

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**UYARLANABİLİR AKILLI YÜZEYLER İLE DESTEKLİ
İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE FARKLI GÜRÜLTÜ
ANALİZLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Damla GÜMÜŞ**

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet BİLİM**

**Aralık 2022
KAYSERİ**

**T.C.
NUH NACİ YAZGAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**UYARLANABİLİR AKILLI YÜZEYLER İLE DESTEKLİ
İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE FARKLI GÜRÜLTÜ
ANALİZLERİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Damla GÜMÜŞ**

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet BİLİM**

**Aralık 2022
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

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

Damla GÜMÜŞ



YÖNERGEYE UYGUNLUK ONAYI

“Uyarlanabilir Akıllı Yüzeyler ile Destekli İletişim Sistemlerinde Farklı Gürültü Analizleri” adlı Yüksek Lisans tezi, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan

Damla GÜMÜŞ

Danışman

Doç. Dr. Mehmet BİLİM



YÜKSEK LİSANS BİTİRME TEZİ KABUL VE ONAY SAYFASI

Doç. Dr. Mehmet BİLİM danışmanlığında Damla GÜMÜŞ tarafından hazırlanan “Uyarlanabilir Akıllı Yüzeyler ile Destekli İletişim Sistemlerinde Farklı Gürültü Analizleri” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Nuh Naci Yazgan Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

.../.../2022

JÜRİ:

Danışman : Doç. Dr. Mehmet BİLİM

Üye :

Üye :

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Kurulunun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... /...../

Prof. Dr. Serhan YAMAÇLI

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR

Tez dönemimin tüm aşamalarında sahip olduğu bilgileri paylaşarak, getirdiği özgün yaklaşımlar ve yorumlarıyla, güven aşılayıcı, özverili ve sabırlı tutumuyla bana büyük katkıda bulunan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet BİLİM'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni her daim destekleyen aileme ve çalışma arkadaşlarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Damla GÜMÜŞ

Kayseri, Aralık 2022



UYARLANABİLİR AKILLI YÜZEYLER İLE DESTEKLİ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE FARKLI GÜRÜLTÜ ANALİZLERİ

Damla GÜMÜŞ

Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2022

Danışman: Doç. Dr. Mehmet BİLİM

ÖZET

Yeni nesil iletişim sistemlerinin gelişen teknolojiyle birlikte, yüksek verimliliğe sahip, yüksek iletim hızı, yüksek kullanıcı kapasitesi gibi özellikleri kapsayacak şekilde tasarlanması planlanmaktadır. Bu sebeple, yeni nesil iletişim sistemlerine aday farklı sistemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Son dönemlerde bu adaylardan en popüler ve dikkat çeken uyarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface, RIS) destekli iletişim sistem modelleri olarak ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında, ilk olarak RIS destekli tek atlamaya sahip bir sistem için eklenebilir beyaz genelleştirilmiş Gauss gürültüsü (additive white generalized Gaussian noise, AWGGN) varlığında hata analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, iki kollu seçme birleştirme tekniğini kullanan RIS destekli bir haberleşme sisteminin AWGGN koşullarında hata analizi incelenmiştir. Ele alınan sistem modellerinin Rayleigh sönümlü kanallarda olduğu varsayılmış ve hata analizleri olasılık yoğunluk fonksiyonu temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Sistem modellerindeki farklı parametre değerleri ile türetilmiş olan hata ifadelerinin değerlendirmeleri sunulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda, bu tez kapsamında gerçekleştirilen hata ifadelerinin doğruluğu tam nümerik simülasyonlarla kıyaslanarak gösterilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uyarlanabilir Akıllı Yüzey Teknoloji, Hata Olasılığı Analizi, Rayleigh Sönümlenmesi, AWGGN.

DIFFERENT NOİSE ANALYSIS OF RELONFIGURABLE INTELLIGENT SURFACE ASSISTED CAMMUNILATION SYSTEMS

Damla GÜMÜŞ

Nuh Naci Yazgan University, Graduate School of Sciences

M.Sc. Thesis, December 2022

Supervisor: Assoc. Prof. Mehmet BİLİM

ABSTRACT

It is planned that the next generation communication systems will be designed to include features such as high efficiency, high transmission speed, and high user capacity, together with the developing technology. For this reason, it is tried to develop different systems that are candidates for new generation communication systems. Recently, the most popular and remarkable of these candidates has emerged as the adaptable intelligent surface (RIS) supported communication system models. In this thesis, firstly, error analyzes were performed in the presence of additive white generalized Gaussian noise (AWGGN) for a RIS supported single hop system. Then, error analysis in AWGGN conditions of a RIS supported communication system using the two-arm selection-joining technique is examined. The system models considered are assumed to be in Rayleigh damped channels and error analyzes are performed based on the probability density function. Evaluations of error expressions derived with different parameter values in system models is presented. As a result of the studies, the accuracy of the error statements made within the scope of this thesis has been tried to be shown by comparing them with full numerical simulations.

Keywords: reconfigurable Intelligent Surface Technology, Error Probability Analysis, Rayleigh Fading, AWGGN.

İÇİNDEKİLER

UYARLANABİLİR AKILLI YÜZEYLER İLE DESTEKLİ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE FARKLI GÜRÜLTÜ ANALİZLERİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK ONAYI	iii
KABUL VE ONAY SAYFASI	iv
ÖNSÖZ / TEŞEKKÜR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMA VE SİMGELER	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
1. BÖLÜM: GİRİŞ.....	1
2. BÖLÜM: UYARLANABİLİR AKILLI YÜZEYLER İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI (RIS)	
2.1. Yenilikler	8
2.2. RIS Literatür Bilgisi.....	9
2.2.1. RIS ile ilgili Genel Bilgiler	10
2.2.2. RIS Mimarisi ve Pratik Kısıtlamalar.....	14
2.2.2.1. RIS Elemanları için Ayrık Yansıma Genliği ve Faz Kayması.....	17
2.2.2.2. RIS Elemanları için Birleşik Yansıma Genliği ve Faz Kayması	20
2.2.3. RIS ile ilgili Diğer Bilgiler ve Gelecek Yön	21
2.2.4. RIS ile ilgili Tarihsel Gelişim.....	24
3. BÖLÜM: KABLOSUZ HABERLEŞMEDE FARKLI RIS KATEGORİLERİ	
3.1. RIS Çeşitleri	27
3.1.1. Dalga Kılavuzu RIS	27
3.1.2. Kırıcı RIS.....	28
3.1.3. Yansıtma RIS	28
3.2. Fizik Açısından Meta Yüzeyler	28

3.3. RIS'ların Analizinde Işın Optik Perspektifi ile Dalga Optik Perspektifi	
Kıyaslanması	29
3.4. Ayarlanabilirliğin Sağlanması	32
3.5. RIS Çalışma İlkeleri	34
4. BÖLÜM: ELE ALINAN SİSTEMLER VE KANAL MODELLERİ	
4.1. RIS Destekli Kablosuz Bir Haberleşme Sisteminin AWGGN Analizi.....	35
4.2. İki Kollu Seçme Birleştirme Tekniğini Kullanan RIS Verici Sistemlerin	
AWGGN Analizi	37
5. BÖLÜM: PERFORMANS ANALİZLERİ	
5.1. RIS Destekli Kablosuz Bir Haberleşme Sisteminin AWGGN Analizi.....	40
5.2. İki Kollu Seçme Birleştirme Tekniğini Kullanan RIS Verici Sistemlerin	
AWGGN Analizi	43
6. BÖLÜM: BULGULAR	
6.1. RIS Destekli Kablosuz Bir Haberleşme Sisteminin AWGGN Analizi	
Sonuçları.....	47
6.2. İki Kollu Seçme Birleştirme Tekniğini Kullanan RIS Verici Sistemlerin	
AWGGN Analizi Sonuçları.....	50
7. BÖLÜM: SONUÇLAR.....	53
KAYNAKÇA.....	55
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.

KISALTMA VE SİMGELER

Bu tez çalışmasında kullanılan bazı kısaltmalar ve semboller, olacak şekilde aşağıda verilmiştir.

Simgeler	Açıklamalar
n	Gürültü Terimi
u	Modülasyon Sabiti
N	RIS Üzerindeki Yansıtıcı Eleman Sayısı
θ_j	Yaklaşıklıkın Parametreleri
$f_{\gamma_{sc}}(\gamma)$	Ele Alınan Sistemin Toplam PDF İfadesi
$F_{\gamma}(\cdot)$	Kümülatif Dağılım Fonksiyonu
$\Gamma(\cdot)$	Gama Fonksiyonu
g_i	RIS Üzerindeki i . Yansıtıcı Eleman ile D Arasındaki Kanal Katsayısı
r_i	i . Yansıtıcı Eleman Cevabı
H_i	S ile RIS Üzerindeki i . Yansıtıcı Eleman Arasındaki Kanal Katsayısı
ω_j	Yaklaşıklıkın Parametreleri
η	Sönümleme Sinyali Güç Oranı
λ	Gürültünün Çeşitini Belirleyen Parametre
γ	SNR İfadesi
ζ	Bağımsız ve Eşit Dağılmış Rastgele Değişken
$\bar{\gamma}$	Ortalama SNR
$P(e \gamma)$	Koşullu Hata İfadesi
$W_{\gamma}(\cdot)$	Whittaker Fonksiyonu
$\mathcal{Q}_{\lambda}(\cdot)$	Genelleştirilmiş Gauss fonksiyonu
$D_a(z)$	Parabolik Silindir Fonksiyonu
${}_1F_1$	Hipergeometrik Fonksiyonu
$\Phi_1(\cdot)$	Seri Gösterime Sahip İki Değişkenin Birleşik Hipergeometrik Fonksiyon

Kısaltmalar

5G

6G

B5G

eMBB

URLLC

mMTC

APs

M-MIMO

AWGGN

LoS

FD

RF

MIMO

MmWave

RIS

EM

FPGA

FET

RFID

AoA

TDD

OFDM

HBF

S

D

BFSK

BPSK

SNR

PDF

Açıklamalar

Beşinci Nesil

Altıncı Nesil

5G Ötesi

Gelişmiş Mobil Geniş Bant

Ultra güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim

Devasa Makine Tipi İletişim

Erişim noktaları

Devasa-Çoklu Giriş Çoklu Çıkış

katkılı beyaz genelleştirilmiş Gauss gürültüsü

Görüş Hattı

çift yönlü

Radyo frekansı

çoklu giriş ve çıkış

Milimetre Dalga

Araştırma Bilgi Sistemleri

Elektromanyetik Dalga

Alan Programlanabilir Kapı Dizisi

Alan Etkili Transistörün

Radyo Frekansı Tanımlama

Varış Açısı

Zaman Bölmeli çift yönlü

Ortogonal frekans bölmeli çoğullama

Hologram Beyin Öğrenme

Kaynak

Hedef

ikili frekans kaydırmalı anahtarlama

ikili faz kaydırmalı anahtarlama

Sinyal Gürültü Oranı

Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu

CDF	Kümülatif Yoğunluk Fonksiyonu
SEP	Sinyal Hata Olasılığı
mmW	Milimetre Dalga
RF	Radyo Frekans
QPSK	Dörtlü Faz Kaymalı Anahtarlama



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.	RIS İle İlgili Ana Sanayide İlerleme Prototipler ve Projeler Listesi	8
Tablo 2.	RIS ile İlgili Temel Araştırmalar	10
Tablo 3.	Farklı Dalga Temsillerinin Karşılaştırılması	31
Tablo 4.	λ Parametresinin Aldığı Değere Katsayılar.....	44



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.	Kablosuz kanalların yeniden yapılandırılması için RIS'in temel işlevleri.....	4
Şekil 2.	RIS ile kablosuz sistem/ağ tasarımlarının olası paradigma kaymaları	6
Şekil 3.	Gelecekteki kablosuz ağlarda RIS uygulamalarının şematik gösterimi	7
Şekil 4.	RIS tarafından yansıtılan kanalın yol kaybı modelleri için temel gösterimler.	15
Şekil 5.	RIS mimarisi.....	17
Şekil 6.	PIN diyotuna dayalı ayarlanabilir yansıtma elemanına bir örnek.....	18
Şekil 7.	Pratik RIS yansıtıcı eleman için faz kaymasına karşı yansıma genliği pratiği	20
Şekil 8.	Love'un denklik ilkesi için sorunlar (Bölge I için).....	29
Şekil 9.	Holografik empedans akıllı yüzeyinin kavramsal çizimi.....	30
Şekil 10.	Işın-optiği ve dalga-optiği perspektifinin karşılaştırılması	30
Şekil 11.	Varaktör RIS'in şematik diyagramı.....	33
Şekil 12.	Ele alınan sistem modeli	36
Şekil 13.	Ele alınan sistem modeli	37
Şekil 14.	Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültü etkisi altında ve BFSK modülasyonu için farklı hücre sayılarının hata olasılığı kıyaslaması.	47
Şekil 15.	Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültü etkisi altında ve $N=4$ için farklı modülasyon türlerinin hata olasılığı kıyaslaması.	48
Şekil 16.	Ele alınan sistem modelinin BPSK modülasyonu ve $N=4$ durumunda farklı gürültü türleri için hata olasılığı kıyaslaması.	49
Şekil 17.	Laplas gürültüsü altında ele alınan sistemin farklı N yansıtıcı eleman sayısı ile hata eğrileri	51
Şekil 18.	Ele alınan sistem modeli için Laplas gürültüsü etkisinde farklı iletim hatları ortalama SNR değişimlerine ait hata eğrileri.....	51
Şekil 19.	Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültüsü etkisinde farklı modülasyonlarla hata eğrileri.....	52

1. BÖLÜM

GİRİŞ

Beşinci nesil (5th generation, 5G) kablosuz ağlar dünya çapında hala geliştiriliyor olmasına rağmen, akademide ve endüstride gelecek için 5G gereksinimlerini daha fazlasını karşılamayı hedefleyen 5G ötesi (beyond 5G, B5G) altıncı nesil (6th generation, 6G) kablosuz ağlar gibi, birlikte son derece yüksek güvenli ve düşük gecikme süresi, ultra yüksek veri hızı ve enerji verimliliği, küresel kapsam ve bağlantıları, popüler şekilde araştırılmaktadır [1]. Ancak, 5G servisleri örneğin geliştirilmiş mobil geniş band (Enhanced Mobile Broadband, eMBB), ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim (Ultra-reliable and Low Latency Communications, URLLC), ve büyük makine tipi iletişim (Massive Machine Type Communications, mMTC) için uyumlu mevcut teknoloji trendleri bu gereklilikleri karşılamayabilmektedir. Bunların sebepleri şeklindedir [2-3]:

- Gelişmiş artan baz istasyonları, erişim noktaları (Access points, APs), röleler ve daha kısa iletişim mesafeleri için gelişmiş ağ kapsamı ve kapasite elde etmek adına yapılan dağıtım antenleri olarak sıralanabilir. Ancak daha fazla sunucu ve komplike ağ arayüzleri problemleriyle birlikte daha yüksek enerji tüketimine ve dağıtım/ana taşıma/bakım maliyetine neden olmaktadır.
- Büyük çok girişli çok çıkışlı (Massive-Multi Input Multi Output, M-MIMO) kapılar tesisat için baz istasyonları veya AP rölelerinde önemli ölçüde artan antenler gibi artan gereklilikler, sinyal işlemenin karmaşıklaşmasıyla birlikte donanım ve enerji harcamalarını getirmektedir.
- Büyük ve mevcut band genişliği kullanmak için milimetre dalga boyu ve hatta tera herz (THz) gibi daha yüksek frekanslara geçmek, mesafe boyunca daha yüksek yayılım kayıplarını karşılamak için daha fazla aktif düğüm ve daha fazla anten (yani süper MIMO) montajı ile sonuçlanmaktadır.

Yukarıdaki sorunlar ve sınırlar göz önüne alınarak, düşük, satın alınabilir bir maliyet ve enerji tüketimi ile geleceğin kablosuz ağlarının başarıyla sürdürülebilir bir büyüme kapasitesi için yıkıcı bir şekilde yeni ve yenilikçi teknolojiler geliştirmek bir zorunluluktur.

Diğer bir taraftan, ultra güvenli kablosuz iletişim alanları elde etmek için zamanla değişen kablosuz kanal, kullanıcı hareketliğinden doğan temel zorluklardır. Çeşitli modülasyonlarla kanal zayıflaması için geleneksel yaklaşımlar karşılaşılan bu zorlukları atlamak için kodlama ve çeşitli teknikler ya da uyarlanabilir güç/hız kontrolü ve hüzme şekillendirme tekniklerini kullanmaktadırlar [4-5]. Ancak, bunlar sadece ek yüke ihtiyaç duymaz aynı zamanda büyük ölçüde rasgele kablosuz uyarlamalara ihtiyaç duymaktadırlar. Kanallar üzerinde limitli bir kontrole sahip olmalı, böylece yüksek kapasiteli ve yüksek güvenli kablosuz iletişimlerini yenilmez kılmak için önündeki en büyük engeli kaldırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak RIS destekli tek atlamaya sahip bir sistem için eklenebilir beyaz genelleştirilmiş Gauss gürültüsü (additive white generalized Gaussian noise, AWGGN) varlığında hata analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu alt bölümde yapılan analizler sonucunda farklı özel fonksiyonları (parabolik silindir, hipergeometrik, hata vb. gibi) kullanarak çeşitli hata ifadeleri elde edilmiştir. İkinci kısımda ise, iki kollu seçme birleştirme tekniğini kullanan RIS destekli bir haberleşme sisteminin yine birinci alt başlıktakine benzer şekilde AWGGN koşullarında hata analizi incelenmiştir. Ele alınan sistem modellerinin Rayleigh sönümlü kanallarda olduğu varsayılmış ve hata analizleri olasılık yoğunluk fonksiyonu temel alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk kısımda türetilen ifadelerden parabolik silindir fonksiyonu içeren çözüm kullanılarak farklı yansıtıcı eleman sayısı, modülasyon türü ve gürültü tiplerine ait sonuçlar sunulmuştur. İkinci kısımda ise yapılan analiz sonucunda yaklaşık bir hata ifadesi türetilmiş ve yine farklı sistem parametre değerleri ile çeşitli senaryolar sunulmuştur. Tezin bulgular kısmında sunulan sonuçlarda, analitik ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu gözlemlenmektedir. Bu uyumluluk ise, tezde yapılan analitik çalışmaların doğruluğunu göstermektedir.

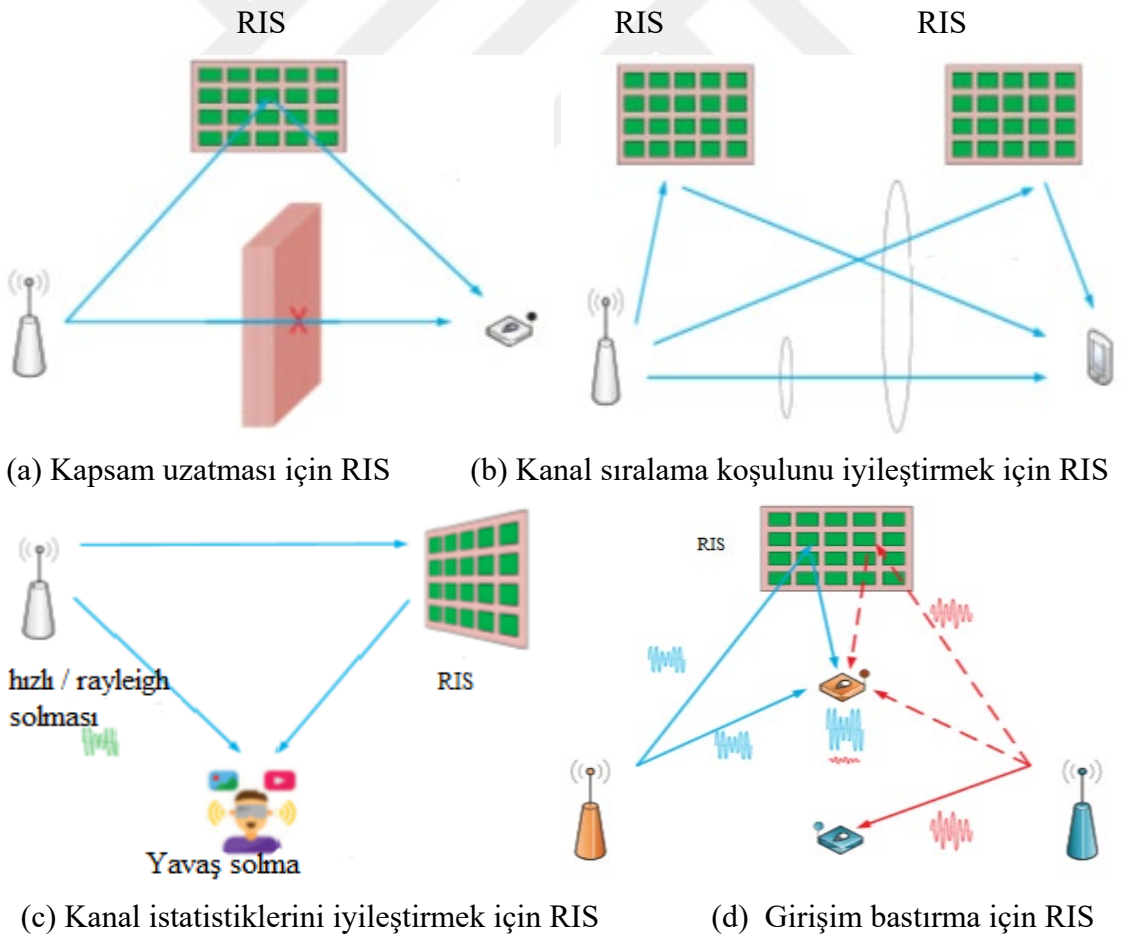
2. BÖLÜM

UYARLANABİLİR AKILLI YÜZEYLER İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI (RIS)

Daha önce verilen motivasyonlarla, RIS B5G/6G kablosuz iletişim sistemleri için akıllı ve yeniden yapılandırılabilir. Kablosuz kanal çevreye yaymak için yeni ortaya çıkmış umut vaadeden bir konudur [6-7]. Genel olarak konuşursak, RIS bağımsızca gelen sinyaller için her biri uyarabilen kontrol edilebilen genlik ve faz değıştirenler için büyük bir çoğunluğu pasif yansıtıcı elemandan oluşan düzlemsel bir yüzeydir. Yoğun olarak kablosuz ağlarda RIS dağıtmak ve yansımaları akıllıca koordinasyon etmek, vericiler ile kablosuz kanallar arasında sinyal yayılımı ve alıcılardan istenileni gerçekleştirmek ve dağıtımını elde etmek için esnek bir şekilde yapılandırılabilir. Böylece kanal sönümlemeleri ve arayüz sorunlarıyla mücadelenin temelleri için yeni bir anlam sağlar, kablosuz iletişim kapasitesi ve güvenilirliği için potansiyel bir kuantum sıçraması elde edilmektedir. Şekil 1’de görüldüğü üzere, RIS akıllı yansımalar aracılığıyla alıcı-verici arasını atlamak için yapılmış sanal direk görüş hattı (line-of-sight, LoS) bağlantısı, kanal sıra koşulunu geliştirmek için istenen yöne doğru ekstra sinyal yolları eklemek, kanal istatistiklerini ve dağıtımını ultra yüksek güvenilirlik için Rayleigh/hızlı sönümlemeyi Rician/yavaş sönümlemeye dönüştürme, ortak kanal/hücreler arası girişimi bastırma/boşaltma vb. gibi kablosuz kanaldaki fonksiyonları elde edebilmektedir.

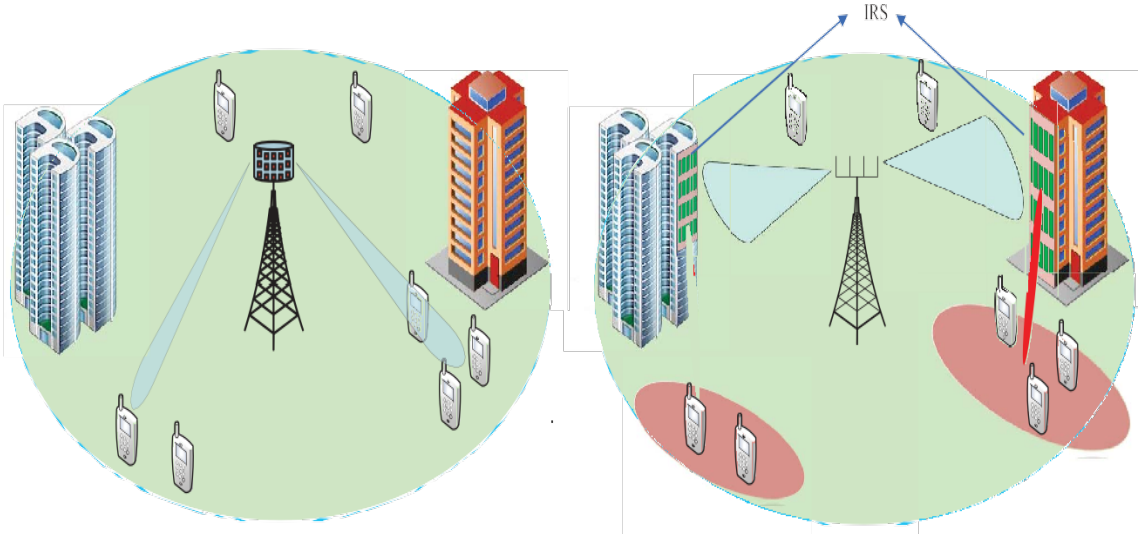
Kavramsal olarak çekici olmasının yanı sıra, RIS’in bir dizi uygulanabilirlik avantajı vardır. İlk olarak, geleneksel aktif anten dizileri veya yakın zamanda önerilen aktif yüzeyler ile karşılaştırıldığında, yansıtma elemanları (örneğin, düşük maliyetli basılı dipoller), herhangi bir iletim radyo frekansı (RF) zincirine ihtiyaç duymadan yalnızca çarpma sinyallerini pasif olarak yansıtır. Sonuç olarak, daha düşük donanım/enerji maliyetleri ile uygulanabilmektedir. Ayrıca, RIS tam çift yönlü (Full Duplex, FD) modda

çalışır ve herhangi bir anten gürültüsü amplifikasyonunun yanı sıra kendi kendine parazit içermez, bu nedenle geleneksel aktif rölelere göre rekabet avantajları sunmaktadır. Örnek vermek gerekirse, FD rölesi gibi davranmasının yanı sıra spektral verimliliğin kendi kendine girişim iptali için karmaşık tekniklere ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, RIS genellikle düşük maliyetli, hafif ve uyumlu geometrik yapıya sahip olduğundan, değiştirme ve yerleştirme için ortam nesnelere kolayca monte yapılabilmektedir. Son olarak, RIS kablosuz ağlara şeffaf bir şekilde entegre edilebilmekte ve yardımcı bir cihaz olarak hizmet etmektedir. Böylece mevcut kablosuz sistemlerinde (örnek vermek gerekirse hücresel veya WiFi) uyumluluk ve büyük esneklik sağlanmaktadır. Yukarıdaki umut verici avantajlar nedeniyle, RIS, spektral ve enerji verimliliğini maliyet etkin bir şekilde önemli ölçüde artırmak için kablosuz ağlarda toplu olarak kullanmaya uygundur. Bu nedenle, RIS'in kablosuz sistem/ağ tasarımlarında kullanılması öngörülmektedir. RIS'siz mevcut MIMO sisteminden yeni RIS destekli küçük/orta MIMO sistemine faydalanması öngörülmektedir.

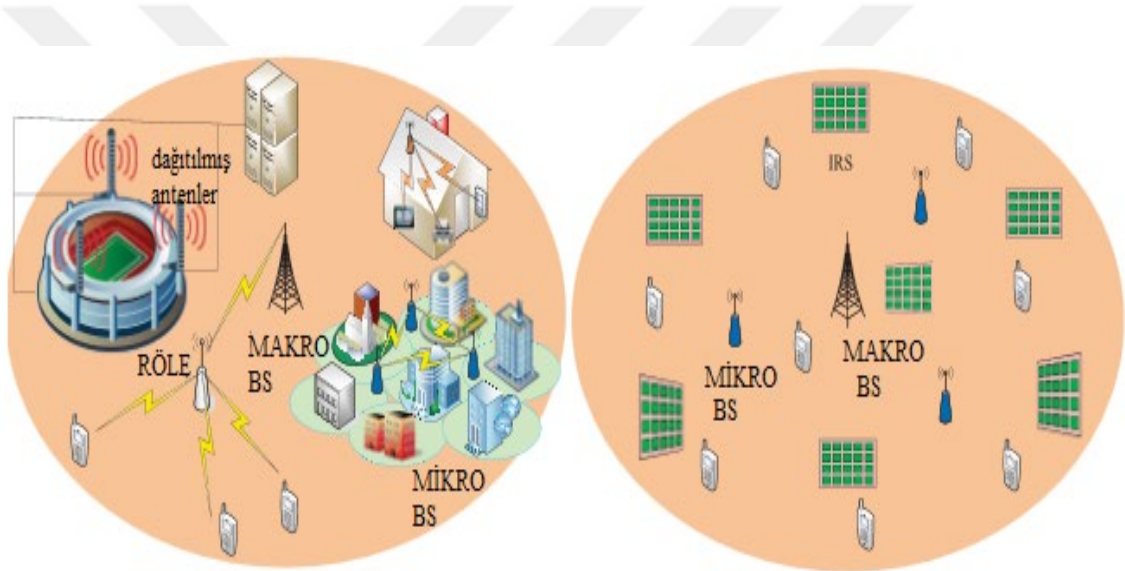


Şekil 1. Kablosuz kanalların yeniden yapılandırılması için RIS'in temel işlevleri [8].

Şekil 2'de gösterildiği gibi, gelecekte yeni RIS destekli hibrit ağ heterojen kablosuz ağlar Şekil 2 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Doğrudan keskin ışınlar üretmek için onlarca, hatta yüzlerce aktif antene dayanan MIMO'nun aksine RIS destekli bir MIMO sistemi, kullanıcıların hizmet kalitesini korurken baz istasyonunun önemli ölçüde daha az antenle donatılmasını sağlamaktadır. Bu, akıllı pasif yansımalar [9] aracılığıyla ince taneli yansıma ışınları oluşturmak için RIS'in geniş açıklığından yararlanılarak gerçekleştirilir. Neticede, kablosuz sistemler için özellikle sonunda daha yüksek frekans bantlarına geçecek olan, enerji kullanımının maliyeti ve sistem donanımı önemli ölçüde azaltılabilir. Mevcut kablosuz ağlar, röleler, dağıtılmış antenler, makro ve küçük erişim noktaları vs için oluşan heterojen çok katmanlı bir mimari kullanıyor olsa da, bunların tümü ağda yeni sinyaller üreten aktif düğümlerdir. Konuşlandırılan daha aktif düğümlerle artan ağ uzamsal kapasitesinin öncülünü gerçekleştirmek için karmaşık koordinasyon ve girişim yönetimi gerektirir. Bu strateji, ağ işletim maliyetlerinin kaçınılmaz olarak artması nedeniyle uzun vadede kablosuz ağ kapasitesinin genişlemesini sürdüremeyebilir. Buna karşılık, RIS'ların kablosuz ağa entegre etmek, aktif bileşenlerle mevcut heterojen ağı yalnızca akıllı bir şekilde birlikte çalışan hem aktif hem de pasif bileşenlerden oluşan yeni bir hibrit mimariye yönlendirilecektir. RIS'lar aktif muadillerine kıyasla çok daha düşük maliyetli olduklarından, pasif yansımaları ve sonuçta ortaya çıkan yerel kapsama alanı sayesinde karmaşık girişim yönetimine ihtiyaç duymadan kablosuz ağda daha da düşük maliyetle daha yoğun bir şekilde konumlandırılabilirler. Toplam maliyetleri göz önüne alındığında, hibrit ağda konumlandırılan aktif baz istasyonları ve pasif RIS'lar arasındaki oranları en uygun şekilde ayarlayarak, maliyetle sürdürülebilir bir ağ kapasitesi ölçeklendirmesi elde edilebilir [10].



(a) m sistemi ile RIS destekli küçük/orta sistemlerin karşılaştırması

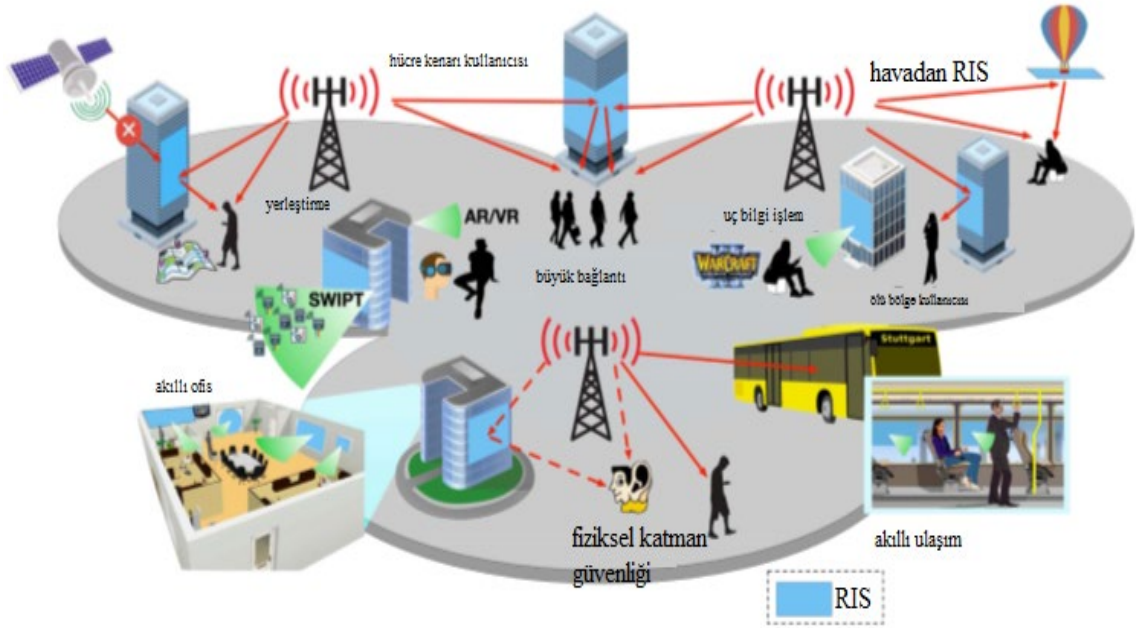


(b) RIS destekli hibrit kablosuz ağa karşı heterojen kablosuz ağ

Şekil 2. RIS ile kablosuz sistem/ağ tasarımlarının olası paradigma kaymaları [8].

Şekil 3'de, çeşitli gelecek vaat eden uygulamalarla RIS'lar tarafından desteklenen gelecekteki bir kablosuz ağ örneği verilmektedir. Örnek vermek gerekirse, RIS, tıkanmaya karşı son derece savunmasız olan THz ve mmWave (Milimeter Wave mmWave) iletişimlerinde kapsama alanı büyümesi için özellikle yarar sağlamaktadır. Ayrıca, RIS'ların hücre kenarında konumlandırılması, yalnızca hücre ucundaki kullanıcılarda istenen sinyal gücünün iyileştirilmesine yardımcı olmakla kalmaz, aynı zamanda komşu hücrelerden onlara giden ortak kanal girişiminin bastırılmasını da kolaylaştırır. Buna ek olarak, RIS'in geniş açıklığı, AP'den kablosuz cihazlara eşzamanlı kablosuz bilgi ve güç aktarımının verimliliğini artırmak için uzun mesafelerdeki önemli

güç kaybını telafi ederek yakındaki cihazlara huzme biçimini yansıtmak için kullanılabilir. Örnek verilirse, akıllı ofisler ve evler olarak sıralanabilir.



Şekil 3. Gelecekteki kablosuz ağlarda RIS uygulamalarının şematik gösterimi [8].

İç mekan ortamında gelişmiş kapsama alanı ve yüksek kapasiteli noktalar elde etmeye yardımcı olmak için, RIS tavanlara, duvarlara, mobilyalara ve hatta tabloların ve dekorasyonların arkasına da takılabilmektedir. Bu, özellikle havaalanları, stadyumlar, alışveriş merkezleri, akıllı fabrikalar ve diğer kamusal alanlardaki eMBB ve mMTC uygulamaları için ilgi çekmektedir. RIS, özellikle büyük cihazlar çeşitli yayılma koşullarında dağıtıldığında ve cihazların yalnızca küçük bir kısmı her an iletişim için tipik olarak aktif olduğunda, mMTC senaryoları için cihaz etkinliği algılama doğruluğunu ve verimliliğini etkin bir şekilde geliştirmek için kullanılabilir [11]. RIS, Doppler'i etkin bir şekilde telafi ederek ve elektrik direkleri, reklam panoları ve bina cepheleri üzerindeki yayılma etkilerini geciktirerek, uzaktan kumanda ve akıllı ulaşım için URLLC gibi çeşitli uygulamaları desteklemek için dış ortamda yüksek hızlı hareket eden araçların yüzeyine uygulanabilmektedir [12-13]. İletişim güvenilirliği, için tipik olarak öngörülemeyen kablosuz kanalları daha belirleyici olanlara dönüştürmek için RIS kullanılarak önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Bu, URLLC uygulamaları için önemli olan gecikmeyi azaltır ve paket yeniden iletimlerinin sayısını azaltır. Sonuç olarak, RIS, mevcut “teknolojik açıdan yetersiz” dünyamızı akıllı bir dünyaya dönüştürmek için oyunun kurallarını değiştiren bir teknoloji olmaktadır. Bu teknoloji, ulaşım, üretim, akıllı şehirler vb. dahil olmak üzere 5G/6G'deki çeşitli dikey işletmeler üzerinde olumlu etkilere

sahip olma potansiyelini içermektedir. RIS, yakın zamanda yaklaşmakta olan 6G ekosistemi için uygun bir teknik olarak kabul edilmektedir [1, 14-15]. Ek olarak, endüstri ilgisindeki artışı oluşturmak için yeni önem zincirleri oluşturmak ve RIS benzeri teknolojilerin uygulanmasına ve ticari hale getirilemsine yönelik oluşumlardır. Bu arada, bu yeni alanda araştırmaları daha ileriye taşımak için bir dizi pilot proje başlatılmaktadır. Bu projelerle ilgili daha fazla ayrıntı Tablo 1'de verilmiştir. Akıllı duvar [16], akıllı yansıma dizisi [17] ve RIS [18-19], büyük akıllı yüzey/antenler (LISA) [9], RFocus [21], diğerleri arasında, farklı terminolojilere rağmen, esasen aynı pasif ve ayarlanabilir yansıtıcı/kırıcı yüzeyler ilkesine dayanmaktadır.

Tablo 1. RIS İle İlgili Ana Sanayide İlerleme Prototipler ve Projeler Listesi [8].

Şirket	Yıl	Ana Faaliyet ve Başarı
NTT DOCOMO and Metawave	2018	İlk meta-yapıcı yansıtıcı diziyi kullanarak 28 GHZ-bandını gösteren firmadır [27].
Lumotive and tower Jazz	2019	Sıvı kristal meta yüzey kullanan ilk gerçek katı hal ışını gösteren firmadır [28].
Pivotal Commware	2019	Yazılım tanımlı antenleri kullanarak holografik hüzmleme teknolojisini gösteren firmadır [28].
AGC inc. and NTT DOCOMO	2020	5G için ilk prototip şeffaf dinamik meta yüzeyi gösteren firmadır [29].
Greenerwave	-	Yeniden yapılandırılabilir metayüzeyler için fizikten ilham alan algoritmalar geliştiren firmadır [30].
Araştırma Firmaları	Başlangıç Yılı	Ana Faaliyet
VisorSurf	2017	Yazılım odaklı işlevsel meta yüzey için bir donanım platformu geliştiren firmadır [31].
ARIADE	2019	Yeni radyo ve yapay zeka teknikleriyle entegre meta yüzey tasarlayan firmadır [32].
PathFinder	2021	Akıllı meta yüzey özellikli kablosuz 2.0 ağlar için algoritmik ve teorik temelleri oluşturan firmadır [33].

2.1. Yenilikler

RIS, yeniden yapılandırılabilir bir meta yüzey olarak görülebilmesine rağmen, görünmezlik pelerini, görüntüleme, radar algılama ve hologramlar dahil olmak üzere elektromanyetik (EM) dalgaları manipüle ederek meta yüzeyin geleneksel uygulamalarını genişletmektedir [22]. RIS, kablosuz iletişim için yeni bir sınır olan akıllı ve yeniden yapılandırılabilir bir yayılma ortamı için yaratıcı bir etkinleştirici olarak da hizmet etmektedir. Ayrıca, aktif antenleri/RF zincirlerini korumak için kablosuz alıcı-vericinin yakın alanına sabit/yeniden yapılandırılabilir ışın desenlerine sahip pasif bir

ayna/merceğin yerleştirildiği geleneksel yansıtıcı dizi [23] ile karşılaştırıldığında, RIS, akıllı yansıma yoluyla kablosuz iletişim kanalını değiştirmeye yardımcı olmak için ağda esnek bir şekilde bulunmaktadır. Bu nedenle, RIS destekli kablosuz sistemlerin ve ağların tasarımı, iletişim açısından ortaya çıkan ve aşağıda ayrıntıları verilen benzersiz ve yeni zorluklarla karşılaşmaktadır.

İlk olarak, her bir RIS'in pasif yansımalarındaki tüm yansıtıcı unsurlar, çevresindeki alanda işbirlikçi sinyal odaklaması ve parazit iptali sağlamak için uygun şekilde yapılandırılmalıdır. Bu arada, RIS'lar tarafından yeniden yapılandırılmış kablosuz kanallar üzerinden uçtan uca iletişimlerini optimize etmek için RIS pasif yansımaları da baz istasyonlarının ve kullanıcıların iletimleriyle birlikte tasarlanmalıdır. Bu, her kullanıcının yakınında herhangi bir ilişkili RIS olup olmadığına bakılmaksızın ağdaki tüm kullanıcılara hizmet vermek için gereklidir. Ayrıca, kablosuz verici ve alıcının yüzeyin aynı tarafında veya zıt taraflarında bulunduğu uygulama senaryolarına bağlı olarak, bu tür yüzeylerin pratik olarak sırasıyla sinyal yansıması ve kırılması için bir ayna veya lens olarak üretilebileceğini unutulmamalıdır.

İkincisi, RIS'da tipik olarak RF zincirleri bulunmadığından, RIS ile hizmet veren baz istasyonları veya arasında (yukarıda bahsedilen RIS yansıma optimizasyonu için gerekli olan) kanal durum bilgisini elde etmek, zorlu bir görev haline gelmektedir. Bu, RIS'ın yaygın olarak çok sayıda yansıtıcı öğeye ve dolayısıyla tahmin edilmesi gereken ilişkili kanal katsayılarına sahip olduğu göz önüne alındığında özellikle doğru olmaktadır. Üçüncüsü, farklı çalışmaları (yansıtmaya karşı iletme/alma) ve farklı dizi mimarilerine (pasif ve aktif) sahip oldukları için, ağ kapasitesini en üst düzeye çıkarmak için RIS'ları kablosuz bir ağda dağıtmanın en iyi yolu, muhtemelen yalnızca aktif baz istasyonları veya AP'ler ve röleler içeren geleneksel kablosuz ağların dağıtımını düşünüldüğünde aktif en iyi dağıtım yolundan çok farklı olacaktır. Bu, mevcut araştırmanın kapsamlı bir şekilde yeniden incelenmesini gerektirmektedir. Özetle, RIS'ların kablosuz ağlara etkin entegrasyonu, her ikisi de yeni araştırmalar gerektiren yeni fırsatlar ve zorluklar sunmaktadır.

2.2. RIS Literatür Bilgisi

Bu bölümde, temel RIS sinyal ve kanal modellerinin ilk tanıtıldığı, ardından donanım mimarisinin ve pratik kısıtlamaların yanı sıra bunların neden olduğu sorunlarının gelecekte araştırmaya değer olduğu RIS destekli kablosuz iletişim ile ilgili

temel bilgileri sunulmaktadır. Ayrıca Tablo 2’de RIS ile ilgili literatür özeti verilmektedir.

Tablo 2. RIS ile İlgili Temel Araştırmalar [8]

Referans	Ana Katkı
[7]	Kablosuz iletişim için RIS teknolojisine genel bir bakış, ana uygulamalar ve önemli teknik değişiklikler tartışılmıştır.
[18]	İletişim algılama ve bilgi işlem performansını iyileştirmede yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler uygulamaları tartışılmıştır.
[19]	RIS çok yönlü denetleyici ve enerji açısından verimli vericinin uygulanmasına vurgu yaparak, RIS ile güçlendirilmiş kablosuz ağlar için son teknoloji çözümleri özetlenmiştir.
[20]	LISA'nın uygulamalarını ve açık araştırma problemlerini, ayrıca farklılıklarını ve geri saçılma iletişimi ile olan bağlantıları tartışılmıştır.
[24]	Yazılım kontrollü meta yüzeylerin fiziksel ve işlevsel mimarisinin ağ ve tanıtımı katmanı entegrasyonu tartışılmıştır.
[26]	Röle ve RIS arasındaki temel benzerlikleri ve farklılıkları incelenmiş ve iletişim performansları karşılaştırılmıştır.
[27]	Akıllı yüzeyler ve yansıtıcı dizi kullanarak farklı RIS uygulamalarına genel bakış ve uygun RIS kanal modellemesinin yanı sıra RIS destekli kablosuz ağdaki zorluklar ve fırsatlar tartışılmıştır.
[28]	Holografik MIMO yüzeyinin tanımı ve donanım mimari sınıflandırılmaları ve ana özellikleri özetlenmiştir.
[29]	RIS uygulamalarına, teknolojik avantajlara, son teknoloji araştırmalara ve gelecekteki araştırma yönergelerine kapsamlı bir genel bakış savunulmuştur.
[30]	RIS kanal tahmini, kaynak tahsisi ve pasif bilgi aktarımı dahil olmak üzere RIS ile ilgili üç adet tasarım konusu ele alınmıştır.
[31]	RIS destekli kablosuz ağın literatür araştırması verilmiş ve farklı performans ölçümleri ve analitik yaklaşımları gözden geçirilmiştir.
[32]	RIS’ın temelleri gözden geçirmiş, işlevleri ve performans kazanımları hakkında bilgiler verilmiştir.

2.2.1. RIS ile ilgili Genel Bilgiler

Bir vericiden istenilen alıcıya iletişimde yardımcı olmak için düzlemsel bir yüzey üzerinde $\mathcal{N}$ tane pasif yansıtıcı elemanlar içeren bir RIS'in yerleştirildiği temel noktadan noktaya iletişim sistemi bu bölümde anlatılmaktadır. Kolaylık için hem verici hem de alıcıda tek bir anten olduğu ve iletişim sisteminin belirli bir taşıyıcı frekansta dar bir bantta olduğu varsayılmaktadır. Taşıyıcı frekansı ve sistem bant genişliği Hz cinsinden

fc ve B ile gösterilmektedir. Bununla birlikte, $B \ll fc$ şeklinde gösterilmektedir. $X(t)$ eşdeğer karmaşık değerli baz bant iletim sinyalini gösterdiği varsayılmaktadır.

Genelliği kaybetmeden, ilk olarak, RIS'in $\mathcal{N}$ ile gösterilen ve $n \in \{1, \dots, N\}$ şeklinde belirtilen belirli bir yansıtıcı elemanı aracılığıyla vericiden alıcıya sinyal yayılımına odaklanılmaktadır. Vericiden RIS elemanına eşdeğer taban bandı kompleks kanal katsayısı $a_{1,n}e^{-j\xi_{1,n}}$ ile gösterilir. Burada $a_{1,n}$ ve $\xi_{1,n}$ sırasıyla faz kaymasını, dar bant sisteminin frekansını ve düz kanalın genlik zayıflamasını ve temsil etmektedir. Daha sonra, RIS n. elemanı için geçiş bandı sinyali aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$Y_{in,n}(t) = \text{Re} \left\{ a_{1,n} e^{-j\xi_{1,n}} x(t) e^{j2\pi f_c t} \right\} \quad (1)$$

RIS'in n. elemanı tarafından indüklenen zaman gecikmesi ve genlik zayıflaması sırasıyla $t_n \in [0, 1/f_c]$ ve $\beta_n \in [0, 1]^2$ ile gösterilmektedir. Devrenin doğrusal olmaması ve faz gürültüsü gibi donanım kusurları görmezden gelinerek, RIS'in n. elemanı tarafından yansıtılan sinyal ifadesi şu şekildedir:

$$\begin{aligned} Y_{out,n}(t) &= \beta_{n,yin,n}(t - t_n) \\ &= \text{Re} \left\{ \beta_n a_{1,n} e^{-j\xi_{1,n}} x(t - t_n) e^{j2\pi f_c (t - t_n)} \right\} \\ &\approx \text{Re} \left\{ \left[\beta_n e^{-j\theta'_n} a_{1,n} e^{-j\xi_{1,n}} x(t) \right] e^{j2\pi f_c t} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

Burada $-\theta'_n \in [-2\pi f_c t_n, 0]$ ve $t_n \leq 1/f_c \ll 1/B$ olduğu için $x(t - t_n) \approx x(t)$ 'ye olarak varsayılmaktadır ve n. elemanı tarafından indüklenen faz kaymasıdır. Eşdeğer temel bandı gösteren $s_{in,n}(t) \triangleq a_{1,n} e^{-j\xi_{1,n}} x(t)$ ve $s_{out,n}(t) \triangleq \beta_n e^{-j\theta'_n} a_{1,n} e^{-j\xi_{1,n}} x(t)$ olduğu kabul edilmekte, bunlar sırasıyla $y_{in,n}(t)$ ve $y_{out,n}(t)$ 'nin eşdeğer temel bant sinyallerini göstermektedir. RIS sinyalin temel banttaki yansıma modeli aşağıdaki gibi şu şekilde verilmektedir:

$$s_{out,n}(t) = \beta_n e^{-j\theta'_n} s_{in,n}(t) \stackrel{(a)}{=} \beta_n e^{j\theta_n} s_{in,n}(t) \quad (3)$$

Burada $\theta_n \in [0, 2\pi]$ 'dır ve (a), faz kaymasının 2π 'ye göre periyodik olması dolayısıyla kaynaklanmaktadır. Eşitlik (3)'ten itibaren, temel bant sinyal modelinde, RIS n. elemanının çıkış/yansıma sinyalinin ve buna karşılık gelen giriş/çarpma sinyalinin

karmaşık bir yansıma katsayısı olan $\beta_n e^{j\theta_n}$ ile çarpılmasıyla verildiği görülmektedir. Dar bantlı uçtan uca sistemi RIS ile modellemek için, RIS elemanının neden olduğu fiziksel gecikmenin sembol gecikmesinden çok daha az olması istendiği unutulmamalıdır.

RIS n. elemanından alıcıya, yansıyan sinyal $\alpha_{2,n} e^{-j\xi_{2,n}}$, n. eleman tarafından verilen benzer bir eşdeğer dar bant frekans düz kanalına tabi tutulmaktadır. Daha sonra, RIS n. elemanı yansıması ile alıcıya ulaşan band genişliği sinyali şu şekilde ifade edilmektedir:

$$Y_{r,n}(t) = \text{Re} \left\{ \left[a_{1,n} e^{-j\xi_{1,n}} \beta_n e^{j\theta_n} a_{2,n} e^{-j\xi_{2,n}} x(t) \right] e^{j2\pi fct} \right\} \quad (4)$$

Böylece, RIS n. elemanı aracılığıyla vericiden alıcıya giden kademeli kanal modellenmiş olmaktadır. $h_{r,n}^* \square \alpha_{1,n} e^{-j\xi_{1,n}}$ ve $g_n \square \alpha_{2,n} e^{-j\xi_{2,n}}$ olduğu varsayıldığından eşitlik (4)'e karşılık gelen taban band sinyal modeli ise:

$$Y_n(t) = \beta_n e^{j\theta_n} h_{r,n}^* g_n x(t) \quad (5)$$

şeklindedir. Eşitlik (5)'ten itibaren RIS yansıyan kanalın, verici (n. eleman) kanalı, RIS yansıması ve n. eleman alıcı kanalı olmak üzere üç terimin çarpımı olduğu görülmektedir. Basitlik açısından, komşu RIS unsurları tarafından yansıtılan sinyal bağlantısının olmadığı varsayılmakta, yani tüm RIS unsurlarının olay sinyalleri bağımsız olarak yansıttığı kabul edilmektedir. Önem taşıyan bir yol kaybı nedeniyle, RIS tarafından ilk defa yansıtılan sinyaller dikkate alıyor olmakta ve sadece iki veya daha fazla olarak yansıtılanlar görmezden gelinmektedir. Bu nedenle, tüm RIS unsurlarından alınan sinyal, kendi yansıyan sinyallerinin bir sinyal düşümü olarak modellenenilmekte; böylece, baz temel sinyal modeli

$$y(t) = \left(\sum_{n=1}^N \beta_n e^{j\theta_n} h_{r,n}^* g_n \right) x(t) = h_r^H \Theta g x(t) \quad (6)$$

olarak yazılabilmektedir. Burada $h_r^H = [h_{r,1}^*, \dots, h_{r,N}^*]$, $\Theta = \text{diag}(\beta_1 e^{j\theta_1}, \dots, \beta_N e^{j\theta_N})$ ve $g = [g_1, \dots, g_N]^T$ $\mathcal{N}$ öğelerine sahip RIS'in esas olarak giren sinyal vektöründen bir $\mathcal{N} \times \mathcal{N}$ kompleks köşegen matris ile yansıyan sinyal vektörüne doğrusal bir eşleme gerçekleştirdiğine dikkat edilmelidir. Bu matris çaprazdır, çünkü her RIS ögesi sinyali

bağımsız olarak yansıtır ve RIS öğeleri üzerinde herhangi bir sinyal bağlantısı veya ortak işlem bulunmamaktadır [7, 9, 33].

h_r^H ve g 'deki kanal katsayılarının genellikle mesafeye bağlı yol kaybı, büyük ölçekli gölgeleme ve küçük ölçekli çok yollu sönümlenmeye bağlı olduğuna dikkat edilmektedir. Özellikle, RIS tarafından yansıtılan kanalın yol kaybı ortalama gücünü yakalar ve bu nedenle RIS destekli iletişimlerin bağlantı bütçe analizi ve performans değerlendirmesi için bu durum gereklidir. Genelleme kaybı olmadan, Şekil 4 (a) 'da gösterildiği gibi, sırasıyla $d_{1,n}$ ve $d_{2,n}$ tarafından verilen mesafelerle birlikte hem vericiden hem de alıcıdan yeterince uzakta olduğu varsayılan RIS n . öğesini göz önünde bulundurulmaktadır. Uzak alan propagasyonu koşulunda $d_{2,n} = d_2$ ve $d_{1,n} = d_1$, $\forall_n$ için olduğu varsayabilmektedir. Daha sonra, $E(|g_n|^2)\sigma c_2(\frac{d_2}{d_0})^{-a_2}$ ve $E(|h_{r,n}|^2)\sigma c_1(\frac{d_1}{d_0})^{-a_1}$, $\forall_n$ için, buradan $c_1(c_2)$ yolu gösteren ve karşılık gelen d_0 yol kaybını gösterilmektedirken, $a_1(a_2)$, eşitlik 2 'de başlayıp (boş alan yayılımında) eşitlik (6)' ya kadar aynı değerlere sahip denk gelen yol kaybını göstermektedir [5]. Eşitlik (5)'ten, $P_{n,r}$ ile gösterilen RIS n . elemanı tarafından yansıma yoluyla alınan ortalama sinyal gücünün, $p_{r,n}$ ile ters orantılı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Buna göre

$$P_{r,n} \propto \frac{1}{d_1^{a_1} d_2^{a_2}} \quad (7)$$

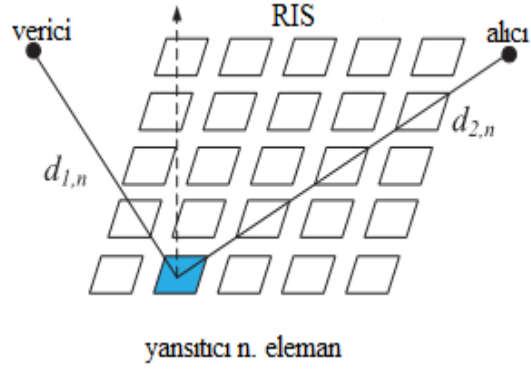
eşitliği açıkça yazılabilmektedir. Başka bir deyişle, n . eleman aracılığıyla yansıtılan RIS kanalı, çift yol kaybından muzdariptir, bu nedenle ürün mesafesi yol kaybı modeli olarak adlandırılmaktadır. Böylelikle, fazlarını birlikte tasarlayarak ve yüksek pasif ışınını şekillendirmek ve kazanımlarını elde etmek için yansıma genliklerini, çift zayıflamadan kaynaklanan yüksek güç kaybını telafi etmek için pratikte çok sayıda RIS yansıtıcı elemanına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 4 (b)' de sonsuz büyüklüğe sahip mükemmel bir elektrik iletkeni (PEC) (veya metalik plaka) ile RIS çevrilmektedir. Serbest alan yayılımını varsayarak ve görüntü teorisini [34] uygulayarak P_r ile gösterilen PEC'in yansıması aracılığıyla alıcıda alınan sinyal gücünün, iki atlamalı bağlantıların toplam mesafesinin karesi ile ters orantılı olduğu gösterilebilmektedir. Bundan hareketle,

$$P_r \propto \frac{1}{(d_1 + d_2)^2} \quad (8)$$

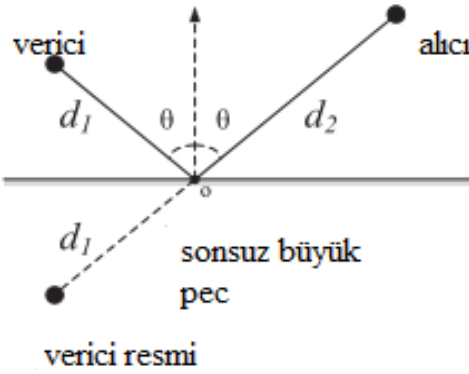
eşitliği açıkça yazılabilir. Bu kalıp genellikle toplam mesafe yolu kaybı modeli olarak söylenmektedir. Öngörüsül olarak, sonsuz büyüklükteki PEC'nin yansıması nedeniyle, alıcıda alınan sinyal, Şekil 1 (b)' de gösterildiği gibi orijinal vericinin görüntü noktasında bulunan ve spekül yansıma olarak da bilinen $d_1 + d_2$ bağlantı mesafesine sahip eşdeğer bir vericiden alınmış gibi olduğu değerlendirilmektedir. Bu modelin sonsuz büyük bir PEC ile serbest alan yayılımı için geçerli olduğunu, ancak genel olarak eşitlik (5-7)'de verildiği gibi eleman seviyesinden modellenen RIS yansıtımlı kanal için geçerli olmadığı unutulmamalıdır. Özellikle, toplam mesafe modelinin bir veya daha fazla sonlu boyutlu ayarlanabilir PEC ile senaryoya uygulanması ve alınan sinyal gücünün, çarpıcı pasif ışın oluşturma kazanımlarından yararlanarak ve aynı zamanda, serbest alan yayılımı altında bile, daha olumlu (ürün mesafesi modeline kıyasla) toplam mesafeye dayalı yol kaybını takip ederek PEC'lerin sayısı ile ölçeklendirildiği sonucuna varılmasında uygun değildir. Bu konuda daha fazla teorik ve/veya deneysel çalışma [35-36] 'te bulunmaktadır.

2.2.2. RIS Mimarisi ve Pratik Kısıtlamalar

RIS'in kontrol edilebilir yansıması, mevcut sayısal yeniden yapılandırılabilir meta yüzeylerden yararlanarak pratik olarak elde edilebilmektedir [51]. Özel olarak, akıllı yüzey, elektriksel kalınlığı tipik olarak ilgili sinyalin alt dalga boyuna göre dizilen, uygun şekilde planlanmış meta atomlardan ve pasif yansıtıcı elemanlardan oluşan düzlemsel bir dizidir. Her bir elementin ve atomun geometrik şeklini (örneğin, kare veya bölünmüş halka), boyutunu, yönünü, düzenlemesini vb. gibi tasarlayarak, istenen sinyal yanıtı (örneğin, yansıma genliği ve/veya faz kayması) gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte, kablosuz iletişimde, kanal genellikle vericinin/alıcının ve çevredeki nesnelerin hareketliliği nedeniyle zamanla değişkendir, böylece kanal varyasyonuna bağlı olarak RIS'in gerçek zamanlı ayarlanabilir yanıtı gerekmektedir. Bu amaçla, RIS elemanlarının dinamik olarak ayarlanabilir yansıma katsayıları ile üretilmesi ve RIS'in kablosuz ağa bağlanması gerekmektedir.



(a) Ürün-mesafe yol kaybı modeli



(b) Güneş-mesafe yol kaybı modeli

Şekil 4. RIS tarafından yansıtılan kanalın yol kaybı modelleri için temel gösterimler [8].

Gerçek zamanlı uyarlanabilir yansımayı sağlamak için Şekil 5 'te, üç katman ve bir akıllı kontrolörden oluşan tipik bir RIS mimarisi gösterilmektedir. Birinci olan dış yüzeyde, sinyalleri direk çalışmak için dielektrik bir alt tabaka üzerine yerleştirilmiş çok sayılarda ayarlanabilir yeniden kullanılabilir metalik yamadan meydana gelmektedir. İkinci ara katmanda ise bakır plaka kullanılmakta bunun nedeni ise RIS'ın yansıması sırasında sinyal enerji sızıntısını en aza indirmek amaçlanmaktadır. Bunu, yansıtıcı elemanların uyarılmasından ve yansıma genliklerinin ve faz değişimlerinin gerçek zamanlı olarak ayarlanmasından sorumlu bir kontrol devre kartı olan üçüncü iç katman takip etmektedir. Ayriyeten, yansıma uygunluğu, alan programlanabilir kapı dizisi (Field Programmable Gate Array, FPGA) aracılığıyla uygulanabilen her bir RIS'a bağlı bir akıllı kontrolör tarafından belirtilmekte vetetiklenmektedir. RIS denetleyicisi ayrıca kablolu veya kablosuz geri dönüş/kontrol bağlantıları aracılığıyla diğer ağ bileşenleri (örneğin baz istasyonları veya AP'ler ve kullanıcı terminalleri) ile iletişim kurmak için bir ağ geçidi görevi görmektedir. Uygulamada, RIS'ın çevresel öğrenme kabiliyetini artırmak için, ilk

katmanda, mesela RIS'in yansıtıcı elemanlarıyla iç içe geçmiş, akıllı kontrolörün yansıma katsayılarını tasarlamasını kolaylaştırmak ve çevredeki radyo sinyallerini algılamak için, daha fazla ayrıntıya sahip özel sensörler de kullanılabilir.

RIS elemanlarını yeniden yapılandırmak ve son derece kontrol edilebilir yansıma işlemini yapmak için kaynaklarda önerilen üç temel yaklaşım kullanılmaktadır:

1) Mekanik aktivasyon (örnek vermek gerekirse çeviri yoluyla ve mekanik döndürme),

2) Fonksiyonel malzemeler (örneğin, grafen ve sıvı kristal)

3) Elektronik cihazlar (örnek vermek gerekirse, alan etkili transistörler (FET'ler), pozitif-iç-negatif (PIN) diyotlar ve mikro-elektromekanik sistem (MEMS) anahtarları [37].

Bu yaklaşımlardan özellikle üçüncü yaklaşım, düşük yansıma kaybı, hızlı tepki süresi ve oranla düşük enerji tüketimi ve donanım maliyeti nedeniyle pratik uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 6'da, yansıtıcı elemanın merkezine yerleştirilen PIN diyotuna dayanan yapısı ve buna ait eşdeğer devresi örnek bir tasarımı ile gösterilmektedir. PIN diyot "ON" (AÇIK) veya "OFF" (KAPALI) durumuna doğru akım (DC) besleme hattı aracılığıyla getirilebilir, PIN diyota farklı ön gerilim kullanılarak, bu da elemanın olay sinyalinde π faz kayması farkıyla sonuçlanmasını imkan sağlamaktadır. [38]'deki çalışmaya göre, PIN diyottunun anahtarlama frekansı, 0,2 mikrosaniye (μ s) anahtarlama süresine karşılık gelen 5 megahertz'e (MHz) kadar olabilmektedir.

Bu, milisaniye (ms) sırasına göre olan tipik kanal tutarlılık süresinden çok daha küçüktür ve bu nedenle zamanla değişen kanallara sahip mobil uygulamalar için çok uygundur. Faz kaymasını ayarlayanın yanı sıra, her bir RIS elemanının yansıma genliğinin denetimi, çeşitli iletişim hedeflerine yeterli şekilde ulaşması için yansıyan sinyali yeniden biçimlendirmekte daha fazla esneklik olanağı sağlamaktadır. Bu aynı zamanda, genlik kontrolü ve genellikle faz kontrolüne kıyasla uygulanması daha düşük maliyetli olduğundan, donanım maliyeti ile uygulamadaki yansıma performansı arasında esnek bir ödünleşme sunmaktadır. RIS için genlik ayarlamasının çeşitli bir çok yolu bulunmaktadır. Sıklıkla kullanılanlardan biri, her bir elemandaki yük direncini ayarlamaktır [39]. Örnek vermek gerekirse, her bir elemanın direncini değiştirerek, sinyal enerjisi bir bölümü ısı olarak dağılır, böylece [0,1]'deki yansıma genliğinin dinamik bir aralığına ulaşmaktadır. Bu, veri modülasyonu için yük empedansını değiştirerek yansıtılan sinyal gücünü kontrol eden pasif bir radyo frekansı tanımlama (Radio Frequency Identification Definition, RFID) etiketinin çalışmasına oldukça

benzemektedir. Gerçekte, yansıma dizaynını optimize etmek için her bir RIS elemanının faz kayması ve genliği üzerinde bağımsız bir kontrole sahip olmak amaçlanmaktadır. Ancak bu, yalnızca ayrı kontroller için yukarıda belirtilenlerden daha karmaşık donanım tasarımları (örneğin, çok katmanlı yüzey tasarımı [37]) gerektirmektedir.

RIS yansıma genliği ve faz kayması sürekli ve bağımsız olarak ayarlanabilir, böylelikle aşağıdaki uygulanabilir formüller elde edilmektedir

$$F_{\beta} = \{\beta | \beta \in [0, 1]\} \quad (9)$$

$$F_{\theta} = \{\theta | \theta \in [0, 2\pi]\} \quad (10)$$

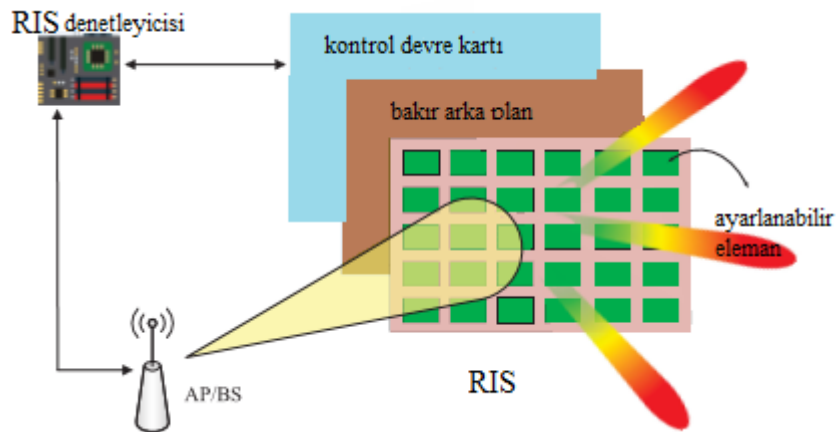
Alternatif olarak, $\Psi = \beta e^{j\theta}$ ögesi başına yansıma katsayısı tanımlayarak, aşağıdaki eşdeğer uygulanabilir küme elde edilmektedir.

$$F = \{\Psi | \Psi \leq 1\} \quad (11)$$

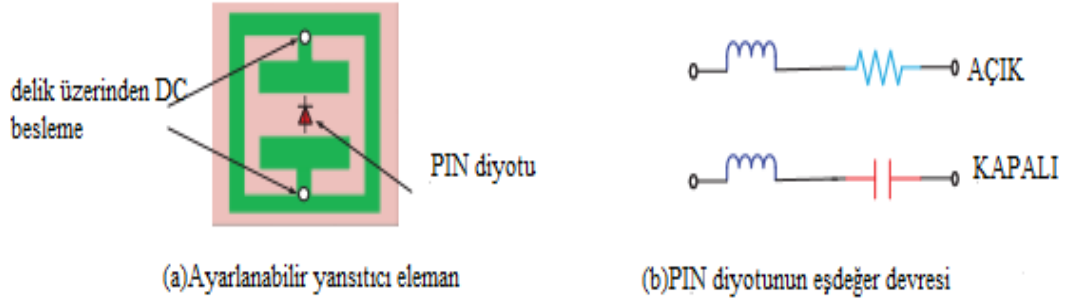
RIS yansıtıcı elemanlar için yukarıdaki ideal uygulanabilir kümelerin, genellikle pratik yansıma modelleri altında RIS destekli kablosuz iletişim sistemlerinin teorik performans sınırlarına yol açtığını unutulmaması gereken bir durumdur.

2.2.2.1. RIS Elemanları için Ayrık Yansıma Genliği ve Faz Kayması

Genel olarak, faz kaydırma kontrolü (veya faz hüzmleme), genliğe kıyasla uygulanması daha yüksek bir maliyete sahiptir.



Şekil 5. RIS mimarisi



Şekil 6. PIN diyotuna dayalı ayarlanabilir yansıtma elemanına bir örnek [8]

Yansıma katsayısını sürekli olarak ayarlamak, iletişim performansını optimize etmek için faydalı olsa da, daha yüksek çözünürlüklü yansıtma elemanları sadece artan maliyet değil, aynı zamanda daha karmaşık donanım tasarımı gerektirdiğinden uygulanması pratik olarak zor olmaktadır. Örnek verilmek gerekirse, RIS elemanı başına 8 seviye faz kaymasını harekete geçirmek için en az $\log_2 8 = 3$ PIN diyot gerekli olmaktadır. RIS kontrolöründe daha fazla kontrol PIN gerektirme nedeni bu, boyut sınırı nedeniyle eleman tasarımını daha zorlaştırmakta ve ayrıca gerekli PIN diyotları kontrol etmek için kullanılmaktadır. Çok seviyeli faz kaymaları elde etmek için tek bir varaktör diyottan yararlanabilirse, çeşitli ön gerilimler lazım olur ve bu nedenle uygulanması daha maliyetlidir. Böylelikle çok sayıda yansıtıcı elemana sahip olan pratik RIS'lar için, her bir eleman sadece az sayıda kontrol biti gerektiren, örneğin iki seviyeli (yansıtan veya soğuran) genlik kontrolü ve iki seviyeli (0 veya π) faz kayması kontrolü gibi sadece ayrı ve sonlu genlik/faz kayması seviyelerinin uygulanması daha uygun maliyetli olmaktadır [40-41].

Genel olarak b_β ve b_θ , sırasıyla K_β ve K_θ ile gösterilen faz kayması ve yansıma genliği seviyelerini kontrol edebilmek için bit sayısını göstermektedir, burada $K_\theta = 2^{b_\theta}$ ve $K_\beta = 2^{b_\beta}$ olmaktadır. RIS'in her bir elemanındaki faz kaymaları ve ayrık yansıma genlik kümeleri sırasıyla aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$F'_\beta = \{\bar{\beta}_1, \dots, \bar{\beta}_{K_\beta}\} \quad (12)$$

$$F'_\theta = \{\bar{\theta}_1, \dots, \bar{\theta}_{K_\theta}\} \quad (13)$$

Burada $0 \leq \bar{\beta}_m < \bar{\beta}_{m'}$ için $1 \leq m < m' \leq K_\beta$ ve $0 \leq \bar{\theta}_l < \bar{\theta}_{l'} < 2\pi$ için $1 \leq l < l' \leq K_\theta$ olmalıdır. Örneğin, ayrık genlik ve faz kayması değerlerinin sırasıyla $[0, 1]$ ve $(0, 2\pi)$ aralığında düzgün dağılımlı olarak elde edildiğini varsayarak, eşitlik (12) ve (13) yeniden şu şekilde yazılabilmektedir.

$$F'_\beta = \{0, \square\beta, \dots, (K_\beta - 1)\square\beta\} \quad (14)$$

$$F'_\theta = \{0, \square\theta, \dots, (K_\theta - 1)\square\theta\} \quad (15)$$

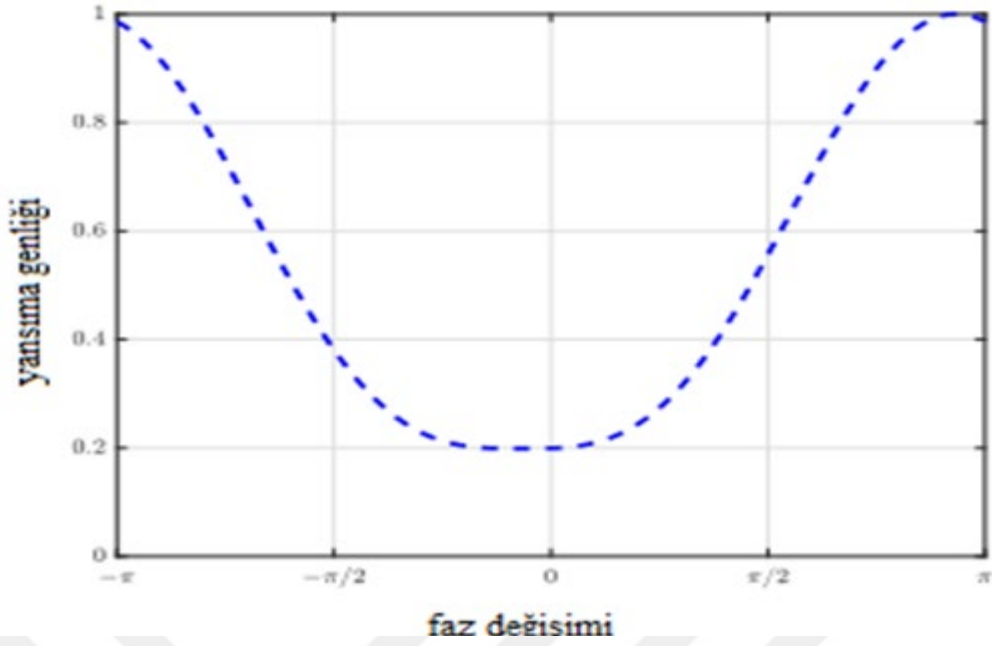
Burada $\square\beta = 1/(K_\beta - 1)$ ve $\square\theta = 2\pi/K_\theta$ şeklindedir. Eşitlik (10) ve (9) 'daki ideal sürekli faz kayması ve yansıma genliği örnekleri ile karşılaştırıldığında, eşitlik (15) ve (14)' teki versiyonları kaçınılmaz olarak daha geniş yansıyan faz kontrolüne ve sinyal genliği dolayısıyla iletişim performansının azalmasına yol açtığı belirtilmektedir. Ayrıca, muadillerine göre ele alınması daha zor olan ve sonuç olarak ortaya çıkan ayrık optimizasyon değişkenleri nedeniyle RIS yansıtıcı elemanların genliklerini/ faz değişimlerini uygulamada optimize etmede yeni sorunlar getirebilmektedir.

Uygulamada, donanım maliyetini ve tasarım karmaşıklığını daha da azaltmak için, yalnızca ayrık faz kayması kontrolü veya ayrık genlik denetimi uygulanabilir, böylece yukarıdaki ayrık modellerin aşağıdaki iki özel durumuna yol açtığı belirtilmektedir. Bunlar şu şekildedir:

- Sadece ayrı faz kayması kontrollü RIS, burada her yansıtma elemanı için, yansıma genliği en yüksek değere ayarlanırken sadece faz kayması ayarlanabilmektedir, yani $F'_\theta = \{0, \square\theta, \dots, (K_\theta - 1)\square\theta\}$ ve $F'_\beta = \{\beta | \beta = 1\}$ olmaktadır.

- Yalnızca ayrık genlik kontrolüne sahip RIS, burada her bir yansıtma elemanı için, faz kayması sabit (örneğin, genellik kaybı olmadan sıfır) olarak ayarlandığında yalnızca yansıma genliği ayarlanabilmektedir, yani, $F'_\beta = \{0, \square\beta, \dots, (K_\beta - 1)\square\beta\}$ ve $F'_\theta = \{\theta | \theta = 0\}$ olmaktadır.

Genel olarak, faz kayması kontrolü, genliğe oranla uygulanması daha fazla maliyetlidir. Birinci özel durum, yansıtıcı eleman başına aynı sayıda kontrol biti göz önüne alındığında ikincisinden daha iyi pasif ışın şekillendirme performansı elde edilebilmektedir.



Şekil 7. Pratik RIS yansıtıcı eleman için faz kaymasına karşı yansıtma genliği pratiği [42-43].

2.2.2.2. RIS Elemanları için Birleşik Yansıtma Genliği ve Faz Kayması

Yansıtma genliği ve faz kaymasının aynı anda bağımsız kontrolü maksimum tasarım esnekliği sağlamakata, ancak eleman tasarımında zorluklar getirmektedir. Son zamanlarda, RIS için pratik bir yansıtma modeli [42-43]'de her bir yansıtıcı elemanı belirli endüktans, kapasitans ve direnç ile bir rezonans devresi olarak modellenerek verilmiştir. Bu modele dayanarak, yansıtıcı elemanın genlik tepkisinin genel olarak faz kayması ile doğrusal olmayan bir şekilde birleştiği ve bu nedenle bağımsız olarak ayarlanamadığı ortaya çıkmaktadır. Spesifik olarak, Şekil 7'de gösterildiği gibi, yansıtma genliği tipik olarak sıfır faz kaymasında minimum değerine ulaşır, ancak faz kayması π veya $-\pi$ 'ye eğilim gösterdiğinde monoton olarak artmakta ve birin maksimum değerine asimptotik olarak yaklaşmaktadır. Bunun nedeni, her yansıtıcı elemanda, herhangi bir faz kaymasının, yansıtma genliğini kaçınılmaz olarak değiştiren etkili kapasite/direncini ayarlayarak elde edilmesi olarak belirtilmektedir. Özellikle, faz kayması sıfıra yaklaştığında, yansıtıcı akımlar (görüntü akımları olarak da adlandırılır) eleman akımları ile faz halindedir ve böylece hem elektrik alanı hem de elemandaki akım akışı arttırılır, bu da maksimum enerji dağılımına ve en düşük yansıtma genliğine neden olmaktadır. Tersine, bir durum ise, kayma π veya $-\pi$ civarındadır, yansıtıcı akımlar eleman akımları ile faz dışındadır ve böylece hem elektrik alanı hem de elemandaki akım akışı azalmakta,

böylece minimum enerji kaybına ve en yüksek yansıma genliğine yol açmaktadır. RIS'in yansıma modeli, [44]'deki çalışmada belirtilen deneysel sonuçlarla da uyumludur. Faz kaydırma kuplajı ve yansıma genliği, RIS yansıtıcı elemanlarının en iyi yansıma katsayısı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir, çünkü her biri tarafından yansıtılan sinyal genliği ve faz arasında en iyi bir şekilde denge kurması gerekmektedir. Böylelikle tüm RIS elemanları tarafından yansıtılan sinyaller alıcıda maksimum güçle veya maksimum sinyal- gürültü oranı (Signal to Noise Ratio, SNR) elde edilerek birleştirilmektedir.

Üsteki belirtilen açıklamalarda ideal ve pratik RIS yansıma modellerine ek olarak, RIS teorik olarak pasiftir, ancak pratikte de enerji harcamaktadır. RIS sadece güç güçlendirmesi olmadan sinyali yönlendirse, bir güç kaynağına ihtiyaç duymaktadır. Bunun nedeni ise akıllı kontrolörünün yanı sıra yansıtıcı elemanları yeniden yapılandırma işlemini sürdürmek içindir. Örnek verilmek gerekirse, RIS yansıtıcı elemanlarının faz kaymalarını düzenlemek için PIN diyotlarına ihtiyaç duyulursa, PIN diyot KAPALI konumda iken, eleman herhangi bir enerji tüketmezken, PIN diyot Açık konumda iken , belirli bir miktarda güç tüketmektedir. Örneğin [47]'daki çalışmada bu değer yaklaşık 0,33 milliwatt (mw) iken [45]'deki çalışmada yaklaşık 50 μ W olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte, aktif antenlerin güç tüketimine karşılaştırılırsa (örneğin, masif MIMO ve çok antenli röle), bu tür güç tüketimi çok daha düşüktür ve bu nedenle kıyaslama için pratik olarak ihmal edilebilmektedir. Başka taraftan, akıllı kontrolörün güç tüketimi kontrolörün devre uygulamasına (örneğin, FPGA) ve kullanılan iletişim parçasına bağlı olmaktadır. Örnek verilmek gerekirse, 256 yansıtıcı elemana sahip bir RIS kontrolörünün güç harcaması sadece yaklaşık 0.72 W olarak gösterilmektedir. [47]'deki araştırmada, bu da uygulamadaki aktif baz istasyonu veya rölenin güç tüketiminden önemli ölçüde daha azdır. Bu sebeple, RIS çoğunlukla kablosuz ağdaki mevcut aktif rölelerden önemli ölçüde daha düşük enerji harcamaktadır.

2.2.3. RIS ile ilgili Diğer Bilgiler ve Gelecek Yön

RIS pratik donanım tasarımı ve yansıma biçimlemesi, RIS destekli kablosuz sistemlerde yansıma iyilemesi ve hedeflenebilir performans kazanımları için kritik öneme ihtiyaç duymaktadır. Böylelikle, çalışmalar daha erken bir aşamadır ve bu sebeple daha çok araştırmaya değer birçok farklı ve önemli sorunların çözülmesi gerekmektedir. Bu alt başlıkta, gelecekteki çalışmaları daha iyi hale getirmek için umut verici konular bulunmaktadır.

Eşitlik (6)'da verilen RIS'in doğrusal kanal modeli için önemli bir varsayım, komşu RIS elemanları arasındaki herhangi bir yansıyan sinyal bağlantısının göz ardı edilmesidir. Uygulamada, aynı RIS boyutu göz önüne alındığında yansıtıcı elemanların sayısının artırılması, genellikle daha ince taneli pasif hüzmeye oluşturma amaçlanmalı ve böylece gelişmiş performansın elde edileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, bu, eleman aralığını azaltacak ve yakın yansıtıcı elemanlar kendi devre kuplajları aracılığıyla birbirleriyle etkileşime gireceğinden bunlara bağlı yansıma katsayıları ile ortaya çıkacaktır. Bu durum karşılıklı kuplajın daha şiddetli ve dolayısıyla daha ihmal edilemez hale gelmesi demektir. Bu nedenle, eşitlik (6)'da verilen RIS'in doğrusal kanal modeli yanlış hale gelecek ve gelecekteki çalışmalarda ele alınması ilginç bir sorun haline geleceği öngörülmektedir. Ayrıca, kusurlu zemin yapıları, parazitik dağıtıcılar ve nötralizasyon hatları kullanarak karşılıklı bağlanmanın etkisini en aza indirmek için etkili dekuplaj/izolasyon teknikleri geliştirmeye değer yönler olarak değerlendirilmektedir [37, 47].

Eşitlik (6)'da verilen RIS kanal modelinde benimsenen bir diğer varsayım ise yansıma katsayısının RIS'a çarpan sinyalin durum açısına habersiz olmasıdır. Bu durum göz önüne alındığında, [46]'da ki son deneysel sonuçlar, RIS faz kaymasının ve, özellikle yansıma katsayısının, olay açısına oldukça önemli olabileceğini göstermektedir. Bu açıya bağlı bir yansıma modeli, özellikle çok yönlü bir yayılma ortamında, RIS'in yansıma tepkisi RIS'a giden her sinyal yolunun varış açısına (Angle of Arrival, AoA) bağlı olduğundan, RIS yansıma optimizasyonunda yeni bir zorluk oluşturmaktadır. Daha da önemlisi, tipik zaman bölmeli çift yönlü (Time Division Duplex, TDD) tabanlı kablosuz sistemlerde yaygın olarak benimsenen kanal karşılıklılığı varsayımı, RIS dahil olduğunda artık geçerli olmayabilir, bu da yukarı yönlü iletişime dayalı kanal tahmininin aşağı yönlü iletişim için geçerli olmadığı anlamına gelmektedir. Bu nedenle, bu etkiyle ilgili daha fazla çalışmanın yapılması gerektiği açıkça görülmektedir.

Son olarak, eşitlik (6)'daki RIS kanal modeli her yansıtıcı elemanın faz kaymasının sinyal bant genişliği (B) üzerinde sabit olduğunu varsaymıştır. Bu varsayım, $B \ll f_c$ 'li dar bant sistemi için uygun olsa da, B çok daha fazla olduğunda ve dolayısıyla f_c ile benzetilebilir hale geldiğinde geniş bant sistemi için doğru değildir. Eşitlik (2)'de gösterildiği gibi, RIS ile faz kayması, giriş sinyalinin belirli bir süre geciktirilmesiyle sonuçlanır ve bu, f_c 'den sapan sinyal frekansı ile artan doğrusal bir faz kaymasına neden olmaktadır. Frekans üzerinden bu tür tekdüze olmayan bir faz kayması, çoklu taşıyıcı

(dikgen frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) gibi) modüle edilmiş sinyal için istenmeyen faz hatalarına neden olabilir ve bu nedenle, daha fazla araştırma gerektiren donanım veya sinyal işleme ile telafi edilmelidir. Ek olarak, frekans/zaman offseti, faz gürültüsü vb. gibi diğer RIS donanım kusurlarının yansıma tasarımı ve ulaşılabilir performansı üzerindeki etkileri büyük ölçüde bilinmemektedir ve bu da gelecekteki çalışmalarda bu konu hakkında daha fazla araştırma yapılmasını gerektirmektedir.

2.2.4. RIS ile ilgili Tarihsel Gelişim

Bu alt bölümde, elektromanyetik dalgalarının belirli temel performans göstergelerini iyileştirmek için bilinçli bir şekilde değişime odaklanan yeniden yapılandırılabilir kablosuz sistemler ve akıllı yüzeyler hakkındaki ilk kavramlar ve fikirler kısaca özetlenmektedir.

Akıllı duvarlardan iletim [48] olarak bilinen ve sinyal gücünü kontrol eden aktif frekans seçici yüzeylere dayanmaktadır. Özellikle, [48]'deki yazarlar dikkatlerini sinyal kapsama ve parazit de dahil olmak üzere genel sistem performansını artırmak için radyo kanalı parametrelerini etkileyerek yayılma ortamını kontrol etmeye odaklanmışlardır. Yazarların ana motivasyonu, iç mekan ortamında frekans seçici yüzeyleri dağıtırken duvarların malzemesinin elektromanyetik özelliklerini değiştirmektir. Tamamen şeffaf veya son derece yansıtıcı bir yüzey elde edilen PIN diyotlarının açık/kapalı durumlarını değiştirerek aktif frekans seçici bir yüzeyin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Aktif bir duvarın sinyal kapsamını ve sinyal kalitesini kontrol etmek için etkili bir araç olabileceği bilgisayar simülasyonları tarafından gösterilmiştir.

Öte yandan, [49]'de, [48]'in aynı yazarları, akıllı duvarlar için en iyi yapılandırmayı öğrenmek için yapay bir sinir ağı düşünerek akıllı duvar konseptini genişlettiler. Duyusal verilere ve görelî sistem performans ölçülerine göre, yapay sinir ağı tarafından iki ikili çıkış (açık ve kapalı durumları olan duvarlar) elde edilmektedir. Başka bir deyişle, karar vermek ve akıllı duvarları kontrol etmek için makine öğrenimi algoritmalarıyla donatılmış bilişsel bir motor konuşlandırılmıştır. [50]'de, yüzey panellerine monte edilen PIN diyotlarının açma/kapama durumlarını ayarlayarak anahtarlamalı ışınlamayı etkinleştirmek için aktif frekans seçici yüzey tabanlı bir anten olarak kabul edilmektedir. Her yüzey panelinde diyotların açık ve kapalı kombinasyonlarından yararlanılarak, ışın yönlendirmesi çeşitli yönlerde elde

edilmektedir.

[51]'de yazarlar, mekansal mikrodalga modölatörlerinin karmaşık kablosuz ortamlarda karmaşık mikrodalga alanlarını yalnızca ikili faz durumu ayarlanabilir meta yüzeyleri kullanarak şekillendirebildiğini göstermiştir.

İç mekan kablosuz kapsama alanını kontrol etmek amacıyla, [52] yazarları tarafından kablosuz erişim noktalarının etrafına monte edilebilmek için 3-B reflektörler gerçekleştirilmiştir. İç ortamlarda kablosuz kapsama alanını genişletmek için optimize edilmiş ancak yeniden yapılandırılmaz (statik şekilli) reflektör tasarımları tanıtılmıştır.

Meta materyalleri kodlama kavramı, yüzey elemanlarının faz tepkisini değiştirerek elektromanyetik dalgalarını değişime uğratmak için [53]'da olarak önerilmiştir. İkili öğelerden oluşan bir meta yüzey (0 veya π faz farklılıkları ile) dikkate alınmaktadır. Yazarlar, kodlama biti dizilerini değiştirerek saçılma desenlerini değiştirmenin fizibilitesini gösterdiler. Özellikle yazarlar, gelen elektromanyetik enerjisini her yöne yönlendirerek yüzeylerin radar kesitini en aza indirmek için en uygun kodlama dizilerini (ikili aşamaların deseni) belirlenmiştir. [48]'deki çalışmaya benzer biçimde, yazarlar meta-malzeme öğelerinin faz yanıtlarını değiştirmek için PIN diyotlarının açık/kapalı durumunu kullanmışlardır. Son olarak, yazarlar PIN diyotları aracılığıyla programlanabilir meta yüzeyleri kontrol etmek için bir FPGA donanımı tasarlamışlardır. Yazarlar tarafından, bu programlanabilir meta materyallerin hedeflerin saçılma özelliklerini azaltmak ve antenlerin radyasyon ışınlarını manipüle etmek için kullanılabileceği savunulmaktadır. Aynı yazarlar, hem uzay hem de frekans etki alanlarında EM dalgalarının kontrolünü sağlayan zaman boyutundan yararlanarak [54] dijital meta yüzeyleri kodlayan uzay-zaman kavramını tanıtmışlardır. Özellikle, yazarlar sadece yayılma yönünü değil, harmonik güç dağılımını da kontrol etmeyi amaçlamışlardır.

PIN diyotlarına dayanan başka bir programlanabilir meta yüzey tasarımı [55] içinde önerilmiştir. Yazarlar tarafından, yeniden yapılandırılabilir bir fazın yanı sıra, polarizasyon kontrolü, saçılma ve ışın odaklamanın PIN diyotlarının açık/kapalı durumunun ayarlanmasıyla mümkün olduğu gösterilmiştir.

Ayarlanabilir (varactor-tuned) rezonatörler [56] aracılığıyla gerçekleştirilen yeniden yapılandırılabilir yansıtma dizilerinin yardımıyla, pasif reflektör elemanlarına sahip akıllı yansıtma dizileri kullanan iletişim kavramı [57]'da önerilmektedir. Yazarlar, taşınabilir, giyilebilir ve hatta daha küçük cihazlar için uygulanması nispeten zor olan iletilen veya alınan sinyalleri odaklamak için çok sayıda anten gerektiren hüzmleme

tekniklerine alternatif olarak akıllı yansıtma dizilerini kullanmışlardır. Yansıtma dizilerinin, gelen sinyallerin fazını arabelleğe almadan veya işlemeyen akıllı yansımalar aracılığıyla değiştirmek için etkili bir şekilde kullanılabileceği ve alınan sinyal kalitesinin, yansıtma dizisinin her yansıtıcı ögesinin faz kaydırmasını optimize ederek artırılabilmesi gösterilmiştir. Deneyler ve simülasyonlar sayesinde yazarlar, kullanıcı ekipmanlarının donanım ve yazılımında büyük bir değişiklik yapılmadan akıllı yansıtma dizileri kullanılarak daha yüksek spektral verimlilik elde edilebileceğini gösterdiler. Yazarlar, taşıma kapasitesini de en üst düzeye çıkarmak için bir faz optimizasyonu algoritması sunmuşlardır. Yazarlar daha sonraki çalışmalarında, IEEE 802.11ad standardı bağlamında milimetre dalga iletişimini desteklemek için yeniden yapılandırılabilir yansıtma dizilerini kullanmanın fizibilitesini araştırmışlardır [58]. Bu çalışmada yazarlar, PIN diyotları yerine reflektör ünitelerini kontrol etmek için açma/kapama durumlarına sahip elektronik kontrollü röle anahtarlarını dikkate ederek nispeten büyük bir yansıtma dizisi tasarlanmış olup 802.11ad ağlarına uygulama ve milimetre dalga ağlarının LOS tıkanmasının üstesinden gelmek için bir ışın arama protokolü ortaya konuldu.

Büyük bir MIMO çözümünün ötesinde, büyük akıllı yüzey (LIS) kavramı [59]–[60]'de önerilmiştir. Özellikle, bitişik ve elektromanyetik olarak aktif bir yüzey oluşturan çok sayıda yayılan ve algılayan elemana sahip bir sistem düşünülmektedir. Geleneksel masif MIMO [61] ve RIS arasındaki en büyük fark, iletim ve alım için bitişik yüzeyin tamamının kullanıldığı yapılardır. Yazarlar ayrıca maç filtreleme (alınan sinyallerin yüzeydeki 2-B entegrasyonu yoluyla) adı verilen bir prosedürü göz önünde bulundurarak bir sinyal modeli tanıtıldı ve sistemin kapasitesini araştırdılar.

Son olarak, yazılım kontrollü HyperSurfaces kavramı, radyo dalgalarının tam elektromanyetik değişimi sağlamak amacıyla [62], [63], [64], [65] olarak önerildi. Hafif bir nesnelerin interneti ağ geçidi ile donatılmış, ultra ince meta atomlardan oluşan akıllı yüzeyler merkezi bir denetleyiciden komut alır ve engel olan elektromanyetik dalgalarını herhangi bir yönde emerek, odaklayarak ve yönlendirerek elektromanyetik davranışlarını ayarlamaktadır. Kontrol edilebilir anahtar elemanları (açma/kapama durumları ile) ve kare yamalarla donatılmış HyperSurfaces'in işlevsel ve fiziksel mimarisi tanımlanmıştır. Bilgisayar simülasyonları ile genellikle LOS olmayan iletimde yüksek yayılma kayıplarından etkilenen 60 GHz'de iletişim için iç ortamlarda sinyal kapsamının ve sinyal gücünün artırılabilmesi gösterilmiştir.

Aynı yazarlar, genel bir çok kullanıcı senaryoyu göz önünde bulundurarak programlanabilir kablosuz ortam kavramlarını genelleştirdiler ve parazit en aza indirme, gizlice dinleme ve çok azaltma için çözümler önermişlerdir [64]. Alınan sinyal gücünü en üst düzeye çıkarmak ve keyfi olarak dağıtılmış kullanıcılar için maksimum gecikme yayılmasını en aza indirmek için genel bir optimizasyon sorunu formüle edilmiştir.



3. BÖLÜM

KABLOSUZ HABERLEŞMEDE FARKLI RIS KATEGORİLERİ

Yapıları göz önüne alındığında, RIS'lar metamateryal veya yama- dizi tabanlı teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilebilmektedirler. Metamateryal tabanlı RIS'lar meta yüzeyler olarak adlandırılmaktadır. Farklı durumlarda konumlandırılan RIS'lar, baz istasyonlarında çalışan kullanıcı ve baz istasyonları veya dalga kılavuzu yüzeyleri arasındaki yüzeyleri kırarak şekilde yapılandırılabilir. Ayarlama mekanizmaları göz önüne alındığında, RIS'lar elektriksel, mekanik veya termal olarak yeniden yapılandırılabilir. Enerji harcamasına bağlı olarak, RIS'lar pasif- kayıpsız, pasif- kayıplı veya aktif olarak bölümlendirilebilir. RIS'ların pasif veya aktif doğası, kesin sonuç kapasitelerini belirlemektedir. Bununla birlikte, RIS'ların yenilenebilir olmalarının genel özellikleri nedeniyle tamamen pasif olamayacaklarını belirtmekte yarar vardır. Burada, üç önemli RIS çalışma işlemi açıklanmaktadır: dalga kılavuzu [66], kırılma [67] ve yansıma [68]. Love'un olan denkliği ilkesi yardımıyla [69], yansıyan ve kırılan elektromanyetik alanı, eşdeğer yüzey elektrik ve manyetik akımlar getirilerek incelenebilmektedir [67]. Bu incelenen üç çalışma koşulunda, RIS bir dalgayı (bir olay dalgası tarafından indüklenen veya bir dalga kılavuzu tarafından beslenen) boş alanda istenilen bir dalgaya yayılma geçiktiren dönüştürmekte ve dağıtmaktadır.

3.1. RIS Çeşitleri

3.1.1. Dalga Kılavuzu RIS

Meta yüzeydeki elemanlar, bağlı olmayan manyetik dipoller olarak modellenmiştir. Her bir dipol elemanının büyüklüğü, her bir elemanın polarizasyonu ve referans dalganın çarpımı ile orantılıdır. Kutuplanabilirliği ayarlanarak, yüzey üstü anteni ışın biçimlendirmesi şeklinde kullanılabilir.

Yüzeydeki her madde bir mikro anten görevi şeklinde kullanılabilir. Klasik anten dizilerine karşılık, kompakt dalga kılavuzu yüzeyi daha geniş açılara iletebilmekte ve daha az yer kaplamaktadır.

3.1.2. Kırıcı RIS

Bu tip bir RIS’da, eşdeğer bir empedans matris modeli kullanılmaktadır, böylece üst yüzeyin iki tarafındaki teğetsel alan bileşenleri uygun şekilde optimize edilmektedir. Ayrıca, üç olası cihaz gerçekleşmesi durumu ortaya çıkmaktadır. Bunlar; kendiliğinden salımlı ışınlanma yüzeyleri, yalnızca kayıpsız bileşenlerin oluşturduğu yüzeyler ve yerel olmayan yüzeyler olarak tanımlanmaktadır.

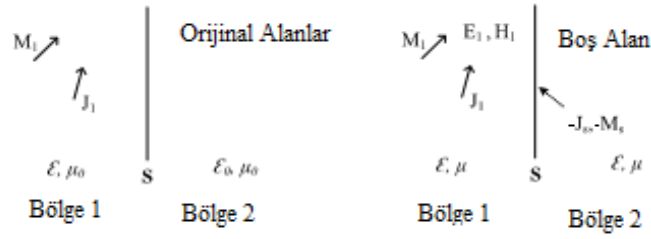
3.1.3. Yansıtma RIS

Üst yüzeydeki elemanlar, ayarlanabilir bir öngerilim gerilimine sahip varaktör diyotları içermektedir. Birkaç sayısallaştırılmış öngerilim seviyesini önceden tasarlayarak, yansıyan dalga için farklı ışın şekillendirme elde edebilmekte ve her eleman ayrı faz kaymaları uygulayabilmektedir.

3.2. Fizik Açısından Meta Yüzeyler

Bir kablosuz sinyal, esasen üç boyutlu bir uzayda yayılan bir EM dalgası olarak görülmektedir. EM dalgası uzayda yayılırken ve saçılan nesnelerle etkileşime girerken sinyal gücünün zayıflaması veya azalması meydana gelmektedir. Elektromanyetizmanın temel kurallarından, birim alan başına sinyal gücü, belirli bir ortamdaki ilgili dalganın elektrik alanının karesi ile orantılıdır. Yansıtıcı ve kırıcı akıllı yüzeyler söz konusu olduğunda, bu EM dalgalarını çevreleyen nesnelerle nasıl etkileşime girdiğinin anlaşılması gerekmektedir. Eşdeğerlik genel kuralı, özellikle EM, SEP dalga dönüşümlerini incelemek için temelidir. Hem dış sorunlar (kaynaksız bölge) hem de iç sorunlar için bu genel kuralllar elde edilebilmektedir. Love’un alan denkliği ilkesi, yakın bir yüzeyin dışındaki veya içindeki EM alanının yüzeydeki manyetik ve elektrik akımlar tarafından benzersiz bir şekilde ifade edilmektedir. Şekil 8 ’teki gibi, bölge I için eşdeğer sorun, her bir özel durum için sınır şartlarını karşılayan eşdeğer akımların S üzerine yerleştirilmesi ve bölge II’nin aynı kurucu parametre ortamı ve μ ile doldurulmasıyla yeniden formül ifade edilmektedir. Bu amaçla, eşdeğer akımlar ($-J_s$,

$-M_s$), orijinal kaynak akımlarla (J_1 , M_1) birlikte, I bölgesinde doğru alanları yaymaktadır. II bölgesi için eşdeğer problem benzer şekilde formüle edilebilmektedir.



(a) Orijinal sorun

(b) Bölge I için eşdeğer sorun

Şekil 8. Love'un denklik ilkesi için sorunlar (Bölge I için). [72]

Love'un alan denkliği ilkesi, RIS'ların radyasyon modelini analiz etmenin teorik temelini oluşturmaktadır. Fakat SEP, yüzey akımları tarafından üretilen EM alanının nasıl hesaplanacağı ifade edilmektedir. Rastgele bir alan noktasında sinyal gücünü elde etmek için Huygens- Fresnel prensibi kullanılabilir. Huygens- Fresnel ilkesi, bir dalga cephesindeki her noktanın kendisinin küresel dalgacıkların kaynağı olduğunu ve farklı noktalardan yayılan ikincil dalgacıkların karşılıklı olarak müdahale ettiğini belirten, dalga yayılımı sorunlarına uygulanan bir analiz yöntemidir. Bu küresel dalgacıkların toplamı dalga cephesini oluşumunu sağlamaktadır. Huygens- Fresnel yeniliğine dayanarak, bir RIS tarafından (kırılma ve yansımada) saçılan EM alanı analitik olarak incelenmektedir.

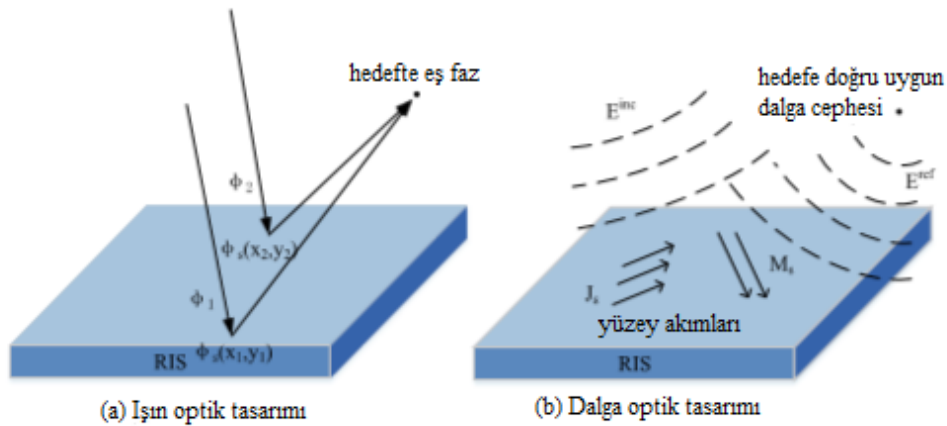
Dalga kılavuzu tabanlı RIS'lar söz konusu olduğunda, çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilmektedir. [71]'deki çalışmada, dalga kılavuzu yüzeyinin EM dalga manipülasyonu, üç boyutlu serbest uzay dalgaları ile iki boyutlu yüzey dalgaları arasındaki bağlantıyı gerçekleştirdiği belirtilmektedir. Neticede, üst yüzey, 3 boyut uzayda yayılan sinyal hakkında ek bilgi taşıyan bir hologram olarak temsil etmektedir. Kaynak tarafından uyarıldıktan sonra, önceden tasarlanmış bu bilgi yayılan alana bağlanır diye düşünmek doğru bir yaklaşım kabul edilir. Şekil 9'da, kavramsal olarak önceden tasarlanmış bir holografik dalga kılavuzu tabanlı RIS'ı ifade etmektedir.

3.3. RIS'ların Analizinde Işın Optik Perspektifi ile Dalga Optik Perspektifi Kıyaslanması

Bir RIS ile çarpan EM dalgalar arasındaki etkileşimi karakterize etmek için, ya ışın- optik ya da dalga- optik perspektifinden yaklaşımlar ve araçlar benimsenebilir. Bu iki görüş fizik alanındaki araştırmacılar tarafından epey bir zamandır kullanılmaktadır.



Şekil 9. Holografik empedans akıllı yüzeyinin kavramsal çizimi [71].



Şekil 10. Işın-optiği ve dalga-optiği perspektifinin karşılaştırılması [71].

Bazı yaklaşımlara dayanmalarına rağmen, bu iki analiz yöntemi, ışık veya radyo dalgalarının malzemelerle etkileşimi hakkında önemli içgörüler elde etmek için yararlı olmaktadır. RIS kaynaklarda, her iki analiz yöntemlerinin de sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, kullanımlarının arkasındaki fiziksel yorumlar ve varsayımlar temelinde farklılık göstermektedir. Benzerliklerine veya farklılıklarına yön göstermek için burada iki yöntemin karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 10(a)'da gösterildiği gibi, ışın- optik perspektifinden bakıldığında, bir EM dalgası, değişen fazlara sahip geometrik ışınların bir koleksiyonu olarak modellenmiştir. Her ışının fazı, diğer ortamlardan veya vakumdan geçerken optik yol uzunluğu ile doğrusal olarak arttığı

görülmektedir. Bundan bir sonuç çıkarılacak olunursa, i. ışınının her zamanda, bir faz (ϕ_i ile tanımlanır) gösterilebilmektedir. Işın etkileşimi bir malzeme sağlandığında, fazın malzeme kırılma indeksi ve değişimi arasındaki ilişki belirlenerek veri incelenmektedir. İstenilen yansıyan dalga, ışınlar topluluğuna uygun eş-faz koşuluna uyarsa elde edilmektedir. Dalga- optik açısı, bir EM dalgasının karşılık gelen manyetik alan ve elektrik alan ile temsil edildiği Şekil 10(b)' de elde edilmektedir. Her durumda, bu iki vektör alanının her biri, bir genlik, bir yön ve bir faza sahip, zamanla değişen karmaşık değerli bir vektörle ayırt edilebilmektedir. Dalga- optik açılarından düşünüldüğünde, malzeme ve dalga arasında etkileşim, eşdeğer yenilikler kullanılarak gözlemlenmektedir. Uzayda dalga cepheleri olarak isimlendirdiğimiz bir dizi yüzey eşit faz değerlerine sahip noktalar oluşturmaktadır. Sonuç olarak, RIS tarafından uygun dalga cephesi dönüşümleri gerçekleştirilirse, istenen dağınık dalgalar (yansıyan veya kırılan) elde edilmektedir.

Tablo 3. Farklı dalga temsillerinin karşılaştırılması [71].

	Işın-optiği	Dalga optiği
Dalga temsili	Geometrik ışınlar	Vektör alanları
Teorik temel	Snell Yasası	Maxwell denklemleri
Yüzey profili	Faz süreksizliği	Yüzey empedansı
Yansıyan dalganın gerekliliği	Eş faz koşulu	Uygun dalga cephesi
Güç akışı	Kesin değil	Kesin

Tablo 3, iki analiz yöntemi arasındaki bazı farklılıkları vurgulamaktadır. Dalga optiği ile karşılaştırıldığında, ışın optiği perspektifi, gerçek sistemin daha güçlü bir basitleştirilmesidir. Neticede, kabullenilmesi daha basittir ve RIS tasarımı hakkında hızlı bir varsayım üretebilmektedir. Sonuç olarak, RIS'ın güç akışı göz önünde bulunduğunda ışın- optik yöntemleri başarılı olamamaktadır. Güç akışını tahmin etmek için dalga optik yöntemleri ise genel ve yerel RIS güç tüketimini incelememizi sağlayan Poynting vektörünü kullanarak tahmin edilir. Bu, RIS'ları üretirken ve dizayn ederken dikkat edilmesi gerekmektedir. Örnek vermek gerekilirse, [70] ve [71]'deki konular, yerel olarak pasif RIS'larla kayıpsız düzlem dalgalı ışın yönlendirmelerini gerçekleştirmenin mümkün olduğunu söylemektedir. Sistemin güç akışını incelemek için dalga- optik perspektifini benimsemek gerekmektedir. Dahası, [71]'deki araştırmacılar, simülasyon sonuçlarına göre, RIS'ların ışın- optik yaklaşımına göre tasarlanırsa, giderek daha iyi performans beklenebileceğini belirtmektedir. Neticede, her iki durumunda sınırlamaları ve avantajları olmaktadır. Bununla birlikte, dalga- optik perspektifini benimsemek çoğu vaka için en uygun seçim

olarak değerlendirilmelidir. Dalga optik ve ışın optik inceleme yöntemleri arasındaki yansıma katsayısı ve güç akışı açısından farklılıkları çalışmada [73] 'de gösterilmiştir.

3.4. Ayarlanabilirliğin Sağlanması

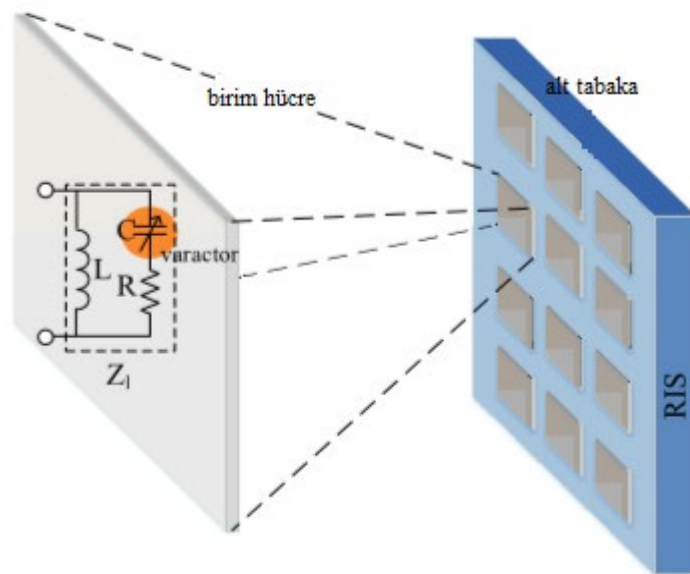
RIS'in yama dizisi, RIS'in faz süreksizliği EM özellikleri, çeşitli mekanizmalar yoluyla yüzey empedansının düzenlenmesi ile sonradan ayarlanabilmektedir. Elektrik voltajının yanı sıra, termal uyarma, optik pompa ve fiziksel gerdirme gibi başka mekanizmalar da uygulanabilmektedir. Bunlar arasında elektriksel kontrol en uygun seçimdir, çünkü elektrik voltajının nicelenmesi ve FPGA yongaları tarafından kontrol edilmesi daha kolaydır. RIS malzemelerinin seçimi yarı iletkenler [74] ve grafen [75] içermektedir. Ayar mekanizmalarından bağımsız olarak, yama dizisi akıllı yüzeyler dikkat çekmektedir. Bu tür RIS'ların genel geometri düzeni, bir substrat üzerine entegre edilmiş birim hücrelerin periyodik (veya en genel durumda yarı periyodik) bir koleksiyonu olarak modellenabilir. Daha kolay anlatılması için, RIS'ların hücrelerin birbirleriyle etkileşime girmediği yerel bir tasarıma dayanarak ele alınmaktadır. Yerel bir tasarım genellikle en uygun olmayan RIS'ların tasarımı ile görülmektedir. Yerel olmayan ve yerel olan tasarımlar hakkında kapsamlı bir inceleme [73] 'de gösterilmiştir. RIS'in ayarlanabilirliğini karakterize etmek için eşdeğer topraklanmış eleman devreleri yöntemi benimsenebilir. Şekil 11 'deki gibi, birim hücre, bir yük empedansı z_1 'e sahip bir topraklanmış eleman devresine eş gösterilmektedir. Öncelikle, eşdeğer yük empedansı, varaktör diyotunun ön gerilim voltajı değiştirilerek düzenlenebilmektedir. Kablosuz iletişim sistemlerinde yama dizisi RIS'ların modellerken, yerel bir tasarım altında, birim hücrelerinin her birini eşdeğer bir yansıma katsayısı ile karakterize edebilmektedir. Örnek verilmek gerekirse, i. hücrenin yansıma katsayısı aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$r_i = \beta_i \cdot e^{j\phi_i} \quad (16)$$

Burada β_i ve ϕ_i sırasıyla genlik tepkisine ve faz tepkisine karşılık gelmektedir. [44]' te gösterildiği gibi, eşdeğer yansıma katsayısı, her bir birim hücrelerini kontrol eden topraklanmış devrenin ayar empedansına ve ayrıca RIS portlarındaki kendi kendine ve karşılıklı empedanslara (karşılıklı bağlantı göz ardı edilemezse) bağlıdır. Özellikle, [76] ve [77]' de gösterildiği gibi, eşitlik (16)'daki β_i ve ϕ_i genellikle birbirlerinden tamamen bağımsız değildir, yani $\beta_i = f(\phi_i)$ olmaktadır. Burada, $\Phi(\vec{r}_x)$, RIS üzerindeki

pozisyonun bir fonksiyonu olarak RIS tarafından tanıtılan faz süreksizliğini ve ϕ_{mn} , bir yama- dizisi RIS'in (m, n)-inci elemanının faz süreksizliğini ifade etmektedir.

Hazırdaki RIS tasarımlarının yama dizisi, bazı durumlarda genlik kontrolü ve ayrı faz kontrolü olarak uygulayabilmektedir. Arun ve Balakrishnan [77], dikdörtgen bir dizi pasif antene sahip iki boyutlu bir yüzey olan RFocus'u planlamıştır. Her pasif ünitenin boyutu $\lambda/4 \times \lambda/10$ 'dur ve EM dalgaları yansıtılır veya kırılır. Yazarlar RFocus yüzeyinin fiyatının düşük olarak üretilebileceğini ve medyan sinyal dayanımını 9,5 kat artırabileceğini anlatılmıştır. Welkie ve arkadaşları [78], radyo sinyallerini aktif olarak iletmek ve pasif olarak yansıtmak için bir binanın duvarlarına gömülü düşük maliyetli bir cihaz üretmiştir. Dunna vd. [79], ortamdaki saçılımı artırmak için akıllı bir yüzey kullanan ScatterMIMO'yu geliştirmiştir. Donanım tasarımı, her bir reflektör ünitesi dört açık uçlu iletim hattına bağlı bir yama anteni sağlamaktadır. İletim hatları $0, \pi/2, \pi$ veya $3\pi/2$ faz kaymaları sağlanmaktadır. Ölçümlere dayanarak, ScatterMIMO'nun, temel çizgiler şemalarına kıyasla iki kat ve SNR 4.5 dB artırdığı gösterilmektedir. Düzenlenebilirliğin yama- dizi tabanlı yüzeyler dışındaki uygulamalarla sağlanabileceğini belirtmekte yarar sağlamaktadır. Örnek verilmek gerekirse, ivotan ommware, holografik ışın şekillendirme (Hologram Brainlearning, HBF) adı verilen yeni bir teknik fikri ortaya koymuştur. Önerilen holografik ışın oluşturucu, fazlı diziler veya masif MIMO gibi diğer iletim teknolojileri düşünüldüğünde daha düşük güç tüketimine ve bir maliyette sahip olmaktadır.



Şekil 11. Varaktör RIS'in şematik diyagramı. [71]

3.5. RIS Çalışma İlkeleri

Tek ışınlı yansıma göz önüne alındığında, yama dizisi tabanlı bir RIS, yakın alan ve uzak alan kısmında bir terminal cihazına hizmet edecek şekilde tasarlabilmektedir. RIS'ların birçok işletim fonksiyonu ve konfigürasyonu arasında, kablosuz iletişim bağlamında anormal yansıma ve ışın şekillendirme yaygın olarak kullanılmaktadır. Dalga-optik perspektifini benimseyen normal olmayan yansıma, bir düzlem dalgasından başka bir düzlem dalgasına bir dalga cephesi dönüşümü iken, hüzmleme bir düzlem dalgasından istenen bir dalga cephesine bir dalga cephesi dönüşümü sağlanmaktadır. Işın-optik bakış açısını benimseyerek, bu iki yapılandırmanın çalışma kuralları şu şekilde belirtilmektedir. RIS, genelleştirilmiş yansıma yasalarını takip ederek normal olmayan yansıma söz konusu olduğunda, uzak alan terminaline bir olay ışını yansıtacak şekilde tasarlanmıştır [80]. Işın şekillendirme (odaklama olarak da adlandırılır) söz konusu olduğunda, olay dalgası genellikle odak noktası olarak adlandırılan hedef bir bölgeye odaklanmaktadır. Gerekli RIS yapılandırmaları, eş faz koşulunu sağlamaktadır [81]. Bu iki çalışma yenilikleri arasındaki ilişki [82] 'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu iki farklı yeniliği sunmadan önce, uzak alan bölgesi ile yakın alan bölgesi arasındaki fiziksel ayrım açıklığa kavuşturulmaktadır.

4. BÖLÜM

ELE ALINAN SİSTEMLER VE KANAL MODELLERİ

Bu tez çalışmasında ele alınan sistem ve kanal modelleri iki alt başlıkta toplanmıştır.

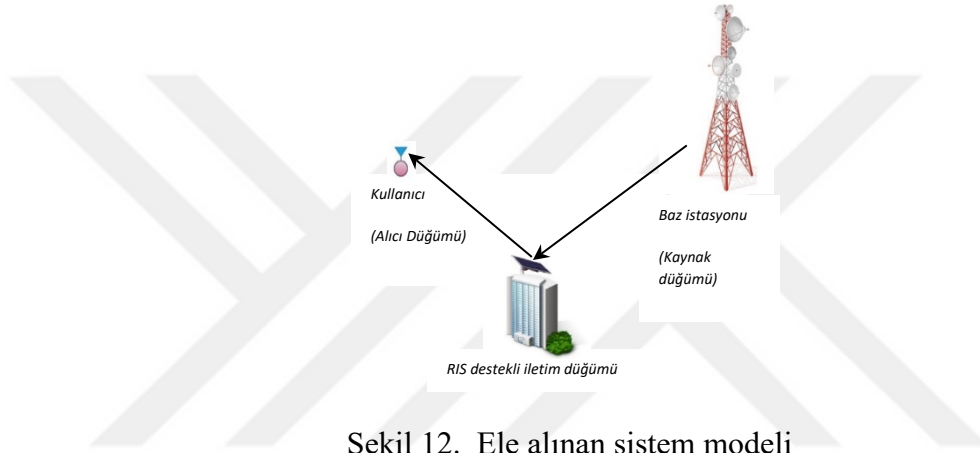
4.1. RIS Destekli Kablosuz Bir Haberleşme Sisteminin AWGGN Analizi

Bu tezin ilk kısmında ele alınan sistem modeli Şekil 12’de gösterildiği gibi aşağı yönlü bir iletim senaryosunu ele almaktadır. Sistem modeli tek antenli bir kaynak (source, S), tek antenli bir alıcı (destination, D) ve iletim görevini üstelenen RIS destekli bir düğüm noktasından oluşmaktadır. S -RIS ve RIS- D arasındaki kanalların Rayleigh sönümlenmesine sahip olduğu ve S - D arasında iletim olmadığı kabul edilmektedir. Buna göre, S -RIS ve RIS- D arasındaki kanalların kanal katsayılarının dağılımı Rayleigh dağılımlıdır ve herhangi bir yol kaybı bulunmadığı varsayılmıştır. Ayrıca D ’de alınan

işaret $y = \sum_{i=1}^N h_i g_i r_i x + n$ şeklinde eşdeğer olarak tanımlanmaktadır. Burada x iletilen

sinyali, n gürültü terimini, h_i S ile RIS üzerindeki i . yansıtıcı eleman arasındaki kanal katsayısını, g_i RIS üzerindeki i . yansıtıcı eleman ile D arasındaki kanal katsayısını ve r_i i . yansıtıcı eleman cevabını tanımlamaktadır. N ise RIS üzerindeki yansıtıcı eleman sayısıdır. h_i ve g_i kanallarının fazlarının RIS tarafından mükemmel bir şekilde bilindiği varsayılmaktadır [83-84]. RIS üzerindeki her bir yansıtıcı eleman, S ’den aldığı sinyali D ’ye ilettiği için daha başarılı bir haberleşme gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmanın özgünlüğü ise iletim ortamlarındaki gürültünün AWGGN olarak kabul edilmesidir.

AWGGN gürültüsünün genelleştirilmiş bir yapıya sahip olmasından dolayı pratik haberleşme uygulamalarında karşılan gürültü modellerinin de incelenmesini sağlamaktadır. Bu gürültü modelleri; su altı ve ultra geniş haberleşme sistemlerindeki gibi bazı sistemlerdeki Laplas gürültü modeli, enerji hattı haberleşmesinde karşılaşılan Dürtüsel ve Gama gürültü modelleri, geleneksel haberleşme sistemlerindeki Gauss (Gaussian) gürültü modeli olarak sıralanmaktadır [85-86]. Yıkıcılığı farklı olan gürültü modellerinin RIS sistemlerine uyarlanması, pratik/gerçek hayat RIS uygulamaları için önemli olduğu düşünülmektedir.



Şekil 12. Ele alınan sistem modeli

Ele alınan sistem modeli için D düğümündeki anlık işaret-gürültü oranının PDF ifadesi şu şekildedir [82]:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \Psi \gamma^{\frac{A-1}{2}} e^{\frac{-1}{B} \sqrt{\gamma}} \quad (17)$$

Burada $\bar{\gamma}$ ortalama SNR'yi tanımlamakta ve

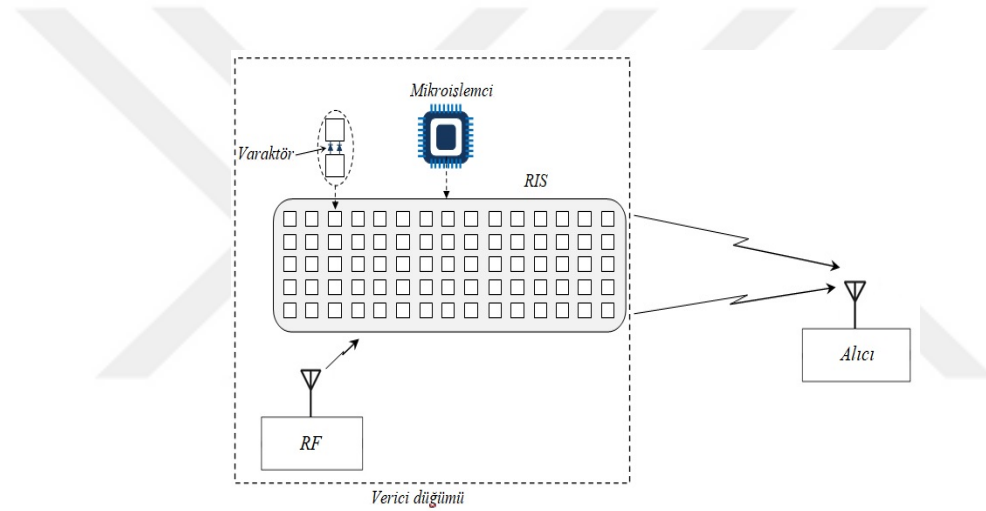
$$\Psi = \frac{1}{2B^{A+1}\Gamma(A+1)\bar{\gamma}^{\frac{A+1}{2}}} \quad (18)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (18)'de $A = \frac{s_1^2}{s_2} - 1$, $B = \frac{s_2}{s_1}$ biçimindedir. A ve B

için yapılan tanımlamalarda $s_1 = \frac{N\pi}{2}$ ve $s_2 = 4N \left(1 - \frac{\pi^2}{16}\right)$ şeklindedir. $\Gamma(\cdot)$ ise Gama fonksiyonudur.

4.2. İki Kollu Seçme Birleştirme Tekniğini Kullanan RIS Verici Sistemlerin AWGGN Analizi

Bu tezin ikinci kısmında ele alınan sistem modeli Şekil 13'deki gibidir. Burada sistem modeli için DB iletim kullanılmış olup, alıcı düğümünde SC tekniği ile bu iletim hatlarından gelen sinyaller birleştirilmektedir. Verici düğümünde RF noktası ile RIS yapısı birbirine çok yakın olduğu için aralarında herhangi bir iletim kaybının olmadığı varsayılmıştır. Böylece, RF ve RIS tek bir verici düğümü olarak değerlendirilmektedir [86].



Şekil 13. Ele alınan sistem modeli

Verici düğümü ile alıcı arasındaki DB iletim hatlarının Rayleigh sönümlü olduğu ve AWGGN gürültüsü altında iletim gerçekleştirdiği düşünülmektedir. Bu çalışmanın özgünlüğü, DB iletim kanallarının yine AWGGN gürültüsünde olmasıdır. AWGGN gürültüsü daha önce bahsedildiği gibi, genel bir gürültü modeli olup, klasik haberleşme sistemlerinde karşılaşılan AWGN gürültüsü de dahil olmak üzere dürtüsel (impulsive), Laplas (Laplacian) ve Gama (Gamma) vb. gibi daha çok yıkıcı gürültü modellerini de kapsamaktadır. Böylelikle sistemin AWGGN analizi gerçekleştirilerek farklı gürültü tiplerinin de analizinin yapılması söz konusudur. Daha öncede belirtildiği gibi, Rayleigh sönümlenme olduğu düşünüldüğünden, iletim hatlarından her birine ait anlık SNR'sinin PDF ifadeleri şu şekilde tanımlanmıştır [87]:

$$f_{\gamma_1}(\gamma) = W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} \quad (19)$$

$$f_{\gamma_2}(\gamma) = W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} \quad (20)$$

Burada $W_1 = \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^N (N-1)!}$, $W_2 = \frac{1}{(B\bar{\gamma}_2)^N (N-1)!}$ $B = 1 + (N-1)\Gamma^2(3/2)$, N ,

RIS'teki yansıtıcı eleman sayısı ve $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2$ olup toplam ortalama SNR olarak tanımlanmaktadır. $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2$ ifadesindeki $\bar{\gamma}_1$ DB iletimdeki birinci iletim hattına ait, $\bar{\gamma}_2$ ise ikinci iletim hattına ait ortalama SNR ifadelerini temsil etmektedir. Alıcı düğümde SC tekniği ile birleştirme yapıldığından alıcıdaki toplam PDF ifadesi [88-89]

$$f_{\gamma_{sc}}(\gamma) = f_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) + f_{\gamma_2}(\gamma)F_{\gamma_1}(\gamma) \quad (21)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $f_{\gamma_1}(\gamma)$ ve $f_{\gamma_2}(\gamma)$ sırasıyla (19) ve (20)'de tanımlandığı gibidir. $F_{\gamma_1}(\gamma)$ ve $F_{\gamma_2}(\gamma)$ ifadeleri ise DB'deki birinci ve ikinci iletim hatlarına ait anlık SNR'nin kümülatif dağılım fonksiyonlarıdır (cumulative distribution function, CDF). Buna göre, eşitlik (19) ve (20)'den faydalanarak $F_{\gamma_1}(\gamma)$ ve $F_{\gamma_2}(\gamma)$ ifadeleri aşağıdaki gibidir [87]:

$$F_{\gamma_1}(\gamma) = 1 - e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} \sum_{s=0}^{N-1} \frac{\gamma^s}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \quad (22)$$

$$F_{\gamma_2}(\gamma) = 1 - e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\gamma^k}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} \quad (23)$$

Eşitlik (19), (20), (22) ve (23)'teki ifadeler eşitlik (21)'de yerine konulursa

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{sc}}(\gamma) = & W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} - W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\gamma^k}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} \\ & + W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} - W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} \sum_{s=0}^{N-1} \frac{\gamma^s}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \end{aligned} \quad (24)$$

olarak toplam PDF ifadesi türetilmiş olunur. Eşitlik (24)'te bazı matematiksel düzenlemeler yapılırsa

$$\begin{aligned}
f_{\gamma_{sc}}(\gamma) = & W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} - W_1 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} \gamma^{N+k-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} \right)} \\
& + W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} - W_2 \sum_{s=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \gamma^{N+s-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} \right)}
\end{aligned} \tag{25}$$

şeklinde kullanımı kolay olan nihai ifade elde edilmiştir.

5. BÖLÜM

PERFORMANS ANALİZLERİ

5.1. RIS Destekli Kablosuz Bir Haberleşme Sisteminin AWGGN Analizi

Bir haberleşme sisteminin sembol hata olasılığı, P_e , $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi ve $f_\gamma(\gamma)$ ele alınan sistemin D 'deki anlık SNR'sinin PDF ifadesi olmak üzere

$$P_e = \int_0^{\infty} p(e|\gamma) f_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (26)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada $f_\gamma(\gamma)$ ifadesi eşitlik (17)'deki gibidir. AWGGN durumu için $p(e|\gamma)$ ifadesi ise [90]

$$p(e|\gamma) = f Q_\lambda(\sqrt{u\gamma}) \quad (27)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada $Q_\lambda(\cdot)$ genelleştirilmiş Gauss fonksiyonu ve λ ise gürültünün çeşidini belirleyen parametredir. Örneğin; Dürtüsel gürültü için $\lambda = 0$, Gama gürültüsü için $\lambda = 0.5$, Laplas gürültü için $\lambda = 1$ ve Gauss gürültüsü için $\lambda = 2$ olarak alınmaktadır. f ve u ise modülasyon sabitleridir. Örneğin; $f=1$, $u=1$ ikili frekans kaydırmalı anahtarlama (binary frequency shift keying, BFSK), $f=1$, $u=2$ ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase shift keying, BPSK) ve $f=2$, $u=1$ dördün faz kaydırmalı anahtarlama (quadrature phase shift keying, QPSK) şeklindedir. Eşitlik (27)'te tanımlanan $p(e|\gamma)$ ifadesi matematiksel açıdan işlem zorluğu içerdiğinden [91]'de verilen yaklaşıklığın kullanılması tercih edilmektedir. Buna göre $p(e|\gamma)$

$$p(e|\gamma) \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j e^{-\omega_j u \gamma} \quad (28)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada θ_j ve ω_j sunulan yaklaşıklığın parametreleri olup, [73, Tablo 3]'te verilmiştir. Eşitlik (17) ve (18), (28)'de yerine yazılırsa

$$P_e \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j \Psi \int_0^{\infty} e^{-\omega_j u \gamma} \gamma^{\frac{A-1}{2}} e^{\frac{-1}{B} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma}}} d\gamma \quad (29)$$

elde edilir. Buradaki integrali çözmek için $t = \sqrt{\gamma}$ değişken dönüşümü ve [74, Eşitlik (3.462.1)] yardımıyla şu ifade türetilir:

$$P_e \approx 2f \sum_{j=1}^4 \theta_j \Psi(2\omega_j u)^{-\frac{(A+1)}{2}} \Gamma(A+1) e^{\left(\frac{1}{B^2 \gamma} 8\omega_j u\right)} D_{-(A+1)}\left(\frac{1}{B\sqrt{\gamma}\sqrt{2\omega_j u}}\right) \quad (30)$$

Burada $D_a(z)$ parabolik silindir fonksiyonudur. Mathematica yazılımının güncel versiyonlarında direkt olarak $D_a(z)$ parabolik silindir fonksiyonu bulunmaktadır. Ancak MATLAB yazılımında direkt olarak bu fonksiyon bulunmadığından $D_a(z)$ parabolik silindir fonksiyonu için ${}_1F_1$ hipergeometrik fonksiyon dönüşümünün yapılması uygun görülmüştür. Buradan hareketle, [74, Eşitlik (9.240)] ifadesine göre

$$D_p(z) = 2^{\frac{p}{2}} e^{-\frac{z^2}{4}} \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma\left(\frac{1-p}{2}\right)} \Phi\left(-\frac{p}{2}, \frac{1}{2}; \frac{z^2}{2}\right) - \frac{z\sqrt{2\pi}}{\Gamma\left(\frac{-p}{2}\right)} \Phi\left(\frac{1-p}{2}, \frac{3}{2}; \frac{z^2}{2}\right) \right\} \quad (31)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $\Phi(\alpha, \beta; z) = {}_1F_1(\alpha, \beta; z)$ [73, Eşitlik (9.240)] şeklindedir. Eşitlik (30), (31)'de yerine konulursa P_e

$$P_e \approx 2f \sum_{j=1}^4 \theta_j \Psi(2\omega_j u)^{-\frac{(A+1)}{2}} \Gamma(A+1) e^{\left(\frac{1}{B^2 \gamma} 8\omega_j u\right)} \times 2^{\frac{p}{2}} e^{-\frac{z^2}{4}} \left\{ \frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma\left(\frac{1-p}{2}\right)} \Phi\left(-\frac{p}{2}, \frac{1}{2}; \frac{z^2}{2}\right) - \frac{z\sqrt{2\pi}}{\Gamma\left(\frac{-p}{2}\right)} \Phi\left(\frac{1-p}{2}, \frac{3}{2}; \frac{z^2}{2}\right) \right\} \quad (32)$$

olarak türetilir. Burada $p = -A - 1$ ve $z = \frac{1}{B\sqrt{\gamma}\sqrt{2\omega_j u}}$ 'dur. Benzer şekilde, [74, Eşitlik (9.240)] yardımıyla

$$P_e \approx 2f \sum_{j=1}^4 \theta_j \Psi(2\omega_j u)^{-\frac{(A+1)}{2}} \Gamma(A+1) e^{\left(\frac{1}{B^2 \bar{\gamma} 8\omega_j u}\right)} \times$$

$$2^{-\frac{(A+1)}{2} + \frac{1}{4}} W_{-\frac{(A+1)}{2} + \frac{1}{4}, -\frac{1}{4}} \left(\frac{1}{B^2 \bar{\gamma} 4\omega_j u} \right) \left(\frac{1}{B\sqrt{\gamma}\sqrt{2\omega_j u}} \right)^{-0.5} \quad (33)$$

olarak da elde edilir. Burada $W_{\cdot}(\cdot)$ Whittaker fonksiyonudur. Buna ek olarak, bir diğer alternatif çözüm [93]'teki ${}_1F_1$ hipergeometrik fonksiyon gösterimi kullanılarak

$$P_e \approx 2f \sum_{j=1}^4 \theta_j \Psi(2\omega_j u)^{-\frac{(A+1)}{2}} \Gamma(A+1) e^{\left(\frac{1}{B^2 \bar{\gamma} 8\omega_j u}\right)} \times$$

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} 2^{-\frac{(A+1)}{2}} e^{-\left(\frac{1}{8B^2 \bar{\gamma} \omega_j u}\right)} \left\{ \cos\left(\frac{-\pi(A+1)}{2}\right) \Gamma\left(\frac{-A}{2}\right) \times \right. \right.$$

$${}_1F_1\left(\frac{A+1}{2}, \frac{1}{2}; \frac{1}{4B^2 \bar{\gamma} \omega_j u}\right) + \sqrt{2} \left(\frac{1}{B\sqrt{\gamma}\sqrt{2\omega_j u}} \right) \sin\left(\frac{-\pi(A+1)}{2}\right) \times$$

$$\left. \left. \Gamma\left(-A + \frac{1}{2}\right) {}_1F_1\left(A+1, \frac{3}{2}; \frac{1}{4B^2 \bar{\gamma} \omega_j u}\right) \right\} \right\} \quad (34)$$

biçiminde de elde edilir. Ayrıca son olarak [94]'deki hata fonksiyonu gösterimi sayesinde

P_e

$$P_e \approx 2f \sum_{j=1}^4 \theta_j \Psi(2\omega_j u)^{-\frac{(A+1)}{2}} \Gamma(A+1) e^{\left(\frac{1}{B^2 \bar{\gamma} 8\omega_j u}\right)} \times$$

$$\left\{ \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(-1)^A}{A!} e^{\left(-\frac{1}{4}z^2\right)} \frac{\partial^A \left(e^{0.5z^2} \operatorname{erfc}\left(z/\sqrt{2}\right) \right)}{\partial z^A} \right\} \quad (35)$$

olarak elde edilir. Burada $z = \frac{1}{B\sqrt{\gamma}\sqrt{2\omega_j u}}$ şeklindedir. Eşitlik (32), (33), (34) ve

(35)'deki çözümler ele alınan sistemin hata olasılığı ifadelerinin farklı alternatif çözümleri

olarak ilk defa bu çalışmada sunulmuştur. Bir sonraki bölümde sunulan nümerik sonuçlarda analitik eğriler için eşitlik (32) kullanılmıştır.

5.2. İki Kollu Seçme Birleştirme Tekniğini Kullanan RIS Verici Sistemlerin AWGGN Analizi

Bu alt başlıkta Şekil 12'deki sistemin AWGGN analizi sunulmaktadır. Bunun için PDF tabanlı genel hata formüle ele alınmaktadır. Buna göre

$$P_e = \int_0^{\infty} p(e|\gamma) f_{\gamma_{sc}}(\gamma) d\gamma \quad (36)$$

olarak bilinmektedir. Burada $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi, $f_{\gamma_{sc}}(\gamma)$ ifadesi ise ele alınan sistemin toplam PDF ifadesidir. Bu PDF ifadesi eşitlik (25)'de türetilmiştir. $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi ise

$$p(e|\gamma) = f Q_{\lambda}(\sqrt{u\gamma}) \quad (37)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (37)'deki parametre ve fonksiyon denklemleri daha önce verilmiştir. $Q_{\lambda}(\cdot)$ ifadesi

$$Q_{\lambda}(x) = \frac{\lambda \Lambda^{2/\lambda}}{2\Gamma(1/\lambda)} \int_x^{\infty} e^{-\Lambda^{\lambda} t^{\lambda}} dt \quad (38)$$

olarak tanımlanmaktadır. Eşitlik (38) ile verilen ifade eşitlik (37)'de kullanıldığı zaman matematiksel açıdan işleme çok müsait olmayan ifadeler ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple, literatürde bu tip matematiksel işlemlerin yapılabilmesi için bazı yaklaşıklıklar önerilmiştir. Genelleştirilmiş Gaussian fonksiyonu için önerilmiş olan yaklaşıklıklardan [98]'teki ifade oldukça kullanışlıdır [96, 97]. Bu ifade üstel fonksiyon terimlerinin toplamı şeklindedir. Matematiksel olarak işlem yapmaya müsait olmasının nedeni de içerisinde sadece üstel fonksiyonlar bulunmasıdır. Bu sebeple, [95]'teki yaklaşıklık

$$Q_{\lambda}(x) \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j e^{-\omega_j x^2} \quad (39)$$

şeklidedir. Burada θ_j ve ω_j yaklaşıklık katsayılarıdır. λ parametresinin aldığı değere göre bu katsayılar değişiklik göstermektedir. θ_j ve ω_j katsayılarının değerleri Tablo 4’de verildiği gibidir.

Tablo 4. λ parametresinin aldığı değere katsayılar

	λ			
	0.5	1	1.5	2
θ_1	44.920	0.068	0.065	0.099
θ_2	126.460	0.202	0.149	0.157
θ_3	389.400	0.182	0.136	0.124
θ_4	96.540	0.255	0.125	0.119
ω_1	0.130	0.217	0.341	1.981
ω_2	2.311	2.185	0.712	0.534
ω_3	12.520	0.657	10.570	0.852
ω_4	0.629	12.640	1.945	10.268

Eşitlik (39)’deki yaklaşıklık $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi için kullanırsa

$$p(e|\gamma) \approx f \sum \theta e^{-\omega_j \gamma} \quad (40)$$

olarak elde edilir. Eşitlik (25)’deki PDF ifadesi, eşitlik (40)’deki $p(e|\gamma)$ koşullu hata olasılığı ifadesi eşitlik (36)’de yerine yazılırsa

$$P_e \approx \int_0^\infty f \sum_{j=1}^4 \theta_j e^{-\omega_j \gamma} \left[W_1 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_1}} - W_1 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} \gamma^{N+k-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} \right)} + W_2 \gamma^{N-1} e^{-\frac{\gamma}{B\bar{\gamma}_2}} - W_2 \sum_{s=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \gamma^{N+s-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} \right)} \right] d\gamma \quad (41)$$

ifadesi elde edilir. Eşitlik (41) için gerekli matematiksel düzenlemeler yapıldığında

$$P_e \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j \left\{ W_1 I_1 - W_1 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} I_2 + W_2 I_3 - W_2 \sum_{s=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} I_4 \right\} \quad (42)$$

olarak yeniden elde edilir. Burada I_1, I_2, I_3 ve I_4 sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$I_1 = \int_0^{\infty} \gamma^{N-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)} d\gamma \quad (43)$$

$$I_2 = \int_0^{\infty} \gamma^{N+k-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)} d\gamma \quad (44)$$

$$I_3 = \int_0^{\infty} \gamma^{N-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)} d\gamma \quad (45)$$

$$I_4 = \int_0^{\infty} \gamma^{N+s-1} e^{-\gamma \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)} d\gamma \quad (46)$$

Eşitlik (43)-(46)'de verilen aynı formattadır. [80, eşitlik (3.381.4)] yardımıyla çözülebilmektedir. Buna göre

$$I_1 = \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)^{-N} \Gamma(N) \quad (47)$$

$$I_2 = \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)^{-(N+k)} \Gamma(N+k) \quad (48)$$

$$I_3 = \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)^{-N} \Gamma(N) \quad (49)$$

$$I_4 = \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)^{-(N+s)} \Gamma(N+s) \quad (50)$$

olarak elde edilir. Burada $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonudur [99]. Eşitlik (47)-(50)'de verilen çözümler eşitlik (42)'te yerine yazılırsa

$$P_e \approx f \sum_{j=1}^4 \theta_j \left\{ \begin{aligned} & W_1 \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)^{-N} \Gamma(N) - W_1 \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^k k!} \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)^{-(N+k)} \Gamma(N+k) \\ & + W_2 \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \omega_j u \right)^{-N} \Gamma(N) - W_2 \sum_{s=0}^{N-1} \frac{1}{(B\bar{\gamma}_1)^s s!} \left(\frac{1}{B\bar{\gamma}_2} + \frac{1}{B\bar{\gamma}_1} + \omega_j u \right)^{-(N+s)} \Gamma(N+s) \end{aligned} \right\} \quad (51)$$

olarak yaklaşık ifade elde edilir. Eşitlik (51) ile türetilmiş olan ifade yaklaşık bir ifade olup, DB SC tekniğini kullanan RIS verici sistemlerin AWGGN koşullarında hata ifadesidir. Bilindiği kadarıyla bu alt başlıklardaki hata ifadeleri literatürde ilk kez türetilmiştir.

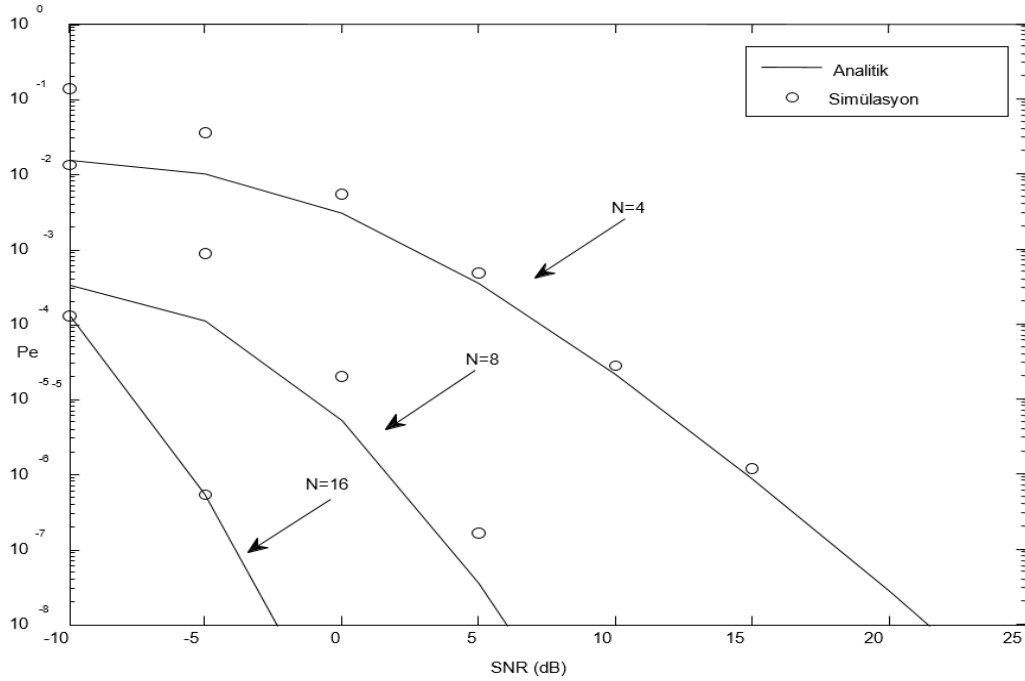


6. BÖLÜM

BULGULAR

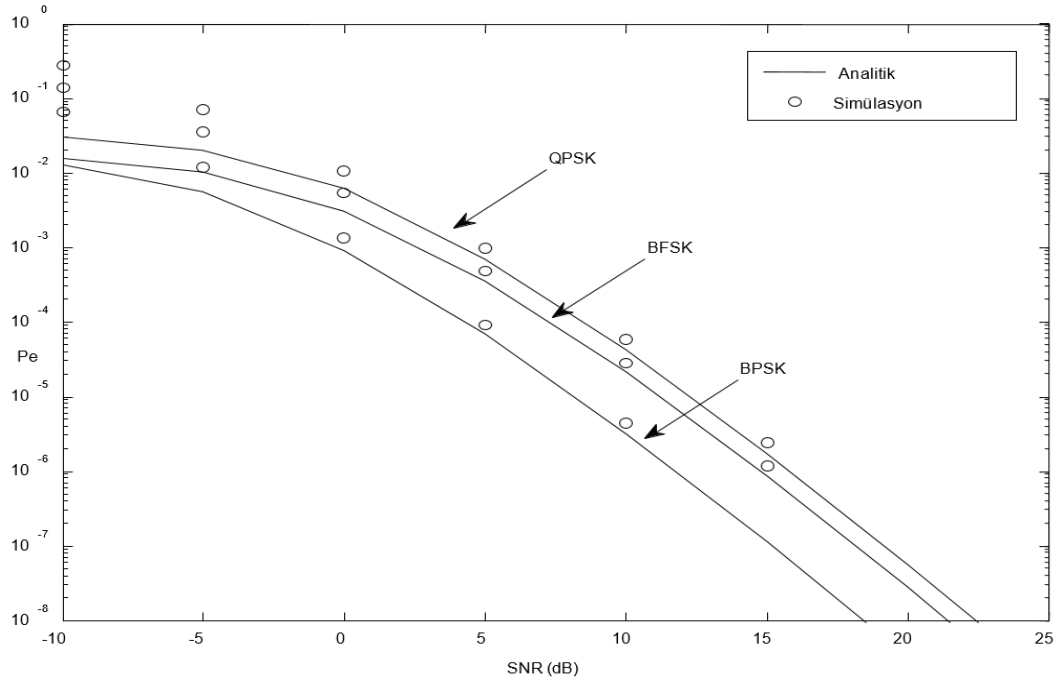
6.1. RIS Destekli Kablosuz Bir Haberleşme Sisteminin AWGGN Analizi Sonuçları

Burada ele alınan RIS destekli haberleşme sisteminin analizinde elde edilen hata ifadesi kullanılarak üç farklı senaryo incelenmiştir. Bunlardan ilki olan Şekil 14’de, RIS yapısındaki N yansıtıcı eleman sayısının değişimidir. Burada kullanılan modülasyon BFSK ($f=1, u=1$) olup, Laplas gürültü ($\lambda=1$) etkisi göz önünde bulundurulmuştur.

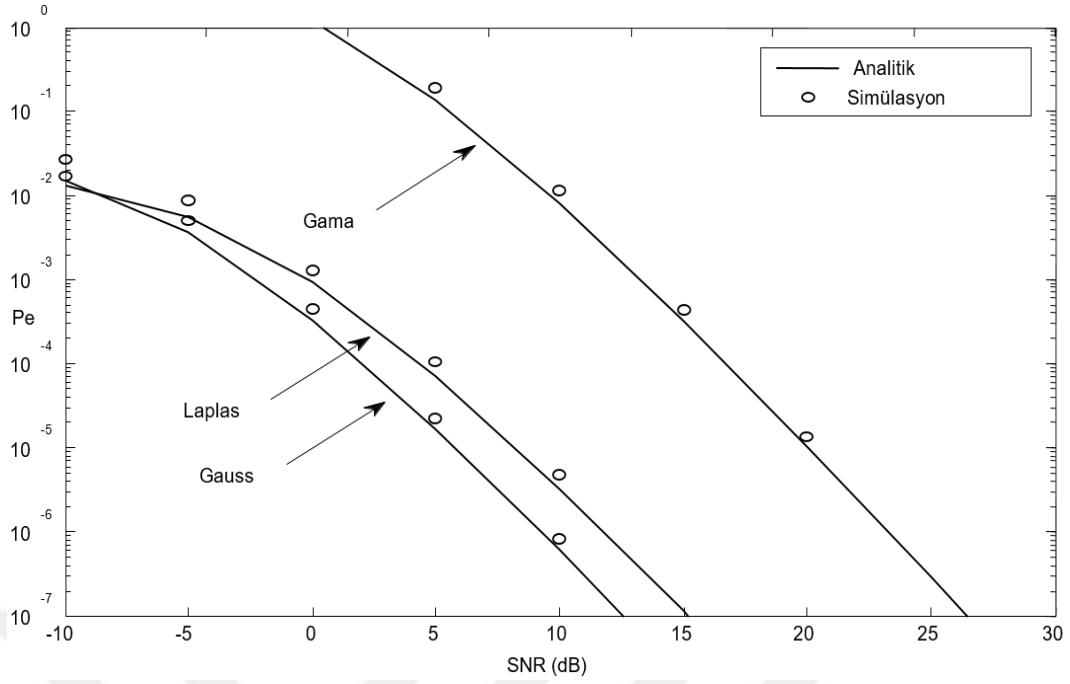


Şekil 14. Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültü etkisi altında ve BFSK modülasyonu için farklı hücre sayılarının hata olasılığı kıyaslaması.

RIS destekli sistemlerde N hücre sayısının artması sistemin hata olasılığına olumlu etki yapmaktadır. Bu durum şekilden de görülmektedir. Çünkü RIS üzerindeki yansıtıcı eleman sayısının artması ile S düğümünden gelen işaretin daha fazla sayıda kopyasının D düğümüne iletilmesi sağlamaktadır. İkinci senaryoda ise Şekil 15'te görüldüğü gibi, RIS yapısındaki hücre sayısının 4 olduğu ve Laplas gürültüsünün ($\lambda=1$) dikkate alındığı durumda farklı modülasyon türlerinin sistemin hata olasılığına olan etkisi incelenmiştir. Burada ele alınan modülasyon türleri sıralı olarak BFSK ($f=1, u=1$), BPSK ($f=1, u=2$) ve QPSK ($f=2, u=1$) şeklinde görülmektedir. Beklenildiği gibi, birim zamanda iletilen bit sayısı arttıkça sistemin hata olasılığı artmaktadır. Bu durum QPSK modülasyonu ile elde edilen hata eğrisinin BPSK ve BFSK modülasyonları ile elde edilen hata eğrilerinden daha kötü olması ile doğrulanmaktadır. En iyi hata eğrisinin ise BPSK modülasyonu ile elde edildiği yine Şekil 15'teki sonuçlardan görülmektedir.



Şekil 15. Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültü etkisi altında ve $N=4$ için farklı modülasyon türlerinin hata olasılığı kıyaslaması.



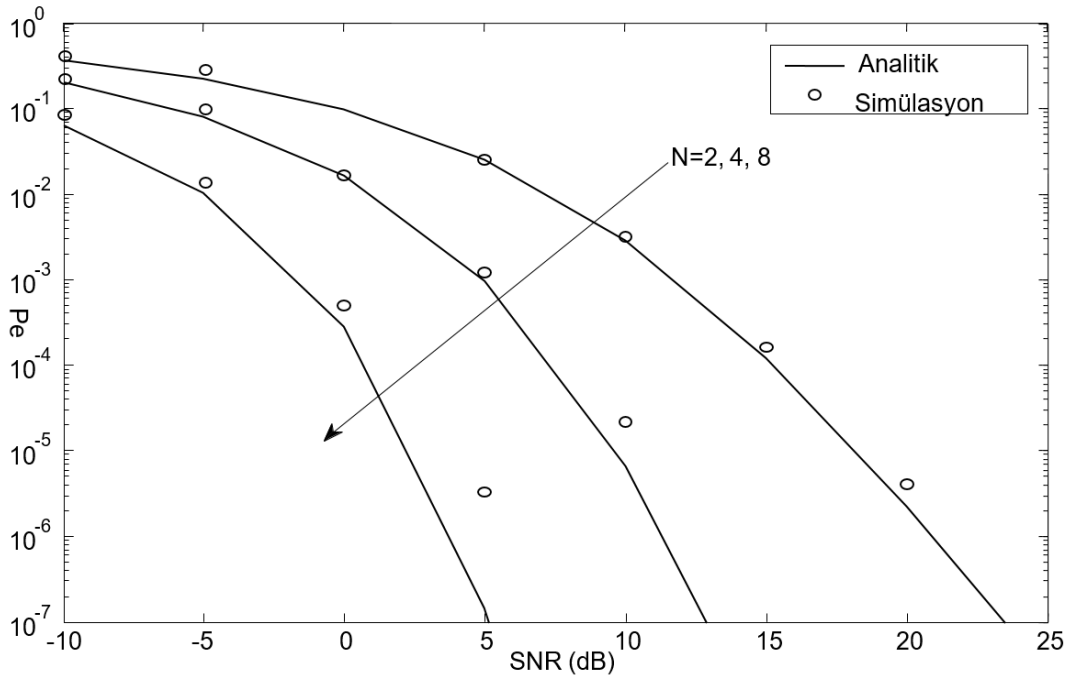
Şekil 16. Ele alınan sistem modelinin BPSK modülasyonu ve $N=4$ durumunda farklı gürültü türleri için hata olasılığı kıyaslaması.

Bu çalışma incelenen son senaryoda ise, λ parametresinin değişmesiyle elde edilen farklı gürültü türlerinin ele alınan RIS destekli sistem modelinin hata başarımına olan etkisini gözlemlemektedir. Burada her gürültü modeli için RIS yapısındaki yansıtıcı eleman sayısı 4 ve kullanılan modülasyon ise BPSK olarak belirlenmiştir. En yıkıcı gürültü modeli olan Gama ile RIS sisteminin hata eğrisinin en kötü olduğu, Laplas gürültüsü ile elde edilen eğrinin Gama gürültüsüne göre daha iyi, Gauss gürültüsüne göre daha kötü bir başarımla oluşturduğu Şekil 16'dan görülmektedir. Sonuç olarak, incelenen her üç senaryo için, bir önceki alt başlıkta sunulan eşitlik (32) kullanılarak elde edilen analitik sonuçlar ile aynı sistem durumlarına ait simülasyon sonuçların birbiri ile uyum içerisinde olduğu açıkça görülmektedir. Eğrilerin formlarının aynı şekilde olduğu göz önüne alındığında yapılan analizlerin doğru olduğu ortaya konmuştur. Analitik sonuçlar ile tam sonuçların arasındaki farkın her üç şekilde de özellikle düşük SNR bölgesinde fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebinin, analizde çözüme ulaşmak için kullanılan eşitlik (27)'teki koşullu hata ifadesinin yaklaşık olması ve eşitlik (31)'deki parabolik silindir fonksiyonun hipergeometrik fonksiyon dönüşümünün kullanılması olarak belirtilebilir.

6.2. İki Kollu Seçme Birleştirme Tekniğini Kullanan RIS Verici Sistemlerin AWGGN Analizi Sonuçları

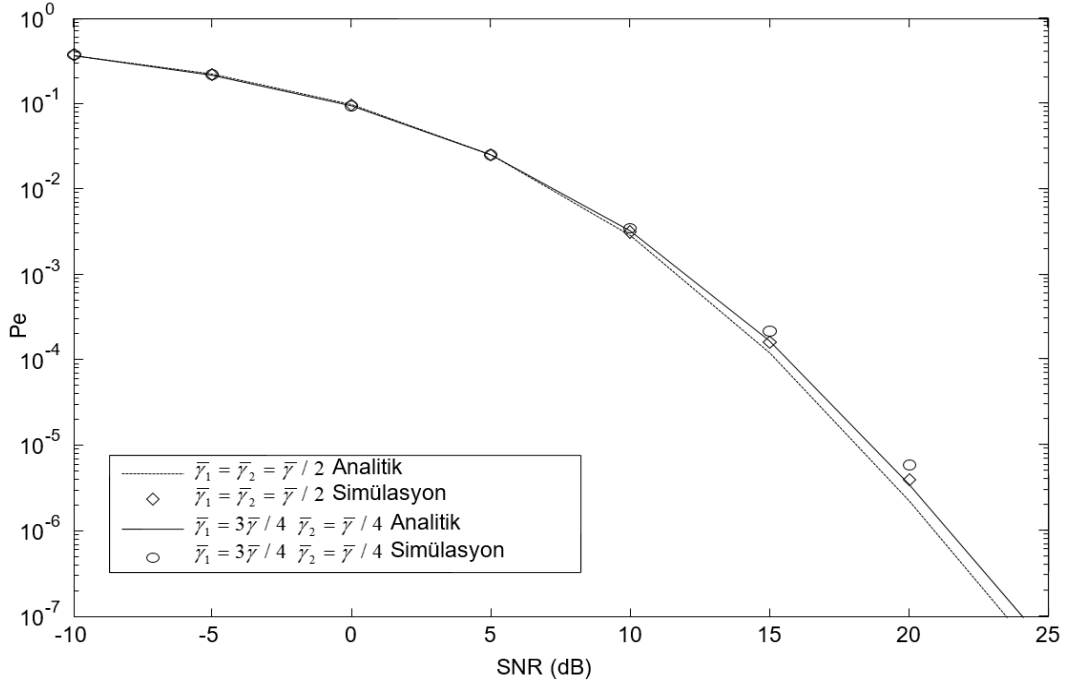
Bu alt başlıkta bir önceki bölümde yapılan analizler sonucunda türetilmiş olan yaklaşık hata ifadesinin doğruluğu gösterilmeye çalışılmaktadır. Ele sistem modeli için farklı parametre ayarlamaları ile değişik senaryolar oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu senaryolar ve elde edilen hata eğrileri Şekil 17-19’da sunulmaktadır. Şekil 17’de BFSK modülasyonu ile Laplas gürültüsünün etkisi gözetilerek DB SC RIS verici sisteminin hata eğrileri sunulmaktadır. Şekil 17’de N yansıtıcı eleman sayısının değişiminin etkisi araştırılmaktadır. Buradaki senaryo için $\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2$ olup $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} / 2$ şeklinde ayarlanmıştır. Bunun anlamı DB iletim hatlarındaki ortalama SNR miktarı her bir iletim hattına eşit olarak dağıtılmış demektir. RIS sistemlerindeki N yansıtıcı eleman sayısının artması sistemi olumlu etkilemektedir. Bunun da sebebi, RIS’taki yansıtıcı eleman sayısının artması aynı sinyalin daha fazla miktarda farklı kopyasının iletim hatlarından gönderilmesi demektir. Bu durum, Şekil 17’deki sonuçlarda da açıkça görülmektedir. Sırasıyla hata eğrilerinin performans kıyaslaması az olandan çok olana 2, 4 ve 8 şeklindedir.

Şekil 18’deki senaryoda ise $\bar{\gamma}_1$ ve $\bar{\gamma}_2$ miktarlarındaki farklı durumların ele alınan sistem modeline etkisi gösterilmektedir. Burada yine BFSK modülasyonun kullanıldığı varsayılmış, Laplas gürültüsünün etkisi altında sistem hata eğrileri elde edilmiştir. RIS’taki N yansıtıcı eleman sayısının ise 2’ye eşit olduğu durum görülmektedir.



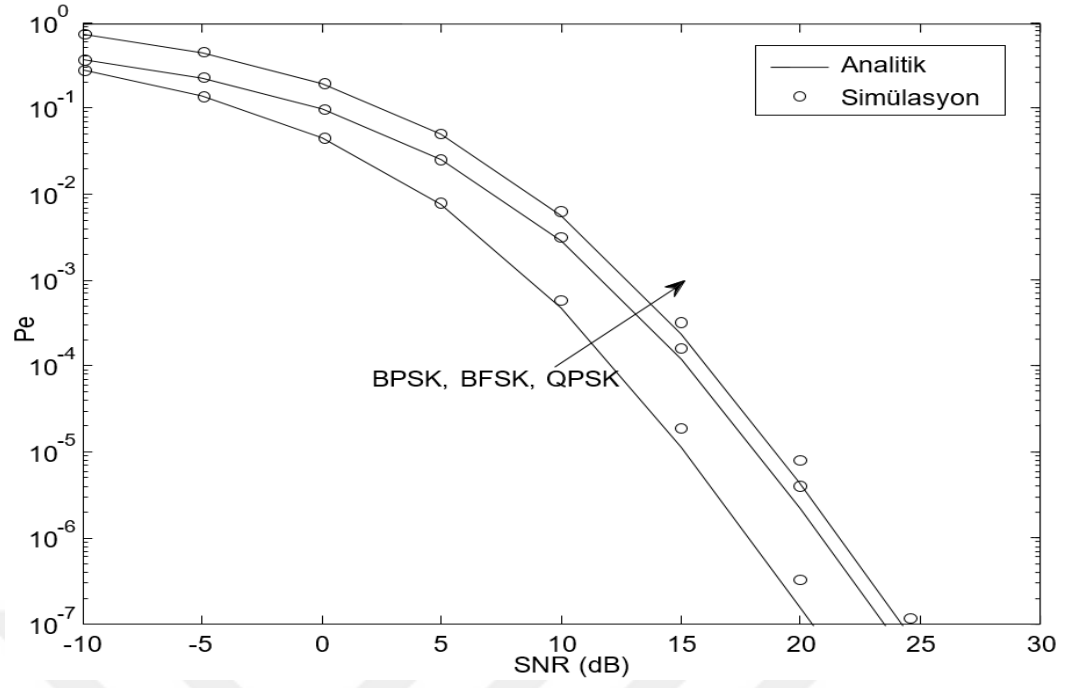
Şekil 17. Laplas gürültüsü altında ele alınan sistemin farklı N yansıtıcı eleman sayısı ile hata eğrileri

DB'deki iletim hatları için iki farklı ortalama SNR dağılımı araştırılmaktadır. Bunlardan ilki, $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} / 2$ durumu, ikincisi ise $\bar{\gamma}_1 = 3\bar{\gamma} / 4, \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} / 4$ olarak değerlendirilmektedir. Şekil 18'den de görüldüğü gibi, iki durumda birbirine benzer hata performansı göstermektedir. Ancak ilk durumun hata performansının ikinci duruma göre özellikle 10 dB'den sonra biraz daha iyi olduğu dikkati çekmektedir.



Şekil 18. Ele alınan sistem modeli için Laplas gürültüsü etkisinde farklı iletim hatları ortalama SNR değişimlerine ait hata eğrileri

Bu bölümde sunulan son inceleme ise Şekil 4'te verilmektedir. Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültüsü etkisi altında, $N=2$ ve $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} / 2$ olduğu durumda farklı modülasyon türlerinin ele alınan sisteme etkisi incelenmektedir. Sunulan grafikte, üç farklı modülasyon türü analiz edilmiştir. Bunlar: BPSK, BFSK ve QPSK şeklindedir. Beklenildiği gibi, BFSK modülasyonlu sistemin hata performansı QPSK modülasyonluya göre daha iyi, ancak BPSK modülasyonlu duruma göre daha kötüdür. Şekil 17-19'da sunulan bütün nümerik sonuçlarda yapılan analizler sonucunda türetilen ifadenin analitik sonuçları ile nümerik tam simülasyon sonuçlarının birbiri ile iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu durum, yapılan analizlerin doğruluğunu göstermektedir. Sonuçların kıyaslama olarak verilmesinin nedenini bu şekilde açıklamak mümkündür.



Şekil 19. Ele alınan sistem modelinin Laplas gürültüsü etkisinde farklı modülasyonlarla hata eğrileri

7. BÖLÜM

SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, iki farklı RIS destekli sistem modeli ele alınmış ve her iki sistem modeli için AWGGN analizleri yapılmıştır. İlk bölümde, RIS destekli bir kablosuz haberleşme sisteminin AWGGN etkisi altında Rayleigh sönümlenmeli kanallarda hata analizi detaylı bir şekilde sunulmuştur. Gerçekleştirilen hata analizi PDF tabanlı olup, ilk sistem modeli için dört farklı çözüm elde edilmiştir. Alternatif çözümlerden parabolik silindir fonksiyonu içeren çözüm kullanılarak analitik sonuçlar elde edilmiştir. İkinci bölümde ise, RIS sisteminin verici olarak kullanıldığı bir DB SC iletim sisteminin AWGGN koşullarında ve Rayleigh sönümlenmesinde hata analizi incelemektedir. Yapılan hata analizi için ele alınan sistemin toplam anlık SNR'sine ait PDF ifadesi türetilmiş, türetilen bu PDF yardımıyla yaklaşık hata analizi ifadesi elde edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen yaklaşık hata ifadesinin doğruluğu çeşitli senaryolar ile gösterilmiş ve tam nümerik simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır. Benzer durum ilk bölümde sunulan analitik ifadelerin doğruluğu için de geçerlidir. Ele alınan her iki sistem analizi için sistemdeki farklı parametrelerin değişimlerinin hata olasılıklarına etkileri incelenmiş olup, bulgular bölümde bu etkiler gösterilmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasının kazanımları, gelecek nesil haberleşme sistemlerinde önemli bir yere sahip olacağı öngörülen RIS destekli haberleşme sistemlerinin literatürde olmayan analizlerinin yapılması ve literatürdeki bu boşlukların giderilmesi olarak belirtilebilmektedir. Sunulan tez çalışmasının amacı ise, gelecekte dikkate değer bir yere sahip olacağı öngörülen RIS destekli sistemlerin AWGGN gibi gerçek hayat senaryolarında karşılaşılabilecek koşullarda hata analizlerini sunmak olarak değerlendirilmektedir. Bu tezin devamında yapılabilecek gelecek çalışmalar için, bu tez çalışmasında ele alınmayan RIS destekli farklı sistem modellerinin AWGGN

analizlerinin yapılması veya RIS destekli sistemlerin bulunmuş olduğu kanal ortamlarının farklı sönümlemelere ait olduğu durumların ele alınması şeklinde sıralanabilmektedir.



KAYNAKÇA

- [1] Rajatheva, N., Atzeni, I., Bicaïs, S., Bjornson, E., Bourdoux, A., Buzzzi, S., Xu, W. 2020. Scoring the terabit/s goal: Broadband connectivity in 6G. **arXiv preprint arXiv, 2008**: 1-51.
- [2] Boccardi, F., Heath, R. W., Lozano, A., Marzetta, T. L., Popovski, P. 2014. Five disruptive technology directions for 5G. **IEEE communications magazine, 52**(2): 74-80.
- [3] Wu, Q., Li, G. Y., Chen, W., Ng, D. W. K., Schober, R. 2017. An overview of sustainable green 5G networks. **IEEE wireless communications, 24**(4): 72-80.
- [4] Tse, D., Viswanath, P. 2005. Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge Univ. Pr., Cambridge in United Kingdom, 564 pp.
- [5] Goldsmith, A. 2005. Wireless communications. Cambridge University Press, 673 pp.
- [6] Wu, Q., Zhang, R. 2018. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design. In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Wu, Q., Zhang, R. 2020. Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network. **IEEE Communications Magazine, 58**(1): 106-112.
- [8] Wu, Q., Zhang, S., Zheng, B., You, C., Zhang, R. 2021. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: A tutorial. **IEEE Transactions on Communications, 69**(5): 3313-3351.
- [9] Wu, Q., Zhang, R. 2019. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming. **IEEE Transactions on Wireless Communications, 18**(11): 5394-5409.
- [10] Lyu, J., Zhang, R. 2021. Hybrid active/passive wireless network aided by intelligent reflecting surface: System modeling and performance analysis. **IEEE Transactions on Wireless Communications, 20**(11): 7196-7212.
- [11] Xia, S., Shi, Y. 2020. Intelligent reflecting surface for massive device connectivity: Joint activity detection and channel estimation. In *ICASSP 2020-2020 IEEE*

- International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 5175-5179). IEEE.
- [12] Basar, E. 2019. Reconfigurable intelligent surfaces for Doppler effect and multipath fading mitigation. **Frontiers in Communications and Networks**, **14**. arXiv: 1912.04080.
 - [13] Huang, Z., Zheng, B., Zhang, R. 2021. Transforming fading channel from fast to slow: IRS-assisted high-mobility communication. In *ICC 2021-IEEE International Conference on Communications* (pp. 1-6). IEEE.
 - [14] Latva-aho, M., Leppänen, K., Clazzer, F., Munari, A. 2020. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence. ISBN 978-952-62-2354-4. ISSN 2669-9621.
 - [15] Rajatheva, N., Atzeni, I., Bjornson, E., Bourdoux, A., Buzzi, S., Dore, J. B., Xu, W. 2020. White paper on broadband connectivity in 6G. **arXiv preprint arXiv:2004.14247**.
 - [16] Subrt, L., Pechac, P. 2012. Intelligent walls as autonomous parts of smart indoor environments. **IET communications**, **6**(8): 1004-1010.
 - [17] Tan, X., Sun, Z., Koutsonikolas, D., Jornet, J. M. 2018. Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays. In *IEEE INFOCOM 2018-IEEE Conference on Computer Communications* (pp. 270-278). IEEE.
 - [18] Renzo, M. D., Debbah, M., Phan-Huy, D. T., Zappone, A., Alouini, M. S., Yuen, C., Fink, M. 2019. Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, **2019**(1): 1-20.
 - [19] Basar, E., Di Renzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M. S., Zhang, R. 2019. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. **IEEE access**, **7**, 116753-116773.
 - [20] Liang, Y. C., Long, R., Zhang, Q., Chen, J., Cheng, H. V., Guo, H. 2019. Large intelligent surface/antennas (LISA): Making reflective radios smart. **Journal of Communications and Information Networks**, **4**(2): 40-50.
 - [21] Arun, V., Balakrishnan, H. 2019. RFocus: Practical beamforming for small devices. **arXiv preprint arXiv:1905.05130**.

- [22] He, Q., Sun, S., Zhou, L. 2019. Tunable/reconfigurable metasurfaces: physics and applications. **Research**, 2019. Art. no. 1849272.
- [23] Hum, S. V., Perruisseau-Carrier, J. 2013. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review. **IEEE transactions on antennas and propagation**, 62(1): 183-198.
- [24] Liaskos, C., Nie, S., Tsioliariidou, A., Pitsillides, A., Ioannidis, S., Akyildiz, I. 2018. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces. **IEEE Communications Magazine**, 56(9): 162-169.
- [25] Björnson, E., Özdogan, Ö., Larsson, E. G. 2020. Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions. **IEEE Communications Magazine**, 58(12): 90-96.
- [26] Di Renzo, M., Ntontin, K., Song, J., Danufane, F. H., Qian, X., Lazarakis, F., Shamai, S. 2020. Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison. **IEEE Open Journal of the Communications Society**, 1: 798-807.
- [27] ElMossallamy, M. A., Zhang, H., Song, L., Seddik, K. G., Han, Z., Li, G. Y. 2020. Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities. **IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking**, 6(3): 990-1002.
- [28] Huang, C., Hu, S., Alexandropoulos, G. C., Zappone, A., Yuen, C., Zhang, R., Debbah, M. 2020. Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends. **IEEE Wireless Communications**, 27(5): 118-125.
- [29] Di Renzo, M., Zappone, A., Debbah, M., Alouini, M. S., Yuen, C., De Rosny, J., Tretyakov, S. 2020. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead. **IEEE journal on selected areas in communications**, 38(11): 2450-2525.
- [30] Yuan, X., Zhang, Y. J. A., Shi, Y., Yan, W., Liu, H. 2021. Reconfigurable-intelligent-surface empowered wireless communications: Challenges and opportunities. **IEEE wireless communications**, 28(2): 136-143.

- [31] Gong, S., Lu, X., Hoang, D. T., Niyato, D., Shu, L., Kim, D. I., Liang, Y. C. Towards Smart Radio Environment for Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Comprehensive Survey. arXiv 2019. **arXiv preprint arXiv:1912.07794**.
- [32] Björnson, E., Özdogan, Ö., Larsson, E. G. 2020. Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions. **IEEE Communications Magazine**, **58**(12): 90-96.
- [33] Huang, C., Zappone, A., Debbah, M., Yuen, C. 2018. Achievable rate maximization by passive intelligent mirrors. In *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 3714-3718). IEEE.
- [34] Baker, B. B., Copson, E. T. 2003. The mathematical theory of Huygens' principle (Vol. 329). American Mathematical Soc., USA: American Mathematical Society.
- [35] Garcia, J. C. B., Sibille, A., Kamoun, M. 2020. Reconfigurable intelligent surfaces: Bridging the gap between scattering and reflection. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, **38**(11): 2538-2547.
- [36] Di Renzo, M., Danufane, F. H., Xi, X., De Rosny, J., Tretyakov, S. 2020. Analytical modeling of the path-loss for reconfigurable intelligent surfaces—anomalous mirror or scatterer?. In *2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [37] Nayeri, P., Yang, F., Elsherbeni, A. Z. 2018. Reflectarray antennas: theory, designs, and applications, Wiley-IEEE Press, 424 pp.
- [38] Zhang, L., Chen, X. Q., Liu, S., Zhang, Q., Zhao, J., Dai, J. Y., Cui, T. J. 2018. Space-time-coding digital metasurfaces. **Nature communications**, **9**(1): 1-11.
- [39] Yang, H., Chen, X., Yang, F., Xu, S., Cao, X., Li, M., Gao, J. 2017. Design of resistor-loaded reflectarray elements for both amplitude and phase control. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, **16**: 1159-1162.
- [40] Cui, T. J., Qi, M. Q., Wan, X., Zhao, J., Cheng, Q. 2014. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. **Light: science & applications**, **3**(10): e218-e218.

- [41] Wu, Q., Zhang, R. 2019. Beamforming optimization for intelligent reflecting surface with discrete phase shifts. In *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 7830-7833). IEEE.
- [42] Abeywickrama, S., Zhang, R., Wu, Q., Yuen, C. (2020). Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization. **IEEE Transactions on Communications**, **68**(9): 5849-5863.
- [43] Abeywickrama, S., Zhang, R., Wu, Q., Yuen, C. 2020. Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization. **IEEE Transactions on Communications**, **68**(9): 5849-5863.
- [44] Zhu, B. O., Zhao, J., Feng, Y. 2013. Active impedance metasurface with full 360 reflection phase tuning. **Scientific reports**, **3**(1): 1-6.
- [45] Kaina, N., Dupré, M., Lerosey, G., Fink, M. 2014. Shaping complex microwave fields in reverberating media with binary tunable metasurfaces. **Scientific reports**, **4**(1): 1-8.
- [46] Tang, W., Chen, M. Z., Chen, X., Dai, J. Y., Han, Y., Di Renzo, M., Cui, T. J. 2020. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: Path loss modeling and experimental measurement. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, **20**(1): 421-439.
- [47] Zhang, S., Chen, X., Pedersen, G. F. 2019. Mutual coupling suppression with decoupling ground for massive MIMO antenna arrays. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, **68**(8): 7273-7282.
- [48] L. Subrt and P. Pechac, "Controlling propagation environments using intelligent walls," in Proc. 2012 6th Eur. Conf. Antennas Propag. (EUCAP), Prague, Czech Republic, Mar. 2012, pp. 1–5.
- [49] L. Subrt and P. Pechac, "Intelligent walls as autonomous parts of smart indoor environments," IET Commun., vol. 6, no. 8, pp. 1004–1010, May 2012.
- [50] G.H.Elzwawi,H.H.Elzwawi,M.M.Tahseen,andT.A.Denidni,"Frequency selective surface-based switched-beamforming antenna," IEEE Access, vol. 6, pp. 48042–48050, 2018.

- [51] N. Kaina, M. Dupré, G. Lerosey, and M. Fink, “Shaping complex microwave fields in reverberating media with binary tunable metasurfaces,” *Sci. Rep.*, vol. 4, no. 1, Oct. 2014, Art. no. 6693.
- [52] X.Xiong,J.Chan,E.Yu,N.Kumari,A.A.Sani,C.Zheng,andX.Zhou, “Customizing indoor wireless coverage via 3D-fabricated reflectors,” in *Proc. 4th ACM Int. Conf. Syst. for Energy-Efficient Built Environ.*, Delft, The Netherlands, 2017, Art. no. 8.
- [53] T.J.Cui,M.Q.Qi,X.Wan,J.Zhao,andQ.Cheng,“Codingmetamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials,” *Light, Sci. Appl.*, vol. 3, p. e218, Oct. 2014.
- [54] L. Zhang, X. Q. Chen, S. Liu, Q. Zhang, J. Zhao, J. Y. Dai, G. D. Bai, X. Wan, Q. Cheng, G. Castaldi, V. Galdi, and T. J. Cui, “Space-timecoding digital metasurfaces,” *Nature Commun.*, vol. 9, no. 1, Oct. 2018, Art. no. 4334.
- [55] H. Yang, X. Cao, F. Yang, J. Gao, S. Xu, M. Li, X. Chen, Y. Zhao, Y. Zheng, and S. Li, “A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control,” *Sci. Rep.*, vol. 6, Oct. 2016, Art. no. 35692.
- [56] S. V. Hum and J. Perruisseau-Carrier, “Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 183–198, Jan. 2014.
- [57] X. Tan, Z. Sun, J. M. Jornet, and D. Pados, “Increasing indoor spectrum sharing capacity using smart reflect-array,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016, pp. 1–6.
- [58] X. Tan, Z. Sun, D. Koutsonikolas, and J. M. Jornet, “Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays,” in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun. (INFOCOM)*, Honolulu, HI, USA, Apr. 2018, pp. 270–278.
- [59] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, “The potential of using large antenna arrays on intelligent surfaces,” in *Proc. IEEE 85th Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, Sydney, NSW, Australia, Jun. 2017, pp. 1–6.
- [60] S.Hu,F.Rusek,andO.Edfors,“BeyondmassiveMIMO:Thepotentialof positioningwithlargeintelligentsurfaces,”*IEEETrans.SignalProcess.*, vol. 66, no. 7, pp. 1761–1774, Apr. 2018.

- [61] (2018). World's First 5G NR Radio. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/networks/offerings/5g/5g-nr-radio>
- [62] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, "Realizing wireless communication through softwaredefined hypersurface environments," in Proc. IEEE 19th Int. Symp. 'WorldWireless, MobileMultimediaNetw.' (WoWMoM), Chania, Greece, Jun. 2018, pp. 14–15.
- [63] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, "A new wireless communication paradigm through softwarecontrolled metasurfaces," IEEE Commun. Mag., vol. 56, no. 9, pp. 162–169, Sep. 2018.
- [64] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, "A novel communication paradigm for high capacity and security via programmable indoor wireless environments in next generation wireless systems," Ad Hoc Netw., vol. 87, pp. 1–16, May 2019.
- [65] C. Liaskos, A. Tsioliaridou, S. Nie, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, "Modeling, simulating and configuring programmable wireless environments for multi-user multi-objective networking," Dec. 2018, arXiv:1812.11429. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1812.11429>
- [66] Smith, D. R., Yurduseven, O., Mancera, L. P., Bowen, P., Kundtz, N. B. 2017. Analysis of a waveguide-fed metasurface antenna. **Physical Review Applied**, 8(5): 054048.
- [67] Zhu, B. O., Chen, K., Jia, N., Sun, L., Zhao, J., Jiang, T., Feng, Y. 2014. Dynamic control of electromagnetic wave propagation with the equivalent principle inspired tunable metasurface. **Scientific reports**, 4(1): 1-7.
- [68] Dai, J. Y., Zhao, J., Cheng, Q., Cui, T. J. 2018. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface. **Light: Science & Applications**, 7(1): 1-10.
- [69] Rengarajan, S. R., Rahmat-Samii, Y. 2000. The field equivalence principle: Illustration of the establishment of the non-intuitive null fields. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, 42(4): 122-128.

- [70] Asadchy, V. S., Albooyeh, M., Tsvetkova, S. N., Díaz-Rubio, A., Ra'di, Y., Tretyakov, S. A. 2016. Perfect control of reflection and refraction using spatially dispersive metasurfaces. **Physical Review B**, **94**(7): 075142.
- [71] Fong, B. H., Colburn, J. S., Ottusch, J. J., Visher, J. L., Sievenpiper, D. F. 2010. Scalar and tensor holographic artificial impedance surfaces. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, **58**(10): 3212-3221.
- [72] Liu, Y., Liu, X., Mu, X., Hou, T., Xu, J., Di Renzo, M., Al-Dhahir, N. 2021. Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities. **IEEE communications surveys & tutorials**, **23**(3): 1546-1577.
- [73] Estakhri, N. M., Alu, A. 2016. Wave-front transformation with gradient metasurfaces. **Physical Review X**, **6**(4): 041008.
- [74] Di Renzo, M., Zappone, A., Debbah, M., Alouini, M. S., Yuen, C., De Rosny, J., Tretyakov, S. 2020. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead. **IEEE journal on selected areas in communications**, **38**(11): 2450-2525.
- [75] Zhu, B. O., Zhao, J., Feng, Y. 2013. Active impedance metasurface with full 360 reflection phase tuning. **Scientific reports**, **3**(1): 1-6.
- [76] Emani, N. K., Kildishev, A. V., Shalaev, V. M., Boltasseva, A. 2015. Graphene: a dynamic platform for electrical control of plasmonic resonance. **Nanophotonics**, **4**(2): 214-223.
- [77] Gradoni, G., Di Renzo, M. 2021. End-to-end mutual coupling aware communication model for reconfigurable intelligent surfaces: An electromagnetic-compliant approach based on mutual impedances. **IEEE Wireless Communications Letters**, **10**(5): 938-942.
- [78] Arun, V., Balakrishnan, H. 2020. {RFocus}: Beamforming Using Thousands of Passive Antennas. In *17th USENIX symposium on networked systems design and implementation (NSDI 20)* (pp. 1047-1061).
- [79] Welkie, A., Shangguan, L., Gummeson, J., Hu, W., Jamieson, K. 2017. Programmable radio environments for smart spaces. In *Proceedings of the 16th ACM Workshop on Hot Topics in Networks* (pp. 36-42).

- [80] Dunna, M., Zhang, C., Sievenpiper, D., Bharadia, D. 2020. ScatterMIMO: Enabling virtual MIMO with smart surfaces. In *Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking* (pp. 1-14).
- [81] Bell, R. J., Armstrong, K. R., Nichols, C. S., Bradley, R. W. 1969. Generalized laws of refraction and reflection. **JOSA**, **59**(2): 187-189.
- [82] Huang, J., Encinar, J. A. 2008. *Reflectarray antennas*. John Wiley & Sons, 232 pp.
- [83] Basar, E., Di Renzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M. S., Zhang, R. 2019. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. **IEEE access**, **7**, 116753-116773.
- [84] Salahat, E., Hakam, A. 2014. Novel unified expressions for error rates and ergodic channel capacity analysis over generalized fading subject to AWGN. In *2014 IEEE Global Communications Conference* (pp. 3976-3982). IEEE.
- [85] Soury, H., Yilmaz, F., Alouini, M. S. 2012. Average bit error probability of binary coherent signaling over generalized fading channels subject to additive generalized Gaussian noise. **IEEE Communications Letters**, **16**(6): 785-788.
- [86] Mohjazi, L., Muhaidat, S., Abbasi, Q. H., Imran, M. A., Dobre, O. A., Di Renzo, M. 2021. Battery recharging time models for reconfigurable intelligent surfaces-assisted wireless power transfer systems. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, **6**(2): 1173-1185.
- [87] Basar, E., Di Renzo, M., De Rosny, J., Debbah, M., Alouini, M. S., Zhang, R. 2019. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces. **IEEE access**, **7**: 116753-116773.
- [88] Yang, L., Meng, F., Wu, Q., Da Costa, D. B., Alouini, M. S. 2020. Accurate closed-form approximations to channel distributions of RIS-aided wireless systems. **IEEE Wireless Communications Letters**, **9**(11): 1985-1989.
- [89] Khatalin, S. 2009. Performance of dual-branch selection combining diversity systems in non-identical Nakagami-q (Hoyt) fading channels. **IET communications**, **4**(5): 585-595.
- [90] Bilim, M. 2021. Dual-branch SC wireless systems with HQAM for beyond 5G over η - μ fading channels. **Peer-to-Peer Networking and Applications**, **14**(1): 305-318.

- [91] Bilim, M. 2020. Uplink communications with AWGGN over non-homogeneous fading channels. **Physical Communication**, **39**: 101047.
- [92] Salahat, E., Hakam, A. 2014. Novel unified expressions for error rates and ergodic channel capacity analysis over generalized fading subject to AWGGN. In *2014 IEEE Global Communications Conference* (pp. 3976-3982). IEEE.
- [93] Gradshteyn, I.S., Ryzhik, I. M., 2007. Tables of Integrals, Series and Products, 7th ed., San Diego, CA:Academic, 1220 pp.
- [94] Whittaker, E. T., Watson, G. N. 1990. Parabolic Cylinder Function in a Course in Modern Analysis. England: Cambridge University Press, 347 pp.
- [95] Digital Library of Mathematical Functions, Accessed Jan 21, 2022 [Online]. Available: <https://dlmf.nist.gov/12.7>.
- [96] Salahat, E., Hakam, A. 2014. Novel unified expressions for error rates and ergodic channel capacity analysis over generalized fading subject to AWGGN. In *2014 IEEE Global Communications Conference* (pp. 3976-3982). IEEE.
- [97] Özen, C., Bilim, M. Kaskat bir sistemin FTR sönümlemeli kanallarda HQAM performans analizi. **Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, **11**(2): 258-263.
- [98] Bilim, M. 2020. Uplink communications with AWGGN over non-homogeneous fading channels. **Physical Communication**, **39**: 101047.
- [99] Gradshteyn, I. S., Ryzhik, I. M. 2014. Table of integrals, series, and products. Academic press, 1161 pp.