı çıkış sayısını temsil etmek üzere kanal kodlayıcıdan çıkan bilgi biti dizisi ise bir vektör dizisi olarak Eşitlik 15'teki gibi elde edilir:

$$\mathbf{c}=[c_1 \ c_2 \ \dots \ c_k] \quad (15)$$

c vektör dizisi, $m=\log_2 N_T$ adet bit grupları halinde SSK eşleştiricisiyle takımyıldız vektörüne eşlenir. SSK modülasyonu, j 'inci antenden iletilen bir x_j sembolüne eşlenen m bit gruplarından oluşur. x_j vektörü Eşitlik 16'daki gibi, diğer tüm antenlerin boşa kaldığı durumda etkinleştirilmiş anteni belirtir.

$$x_j \triangleq [0 \ 0 \ \dots \ 1 \ \dots \ 0]^T \quad (16)$$

x_j sembol vektörü sadece antenin konumu hakkında bilgi verir ve x_j , sadece aktif antende '1' değerini alır. SSK tekniğini açıklamak amacıyla 2 bit/s/Hz spektral verimlilik ile sinyal iletimi için bir SSK modülasyonu örneği Tablo 1'de verilmiştir (Jeganathan ve ark. 2009).

Tablo 1. SSK için Haritalama Kuralı Örneği

$\mathbf{b} = [b_1 \ b_2]$	Sembol	j Anten indisi	$\mathbf{x} = [x_1 \ \dots \ x_4]^T$
[0 0]	0	1	[1 0 0 0] ^T
[0 1]	1	2	[0 1 0 0] ^T
[1 0]	2	3	[0 0 1 0] ^T
[1 1]	3	4	[0 0 0 1] ^T

Modüle edilmiş sinyal yani takımyıldız vektörü, $N_R \times N_T$ boyutlu MIMO kanal matrisi olmak üzere H kablosuz kanalından iletilir. Ayrıca iletim boyunca, gürültü eklenir ve bu gürültü Eşitlik 17'deki gibi ifade edilebilir.

$$n = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & \cdots & n_{N_R} \end{bmatrix}^T \quad (17)$$

j 'inci anten kullanıldığında iletim sonrası alıcı anten tarafında oluşan sinyal y olarak tanımlanır. E ortalama sinyal enerjisi olmak üzere y sinyali Eşitlik 18'deki tanımlanmıştır (Jeganathan ve ark. 2009).

$$y = \sqrt{E}Hx + n \quad (18)$$

Kanal durum bilgisinin alıcıda bilindiği varsayılarak alınan y sinyaline ML, Greedy, maksimum oran birleştirme (Maximal-Ratio Combining, MRC) gibi algoritmalar uygulanarak iletimi yapan aktif anten numarası tahmin edilmekte ve iletilen $x(k)$ vektörünün sezimi yapılmaktadır.

3.4. Uyarlanabilir Akıllı Yüzeyler (RISler)

RISler, çok sayıda pasif saçılma unsurundan oluşan düzlemsel bir dizidir. RIS olarak ifade edilen her bir saçılma elemanı, gelen EM dalgada elektronik olarak kontrol edilen bir faz kaymasını indükleyerek fiziksel kanalı en verimli şekilde kullanmak amacıyla yeniden şekillendirmektedir. RISler ile geliştirilmiş kablosuz iletişimin temel avantajı, son derece düşük güç tüketimi ve radyo ortamında büyük ölçekli dağıtım için kanal kapasitesini önemli ölçüde artırabilmesidir. Kablosuz iletişim sistemlerinin performansı, ortamdaki ve sistem tasarımcısının kontrolü dışındaki EM dalga yayılmasının ürünü olan kablosuz kanal durumu tarafından belirlenir. Alıcı-vericiler sadece kanal durumunu izler ve daha sonra belirli bir tutarlılık aralığında daha iyi kullanmak için modülasyonlarını ve kodlamalarını uyarlarlar. RISler daha basit iletişim tekniklerini kolaylaştırmak için kapasiteyi artırmak veya uygun yapıları empoze etmek için sistem tasarımcısının kablosuz kanalı değiştirmesine izin vermektedir (Zou ve ark. 2020).

Bu bağlamda, RISler 6G kablosuz ağların ve ötesinin gerekliliklerini karşılayabilecek yüksek potansiyelli bir teknoloji olarak önerilmektedir. RISler mevcut kablosuz haberleşme sistemlerine entegre edilerek, kablosuz kanalı etkin biçimde

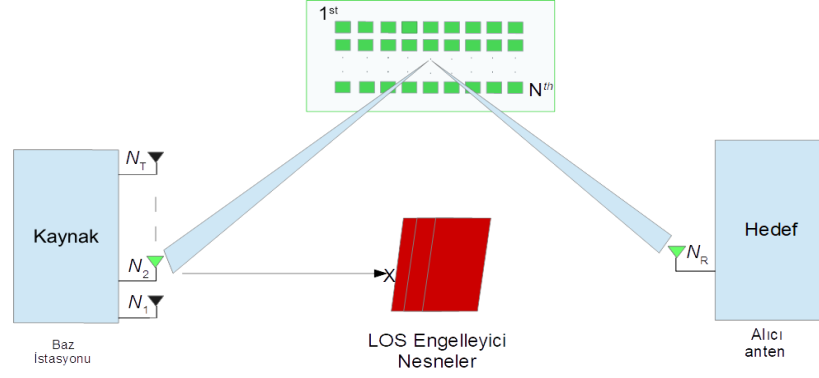
kontrol etme ve değiştirmeyi, faz yönlendirmesi ile sistem performansını artırmayı ve taşıyıcı sinyaller üzerinde doğrudan değişim yeteneği ile yüksek spektral verimlilik sağlamayı vaat etmektedir. RIS'nin birim hücrelerinin yansımaya katsayılarını periyodik olarak değiştirme yeteneği, kablosuz kanalı etkin biçimde kontrol etme ve değiştirmeyi yeteneğinden kaynaklanmaktadır. RIS elemanları, yansıyan EM dalgayı belirli açıya ve ayarlanmış faza yönlendirebilir. Ancak, RIS kablosuz kanalının modellenmesi ve tahmin edilmesi zorlu görevler olarak kabul edilmektedir (Yıldırım ve ark. 2021)

RIS, EM dalgaları yönlendirebilen ve uygulama sorunlarını azaltan donanım mimarisi sağlayan yeni bir teknolojidir. RIS, yansıyan dalgaların faz ve genlik gibi EM yanıtları üzerinde gerçek zamanlı manipülasyon gerçekleştirmek için harici sinyallerle kontrol edilebilen programlanabilir yapıdır (Başar ve ark. 2019). Böylece kablosuz iletişimde yüksek spektral verimliliği sağlamak amacıyla radyo sinyallerinin genlik ve fazlarında değişiklikler yaparak kablosuz kanalı en verimli Şekilde kullanma yeteneğini ortaya çıkarmaktadır.

RISler; alan programlanabilir kapı dizisi (Field Programmable Gate Array, FPGA) denetleyicisi, P tipi-z-N tipi (P-type, Intrinsic, N-type semiconductor, PIN) yarı iletken diyotlar ya da varaktr diyotlar gibi entegre elektroniklerle yüzeyine yansıyan EM dalgaları elektronik olarak kontrol edilebilen iki boyutlu yüzeyleridir. RISlerin temel işlevselliği, yüzeyine gelen EM dalgaların neden olduğu yüzey akımlarını kontrol ederek EM dalgaları yönlendirmektir. RISler, dalga sönümlemesi, yansımaya, kırılma, hzmeleme/odaklama, bölme/ayırma ve analog işleme gibi EM tabanlı temel işlevselliklerle üzerlerindeki akım dağılımını kasıtlı bir Şekilde kontrol etmeyi ve değiştirmeyi amaçlar. Yüzey akımı kontrolü, PIN diyotlar, varaktr diyotlar ya da mikro elektromekanik sistem anahtarları gibi anahtarlama elemanları ile gerçekleştirilir.

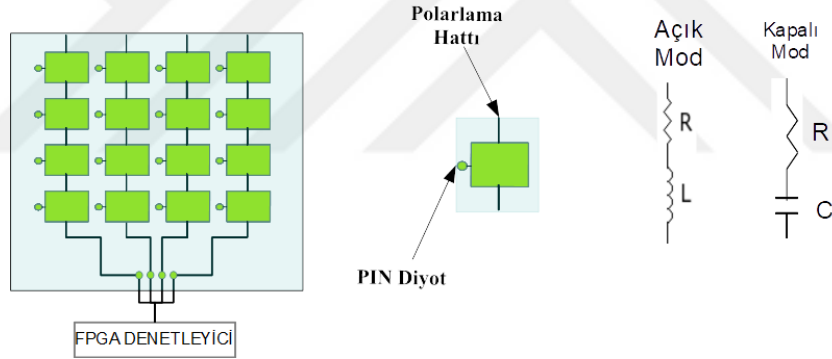
BS ile kullanıcı arasında etkin bir görüş hattının olmadığı durumlar için hem BS hem de kullanıcı ile net bağlantıları olan bir RIS, akıllı sinyal yansımaya yoluyla engelin atlanmasına yardımcı olur. Böylece aralarında sanal bir LOS bağlantısı oluşturur. Özellikle i mekn blokajına karşı oldukça savunmasız olan mmWave iletişimlerindeki kapsama alanı genişletmesi için kullanışlıdır (Wu ve ark. 2020).

Baz istasyonu ile arasındaki LOS hattının bir engel tarafından ciddi Şekilde engellendiği l bir bölgede bulunan bir kullanıcı için RIS destekli kablosuz ağ uygulaması Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. RIS destekli iletişim sisteminin basit bir örneği.

RIS, gerilimi ön gerilim hattı üzerinden kontrol ederek, PIN diyotlarla, Şekil 3.12'deki eşdeğer devrede gösterildiği gibi 'Açık' ve 'Kapalı' modlar arasında geçiş yapabilir, bu da radyan cinsinden π kadar bir faz kayması farkını gerçekleştirebilir (Pan, 2021). Faz kaydırma düzeylerinin sayısını artırmak için her öğeye daha fazla PIN entegre edilmelidir.



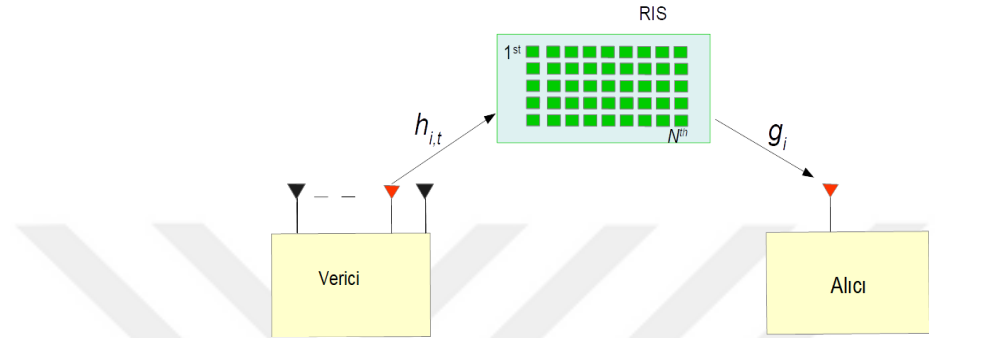
Şekil 3.12. Bir RIS mimarisi.

3.5. RIS - Destekli SM Şemaları

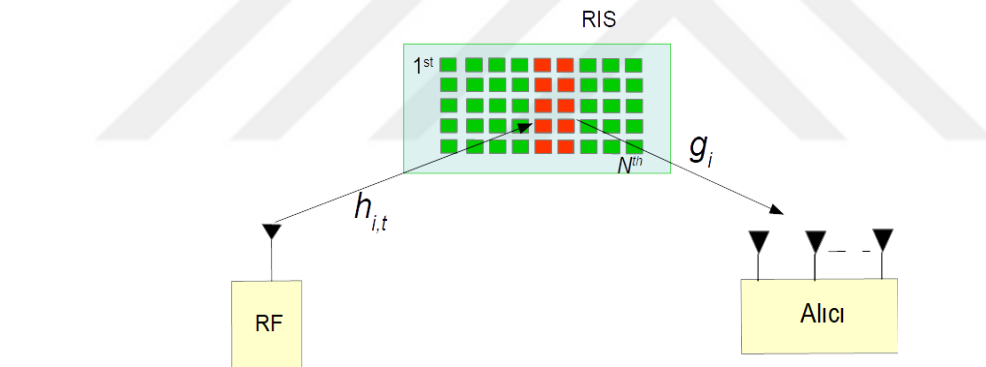
RISler, sinyallerin fazlarını yansıtıcı bir yüzey üzerinde etkin bir şekilde ayarlayarak kablosuz kanalın spektral verimliliğini artıran yeni nesil kablosuz iletişim tekniklerinin ihtiyaçlarını karşılamak için umut verici bir teknolojidir. Ayrıca alternatif MIMO kablosuz haberleşme tekniği olan SM ise veri iletimi için modülasyon bitlerinin yanı sıra bilgi bitlerini iletmek için aktif anten veya antenlerin indisi kullanılarak veri iletimini sağlar. RISler mevcut kablosuz haberleşme sistemlerine entegre edilerek, kablosuz kanalı etkin biçimde kontrol etme ve değiştirme yeteneği sağlanmaktadır. Bu

bağlamda, hem RIS hem de SM tekniğinin potansiyel faydalarını almak için RIS destekli SM şemaları önerilmiştir (Başar, 2020).

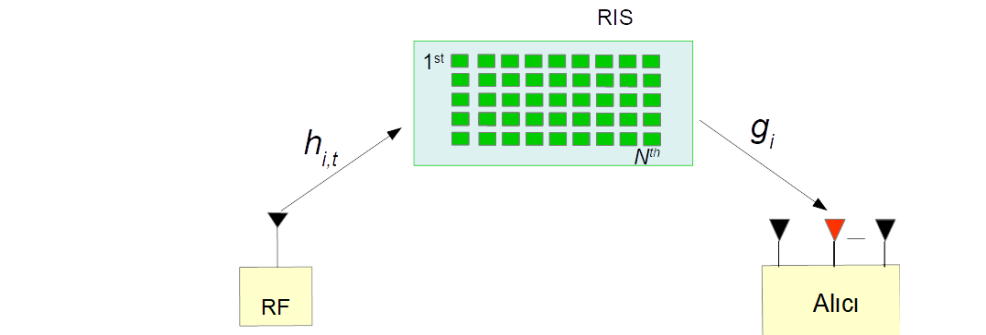
RIS-SM'nin kaynak, RIS veya hedefte uygulandığı üç konsept sırasıyla Şekil 3.13,14 ve 15'te gösterilmiştir (Başar, 2020). Bu tez çalışmasında, SM'nin alıcı ve verici tarafta uygulandığı şemalar kullanılmış ve farklı sönümlenmeli kanallardaki performansı incelenmiştir.



Şekil 3.13. SM'nin vericide uygulandığı RIS - destekli SM şeması.



Şekil 3.14. SM'nin RIS'te uygulandığı RIS - destekli SM şeması.

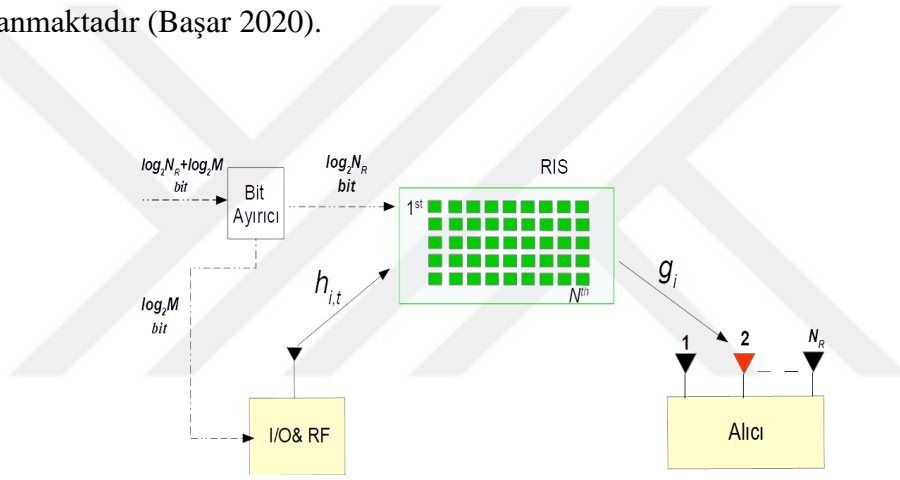


Şekil 3.15. SM'nin alıcıda uygulandığı RIS - destekli SM şeması.

3.5.1. RIS - Destekli RSM Şeması

Bu bölümde RIS elemanların kablosuz kanalı etkin biçimde kontrol etme ve değiştirme yeteneği, faz yönlendirmesi ile sistem performansını artırma ve taşıyıcı sinyaller üzerinde doğrudan değişim ile spektral verimliliği artırması gibi avantajlarından yararlanmak için yenilikçi bir MIMO haberleşme tekniği olan SM tekniğine entegre edildiği RIS-SM şeması ele alınmıştır.

İlgili RIS-SM şemasında, Şekil 3.16’da gösterildiği gibi, hedef alıcı antende SM uygulanmaktadır ve bu şema, tezin devamında RIS-RSM olarak anılacaktır. RIS kullanarak SM şemasının verimliliğini artırmak için bit ayırıcı ile bilgi bitleri $\log_2(M) + \log_2(N_R)$ olarak iki gruba ayrılarak RF kaynağında sıradan M seviyeli modülasyon uygulanmaktadır (Başar 2020).



Şekil 3.16. RIS destekli RSM Şeması.

$\log_2(N_R)$ bilgi biti grubu, m indisli seçilen alıcı antene göre RIS fazlarını ayarlanmasını Eşitlik 19'daki gibi sağlar.

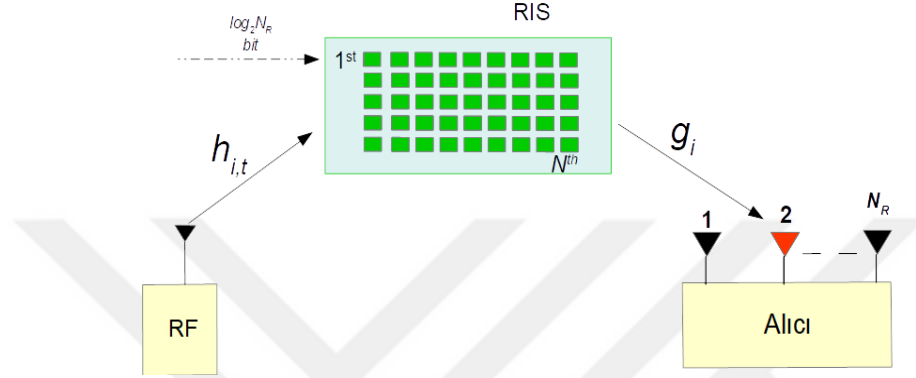
$$i = 1, 2, \dots, N \text{ için } \varphi_i = \psi_{m,i} \quad (19)$$

$\log_2(M)$ bitleri, bir RF zinciri yoluyla bir genlik/faz modülasyonlu sinyalin üretilmesi için RF kaynağına geçirilir. Sonuç olarak, x , M-QAM/PSK takımı yıldızlarından seçilen veri sembolü olmak üzere l . alıcı antende alınan sinyal, Eşitlik 20'deki gibi ifade edilir (Başar 2020).

$$r_l = \left[\sum_{i=1}^N g_{l,i} e^{j\varphi_i} \right] x + n_l, \quad l \in \{1 \dots N_R\} \quad (20)$$

3.5.2. RIS - Destekli RSSK Şeması

RIS kullanarak SSK şemasının performansını artırmak için RF kaynağı tarafından üretilen modüle edilmemiş taşıyıcı sinyal, Şekil 3.17’de gösterildiği gibi, gelen $\log_2(N_R)$ bilgi bitlerine göre seçilen belirli bir alıcı antende anlık alınan SNR değerini maksimize etmek suretiyle alıcıya yansıtılmaktadır (Başar, 2020). Bu yöntem, tezin devamında RIS-RSSK olarak anılacaktır.



Şekil 3.17. RIS - destekli RSSK.

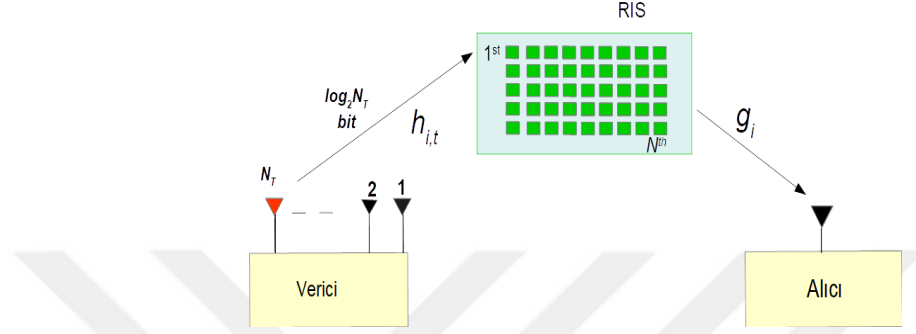
RIS-RSSK şemalarında RIS faz terimleri, hedef alıcı antendeki SNR değerini maksimize edilecek şekilde ayarlanır. SSK şemasının uygulandığı hedefin görevi alınan maksimum anlık SNR ile alıcı antenin indisini tespit etmektir. İletilen sinyal, N adet yansıtıcı elemandan yapılmış bir RIS tarafından yansıtılır. Alıcının l . anteninde alınan temel bant sinyali Eşitlik 21’deki gibi verilir (Başar, 2020).

$$r_l = \sqrt{E} \left[\sum_{i=1}^N g_{l,i} e^{j\varphi_{m,i}} \right] + n_l, \quad l \in \{1, \dots, N_R\} \quad (21)$$

E , modüle edilmemiş taşıyıcının iletilen sinyal enerjisidir. n_l , $CN(0, N_0)$ dağılımını izleyen l . aktif alıcıdaki AWGN örneğidir. Reflektör fazları $\{\varphi_i\}_{i=1}^N$, belirli bir alıcı antende alınan SNR değerini maksimize etmek için bilgi bitlerine göre ayarlanır (Başar, 2020). Gelen $\log_2(N_R)$ bitleri bir alıcı antenin m indisini belirtir ve RIS, fazlarını bu seçilen alıcı antene göre $i = 1, 2, \dots, N$ için $\varphi_i = \psi_{m,i}$ olarak ayarlar.

3.5.3. RIS Destekli TSSK İletim Şeması

Kaynak verici antenler ve hedef alıcı anten arasında görüş hattı olmaksızın çift atlamalı bir iletişim senaryosunda RIS, Şekil 3.18’de görüldüğü gibi N adet reflektör elemanından oluşurken, sistem çoklu verici anten ve tek bir alıcı antenden oluşmaktadır.



Şekil 3.18. RIS destekli TSSK iletişim şeması.

Buna göre, RIS aracılığıyla alıcı antende alınan sinyal Eşitlik 22’deki gibi yazılabilir.

$$y = \sqrt{E} \left(h_{i,t} e^{j\phi_i} g_i \right) + n \quad (22)$$

Burada $(t \in \{1, \dots, N_T\})$ olmak üzere, baz istasyonunun aktive edilmiş verici antenin indisidir. $h_{i,t} = \alpha_{t,i} e^{-j\theta_{t,i}}$ verici anten ve reflektör elemanları arasındaki sönmüleme kazancıdır, $g_i = \beta_i e^{-j\varphi_i}$ reflektör elemanları ile alıcı anten arasındaki sönmüleme kazancıdır, E iletilen sinyal enerjisidir. Böylece, alıcı antende alınan sinyal Eşitlik 23’deki gibi yeniden yazılabilir (Başar, 2020).

$$y = \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i e^{j(\phi_i - \theta_{t,i} - \varphi_i)} \right) + n \quad (23)$$

Kanal durumu (genlik ve faz) hakkında bilgi sahibi olan RIS yardımı ile kanal fazları elimine edilerek SNR değeri $\phi_i = \theta_{t,i} + \varphi_i$ şeklinde maksimize edilebilir (Başar, 2020). Böylece, alıcıda alınan sinyal Eşitlik 24’deki gibi yeniden yazılabilir.

$$y = \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) + n \quad (24)$$

3.6. En Yüksek Olabilirlik (ML) Sezimi Yöntemi

Bu bölümde, ML sezim (sembol algılama, symbol detection) yöntemi, SM tekniğinin de bir üyesi olduğu MIMO sistemler üzerinden anlatılmıştır.

Herhangi bir t sembol zamanında $N_T \times N_R$ boyutlu bir MIMO sistemin giriş-çıkış ilişkisi düz sönümlenmeli kanallar dikkate alınarak şu şekilde verilebilir.

$$\mathbf{r}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{s}_t + \mathbf{n}_t \quad (25)$$

Burada sembol zaman dilimi $t = 1, 2, \dots, N_L$ ve N_L paket uzunluğu olarak kabul edilebilir. Bu ifade matrisel formda daha açık bir şekilde Eşitlik 26'daki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} r_{1,t} \\ r_{2,t} \\ \vdots \\ r_{N_R,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11,t} & h_{12,t} & \cdots & h_{1N_T,t} \\ h_{21,t} & h_{22,t} & \cdots & h_{2N_T,t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1,t} & H_{N_R2,t} & \cdots & h_{N_R N_T,t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{1,t} \\ s_{2,t} \\ \vdots \\ s_{N_R,t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{1,t} \\ n_{2,t} \\ \vdots \\ n_{N_R,t} \end{bmatrix} \quad (26)$$

Temel olarak ML sezim yöntemi, verilen bir MIMO kanal matrisi \mathbf{H} için alıcı tarafta bilindiği varsayılan ve alınan sinyal vektörü \mathbf{r} 'den iletilen sinyal vektörü \mathbf{s} 'nin tahmin edilmesidir. Giriş sembolleri alfabeti, gerçek sistemler için makul bir varsayım olmak üzere, eşit-olasılıklı sembollerden oluştuğunda ML performansı optimum olacaktır. $s_{i,t}$, t sembol zamanında i 'nci verici antenden iletilen veri sembolü olmak üzere $s_{i,t} \in \mathbf{S}$ ve $i = 1, 2, \dots, N_T$ olarak yazılabilir (Kshetrimayum, 2017).

Devamında $\arg \min_x f(s)$, \mathbf{s} 'nin tüm olasılıkları arasında, $f(\mathbf{s})$, f fonksiyonunun değerini en aza indirecek olan belirli \mathbf{s} sembolünü ifade etmek için kullanılabilir. ML sezim yöntemi, alınan vektör ile iletilen sembol vektörlerinin tüm olası kombinasyonları arasındaki Öklid uzaklığını en aza indiren vektörü hesaplamaktadır ve matematiksel olarak Eşitlik 27'deki gibi ifade edilir.

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_x \|\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{s}\|^2 \quad (27)$$

Öte yandan, ML sezim yöntemi, $f(\mathbf{r}|\mathbf{s})$, alınan vektör \mathbf{r} için \mathbf{s} vektörünün olabilirlik fonksiyonu olmak ve n_t dairesel simetrik karmaşık Gauss gürültü vektörünü temsil

etmek üzere Eşitlik 28 maksimize eden en iyi sembol vektörünü bulmak şeklinde de uygulanabilir.

$$\hat{s} = \arg \max_{s \in \mathcal{S}^{N_T}} f(\mathbf{r} | \mathbf{s}) \quad (28)$$

Burada n_t gürültüsünün karakteristiği gereği $f(\mathbf{r} | \mathbf{s})$ olabirlik fonksiyonu, \mathbf{R}_n gürültünün matrisi olmak üzere Eşitlik 29'daki gibi karmaşık çok değişkenli Gauss dağılımına sahip olacaktır (Kshetrimayum, 2017).

$$f(\mathbf{r} | \mathbf{s}) = \frac{1}{\pi \mathbf{R}_n} \exp\left(-(\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{s})^H \mathbf{R}_n^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{s})\right) \quad (29)$$

Negatif bir üstel fonksiyonu maksimum değerine ulaştırmak, aşağıdaki Eşitlik 30'daki gibi argümanını minimum yapmaya eşdeğerdir.

$$\hat{s} = \arg \min_{s \in \mathcal{S}^{N_T}} (\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{s})^H \mathbf{R}_n^{-1} (\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{s}) \quad (30)$$

Verici anten sayısı $N_T = 2$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 2$ olan 2×2 boyutlu bir MIMO sistemini ML sezim yöntemi için t sembol zamanında ele alacak olursak, alınan sinyal vektörü \mathbf{r} , kanal matrisi \mathbf{H} , iletilen sinyal vektörü \mathbf{s} ve gürültü vektörü \mathbf{n} , Eşitlik 31'deki gibi yazılır (Kshetrimayum, 2017).

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Gerekli vektör ve kanal matris bilgilerini elde ettikten sonra $r_1 = h_{11}s_1 + h_{12}s_2 + n_1$ ve $r_2 = h_{21}s_1 + h_{22}s_2 + n_2$ olmak üzere düz sönümlenme için alınan sinyal vektörünü kanal matrisi, iletilen sinyal ve gürültü vektörü cinsinden Eşitlik 32'deki gibi yazılabilir.

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}$$

Sezicide, $s_k \in \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$ olmak üzere s_k 'nın M seviyeli takımyıldızında modüle edildiği 2×2 MIMO sistemi için t zamanında s_1 ve s_2 'yi tespit etmemiz

gerekmektedir ancak her iki alıcı anten için bu sinyaller arasında girişim mevcuttur. Bu durumlar için en uygun alıcı ML alıcısıdır. ML sezim yönteminde Öklid mesafesinin minimum uzunluğu, Eşitlik 33'ten yararlanarak bulunmaktadır.

$$\min_{i,j \in \{1,2,\dots,M\}} \left[\left\| r_1 - (h_{11}s_i + h_{12}s_j) \right\|^2 + \left\| r_2 - (h_{21}s_i + h_{22}s_j) \right\|^2 \right] \quad (33)$$

Örneğin, 16-QAM için ele alacak olursak, s_1 ve s_2 vektörleri, her biri $M=16$ sembol sayısından birisine karşılık gelmek üzere 16×16 çift kombinasyonu anlamına gelir. Başka bir ifade ile $16^2 = 256$ 'lık bir metrik hesaplama gerekmektedir. 4×4 MIMO sistemi için $N_T = N_R = 4$, $16^4 = 65536$ metrik hesaplama gerekir. Kod çözme karmaşıklığı, verici anten sayısı (N_T) ve takımyıldız boyutu (M) ile $|S|^{N_T} = M^{N_T}$ şeklinde üstel olarak artmaktadır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasının araştırma ve sonuç bölümünde, RIS-SM şemalarının farklı sönümlenmeli kanal modelleri için ABER performans analizi yapılmıştır.

Uygulamaların ilk aşamasında RIS-RSM şeması için ML sezim yöntemi anlatılmış ardından RIS-RSM şemasının ML sezim yöntemi kullanılarak Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanallardaki ABER performans analizi yapılmıştır. Bir sonraki aşama olarak, RIS-RSSK şeması için ML sezim yöntemi anlatılmış ardından RIS-RSSK şemasının ML sezim yöntemi kullanılarak farklı kanallardaki performans analizi sonuçları verilmiştir. İlk iki aşamada sunulan ABER sonuçları, çok sayıda sembol gönderildiği varsayılarak ve bu sembollerin iletiminde yapılan hataların ortalaması Monte Carlo simülasyonu ile hesaplanarak elde edilmiştir.

Uygulamaların üçüncü aşamasında RIS-TSSK şeması için ML sezim yöntemi anlatılmış ardından Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ kanallardaki performans analizi sonuçları ele alınmıştır. Bu şemanın Ricean kanallar için matematiksel türetimler yapılmış, gerçekleştirilen analizler detaylandırılmış ve ABER sonuçları analitik olarak da sunulmuştur.

Dördüncü aşamada RIS-RSSK şeması ile alıcı antenler üzerinde SSK uygulanan klasik SSK (RSSK) için ML sezim yöntemi kullanılarak Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ kanallardaki ABER performans analizi sonuçları kıyaslanmıştır. Uygulamaların beşinci aşaması olarak RIS-RSSK şeması ile RIS-RSM şeması için ML sezim yöntemi kullanılarak Rayleigh ve Ricean kanallardaki performans analizi sonuçları kıyaslanmıştır. Ardından son aşama olarak RIS-TSSK şeması ile RIS-RSSK şemasının için ML sezim yöntemi kullanılarak Rayleigh ve Ricean kanallardaki ABER performans analizi sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.1. RIS-RSM Şemasının Farklı Kanallardaki Performans Analizi

Bu bölümde ilk olarak RIS-RSM şemasının ML sezim yöntemi uygulaması ele alınmıştır. Ardından RIS-RSM şeması için ML sezim algoritması kullanarak Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modelleri üzerindeki performans analizi için ABER sonuçları verilmiştir.

4.1.1. RIS - Destekli RSM Şeması İçin ML Sezim Yöntemi

RIS-RSM şeması için ML sezim yöntemi, tahmin hata olasılığının en aza indirilmesi prensibiyle aktif alıcı antende alınan temel bant sinyaline uygulanan ikili hata tahmin detektörüdür. Seçilen alıcı anten indisi m ve iletilen veri sembolü x için hatalı seçilen veri sembolü \hat{x} ve hatalı seçilen alıcı anten indisi \hat{m} olmak üzere ortaklaşa bir arama yaparak alınan tüm sinyallerin ikili hata olasılığı (pairwise error probability, PEP) hesabı Eşitlik 20'den faydalanarak Eşitlik 34'teki gibi gerçekleştirilir (Başar, 2020).

$$P(m, x \rightarrow \hat{m}, \hat{x}) = P\left(\sum_{l=1}^{N_R} |r_l - G_l x|^2 > \sum_{l=1}^{N_R} |r_l - \hat{G}_l \hat{x}|^2\right) \quad (34)$$

Burada, G_l ve \hat{G}_l ifadeleri Eşitlik 35'teki gibidir,

$$G_l = \sum_{i=1}^N g_{l,i} e^{j\varphi_{m,i}}, \quad \hat{G}_l = \sum_{i=1}^N g_{l,i} e^{j\varphi_{\hat{m},i}} \quad (35)$$

Ayrıca alınan sinyalin tahmini ile ML algılama detektörü algoritması Eşitlik 36'daki ifade edilebilir.

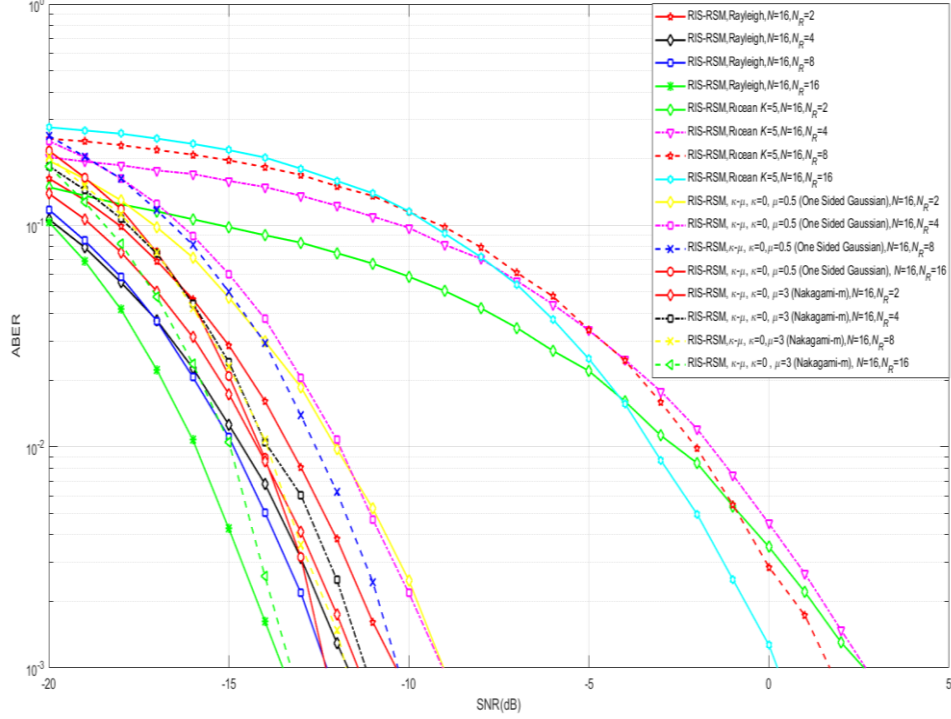
$$\left(\hat{m}, \hat{x}\right) = \arg \min_{(m,x)} \sum_{l=1}^{N_R} \left| r_l - \left[\sum_{i=1}^N g_{l,i} e^{j\varphi_{m,i}} \right] x \right|^2 \quad (36)$$

4.1.2. RIS - Destekli RSM Şeması için Performans Analiz Sonuçları

RIS - destekli RSM şeması için modülasyon seviyesi $M=4$, Ricean faktörü $K=5$ dB, $\kappa - \mu$ kanal modeli için $\kappa = 0$, $\mu=0.5$ parametre değerleri tek taraflı Gaussian (One sided Gaussian) dağılımını, $\kappa = 0$, $\mu=3$ parametre değerleri ise Nakagami-m kanal modelini tanımlamak üzere RIS eleman sayısı $N=16$ ve alıcı anten sayısı N_R 'nin değişken değerleri için uygulama sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.1'de verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS-RSM şeması, tüm değişken alıcı anten sayısı değerleri için Rayleigh sönümlenmeli kanal ortamında, Ricean, $\kappa - \mu$ dağılımının değişken parametreleri kullanılarak elde edilen tek taraflı Gaussian ve Nakagami-m modellerine göre daha iyi performans göstermektedir.

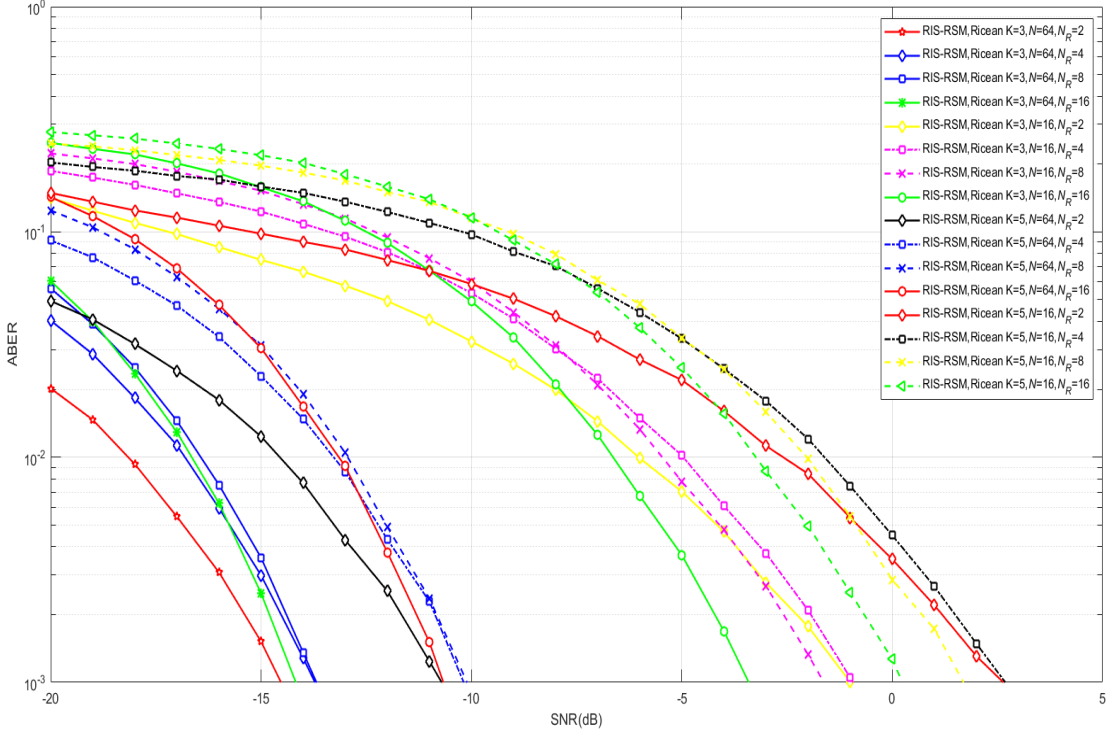
Örneğin, $N_R = 16$ iletimi için 10^{-3} ABER değerinde Rayleigh kanal ortamında, Ricean kanal ortamına göre yaklaşık 14 dB performans artışı olmuştur. Ayrıca One sided Gaussian ve Nakagami-m modellerinde, Rayleigh kanal ortamının performansına yakın ABER değerleri gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. RIS-RSM şemasının farklı sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

Daha sonra RIS-RSM için modülasyon seviyesi $M=4$, Ricean faktörü $K=3$ dB ve $K=5$ dB iken farklı N ve N_R değerleri için ABER performans analizleri verilmiştir. Şekil 4.2’de verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS eleman sayısı N ’nin artması durumunda tüm N_R değerleri için BER performansı artarken, K Ricean faktörü değerinin artması performans düşüklüğüne sebep olmuştur. Örneğin, $K=3$ dB için RIS eleman sayısı $N = 64$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 2$ seçimli bir iletim, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 2$ seçimli bir iletime göre 10^{-3} ABER değeri için yaklaşık olarak 13 dB daha iyi bir performans sağlamıştır.

Ayrıca, $K=5$ dB, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir iletimde, $K=3$ dB, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir iletime göre 10^{-3} ABER değeri için yaklaşık olarak 4 dB performans düşüklüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. RIS-RSM şemasının değişken N ve N_R değerleri için Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

4.2. RIS-RSSK Şemasının Farklı Kanallardaki Performans Analizi

Bu bölümde ilk olarak RIS-SSK şemasının alıcı anten kısmında uygulandığı ML sezim yöntemi uygulaması ele alınmıştır. Ardından RIS-RSSK şeması için ML tahmin algoritması kullanarak Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modelleri üzerindeki performans analizi sunulmuştur.

4.2.1. RIS - Destekli RSSK Şeması İçin ML Sezim yöntemi

RIS – destekli RSSK şeması için ML sezim yöntemi, tahmin hata olasılığının en aza indirilmesi prensibiyle aktif alıcı antende alınan temel bant sinyali üzerinde sezim işlemi yapmaktadır. Seçilen alıcı anten indisi m için hatalı seçilen alıcı anten indisi \hat{m} olmak üzere ortaklaşa bir arama yaparak alınan tüm sinyallerin PEP hesabı Eşitlik 21'den faydalanarak Eşitlik 37'deki gibi gerçekleştirilir.

$$P(m \rightarrow \hat{m}) = P\left(\sum_{l=1}^{N_R} |r_l - \sqrt{E}G_l|^2 > \sum_{l=1}^{N_R} |r_l - \sqrt{E}\hat{G}_l|^2\right) \quad (37)$$

Burada, G_l ve \hat{G}_l ifadeleri Eşitlik 38'deki gibidir.

$$G_l = \sum_{i=1}^N g_{l,i} e^{j\varphi_{m,i}}, \quad \hat{G}_l = \sum_{i=1}^N \hat{g}_{l,i} e^{j\varphi_{\hat{m},i}} \quad (38)$$

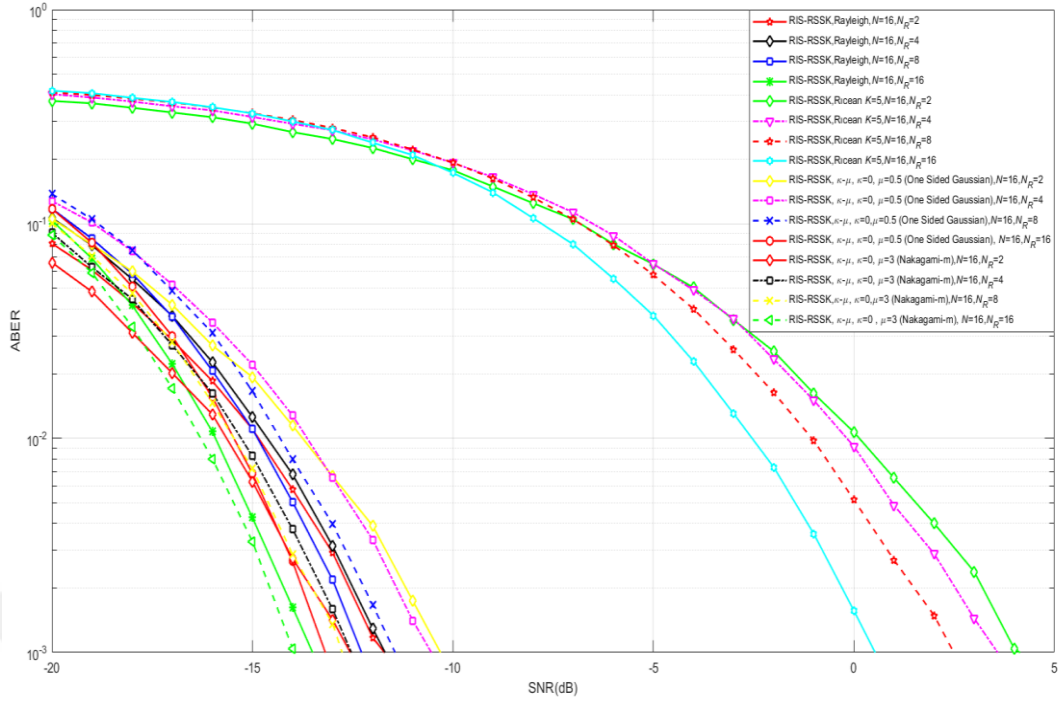
Ayrıca alınan sinyalin tahmini ile ML algılama detektörü algoritması Eşitlik 39'daki gibi ifade edilebilir.

$$\hat{m} = \arg \min_m \sum_{l=1}^{N_r} \left| r_l - \sqrt{E} \left[\sum_{i=1}^N g_{l,i} e^{j\varphi_{m,i}} \right] \right|^2 \quad (39)$$

4.2.2. RIS - Destekli RSSK Şeması için Performans Analiz Sonuçları

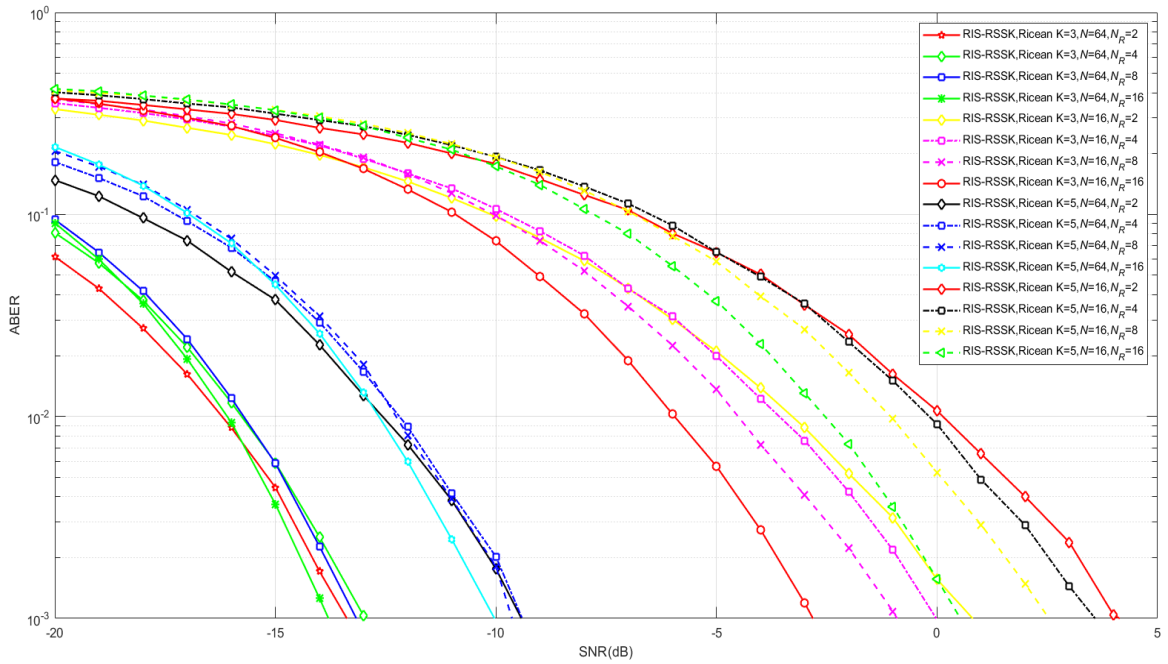
Bu bölümde ilk olarak RIS-SSK şemasının ML sezim yöntemi kullanarak Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modelleri üzerindeki performans analizi için ABER performans analizi yapılmıştır. RIS-RSSK için RIS eleman sayısı $N=16$, Ricean faktörü $K=5$ dB, $\kappa - \mu$ kanal modeli için $\kappa = 0$, $\mu=0.5$ parametre değerleri One sided Gaussian dağılımını, $\kappa = 0$, $\mu=3$ parametre değerleri ise Nakagami-m kanal modelini tanımlamak üzere alıcı anten sayısı N_R değişken değerleri için uygulama sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.3'te verilen simülasyon sonuçlarına göre tüm değişken alıcı anten sayısı değerleri için Rayleigh sönümlenmeli kanal ortamı, Ricean, $\kappa - \mu$ dağılımının değişken parametreleri kullanılarak elde edilen One sided Gaussian modelline göre daha iyi performans göstermektedir. Örneğin, $N_R = 16$ iletimi için 10^{-3} BER değerinde Rayleigh kanal ortamında, Ricean kanal ortamına göre yaklaşık 14 dB performans artışı olmuştur. Ayrıca, One sided Gaussian ve Nakagami-m modelleri, Ricean kanal ortamına göre daha yüksek performans sergilemiştir.



Şekil 4.3. RIS-RSSK şemasının farklı sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

Daha sonrasında ise RIS - destekli RSSK için Ricean faktörü $K=3$ dB ve $K=5$ dB iken N ve N_R değişken değerleri için BER performans analizleri verilmiştir.



Şekil 4.4. RIS-RSSK şemasının değişken N ve N_R değerleri için Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.4'te verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS eleman sayısı N artması durumunda değişken tüm N_R değerleri için ABER performansı artarken, K Ricean faktörü değerinin artmasıyla performans düşüklüğü olmuştur. Örneğin, $K=3$ dB için RIS eleman sayısı $N = 64$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 2$ seçimli bir iletim, RIS eleman sayısı $N=16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 2$ seçimli bir iletim göre 10^{-3} BER değeri için performans yaklaşık olarak 13 dB artırmaktadır.

Ayrıca, $K=5$ dB , RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir iletimde, $K=3$ dB , RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir iletime göre 10^{-3} BER değeri için yaklaşık olarak 3 dB performans düşüklüğü gözlemlenmiştir.

4.3. RIS-TSSK Şemasının Farklı Kanallardaki Performans Analizi

Bu bölümde ilk olarak RIS-TSSK şeması için ML sezim yöntemi uygulaması ele alınmıştır. Ardından RIS-TSSK şeması için ML tahmin algoritması kullanarak Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modelleri üzerindeki performans analizi için elde edilen sonuçlar verilmiştir.

4.3.1. RIS Destekli TSSK Şeması için ML Sezim Yöntemi

RIS-TSSK şemasının ML algılayıcı detektörü, aktif olarak kullanılan verici antenin indisini belirleyen optimal bir yöntem olarak Eşitlik 24'ten hareketle Eşitlik 40'daki gibi tasarlanmıştır.

$$\hat{t} = \arg \min_t \left\{ \left| y - \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) \right|^2 \right\} \quad (40)$$

4.3.2. RIS - Destekli TSSK Şemasının Ricean Sönümlenmeli Kanallardaki Performansının ML Sezim Yöntemi ile Teorik Analizi

RIS-TSSK şemasının ABER performansı, Eşitlik 40 kullanılarak bilgisayar simülasyonları ile nümerik olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında bilgisayar simülasyonlarının doğruluğunu test etmek amacıyla bu şema için Ricean kanal ortamı

varsayımı altında analitik türetimler de yapılmıştır. Türetimler esnasında verici anten sayısının 2 olduğu varsayılmıştır.

Kaynak verici anten tarafından üretilen modüle edilmemiş taşıyıcı sinyalin, verici antenleri ile hedef alıcı antene yansıtılmak üzere RIS'ye iletildiğini varsayarsak; sinyalin hedef alıcı anten tarafında verici anteni \hat{t} üzerinden iletildiği hatalı olarak tespit edildiğinde, koşullu PEP aşağıdaki Eşitliklere göre hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
P_e &= P \left\{ \left| y - \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{t,i} \beta_i \right) \right|^2 > \left| y - \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N \alpha_{\hat{t},i} \beta_i \right) \right|^2 \right\} \\
&= P \left\{ |n|^2 > \left| \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right) + n \right|^2 \right\} \\
&= P \left\{ -E \left| \left(\sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right) \right|^2 - 2\Re \left\{ \sqrt{E} \left(\sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{t},i}) \beta_i \right) n^* \right\} > 0 \right\} \quad (41)
\end{aligned}$$

$G_i = \sum_i^N \alpha_{t,i} \beta_i$ ve $\hat{G}_i = \sum_i^N \alpha_{\hat{t},i} \beta_i$ olmak üzere bazı matematiksel işlemlerden sonra koşullu PEP Eşitlik 42'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_e = P \{ D > 0 \} \quad (42)$$

Burada, $D = -E \left| G_i - \hat{G}_i \right|^2 - 2\Re \left\{ \sqrt{E} \left(G_i - \hat{G}_i \right) n^* \right\}$ ortalaması $\mu_D = -E \left| G_i - \hat{G}_i \right|^2$ ve

varyansı $\sigma_D^2 = 2EN_0 \left| G_i - \hat{G}_i \right|^2$ olan karmaşık bir Gauss rastgele değişkenidir (random

variable, RV), n^* ise n 'nin karmaşık eşlenik değeridir. Bu bilgiler ışığında koşullu PEP, Marcum Q - fonksiyonu kullanılarak da Eşitlik 43'teki gibi hesaplanabilir (Canbilen ve ark. 2020):

$$P_e = Q \left(\sqrt{\frac{E \left| G_i - \hat{G}_i \right|^2}{2N_0}} \right) \quad (43)$$

Burada, $G_i - \hat{G}_i = \sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{i},i}) \beta_i$ eşitliği göz önünde bulundurularak, Koşullu PEP, Q fonksiyonu kullanılarak Eşitlik 44'deki gibi de elde edilebilir.

$$P_e = Q \left(\sqrt{\frac{E \left| \sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{i},i}) \beta_i \right|^2}{2N_0}} \right) \quad (44)$$

Burada $\lambda = |B|^2 = \left| \sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{i},i}) \beta_i \right|^2$ eşitliği yazılırsa, $N \gg 1$ için merkezi limit teoremine (Central Limit Theory, CLT) göre, B Gauss dağılımını takip eder. Bu durumda $\beta = \beta_i$ ve $\alpha = \alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{i},i}$ tanımlanır, β ve α 'nin bağımsız Rician dağılımına sahip olduğu varsayılırsa; B 'nin ortalama ve varyans değerleri sırasıyla Eşitlik 45 ve 46'daki gibi hesaplanır:

$$\mu_B = 0 \quad (45)$$

$$\sigma_B^2 = 2N \left(1 - \frac{\pi}{4(K+1)} L_{\frac{1}{2}}^2(-K) \right) \quad (46)$$

Tüm bunlar göz önünde bulundurularak, ortalama PEP Eşitlik 47'deki gibi hesaplanabilir:

$$P_e = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} Q \left(\sqrt{\frac{E\lambda}{2N_0}} \right) f_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (47)$$

Burada, $\lambda = |B|^2 = \left| \sum_{i=1}^N (\alpha_{t,i} - \alpha_{\hat{i},i}) \beta_i \right|^2$ eşitliğinden λ değerinin bir serbestlik dereceli bir merkezi chi-kare RV olduğu gözlenir. İşlem kolaylığı açısından ortalama PEP değerini hesaplamak için Eşitlik 47'deki $f_{\lambda}(\lambda)$ ile ifade edilen λ 'nın PDF'sini ve Q - fonksiyonunu kullanmak yerine, merkezi chi - kare (chi-square) dağılımına sahip olan λ 'nın Eşitlik 48'de verilen moment üreten fonksiyonu (moment generating function, MGF) kullanılmıştır.

$$M_\lambda(s) = \left(\frac{1}{1 - s \cdot 2\sigma_B^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (48)$$

Bu sayede, Eşitlik 47 ile verilen ortalama PEP değeri, Eşitlik 49'daki gibi yeniden yazılmıştır.

$$P_e = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi M_\lambda \left(\frac{-E}{4N_0 \sin^2 \theta} \right) d\theta \quad (49)$$

Eşitlik 46 ve 48'den yararlanarak, ortalama PEP değeri, Eşitlik 50'deki gibi elde edilmiştir. SSK şeması için $N_T=2$ seçilirse PEP değeri BER değerine eşit olduğundan, Eşitlik 50, aynı zamanda RIS-TSSK şemasının Ricean sönümlenmeli kanallardaki ABER değerini verir.

$$P_e = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(4N \left(1 - \left(\frac{\pi}{4(K+1)} \right) L_{\frac{1}{2}}^2(-K) \right) \right) \left(\frac{E}{4N_0 \sin^2 \theta} \right)}} d\theta \quad (50)$$

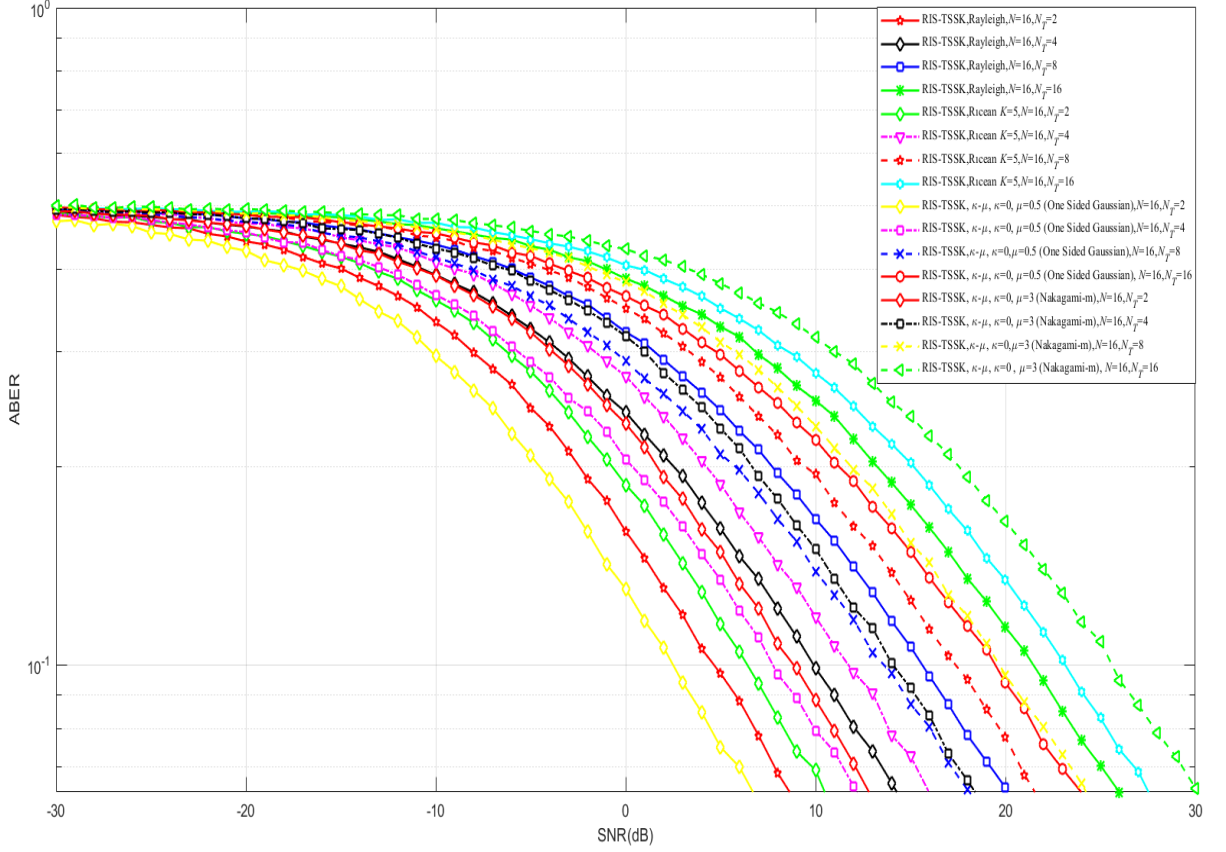
Eşitlik 50'de yer alan $\sin\theta$ ifadesinin maksimum değerinin 1 olduğu göz önüne alınarak ABER ifadesi için bir üst sınır ifadesi Eşitlik 51'deki gibi elde edilmiştir.

$$P_e = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(4N \left(1 - \left(\frac{\pi}{4(K+1)} \right) L_{\frac{1}{2}}^2(-K) \right) \right) \left(\frac{E}{4N_0} \right)}} d\theta \quad (52)$$

4.3.3. RIS - Destekli TSSK Şeması için Performans Analiz Sonuçları

Bu bölümde ilk olarak RIS-TSSK şemasının ML sezim yöntemi kullanarak Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modelleri üzerindeki ABER performans analizi yapılmıştır. RIS-TSSK için RIS eleman sayısı $N=16$, Ricean faktörü $K=5$ dB, $\kappa - \mu$ kanal modeli için $\kappa = 0$, $\mu=0.5$ parametre değerleri One sided Gaussian dağılımını,

$\kappa = 0$, $\mu=3$ parametre değerleri ise Nakagami-m kanal modelini tanımlamak üzere verici anten sayısı N_T değişken değerleri için uygulama sonuçları aşağıda verilmiştir.



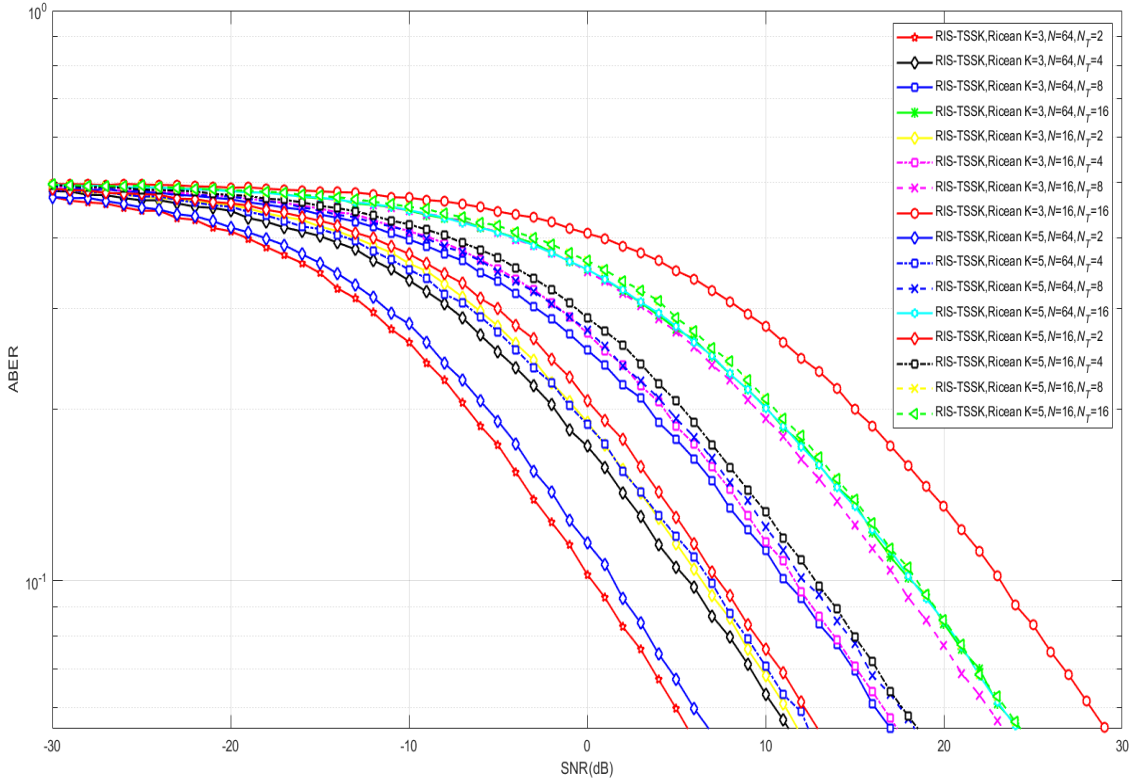
Şekil 4.5. RIS-TSSK şemasının farklı sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.5'te verilen simülasyon sonuçlarına göre tüm değişken alıcı anten sayısı değerleri için Rayleigh sönümlenmeli kanal ortamındaki sistem performansı Ricean sönümlenmeli kanal ortamına göre yüksektir. Örneğin, $N_T = 16$ için Rayleigh kanal ortamı, Ricean kanal ortamına göre 10^{-1} ABER değeri için neredeyse 3 dB daha iyi performans sağlamıştır. Ayrıca, $\kappa - \mu$ dağılımının değişken parametreleri kullanılarak elde edilen One sided Gaussian modeli, tüm değişken anten sayısı değerleri için Rayleigh, Ricean ve Nakagami-m modellerine göre daha yüksek performans sergilemiştir.

Daha sonra RIS-TSSK için Ricean faktörü $K=3$ dB ve $K=5$ dB iken farklı N ve N_T değerleri için ABER performans analizleri verilmiştir. Şekil 4.6'da verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS eleman sayısı N artması durumunda tüm N_T değerleri için ABER performansı artarken, K Ricean faktörü değerinin artmasıyla performans

düşüklüğü olmuştur. Örneğin, $K=3$ dB için RIS eleman sayısı $N = 64$ ve alıcı anten sayısı $N_T = 2$ seçimli bir iletim, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_T = 2$ seçimli bir iletime göre 10^{-1} ABER değeri için yaklaşık olarak 6 dB daha iyi bir performans sağlamıştır.

Ayrıca, $K=5$ dB, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir iletimde, $K=3$ dB, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir iletime göre 10^{-1} ABER değeri için yaklaşık olarak 1 dB performans düşüklüğü gözlemlenmiştir.

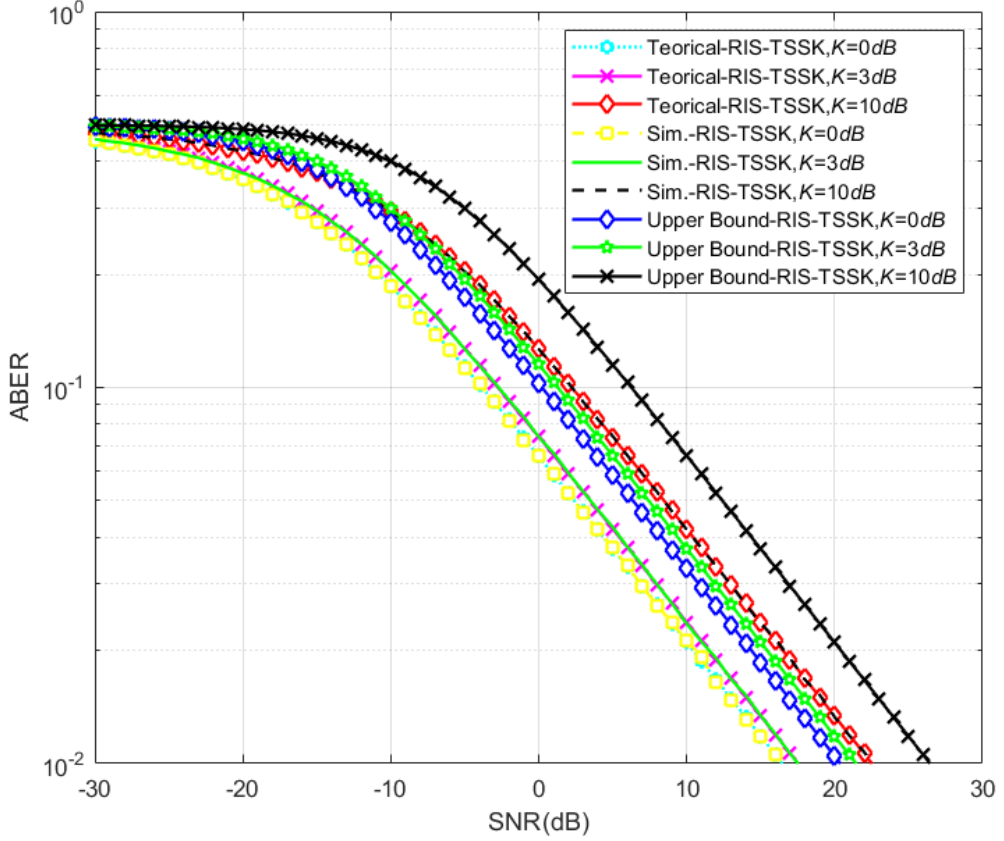


Şekil 4.6. RIS-TSSK şemasının değişken N ve N_T değerleri için Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.7’de verilen simülasyon ve teorik analiz sonuçlarına göre ise $N_T = 2$, $N=128$ seçimli RIS-TSSK iletiminde, artan tüm Ricean K faktörü değerleri için sistem performansının düştüğü görülmektedir. Örneğin, $K=3$ dB ve 10^{-2} ABER değeri için SNR değeri 15 dB, $K=5$ dB ve 10^{-2} ABER değeri için SNR değeri 17 dB iken $K=10$ dB ve 10^{-2} ABER değeri için SNR değeri 22 dB olarak elde edilmiştir. Böylelikle, Ricean K faktörünün sistem performansına olumsuz etkisi ispatlanmıştır.

Ayrıca, her bir Ricean K faktörü değeri için yapılan teorik hesaplamalar ve elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında birebir aynı sonuçlar elde edilmiş,

böylece yapılan simülasyon sonuçlarının doğruluğu ispat edilmiştir. Ek olarak, RIS-TSSK şemasının davranışına ilişkin genel bir bakış açısı elde etmek amacıyla Eşitlik 52’de üretilen ABER üst sınır sonuçları değişken tüm Ricean K faktörü değerleri için üst sınır performans sonuçları olarak Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

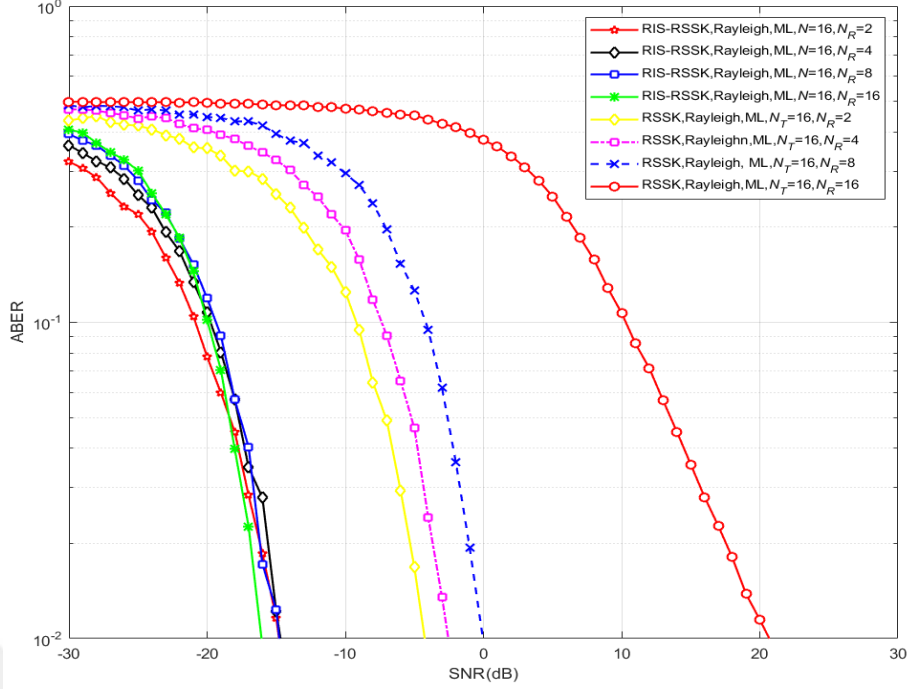


Şekil 4.7. RIS-TSSK şemasının değişken K değerleri için Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki simülasyon ve teorik analiz sonuçlarının karşılaştırılması ($N_T=2$, $N=128$).

4.4. RIS-RSSK ve RSSK Şemasının Rayleigh ve Ricean Kanallardaki Performans Karşılaştırması

Bu bölümde RIS-RSSK ve RSSK şemalarının ML sezim yöntemi kullanarak Rayleigh ve Ricean sönümlenmeli kanal modelleri üzerindeki performans analizi sunulmuştur.

RSSK için verici anten sayısı $N_T=16$, RIS-RSSK için RIS eleman sayısı $N=16$ iken N_R değişken değerleri için uygulama sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.8. RIS-RSSK ve RSSK şemalarının $N=16$, $N_T=16$ ve değişken N_R değerleri için Rayleigh sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

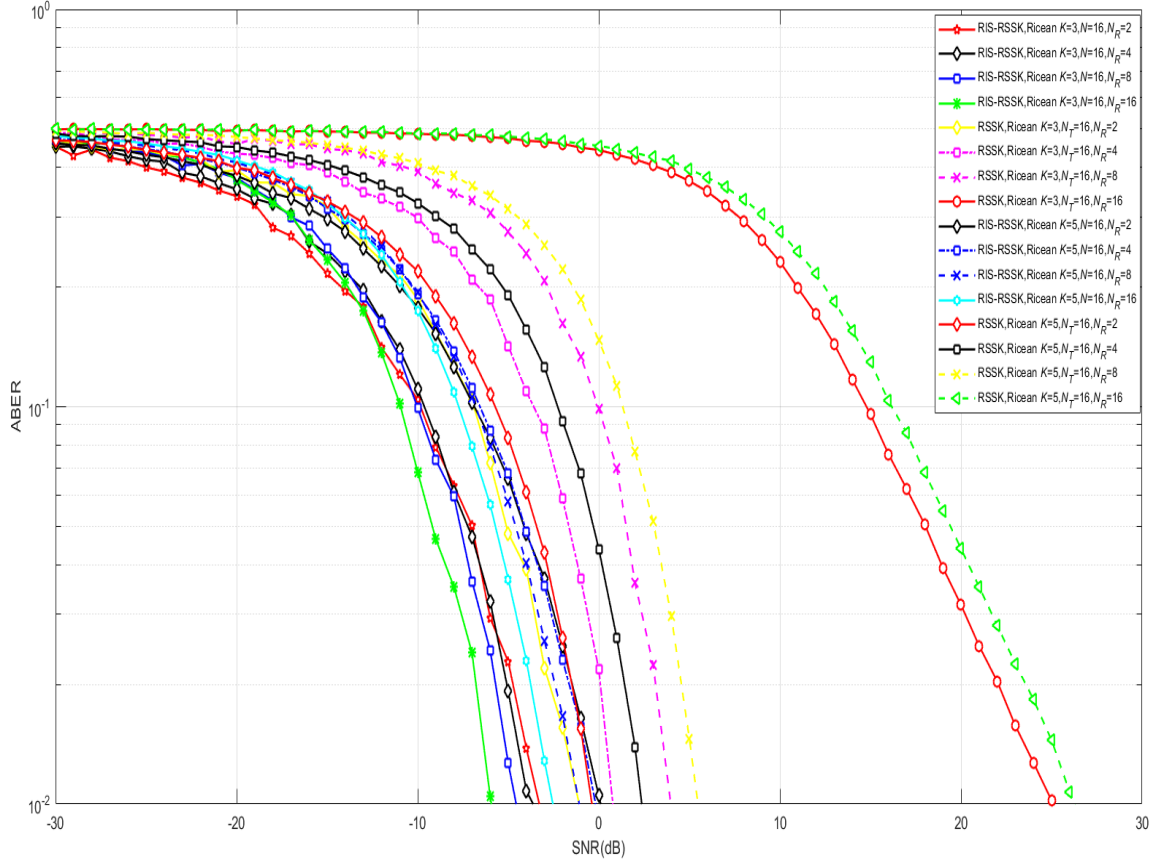
Şekil 4.8’de verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS-RSSK şeması RSSK şemasına göre değişken tüm N_R değerleri için daha üstün sonuçlar üretmektedir. Örneğin, RIS eleman sayısı $N = 16$, ve alıcı anten sayısı $N_R = 8$ seçimli bir iletim, alıcı anten sayısı $N_R = 8$ ve verici anten sayısı $N_T = 16$ seçimli bir iletim göre 10^{-2} ABER değeri için yaklaşık olarak 15 dB daha üstün sonuçlara ulaşmıştır.

RSSK için verici anten sayısı $N_T=16$, RIS-RSSK için $N=16$, alıcı anten sayısı N_R değişken değerleri ve Ricean faktörü $K=3$ dB ve $K=5$ dB iken Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.9’da verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS-RSSK şeması RSSK şemasına göre RIS eleman sayısı artması durumunda değişken tüm N_R değerleri için daha üstün sonuçlar üretmektedir. Örneğin, Ricean faktörü $K=3$ dB için $N = 16$ ve $N_R = 8$ seçimli bir iletim, $N_T = 16$ ve $N_R = 8$ seçimli bir iletim göre 10^{-2} ABER değeri için yaklaşık olarak 9 dB daha üstün sonuçlara ulaşmıştır.

Ayrıca, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir RIS-RSSK iletimi değişken K değerlerine göre kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 10^{-2} ABER değeri için Ricean faktörü $K=5$ dB değerine sahip kanal ortamında, $K=3$ dB seçilen kanal ortamına göre yaklaşık olarak 3 dB performans düşüklüğü gözlemlenmiştir. Benzer olarak, verici anten sayısı $N_T = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$

seçimli bir RSSK iletimi, değişken K değerlerine göre kıyaslandığında Ricean faktörü $K=3$ dB değerine sahip kanal ortamında, $K=5$ dB seçilen kanal ortamına göre yaklaşık olarak 1 dB performans artışı olmuştur.



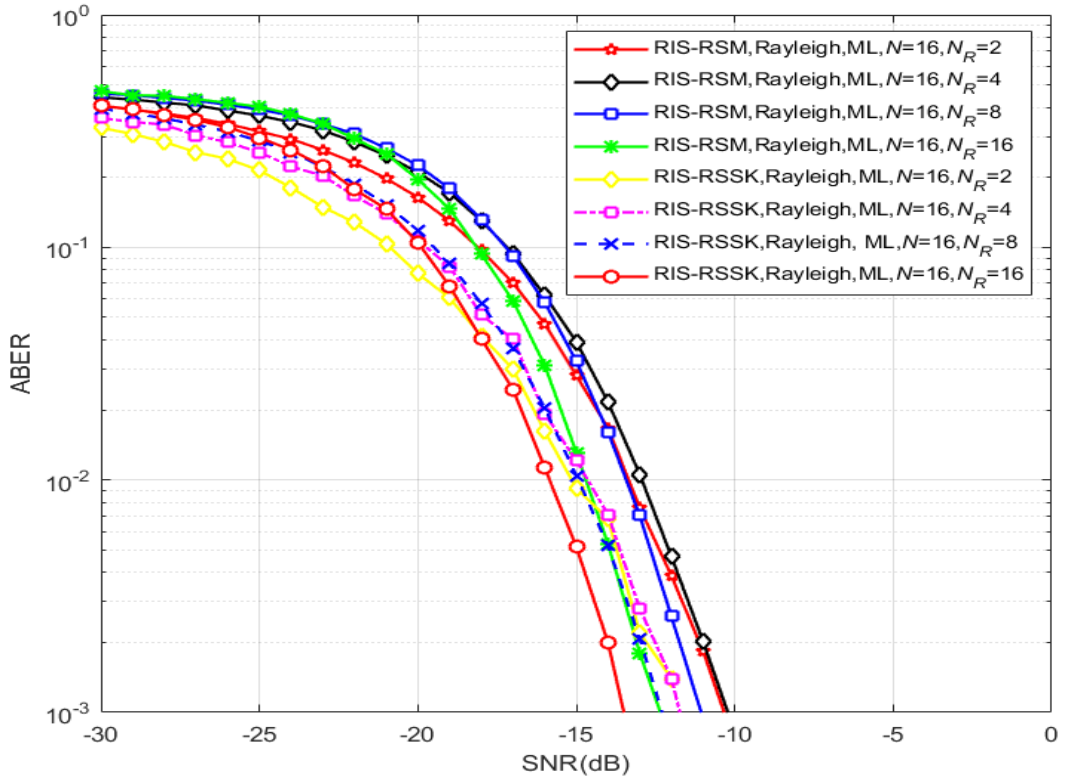
Şekil 4.9. RIS-RSSK ve RSSK şemalarının $N=16$, $N_T=16$ ve değişken N_R değerleri için Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

4.5. RIS-RSSK ve RIS-RSM Şemasının Performans Karşılaştırması

Bu bölümde ilk olarak RIS destekli SSK şemasının alıcı anten kısmında uygulandığı RIS-RSSK ve RIS-RSM şemalarının ML sezim yöntemi kullanarak Rayleigh ve Ricean sönümlenmeli kanal modelleri üzerindeki performans analizi için ABER performans analizi yapılmıştır.

RIS-RSM için $N=16$, $M=4$, RIS-RSSK için $N=16$, Ricean faktörü $K=5$ dB olmak üzere alıcı anten sayısı N_R değişken değerleri için uygulama sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.10’de verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS-RSSK şeması RIS-RSM şemasına göre RIS eleman sayısının artması durumunda değişken tüm N_R değerleri için her iki şemanında ABER performansı artmaktadır. Örneğin, RIS eleman sayısı $N = 16$, ve alıcı anten sayısı $N_R = 8$ seçimli bir iletim, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 8$ seçimli bir RIS-RSM iletim göre 10^{-3} BER değeri için yaklaşık olarak 1 dB performans artışı olmuştur. Sonuçlar yakın çıkmasına rağmen aynı N_R değerinde RIS-RSM ile daha fazla bit iletildiğinden dolayısıyla RIS-RSM performansının daha üstün olmaktadır.



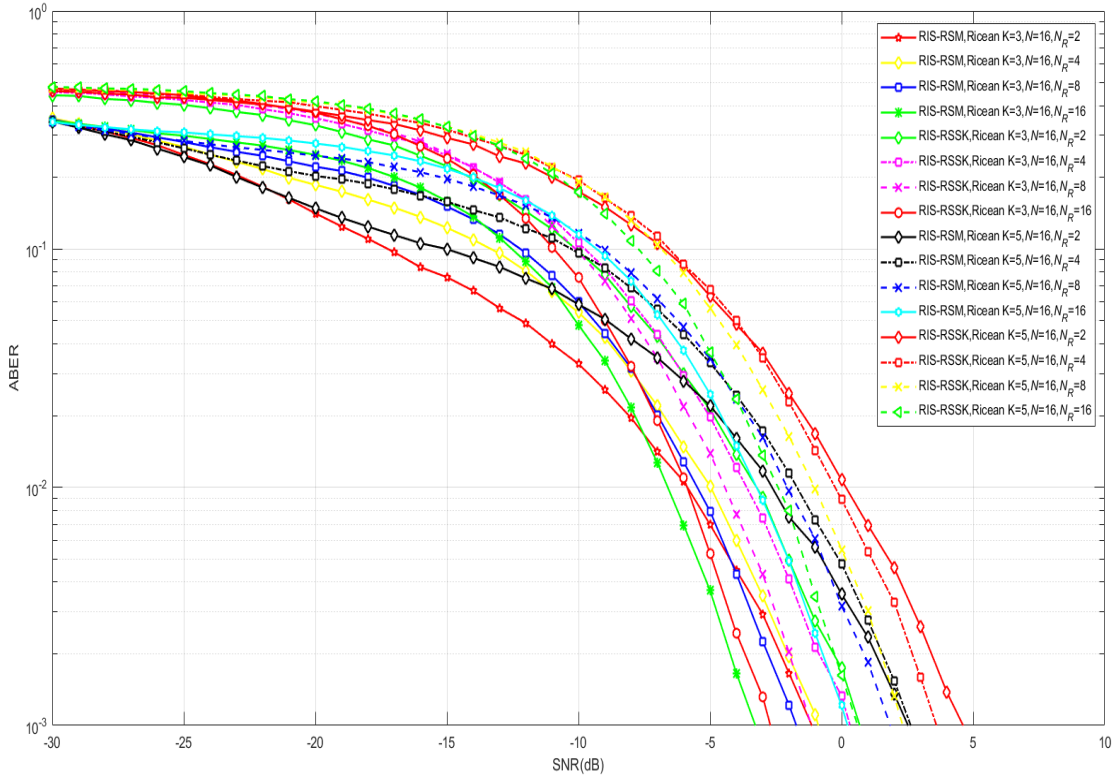
Şekil 4.10. RIS-RSSK ve RIS-RSM şemalarının $N=16$ ve Değişken N_R değerleri için Rayleigh sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

RIS-RSM için RIS eleman sayısı $N = 16$, RIS-RSSK için RIS eleman sayısı $N=16$, alıcı anten sayısı N_R değişken değerleri ve Ricean faktörü $K=3$ dB ve $K=5$ dB iken Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.11’de verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS-RSSK şeması RIS-RSM şemasına göre RIS eleman sayısı N artması durumunda değişken tüm N_R değerleri için BER performansı artmaktadır. Örneğin, Ricean faktörü $K=3$ dB için $N = 16$ ve $N_R = 16$

seçimli bir RIS-RSM iletim, $N = 16$ ve $N_R = 16$ seçimli bir RIS-RSSK iletime göre 10^{-2} ABER değeri için yaklaşık olarak 1 dB daha üstün sonuçlara ulaşmıştır.

Ayrıca, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir RIS-RSSK iletimi değişken K değerlerine göre kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 10^{-3} ABER değeri için Ricean faktörü $K=5$ dB değerine sahip kanal ortamı, $K=3$ dB seçilen kanal ortamına göre yaklaşık olarak 3 dB performans düşüklüğü gözlemlenmiştir. Benzer olarak, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir RIS-RSM iletimi, değişken K değerlerine göre kıyaslandığında Ricean faktörü $K=3$ dB değerine sahip kanal ortamında, $K=5$ dB seçilen kanal ortamına göre yaklaşık olarak 5 dB performans artışı olmuştur.



Şekil 4.11. RIS-RSSK ve RIS-RSM şemalarının $N=16$ ve Değişken N_R değerleri için Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

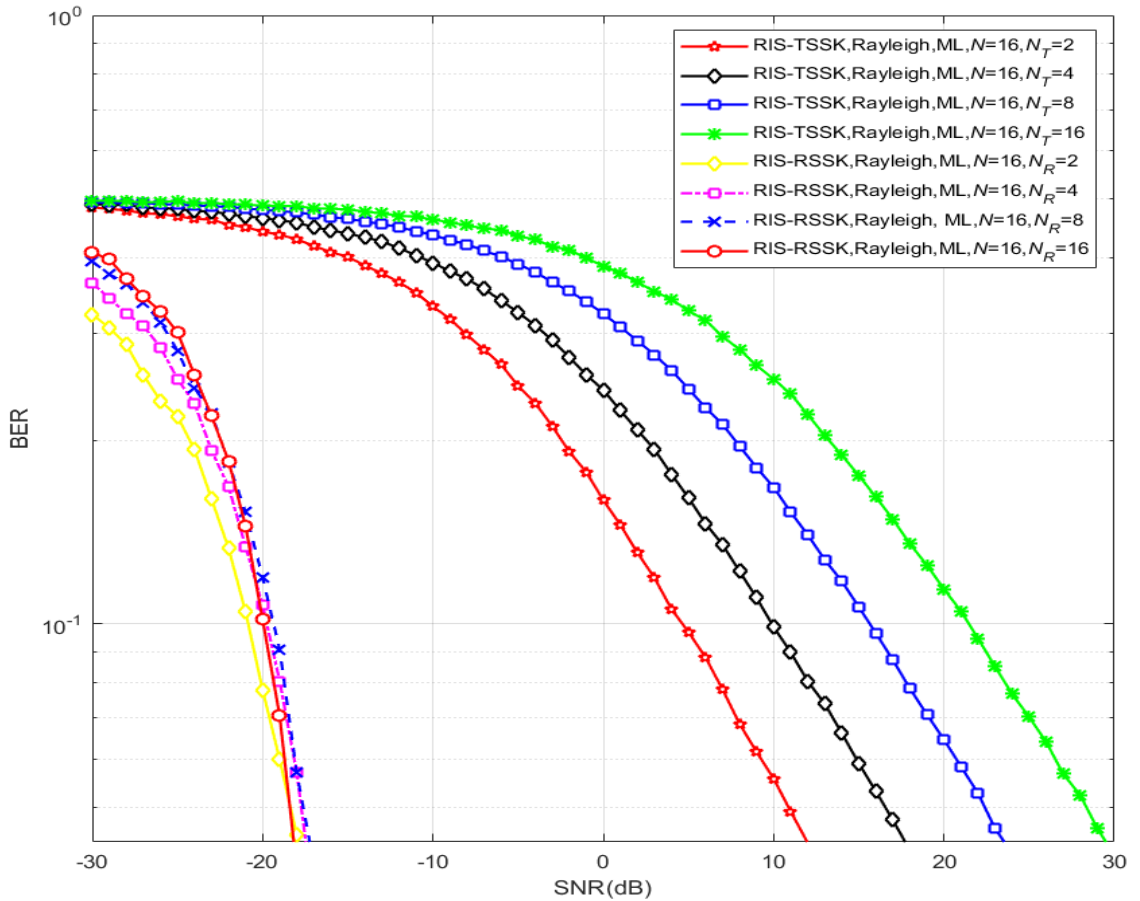
4.6. RIS-TSSK ve RIS-RSSK Şemasının Performans Karşılaştırması

Bu bölümde ilk olarak RIS destekli SSK şemasının verici anten kısmında uygulandığı RIS-TSSK ve RSSK şemalarının ML sezim yöntemi kullanarak Rayleigh,

Ricean ve $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modelleri üzerindeki performans analizi için ABER performans analizi yapılmıştır.

RIS eleman sayısı $N=16$, RIS-TSSK için verici anten sayısı N_T değişken değerleri ve RIS-RSSK için alıcı anten sayısı N_R değişken değerleri için Rayleigh sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçları Şekil 4.12’de verilmiştir.

Hata tespit algoritması olarak ML sezim yöntemi, alıcı anten kısmında uygulandığından dolayı simülasyon sonuçlarından da tespit edilebileceği gibi RIS-RSSK şeması RIS-TSSK şemasına göre değişken tüm N_R ve N_T değerleri için daha üstün sonuçlar üretmektedir. Örneğin alıcı anten sayısı $N_R = 2$ ve RIS eleman sayısı $N = 16$ seçimli bir RIS-RSSK iletimde, verici anten sayısı $N_T = 2$ ve RIS eleman sayısı $N = 16$ seçimli bir RIS-TSSK iletim göre 10^{-1} BER değeri için yaklaşık olarak 26 dB performans artışı olmuştur.

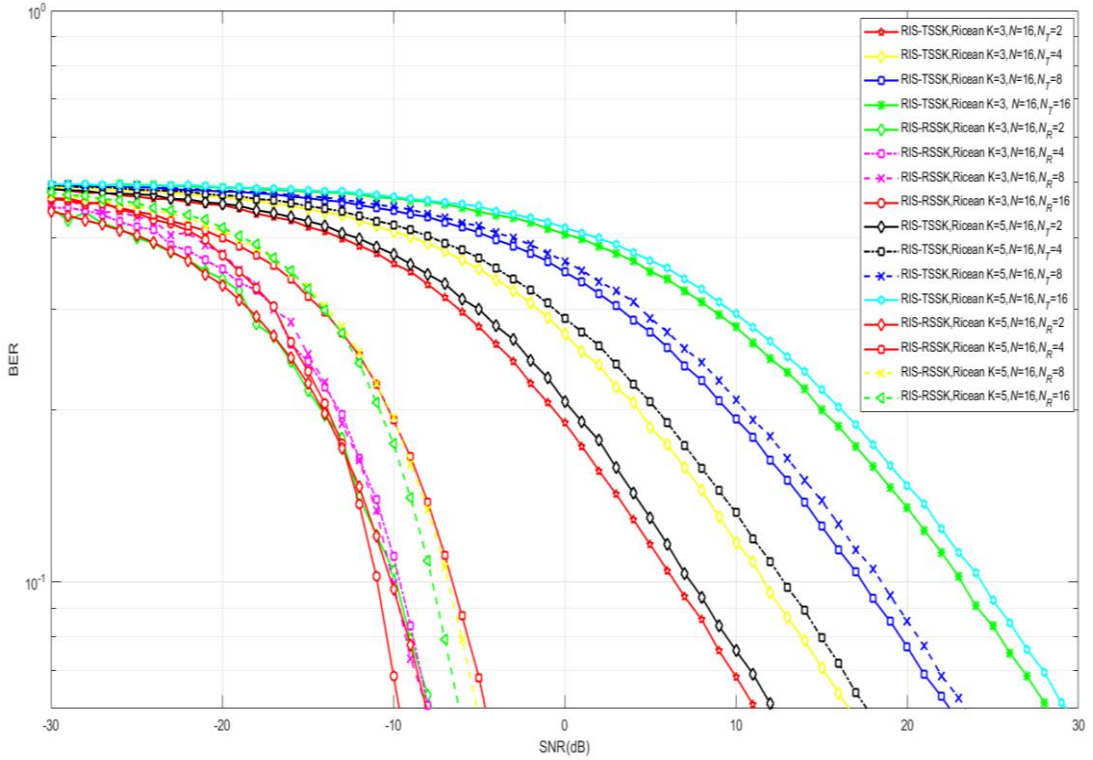


Şekil 4.12. RIS-TSSK ve RIS-RSSK şemalarının $N=16$ ve Değişken N_R değerleri için Rayleigh sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

RIS eleman sayısı $N=16$, RIS-TSSK için N_T değişken değerleri ve RIS-RSSK için N_R değişken değerleri için Ricean faktörü $K=3$ dB ve $K=5$ dB iken Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçları aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.13'te verilen simülasyon sonuçlarına göre RIS-RSSK şeması RIS-TSSK şemasına göre RIS eleman sayısı N artması durumunda değişken tüm N_R değerleri için ABER performansı artmaktadır. Örneğin, Ricean faktörü $K=3$ dB için $N = 16$ ve $N_R = 2$ seçimli bir RIS-RSSK iletim, $N = 16$ ve $N_T = 2$ seçimli bir RIS-TSSK iletim göre 10^{-1} ABER değeri için yaklaşık olarak 17 dB daha üstün sonuçlara ulaşmıştır.

Ayrıca, RIS eleman sayısı $N = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir RIS-RSSK iletimi değişken K değerlerine göre kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre 10^{-3} ABER değeri için Ricean faktörü $K=5$ dB değerine sahip kanal ortamı, $K=3$ dB seçilen kanal ortamına göre yaklaşık olarak 3 dB performans düşüklüğü gözlemlenmiştir. Benzer olarak, verici anten sayısı $N_T = 16$ ve alıcı anten sayısı $N_R = 16$ seçimli bir RIS-TSSK iletimi, değişken K değerlerine göre kıyaslandığında Ricean faktörü $K=3$ dB değerine sahip kanal ortamında, $K=5$ dB seçilen kanal ortamına göre yaklaşık olarak 1 dB performans artışı olmuştur.



Şekil 4.13. RIS-TSSK ve RIS-RSSK şemalarının $N=16$ ve değişken N_R değerleri için Ricean sönümlenmeli kanallar üzerindeki uygulama sonuçlarının karşılaştırılması.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, yeni nesil kablosuz iletişim tekniklerinin ihtiyaçlarını karşılamak için umut verici bir teknoloji olarak sunulan RIS teknolojisi, veri iletimi için aktif anten indisi kullanan SM teknikleriyle birlikte ele alınmıştır. Hem RIS hem de SM tekniklerinin potansiyel avantajlarını birlikte taşıyan RIS-SM ve RIS-SSK şemaları incelenmiş ve Rayleigh, Ricean ve $\kappa - \mu$ gibi sönümlenme kanalları üzerinden ABER performansı araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında ele alınan tüm sistemlerin aktif verici anten bilgisi, alıcı tarafında ML algılama algoritması kullanılarak sezilmeye çalışılmıştır. Önerilen RIS tabanlı SM/SSK sistemlerinin ABER performansının, artan yansıtıcı eleman sayısı ve azalan Ricean-K faktörü ile orantılı olarak iyileştiği bilgisayar simülasyonları kullanılarak gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, önerilen tüm sistemler için Rayleigh sönümlenmeli kanal ortamı, Ricean sönümlenmeli kanal ortamına göre RIS üzerinden iletimin daha yüksek performansla yapılmasını sağlamıştır. $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modelindeki farklı κ ve μ parametre değerlerine göre Ricean, One sided Gaussian ve Nakagami-m kanal modellerinin simülasyon sonuçları ABER cinsinden elde edilmiştir. $\kappa - \mu$ sönümlenmeli kanal modeli için elde edilen sonuçlar değişken alıcı – verici anten sayısı ve parametre değerlerine göre farklılık göstermektedir. Önerilen tüm sistemler için RIS eleman sayısının artması durumunda ABER performansının arttığı gözlemlenmiştir. SM ve SSK tekniklerinin alıcıda uygulandığı sistemler ele alındığında, alıcı anten sayısının artması durumunda sistem performansının arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte SM ve SSK tekniklerinin vericide uygulandığı sistemler için verici anten sayısının artması durumunda ABER performans değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Diğer taraftan ise RIS teknolojisinin kablosuz kanal performansına olan faydalarını gözlemlemek için RIS-SM/SSK şemaları, geleneksel SM/SSK şemalarıyla karşılaştırılmış, önerilen tüm sistemler için RIS-SM/SSK şemalarının geleneksel SM/SSK şemalarına göre üstün sonuçlar ürettiği gözlenmiştir. Tüm bu sonuçlar ile birlikte RIS sistemlerin farklı kablosuz kanal modelleri üzerindeki performans katkısı ispatlanmıştır.

5.2 Öneriler

RIS teknolojisi, serbest uzay ortamları başta olmak üzere kapalı alan ortamları için THz ve mmWave haberleşmelerinde SM ve SSK gibi tekniklerle birlikte kullanılmaya oldukça müsaittir. Ayrıca kablosuz kanal ortamının doğası gereği meydana gelen sönümlenme kaybına karşı performans iyileştirmesine yönelik oldukça esnek ve başarıyı yüksek tasarımlar yapılması mümkündür.

SM, SSK gibi MIMO sistemlerde alıcı anten sayısının artması sistem performansının artmasını sağlarken alıcı karmaşıklığıyla birlikte iletilen veri oranındaki artış sistem kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Özellikle ML gibi sezim yöntemlerinde kod çözme karmaşıklığı, verici anten sayısı (N_T) ve modülasyon seviyesi (M) ile eksponansiyel olarak artmaktadır. Bu sebeple kod çözme karmaşıklığını azaltmak amacıyla yenilikçi hata tahmini algoritmaları geliştirilmelidir.

Gelecek yıllarda özellikle ofis, ev gibi kapalı alan ortamlarında kullanımı yaygınlaşması beklenen IoT teknolojisinin kablosuz kanal performans gereksinimlerini karşılamak adına RIS teknolojisinin geliştirilmesi ve diğer MIMO sistemlere entegre edilerek kullanımının yaygınlaştırılması gerekmektedir.

6G ve ötesi haberleşme teknolojileriyle birlikte talep edilen ultra hızlı veri oranı gibi gereksinimleri karşılamak adına umut vaat eden RIS teknolojisinin SM gibi teknolojilerle günlük hayatta kullanımı yaygınlaştırılabilir. Bunun yanı sıra RIS teknolojisi, SM tekniklerinin dışında farklı modülasyon teknikleriyle birlikte kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- Badarneh O. S., Mesleh R., Ikki S. S. ve Aggoune H. M., 2014, "Performance Analysis of Space Modulation Techniques over alpha - mu Fading Channels with Imperfect Channel Estimation," IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966118.
- Başar E., 2019a., Media-Based Modulation for Future Wireless Systems: A Tutorial. IEEE Wireless Communications, vol 26, no. 5, pp. 160-166, October 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800568.
- Başar E., 2019b, "Transmission Through Large Intelligent Surfaces: A New Frontier in Wireless Communications", 2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), ArXiv:1902.08463, Apr. 2019.
- Başar E, Di Renzo M, De Rosny J, Debbah M, Alouini M ve Zhang R., 2019, Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces. IEEE Access, Access, IEEE. 2019;7:116753-116773. doi:10.1109/ACCESS.2019.2935192
- Başar, E. 2020, Reconfigurable Intelligent Surface-Based Index Modulation: A New Beyond MIMO Paradigm for 6G. IEEE Transactions on Communications, Communications, IEEE Transactions on, IEEE Trans. Commun, 68(5), 3187–3196.
- Bian, Y., Cheng, X., Wen, M. ve ark. 2015, Differential spatial modulation. IEEE Transactions on Vehicular Technology 64 (7): 3262–3268. doi:10.1109/TVT.2014.2348791.
- Bouida, Z., El-Sallabi, H., Ghayeb, A., Qaraqe, K. 2015, Enhanced Space-Shift Keying (SSK) with Reconfigurable Antennas. 2393-2398. doi:10.1109/ICC.2015.7248683.
- Bouida, Z., El-Sallabi, H., Ghayeb, A. ve Qaraqe, K. A. 2016, Reconfigurable Antenna-Based Space-Shift Keying (SSK) for MIMO Rician Channels. IEEE Transactions on Wireless Communications, 15 (1), 446-457, doi: 10.1109/TWC.2015.2474862.
- Canbilen, A. E. 2019, İşbirlikli uzaysal modülasyonun farklı sönümlenmeli kanallardaki performans analizi. Retrieved from https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=D7V3sIEhEDVtv13uWdpSUw&no=m8rC4tFk57sfD0Z5JToE_w
- Canbilen, A. E. 2021, Performance analysis of RIS-assisted SM with I/Q imbalance. Physical Communication, 49, 101473. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101473>
- Canbilen, A. E., Başar E. ve Ikki, S. S., 2020, Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Space Shift Keying. IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 9, pp. 1495-1499, Sept. 2020, doi: 10.1109/LWC.2020.2994930.

- Chang R. Y., Lin S. J., ve Chung, W.H. 2012, Energy Efficient Transmission over Space Shift Keying Modulated MIMO Channels. *IEEE Transactions on Communications*. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2012.072412.110857>
- Chau, Y.A. ve Yu, S.H., 2001., Space modulation on wireless fading channels. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2001)*, vol. 3, pp. 1668–1671. doi: 10.1109/VTC.2001.956483.
- CISCO, 2020, Cisco Annual Internet Report 2018–2023 Update, White Paper.
- CISCO, 2020, New Cisco Annual Internet Report Forecasts 5G to Support More Than 10% of Global Mobile Connections by 2023, Press Release.
- Dai, L., Renzo, M. D., Chae, C., Hanzo, L., Wang, B., Wang, M., Yang, X., Tan, J., Bi, S., Xu, S., Yang, F., ve Chen, Z. 2020, Reconfigurable Intelligent Surface-Based Wireless Communications: Antenna Design, Prototyping, and Experimental Results. *IEEE Access*, Access, IEEE, 8, 45913–45923.
- Damen, M., Abdi, A., ve Kaveh, M., 2001, On the effect of correlated fading on several space-time coding and detection schemes. *Proceedings of the 2001 IEEE 54th Vehicular Technology Conference*, vol. 1, Atlantic City, NJ, pp. 13–16.
- ElMossallamy, M. A., Zhang, H., Song, L., Seddik, K. G., Han, Z., ve Li, G. Y. 2020, Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, *Cognitive Communications and Networking*, *IEEE Transactions on*, *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw*, 6(3), 990–1002.
- Goldsmith, A., Jafar, S., Jindal, N., ve Vishwanath, S., 2003, Capacity limits of MIMO channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication* 21 (5): 684–702.
- Hoydis J., Brink S.ten ve Debbah M., 2011, “Massive MIMO: How many antennas do we need?” in *Proc. 49th Annu. Allerton Conf. Commun., Control, Comput.* (Allerton), Sep. 2011, pp. 545–550.
- Jeganathan, J., Ghrayeb, A., and Szczecinski, L. 2008., Generalized space shift keying modulation for MIMO channels. *Proceedings of the IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC 2008*, Cannes, France, pp. 1–5. doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699782.
- Jeganathan, J., Ghrayeb, A., and Szczecinski, L. and Ceron, A. 2009., Space shift keying modulation for MIMO channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 8(7), 3692-3703. doi: 10.1109/TWC.2009.080910.
- Jiao R. ve Dai L., 2020, "On the Max-Min Fairness of Beam-space MIMO-NOMA," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 68, pp. 4919-4932, 2020, doi: 10.1109/TSP.2020.3018559.
- Kshetrimayum, R. 2017., *Fundamentals of MIMO Wireless Communications*. PubRISher: Cambridge University Press ISBN: 978-1108415699

- Kumbhani B. ve Kshetrimayum R. S. 2017, MIMO Wireless Communications over Generalized Fading Channels. 10.1201/9781315116778
- Liang H.-W., Chang R. Y., Chung W.-H., Zhang H., ve Kuo S.-Y., 2012, “Bi-space shift keying modulation for MIMO systems,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 1161–1164, Aug. 2012.
- Liu Y., Liu, X., Mu X., Hou, T., Xu J., Zhijin Q., Renzo, M.D., Al-Dhahir, N., 2020. Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities.
- Ma, T., Xiao, Y., Lei, X., Yang, P., Lei, X. ve Dobre, O. A. 2020, Large Intelligent Surface Assisted Wireless Communications With Spatial Modulation and Antenna Selection. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2562-2574, doi: 10.1109/JSAC.2020.3007044.
- Mesleh, R. ve Alhassi, A., 2018., *Space Modulation Techniques*.
- Mesleh, R., Haas, H., Ahn, C.W., ve Yun, S. 2006, Spatial modulation – a new low complexity spectral efficiency enhancing technique. *IEEE International Conference on Communication and Networking in China (CHINACOM)*, Beijing, China, pp. 1–5.
- Mesleh, R., Haas, H., Sinanovic, S. ve ark. 2008., Spatial modulation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 57 (4): 2228–2241.
- Mesleh, R., Hiari, O., Younis, A., ve Alouneh, S., 2017., Transmitter design and hardware considerations for different space modulation techniques. *IEEE Transactions on Wireless Communications* 16 (11): 7512–7522.
- Ngo H. Q., Larsson E. G., ve Marzetta T. L., 2013., “Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 4, pp. 1436–1449, Apr. 2013
- Pan C, Ren H, Wang K. ve ark. 2021, Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G Systems: Principles, Applications, and Research Directions. *IEEE Communications Magazine, Communications Magazine, IEEE, IEEE Commun Mag.* 2021;59(6):14-20. doi:10.1109/MCOM.001.2001076
- Renzo M. D. ve Haas H. 2010a, Space Shift Keying (SSK) Modulation With Partial Channel State Information: Optimal Detector and Performance Analysis Over Fading Channels. *IEEE Transactions on Communications, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2010, 58 (11), pp. 3196-3210. hal-00546998
- Renzo M. D. ve Haas H. 2010b, Improving the Performance of Space Shift Keying (SSK) Modulation via Opportunistic Power Allocation. *IEEE Communications Letters, Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2010b, 11 (6), pp. 500-502. fhal-00547009
- Sarkar, T.K., Mailloux, R.J., Oliner, A.A. ve ark. 2006, *History of Wireless*. Wiley and Hoboken, NJ

- Salz, J., 1985., Digital transmission over cross-coupled linear channels. AT & T Technical Journal 64: 1147–1159.
- Som, P. ve Chockalingam, A., 2015, Performance Analysis of Space-Shift Keying in Decode-and-Forward Multihop MIMO Networks, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 64 (1), 132-146.
- Tang, W., Dai, J. Y., Chen, M. Z., Wong, K., Li, X., Zhao, X., Jin, S., Cheng, Q., ve Cui, T. J., 2020. Design and Implementation of MIMO Transmission through Reconfigurable Intelligent Surface. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2020 IEEE 21st International Workshop On, 1–5.
- Tang, W., Dai, J. Y., Chen, M. Z., Wong, K., Li, X., Zhao, X., Jin, S., Cheng, Q., ve Cui, T. J., 2020, MIMO Transmission Through Reconfigurable Intelligent Surface: System Design, Analysis, and Implementation. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, IEEE J. Select. Areas Commun, 38(11), 2683–2699.
- Tao Q., Wang J. ve Zhong C. 2020, "Performance Analysis of Intelligent Reflecting Surface Aided Communication Systems," in *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 11, pp. 2464-2468, Nov. doi: 10.1109/LCOMM.2020.3011843.
- Tarique, M. ve Hasan, T. 2011., Impact of Nakagamim Fading Model on Multihop Mobile Ad Hoc Network. *International Journal of Computer Applications*. 26. 10.5120/3078-4214.
- Tarokh, V., Seshadri, N., ve Calderbank, A., 1998., Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction. *IEEE Transactions on Information Theory* 44 (2): 744–765.
- Telatar, E., 1999., Capacity of multi-antenna Gaussian channels. *European Transactions on Telecommunications* 10 (6): 585–595.
- Winters, J., 1987., On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication* 5 (5): 871–878.
- Wittneben, A., 1991., Basestation modulation diversity for digital SIMULCAST. *IEEE 41st Vehicular Technology Conference, 1991. 'Gateway to the Future Technology in Motion'*, pp. 848–853.
- Winters, J., 1998., The diversity gain of transmit diversity in wireless systems with Rayleigh fading. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 47 (1): 119–123.
- Wu Q, ve Zhang R., 2020, Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network. *IEEE Communications Magazine*, *Communications Magazine*, IEEE, *IEEE Commun Mag.* 2020;58(1):106-112.

- Yarkin, F., Altunbas, I. ve Basar, E., 2017a, Performance analysis of source transmit antenna selection in space shift keying with cooperative amplify-and-forward relaying, *Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO)*, 2017, 45-49.
- Yildirim I, Uyrus A ve Basar E., 2021, Modeling and Analysis of Reconfigurable Intelligent Surfaces for Indoor and Outdoor Applications in Future Wireless Networks. *IEEE Transactions on Communications*, Communications, IEEE Transactions on, IEEE Trans Commun.;69(2):1290-1301. doi:10.1109/TCOMM.2020.3035391
- Younis, A., Sinanovic, S., Di Renzo, M. ve ark. 2013., GeneraRISed sphere decoding for spatial modulation. *IEEE Transactions on Communications* 61 (7): 2805–2815. doi: 10.1109/TCOMM.2013.061013.120547
- Zegrar, S. E., Afeef ve L., Arslan, H. 2020, Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS): Channel Model and Estimation.
- Zhang, R., Yang, L. ve Hanzo, L., 2013, GeneraRISed Pre-Coding Aided Spatial Modulation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 12 (11) 5434-5443, doi: 10.1109/TWC.2013.100213.130848.
- Zou, Y., Gong, S., Xu, J., Cheng, W., Hoang, D. T., ve Niyato, D. 2020, Wireless Powered Intelligent Reflecting Surfaces for Enhancing Wireless Communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vehicular Technology, IEEE Transactions on, IEEE Trans. Veh. Technol, 69(10), 12369–12373.