

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YOĞUN ÇOK GİRDİLİ ÇOK ÇIKTILI SİSTEMLERDE
SABİT VE ÇOK GENLİKLİ ÖNKODLAMININ
DİKGEN OLMAYAN ÇOKLU ERİŞİM İLE KULLANIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğrul ÖZCAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ayşe Melda YÜKSEL TURGUT

TEMMUZ 2020

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Tuğrul ÖZCAN



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YOĞUN ÇOK GİRDİLİ ÇOK ÇIKTILI SİSTEMLERDE SABİT VE ÇOK GENLİKLİ ÖNKODLAMANIN DİKGEN OLMAYAN ÇOKLU ERİŞİM İLE KULLANIMI

Tuğrul Özcan

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ayşe Melda Yüksel Turgut

Tarih: Ağustos 2020

Kablosuz iletişim, günümüzde bilginin iletilmesi için kilit bir rol oynamaktadır. Giderek artan daha yüksek veri hızı, daha etkili güç verimliliği ve daha yüksek spektral verimlilik taleplerini karşılamak için, çok girdili çok çıktılı sistemler kablosuz iletişimde önemli bir yer edinmiştir. Ancak, çok girdili çok çıktılı sistemlerde kullanılan anten sayıları, bu talepleri karşılamak için yeterli olamamıştır. Bu nedenle, baz istasyonlarında bulunan anten sayılarını artırma prensibine dayanan yoğun çok girdili çok çıktılı sistemler çözüm olarak önerilmiştir. Yoğun çok girdili çok çıktılı sistemler, 5G kablosuz iletişim teknolojilerinde önemli avantajlar sunsa da baz istasyonlarının kurulum maliyetleri yüksektir ve güç tüketimi fazladır.

Baz istasyonu kurulum maliyetlerini düşürmek için sabit genlikli önkodlama kullanım fikri ortaya atılmıştır. Sabit genlikli önkodlama, çok antenli ileticide tek bir radyo frekans zinciri kullanarak, etkili ve uygulanabilir güç yükseltimi sağlayan bir iletim tekniğidir. Bu teknikte, kablosuz iletim yapılan her kullanıcıya eşit seviyede çok kullanıcı girişi enerjisi sunulur ve geleneksel sıfıra zorlayıcı kodlama tekniklerine göre başarılı veri hızında kayıplara neden olmaktadır. Bu kayıpları bir miktar geri kazanmak amacıyla, çok genlikli önkodlama fikri ortaya atılmıştır. Çok genlikli

öncodlama, yoğun çok girdili çok çıktılı sistemlerde birden fazla radyo frekans zinciri kullanarak, antenlerin gruplanması ve güç ihtiyaçlarına göre antenlere farklı seviyelerde güç paylaşımı yapılması prensibine dayanmaktadır. Bu teknikte, kablosuz iletim yapılan her kullanıcıya eşit seviyede çok kullanıcı girişim enerjisi sunulmuştur ve sabit genlikli öncodlamaya göre önemli bir performans artışı sağlanmıştır.

Yeni nesil kablosuz haberleşme taleplerini karşılamak adına önerilen bir başka çözümler ise dikgen olmayan çoklu erişim tekniklerinin kullanımınıdır. Bu çoklu erişim tekniğinde güç ekseninde çoğullama yapılarak farklı kullanıcıların aynı zaman diliminde aynı frekans bandını kullanmalarına izin verilmektedir. Dikgen olmayan çoklu erişim temelde süperpozisyon kodlaması ve ardışık girişim giderici yöntemlerine dayanmaktadır.

Bu tezde, biz sabit ve çok genlikli öncodlama fikirlerine dayanarak, kablosuz iletim yapılan kullanıcıların gözlemlediği çok kullanıcı girişim enerjisini farklılaştırmak amacıyla, yoğun çok girdili çok çıktılı sistemler için sabit ve çok genlikli öncodlamanın, dikgen olmayan çok erişim tekniğiyle birlikte kullanılması fikrini sunduk. Sabit ve çok genlikli öncodlamanın dikgen olmayan çoklu erişimle birlikte kullanımını durumunda, bağımsız ve eş dağılıma sahip Rayleigh sönümlü kanallar üzerinde yaptığımız simülasyonlar gösterdi ki; kullanıcılar kanal durumlarına göre eşleştirilerek, süperpozisyon ve ardışık girişim giderici uygulamaları kullanıldığında farklı gruplarda farklı seviyelerde çok kullanıcı girişim enerjisi gözlemlenebilmektedir. Çok genlikli öncodlamanın kullanılması, sabit genlikli öncodlamanın kullanılma durumuna göre kullanıcılarda gözlemlenen çok kullanıcı girişim enerjisini kayda değer biçimde azaltmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yoğun çok girdili çok çıktılı sistemler, Sabit genlikli öncodlama, Çok genlikli öncodlama, Dikgen olmayan çoklu erişim, Çok kullanıcı girişim enerjisi

ABSTRACT

Master of Science

USING NON-ORTHOGONAL MULTIPLE ACCESS WITH CONSTANT AND MULTI ENVELOPE PRECODING FOR MASSIVE MULTIPLE INPUT MULTIPLE OUTPUT SYSTEMS

Tuğrul Özcan

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Engineering and Science
Electrical and Electronics Engineering Programme

Supervisor: Assoc. Dr. Ayşe Melda Yüksel Turgut

Date: July 2020

Wireless communication plays key role to transmit information at the present time. In order to provide ever increasing data rate, power efficiency and spectral efficiency demands, multiple input multiple output systems are offered. However, number of antennas at the base stations of multiple input multiple output systems is not enough to meet these requirements. For this reason, massive multiple input multiple output systems which use a great number of antennas at the base stations have been proposed to solve this problem. Massive multiple input multiple output systems provide significant improvements for fifth generation wireless communication technologies. On the other hand, there are some problems need to be solved such as higher built cost and power consumption of these systems.

Constant envelope precoding has been proposed to reduce base stations' building costs and hardware complexity. Constant envelope precoding is an effective and applicable technique that provides wireless communication with only one nonlinear power amplifier coupled with phase shifters in front of the each antennas at the base stations. Constant envelope precoding offers same level of multi user interference to each user and results in performance loss related to achievable data rates compared to

conventional zero forcing precoding approaches. In order to recover performance loss, multi envelope precoding has recently been proposed. In multi envelope precoding, there are more than one but limited number of power amplifiers coupled with phase shifters in front of the each antennas at the base stations. Thus, different power levels can be provide to different group of antennas according to the power requirements. As a result of the multi envelope precoding, there is a considerable improvement in achievable data rates compared to constant envelope precoding, but still same level of multi user interference is observed on users.

Non-orthogonal multiple access technique is an another prepared solution to meet new generation wireless communication demands. In non-orthogonal multiple access, users can be communicate at the same frequency band and time interval thanks to superposition coding and successive interference cancellation techniques.

In this thesis, we proposed an idea that using non-orthogonal multiple access with constant and multi envelope precoding for massive multiple input multiple output systems with the objective of differentiate multi user interference observed on users according to their requirements. We pair users according to their channel conditions and examine the impact of the non-orthogonal multiple access multi user interference. Simulations for the independent and identically distributed Rayleigh fading channel show that different multi user interference levels are possible with non-orthogonal multiple access under both constant envelope and multi envelope precoding. Using multi envelope precoding provides better performance than constant envelope precoding.

Keywords: Massive multiple input multiple output systems, Constant envelope precoding, Multi envelope precoding, Non-orthogonal multiple access, Multi user interference

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Ayşe Melda Yüksel Turgut'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma, bu süreçte anlayış ve desteklerini esirgemeyen Aselsan MGEO ve FNSS Savunma Sistemleri A.Ő. 'de bulunan amir ve iş arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
2. LİTERATÜR ANALİZİ	5
2.1 Yoğun Çok Girdili Çok Çıktılı Sistemler	5
2.2 Sabit Genlikli Önkodlama	8
2.3 Çok Genlikli Önkodlama.....	13
2.4 Dikgen Olmayan Çoklu Erişim	21
3. SABİT GENLİKLİ ÖNKODLAMA VE DİKGEN OLMAYAN ÇOKLU ERİŞİM TEKNİKLERİNİN BİRLİKTE KULLANIMI	25
3.1 Amaç.....	25
3.2 Sistem Modeli.....	25
3.3 Sonuçlar	32
4. ÇOK GENLİKLİ ÖNKODLAMA VE DİKGEN OLMAYAN ÇOKLU ERİŞİM TEKNİKLERİNİN BİRLİKTE KULLANIMI	35
4.1 Amaç.....	35
4.2 Sistem Modeli.....	35
4.3 Sonuçlar	39
5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	43
KAYNAKLAR	45
ÖZGEÇMİŞ	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2-1 : mMIMO Sistemlerin genel gösterimi	5
Şekil 2-2 : mMIMO Sistemlerde RF zincirinin genel gösterimi	7
Şekil 2-3 : CE Önkodlama tekniğinde oluşan RF zinciri	8
Şekil 2-4 : CE Önkodlama tekniği kullanıldığında oluşan blok diyagram	9
Şekil 2-5 : CE Önkodlama tekniğinde, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik MUI enerjisi	13
Şekil 2-6 : ME Önkodlama tekniği kullanıldığında oluşan blok diyagram	14
Şekil 2-7 : İki genlikli önkodlama tekniği kullanıldığında antenlerin gruplanması	18
Şekil 2-8 : İki genlikli önkodlama tekniği kullanıldığında baz istasyonunda oluşacak RF zinciri	19
Şekil 2-9 : CE önkodlama ve iki genlikli önkodlama tekniklerinde, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik MUI enerjisi	20
Şekil 2-10 : CE önkodlamada, antenlere farklı seviyelerde güç dağıtılan iki genlikli önkodlama ile artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik MUI enerjisi bakımından karşılaştırılması	20
Şekil 2-11 : 4-QAM için (a) Birinci kullanıcının sembolü, (b) İkinci kullanıcının sembolü, (c) Süperpozisyon kodlaması sonunda iletilecek sembol	22
Şekil 2-12 : NOMA'da yıldız kümesinin oluşturulması	22
Şekil 2-13 : Süperimpoze sinyallerin çözülmesi, (a) İkinci kullanıcının sembolünün bulunması, (b) Birinci kullanıcının sembolünün bulunması	23
Şekil 3-1 : CE önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda oluşan blok diyagram	26
Şekil 3-2 : CE Önkodlama ve NOMA'nın birlikte kullanım durumunda sistem modeli	26
Şekil 3-3 : Kullanıcı eşleştirmelerinin ardından sistem özeti	28
Şekil 3-4 : CE Önkodlama ile NOMA birlikte kullanıldığında, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik çok kullanıcı girişi enerjisi	32
Şekil 3-5 : CE Önkodlama ile NOMA birlikte kullanıldığında, artan anten sayısı ve farklı α değerlerine bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik çok kullanıcı girişi enerjisi	33
Şekil 4-1 : ME Önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda oluşan blok diyagram	36
Şekil 4-2 : ME Önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda oluşan sistem özeti	36
Şekil 4-3 : ME Önkodlama kullanıldığında, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik çok kullanıcı girişi enerjisi	40
Şekil 4-4 : ME Önkodlama kullanıldığında, artan anten sayısı ve farklı değerlerine bağlı olarak, kullanıcı başına düşen ergodik çok kullanıcı girişi enerjisi	41
Şekil 4-5 : MUI enerjisinin sinyal-gürültü-girişi oranına etkisi	41

KISALTMALAR

ADC	: Analog Dijital Çevirici (Analog-to-Digital Converter)
APC	: Ortalama Güç Kısıtlaması (Average Power Constraint)
AWGN	: Toplanır Beyaz Gauss Gürültüsü (Additive White Gaussian Noise)
CDMA	: Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)
CE	: Sabit Genlikli (Constant Envelope)
DPC	: Kirli Kağıt Kodlaması (Dirty Paper Coding)
FDMA	: Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Frequency Division Multiple Access)
LTE	: Uzun Süreli Gelişim (Long Term Evolution)
ME	: Çok Genlikli (Multi Envelope)
MIMO	: Çok Girdili Çok Çıktılı (Multiple Input Multiple Output)
mMIMO	: Yoğun Çok Girdili Çok Çıktılı (Massive Multiple Input Multiple Output)
MUI	: Çok Kullanıcılı Girişim (Multi User Interference)
NOMA	: Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access)
OFDMA	: Dik Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Orthogonal Frequency Division)
PA	: Güç Yükseltici (Power Amplifier)
PS	: Faz Kaydırıcı (Phase Shifter)
RF	: Radyo Frekansı (Radio Frequency)
SIC	: Ardışık Girişim Giderici (Successive Interference Cancellation)
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access)
ZF	: Sıfıra Zorlayıcı (Zero Forcing)

1. GİRİŞ

Kablosuz iletişim, modern iletişim teknolojilerinin önemli bir parçasıdır. Kullanıcı talepleri ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak, zaman içerisinde köklü değişiklikler uygulanmış ve standartlaştırılmıştır. 5G kablosuz iletişim teknolojilerinin takdimi ile birlikte, daha yüksek veri hızları, daha etkili güç verimliliği ve daha yüksek spektral verimlilik gibi talepler ortaya çıkmıştır [1]. Sistem kapasitesini arttırmak için enformasyon teorisi üç önemli konuda gelişme kaydedilmesi gerektiğini belirtmektedir [2,3]. Ultra-yoğun ağlar kullanmak ağ kapasitesini artırır ve küçük hücre teknolojisinin kullanımıyla mümkün olacaktır [4,5]. Milimetrik dalga boyunu kullanmak büyük miktarda bant genişliği sunarak daha yüksek sistem kapasitesine erişimi mümkün kılacaktır [6]. İleticide yoğun çok girdili çok çıktılı (massive multiple input multiple output -mMIMO) sistemlerin kullanımıyla yüksek spektral verimlilik sağlanacaktır [7].

Çok girdili çok çıktılı (multiple input multiple output -MIMO) sistemler kablosuz ağlarda sistem kapasitesini arttırmak için önerilmiştir ve bir süredir modern kablosuz iletişim teknolojilerinin vazgeçilmez parçalarından biri haline gelmiştir [8,9]. MIMO sistemler, baz istasyonlarında sinyal iletim ve alımının birden fazla antenle yapılması prensibine dayanır ve kanal kapasitesinde önemli bir artış sağlar. Baz istasyonlarında birden fazla anten bulunmasının faydalarından yararlanmak için birçok teknik mevcuttur. Aynı bilginin birden fazla kanalla iletilmesi fikrine dayanan uzaysal çeşitlilik (spatial diversity) sistem güvenilirliğini arttırmak için önemli bir yöntemdir [9]. Sönümlü kanallar üzerinde zaman çeşitliliği sağlamak için, uzaysal çeşitlilik ile birlikte kullanıldığında sistem performansında iyileştirmeler sunan çeşitli kanal kodlama yöntemleri önerilmiştir [9]. İletilecek bilginin farklı kısımlarının farklı kanallarla iletilmesi fikrine dayanan uzaysal çoğullama (spatial multiplexing) ile veri hızının artırılması hedeflenmiştir [10]. Önkodlama fikriyle, kanal durum bilgisinden (channel state information) yararlanarak, kanal durumundan kaynaklanan bozulmaların sinyal çözümüne olan etkisinin azaltılması amaçlanmıştır [11].

Baz istasyonlarında bulunabilecek anten sayısı uzun süreli gelişim (long term evolution –LTE) standardına göre 8 ile sınırlandırılmıştır [12]. Ancak, baz istasyonlarında bulunan anten sayısına bağlı olarak elde edilen potansiyel avantajlar mMIMO sistemleri popüler bir araştırma konusu haline getirmiştir. Bu teknikte, baz istasyonlarında MIMO sistemlere göre çok daha fazla anten bulundurarak, bu antenlerin eş zamanlı olarak aynı zaman dilimini veya frekans bandını kullanması öngörülmüştür [1]. Bant genişliğini arttırmak için önerilen milimetrik dalga boyunun kullanımı anten dizilerinin fiziksel boyutunu küçülterek büyük anten dizileri kurmayı desteklemektedir [13]. Benzer şekilde, mMIMO sistemler yüksek anten kazancı sunarak, milimetrik dalga boyundan kaynaklanan yol kayıplarını tolere edebilmektedir [13].

mMIMO sistemler birçok avantaj sunsa da yüksek sayıda anten dizisinden kaynaklanan donanımsal komplekslik, yüksek güç tüketim ihtiyacı ve kurulum maliyetlerinin fazla olması gibi çözülmeyi bekleyen birçok dezavantaja da sahiptir [14]. Baz istasyonunda çok sayıda anten bulunması nedeniyle, doğrusal güç yükselteçleri (power amplifier -PA), faz kaydırıcılar (phase shifters -PS), analog dijital çeviriciler (analog-to-digital converter -ADC) gibi çok sayıda radyo frekans (radio frequency -RF) elemanı da gereklidir [1]. Baz istasyonunda her bir RF zincirinde bir adet doğrusal PA mevcuttur ve bu durum kurulum maliyetlerini yükseltmektedir. Bunun yanı sıra, doğrusal PA kullanımı güç verimliliği bakımından tercih edilmemektedir [15]. Bu nedenlerle, baz istasyonlarında bulunan PA sayısını azaltmak ve doğrusal olmayan PA kullanımını mümkün kılmak amacıyla sabit genlikli (constant envelope -CE) önkodlama fikri ortaya atılmıştır [16, 17, 18]. Bu yöntem, tüm iletim antenlerindeki sinyal genliğinin birbirine eşit seçilmesine ve ardından bir adet PA ve her anten önünde bulunan sayısal veya analog PS yardımıyla iletim yapılması prensibine dayanır.

CE önkodlama, baz istasyonu kurulum maliyetlerini düşürse de, ortalama güç kısıtlaması (average power constraint -APC) yöntemine göre daha fazla güç ihtiyacı doğurması ve her kullanıcıda eşit miktarda gözlemlenen çok kullanıcı girişi (multi-user interference -MUI) enerjisinin yüksek olması gibi dezavantajlara sahiptir. Bu alanlardaki performans kayıplarını bir miktar geri kazanmak amacıyla birden fazla PA kullanım prensibine dayanan çok genlikli (multi envelope -ME) önkodlama fikri ortaya atılmıştır [19]. Bu yöntemde, antenler gruplanarak daha yüksek güç ihtiyacı

olan antenlerde daha fazla güç tüketmek amacına ulaşmak için sıfıra zorlayıcı (zero forcing –ZF) önkodlama yönteminin kullanılmasıyla, her kullanıcıda eşit gözlemlenen MUI enerjisinin kayda değer biçimde azaldığı görülmüştür.

IEEE 802.16e standardı MIMO tekniklerinin dik frekans bölmeli çoklu erişim (orthogonal frequency division multiple access -OFDMA) ile birlikte kullanımını içermektedir [20]. OFDMA tekniğinde kullanıcılar frekansta birbirine dikgen olan radyo kaynaklarında iletişim sağlamaktadır. Bu yöntemle kullanıcılar arası girişim çok düşük seviyelerde olduğu için çoğullama kazancı düşük karmaşıklığa sahip alıcılara sağlanabilmektedir. Ancak, modern kablosuz iletişim isterlerini karşılamak için, birden fazla kullanıcının aynı zaman diliminde ve aynı frekans bandında iletişim kurmasına olanak tanıyarak yüksek spektral verimlilik sağlayan dikgen olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access -NOMA) tekniği önerilmiştir [21].

1.1 Tezin Amacı

Bu tezde, mMIMO sistemlerde baz istasyonu kurulum maliyetlerini düşürmek için önerilen CE önkodlama ve ME önkodlama tekniklerinde MUI enerjisi analizi üzerinde durulmuştur. Her iki önkodlama tekniğinde de, hizmet verilen tüm kullanıcılarda, kullanıcı taleplerinden bağımsız olarak eşit miktarda MUI enerjisi gözlemlenmiştir. Bu çalışmada amacımız, farklı kullanıcı ve grupların ihtiyaç ve taleplerine bağlı olarak, farklı kullanıcı ve gruplarda MUI enerjisinin birbirinden farklı seviyelerde görülmesini sağlamaktır.

Bu amaçla, mMIMO sistemlerde, CE önkodlama ve ME önkodlamanın NOMA tekniği ile birlikte kullanım durumu araştırılmıştır. Kullanıcılar kanal durumlarına göre, en iyi kanal durumuna sahip kullanıcıyla en kötü kanal durumuna sahip kullanıcı eşleşecek şekilde birbirleriyle eşleştirilmiştir. CE önkodlama ve ME önkodlama tekniklerinde önerilen ve ileticide faz açılarının bulunmasını sağlayan algoritmalar, NOMA tekniğinin temel unsurları olan kullanıcı eşleştirme algoritmasına ve süperpozisyon kodlamasına uygun hale getirilmiştir. Alıcıda ardışık girişim giderici (successive interference cancellation -SIC) tekniği kullanılmıştır.

Bağımsız ve eş dağılıma sahip Rayleigh sönümlü kanallar üzerinde benzetim çalışmaları yapılarak, CE önkodlama ve ME önkodlamanın NOMA tekniği ile birlikte kullanıldığı durumlarda iyi kanal durumuna sahip kullanıcılar ile kötü kanal durumuna sahip kullanıcılar arasında MUI enerjisi bakımından ayırım yapmanın mümkün olduğu

gösterilmiştir. Bu yöntemle, kullanıcılar arasında ödünleşim yapmak koşuluyla, bazı kullanıcılarda CE önkodlama ve ME önkodlamada gözlemlenen MUI enerjisinden daha düşük MUI enerjisi gözlemlemek de mümkün olmuştur. Her iki önkodlama yöntemi için de, gruplar arasında gücün paylaşılma oranı üzerinde benzetimler yapılarak, en uygun güç paylaşım oranı saptanmıştır.

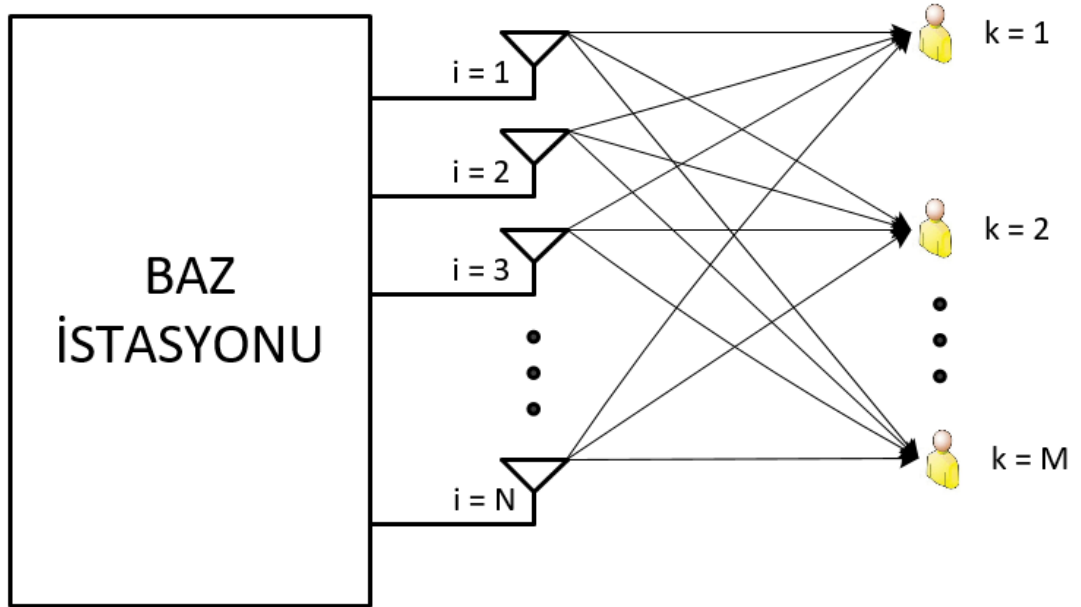
Bölüm 2’de mMIMO sistemler, CE önkodlama, ME önkodlama ve NOMA teknikleri için literatür analizi sunulmuştur. mMIMO sistemlerde, NOMA tekniğinin CE önkodlama tekniği ile birlikte kullanımı Bölüm 3’te, ME önkodlama tekniği ile birlikte kullanımı Bölüm 4’te incelenmiştir. Bölüm 5’te sonuçlar açıklanmış ve gelecek çalışmalar belirtilmiştir.



2. LİTERATÜR ANALİZİ

2.1 Yoğun Çok Girdili Çok Çıktılı Sistemler

5G kablosuz iletişim teknolojilerinde, bant genişliğini artırarak sistem kapasitesinin artırılması amacıyla milimetrik dalga boyunun kullanımı önemli bir yer edinmiştir. Yol kaybı, yayılımda yağmur etkisi, farklı obje ve yapıların yansımaya katsayılarını içeren iç ve dış ortam yayılım ölçümleri, milimetrik dalga boyunun kullanımının umut vadeden bir teknoloji olduğunu göstermiştir [22]. Milimetrik dalga boyunun kullanımı, küçülen anten boyutları nedeniyle baz istasyonlarında çok daha fazla sayıda anten bulunmasına yardımcı olacaktır. Baz istasyonlarında bulunan anten sayısı arttıkça daha etkili hüzmleme (beamforming) yöntemlerinin kullanılmasının önü açılacak ve daha küçük hücre yapıları kullanılabilir [13]. Bu nedenlerle, Şekil 2-1’de genel bir gösterimi bulunan mMIMO sistemler ile küçük hücre kullanımı ve milimetrik dalga kullanımı birbirlerini tamamlayan teknolojiler olarak görülmektedir.



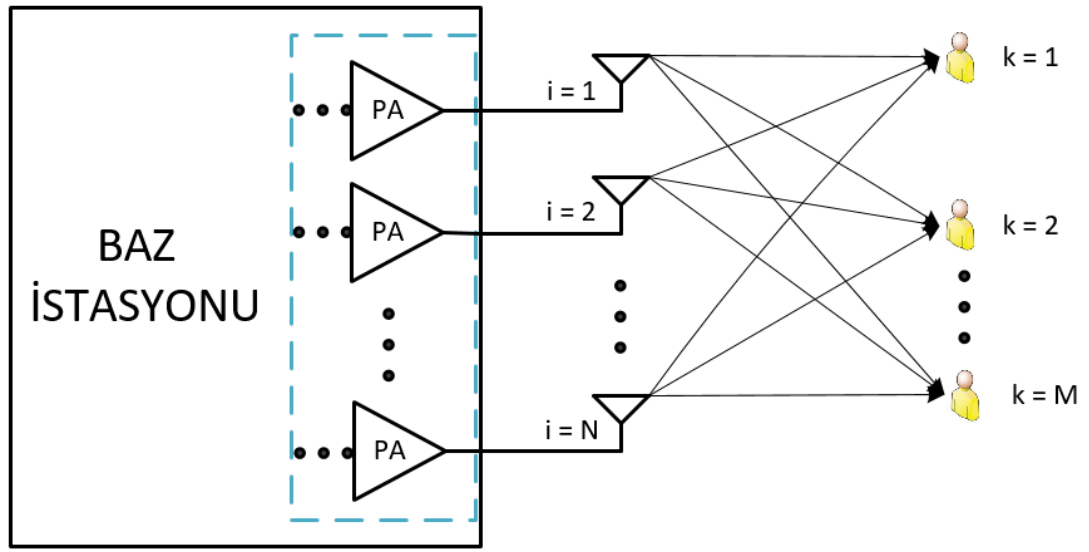
Şekil 2-1 : mMIMO Sistemlerin genel gösterimi

mMIMO sistemlerin kullanımını araştırmak amacıyla birçok test yapılmıştır [1, 12, 23, 24]. Bu testlerin sonuçları, mMIMO sistemlerin 5G kablosuz iletişim teknolojilerinde önemli gelişmeler sunacağı fikrini desteklemiştir. Kanal kapasitesinin arttırılması, enerji verimliliğinin artması ve gecikmede azalmalar bu gelişmelerden bazılarıdır [25]. mMIMO sistemler, uzaysal oğullama sayesinde kanal kapasitesini kayda değer biçimde arttıracaktır. Aynı frekans bandı ve aynı zaman diliminin kullanılması sayesinde, geleneksel MIMO sistemlere göre 10 kat daha fazla kapasite sunulacağı tahmin edilmektedir [1]. Çok sayıda anten kullanılmasına bağlı olarak yayılım etkileri azalacak ve enerji verimliliği artacaktır [26]. Baz istasyonu ile kullanıcı arasındaki sönümlü kanal kazancının olduğa düşük olduğu durumlarda, çoklu kanallardan alınan bozucu sinyaller nedeniyle, kullanıcı kanal durumunun değişmesini bekler ve bu durum gecikmelere neden olur. mMIMO sistemler ile hzmeleme yöntemlerinin gelişmesine imkn verilmesi nedeniyle gecikmeler azalacaktır [1]. mMIMO sistemler sunduğu birçok avantajın yanı sıra çözülmeyi bekleyen çok sayıda problem de doğurmaktadır.

Hücresel ağlar, genellikle, kullanıcılara yüksek kalitede servis sunmak için çok sayıda anten içeren baz istasyonları kullanmaktadır. Çoklu hücre geometrisi göz önünde bulundurulursa, her hücrede mMIMO sistemler ile donatılmış baz istasyonlarında kanal durum bilgisinin bulunması olduğa önemlidir. Bu amaçla, yukarı yönlü deneme sinyallerinin gönderilmesi (uplink training of pilots) tekniği kullanılır [25,27]. Bu yöntem, her kullanıcıdan baz istasyonuna deneme sinyallerinin gönderilmesi ve kanal durum bilgisinin baz istasyonunda her kullanıcı için tahmin edilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemde temel kısıtlama deneme sinyallerinin kullanıcılar arasındaki paylaşımıdır. Bu durum kanal durum bilgisini deneme sinyali paylaşım şemasına bağlı duruma getirdiği için sistem performansını kayda değer biçimde etkilemektedir. Kullanıcıların hareketliliği, kanalın eşvrelilik süresini (channel coherence time) kısaltarak deneme süresini limitli hale getirir. Bu nedenle, kısıtlı bant genişliği göz önünde bulundurulursa, her hücredeki kullanıcılara birbirine dik deneme sinyallerinin paylaştırılması uygulanabilir olmamaktadır. Bu durum, farklı hücrelerde birbirine dik olmayan deneme sinyallerinin yeniden kullanılmasına neden olmaktadır ve bu duruma deneme sinyallerinin karışması (pilot contamination) adı verilmektedir [28]. Bu problemi aşmak için, birleştirilmif deneme sinyallerinin kullanımını, konumsal ve açısal ayırım yapmaya dayanan yöntemleri içeren birçok çalışma

yapılmıştır [29, 30, 31]. Bayesian kanal tahmini bu problemin çözümü için önerilen bir başka yöntemdir [32]. Kör deneme sinyali arındırma (blind pilot decontamination) yöntemi de daha kısa deneme sinyal süresi sunmasıyla bir başka çözüm önerisi haline gelmiştir [33].

mMIMO sistemlerde çok sayıda anten kullanılmasının getirdiği bir diğer problem baz istasyonlarında oluşan donanımsal komplekslik ve kurulum maliyetlerinin oldukça yüksek oluşudur. mMIMO sistemlere ait baz istasyonunda bulunan RF zinciri kabaca Şekil 2-2'de gösterilmiştir.



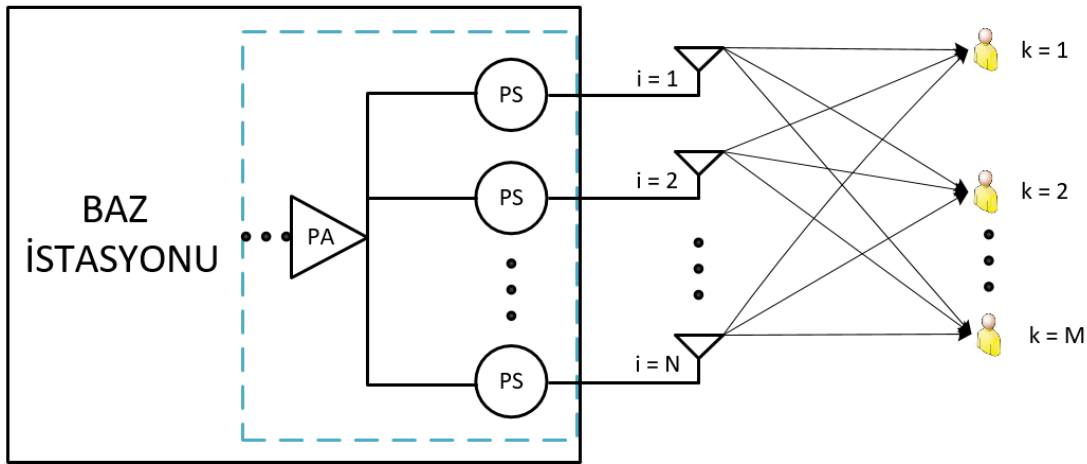
Şekil 2-2 : mMIMO Sistemlerde RF zincirinin genel gösterimi

Kirli kâğıt kodlaması (dirty paper coding -DPC) gibi düşük frekanslarda kullanılabilen dijital önkodlama tekniklerinde iletilen sinyal hem faz açısıyla hem de genliğiyle kontrol edilerek girişimler engellenir ve yüksek performans sağlanır [34]. Ancak, dijital önkodlama yöntemlerinde, RF zincirinde bulunan her anten için atanmış özel temelbant (baseband) gereklidir. Bu yöntemler mMIMO sistemlere uygulanacak olursa, gerekecek RF zincir sayısı nedeniyle karşılanamaz kurulum maliyetleri ve enerji tüketimleri ortaya çıkacaktır. Örneğin, milimetrik dalga boyunda kullanılacak bir adet RF zinciri 250 mW güç tüketimine sahiptir [35]. 64 antenli mMIMO sistem göz önüne alındığında, yalnızca RF zincirleri tarafından tüketilecek güç miktarı 16 W olacaktır. Bu durumun yanı sıra, her bir RF zincirinde bir adet doğrusal PA bulunmalıdır ve bu durum kurulum maliyetlerini ciddi şekilde arttıran bir faktördür. Literatürde yapılan çalışmalar doğrusal olmayan PA kullanımının 6 kat daha fazla güç

verimliliği sağladığını göstermiştir [15]. Bu nedenlerle, RF zincirinde PA sayısını azaltacak ve doğrusal olmayan PA kullanımına olanak sağlayacak CE önkodlama fikri ortaya atılmıştır [16, 17, 18]. Bu yöntem, tüm iletim antenlerindeki sinyal genliğinin birbirine eşit seçilmesine ve ardından bir adet PA ve her anten önünde bulunan sayısal veya analog PS yardımıyla iletim yapılması prensibine dayanır. Yalnızca bir adet PA kullanılacağı için doğrusal olmayan PA kullanımı da mümkün olacaktır.

2.2 Sabit Genlikli Önkodlama

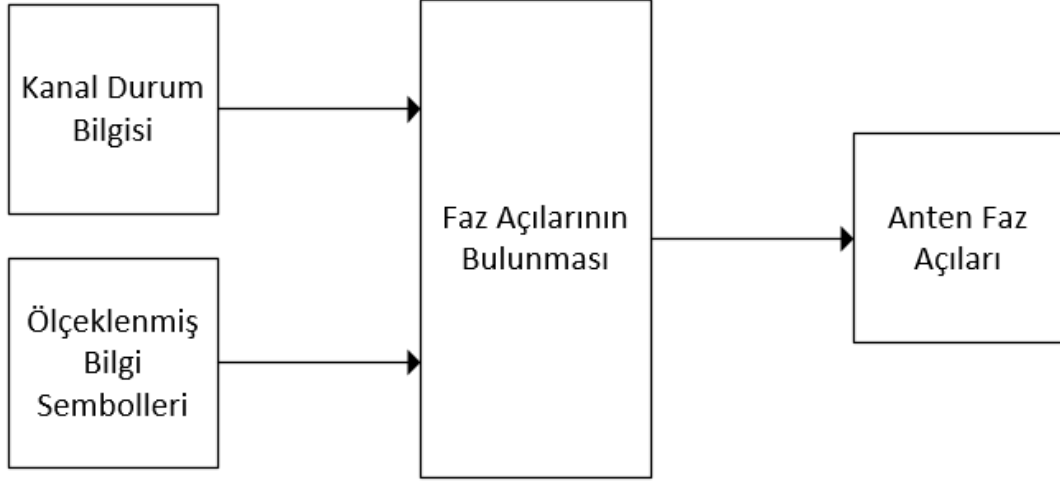
CE önkodlama, temelde baz istasyonunda bulunan tek bir doğrusal olmayan PA ve her bir antenin önünde bulunan PS'ler yardımıyla CE sinyallerin yalnızca faz açılarıyla değişiklik sağlanarak iletim yapılması fikrine dayanmaktadır. Bu tekniğin kullanıldığı durumlarda oluşan baz istasyonu RF zinciri genel hatlarıyla Şekil 2-3'te verilmiştir.



Şekil 2-3 : CE Önkodlama tekniğinde oluşan RF zinciri

Bu iletim şeklinde kullanıcıların her birinde eşit seviyede görülen MUI enerjisi oluşur. MUI girişim enerjisini azaltmak için [16]'da etkili bir yöntem geliştirilmiştir.

Kullanıcılar ve baz istasyonu arasında kanal durum bilgisi bilindiğinde, CE sinyaller, her kullanıcıda MUI enerjisini en az seviyede tutacak şekilde seçilebilmektedir. CE önkodlama tekniğinin kullanıldığı durumda oluşan blok diyagram Şekil 2-4'te verilmiştir.



Şekil 2-4 : CE Önkodlama tekniği kullanıldığında oluşan blok diyagram

Bu bölümde, [16]'da geliştirilen yöntem incelenecek ve bu yöntemin performansı grafiklerle desteklenecektir.

mMIMO sistemde, N adet anten ve tek antene sahip M adet kullanıcının olduğu kabul edilmiştir. Baz istasyonunda bulunan toplam güç P_T olarak ifade edilirse her bir antenden iletilecek güç P_T/N olacaktır. Anten başına sabit genlikli iletim kısıtı altında, i . antenden iletilen kompleks sembol x_i olarak ifade edilirse, $|x_i|^2 = P_T/N$, $i = 1, 2, \dots, N$ olarak tanımlanabilir. i . antenden iletilen kompleks sembol x_i 'nin fazı θ_i olarak tanımlanırsa, $x_i = \sqrt{P_T/N} e^{j\theta_i}$ formunu alacaktır. Karmaşık toplanır beyaz Gauss gürültüsü $w_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ olarak tanımlandığında, k . kullanıcıda alınan sinyal

$$y_k = \sqrt{\frac{P_T}{N}} \sum_{i=1}^N h_{k,i} e^{j\theta_i} + w_k, k = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada $h_{k,i}$ baz istasyonundaki i . anten ve k . kullanıcı arasındaki kompleks kanal kazancını göstermektedir.

Birim enerjili bilgi alfabeti U_k ile, her kullanıcıdaki bilgi sembolünün enerjisi E_k , $k = 1, 2, \dots, M$ ile ve k . kullanıcıya iletilecek bilgi sembolü $u_k \in U_k$ ile gösterilirse, ölçeklenmiş bilgi sembollerinin vektörü

$$u = (\sqrt{E_1}u_1, \dots, \sqrt{E_M}u_M)^T \quad (2)$$

şeklinde tanımlanabilir.

Sabit genlikli iletimin eşit kazanımlı iletimden tamamen farklı olduğu özellikle belirtilmelidir. Tek kullanıcı bir sistem göz önünde bulundurulacak olursa, eşit kazanımlı iletimde, i . antenden kullanıcıya iletilecek birim ortalama enerjili kompleks bilgi sembolü u , $x_i = \sqrt{P_T/N}u$ sinyali ile iletilir [36]. Bu nedenle, genliği sabit değildir ve u sembolünün genliğine göre değişir ($|x_i| = \sqrt{P_T/N}|u|$). Bu durumun aksine, sabit genlikli önkodlama metodunda, her antenden sabit genlikli sinyaller iletilir ($x_i = \sqrt{P_T/N}e^{j\theta_i}$).

CE önkodlamanın kullanıldığı iletim sonucunda, bilgi sembollerinin vektörü u ve faz açılarının vektörü Θ göz önünde bulundurulduğunda, alıcıda alınan sinyal y_k , Denklem 3'teki gibi düzenlenebilir.

$$y_k = \sqrt{P_T}\sqrt{E_k}u_k + \sqrt{P_T}s_k + w_k \quad (3)$$

$$s_k \triangleq \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i}e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k}u_k \right) \quad (4)$$

Burada, $\sqrt{P_T}s_k$ alınan sinyaldeki MUI terimidir ve [16]'da ispatlandığı üzere, anten sayısı sonsuza gittikçe sıfıra yaklaşmaktadır.

k . kullanıcıda alınan sinyaldeki sinyal-gürültü-girişim oranı ise

$$\gamma_k \left(H, E, \frac{P_T}{\sigma^2} \right) = \frac{E_k}{\mathbb{E}_{u_1, \dots, u_M} [|s_k|^2] + \frac{\sigma^2}{P_T}} \quad (5)$$

şeklinde tanımlanacaktır. Bu durumda, MUI enerjisi $\mathbb{E} [|s_k|^2]$ azaltıldıkça, daha yüksek sinyal-gürültü-girişim oranı elde edilecektir. Bu amaçla, baz istasyonunda bulunan önkodlayıcı, bilinen iletilecek semboller (u) için sistemdeki toplam MUI enerjisini en düşüğe tutacak faz açılarını (θ) seçmelidir. Bu durum, Denklem 6'da verilen lineer olmayan en küçük kareler problemini çözmeye zorunluluğu doğurmuştur.

$$\Theta^u = (\theta_1^{(u)}, \dots, \theta_N^{(u)}) = \arg \min_{\theta_i \in [-\pi, \pi), i = 1, \dots, N} g(\Theta, u)$$

$$g(\Theta, u) \triangleq \sum_{k=1}^M |s_k|^2 \quad (6)$$

Bu lineer olmayan en küçük kareler problemi konveks değildir ve birden fazla yerel minimuma sahiptir. [16]'da bu problemin gradyan iniş yöntemleri kullanılarak çözülebileceği tartışılmaktadır. Ancak, gradyan iniş metotlarının yavaş yakınsama sunması nedeniyle [16]'da önerilen özyineleme metodu Algoritma 1'de özetlenmiştir.

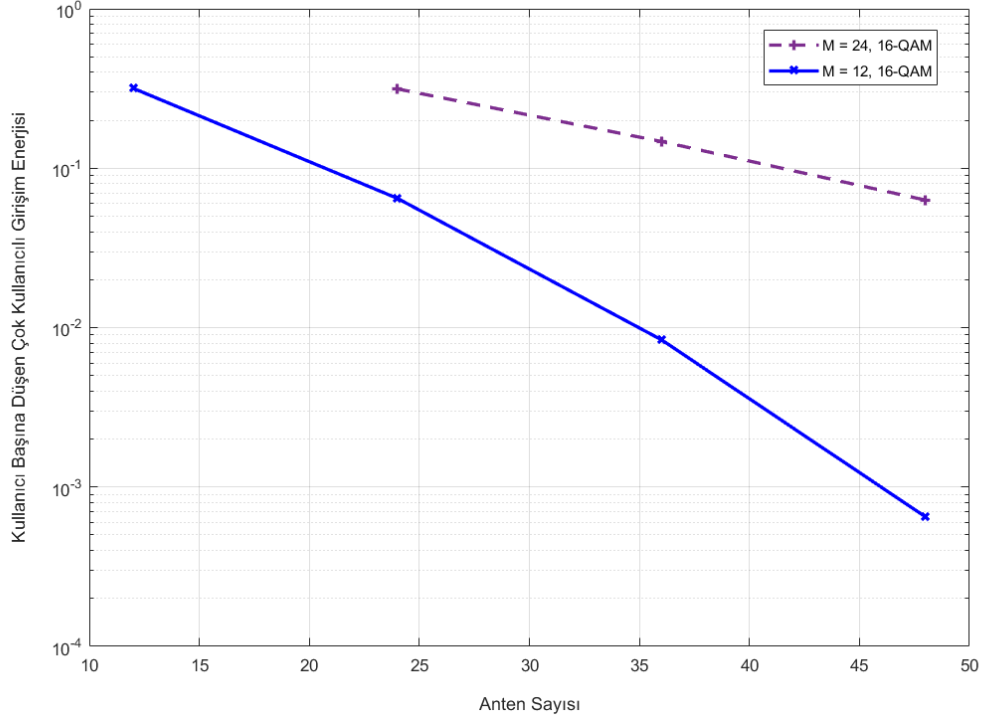
ALGORİTMA 1: CE önkodlama tekniğinde iletim faz açılarının bulunması için önerilen özyineleme metodu

1. $\Theta = 0$
2. for p = 1 : L
3. for q = 1: N
4. Denklem 4 yardımıyla *i.* antenden gelen sinyali göz ardı ederek her bir kullanıcıda oluşan girişimi (s_k) hesapla
5. Bulunan s_k değerlerini, *i.* anten ile *k.* kullanıcı arasındaki kanaldaki kanalın hermişyeni ($h_{k,i}^*$) ile çarp
6. Tüm kullanıcılar için ayrı ayrı bulunan sonuçları topla
7. Bulunan sonucun argümentini al
8. $\theta_i = \pi + argument$
9. end for
10. end for

Algoritma 1’de p özyineleme sayısını temsil etmektedir ve her özyineleme adımı N adet alt-özyineleme adımına sahiptir. Alt-özyineleme sayısı q ile gösterilmektedir. p . özyineleme adımının, q . alt-özyineleme adımının (p,q) ardından elde edilen faz açısı vektörü $(\theta_1^{(p,q)}, \dots, \theta_N^{(p,q)})^T$ olarak tanımlanacaktır. Algoritma 1, her $(p,q+1)$. özyineleme adımında, diğer tüm faz açılarını sabit tutarak yalnızca $(q+1)$. faz açısını $(\theta_{q+1}^{(p,q+1)})$ değiştirerek amaç fonksiyonunu azaltma eğilimindedir. (p,q) . özyineleme adımının ardından, eğer $q < N$ koşulu sağlanıyorsa, algoritma $(p,q+1)$. özyineleme adımına ilerleyecektir. Aksi halde, $(p+1,q)$. özyineleme adımı ile devam edilecektir. Algoritma 1, önceden belirlenen L özyineleme sayısında sonlandırılmaktadır. Deneysel olarak görülmüştür ki, yeterince büyük N/M oranında, L özyineleme sayısının ardından amaç fonksiyonundaki azalma eğilimi oldukça düşüktür. Bu algoritma kullanılarak, $(p,q+1)$. özyinelemenin ardından elde edilen yeni faz açılarının denklemi Denklem 7’de verilmiştir. \emptyset değeri ilgili özyineleme adımında bulunması hedeflenen θ değerini temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} \theta_{q+1}^{(p,q+1)} &= \arg \min_{\boldsymbol{\theta} = (\theta_1^{(p,q)}, \dots, \theta_q^{(p,q)}, \emptyset, \theta_{q+2}^{(p,q)}, \dots, \theta_N^{(p,q)})^T, \emptyset \in [-\pi, \pi]} g(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{u}) \\ &= \pi + \arg \left(\sum_{k=1}^M \frac{h_{k,q+1}^*}{\sqrt{N}} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1, \neq (q+1)}^N h_{k,i} e^{j\theta_i^{(p,q)}} \right) - \sqrt{E_k} u_k \right] \right) \\ \theta_i^{(p,q+1)} &= \theta_i^{(p,q)}, i = 1, 2, \dots, N, i \neq q + 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Bu uygulamanın sonuçlarını göstermek için, birbirinden bağımsız ve eş dağılıma sahip Rayleigh sönümlü kanal göz önünde bulundurularak, sabit bilgi alfabeleri $U_1 = U_2 = \dots = U_M = (16-QAM)$ ve sabit bilgi sembolü enerjisi $E_k = 1, k = 1, \dots, M$ kullanılarak, sistemdeki toplam kullanıcı sayısı $M=12$ ve $M=24$ durumlarında ergodik MUI enerjisinin artan anten sayısının fonksiyonu olarak çizimi Şekil 2-5’te gösterilmiştir.



Şekil 2-5 : CE Önkodlama tekniğinde, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik MUI enerjisi

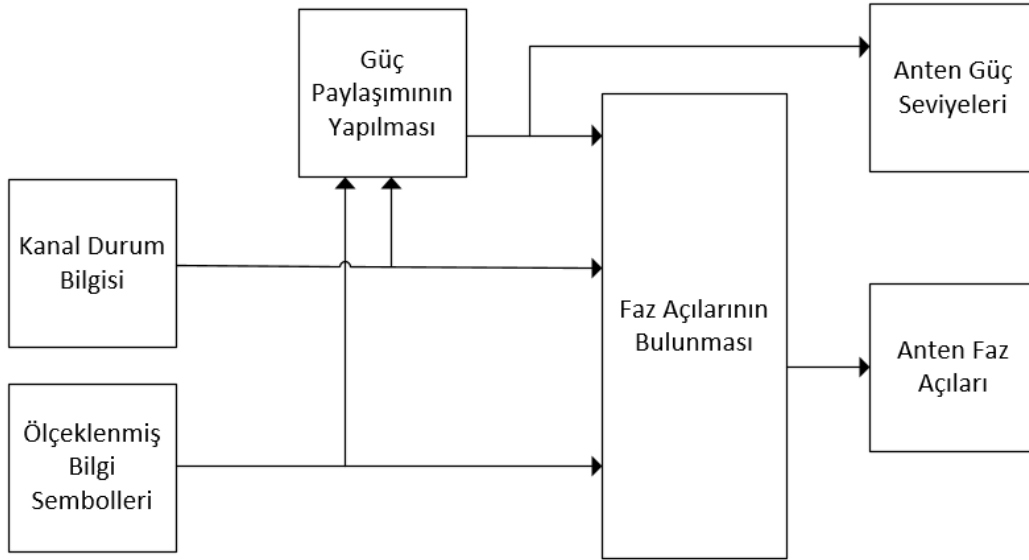
Şekil 2-5'ten görülebileceği üzere, sabit bilgi sembolü enerjisi ve kullanıcı sayısında, kullanıcı başına düşen MUI enerjisi artan anten sayısına bağlı olarak azalma eğilimindedir. Her kullanıcıda eşit miktarda MUI enerjisi gözlemlenmiştir.

Denklem 5'de gösterildiği gibi, sinyal-gürültü-girişim oranını daha fazla arttırabilmek için bilgi sembolünün enerjisi E_k her bir kullanıcı için arttırılmalı ve/veya kullanıcı başına düşen MUI enerjisi en düşük seviyede tutulmalıdır. Simülasyonlar göstermiştir ki, sinyal-gürültü-girişim oranını arttırmak, N ve E_k değerlerini oransal olarak arttırarak mümkün olabilir.

2.3 Çok Genlikli Önkodlama

Bölüm 2.2.'de gösterildiği üzere CE önkodlama, mMIMO sistemlerde baz istasyonlarının kurulum maliyetlerini azaltmak için etkili bir yöntem olsa da, yüksek güç gerekliliği doğurması ve yüksek MUI enerjisi sunması gibi dezavantajlara da sahiptir. Bu alanlarda iyileştirme sunabilmek için, baz istasyonunda birden fazla PA kullanımına dayanan ME önkodlama fikri ortaya atılmıştır [19].

Bu yöntemde, baz istasyonundaki antenler gruplanarak baz istasyonunda bulunan toplam güç bu gruplara dağıtılmıştır. Bu güç dağıtım işlemi iletim faz açılarının bulunduğu aşamadan önce gerçekleştirilmektedir. Ardından her bir gruba ayrı ayrı CE önkodlama tekniği uygulanmıştır. ME önkodlama sistemine ait blok diyagramı Şekil 2-6'da verilmiştir.



Şekil 2-6 : ME Önkodlama tekniği kullanıldığında oluşan blok diyagram

mMIMO bir sistemde N adet anten ve tek antene sahip M adet kullanıcının olduğu kabul edilmiştir. CE önkodlamadan farklı olarak önerilen anten gruplama yöntemi için ZF önkodlama tekniği kullanılmıştır.

ZF önkodlama, kanal durum bilgisi baz istasyonunda mevcutsa sistem performansını kanal kapasitesine yakınsatan bir sinyal işleme metodudur [37, 38]. mMIMO sistemlerde yüksek sayıda anten bulunduğu için, doğrusal önkodlama tekniklerinin kullanılmasıyla hızlı sönmüleme ve hücre içi MUI etkileri yok olurken yalnızca hücreler arası girişim sorun arz etmektedir [7].

mMIMO bir sistemde alınan sinyal ile iletilen sinyal arasındaki ilişki Denklem 8’de verilmiştir.

$$y_{M \times 1} = H_{M \times N} x_{N \times 1} + w_{M \times 1} \quad (8)$$

Denklem 8’de w dairesel simetrik kompleks Gaussian gürültü vektörü, x iletilen sinyal vektörü, y alınan sinyal vektörü ve H kanal matrisidir. İletilecek sembol vektörü u ile gösterilecek olursa, sıfıra zorlayıcı vektör

$$z_f = H^H (H H^H)^{-1} u \quad (9)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada H^H kanal matrisinin hermisyenidir. Böylece iletilen sinyal aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$x_{z_f} = a z_f \quad (10)$$

Burada $a = \sqrt{P_T / z_f^H z_f}$ olarak tanımlanmıştır. ZF önkodlama ile birlikte Denklem 8’de verilen alınan sinyal ile iletilen sinyal arasındaki ilişki, Denklem 9 ve Denklem 10’un yardımıyla, Denklem 11’deki hali alacaktır.

$$\begin{aligned} y_{z_f} &= H x_{z_f} + w \\ &= a u + w \end{aligned} \quad (11)$$

Gürültüden arınmış alınan sinyal ($y_{z_f} - w$) bilgi sembol vektörünün ölçeklenmiş bir haline dönüşmüş olur. Böylece eşzamanlı iletimden kaynaklanan girişim giderilmiş olacaktır.

[19]’da kurulan sistemde n . antenin güç katsayısı $p_{z_f}^n$ olarak ifade edilirse, güç katsayısı vektörü $P_{z_f}^{N \times 1} = [p_{z_f}^1, p_{z_f}^2, \dots, p_{z_f}^N]^T$ şeklinde tanımlanacaktır. Baz istasyonunda a adet PA olduğu varsayılırsa P_{z_f} a adet belli değere sahip olacaktır. ZF vektör Denklem 9 yardımıyla hesaplanacaktır ve elemanlarının mutlak değeri

kullanılarak P_{zf} vektörü oluşturulacaktır. Oluşturulacak her anten grubu için güç katsayısı seçilirken baz istasyonundaki toplam güç kısıtı dikkate alınacaktır.

Her bir gruptaki anten sayısının eşit olduğu kabul edilirse $\frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_a^2}{a} = 1$ olacaktır. Örneğin, $p_1 > 1$ ise, sıfıra zorlayıcı vektörde karşılık gelen mutlak değer teriminin geriye kalan antenlerin yarısından daha fazlasından daha büyük bir değere sahip olduğu anlamına gelecek ve 1 numaralı anten ilk anten grubuna dâhil olacaktır. Eğer baz istasyonunda 2 adet GY varsa, geri kalanlar için $p_2 = \sqrt{2 - p_1^2}$ yeni kistas kabul edilecektir. Bu yöntemle antenler gruplanıp iletim yapıldığında alınan sinyal

$$y_k = \sqrt{\frac{P_T}{N}} \sum_{i=1}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i} + w_k, k = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

şeklinde olacaktır. k . kullanıcıya iletilen bilgi sembolü u_k ile ifade edildiğinde, alınan sinyal ve MUI terimi sırasıyla Denklem 13 ve Denklem 14'teki şekilde ifade edilebilecektir.

$$y_k = \sqrt{P_T} \sqrt{E_k} u_k + \sqrt{P_T} s_k + w_k \quad (13)$$

$$s_k \triangleq \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k} u_k \right) \quad (14)$$

Böylece, Denklem 6'da verilen, CE önkodlama tekniğinde kullanıcılarda görülen MUI enerjisini en düşük seviyede tutacak faz açılarını belirlemek için karşılaşılan lineer olmayan en küçük kareler problemi, ME önkodlama için Denklem 15'de verilen hali almış olacaktır.

$$\theta^u = (\theta_1^{(u)}, \dots, \theta_N^{(u)}) = \arg \min_{\theta_i \in [-\pi, \pi), i = 1, \dots, N} g(\theta, u)$$

$$g(\theta, u) \triangleq \sum_{k=1}^M |s_k|^2 = \sum_{k=1}^M \left| \frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k} u_k \right|^2 \quad (15)$$

Bu problemi çözebilmek için CE önkodlamada önerilen Algoritma 1 güncellenerek Algoritma 2 geliştirilmiştir. Algoritma 2, işleyiş bakımından Algoritma 1'e oldukça

benzerdir ve Algoritma 1, Bölüm 2.2’de detaylıca açıklanmıştır. Algoritma 2’nin uygulanmasının ardından elde edilen yeni faz açılarının denklemi Denklem 16’da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 & \arg \min_{\Theta} g(\Theta, \mathbf{u}) \\
 & \Theta = \left(\theta_1^{(p,q)}, \dots, \theta_q^{(p,q)}, \emptyset, \theta_{q+2}^{(p,q)}, \dots, \theta_N^{(p,q)} \right)^T, \emptyset \in [-\pi, \pi) \\
 & = \pi + \arg \left(\sum_{k=1}^M \frac{h_{k,q+1}^*}{\sqrt{N}} \left[\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1, \neq (q+1)}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i^{(p,q)}} \right] - \sqrt{E_k} u_k \right) \\
 & \theta_i^{(p,q+1)} = \theta_i^{(p,q)}, i = 1, 2, \dots, N, i \neq q + 1. \tag{16}
 \end{aligned}$$

ALGORİTMA 2: ÇG önkodlama tekniğinde iletim faz açılarının bulunması için önerilen özyineleme metodu

1. Sıfıra zorlayıcı vektörünü Denklem 10 yardımıyla hesapla

$$\mathbf{v}_{zf} = [v_{zf}^1, v_{zf}^2, \dots, v_{zf}^N]^T$$

2. Güç katsayıları vektörünü hesapla

$$\mathbf{v}_{abs} = [|v_{zf}^1|, |v_{zf}^2|, \dots, |v_{zf}^N|]^T$$

3. Güç katsayıları vektörünü kullanarak antenleri grupta

4. $\Theta = 0$

5. for $p = 1 : L$

6. for $q = 1 : N$

7. Denklem 14 yardımıyla i . antenden gelen sinyali göz ardı ederek her bir kullanıcıda oluşan girişimi (s_k) hesapla

8. Bulunan s_k değerlerini, i . anten ile k . kullanıcı arasındaki kanaldaki hermişyeni ($h_{k,i}^*$) ile çarp

9. Tüm kullanıcılar için bulunan sonuçları topla

10. Bulunan sonucun argümentini al

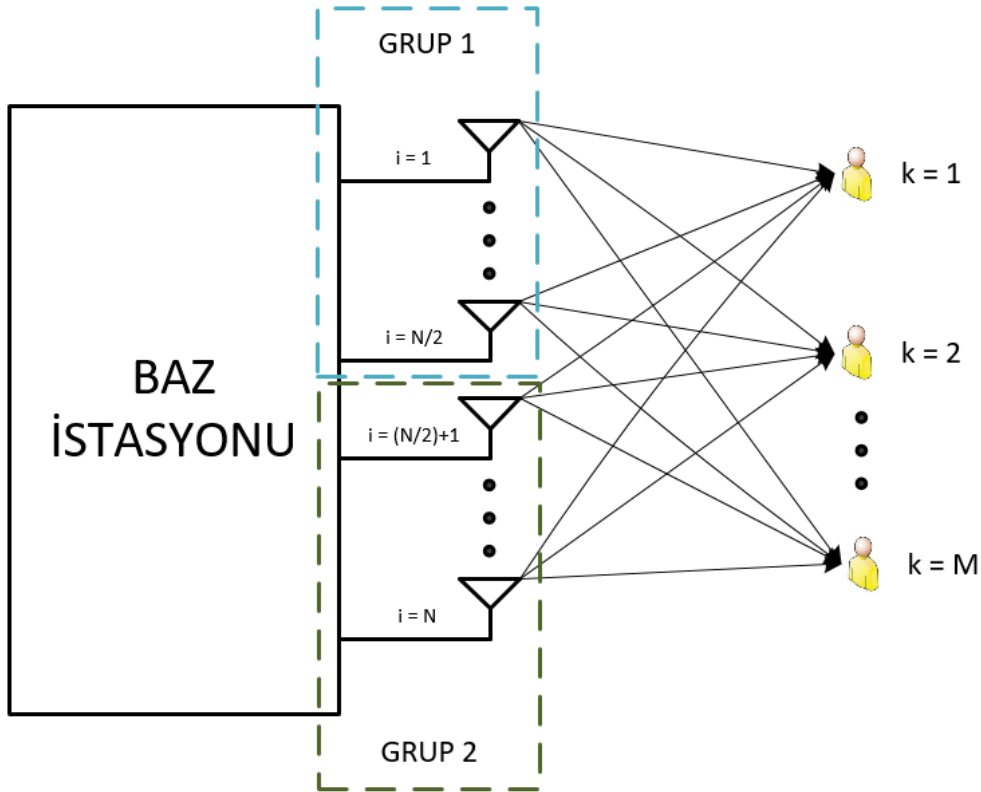
11. $\theta_i = \pi + argument$

12. end for

13. end for

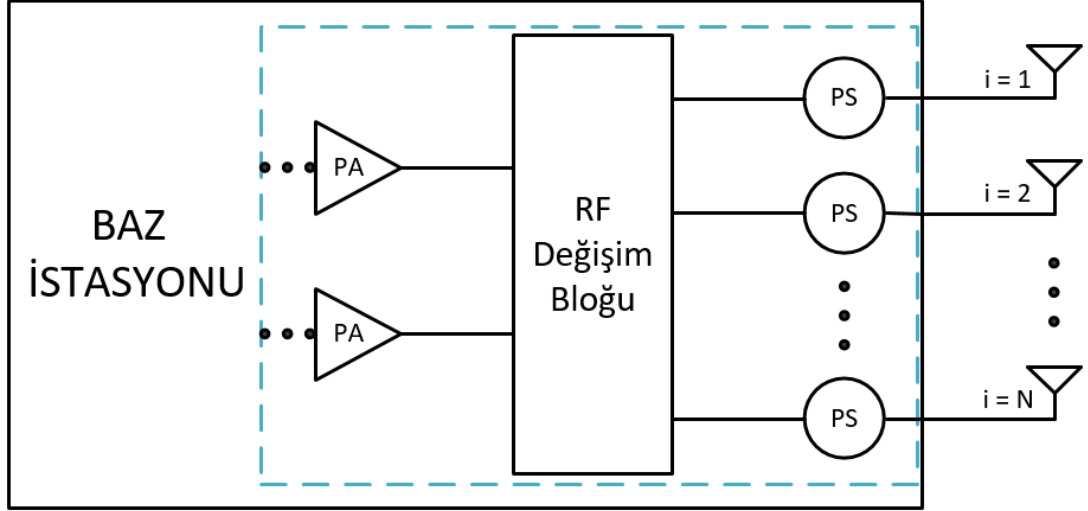
Bu uygulamanın sonuçlarını göstermek için [16]'da baz istasyonunda bulunan farklı PA sayılarına dayanan simülasyonlar yapılmıştır. Örneğin, baz istasyonunda iki PA bulunduğu durumda kullanılan tekniğe iki genlikli önkodlama, üç PA bulunduğu durumda kullanılan tekniğe üç genlikli önkodlama ismi verilmiştir.

İki genlikli önkodlama tekniğinde güç katsayısı vektörü p_1 ve p_2 olarak isimlendirilen yalnızca iki farklı değere sahip olacaktır. Her iki PA tarafından beslenen anten sayısı eşit olduğu kabul edilirse $p_1^2 + p_2^2 = 2$ denklemi kurulabilecektir. Ardından ZF vektör ve mutlak değer vektörü hesaplanarak antenler gruplanacak ve Şekil 2-7'de gösterildiği gibi antenler iki gruba ayrılacaktır.



Şekil 2-7 : İki genlikli önkodlama tekniği kullanıldığında antenlerin gruplanması

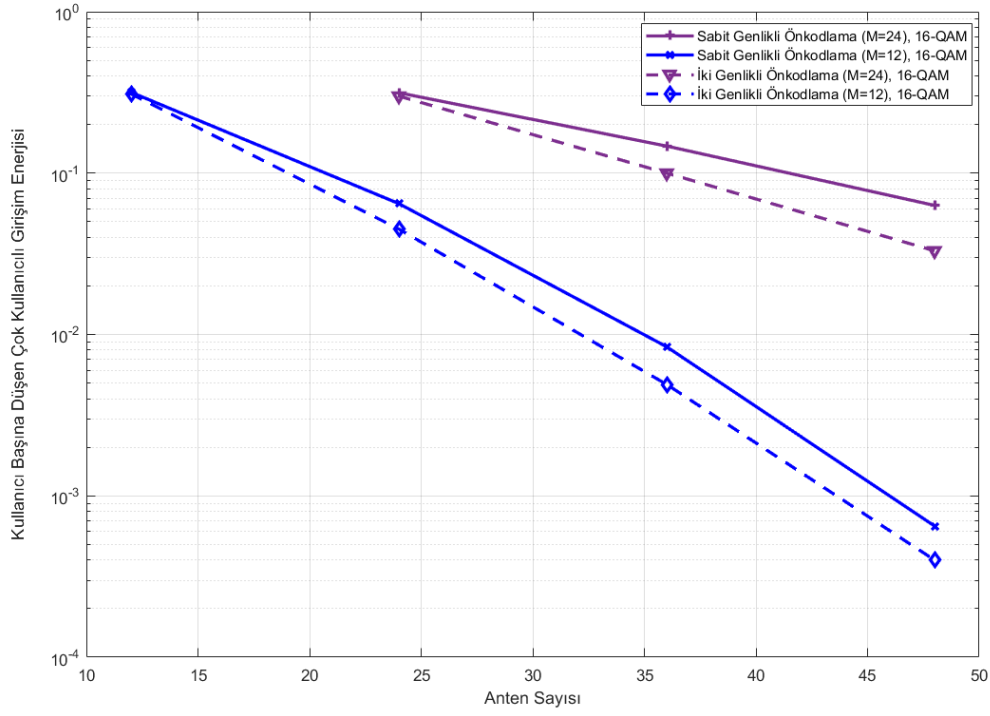
Son olarak bu iki gruba da ayrı ayrı CE önkodlama tekniği uygulanacaktır. İki genlikli önkodlama tekniğinin baz istasyonunda oluşturduğu RF zinciri gösterimi Şekil 2-8'de verilmiştir.



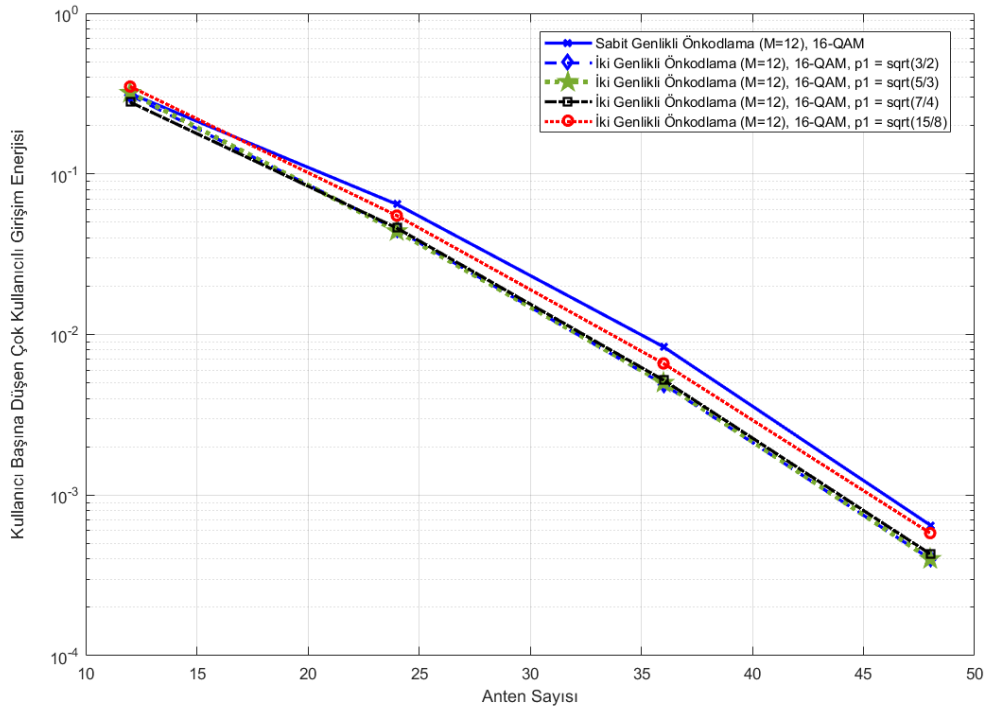
Şekil 2-8 : İki genlikli önkodlama tekniği kullanıldığında baz istasyonunda oluşacak RF zinciri

İki genlikli önkodlama tekniğinin sonuçlarını göstermek adına $p_1 = \sqrt{3/2}$ ve $p_2 = \sqrt{1/2}$ kabul edilerek simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 2-9'da verilen benzetim sonuçlarına göre, CE önkodlamaya göre yine her kullanıcıda eşit miktarda görülen kullanıcı başına düşen MUI enerjisinin kayda değer biçimde azaltıldığı ortaya konulmuştur.

Güç seviyelerinin MUI enerjisine etkilerini araştırmak için, $p_1 = \sqrt{3/2}$, $p_1 = \sqrt{5/3}$, $p_1 = \sqrt{7/4}$ ve $p_1 = \sqrt{15/8}$ değerleri için benzetim tekrarlanmıştır. Şekil 2-10'da verilen benzetim sonuçlarına göre $p_1 = \sqrt{15/8}$ dışındaki tüm değerler benzer performans gösterirken, bu değerde performans kaybı yaşanmıştır. p_1 değeri, 2'ye oldukça yakınsadığı için bu performans kaybı beklenenin dışında değildir.



Şekil 2-9 : CE önkodlama ve iki genlikli önkodlama tekniklerinde, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik MUI enerjisi



Şekil 2-10 : CE önkodlamada, antenlere farklı seviyelerde güç dağıtılan iki genlikli önkodlama ile artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik MUI enerjisi bakımından karşılaştırılması

2.4 Dikgen Olmayan Çoklu Erişim

Çoklu erişim teknikleri kablosuz haberleşme sistemlerinin tanımlanmasında kilit bir rol oynamıştır. 1G sistemlerde frekans bölmeli çoklu erişim (frequency division multiple access –FDMA), 2G sistemlerde zaman bölmeli çoklu erişim (time division multiple access –TDMA), 3G sistemlerde kod bölmeli çoklu erişim (code division multiple access –CDMA) ve 4G sistemlerde OFDMA teknikleri kullanılmıştır.

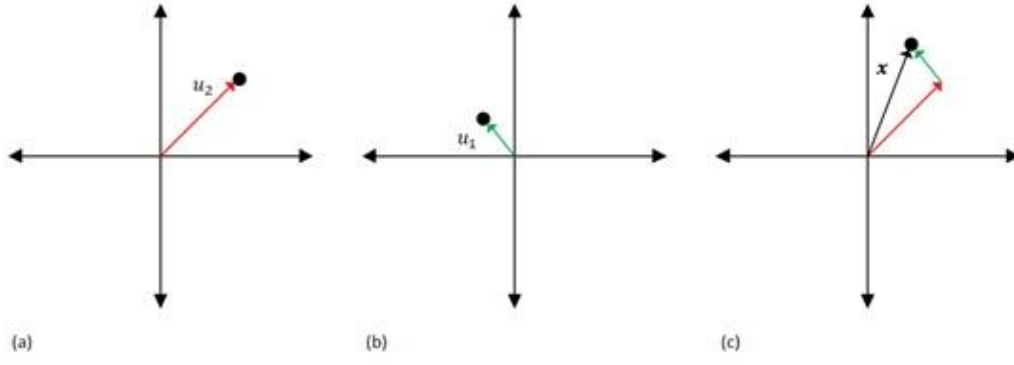
Bölüm 1’de özetlenen, yeni nesil 5G haberleşme sistemlerinde ortaya çıkan isterleri karşılamak adına önerilen tekniklerden biri de NOMA olmuştur [39]. Bu teknikte güç veya kod ekseninde çoğullama yapılarak farklı kullanıcıların aynı frekans bandında ve aynı zaman dilimi içerisinde birbirleriyle haberleşebilmesine olanak sağlanmaktadır.

NOMA tekniğinde, sistemde bulunan kullanıcılar birbirleriyle eşleştirilir ve bu aynı kümede bulunan kullanıcıların sembolleri süperpozisyon kodlaması yapılarak, farklı güç katsayıları ile çarpılır ve toplanarak gönderilir. Süperpozisyon kodlaması ilk olarak [41]’de, birden fazla alıcıya eşzamanlı olarak tek kaynaktan bilginin iletilebilmesi için önerilmiştir. Örneğin, iki kullanıcılı bir sistemde kullanıcılara ait semboller u_1 ve u_2 olarak, bu sembollerin iletileceği güç seviyeleri p_1 ve p_2 ile ifade edilirse süperpozisyon sonrası iletilecek sinyal Denklem 17’de verilmiştir.

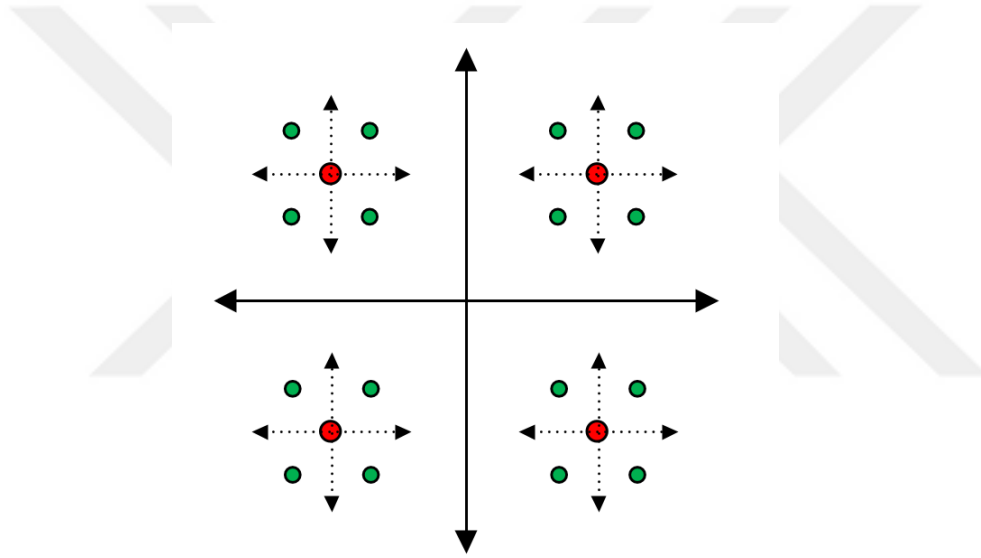
$$x = \sqrt{p_1}u_1 + \sqrt{p_2}u_2 \quad (17)$$

İletilecek sembolün oluşturulmasının sinyal yıldız kümeleri üzerindeki gösterimi Şekil 2-11’de verilmiştir.

Sistemdeki iki kullanıcılarında iki bit iletmeyi denediği (4-QAM) bir sistemde, her iki kullanıcının bitleri birleştirilerek toplamda dört bit (16-QAM) iletim yapılmış olacaktır. Bu örnek için yıldız kümelerinin gösterimi Şekil 2-12’de verilmiştir.



Şekil 2-11 : 4-QAM için (a) Birinci kullanıcının sembolü, (b) İkinci kullanıcının sembolü, (c) Süperpozisyon kodlaması sonunda iletilecek sembol



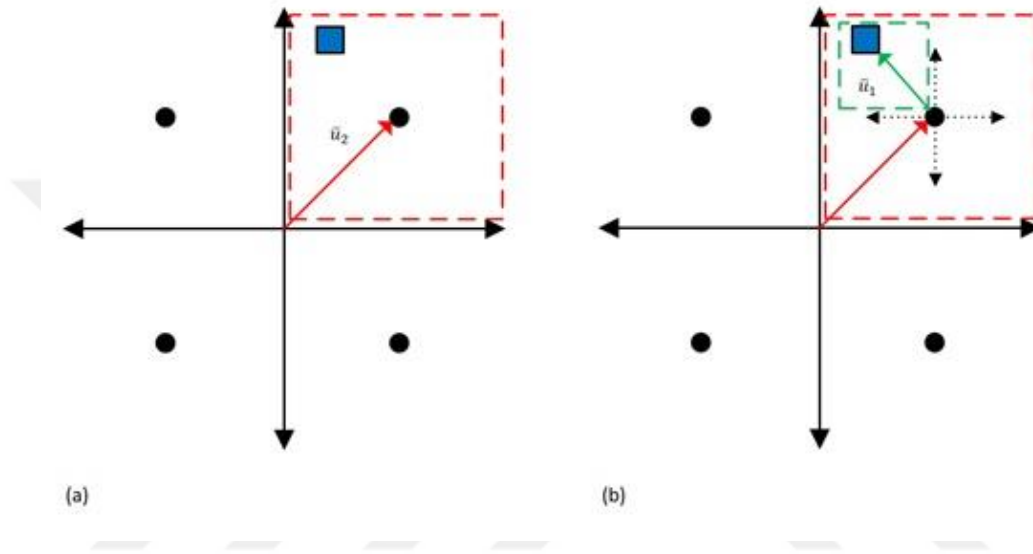
Şekil 2-12 : NOMA'da yıldızkümesinin oluşturulması

Alıcı tarafında, her kullanıcı Şekil 2-13'te özetlenen SIC tekniğini kullanarak kendi sembollerini sezmeğe çalışır. Tek antenli bir istasyonunun olduğu sistem göz önünde bulundurulursa, kullanıcılarda alınan sinyal

$$y_k = h_k x + w_k, k = 1,2 \quad (18)$$

şeklinde yazılabilir ve burada h_k baz istasyonu ile k . kullanıcı arasındaki karmaşık kanal kazancını, w_k ise k . kullanıcıda oluşan $N_{0,k}/2$ güç spektral yoğunluğuna sahip toplanır beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise –AWGN) değerini ifade etmektedir. İki kullanıcıya sahip bu sistemde, $|h_1|^2/N_{0,1} > |h_2|^2/N_{0,2}$

durumunun oluştuğu kabul edilirse, ikinci kullanıcıda SIC ihtiyacı oluşmamaktadır. Burada, ikinci kullanıcı ilk kullanıcının sembolüne gürültü gibi davranacak ve kendi sembolünü sezme işlemi gerçekleştirecektir. Birinci kullanıcı ise, kendi sembollerini sezebilmek için, öncelikle ikinci kullanıcının sembolünü sezecek ve bu sembolü alınan sinyalden çıkararak kendi sembolünü sezmeye çalışacaktır.



şekil 2-13 : Süperimpoze sinyallerin çözülmesi, (a) İkinci kullanıcının sembolünün bulunması, (b) Birinci kullanıcının sembolünün bulunması

[21] ve [40]'ta NOMA tekniğinin sistem performansına katkısı araştırılmıştır. Yapılan araştırmaların sonuçlarına göre, eşleştirilen kullanıcılar arasında kanal durumları bakımından fark arttıkkça, NOMA, TDMA tekniğine göre daha yüksek performans sunmaktadır. Bu nedenle kullanıcı eşleştirmeleri yapılırken en iyi kanal durumuna sahip kullanıcı ile en kötü kanal durumuna sahip kullanıcının aynı kümede olması NOMA için kritik bir öneme sahiptir.



3. SABİT GENLİKLİ ÖNKODLAMA VE DİKGEN OLMAYAN ÇOKLU ERİŞİM TEKNİKLERİNİN BİRLİKTE KULLANIMI

3.1 Amaç

Bölüm 2.2’de bahsedildiği üzere CE önkodlama, mMIMO sistemlerin getirmiş olduğu baz istasyonu kurulum maliyetlerini düşürmek ve çok kullanıcı girişim enerjisini azaltmak için etkili bir yöntemdir. Bununla birlikte, kullanıcıların kanal durumları, ihtiyaçları ve taleplerinden bağımsız olarak her kullanıcıya eşit miktarda çok kullanıcı girişim enerjisi sunulmaktadır.

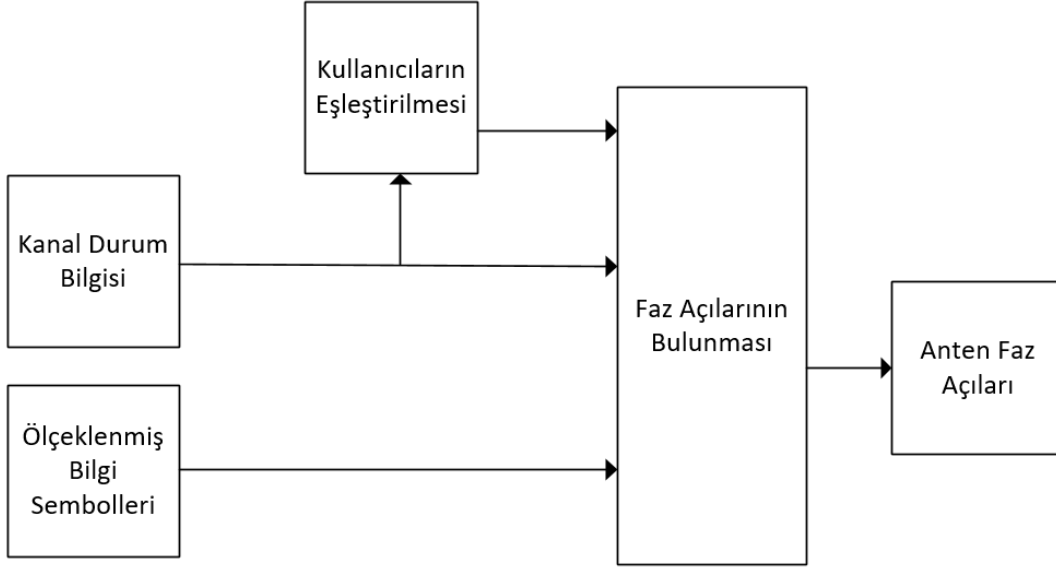
Bu bölümde, sistemdeki kullanıcılara eşit miktarda sunulan çok kullanıcı girişim enerjisini farklılaştırmak amacıyla, CE önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanımını inceledik. Bunu başarabilmek için, sistemdeki kullanıcıları kanal durumlarına göre grupladık. Aynı grupta bulunan kullanıcıların sembollerinin süperpozisyon kodlaması kullanarak farklı güç seviyelerinde, CE sinyaller aracılığıyla iletilmesini hedefledik. Kullanıcılarda görülen çok kullanıcı girişim enerjisini azaltmak amacıyla, sistemde bulunan antenlerin faz açılarını belirleyen özyineleme metodunu NOMA tekniğine uygun hale getirdik. Alıcı tarafta SIC kullanarak kullanıcıların kendi verilerini sezmesini amaçladık. Birbirinden bağımsız ve eş dağılıma sahip Rayleigh sönümlü kanallar üzerinde benzetimler yaparak, bu uygulamanın sonuçlarını araştırdık.

3.2 Sistem Modeli

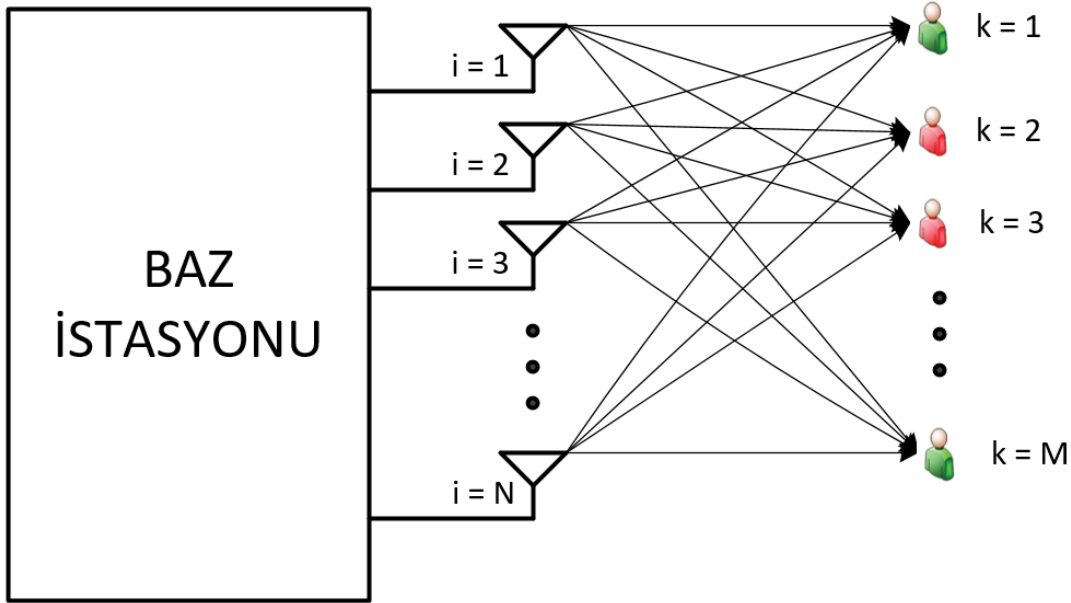
CE önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda oluşan blok diyagram Şekil 3-1’de verilmiştir ve sistemin gerçekleşmesi için yapılan çalışmalar bu bölümde açıklanacaktır.

Bu çalışmada kurulan sistem modeli Bölüm 2.2’de verilen sistem modeline oldukça benzerdir ve Şekil 3-2’de gösterilmiştir.

Baz istasyonunda N adet anten bulunan ve tek antenli M adet kullanıcıdan oluşan mMIMO yayın kanalı göz önünde bulundurulacaktır.



Şekil 3-1 : CE önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda oluşan blok diyagram



Şekil 3-2 : CE Önkodlama ve NOMA'nın birlikte kullanım durumunda sistem modeli

$x_i = \sqrt{P_T/N} e^{j\theta_i}$ sembollerinin iletilmesinin ardından alınan sinyal Denklem 1'de ifade edilmiştir. Denklem 1'de tanımlanan $h_{k,i}$ baz istasyonundaki i . anten ve k . kullanıcı arasındaki kompleks kanal kazancını göstermektedir ve bu bölümde

$$h_{k,i} = \tilde{h}_{k,i} / \sqrt{d_k^\beta} \quad (18)$$

olarak tanımlanmıştır. $\tilde{h}_{k,i}$ çok yollu sönümlenme etkisini ifade eden rastgele değişkendir. Kullanıcıların verilen yarıçap içerisinde düzgün dağıldığı kabul edilmiştir ve d_k , baz istasyonu ile k . kullanıcı arasındaki mesafeyi belirtir. Bu çalışmada uzaklık etkisi $\beta = 4$ kabul edilecektir.

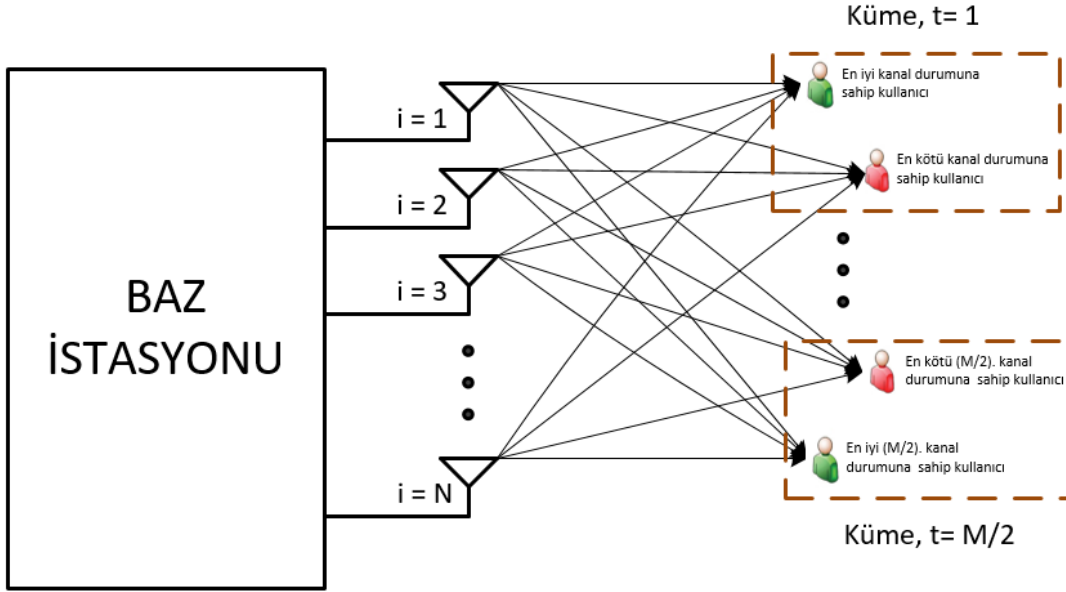
Güç ekseninde çoğullamaya dayanan NOMA tekniğinde iki kullanıcı birbiriyle kanal durum bilgilerine dayanarak eşleştirilmektedir. İyi kanal durumuna sahip kullanıcı ile kötü kanal durumuna sahip kullanıcının eşleştirilmesi, güç ekseninde çoğullamaya dayanan NOMA tekniğinde kritik bir öneme sahiptir. Bu şekilde, M (çift kabul edilmektedir) adet kullanıcının bulunduğu bir sistemde $t = 1, 2, \dots, M/2$ adet küme oluşmaktadır. Kullanıcıları eşleştirmek için Algoritma 3 geliştirilmiştir.

ALGORİTMA 3: Kullanıcıları eşleme metodu

1. Kullanıcıların kanal durumlarını Denklem 18 yardımıyla hesapla
2. En iyi kanal durumuna sahip ($|h_k|$ en büyük olan) ilk $M/2$ kullanıcıyı, en iyi kanal durumuna sahip kullanıcıdan en kötü kanal durumuna sahip kullanıcıya doğru olmak üzere yeniden sırala
3. En kötü kanal durumuna sahip ($|h_k|$ en küçük olan) ilk $M/2$ kullanıcıyı, en kötü kanal durumuna sahip kullanıcıdan en iyi kanal durumuna sahip kullanıcıya doğru olmak üzere yeniden sırala
4. İkinci ve üçüncü aşamada oluşan sıralamalarda, ilk elemanları birbirleriyle, ikinci elemanları birbirleriyle olacak şekilde tüm kullanıcılar için, kullanıcıları birbirleriyle eşleştir. Böylece en iyi kanal durumuna sahip kullanıcı ile en kötü kanal durumuna sahip kullanıcı birbirleriyle eşleşecektir.

Algoritma 3'te özetlendiği üzere en iyi kanal durumuna sahip kullanıcı ($|h_k|$ en büyük olan) $k=1$, en kötü kanal durumuna sahip kullanıcı ($|h_k|$ en küçük olan) $k=(M/2)+1$, en iyi ikinci kanal durumuna sahip kullanıcı $k=2$, en kötü ikinci kanal durumuna sahip

kullanıcı $k=(M/2)+2$ olacak şekilde kullanıcı sırası tüm kullanıcılar için güncellenmiştir. Böylece, $k=1, \dots, M/2$ kullanıcıları iyi kanal durumuna sahip olanlar ve $k=((M/2)+1), \dots, M$ kullanıcıları da kötü kanal durumuna sahip kullanıcılar olarak belirtilebilir. Eşleştirmeler yapılırken, $k=m$. kullanıcı ile $k=(M/2)+m$. kullanıcı aynı kümeye konulmuştur. Eşleştirme işlemi tüm kullanıcılar için bu kurala uygun olarak sağlanmıştır. Kullanıcı eşleştirmelerinin ardından sistem özeti Şekil 3-3'te verilmiştir.



Şekil 3-3 : Kullanıcı eşleştirmelerinin ardından sistem özeti

Aynı kümede bulunan kullanıcıların sembolleri süperpozisyon kodlaması kullanılarak farklı güç seviyeleri ile iletilmiş olur. Aynı kümede kötü kanal durumuna sahip kullanıcılara ait semboller v_t ve iyi kanal durumuna sahip kullanıcılara ait semboller φ_t olarak ifade edilirse, süperpozisyon kodlamasının ardından her bir grup için ölçeklenmiş bilgi sembolü

$$u_t = \sqrt{\alpha} v_t + \sqrt{1-\alpha} \varphi_t \quad (19)$$

olarak tanımlanabilir. Bu denklemde $\alpha \in [0,1]$, v_t ve φ_t arasında gücün hangi oranda paylaşıldığını gösterir. Bu çalışmada, v_t ve φ_t 'nin 16-QAM noktalarından seçilen birim enerjili ve bağımsız bilgi sembolleri olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda, süperpozisyon kodlamasının ardından u_t 256-QAM kiplemeyle iletilmiş olacaktır.

Aynı kümede, kötü kanal durumuna sahip kullanıcı, diğer kullanıcının sembolüne gürültü gibi davranacak ve yalnızca kendi verilerini sezme işlemini gerçekleştirecektir. İyi kanal durumuna sahip kullanıcı için ise ardışık girişim gidericiye ihtiyaç duyulacaktır. Kendi sembollerini bulabilmek için, öncelikli olarak diğer kullanıcının sembollerini sezme işlemini gerçekleştirecek ve bu sembollerini alınan sinyalden çıkarma işlemi uygulayacaktır.

İyi kanal durumuna sahip kullanıcının ilk olarak aynı kümede bulunduğu diğer kullanıcının sembolünü (v_t) sezmesi gerekmektedir. Ardından kendi sembolünü (φ_t) sezecektir. Diğer kullanıcının sembolünü sezme sırasında v_t sembolü hatalı sezilirse, bu hatalı sezme işleminin ardından algılayacağı sembol \hat{v}_t ile ve iyi kanal durumuna sahip kullanıcıda oluşan çok kullanıcılı girişim $\hat{s}_{k\varphi}$ ile ifade edilecektir.

Diğer kullanıcının sembolünü sezme işlemi başarılı olduğunda, iyi kanal durumuna sahip kullanıcıda oluşan çok kullanıcılı girişim $s_{k\varphi}$ ile gösterilecektir. Bu çalışmanın devamında tanımlanacak denklemlerde $s_{k\varphi}$ ifadesi yer alacaktır. Bu ifade, v sembollerinin hatalı sezildiği durumlarda $\hat{s}_{k\varphi}$ ifadesi ile değiştirilmelidir.

Kötü kanal durumuna sahip kullanıcının ise yalnızca kendi sembolünü (v_t) sezmesi yeterlidir. Bu kullanıcıda oluşan çok kullanıcılı girişim s_{kv} ile ifade edilecektir.

$$\hat{s}_{k\varphi} \triangleq \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i} e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k} (\sqrt{\alpha} \hat{v}_k + \sqrt{1-\alpha} \varphi_{k+M/2}) \right) \quad (20)$$

$$s_{k\varphi} \triangleq \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i} e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k} (\sqrt{\alpha} v_k + \sqrt{1-\alpha} \varphi_{k+M/2}) \right) \quad (21)$$

$$s_{kv} \triangleq \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i} e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k} \sqrt{\alpha} v_k \right) \quad (22)$$

k . kullanıcıda alınan sinyaldeki sinyal-gürültü-girişim oranı ise

$$\gamma_k \left(H, E, \frac{P_T}{\sigma^2}, \alpha \right) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{(1-\alpha) E_k}{\mathbb{E}_{\varphi_1, \dots, \varphi_{M/2}} [|s_{k\varphi}|^2] + \sigma^2 / P_T} & 0 < k \leq M/2 \\ \frac{(\alpha) E_k}{\mathbb{E}_{v_{(M/2)+1}, \dots, v_M} [|s_{kv}|^2] + \sigma^2 / P_T} & (M/2) < k \leq M \end{array} \right\} \quad (23)$$

şeklinde tanımlanacaktır. Bu durumda, MUI enerjisi $\mathbb{E}[|s_{k_v}|^2]$ ve $\mathbb{E}[|s_{k_\varphi}|^2]$ azaltıldıkça, daha yüksek sinyal-gürültü-girişim oranı elde edilecektir. Bu amaçla, baz istasyonunda bulunan ön kodlayıcı, bilinen iletilecek semboller (u) için sistemdeki toplam çok kullanıcılı girişim enerjisini en düşüğe tutacak faz açılarını (θ) seçmelidir. Bu durumda, Denklem 6'da verilen, CE önkodlama tekniğinde kullanıcılarda görülen MUI enerjisini en düşük seviyede tutacak faz açılarını belirlemek için karşılaşılan lineer olmayan en küçük kareler problemi, CE önkodlama ve NOMA teknikleri birlikte kullanıldığında Denklem 24'te verilen halini almış olacaktır.

$$\theta^u = (\theta_1^{(u)}, \dots, \theta_N^{(u)}) = \arg \min_{\theta_i \in [-\pi, \pi), i = 1, \dots, N} g(\theta, u)$$

$$g(\theta, u) \triangleq \sum_{k=1}^{M/2} |s_{k_\varphi}|^2 + \sum_{k=(M/2)+1}^M |s_{k_v}|^2 \quad (24)$$

Bu problemi çözebilmek için Bölüm 2.2.'de önerilen Algoritma 1 güncellenerek Algoritma 4 geliştirilmiştir.

Algoritma 4'ün uygulanmasının ardından bulunan faz açılarının denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\theta_{q+1}^{(p,q+1)} = \arg \min_{\theta = (\theta_1^{(p,q)}, \dots, \theta_q^{(p,q)}, \emptyset, \theta_{q+2}^{(p,q)}, \dots, \theta_N^{(p,q)})^T, \emptyset \in [-\pi, \pi)} g(\theta, u)$$

$$= f(\delta) \quad (25)$$

Bu denklemde $f(x) = \pi + \arg(x)$ olarak tanımlanmış olup, δ aşağıda tanımlanmıştır.

$$\delta = \left(\left(\sum_{k=1}^{\frac{M}{2}} \frac{h_{k,q+1}^*}{\sqrt{N}} \left[\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1, \neq (q+1)}^N h_{k,i} e^{j\theta_i^{(p,q)}} - \sqrt{E_k} (\sqrt{\alpha} v_k + \sqrt{1-\alpha} \varphi_{k+\frac{M}{2}}) \right] \right) \right) + \left(\sum_{k=(\frac{M}{2})+1}^M \frac{h_{k,q+1}^*}{\sqrt{N}} \left[\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1, \neq (q+1)}^N h_{k,i} e^{j\theta_i^{(p,q)}} - \sqrt{E_k} \sqrt{\alpha} v_k \right] \right)$$

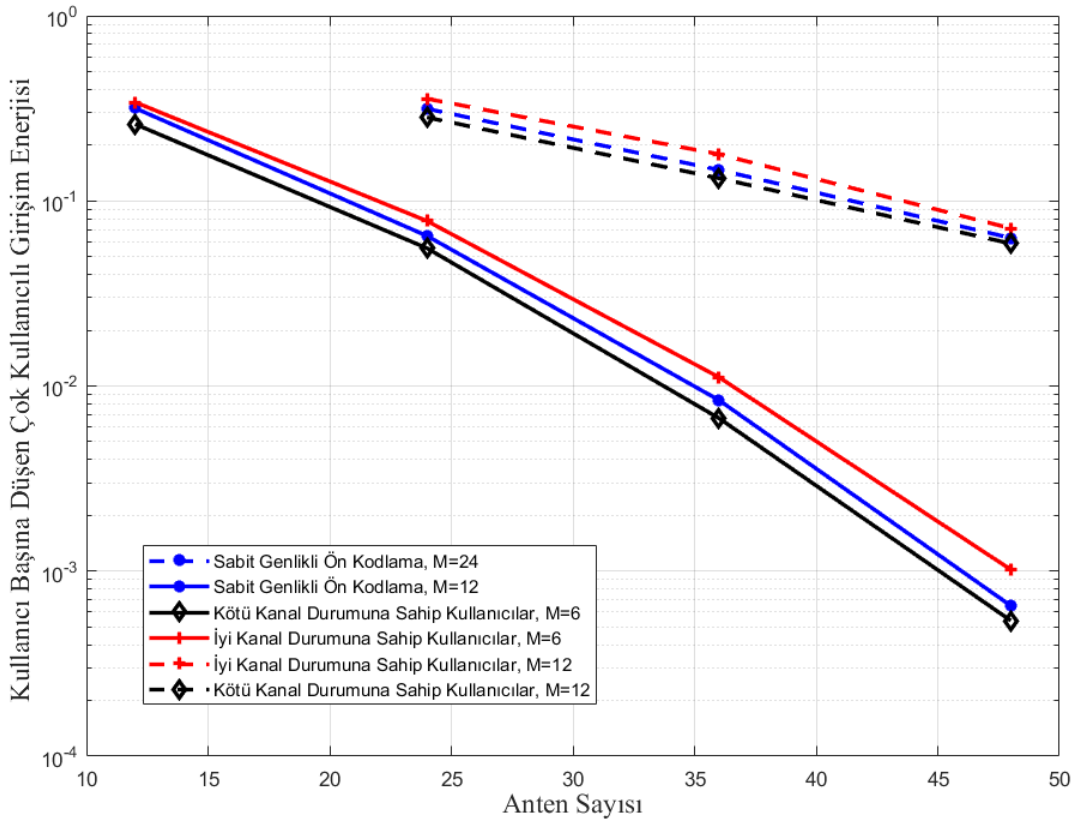
$$\theta_i^{(p,q+1)} = \theta_i^{(p,q)}, i = 1, 2, \dots, N, i \neq q + 1. \quad (26)$$

ALGORİTMA 4: CE önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda iletim faz açılarının bulunması için önerilen özyineleme metodu

1. Kullanıcıların kanal durumlarını ($h_{k,i}$) hesapla
2. Kullanıcıları Algoritma 3 yardımıyla grupla
3. Aynı gruptaki kullanıcıların sembollerini süperpozisyon kodlaması kullanarak superimpoze hale getir
4. $\Theta = 0$
5. for $p = 1 : L$
6. for $q = 1 : N$
7. Denklem 20, Denklem 21 ve Denklem 22'yi kullanarak, i . antenden gelen sinyali göz ardı ederek her bir kullanıcıda oluşan girişimi (s_k) hesapla
8. Bulunan s_k değerlerini, i . anten ile k . kullanıcı arasındaki kanalın hermisyeni ($h_{k,i}^*$) ile çarp
9. Tüm kullanıcılar için bulunan sonuçları topla. Böylece δ bulunmuş olur.
10. $f(\delta)$ 'i hesapla. i . antenin faz açısı bulunmuş olur.
11. end for
12. end for

3.3 Sonuçlar

Bu uygulamanın sonuçlarını göstermek için, birbirinden bağımsız ve eş dağılıma sahip Rayleigh sönümlü kanal gözönünde bulundurularak, sabit bilgi alfabeleri $U_1 = U_2 = \dots = U_M = (16\text{-QAM})$ ve sabit bilgi sembolü enerjisi $E_k = 1, k = 1, \dots, M$ kullanılarak, $\alpha = 0.8$ değeri için, sistemdeki toplam kullanıcı sayısı $M=12$ ve $M=24$ durumlarında ergodik MUI enerjisinin artan anten sayısının fonksiyonu olarak izimi Şekil 3-4'te gösterilmiştir.



Şekil 3-4 : CE nkodlama ile NOMA birlikte kullanıldığında, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik çok kullanıcılı girişim enerjisi

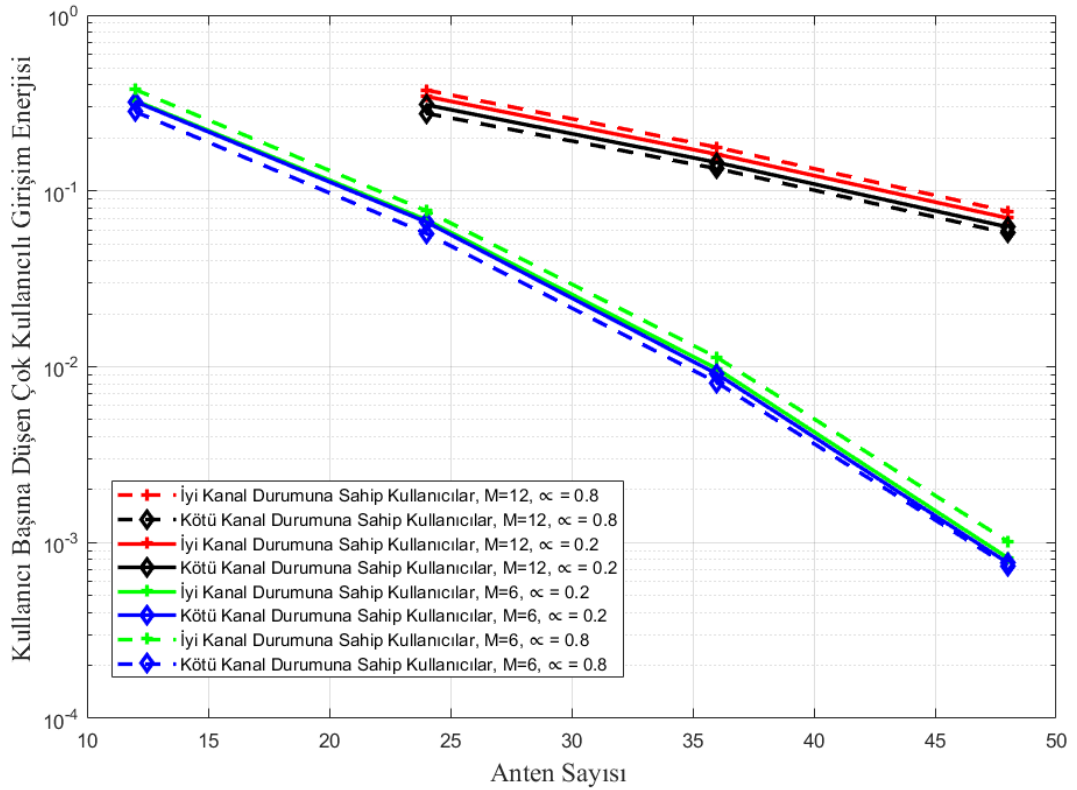
Sistemdeki kullanıcı sayısı arttıka kullanıcılarda oluşan MUI enerjisi kayda değer biçimde artmıştır. Aynı kullanıcı sayısı gözönünde bulundurulduğunda ise, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcılarda oluşan MUI enerjisinin azaldığı grlmüştir.

Yalnızca CE nkodlama kullanıldığında MUI enerjisi kanalların bağımsız ve eş dağılımlı olmaları nedeniyle tüm kullanıcılarda eşittir. CE nkodlama, NOMA ile birlikte kullanıldığında ise iyi kanal durumuna sahip kullanıcılar ile kötü kanal

durumuna sahip kullanıcılar arasında MUI enerjisi bakımından ayırım yapmak mümkün olmuştur. Aynı grupta bulunan kullanıcılar arasında ise MUI enerjisinin eşit olduğu görülmüştür.

Gruplar arasındaki MUI enerjisi farkına α katsayısının etkisini incelemek adına, aynı koşullarda farklı α değerleri için, sistemdeki toplam kullanıcı sayısı $M=12$ ve $M=24$ olduğu durumlarda ergodik MUI enerjisinin artan anten sayısının fonksiyonu olarak çizimi Şekil 3-5'te gösterilmiştir. İyi kanal durumuna sahip kullanıcılar ile kötü kanal durumuna sahip kullanıcılar arasında yapılan güç paylaşımının etkisini gözlemlemek için $\alpha = 0.2$ ve $\alpha = 0.8$ durumları incelenmiştir.

Kullanıcılar arasında yapılan güç paylaşımında aradaki fark arttıkça, iki grup arasındaki MUI enerji farkı da artmaktadır. Bu durum, kullanıcıların farklı ihtiyaçları olduğu takdirde, bir ödünleşime bağlı olarak α değerinin optimize edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 3-5 : CE Önkodlama ile NOMA birlikte kullanıldığında, artan anten sayısı ve farklı α değerlerine bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik çok kullanıcılı girişim enerjisi



4. ÇOK GENLİKLİ ÖNKODLAMA VE DİKGEN OLMAYAN ÇOKLU ERİŞİM TEKNİKLERİNİN BİRLİKTE KULLANIMI

4.1 Amaç

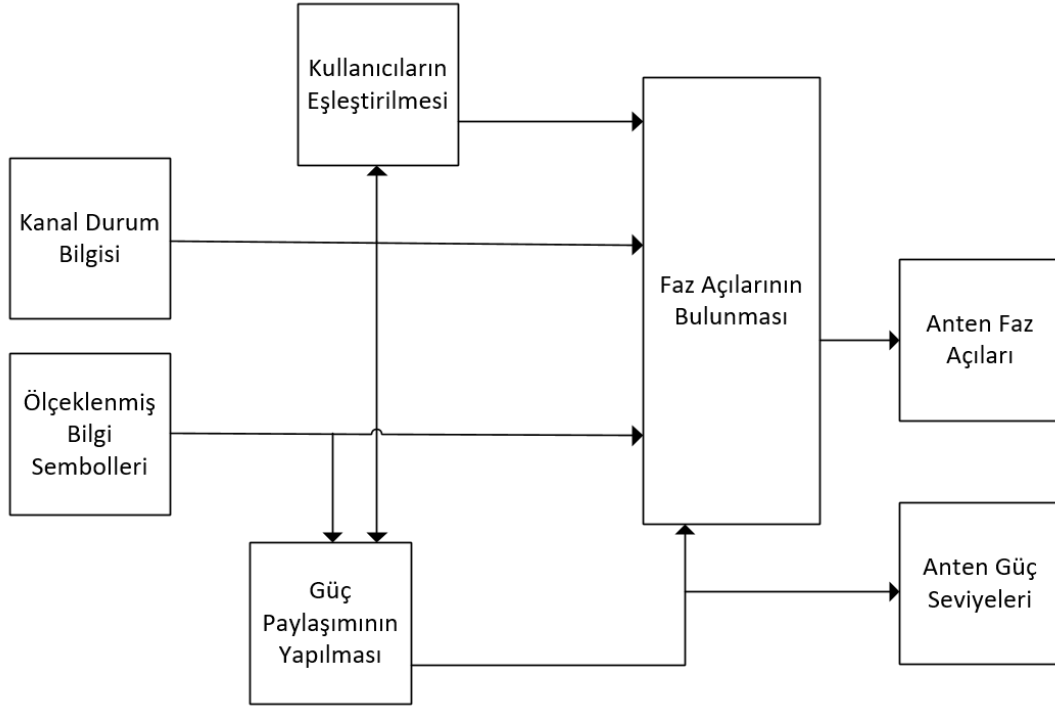
Bölüm 2.3'te bahsedildiği üzere ME önkodlama, mMIMO sistemlerde baz istasyonu kurulum maliyetlerini düşürmek için geliştirilen CE önkodlamada dezavantaj olarak görülen yüksek çok kullanıcı girişim enerjisini düşürmek için önerilen bir yöntemdir. Bununla birlikte, kullanıcıların kanal durumları, ihtiyaçları ve taleplerinden bağımsız olarak her kullanıcıya eşit miktarda çok kullanıcı girişim enerjisi sunulmaktadır.

Bu bölümde, sistemdeki kullanıcılara eşit miktarda sunulan çok kullanıcı girişim enerjisini farklılaştırmak amacıyla, ME önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanımını inceledik. Bunu başarabilmek için, Bölüm 2.3'te özetlenen ME önkodlama yöntemine ek olarak sistemdeki kullanıcıları kanal durumlarına göre grupladık. Aynı grupta bulunan kullanıcıların sembollerinin, süperpozisyon kodlaması kullanarak farklı güç seviyelerinde, birden fazla ancak belirli sayıda sabit genlikli sinyaller aracılığıyla iletilmesini hedefledik. Kullanıcılarda görülen çok kullanıcı girişim enerjisini azaltmak amacıyla, Bölüm 2.2'de önerilen, sistemde bulunan antenlerin faz açılarını belirleyen özyineleme metodunu ME önkodlama ve NOMA tekniğine uygun hale getirdik. Alıcı tarafta SIC kullanarak kullanıcıların kendi verilerini sezmesini amaçladık. Birbirinden bağımsız ve eş dağılıma sahip Rayleigh sönümlü kanallar üzerinde benzetimler yaparak, bu uygulamanın sonuçlarını araştırdık.

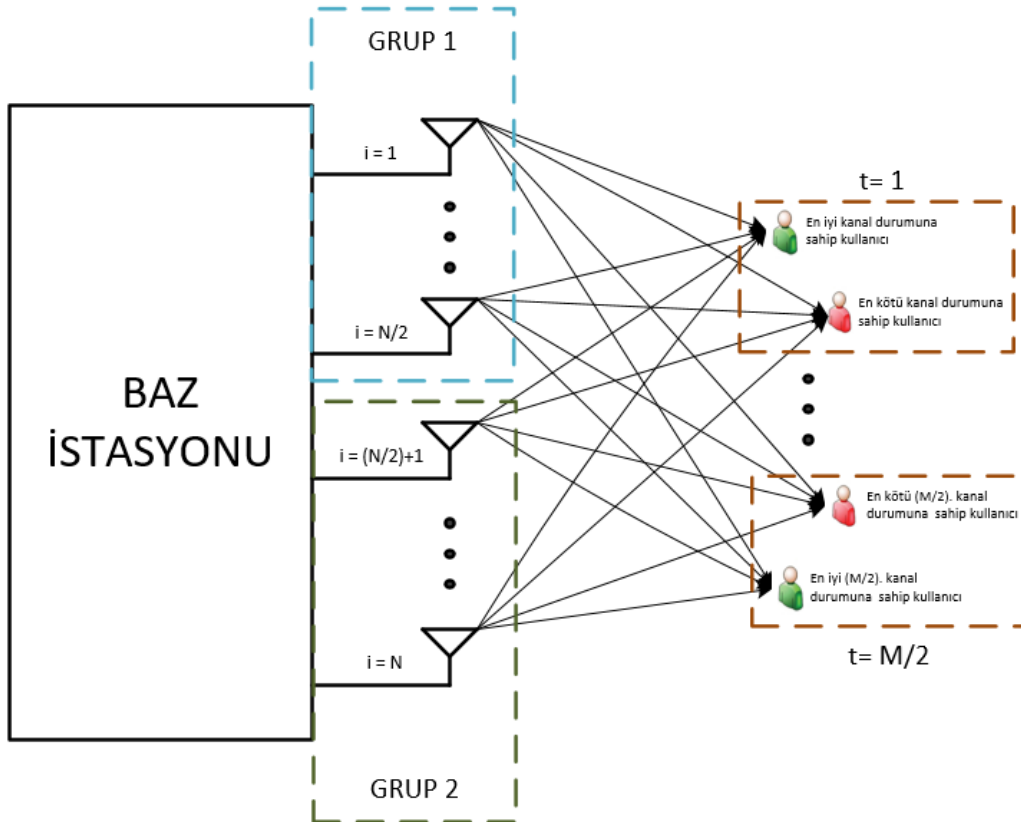
4.2 Sistem Modeli

Bu bölümde kurulan sistem modeli Bölüm 3'te verilen sistem modeline oldukça benzerdir ve blok diyagramı Şekil 4-1'de verilmiştir. Baz istasyonunda N adet anten bulunan ve tek antenli M adet kullanıcıdan oluşan mMIMO yayın kanalı göz önünde bulundurulacaktır.

Antenleri gruplamak için Bölüm 2.3'te özetlenen ZF önkodlama tekniği kullanılacaktır. Kullanıcılar ise Bölüm 3'te verilen Algoritma 3'e uygun olarak gruplanacaktır. Bu durumda oluşan, (örnek: iki genlikli önkodlama) sistem özeti Şekil 4-2'de verilmiştir.



Şekil 4-1 : ME Önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda oluşan blok diyagram



Şekil 4-2 : ME Önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda oluşan sistem özeti

Bu yöntemlerle iletim yapıldığında alınan sinyal

$$y_k = \sqrt{\frac{P_T}{N}} \sum_{i=1}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i} + w_k, k = 1, 2, \dots, M \quad (27)$$

şeklinde olacaktır. t. gruptaki kullanıcılara iletilen bilgi sembolü u_t , Denklem 19 ile ifade edildiğinde, alınan sinyal Denklem 28'deki şekilde ifade edilebilecektir.

$$y_k = \sqrt{P_T} \sqrt{E_k} \sqrt{\alpha} v_k + \sqrt{P_T} \sqrt{E_k} \sqrt{1-\alpha} \varphi_{k+\frac{M}{2}} + \sqrt{P_T} s_k + w_k \quad (28)$$

Burada MUI terimi Bölüm 3'te olduğu gibi değişkenlik gösterecektir. İyi kanal durumuna sahip kullanıcılar hem v_t hem de φ_t sembollerini çözmek zorundadır. Bu sezme işlemi sırasında kötü kanal durumuna sahip kullanıcıların sembolleri doğru çözülsürse, MUI terimi Denklem 29'da olduğu haliye kabul edilecektir. Eğer bu sezme işlemi esnasında bir hata yapılırsa MUI terimi Denklem 30'daki hali alacaktır.

$$s_{k\varphi} \triangleq \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k} (\sqrt{\alpha} v_k + \sqrt{1-\alpha} \varphi_{k+M/2}) \right) \quad (29)$$

$$\hat{s}_{k\varphi} \triangleq \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k} (\sqrt{\alpha} \hat{v}_k + \sqrt{1-\alpha} \varphi_{k+M/2}) \right) \quad (30)$$

Kötü kanal durumuna sahip kullanıcılar ise yalnızca v_t sembollerini çözmekle yükümlüdür. Bu durumda, bu kullanıcılarda oluşan MUI terimi Denklem 31'de verilmiştir.

$$s_{k\nu} \triangleq \left(\frac{\sum_{i=1}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i}}{\sqrt{N}} - \sqrt{E_k} \sqrt{\alpha} v_k \right) \quad (31)$$

Bu durumda, Denklem 6'da verilen, CE önkodlama tekniğinde kullanıcılarda görülen MUI enerjisini en düşük seviyede tutacak faz açılarını belirlemek için karşılaşılan lineer olmayan en küçük kareler problemi, ME önkodlama ve NOMA teknikleri birlikte kullanıldığında Denklem 32'de verilen halini almış olacaktır.

$$\theta^u = (\theta_1^{(u)}, \dots, \theta_N^{(u)}) = \arg \min_{\theta_i \in [-\pi, \pi], i = 1, \dots, N} g(\Theta, u)$$

$$g(\Theta, u) \triangleq \sum_{k=1}^{M/2} |s_{k\phi}|^2 + \sum_{k=(M/2)+1}^M |s_{k\nu}|^2 \quad (32)$$

Bu problemi çözebilmek için, ME önkodlama tekniğinde önerilen Algoritma 2 güncellenerek Algoritma 5 geliştirilmiştir.

ALGORİTMA 5: ME önkodlama ve NOMA tekniklerinin birlikte kullanıldığı durumda iletim faz açılarının bulunması için önerilen özyineleme metodu

1. Sıfıra zorlayıcı vektörünü Denklem 10 yardımıyla hesapla

$$\mathbf{v}_{zf} = [v_{zf}^1, v_{zf}^2, \dots, v_{zf}^N]^T$$

2. Güç katsayıları vektörünü hesapla

$$\mathbf{v}_{abs} = [|v_{zf}^1|, |v_{zf}^2|, \dots, |v_{zf}^N|]^T$$

3. Güç katsayıları vektörünü kullanarak antenleri grupla
4. Kullanıcıları Algoritma 3 yardımıyla grupla
5. Aynı gruptaki kullanıcıların sembollerini süperpozisyon kodlaması kullanarak superimpoze hale getir

6. $\Theta = 0$

7. for p = 1 : L

8. for q = 1: N

9. Denklem 29, Denklem 30 ve Denklem 31 yardımıyla i . antenden gelen sinyali göz ardı ederek her bir kullanıcıda girişimi hesapla

10. Bulunan değeri, i . anten ile hesap yapılan kullanıcı arasındaki kanalin hermisyeni ile carp

11. Tüm kullanıcılar için bulunan sonuçları topla

12. Bulunan sonucun argümentini al

13. $\theta_i = \pi + argument$

14. end for

15. end for

Algoritma 5'in uygulanmasının ardından bulunan faz açılarının denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}\theta_{q+1}^{(p,q+1)} &= \arg \min_{\Theta = (\theta_1^{(p,q)}, \dots, \theta_q^{(p,q)}, \emptyset, \theta_{q+2}^{(p,q)}, \dots, \theta_N^{(p,q)})^T, \emptyset \in [-\pi, \pi]} g(\Theta, \mathbf{u}) \\ &= f(\delta)\end{aligned}\quad (33)$$

Bu denklemde $f(x) = \pi + \arg(x)$ olarak tanımlanmış olup, δ aşağıda tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}\delta &= \left(\left(\sum_{k=1}^{\frac{M}{2}} \frac{h_{k,q+1}^*}{\sqrt{N}} \left[\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1, \neq (q+1)}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i^{(p,q)}} - \sqrt{E_k} (\sqrt{\alpha} v_k + \sqrt{1-\alpha} \varphi_{k+\frac{M}{2}}) \right] \right) \right) \\ &\quad + \left(\sum_{k=\frac{M}{2}+1}^M \frac{h_{k,q+1}^*}{\sqrt{N}} \left[\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=1, \neq (q+1)}^N h_{k,i} p_{zf}^i e^{j\theta_i^{(p,q)}} - \sqrt{E_k} \sqrt{\alpha} v_k \right] \right) \end{aligned}$$

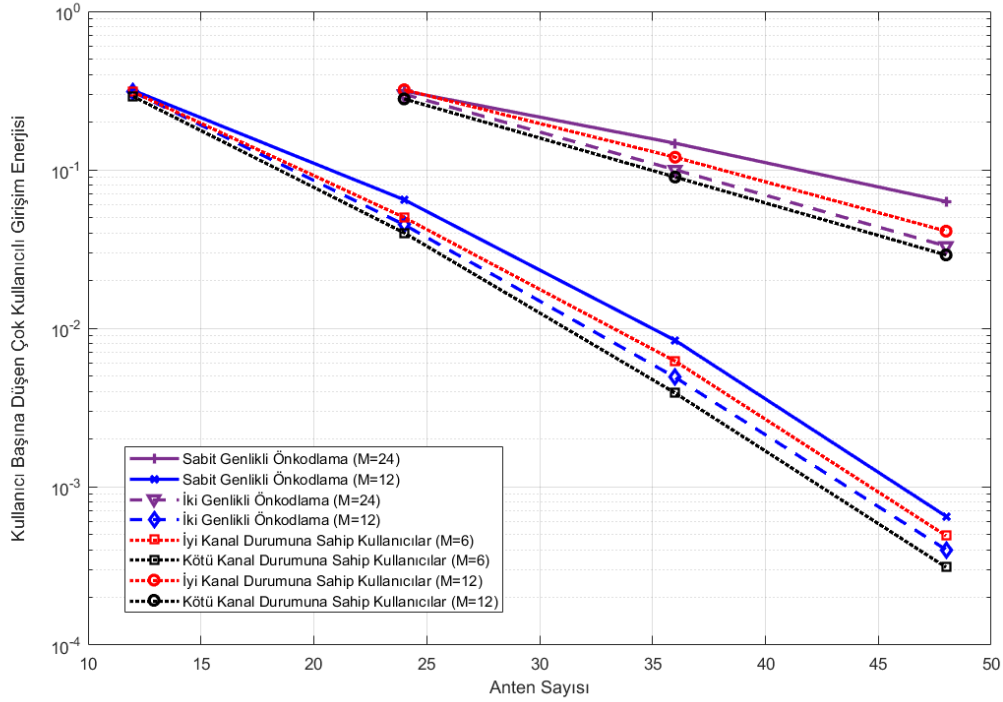
$$\theta_i^{(p,q+1)} = \theta_i^{(p,q)}, i = 1, 2, \dots, N, i \neq q+1. \quad (34)$$

4.3 Sonuçlar

Bu uygulamanın sonuçlarını göstermek için, birbirinden bağımsız ve eş dağılıma sahip Rayleigh sönümlü kanal göz önünde bulundurularak, sabit bilgi alfabeleri $U_1 = U_2 = \dots = U_M = (16\text{-QAM})$ ve sabit bilgi sembolü enerjisi $E_k = 1, k = 1, \dots, M$ kullanılarak, $\alpha = 0.8$ ve $p_1 = \sqrt{3/2}$ değerleri için, sistemdeki toplam kullanıcı sayısı $M=12$ ve $M=24$ durumlarında ergodik MUI enerjisinin artan anten sayısının fonksiyonu olarak çizimi Şekil 4-3'te gösterilmiştir.

Şekil 4-3'ten görülebileceği üzere, ME önkodlama ve NOMA teknikleri birlikte kullanıldığında kullanıcılarda görülen MUI enerjisinde farklılık yaratmak mümkün olmuştur. Bu teknikler birlikte kullanıldığında, yalnızca ME önkodlama kullanıldığında görülen MUI enerjisinden daha yüksek seviyede olan iyi kanal durumuna sahip kullanıcılarda görülen MUI enerjisi, yalnızca CE önkodlama

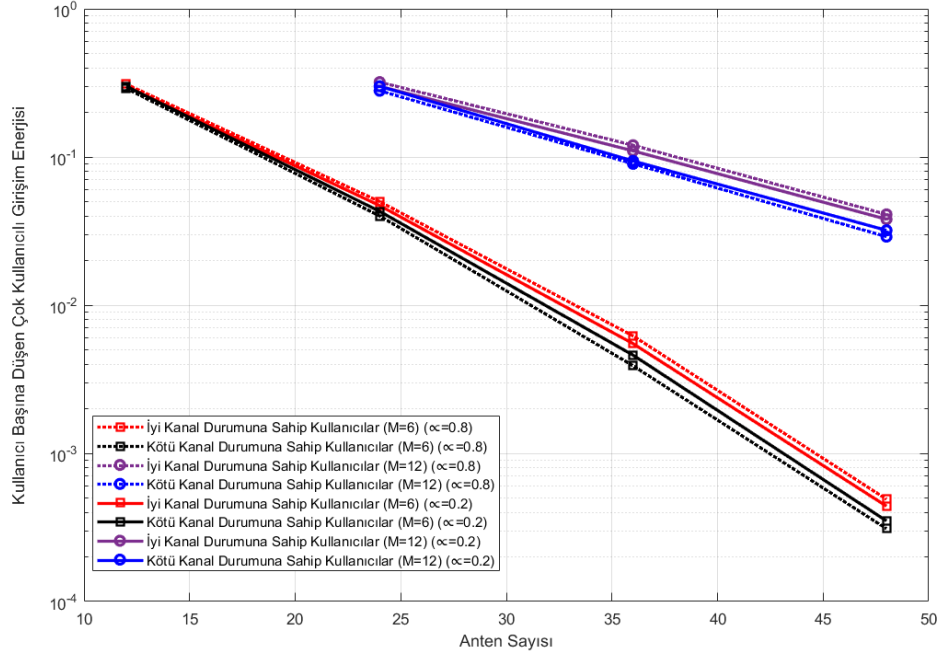
kullanıldığında oluşan MUI enerjisinden yine de daha düşük seviyede görülmektedir. Böylece, bu yöntem kullanıldığında, yalnızca CE önkodlama tekniğinin kullanıldığı duruma kıyasla, kullanıcıların tamamında daha düşük seviyede MUI görülebileceği gibi, kullanıcılar arasında MUI enerjisi bakımından farklılık oluşturulabileceği de ortaya konulmuştur.



Şekil 4-3 : ME Önkodlama kullanıldığında, artan anten sayısına bağlı olarak kullanıcı başına düşen ergodik çok kullanıcılı girişim enerjisi

Gruplar arasındaki MUI enerjisi farkına α katsayısının etkisini incelemek adına, aynı koşullarda farklı α değerleri için, sistemdeki toplam kullanıcı sayısı $M=12$ ve $M=24$ olduğu durumlarda ergodik MUI enerjisinin artan anten sayısının fonksiyonu olarak çizimi Şekil 4-4'te gösterilmiştir. İyi kanal durumuna sahip kullanıcılar ile kötü kanal durumuna sahip kullanıcılar arasında yapılan güç paylaşımının etkisini gözlemlemek için $\alpha = 0.2$ ve $\alpha = 0.8$ durumları incelenmiştir.

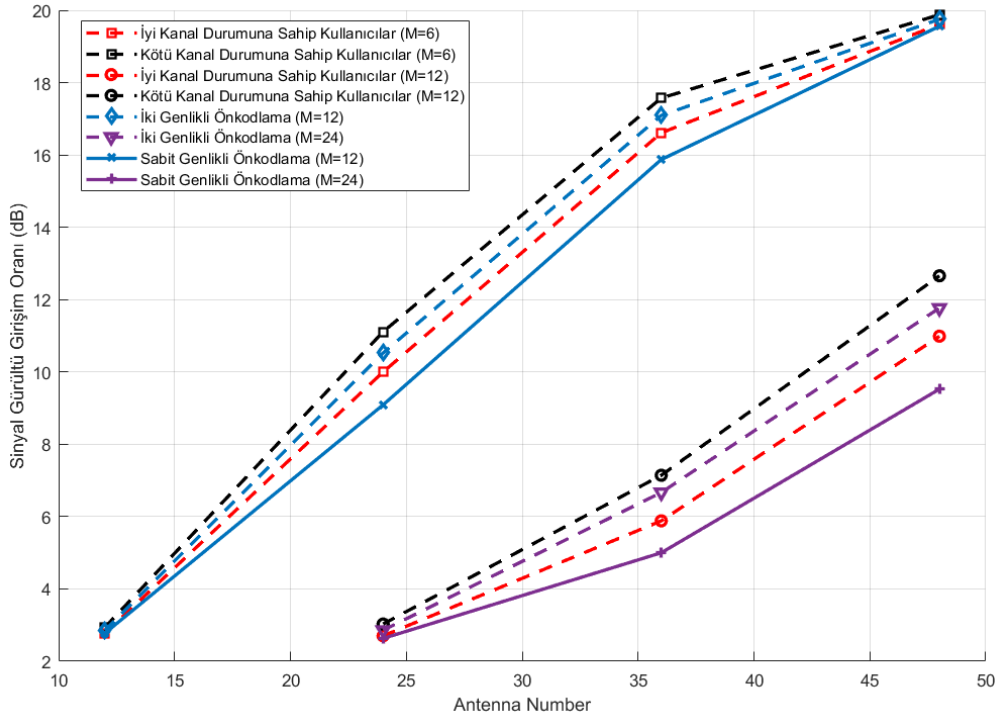
Bölüm 3.3'le benzer şekilde, ME önkodlama ve NOMA teknikleri birlikte kullanıldığında, kullanıcılar arasında güç paylaşılırken aradaki fark arttıkça kullanıcılarda görülen MUI enerjileri arasındaki fark da artmaktadır.



Şekil 4-4 : ME Önkodlama kullanıldığında, artan anten sayısı ve farklı değerlerine bağlı olarak, kullanıcı başına düşen ergodik çok kullanıcılı girişim enerjisi

MUI enerjilerinin sisteme olan etkisini incelemek için SINR değerleri incelenmiştir.

Şekil 4-5'te görüldüğü üzere, (5)'te tanımlanan sinyal-gürültü-girişim oranı, MUI değerleri azaldıkça beklendiği gibi artmaktadır.



Şekil 4-5 : MUI enerjisinin sinyal-gürültü-girişim oranına etkisi



5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tezde, yeni nesil kablosuz haberleşme ağlarında ihtiyaç duyulan taleplere çözüm olarak önerilen yoğun çok girdili çok çıktılı sistemler üzerinde çalışmalar yaptık. Özellikle, yoğun çok girdili çok çıktılı sistemlerin kullanımıyla ortaya çıkan baz istasyonu kurulum maliyetlerini düşürmek amacıyla önerilen sabit genlikli önkodlama ve bu tekniğin kullanıldığı durumlarda gerçekleşen performans kaybını geri kazanmak için önerilen çok genlikli önkodlama tekniklerinde çok kullanıcı girişi enerjisi analizi üzerinde durduk.

Sabit ve çok genlikli önkodlama tekniklerinde, iletim yapılacak kullanıcıların tamamına eşit miktarda çok kullanıcı girişi enerjisi sunulurken, kullanıcıların istek ve taleplerinin aynı olamayabileceği düşüncesiyle, kullanıcılarda görülen çok kullanıcı girişi enerjisini farklılaştırmayı amaçladık. Bunu başarabilmek için, sabit ve çok genlikli önkodlama tekniğinin dikgen olmayan çoklu erişim tekniği ile birlikte kullanılması fikrini sunduk.

Oluşturulan sistem modellerinde, kullanıcıları kanal durumlarına bağlı olarak, iyi kanal durumuna sahip kullanıcılarla kötü kanal durumuna sahip kullanıcılar birbirleriyle eşleşecek şekilde kümelere ayırdık. Aynı kümede bulunan kullanıcıların sembollerini süperpozisyon kodlamasıyla süperimpoze hale getirdik ve bu şekilde iletilmesini amaçladık. Sabit ve çok genlikli önkodlama tekniklerinde önerilen ve kullanıcılarda görülen çok kullanıcı girişi enerjisini azaltmayı hedefleyen özyineleme metodunu, dikgen olmayan çoklu erişim tekniğine uygun hale getirdik. Alıcı tarafta, ardışık girişim giderici uygulaması kullanılarak, kullanıcıların sembollerinin sezilmesini hedefledik.

Birbirinden bağımsız ve eş dağılıma sahip Rayleigh sönümlü kanallar üzerinde yaptığımız simülasyonlar gösterdi ki, hem sabit genlikli önkodlama hem de çok genlikli önkodlama teknikleri dikgen olmayan çoklu erişim tekniği ile birlikte kullanıldığında, kullanıcılarda görülen çok kullanıcı girişi enerjisi bakımından kullanıcılar arasında ayırım yapmak mümkündür. Kullanıcılar arası adaleti sağlamak

adına, önerilen önkodlama çeşitlerine kıyasla, kötü kanal durumuna sahip kullanıcılara daha düşük ve iyi kanal durumuna sahip kullanıcılara daha yüksek seviyede çok kullanıcı girişim enerjisi sunulabilir.

Çok genlikli önkodlamanın tercih edildiği durumda, sistemdeki tüm kullanıcıların gördüğü çok kullanıcı girişim enerjisi, sabit genlikli önkodlamanın kullanıldığı duruma göre kaydadeğer seviyede daha düşüktür.

Gelecek çalışmalarda, sabit ve çok genlikli önkodlamanın dikgen olmayan çoklu erişim ile birlikte kullanımını Rician ve Nakagami gibi kanal tipleri üzerinde araştırılacaktır. Ek olarak, sabit ve çok genlikli önkodlamada kullanılacak kanal kodlama teknikleri araştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, T. L. Marzetta**, (2014) "Massive MIMO for next generation wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195.
- [2] **R.W. Health, A. Lozano, T.L. Marzetta, P. Popovski**, (2014) "Five disruptive technology directions for 5G," *IEEE Commun. Mag.* 52 (2) 74-80.
- [3] **A.L. Swindlehurst, E. Ayanoglu, P. Heydasri, F. Capolino**, (2014) "Millimeter-wave massive MIMO: the next wireless revolution?," *IEEE Commun. Mag.* 52 (9), 56-62.
- [4] **D. Feng, C. Jiang, G. Lim, L.J. Cimini, G. Feng, G.Y. Li**, (2013) "A survey of energy-efficient wireless communications," *IEEE Commun. Surv. Tut.* 15 (1), 167-178.
- [5] **T.E. Bogale, L.B. Le**, (2016) "Massive MIMO and mmWave for 5G wireless HetNet: potential benefits and challenges," *IEEE Veh. Technol. Mag.* 11 (1), 64-75.
- [6] **L. Wei, R.Q. Hu, Y. Qian, G. Wu**, (2014) "Key elements to enable millimetre wave communications for 5G wireless systems," *IEEE Wirel. Commun.* 21 (6), 136-143.
- [7] **T. L. Marzetta**, (2010) "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600.
- [8] **I. E. Telatar**, (1999) "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *European Trans. Telecommunications*, Vol. 10, No. 6, pp. 585-595.
- [9] **T. M. Duman, A. Ghrayeb**, (2008) "Coding for MIMO Communication Systems," West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- [10] **D. Tse, P. Viswanath**, (2005) "Fundamentals of Wireless Communication," London, UK: Cambridge University Press.
- [11] **M. Vu, A. Paulraj**, (2007) "MIMO wireless linear precoding," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 86-105.
- [12] **F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. G. Larsson, T. L. Marzetta, O. Edfors, F. Tufvesson**, (2013) "Scaling up MIMO: Opportunities and challenges with very large arrays," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 40-60.

- [13] **W. Roh, J. Y. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, K. Cheun, F. Aryanfar**, (2014) "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 106-113.
- [14] **X. Gao, L. Dai, S. Han, C.-L. I, R.W. Heath Jr.**, (2016) "Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays," *IEEE J. Sel. Areas Commun.* 34 (4), 998–1009.
- [15] **S. C. Cripps**, (2006) "RF Power Amplifiers for Wireless Communications," *Second Edition (Artech House Microwave Library (Hardcover))*. Norwood, MA, USA: Artech House, Inc.
- [16] **S. K. Mohammed, E. G. Larsson**, (2013) "Per-antenna constant envelope precoding for large multi-user MIMO systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 3, pp. 1059-1071.
- [17] **S. K. Mohammed, E. G. Larsson**, (2013) "Constant-envelope multi-user precoding for frequency-selective massive MIMO systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 2, no. 5, pp. 547-550.
- [18] **M. Kazemi, H. Aghaeinia, T. M. Duman**, (2017) "Discrete-phase constant envelope precoding for massive MIMO systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 5, pp. 2011-2021.
- [19] **M.Gümüş, T. M. Duman**, (2018) "Multi-Envelope Precoding for Massive MIMO Systems," *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 7, Issue: 5.
- [20] **J. Berkmann, C. Carbonelli, F. Dietrich, C. Drewes, W. Xu**, (2008) "On 3G LTE terminal implementation - standard, algorithms, complexities and challenges," in *2008 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Crete Island, Greece*, pp. 970-975.
- [21] **Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, K. Higuchi**, (2013) "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," *Proc. IEEE Veh. Techn. Conf. (VTC Spring)*, pp. 1-5.
- [22] **T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, F. Gutierrez**, (2013) "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," *IEEE Access*, vol. 1, pp. 335-349.

- [23] **C. Shepard, H. Yu, N. An, E. Li, T. Marzetta, R. Yang, L. Zhong**, (2012) "Argos: Practical many-antenna base stations," in *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, ser. Mobicom '12*. New York, NY, USA: ACM, pp. 53-64.
- [24] **J. Vieira, S. Malkowsky, K. Nieman, Z. Miers, N. Kundargi, L. Liu, I. Wong, V. Owall, O. Edfors, F. Tufvesson**, (2014) "A flexible 100-antenna testbed for massive MIMO," in *2014 IEEE Globecom Workshops*, pp. 287-293.
- [25] **L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, R. Zhang**, (2014) "An overview of massive MIMO: Benefits and challenges," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758.
- [26] **H. Q. Ngo, E. G. Larsson, T. L. Marzetta**, (2013) "Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 4, pp. 1436-1449.
- [27] **T. L. Marzetta, B. M. Hochwald**, (2006) "Fast transfer of channel state information in wireless systems," *IEEE Trans. Signal Process.* 54, 1268–1278.
- [28] **J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, S. Vishwanath**, (2009) "Pilot contamination problem in multi-cell TDD systems," in *IEEE International Symposium on Information Theory*, pp. 2184–2188.
- [29] **H. Zhang, S. Gao, D. Li, H. Chen, L. Yang**, (2016) "On superimposed pilot for channel estimation in multicell multiuser MIMO uplink: Large system analysis," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 3, pp. 1492-1505.
- [30] **Y. Zhang, W. Feng, L. Dong, N. Ge**, (2015) "Pilot sequence design for multi-cell distributed MIMO systems with large-scale CSI," in *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, UK, pp. 1739-1744.
- [31] **Z. Wang, C. Qian, L. Dai, J. Chen, C. Sun, S. Chen**, (2015) "Location-based channel estimation and pilot assignment for massive MIMO systems," in *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, UK, pp. 1264-1268.
- [32] **C. K. Wen, Y. Wu, K. K. Wong, R. Schober, P. Ting**, (2015) "Performance limits of massive MIMO systems based on bayes-optimal inference," in *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, UK, pp. 1783-1788.

- [33] **R. R. Muller, L. Cottatellucci, M. Vehkaper,** (2014) “Blind pilot decontamination,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 773-786.
- [34] **M. H. Costa,** (1983) “Writing on dirty paper (corresp.),” *IEEE Trans. Inf. Theory* 29 (3) 439–441.
- [35] **A. Alkhateeb, J. Mo, N. Gonzalez-Prelcic, R. Heath,** (2014) “MIMO precoding and combining solutions for millimeter-wave systems,” *IEEE Commun. Mag.* 52 (12), 122–131.
- [36] **D. J. Love, R. W. Heath,** (2003) "Equal gain transmission in multiple-input multiple-output wireless systems," *IEEE Transaction Communications*, Vol. 51, No. 7, pp. 1102-1110.
- [37] **G. Caire, S. Shamai,** (2003) “On the achievable throughput of a multi antenna Gaussian broadcast channel,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 7, pp. 1691-1706.
- [38] **T. Yoo, A. Goldsmith,** (2006) “On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 528-541.
- [39] **Ma, Z., Zhang, Z., Ding, Z., Fan, P., Li,** (2015) “Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives,” *Sci. China Inf. Sci.*, 58: 1–20.
- [40] **Xu, P., Ding, Z., Dai, X., Poor, H.V.,** (2015) “A New Evaluation Criterion for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Software Defined Networks” in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1633-1639.
- [41] **T. Cover,** (1972) “Broadcast channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 2-14.
- [42] **S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre and K. Kwak,** (2017) "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721-742.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Tuğrul ÖZCAN
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Tarihi ve Yeri : 07.07.1992 - Ankara
E-posta : tugrulozcan92@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

Yıl	Yer	Görev
2017-2018	Aselsan MGEO	Aviyonik Tasarım Mühendisi
2018-	FNSS Savunma Sistemleri A.Ş.	Tasarım Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce (TOEFL IBT: 92, YDS: 82.5)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Özcan, T. ve Yüksel Turgut, A.M., (2020) “Yoğun Çok Girdili Çok Çıktılı Sistemler İçin Sabit Genlikli Önkodlama ve Dikgen Olmayan Çoklu Erişim,” *SIU 2020*