

**ÇOKLU YENİDEN AYARLABİLİR ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI
SİSTEMLERDE DİZAYN VE PERFORMANS ANALİZİ**

EKİM KURTULMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2015

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Murat ALANYALI
Anabilim Dalı Başkanı

EKİM KURTULMAZ tarafından hazırlanan ÇOKLU YENİDEN AYARLA-
BİLİR ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI SİSTEMLERDE DİZAYN VE PERFOR-
MANS ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu
onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. İsrail BAHÇECİ
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Bülent TAVLI

Üye : Yrd. Doç. Dr. İsrail BAHÇECİ

Üye : Prof.Dr Tolga Mete DUMAN

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ekim KURTULMAZ

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İsrail BAHÇECİ
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Aralık 2015

Ekim KURTULMAZ

ÇOKLU YENİDEN AYARLABİLİR ÇOK GİRİŞLİ ÇOK ÇIKIŞLI SİSTEMLERDE DİZAYN VE PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Yeniden yapılandırılabilir çoklu anten sistemleri (MR-MIMO), ışına örüntüsü, frekans bandı ve polarizasyon özelliklerini değiştirebilen akıllı anten elemanları ile oluşturulan MIMO anten sistemleridir. Böyle bir MR-MIMO anten sisteminde, hem element örüntüsü, $F(\phi, \theta)$, hem de dizin örüntüsü, $A(\phi, \theta)$, değiştirilerek etkin anten örüntüsü, $F(\phi, \theta) \times A(\phi, \theta)$, istenilen bir şekilde elde edilebilecektir. Bu çalışmada, sonlu sayıda element örüntüsü, $F_l(\phi, \theta), l = 0, \dots, L - 1$, oluşturabilen bir piksel anten teknolojisi ile elde edilen MR-MIMO üzerinde çalışılmıştır ve bu MR-MIMO için gerekli anten örüntü seçimi ve önkodlama işlevi için çeşitli verici/alıcı tasarımları yapılmıştır. MR-MIMO anten sistemi ile, MIMO kanal özellikleri, her bir anten örüntü modu için farklı bir gerçekleştirme ile neticelenebildiğinden, MR-MIMO tasarımlarını etkin kılabilen kanal kestirim metodu tasarımı, ve kanal kestirim yükünün bu sistemin performansına etkisi incelenmiştir. Anten mod seçimini ve önkodlama matris tasarımını birlikte başarabilen metotlar da önerilmiştir. Simülasyonlarla, MR-MIMO antenlerin, geleneksel MIMO antenlere göre daha yüksek SNR performansı sağladığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz, ÇGÇÇ, ÇYA-ÇGÇÇ, Kanal Kestirimi, Önkodlama.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Electrical and Electronics Engineering
Supervisor : Ass. Prof. İbrahim BAHÇECİ
Degree Awarded and Date : M.Sc. – DECEMBER 2015

Ekim KURTULMAZ

**MULTI RECONFIGURABLE MULTIPLE INPUT MULTIPLE
OUTPUT(MIMO):DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS**

ABSTRACT

Reconfigurable multiple antenna systems (MR-MIMO) are MIMO systems that consist of smart antenna elements whose radiation pattern, frequency band and polarization properties can be changed. With an MR-MIMO antenna system, both element factor, $F(\phi, \theta)$, and array factor, $A(\phi, \theta)$ of the antenna can be modified to achieve a desired antenna radiation pattern $F(\phi, \theta) \times A(\phi, \theta)$. In this paper, we investigate a pixel-antenna based MR-MIMO system that can create a finite number of different antenna radiation patterns, and design transmit and receive algorithms that can perform precoding and antenna mode selection at the same time. Since each mode of an MR-MIMO antenna may result in a different matrix channel realization, we also study channel estimation methods and look into to the impact of channel estimation overhead on the performance gains of MR-MIMO system. Methods that can jointly design antenna mode selection and precoder matrix is also introduced and their performance is analyzed via simulations. Results indicate that significant SNR gains can be achieved with MR-MIMO antennas compared to the traditional MIMO antennas.

Keywords: Wireless, MIMO, MR-MIMO, Precoding, Channel Estimation .

TEŞEKKÜR

Bu alıőmada emeği geçen; baőta tez danıőmanım Ass. Prof. İőrafil Bahçeci'ye, hayatım boyunca bana desteklerini esirgemeyen çok değerli aileme, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım tım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, laboratuvarlarda geçen güzel günlere katkıda bulunan tım öğrenci ve çalıőma arkadaşlarıma ve son olarak TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

1 GİRİŞ	1
1.1 Çok Fonksiyonlu Yeniden Ayarlanabilir Antenler	1
1.1.1 Çok Fonksiyonlu Yeniden Ayarlanabilir Anten ve Geleneksel Anten Karşılaştırması	2
1.1.2 Çok Fonksiyonlu Yeniden Ayarlanabilir Anten ve Fazlı Dizi Karşılaştırması	3
1.2 Çok Girişli Çok Çıkışlı Antenler	3
1.2.1 Çeşitleme ve Çoğullama	4
1.2.2 Uzaysal Kipleme	5
1.3 ÇGÇÇ Sistemler	6
1.3.1 ÇGÇÇ Kanal Kapasitesi	7
1.3.2 ÇYA-ÇGÇÇ	8
2 Yeniden Yapılandırılabilir Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistemlerde Tasarım ve Performans Analizi	10
2.1 Sistem Modeli	11
2.2 MR-MIMO İletim Tasarımı	13
2.2.1 İdeal Anten Mod Seçimi	13
2.2.2 Kestirim Tabanlı Anten Mod Seçimi	13
2.2.3 Akıllı Mod Seçimi	15

2.2.4	Hızlı Mod Seçimi	16
2.3	Simülasyonlar	17
2.4	Sonuçlar ve İleri Çalışmalar	17
3	YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN SİSTEMLERİNİN IEEE 802.11ac AĞINDA PERFORMANSI	23
3.1	Sinyal ve Kanal Modeli	23
3.2	ÇYA-ÇGÇÇ Test Düzenegi	24
3.2.1	Yazılım	25
3.2.2	Donanım	25
3.2.3	ÇYA Antenler	25
3.3	Saha Testi Örnekleri	26
3.3.1	Sonuçlar	29
4	SONUÇ	31
	ÖZGEÇMİŞ	35

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

1.1	ÇYA antenlerde element ve ışınma faktörleri	1
1.2	ÇYA antenlerde element ve ışınma faktörleri	6
2.1	NU göçebe hareket model örneği ve Markov state model gösterimi. $L = 5$	12
2.2	MIMO ve MR-MIMO ile elde edilen SNR dağılımı. $\hat{\mathbf{H}}$ ve $\hat{\mathbf{P}}$ geri besleme bildirimi. Method 1: Akıllı mod seçimi, Method 2: Hızlı mod seçimi, $ \mathcal{K}_\alpha = 45$	18
2.3	girişimcinin olduğu bir ortamdaki SNR dağılımı. Method 1: Akıllı mod seçimi. Method 2: Hızlı mod seçimi, $\alpha = 1$	19
2.4	Baz istasyonu tarafından alınan sinyal güçlerinin karşılaştırılması, $\alpha = 1$	20
2.5	10m,60m arasında 20 girişimcinin olduğu bir ortamdaki SNR dağılımı. Method 1: Akıllı mod seçimi, Method 2: Hızlı mod seçimi, $\alpha = 0$	21
2.6	Baz istasyonu tarafından alınan sinyal güçlerinin karşılaştırılması, $\alpha = 0$	22
3.1	Anlık RSSI için birikim dağılım fonksiyonu.	27
3.2	Doğru girdi için birikim dağılım fonksiyonu	28

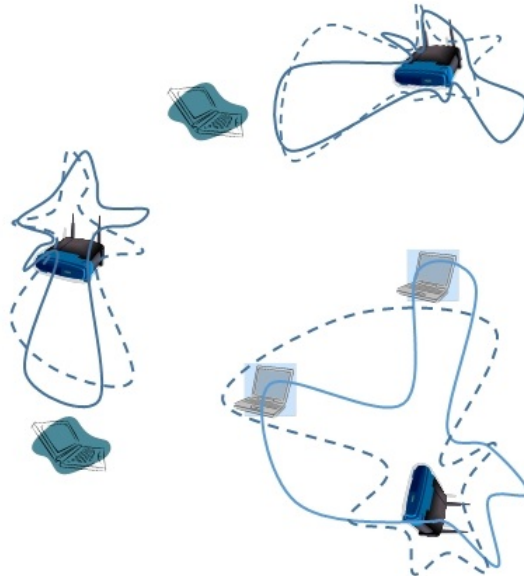
TABLULARIN LİSTESİ

3.1	$H_{m,n}(k)$ kanal modeli için kullanılan parametreler.	24
3.2	Test için kullanılan IEEE 802.11ac parametreleri	29

1. GİRİŞ

1.1 Çok Fonksiyonlu Yeniden Ayarlanabilir Antenler

Taktiksel antenler, boyut ve maliyeti azaltmakla kalmayıp, aynı zamanda bütün frekans bandında ve hava, kara veya mobil, bütün çevre koşullarında maksimum verimlilik, dinamik karşılıklı bağlaşım toleransını sağlamaktadırlar. Bunlara ek olarak, anten elementleri yüksek örneklenmiş anten dizilerinden oluşup, geliştirilmiş yön bulma ve ışma örüntüsü kontrolü kabiliyetlerine sahip olmalıdır. Bu ihtiyaçlara yanıt olarak, çok fonksiyonlu yeniden ayarlanabilir anten(ÇYA) isimli yeni nesil anten teknolojisi önerilmiştir. ÇYA teknolojisi, tek bir antenin frekans, polarizasyon ve ışma örüntüsünü dinamik olarak modifiye etmesini sağlayıp, onu çok fonksiyonlu hale getirir. Bu antenin kullanılması, kablosuz iletişim sistemlerinin serbestlik derecesinin artması yönünden önemlidir.



Şekil 1.1: ÇYA antenlerde element ve ışma faktörleri

1.1.1 Çok Fonksiyonlu Yeniden Ayarlanabilir Anten ve Geleneksel Anten Karşılaştırması

Bilişsel telsiz antenleri, her ne kadar element bazında herhangi bir zeka belirtisi göstermeseler de, literatürde zeki anten sistemi olarak kategorize edilmişlerdir. Bu antenlerin zeki anten olarak adlandırılmalarının nedeni sinyal işleme algoritmaları kullanılarak optimizasyona müsait olmalarıdır. Bu antenlerdeki özellikler ilk dizaynla birlikte sabitlenmiş olup değiştirilmeleri mümkün değildir. Diğer taraftan, ÇYA'ların özellikleri sabit olmayıp dinamik olarak değiştirilebilmektedir. Şekil1'de ÇYA'ların yeniden yapılandırılabilme özelliği karşılaştırma yoluyla gösterilmiştir. ÇYA'nın geleneksel antene göre avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Tek bir ÇYA, özelliklerini dinamik olarak değiştirerek çok işlevli olarak kullanılabilir. Çok sayıda tek işlevli geleneksel antenin yerine kullanıldığında sistemin alanı önemli bir şekilde küçültür.
- Dinamik yeniden ayarlanabilir özellikleri fazladan serbestlik derecesi sağlayarak sistem kazancı artırır.
- Element olarak ÇYA sistemlerini kullanan yeni nesil bir anten dizisi(ÇYAD) geleneksel anten dizisine kıyasla çok yüksek bir performansa sahiptir.

ÇYA'nın özelliklerini dinamik olarak modifiye edebilmek için, anten hacmi üzerindeki akımın dağılımı değiştirilmelidir. Bu durumda her farklı akım dağılımı farklı bir moda tekabül etmektedir. Bu yüzden ÇYA sistemlerinin çoğu, anten alanı üzerindeki anahtarların açık veya kapalı hale gelmesiyle mod seçimini gerçekleştirmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise anten alanı üzerinde yer alan anahtar devresinin antenin dizayn kısıtları ile çakışmasıdır. Operasyonel teknikler ve akıllı malzeme kullanımıyla bu sorunu çözmek mümkündür. Akort edilebilir bakır içerikli cam kullanımı bu sorunu çözmekle kalmayıp, performansı da arttırmaktadır.

1.1.2 Çok Fonksiyonlu Yeniden Ayarlanabilir Anten ve Fazlı Dizi Karşılaştırması

Fazlı dizi anteni(FDA), ışını istenilen yöne yönlendirirken aynı zamanda sıfır noktalarını enterferans yapan sistemlerin yönüne yerleştirebilmesi özelliğiyle, yüksek transfer hızına ulaşabilmektedir. Spektral verimlilik olarak üst düzey olmasına rağmen, ışını yönlendirebilme kabiliyeti, çok sayıda tek fonksiyonlu anten kullanımı yüzünden beraberinde yüksek karmaşıklık ve maliyeti de getirmektedir. Bu yüzden FDA sadece askeri sistemlerde ve uzay sistemlerinde kullanılmaktadır. ÇYAD'nin element faktörünün değişken olması, bu noktada ona ilave bir bağımsızlık derecesi sunar [1]. Bu bağımsızlık derecesi daha küçük ve ucuz bir sistem tasarımına olanak verir. ÇYAD sistemlerde, her anten elementi, ışın demetini çok düzlemlile yönlendirme özelliğine sahiptir. Böylelikle, elementler ışın demetlerini anten faktörüne uyumlu olarak yönlendirebilirler.

1.2 Çok Girişli Çok Çıkışlı Antenler

Yüksek hızlı ve güvenilir kablosuz haberleşme sistemlerine olan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Diğer sistemlerden farklı olarak, kablosuz haberleşme sistemlerinde bu tür güvenilir bağlantıları sağlamak kolay değildir. Bunun en büyük nedeni ise sinyallerin alıcıya farklı patikalardan eklenerek gelmesi ve performansı önemli bir ölçüde düşürmesidir. Bu durum literatürde solma olarak bilinir. Buna ek olarak başka bir problem ise paylaşılan ortamdaki diğer sistemlerin yarattığı girişimdir.

Bu sorunların üstesinden gelmek için akla gelen ilk yöntem daha yüksek dereceden kipleme yöntemleri yardımıyla band genişliğinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktır. Fakat bu yöntemin en büyük dezavantajı güvenilir olmamasıdır. Yani aynı seviyede güç kullanan iki sistemden düşük kipleme yöntemi kullanan sistem, yüksek olana kıyasla daha üst düzey performans göstermektedir. [2]

1.2.1 Çeşitleme ve Çoğullama

Kablosuz sistemlerde, sinyaldeki bozulmaların ve sinyal seviyesindeki değişimlerin temel nedeni sönümlenmedir. Bu değişimler zaman, frekans veya uzay düzlemlerinde olabilir. Bu boyutların hepsinde birden aynı anda bozulma olması ihtimali, boyut sayısı arttıkça düşmektedir, yani yüksek bir olasılıkla sinyalin güvenilir bir şekilde alınabileceği en az bir boyut olacaktır. Kablosuz kanallardaki karakteristik boyutlar; zaman, frekans ve uzaydır. Kablosuz bir kanalda yayılmakta olan bir sinyal çok sayıda dağıtıcı tarafından etrafa saçılır, bunun sonucunda alıcıya farklı zaman dilimlerinde farklı yollardan ulaşır. Bu olaya zaman dağılması denir, ve kanalın gecikme aralığı olarak ölçülür (T_{max}). Tutarlı band genişliği ise $B=1/T_{max}$ ile hesaplanmakta olup, sinyalin ilintili kaldığı band genişliğini göstermektedir. Bunun sonucunda, düşük gecikmeli bir kanalda ilintili band genişliği yüksek olacaktır. Bunlara ek olarak, alıcı ve vericinin hareketliliği ve iletim ortamındaki değişikliklerde iletim kanalında zaman farklılıkları ortaya çıkarmaktadır. Bu zaman farklılıkları Doppler aralığı olan F_d ile gösterilir. İlinti zamanı olan T_c ise $1/F_d$ ile orantılıdır ve kanalın ilintili kaldığı süreyi göstermektedir. Zaman farklılıkları yavaş olan kanallar, daha uzun süre ilintili kalmaktadırlar. Her farklı hattın taşıdığı sinyal enerjisi ve varış açısı da farklı olacaktır. Sonuç olarak bu hatlar farklı uzay noktalarında farklı şekillerde ekleneceklerdir ve uzay çeşitlenmesini meydana getireceklerdir. Uzay çeşitlenmesi temel olarak sinyallerin geliş açısına bağlıdır. Eğer farklı hatlar dar bir açı ile geliyorsa, bu hatları ayırmak için daha büyük bir uzay aralığı gerekecektir. Çeşitleme yapmanın pek çok yolu vardır. Zaman, frekans ve uzay boyutlarındaki çeşitlemeler bu bölümde incelenecektir.

1.2.1.1 Zaman Çeşitlemesi

Zaman çeşitlemesinde, kablosuz kanalların zamana bağlı değişken yapısı kullanılır. Genellikle alıcı ve/veya verici hareketli olduğu zaman bu durum ortaya çıkar. Zaman çeşitlemesi, kanal kodlaması ve ayrıştırma ile elde edilir. Öncelikle bilgi sembolleri kodlanır. Sonrasında bu semboller zaman düzleminde farklı ilinti periyotlarına dağıtılarak, farklı sembollerin farklı sönümlenmeye maruz kalması

sağlanır. Bunu gerçekleştirmek için, düzgün tasarlanmış bir serpiştirici ile arka arkaya gelen iki sembol arasına eşevresellik zamanından fazla bir gecikme konulur.

1.2.1.2 Frekans Çeşitlemesi

Zaman çeşitlemesinde, sembol süresi olan T , kanalın gecikme aralığından küçükse, gönderilen sinyal birkaç sembol süresi boyunca iletilir. Aynı zamanda, alıcıya farklı yollardan iletilebilir. Bu durumda, kanalın frekans tepkisi gönderim band genişliğine göre değişecektir. Zaman çeşitleme tekniklerinde olduğu gibi, frekans çeşitleme tekniklerindeki amaç da kablosuz kanalların bu değişkenliklerini kullanarak bir kazanç elde etmektir. Frekans çeşitlemesinde, sinyalin kopyaları farklı frekans bandlarında gönderilir. Bu kanalların birbirinden bağımsız olmasını sağlamak için, aralarında bir miktar eşevrelilik band genişliği bırakılmalıdır.

1.2.1.3 Uzay Çeşitlemesi

İlintisiz olmalarını sağlamak için birbirinden yeterince mesafe ile ayrılmış ikiden fazla alıcı antenin olduğu sistemlerde uzay çeşitlemesi kullanılabilir. Sinyalin farklı kopyaları, farklı kanal sönümlenmelerine maruz kaldıktan sonra bu antenlere iletilir, bu sayede çeşitlilik sağlanır. Çeşitleme tekniklerinden sonra alıcı da elde edilen sinyaller, gönderilen sembolü tespit etmek için birleştirilmelidir. Bu konuda kullanılan en yaygın yöntemler; seçici birleştirme, maksimum oranla birleştirme ve eşit kazançla birleştirmedir.

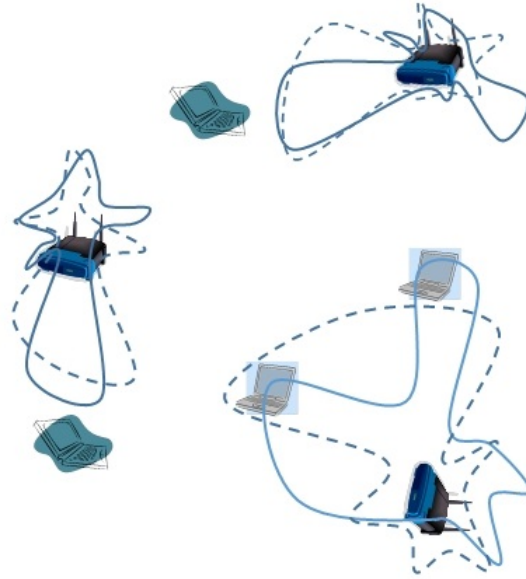
1.2.2 Uzaysal Kipleme

Uzaysal Kipleme (UK), birden çok anteni kullanan bir iletim tekniğidir. Temel olarak, bir bilgi bloğunu iki adet sembolle ifade etmeye dayanır: takımuyduyu gösteren bir sembol ve anten kümesinden birini ifade eden bir numarayı temsil eden bir sembol. İleten anteni temsil eden bir numara kullanmak, genel uzaysal verimliliği kullanan iletilen anten sayısının iki tabanına göre logaritmasıyla doğru orantılı olarak arttırır. Alıcı tarafında ise, birçok anten arasından hangisinin

iletim yaptığı saptanmalıdır. Bunun için genellikle Tekrarlayan Maksimum Oran Birleştirme yöntemi tercih edilir [3]. Temel UK modelinde, birçok antenden sadece bir tanesi verilen sembolü gönderilmek için kullanılır. Daha verimli bir yöntem, aynı anda birden çok sembol gönderilmesiyle mümkündür [4]. UK'nın geleneksel kipleme göre en büyük avantajı, geleneksel kiplemenin aynı verimlilikte çalışabilmek için daha büyük bir alfabe ihtiyacı duymasındır.

1.3 ÇGÇÇ Sistemler

Alıcı ve vericide anten dizileri kullanan Çok Girişli Çok Çıkışlı(ÇGÇÇ)sistemler, daha yüksek bir bant genişliğine veya iletim gücüne ihtiyaç duymadan büyük bir performans artış potansiyeline sahip olmalarıyla 1990'lı yılların sonundan itibaren ilgi görmeye başlamışlardır.



Şekil 1.2: ÇYA antenlerde element ve ışınma faktörleri

Tipik bir ÇGÇÇ iletişim bağlantısında, hem vericide hem de alıcıda birden fazla anten kullanılarak kanal ve ağ durumuna göre, veri hızı ve iletişim kalitesi artırılabilir. Örneğin MIMO anten elemanları arasındaki kanalın yeterince bağımsız olması durumunda çeşitleme ve uzaysal çoklama kazançları, ilintili olması durumunda ise ışın oluşturma kazançları sağlanabilmektedir. MIMO anten

sistemleri dinamik olarak değişen kanallara ve girişimlerle mücadele edebilecek bu özellikleri sayesinde pek çok pratik haberleşme teknolojilerinde ve standartlarında kullanımı sağlanmıştır. ÇGÇÇ sistemlerin Kablosuz Yerel Ağlara (KYA) ve hücre şebekelerinde kullanılması da giderek yaygınlaşmaktadır. ÇGÇÇ sistemler ve uzay-zaman işleminin kablosuz ağlara olan katkıları; hizmet kalitesi(veri hızı, hata oranı, gecikme), pil ömrü, kapsama alanı ve spektrum verimliliğindedir.

ÇGÇÇ sistemler, yüksek bir performans artışı sağlasa da, performansları anten dizisi karakteristiğine yüksek derecede bağlıdır. Işıma örüntüsü, ÇGÇÇ sistemleri için çok önemli bir faktördür. ÇGÇÇ sistemler, genellikle yönsüz veya çok yönlü antenlerden oluşur. Azimut açısında ışınım yapan yönsüz antenler, ÇGÇÇ sistemler için iyi sonuç vermektedir; çünkü bu tip antenler kanalın uzaysal özelliklerini kullanmak için bağımsızlık sağlarlar. Fakat kapalı mekanlarda olduğu gibi, bazı durumlarda kanalların çokyönlü elementleri sadece azimut düzleminde değil, bütün uzaysal düzlemlerinde olabilir. Bu uzay düzlemlerinin hepsini kullanmak, çeşitlilik kazancını arttıracaktır. Çokyönlü(isotropic) bir anten, bütün bu boyutları aynı anda kullanabileceği için, bu seneryoda ideal anten olacaktır, fakat böyle bir anten fiziksel olarak mümkün değildir.

1.3.1 ÇGÇÇ Kanal Kapasitesi

m adet verici, n adet alıcı antenin olduğu bir ÇGÇÇ sistemde, alınan sinyal,

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1.1)$$

şeklinde modellenebilir. Burada \mathbf{H} $m \times n$, kompleks bir matristir. Bir kanaldaki iletim performansını belirleyen önemli bir etken, Kanal Durumu Bilgisi'nin(KDB) bilinmesidir. Bunun için \mathbf{H} 'ın elemanlarının bilinmesi gerekir. Sabitlenmiş kablosuz bir kanalda, sönmülenme kazançlarının yavaş bir şekilde değişmesi beklenir. Bu sayede, kestirimleri alıcı tarafından başarılı bir isabetle yapılp, vericiye geri beslemeyle iletilebilir. Bazı durumlarda, KDB'nin kısmen bilindiğini

varsayınız. Kestirim yapmanın yollarından birisi, kanala periyodik olarak pilot sinyaller göndermektir [5].

Kanal kapasitesi, \mathbf{H} matrisinin nasıl modellendiğine göre farklı şekillerde hesaplanır. \mathbf{H} için farklı modeller şunlardır;

- \mathbf{H} rasgele değildir.
- \mathbf{H} bilinen bir olasılık dağılımında rasgeledir(ergodik kanal)
- \mathbf{H} rasgele fakat sabittir(ergodik olmayan kanal)

Eğer \mathbf{H} rasgele ise(2. ve 3. durumlardaki gibi), elemanlarının sıfır ortalamalı, birbirinden bağımsız reel ve sanal kısımlara sahip(0.5 varyanslı), kompleks Gauss değişkenleri olduğu kabul edilir. Aynı zamanda, \mathbf{H} 'ın elemanlarının her biri, düzgün faza ve Rayleigh büyüklüğüne sahiptir. Bu sayede Rayleigh sönümlenmesi, her bir alıcı-verici çifti için bağımsız bir şekilde modellenebilir. Ayrıca, aksi belirtilmemişse, alıcı tarafında KDB'nin kusursuz bir şekilde bilindiği, verici tarafında ise sadece \mathbf{H} 'ın olasılık dağılımının bilindiği kabul edilir.

m verici, n alıcı antene sahip, ergodik Rayleigh sönümlenmeli bir kanalla modellenmiş bir sistemde, KSB'nin alıcı tarafında kusursuzca bilinmesiyle, aynı kanalı kullanan tek bir antenden oluşan sisteme kıyasla $k = \min(m,n)$ kat bir kazanç vardır. Kapasite yaklaşık olarak her 3 dB SNR artışında k bit/s/Hz kadar artar. Bu sonuç, kusursuz KDB bilgisinden dolayı, çoklu anten sistemleri için bir limit olarak kullanılır. KDB'nin kısmen bilindiği ya da hiç bilinmediği durumlarda, bir kanal kestirimi yapılacaktır. Bu durumda kanal kapasitesi daha düşüktür.

1.3.2 ÇYA-ÇGÇÇ

Geleneksel MIMO sistemlerde kullanılan anten elementlerinin örüntüleri sabittir. Bu antenlerle elde edilebilen ışınma örüntüsü, sabit olan element faktörü $F(\phi, \theta)$ ile sayısal veya analog olarak değiştirilebilen dizin faktörünün $A(\phi, \theta)$ çarpımı ile ortaya çıkan örüntüdür: $AF(\phi, \theta) = F(\phi, \theta) \times A(\phi, \theta)$ [6]. Bu durumda,

MIMO iletişimde her ne kadar önkodlama kazancı sağlansa da verici-alıcı arasında geometrik konuma göre, element faktörden sağlanacak kazanç istenildiği ölçüde olamayabileceği gibi kayıplar da önemli olabilmektedir. Son yıllarda ortaya konan yeniden yapılandırılabilir antenler ile, örüntü element faktörleri de belli esneklikte yapılandırılabilirlik özelliği ile bu kayıplar ortadan kaldırılabilir.

Cetiner et. al. tarafından [7] önerilen parazitik piksel tabanlı yeniden yapılandırılabilir antenler, 2004'ten bu yana çeşitli araştırmalara konu olmuştur [8–10]. MR anten, frekans, örüntü ve polarizasyon gibi anten özelliklerinin dinamik olarak değiştirebilme yeteneğine sahip tek elemanlı bir anten olarak tasarlanmış olsa da, çok sayıda MR antenin bir arada kullanılması ile MR-MIMO anten sistemleri elde edilebilecektir. MR-MIMO antenleri akıllı sinyal işleme algoritmaları ile birlikte optimize edebilmek, geleneksel teknoloji ile elde edilmesi mümkün olmayan yeni kazanç boyutları ortaya koymaktadır [10–13].

2. Yeniden Yapılandırılabilir Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistemlerde Tasarım ve Performans Analizi

Yeni nesil kablosuz iletişim sistemlerinde, önemli performans kazancı sağlayan tekniklerin başında, çok girdili-çok çıktılı (MIMO) anten iletişim teknikleri gelmektedir [14]. Hem verici, hem de alıcıda çok sayıda anten elemanı kullanarak sisteme çeşitleme ve/veya çoklama kazancı sağlanarak veri güvenlik seviyesi ve iletim hızı iyileştirilebilmektedir [15]. Bu kazançların temelinde, çoklu anten kullanan verici-alıcı arasında ortaya çıkan MIMO matris kanalın özdeğer modlarını en uygun metotlara kullanmak bulunmaktadır. Önkodlama, ışın oluşturma ve uzaysal çoklama olarak bilinen bu metotlar, MIMO kanalda bulunan bağımsızlık derecelerini kullanılabilir hale getirebilmektedir [16]. Bütün bunları mümkün kılan temel faktörlerden biri, MIMO antenlerin ışın örüntü özellikleridir.

MR antenlerin performansı henüz tipik kablosuz iletişim sistemlerinde yeterince incelenmemiştir. Bu kısımda, MR-MIMO sistemin, bina-içi kablosuz iletişimde kullanılması durumu detaylı olarak incelenecektir. Tipik kullanım senaryolarında, MR-MIMO sisteminin etkin kullanımını sağlayacak anten mod seçimi ve önkodlama matris tasarım teknikleri önerilecek, ve sistemden beklenen ideal ve ideal olmayan durumlar için SNR ve doğru girdi kazanç analizleri yapılacaktır. Önerilen tekniklerin performansı, simülasyonlar yardımı ile tespit edilecektir. Elde ettiğimiz sonuçlar, tipik bir oda-içi kullanımında, 2-verici/2-alıcı MR-anten içeren bir MR-MIMO sistemden 6-8 dB'ye kadar SNR kazancı elde edilebildiğini göstermektedir.

Bu bölümün akışı kısaca şu şekildedir. Bir sonraki kısımda sistem modeli tanıtılacaktır. Bölüm 2.2'te MR-MIMO sistem için anten mod seçimi ve önkodlama tekniklerini önereceğiz. Performans sonuçları Bölüm 2.3'te gösterilecektir. Bölüm 2.4'te ise sonuçlar özetlenecek ve bu çalışmayla ilgili ileri çalışmalardan söz

edilecektir.

2.1 Sistem Modeli

M antene sahip sabit bir erişim noktası (AP) ile N antene sahip göçebe (nomadic) bir ünite (NU) arasındaki çok-girdili çok çıktılı (MIMO) iletişim problemini ele alalım. NU, Şekil 2.1'de gösterildiği üzere, L konumdan herhangi birinde bulunabilmekte ve bu konumdan diğer herhangi birine rastgele geçebilmektedir. NU'nin bu hareketliliğini bir Markov model ile modelleyebileceğimizi varsayalım (Bknz. Şekil 2.1).

AP'dan iletilen $\mathbf{x}_{M \times 1}$ sinyali için NU'da elde edilen $\mathbf{r}_{N \times 1}$ alıcı sinyalini

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (2.1)$$

olarak ifade edebiliriz ki burada $\mathbf{H}_{N \times M}$ ve $\mathbf{n}_{N \times 1}$, sırası ile sönümlü kanal kazanç matrisini ve eklenir beyaz Gauss gürültüsünü (AWGN) ifade etmektedir. NU'nun konumuna göre kanal matrisi \mathbf{H} , farklı istatistiksel özellikler gösterebilecektir. İleti sinyali \mathbf{x} , QAM sinyal uzay kümesi elemanlarından oluşan $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_M]^T$, $s_i \in \mathcal{S}$, vektörünün, \mathbf{P} önkodlama matrisini kullanan doğrusal önkodlama metodu ile elde edilmektedir:

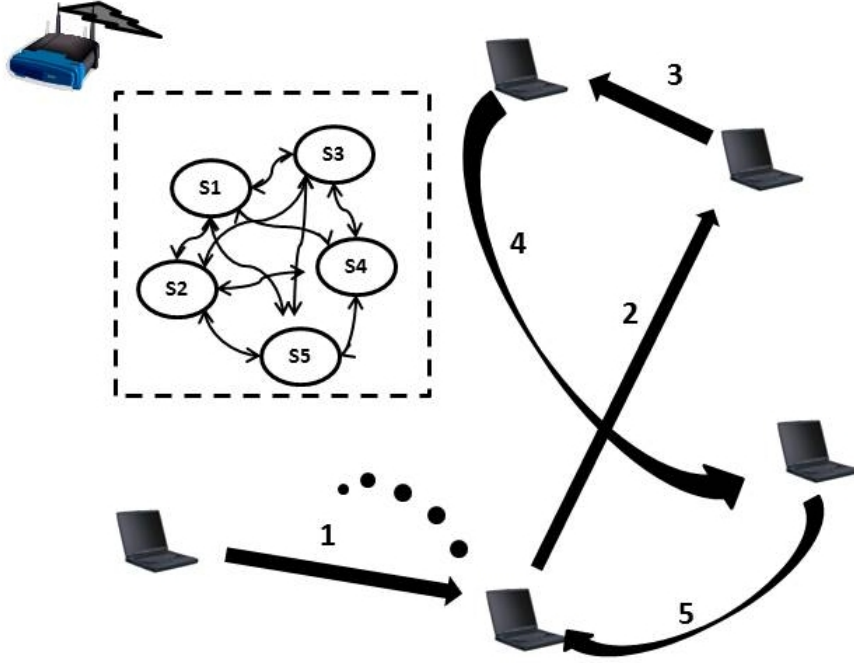
$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{s} \quad (2.2)$$

ki burada ileti sinyallerinin eşit ihtimallerle gönderilmekte, $E[\mathbf{s}\mathbf{s}^H] = I_{M \times M}$ ve toplam iletim güç kısıtı $\text{tr}\{\mathbf{P}\mathbf{P}^H\} \leq P_{\max}$ olarak var sayılmaktadır. Bu sinyal modeli için, ML-alıcı

$$\hat{\mathbf{s}} = \arg \min_{\mathbf{s} \in \mathcal{S}^M} \|\mathbf{r} - \mathbf{H}\mathbf{P}\mathbf{s}\|^2. \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. \mathbf{P} önkodlama matrisi, kanal durumuna göre (ve dolayısı ile NU konumuna göre) belirlenerek kanalın uygun özdeğer-modlarında iletme olanak sağlamaktadır. Böylelikle, NU göçebe konumlarına uygun \mathbf{P} matrisleri belirlenerek önkodlama/ışın oluşturma kazançları sağlanarak iletim performansı iyileştirilebilecektir. Ancak dikkat edilirse, böyle bir geleneksel MIMO sisteminde, antenin sadece dizin faktöründen faydalanılarak kazanç

sağlanabilmektedir. Element faktörü sabit olduğu için, pek çok NU konumunda, antenden sağlanabilecek kazancın bir kısmı tarama kaybına maruz kalmaktadır.



Şekil 2.1: NU göçebe hareket model örneği ve Markov state model gösterimi.
 $L = 5$

Biz bu çalışmada, son yıllarda ortaya konmuş olan MR parazitik antenlerin oluşturduğu bir MIMO anten sistemi üzerinde çalışacağız. Bu anten yapısında, parazitik katmanda bulunan piksellerin, aralarında bulunan PIN diyotların iletken ya da yalıtkan modlarda kullanılması ile, tek bir antenden farklı anten geometrileri, dolayısı ile de farklı element örüntüleri (kısaca anten modu olarak ifade edeceğiz) elde edilebilmektedir [7]. Uygun anten modları ile, tarama kayıpları en aza indirilebilecektir. Her bir anten modu, farklı bir $F(\phi, \theta)$ kazancına tekabül ettiği için, her bir mod için \mathbf{H} farklılık arz edebilecektir. Böylelikle, K farklı modu olan MR-MIMO için, verilen bir NU konumunda, K farklı \mathbf{H}_k , $k = 1, \dots, K$, kanal ortaya çıkabilecektir ve her bir durum için de uygun bir \mathbf{P}_k önkodlama matrisi tasarlanabilecektir. Denklem (2.3)'te gösterilen ML alıcı karmaşıklığı çok yüksek olduğundan, burada, doğrusal en küçük ortalama kare kestirici (MMSE) tabanlı alıcı kullanacağız. k . mod için, MMSE alıcı ve ortaya çıkan ortalama kare hata (MSE) vektörü için kovaryans matris, sırası ile aşağıdaki

gibi hesaplanabilir:

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{P}_k^H \mathbf{H}_k^H \left(\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \mathbf{P}_k^H \mathbf{H}_k^H + \mathbf{\Lambda}_n \right)^{-1} \quad (2.4)$$

$$\mathbf{C}_\epsilon = I_{M \times M} - \mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k. \quad (2.5)$$

MSE'nin düşük oluşu, MIMO alıcı performansını iyileştirecektir. Uygun anten modu ve önkodlama matrisi ile, MSE'si düşük bir MIMO sistem elde edilebilir.

2.2 MR-MIMO İletim Tasarımı

Bu kısımda yeniden yapılandırılabilir MIMO anten durumunda, anten mod seçimi tekniklerinin tasarım ve analizi yapılacaktır.

2.2.1 İdeal Anten Mod Seçimi

Bu durumda, her bir anten modu k için kanal matrisi \mathbf{H}_k 'in verici tarafında ideal olarak bilindiği varsayılmaktadır. Burada, sistem performansını eniyileyecek çeşitli metrikler (kapasite, hata oranı, MSE gibi) arasından, Denklem (2.5)'te gösterilen MSE'yi kullanacağız. Bu durumda, en iyi anten modu ve önkodlama matrisi kombinatorik bir tarama ile hesaplanabilir:

$$\mathbf{P}_k = \arg \max_{\mathbf{P}: \text{tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq P_{\max}} \text{tr}(\mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}) \quad (2.6)$$

$$k^* = \arg \max_{k \in \mathcal{K}} \text{tr}(\mathbf{R}_k \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k). \quad (2.7)$$

Geleneksel MIMO sisteminde, tek bir anten modu olacak (H_0), ve dolayısı ile tek bir P_0 (Denklem 2.6'te $k = 0$ kullanılarak elde edilebilir) önkodlama matrisi kullanılacaktır.

2.2.2 Kestirim Tabanlı Anten Mod Seçimi

Burada, verici anten mod seçimi, alıcıda kestirimlerle elde edilen ve geri besleme ile vericiye gönderilen bilgilere bağlı olarak yapılmaktadır. İki tip geri besleme

mesajımı ele alacağız: (i) kanal kestirimi ile elde edilen $\hat{\mathbf{H}}$ bildirimi, (ii) alıcıda, vericinin de bildiği bir algoritma ile elde edilen $\hat{\mathbf{P}}$ önkodlama matris bildirimi.

2.2.2.1 $\hat{\mathbf{H}}$ bildirimi

Verici, istediği anten modlarında kanal kestirimlerini, $\hat{\mathbf{H}}_k$, $k \in \mathcal{K}_\alpha$, $\mathcal{K}_\alpha \subseteq \mathcal{K}$, elde edip Denklem (2.6) ile $\hat{\mathbf{P}}_k$, $k \in \mathcal{K}_\alpha$ matrislerini, ve Denklem (2.7)'i kullanarak en uygun anten modunu $\hat{k}^* \in \mathcal{K}_\alpha$ belirler. Burada \mathcal{K}_α , alıcının konumunda göre, performans kazancı beklenen anten modlarının oluşturduğu alt kümeyi belirtmektedir: $\mathcal{K}_\alpha \subseteq \mathcal{K}$. Eşitlik durumu, bütün anten modları için kanal kestirimi yapılmasına tekabül etmektedir.

2.2.2.2 $\hat{\mathbf{P}}$ bildirimi

Verici, istediği anten modlarında kanal eğitimi yapar, ve alıcının her bir mod için tasarladığı $\hat{\mathbf{P}}_k$, $k \in \mathcal{K}_\alpha$ matrislerini geri bildirim mesajı ile elde eder. Ancak kanal bilgisi olmadığı için Denklem (2.7) veya benzeri mod seçim metriğini eniyilemek mümkün olmayacaktır. Bu durumda, $\hat{\mathbf{P}}_k$ için ortaya çıkan dizin faktörü, $A_{\hat{\mathbf{P}}_k}(\theta, \phi)$, ile k . anten modu için bilinen element faktörü $F_k(\theta, \phi)$ arasındaki benzerliği kullanabiliriz. Aslında böylelikle, alıcıdaki önkodlama algoritmasının belirlediği kanal özdeğerlerine (ki bu bilgi $\hat{\mathbf{P}}_k$ ile belirtilebilmekte) en uygun anten modunu bulabileceğimizi öngörmekteyiz. Bunun için 3 dB uyumlu (θ, ϕ) örüntü yüzeyini aşağıdaki gibi tanımlayalım:

$$\mathcal{C}_k = \{(\theta, \phi) : A_{\hat{\mathbf{P}}_k}(\theta, \phi) \geq 3 \text{ dB}, F_k(\theta, \phi) \geq 3\text{dB}\} \quad (2.8)$$

Buradan, en uygun anten mod seçimini

$$k^* = \arg \max_{k \in \mathcal{K}_\alpha} \text{Alan}(\mathcal{C}_k) \quad (2.9)$$

şeklinde yapabiliriz. Bu seçim, nümerik olarak, düzgün bir nicemleme yardımı ile de yapılabilecektir:

$$\mathcal{C}_k = \{(l, m) : A_{\hat{\mathbf{P}}_k}(\theta_l, \phi_m) \geq 3 \text{ dB}, F_k(\theta_l, \phi_m) \geq 3\text{dB}\} \quad (2.10)$$

$$\theta_l = l\Delta\theta, \phi_m = m\Delta\phi, |\theta_l| \leq \pi, |\phi_m| \leq \pi$$

$$k^* = \arg \max_{k \in \mathcal{K}_\alpha} |\mathcal{C}_k| \quad (2.11)$$

2.2.3 Akıllı Mod Seçimi

Dikkat edildiği üzere, MR-MIMO anten mod seçiminde, \mathcal{K} ile tanımlı her mod için kanal eğitimi gerekebilmektedir. Yukarıda, $\mathcal{K}_\alpha \subseteq \mathcal{K}$ ile bütün modlar yerine istenilen modlarda kanal eğitimi yapılabileceğini belirtmiştik. Bunu başarabilmek için, vericide, akıllı öğrenme teknikleri kullanılabilir. Bu çalışmada, dizin-element örüntü uyumluluk kriterini kullanan bir akıllı algoritma önereceğiz. Şöyle ki, hali hazırda en uygun anten modu seçilmiş olsun. Yeni bir anten modu seçimi talep edilme durumunda, aşağıdaki basamaklar yardımı ile daha düşük kanal eğitimi yükü ile yeni anten modu seçilebilir:

1. Halihazırdaki anten modu k_t^* ile kanal eğitimi yap
2. $\hat{P}_{k_t^*}$ önkodlama matrisini elde et
3. Denklem (2.8) (veya (2.10))'i kullanarak $|\mathcal{C}_k|$, $k \in \mathcal{K}$ değerlerini hesapla.
4. $|\mathcal{C}_k|$ değerlerinden en büyük K_α tanesini kullanarak \mathcal{K}_α eğitim kümesini elde et.
5. Geri besleme bildirim tipine göre Bölüm 2.2.2.1 veya 2.2.2.2'de önerildiği üzere anten mod seçimi (k_{t+1}^*) ve önkodlama matrisini hesapla.

Anten mod ve önkodlama matris seçimi periyodik olarak yapılabileceği gibi, sinyal-gürültü oranı, doğru girdi oranı (throughput), blok hata oranları gibi sistem performans parametrelerinin ortalamalarında değişiklikler ortaya çıkması ile de tetiklenebilir. Örneğin, SNR metriği durumunda, n . paketteki anlık SNR tahmini ρ_n kullanılarak, ortalama SNR $\bar{\rho}_n$,

$$\bar{\rho}_n = \sqrt{\beta\rho_n} + \sqrt{1-\beta}\bar{\rho}_{n-1} \quad (2.12)$$

şeklinde üstel pencere süzgeci kullanılarak elde edilebilir, ve $|\bar{\rho}_n - \bar{\rho}_{n-D}| \geq \Delta_{\text{th}}$ olması durumunda anten mod/önkodlama matris hesaplamaları için kanal eğitimi tetiklenebilir. Burada D karar için beklenen paket sayısını, Δ_{th} tetikleme için SNR'daki değişim eşik değerini ve β ise unutma faktörünü belirtmektedir ve NU'nun hareketlilik modeline göre belirlenebilir.

2.2.4 Hızlı Mod Seçimi

Anten mod seçiminin hızlı yapılması gerektiği durumlarda, kanal eğitim yükünü azaltmak için, akıllı mod seçim metoduna ek olarak anten modları için oluşturulabilecek kod-kitabı tabanlı seçim teknikleri uygulanabilir. Kod kitabı, sistemin yeterli bir zaman aralığında, yapılan kanal eğitimleri esnasında ortaya çıkan sonuçları kullanarak bir sözlük oluşturması ile ortaya çıkarılabilir. Hatırlayınız ki, bir önkodlama matrisi \mathbf{P} 'nin sütünlarının oluşturduğu M -boyutlu karmaşık uzay, $\mathcal{C}(\mathbf{P})$, MIMO kanalın en uygun özdeğer modlarını kullanılmasını sağlamaktadır. Bu sebeple, birbirine *yakın* sütün uzayına sahip önkodlama matrisleri, benzer kanal modlarına tekabül edecektir ve fiziksel örüntünün bu moda uyumlu olarak seçilmesi ile MR-MIMO kazancı elde edilebilecektir. Burada, \mathbf{P} ve \mathbf{P}_i gibi iki alt-uzay arasındaki mesafe için kordal mesafe (chordal distance) metriğini kullanacağız [17]:

$$\delta(\mathbf{P}, \mathbf{P}_i) = \sqrt{M(1 - \|\mathbf{P}^H \mathbf{P}_i\|^2)} \quad (2.13)$$

Bu durumda, kod kitabı oluşturulurken, eklenen her bir önkodlama matrisinin, önceki matrislerle olan mesafesinin belli bir eşik değerden yüksek olması şartı sağlanmalıdır ki, yeni eklenen önkodlama matrisi, yeterince farklı bir kanal özdeğer modunu temsil edebilsin. Yani, n . önkodlama matrisi, $\mathcal{B} = \{\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_{n-1}\}$ kod-kitabına eklenirken

$$\delta(\mathbf{P}_n, \mathbf{P}_k) \geq \delta_{\text{th}}, k = 1, \dots, n-1 \quad (2.14)$$

şartını sağlamalıdır. Kod kitabı oluşturulurken aynı zamanda, kitaba eklenen önkodlama matrisi \mathbf{P}_k için seçilen anten modu, μ_k da not edilir. Elde bulunan \mathcal{B} kitabı için, anten mod seçimi ise, geri bildirim sonucunda elde edilen bir $\hat{\mathbf{P}}$ matrisi ($\hat{\mathbf{H}}$ bildirim için Denklem (2.6) ile veya $\hat{\mathbf{P}}$ bildirim için alıcının gönderdiği önkodlama matrisi) için aşağıdaki gibi yapılabilir:

$$k^* = \arg \min_{k=1, \dots, |\mathcal{B}|} \delta(\hat{\mathbf{P}}, \mathbf{P}_k) \quad (2.15)$$

ve anten modu olarak, μ_{k^*} kullanılır.

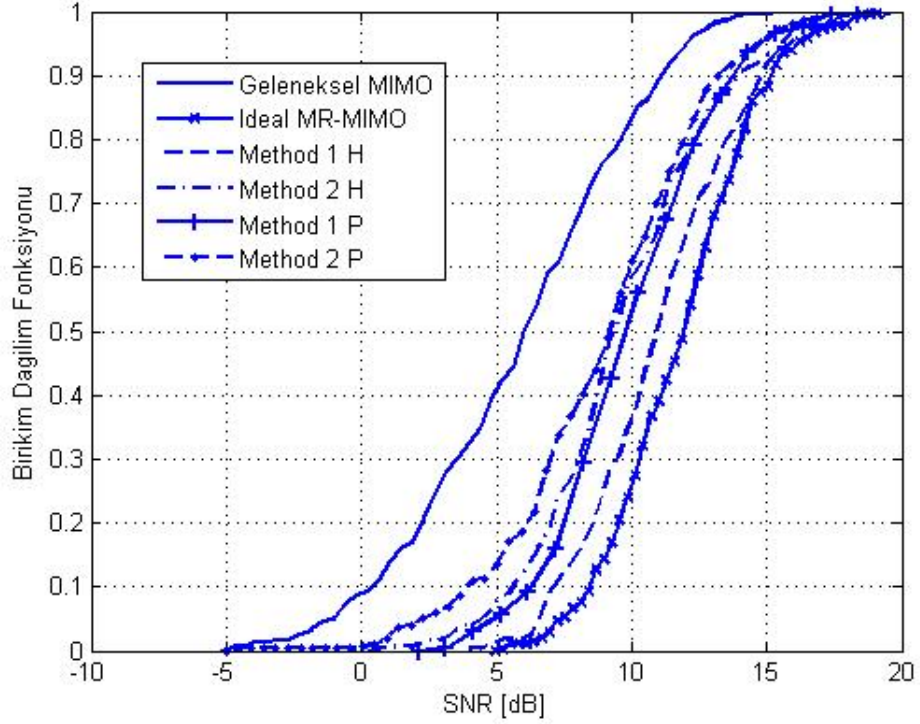
2.3 Simülasyonlar

Yukarıda önerilen MR-MIMO tekniklerini performans analizini IEEE 802.11n/ac standardı için tanımlanan 2a ve 2b senaryolarında bahsedilen bir ev ortamı için yapacağız [18]. Burada, tek bir AP, odanın köşesinde bulunmakta, ve tek bir kullanıcı AP'le bağlantıya geçmektedir. Bu çalışmada, çoğu zaman sabit bir konumda bulunan NU'nun, belli aralıklara, rastgele olarak $L = 4$ konumdan birine geçmekte olduğu varsayılmaktadır. AP'de, 6 farklı anten modunu destekleyen bir MR-MIMO anten varsayılmakta. NU, her bir konumda, ortalama 10 dakika kalmakta ve sonra bir başka konuma geçmektedir; yani NU'nun her konumda ortalama olarak aynı süre kaldığını varsaymaktayız. Kanal matrisi üretmek için [19] uzaysal kanal modelinde, [20]'te belirtilen MU-MIMO kanal üretme tekniği kullanılmıştır. Burada, her bir konum için eş zamanlı olarak kullanıcı varmış gibi düşünülerek, MR-MIMO kanalları üretilmiş, ancak bu kanallar, NU sadece o konumda iken kullanılmıştır.

Şekil 2.2'de, NU için elde edilen SNR değerlerinin birikim dağılım fonksiyonu gösterilmektedir. Grafikte, geleneksel MIMO performansı (sabit anten örneğine sahip 2x2 MIMO), ideal MR-MIMO performansı ve önerilen akıllı MR-MIMO algoritmalarının ortalama SNR performansları analiz edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere, ideal bir durumda, MR-MIMO anten, geleneksel MIMO antenlere göre önemli derecede performans kazancı sağlamaktadır. Kanal ve önkodlama kestirimlerine dayalı tekniklerde, ideal duruma göre bir miktar SNR kaybı gözlenmektedir. Bu kayıp, sadece $\hat{\mathbf{P}}$ geri bildirim yapıldığında, $\hat{\mathbf{H}}$ geri bildirim yapılmasına göre daha yüksek olmaktadır. Bunun sebebi, $\hat{\mathbf{P}}$ geri bildiriminde, kanal bilgisi AP'de olmadığından, MR-MIMO mod seçimi, en uygun modu bulmak yerine, ışına örüntüsü benzer olan en yakın diğer modlardan birini bulmaktadır.

2.4 Sonuçlar ve İleri Çalışmalar

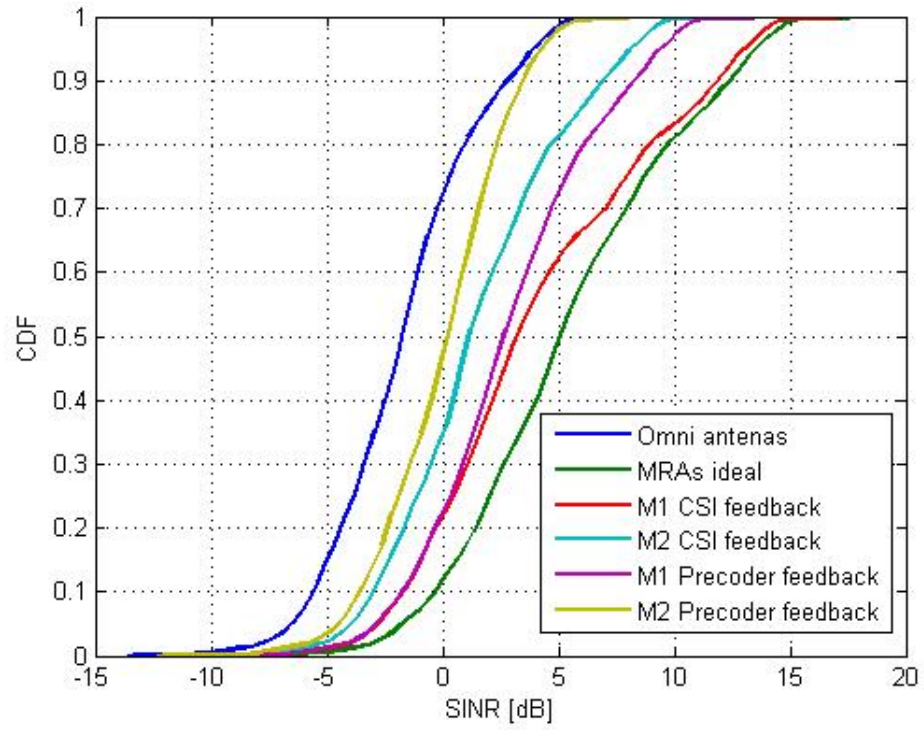
Yeniden yapılandırılabilir MIMO antene sahip olan bir AP ve standart bir MIMO antene sahip bir kullanıcıdan oluşan bir MR-MIMO sistemin link performans



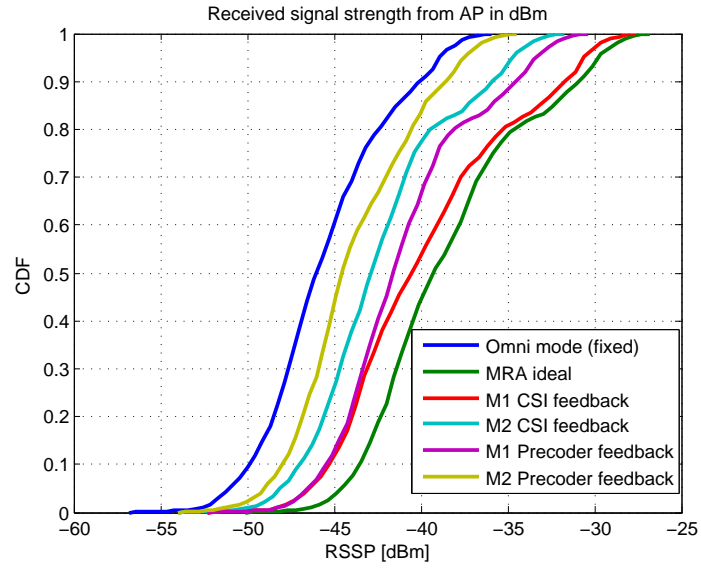
Şekil 2.2: MIMO ve MR-MIMO ile elde edilen SNR dağılımı. $\hat{\mathbf{H}}$ ve $\hat{\mathbf{P}}$ geri besleme bildirimini. Method 1: Akıllı mod seçimi, Method 2: Hızlı mod seçimi, $|\mathcal{K}_\alpha| = 45$.

analizi incelenmiştir. Bu sistemde, AP'deki MR-MIMO anten, akıllı bir anten mod seçimi tekniği ve önkodlama matris tasarımı yardımı ile, etkin bir şekilde kullanılabilmekte ve linkteki SNR seviyesini iyileştirmektedir. Element örüntüsünün istenilen modlarla uygun olarak yapılandırılabilmesi ile, önemli kazançların başarımlı gözlenmiştir. IEEE 802.11ac kullanım modelleri varsayılarak yapılan simülasyonlarda önemli seviyede SNR kazançları gözlenmiştir.

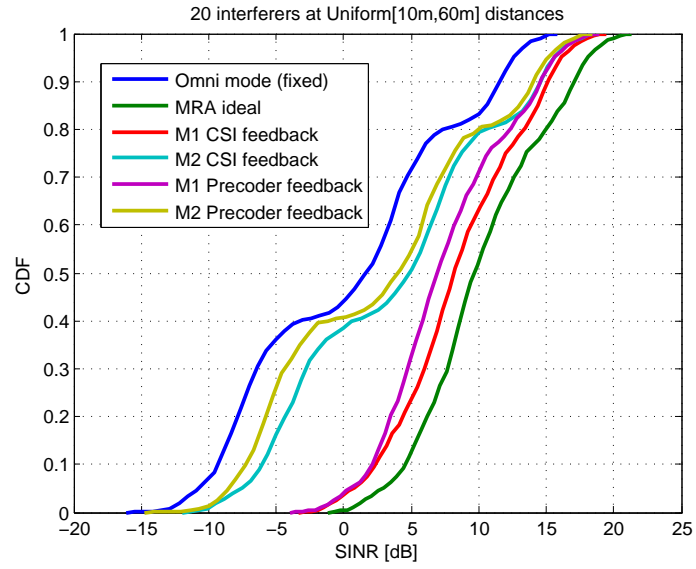
Bu çalışmada tek bir link ve uzun dönem SNR analizi yapılmıştır. Bu çalışmalar, MR-MIMO sistemden beklenen önemli kazançların mümkün olduğunu göstermektedir. İleri çalışmalarda, hem sistem seviyesine yönelik, hem de daha detaylı link performans analizleri ile MR-MIMO sistem performansı daha geniş bir perspektiften ele alınacaktır.



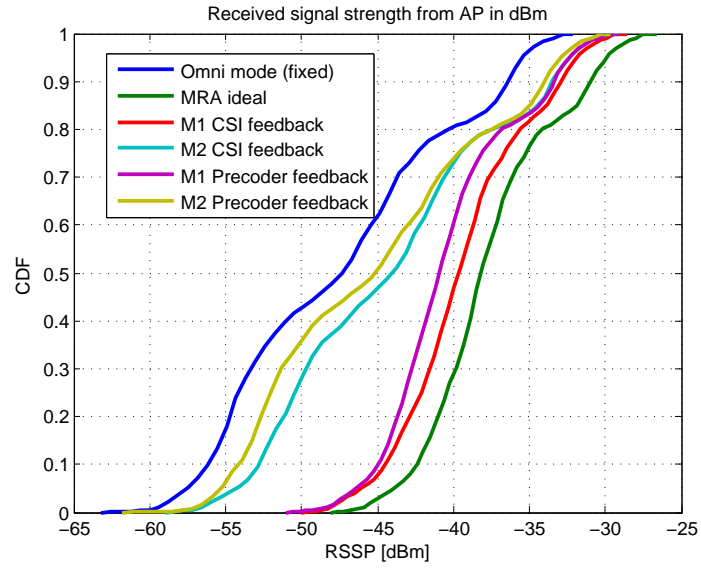
Şekil 2.3: girişimcinin olduğu bir ortamdaki SINR dağılımı. Method 1: Akıllı mod seçimi. Method 2: Hızlı mod seçimi, $\alpha = 1$.



Şekil 2.4: Baz istasyonu tarafından alınan sinyal güçlerinin karşılaştırılması, $\alpha = 1$.



Şekil 2.5: 10m,60m arasında 20 girişimcinin olduğu bir ortamdaki SINR dağılımı. Method 1: Akıllı mod seçimi, Method 2: Hızlı mod seçimi, $\alpha = 0$.



Şekil 2.6: Baz istasyonu tarafından alınan sinyal güçlerinin karşılaştırılması, $\alpha = 0$.

3. YENİDEN YAPILANDIRILABİLİR ANTEN SİSTEMLERİNİN IEEE 802.11ac AĞINDA PERFORMANSI

MR antenlerle ilgili çeşitli teorik ve simülasyon tabanlı analizler, bir önceki kısımda incelenmiş ve MR antenlerle elde edilebilen çeşitli önkodlama ve ışın oluşturma kazançları gösterilmiştir. Bu kısımda ise, MR antenlerle ilgili çeşitli performans analizleri, pratik bir test düzeneğinde incelenmektedir. IEEE 802.11ac destekli ticari bir kablosuz modem (burada yüksek performans özelliği sebebi ile TP Link Archer C7 modeli seçilmiştir) üzerinde MR anten ve anten dizilerini kullanan çeşitli SISO ve SIMO bağlantı performansları test edilmiştir. IEEE 802.11ac senaryo modellerinden ofis-içi ve bina-içi iki farklı senaryoda yapılan çeşitli SISO ve SIMO testlerde, MR anten ve anten dizilerini kullanan sistemlerle, yönsüz antenlere göre kullanım senaryolarına göre %10'lardan %40'lara kadar varan doğru girdi kazançları gözlenmiştir.

3.1 Sinyal ve Kanal Modeli

M verici ve N alıcı antenin kullanıldığı bir MIMO-OFDM haberleşme bağlantısı varsayalım. Çift-yönlü uzaysal kanal modeli ile m. verici anten ile n. alıcı anten arasındaki $H_{n,m}[k]$ kanalını f_k frekansında, aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$H_{n,m}[k] = \sum_l \alpha_{l,m,n,k} e^{j\phi_{l,m,n,k}} \varphi(\Omega_{t,l,m,k}) \psi(\Omega_{r,l,n,k}) e^{-2j\pi f_k \tau_{l,m,n,k}} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de kullanılan parametreler Tablo 3.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.1: $H_{m,n}(k)$ kanal modeli için kullanılan parametreler.

Parameter	Definition
l	l . yayının patikası
$\alpha_{l,m,n,k}$	l . patika için kanal kazancı
$\phi_{l,m,n,k}$	l . patika için faz kayması
$\varphi(\Omega_{t,l,m,k})$	m . verici antenin l . patika çıkış açısı $\Omega_{t,l,m,k}$ için anten kazancı
$\psi(\Omega_{r,l,n,k})$	n . alıcı antenin l . patika geliş açısı $\Omega_{r,l,n,k}$ için anten kazancı

Denklem (1)'de kullanılan parametreler Tablo I'de belirtilmiştir. Dikkat edilirse antenin örüntü kazancı değiştirilerek verici ile alıcı arasındaki her bir patika için kanal kazancı kontrol edilebilmektedir. Eğer uygulama senaryosunda sonlu sayıda ve farklı açılardan sinyal yayılımını sağlayan yansıtıcılar bulunursa, bu yönler tespit edilerek anten modları ayarlanabilir ve bu yönlerle eşleştirilerek kanal kazancı artırılabilir.

3.2 ÇYA-ÇGÇÇ Test Düzenegi

Bu kısımda, 3 verici ve 3 alıcı antenli ve 3 paralel akış destekli MIMO özelliği olan TP-Link Archer C7 ticari kablosuz modem kullanılmaktadır. Bu modem IEEE 802.11n/ac protokolünü desteklemekte, böylelikle hem 2.4 GHz hem de 5 GHz bantlarında iletişim yapabilmektedir. 2.4 GHz radyo iletişim için 3 adet iç anten, 5 GHz bandı için ise 3 adet dış anten girişi bulunmaktadır. Kablosuz modem anten kazancı 5 dBi olan yönsüz antenlerle satışa sunulmaktadır. Bu modem, Qualcomm'un QCA9558 chip-kümesi, 128 MiB RAM hafıza ve 16 MiB flash-bellek ile alternatiflerine göre yüksek performansa sahip bir cihazdır.

Testleri yapmak amacı ile 2 adet TP Link modem kullanılmaktadır. OpenWrt işletim sistemi ile, bu modemler erişim noktası (AP) ve müşteri cihaz (client) olarak ayarlanabilmektedir. Böylelikle test için kullandığımız hem erişim noktası hem de mobil cihazın her ikisi de aynı IEEE 802.11ac desteğine sahip olmaktadır.

3.2.1 Yazılım

Ölçüm ve analizleri daha etkin bir şekilde yapmak amacı ile TP Link'in orijinal yazılımı yerine OpenWrt açık kaynak işletim sisteminden yararlanmaktayız. OpenWrt işletim sistemi, linux tabanlı bir platform olup, çok çeşitli açık kaynak yazılım paketleri sayesinde kablosuz modeme çok farklı fonksiyonlar kazandırabilmektedir. Bu çalışmamızda, veri hızlarını test etmek maksadı ile iperf yazılım paketini,IEEE 802.11n/acWiFi modülünü kontrol etmek maksadı ile iw yazılım paketini, OpenWrt işletim sistemine yükledik.

3.2.2 Donanım

Kullanılan kablosuz modemın 23 adet genel amaçlı giriş çıkış portu (GPIO) bulunmaktadır. Bu portların bir kısmını yeniden yapılandırılabilir antenlerin DC bias kontrol pinlerine gerekli akımı sağlamak amacı kullanabiliriz. Bu maksatla, bu portlardan (iki adet) USB led için kullanılan portlar modifiye edilmiştir. Bu portlardan alınan sinyaller bir transistör tampon devresi yardımı ile MR antenlerin p-i-n diyotlarının etkin çalışmasına uygun olan 1.6 Volt/10 mA akım oluşturmak için kullanılmıştır. Bu devre için, operasyon güç kaynağı yine kablosuz modemden elde edilen 3.3V DC kaynaktan edinilmiştir. Böylelikle, anten besleme devresi, kablosuz modeme entegre edilebilmiştir. OpenWrt OS'te hazır olarak bulunan LED kontrol yazılım paketi ile, bu LED'lerin açık-kapalı durumu yazılım aracılığı ile kontrol edilerek anten modları, yazılım aracılığı seçilebilmektedir.

3.2.3 ÇYA Antenler

Testlerde kullanılan MR anten ,seması ve modlara göre teorik ışınma örüntüleri ,Sekil 1'de gösterilmiştir. Anten yönü 30 derece değiştirilerek istenilen yönde anten kazancı artırılabilir. Ek olarak, kanal durumu da takip edilerek anten modu zaman değişimlerine göre de seçilebilmektedir. Böylelikle, kanalın durumuna göre ve/veya alıcı-verici arası geometrik duruma göre en uygun anten

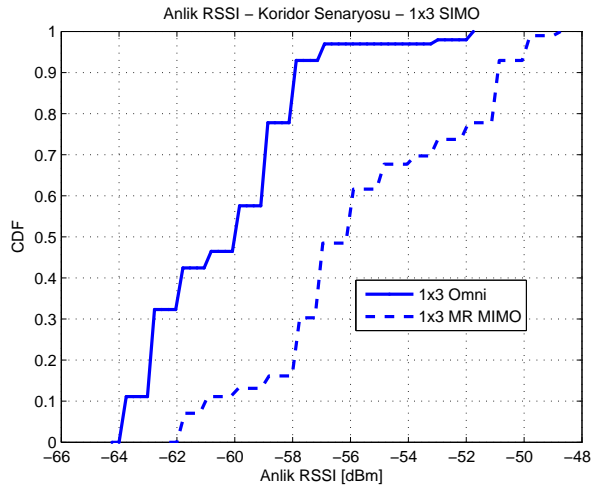
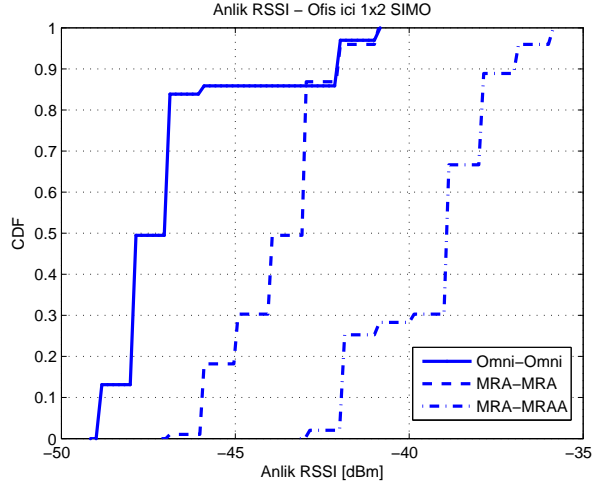
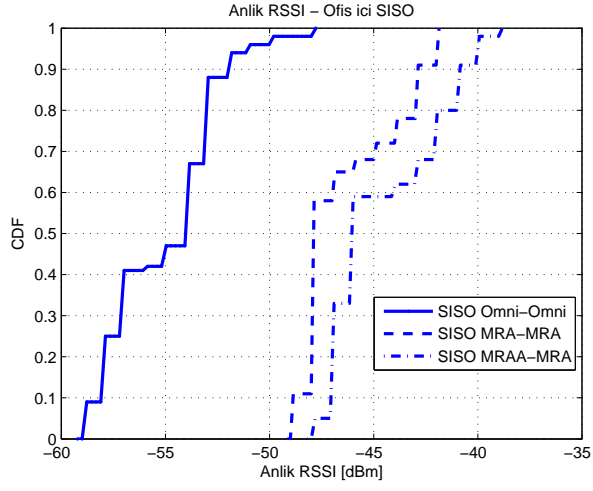
örüntü modu seçilebilmektedir.

3.3 Saha Testi Örnekleri

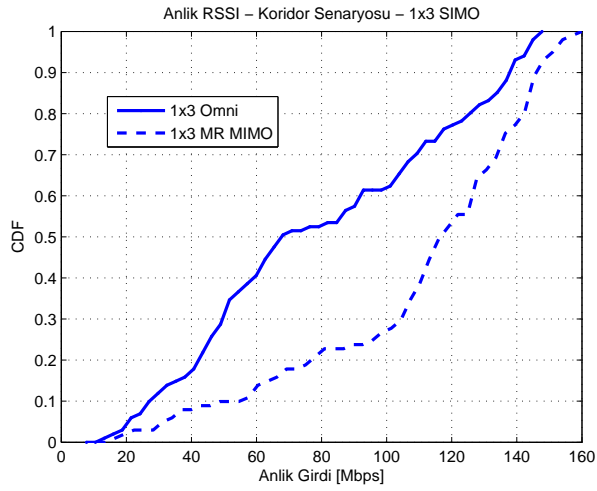
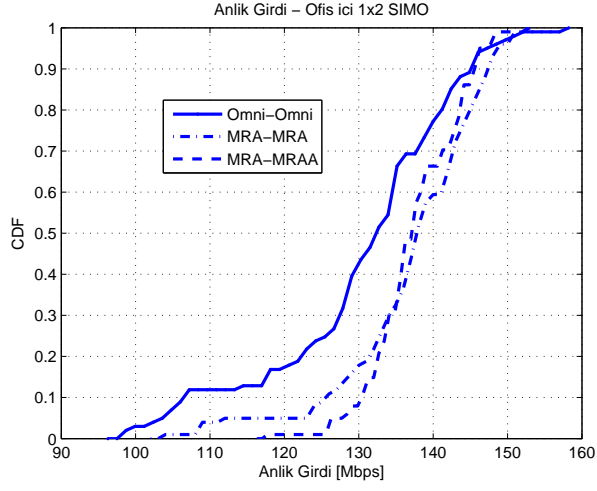
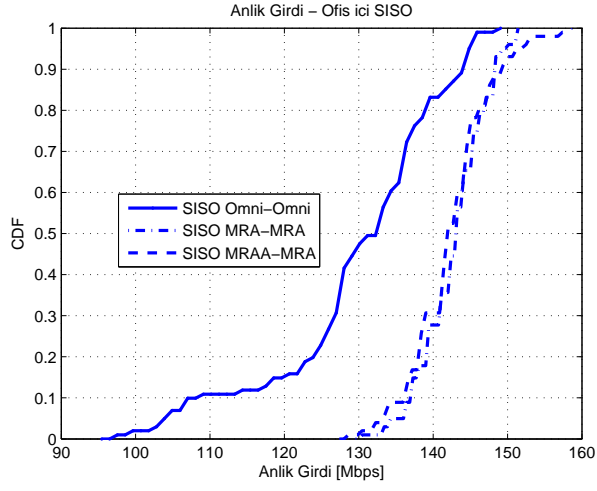
Bu çalışmada 2 farklı ortamda çeşitli performans testleri yaptık:

1. Ofis içi testler: TOBB ETÜ Teknoloji merkezindeki araştırma laboratuvarlarında yaklaşık $10m \times 10m$ ebatında ofis içinde alıcı-verici antenler arası mesafe 6m olacak şekilde konuşlandırma. Bu senaryo için hem tek girdili-tek çıktılı (SISO) anten bağlantısı ve 1 verici-2 alıcı anten kullanan tek girdili-çok çıktılı (SIMO) linkleri için testler yapılmıştır.
2. Koridor kullanımı: TOBB ETÜ Teknoloji merkezinde bulunan koridorlarda, alıcı-verici arası 45m olacak şekilde konuşlandırma. Bu senaryo için 1 verici-3 alıcı anten kullanan SIMO için testler yapılmıştır.

Test parametreleri Tablo 3.2'de özetlenmiştir. Sadece link performansını incelemek istediğimizden bina içinde kullanılmayan bir kanal seçtik (Kanal no: 149). Testlerde çeşitli anten konfigürasyonlarını inceledik. Bu çalışmada, alıcı sinyal güç indikatörü (RSSI) ve TCP trafiği doğru girdi sonuçları üretilmiştir. iperf sunucusu alıcıda, iperf client ise vericide çalıştırılarak vericiden alıcı TCP trafiği doğru girdi miktarı ölçülmüştür. Bu esnada, beacon sinyallerle elde edilen RSSI değerleri de kaydedilmiştir. Doğru girdi sonuçları ve RSSI değerleri 1 sn aralıklara, ve 100 sn süresince elde edilmiştir. Anlık RSSI ve doğru girdi olarak adlandırılmış bu ölçümler için empirik birikim dağılım fonksiyonları (CDF) üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.1 ve 3.2'de gösterilmektedir. Bu sonuçlarda, MR anten modlarının seçimi sayesinde yönsüz (OMNI) anten kullanan sistemlere göre önemli kazançlar elde edilmiştir. MRA dizini kullanımında, bu kazançlar beklenildiği üzere biraz daha çok olmaktadır. Çünkü MRA anten dizini (MRAA), 4 adet MR antenin (MRA) doğrusal dizilimi olarak elde edilmiştir ve teorik olarak 6 dB'lik bir kazanç beklenmektedir. Her ne kadar bu 6 dB'lik kazanç bu pratik senaryoda görülme de, 2-4 dB arası kazançlar görülebilmektedir.



Şekil 3.1: Anlık RSSI için birikim dağılım fonksiyonu.



Şekil 3.2: Doğru girdi için birikim dağılım fonksiyonu

Çizelge 3.2: Test için kullanılan IEEE 802.11ac parametreleri

Parametre	Değer
İleti gücü	17 dBm
MCS türleri	(1) için MCS=9 (2) için MCS=0-9 arası
MRA	3 modlu
MRAA	Her biri 3 modlu, 4 MRA dizini
Wi-Fi kanal no	149 (5.745 GHz)
Bantgenişliği	80 MHz
Girişim	Yok
Anten konfigürasyonları	Tx/Rx
SISO	Omni/Omni,MRA/MRA,MRA/MRAA
1 × 2 SIMO	Omni/Omni,MRA/MRA,MRAA/MRA
1 × 3 SIMO	Omni/Omni,MRAA/MRA
Omni anten maksimum kazanç	5 dBi
MR anten elemanı maksimum kazanç	6.7 dBi
MR anten elemanı modları	Omni, ~ ±30° yön değiştirme

Şekil 3.2’te gösterilen yönsüz anten sistemi vs. MR anten sistemi doğru girdi veri hızları karşılaştırıldığında SISO ofis içinde görülen ortalama %10 doğru girdi kazancı, uzak mesafe 1x3 SIMO koridor deneyinde %40'lara kadar varmıştır. Bunun temel sebebi, ofis içi yakın mesafede, yayılım kayıpları az olduğundan, 3-6 dB arası anten kazançları fazla önem arz etmemektedir. Ancak mesafe kayıpları arttığında, anten kazançları sistem performansına önemli katkı sağlamaktadır. Bu bakımdan MR antenler, özellikle sinyal kayıplarının çok olduğu senaryolarda daha faydalı olacaktır.

3.3.1 Sonuçlar

Bu kısımda, ticari kablosuz modemler kullanılarak ÇYA anten performansı IEEE 802.11ac protokolü altında gerçek zamanlı testlerle ölçülmüş ve çeşitli senaryolarda, ÇYA antenlerin doğru girdi kazançları sağladığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmalar, bu konuda yapılan ilk testler olması sebebi ile, girişimsiz bir ortamda yapılmıştır. İleri çalışmalarda, çeşitli yönlerden girişimler oluşturularak ÇYA antenlerin girişim sinyallerine karşı dirence test edilecektir. Bunlara ek

olarak, Şu ana kadar geliştirilmiş ÇYA anten yazılımı geliŐtirilerek anten mod seĒimini daha etkin bir Şekilde yapılması planlanmaktadır. TGTŐ testlere ek olarak ŐeŐitli ŐGŐŐ testleri de yapılacaktır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, Çoklu-Yeniden Ayarlanabilir Çok Girişli Çok Çıkışlı anten sistemlerinde algoritma tasarımı ve saha içi performans testlerine yer verilmiştir. Tasarım kısmında önerilen birkaç farklı yöntem;

- İdeal anten mod seçimi
- Kestirim tabanlı mod seçimi
- Akıllı mod seçimi
- Hızlı mod seçimi

olarak adlandırılmıştır.

İdeal mod seçiminde, her anten modu için, \mathbf{H}_k 'nin verici tarafında bilindiği varsayılmaktadır. Kombinatorik bir taramayla, en iyi anten modu ve önkodlama matrisi hesaplanabilir. Kestirim tabanlı mod seçiminde, alıcı tarafında kestirimlerle elde edilen veriler, geri besleme aracılığıyla vericiye gönderilir. Bu geri besleme, \mathbf{H} ve \mathbf{P} bildirimini olarak iki ayrı şekilde olabilir. Akıllı mod seçiminde ise, eğitim yükünü azaltmaya yönelik tasarlanmış bir algoritmadır. Önce halihazırdaki anten modu ile kanal eğitimi yapılır ve önkodlama matrisi elde edilir. Sonra bu önkodlama matrisi kullanılarak, en iyi \mathcal{K}_α modu hesaplanır. Bu modlar için kanal eğitimi yapılarak önkodlama matrisi ve kanal modu güncellenir. Hızlı mod seçimi ise iletim çevresini tanımaya ve bu sayede eğitim yükünü azaltmaya yönelik bir algoritmadır. Bu sayede önkodlama matrisi sadece birkaç aday arasından seçilir.

Bu tür sistemlerde algoritma geliştirmek, ucu açık bir problemdir. Eğitim yükünü azaltmaya yönelik algoritmalar, sistem performansını önemli ölçüde arttıracaktır. Bu amaçla, makine öğrenmesi ve yapay zeka algoritmaları incelenerek sisteme

uyarlanabilir. Aynı zamanda, antenin fiziksel dizaynı ve önkodlayıcı dizaynı üzerinde çalışılarak performansı arttırmak mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] B. A. Cetiner, H. Jafarkhani, J.-Y. Qian, H. J. Yoo, A. Grau, and F. De Flaviis, “Multifunctional reconfigurable mems integrated antennas for adaptive mimo systems,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 42, no. 12, pp. 62–70, 2004.
- [2] T. M. Duman and A. Ghrayeb, *Coding For MIMO Communication Systems*. Wiley Online Library, 2007.
- [3] R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, “Spatial modulation,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 2228–2241, July 2008.
- [4] R. M. Legnain, R. H. M. Hafez, and A. M. Legnain, “Improved spatial modulation for high spectral efficiency,” *CoRR*, vol. abs/1204.1414, 2012.
- [5] G. Caire, S. Shamai, Y. Steinberg, and H. Weingarten, “Space-time wireless systems: From array processing to mimo communications,” 2006.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley-Interscience, 2005.
- [7] B. Cetiner, H. Jafarkhani, J.-Y. Qian, H. J. Yoo, A. Grau, and F. De Flaviis, “Multifunctional reconfigurable mems integrated antennas for adaptive mimo systems,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 42, no. 12, pp. 62–70, 2004.
- [8] J. Bernhard, *Reconfigurable Antennas*. Synthesis Lectures on Antennas and Propagation Series, Morgan & Claypool, 2007.
- [9] “Special issue on multifunction antennas and antenna systems,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 2, pp. 2504–2504, 2006.

- [10] B. Cetiner, E. Akay, E. Sengul, and E. Ayanoglu, “A mimo system with multifunctional reconfigurable antennas,” *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, vol. 5, no. 1, pp. 463–466, 2006.
- [11] D. Piazza, N. Kirsch, A. Forenza, R. Heath, and K. Dandekar, “Design and evaluation of a reconfigurable antenna array for mimo systems,” *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 869–881, 2008.
- [12] A. Grau, H. Jafarkhani, and F. De Flaviis, “A reconfigurable multiple-input multiple-output communication system,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 5, pp. 1719–1733, 2008.
- [13] H. Eslami, C. Sukumar, D. Rodrigo, S. Mopidevi, A. Eltawil, L. Jofre, and B. Cetiner, “Reduced overhead training for multi reconfigurable antennas with beam-tilting capability,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 12, pp. 3810–3821, 2010.
- [14] T. M. Duman and A. Ghayeb, *Coding for MIMO Communication Systems*. Wiley, 2008.
- [15] L. Zheng and D. Tse, “Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 5, pp. 1073–1096, 2003.
- [16] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Wiley series in telecommunications, Cambridge University Press, 2005.
- [17] G. Golub and C. Van Loan, *Matrix Computations*. Johns Hopkins Studies in the Mathematical Sciences, Johns Hopkins University Press, 1996.
- [18] IEEE_TGn_TGac, “11-09-0161-02-00ac-802.11ac-usage-model-document,” tech. rep., IEEE, Jan 2009.
- [19] J. P. Kermoal, L. Schumacher, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, and F. Frederiksen, “A stochastic mimo radio channel model with experimental validation,” *IEEE J.Sel. A. Commun.*, vol. 20, pp. 1211–1226, Sept. 2006.
- [20] IEEE_TGn_TGac, “11-09-0308-12-00ac-tgac-channel-model-addendum-document,” tech. rep., IEEE, March 2010.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : KURTULMAZ, Ekim
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 18.10.1990 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : +90 530 263 16 77
Faks : +90 312 292 41 80
e-mail : ekimkurtulmaz90@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	TOBB ETÜ	2015
Lisans	Bilkent Üniversitesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-2015	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Tam Burslu Öğrenci
2016- . . .	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	Yarı Zamanlı Öğretim Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce (Çok iyi)
Almanca (Orta)

Yayımlar

- E.Kurtulmaz,İ.Bahçeci, Reconfigurable MIMO:Performance Analysis and Design, *IEEE 22. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı (SIU 2014)*, Trabzon/ Türkiye,23-25 Nisan 2014.