T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YOĞUN MAKİNE TİPİ HABERLEŞMESİNDE YENİLİKÇİ ÇOKLU ERİŞİM YÖNTEMLERİNİN TASARIMI

Ferdi TEKÇE

DOKTORA TEZİ
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Programı

Danışman
Doç. Dr. Umut Engin AYTEN

Eş-Danışman
Prof. Dr. Lütfiye Durak ATA

Mart, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YOĞUN MAKİNE TİPİ HABERLEŞMESİNDE YENİLİKÇİ ÇOKLU ERİŞİM YÖNTEMLERİNİN TASARIMI

Ferdi TEKÇE tarafından hazırlanan tez çalışması 12.03.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı Elektronik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Prof. Dr. Lütfiye Durak ATA
İstanbul Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Umut Engin AYTEN , Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ahmet SERBES, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ertuğrul BAŞAR, Üye
Koç Üniversitesi _____

Doç.Dr. Bülent BOLAT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr.Öğr.Üye. Mehmet Akif YAZICI, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Umut Engin AYTEN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Yoğun Makine Tipi Haberleşmesinde Yenilikçi Çoklu Erişim Yöntemlerinin Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ferdi TEKÇE

İmza

Aileme,

TEŞEKKÜR

Bu uzun ve zorlu süreçte birlikte geçireceğimiz zamanlardan feragat edip çalışmama rağmen, her aşamada desteklerini esirgemeyen anneme, babama, kardeşlerime, eşime ve kızım Defne'ye çok teşekkür ederim. Son dakika koşturmalarına rağmen sakinliğini ve olumlu bakışını hiç bırakmadan katkıya devam eden, teknik ve idari her süreçte kendisinden çok şey öğrendiğim Prof. Dr. Lütfiye Durak ATA hocama, her durumda iyi yanını görüp beni cesaretlendiren ve destek veren Doç. Dr. Umut Engin AYTEN hocama çok teşekkür ederim.

Ferdi TEKÇE

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ viii

ŞEKİL LİSTESİ xi

TABLO LİSTESİ xiv

ÖZET xv

ABSTRACT xvi

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Orijinal Katkı 5
1.4 Tezin Kapsamı 6
1.5 Tezin Akışı 7

2 MAKİNE TİPİ HABERLEŞME 8

2.1 Yoğun Makine Tipi Haberleşme 9
2.2 Makine Tipi Haberleşme Sistemleri için Performans Göstergeleri 10

3 ÇOKLU ERİŞİM TEKNİKLERİ 13

3.1 Mevcut Dikgen Çoklu Erişim Teknikleri 14
3.1.1 Zaman Bölümlemeli ve Frekans Bölümlemeli Çoğullama Teknikleri 16
3.1.2 Kod Bölmeli Çoklu Erişim Teknikleri 16
3.1.3 Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim Tekniği 16
3.2 Dikgen Olmayan Dalga Şekilleri 17
3.2.1 Güç Bölgesi NOMA 18
3.2.2 Kod Bölgesi NOMA 20
3.2.3 Kaynak Yayılımlı Çoklu Erişim 25
3.2.4 Çoğullanmış NOMA ve Örüntü Bölmeli Çoklu Erişim 29

3.3 Yeni NOMA Türleri Bakımından Karşılaştırma 29
3.4 Yukarı Yönlü NOMA Alıcı-Verici Mimarisi 31
3.4.1 Matematiksel Gösterimler 31
3.4.2 Genel NOMA Yukarı Yönlü Alıcı Verici Mimarisi 31

4 SEYREK KODLU ÇOKLU ERİŞİM 33
4.1 SCMA Alıcı-Verici Sistemi 34
4.2 SCMA Kodlayıcı 35
4.3 SCMA Kod Çözücü 38
4.3.1 MPA (Message Passing Algorithm) 39
4.3.2 Voronoi Diyagram 41
4.4 Kanal Kodlamalı SCMA 42
4.5 SCMA Kod Kitabı Tasarımı 43
4.5.1 Haritalama matrisi 44
4.5.2 Ana Faz-Genlik Yerleşim 47
4.6 SCMA İçin Ana Faz-Genlik Yerleşimi Seçimi 48
4.6.1 Yıldız Faz-Genlik Yerleşim Temelli Kod kitabı Tasarımı 48
4.6.2 Dikdörtgen-QAM Faz-Genlik Yerleşim Temelli Kod Kitabı Tasarımı 49

5 SCMA BENZETİM VE KARŞILAŞTIRMALAR 56
5.1 Yıldız Faz-Genlik Yerleşimli Ana Kod Kitabı Benzetimleri 57
5.1.1 Tek Seviye Yıldız Faz-Genlik Yerleşimli Ana Kod Kitabı 58
5.1.2 İki Seviye Yıldız Faz-Genlik Yerleşimli Ana Kod Kitabı 60
5.2 Dikdörtgensel Faz-Genlik Yerleşimi Kullanılarak Ana Kod Kitabı Üretme 62
5.3 Mevcut OFDMA temelli sistemlerde SCMA'in Kullanılabilirliği 67

6 SCMA-IM 69
6.1 OFDM-IM Temelli Erişim Tekniği 70
6.2 SCMA-IM'in Sistem Modeli 71
6.2.1 SCMA-IM Kodlayıcı 72
6.2.2 SCMA-IM Alıcı 74
6.3 Performans Analizleri 76
6.4 Benzetimler ve Sayısal Sonuçlar 77

7 SONUÇ VE ÖNERİLER 85

KAYNAKÇA 88

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 94

SİMGE LİSTESİ

CB_{ana}	Ana Kod Kitabı (Mother Codebook)
d_j	Kullanıcının kullandığı kaynak sayısı
d_R	Kaynağı kullanan kullanıcı sayısı
d_{min}	Minimum öklid uzaklığı
E_b	Bit başına enerji
ϵ_x	Ortalama enerji
D	Toplam öklid uzaklığı
E	Toplam enerji
F	Haritalama Matrisi
G	Üretici Matrisi
J	Kullanıcı Sayısı
K	Kullanılan Fiziksel Kaynakların Sayısı
M	İkili Sembol Sayısı
N	Kullanıcının kullandığı kaynak sayısı
N_o	Spektral gürültü yoğunluğuna
R	Kanal Kodlama Oranı
μ	Mesajların olasılıkları
λ	Aşırı Yükleme (OL) Katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AMP	Approximate Message Passing
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BLER	Block Error Rate
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
CB	Codebook (Kod kitabı)
CDMA	Code Division Multiple Access
CP	Cyclic Prefix
CW	Codeword (Kod kelimesi)
DL	Down-Link (Aşağı Yönlü Bağlantı)
UL	Up-Link (Yukarı Yönlü Bağlantı)
EPA	Expectation Propagation Algorithm
FBMC	Filter bank multicarrier
FDMA	Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
FN	Functional Node (Fonksiyonel Düğümler)
GFDM	Generalized frequency division multiplexing
GMM-OFDM-IM	Generalized Multiple-Mode OFDM with Index Modulation
i.i.d	independent and identically distributed (bağımsız ve tekil dağılımlı)
IM	Index Modulation
ITU	International Telecommunication Union
KLD	Kullback-Leibler divergence
LDPC	Low-Density Parity-Check

LDS	Low Density Signature
LLR	Log-Likelihood Ratio
LTE	Long-Term Evolution
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output (Çoklu Girişli, Çoklu Çıkışlı)
mMTC	massive Machine Type Communications
MPA	Message Passing Algorithm
ML	Maximum-likelihood (En yüksek Olasılık)
MUSA	Multi-User Shared Access (Çoklu Kullanıcılı Paylaşımlı Erişim)
MUD	Multi-User Detection
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OFDM-IM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation
OL	Over Loading (Aşırı yükleme)
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PDMA	Pattern Division Multiple Access (Örüntü Bölmeli Çoklu Erişim)
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QC-LDPC	quasi-cyclic LDPC
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RSMA	Resource Spread Multiple Access (Kaynak Yayılımlı Çoklu Erişim)
RE	Resource Element (Kaynak bileşeni)
SCMA	Sparse Code Multiple Access (Seyrek Kodlu Çoklu Erişim)
SCMA-IM	Sparse Code Multiple Access based on OFDM-IM (Index Modülasyonlu Seyrek Kodlu Çoklu Erişim)
SIC	Successive Interference Cancellation (Ardışık Karışım Engelleme)
SE	Spectral Efficiency (Spektral Verimlilik)
SNR	Signal-to-Noise-Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
SS	Spread Spectrum
TDMA	Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)

UB	Union Bound
UE	User Equipment (Kullanıcı ekipmanı veya makineler)
UL	Up-Link (Yukarı Yönlü Bağlantı)
VAMP	Vector Approximate Message Passing
VN	Variable Nodes (Değişken düğümler)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 MTC sistemlerinin 4G'den 5G'ye evrilmesi [30] 9
Şekil 2.2 MTC sistemlerinin 4G'den 5G'ye evrilmesi [2] 10
Şekil 2.3 Önümüzdeki yıllarda internet ekosistemi öngörüsü [31] 11
Şekil 3.1 Yeni OMA ve NOMA dalga şekillerini gruplandırma [5] 15
Şekil 3.2 Güç bölgesi NOMA, farklı uzaklıklarda bulunan kullanıcıların güçleri de birbirinden farklıdır [6] 20
Şekil 3.3 Pseudo kod yayma dizisi alıcı-verici yapısı 21
Şekil 3.4 CDMA/LDS'den SCMA'ya geçiş 22
Şekil 3.5 SCMA 3 kullanıcılı faz-genlik yerleşimi 22
Şekil 3.6 Δ açısı ile döndürülerek üretilen BPSK için faz-genlik yerleşimi [37] 23
Şekil 3.7 LTE SC-FDMA ve OFDM üzerinden SCMA verici yapısı [16] 24
Şekil 3.8 LTE OFDMA ve OFDM üzerinden SCMA alıcı yapısı [16] 24
Şekil 3.9 Çoklu erişim teknikleri: (a) TDMA, (b) FDMA, (c) RSMA ve (d) SDMA [40] 25
Şekil 3.10 RSMA blok diyagramları [39] 26
Şekil 3.11 RSMA alıcı-verici diyagramı [41] 27
Şekil 3.12 MUSA alıcı-verici blokları [42] 28
Şekil 3.13 PDMA alıcı-verici yapısı [43] 29
Şekil 3.14 Rayleigh zayıflama kanalında BER performansı bakımından SCMA, MUSA ve PDMA karşılaştırma [42] 30
Şekil 3.15 Genel yukarı yönlü haberleşme sistem modeli 31
Şekil 4.1 SCMA sistemi 34
Şekil 4.2 SCMA Alıcı Verici Yapısı 36
Şekil 4.3 Faktör grafiği 39
Şekil 4.4 (a) MPA için FN'den VN'e güncelleme mesajları (b) MPA için VN'den FN'e güncelleme mesajları 40
Şekil 4.5 MPA Temel Blok Diyagram [46] 41
Şekil 4.6 İki seviyeli yıldız temelli faz-genlik yerleşimi için Voronoi Diyagramı 42
Şekil 4.7 Verici faktör grafiği ve anlamları 43
Şekil 4.8 Örnek 4×6 ve 8×12 boyutlu haritalama matrisleri 44

Şekil 4.9 Üç farklı yükleme oranı için oluşturulmuş haritalama matrisi, d_R değişerek yükleme oranı değiştirilmektedir 45
Şekil 4.10 Hatalı üretilmiş haritalama matrisi 46
Şekil 4.11 Hatalı haritalama ile OL=%300'e göre BER ve BLER performansı . . 46
Şekil 4.12 Örnek yıldız faz-genlik yerleşimi 48
Şekil 4.13 Dikdörtgen faz-genlik yerleşimi 49
Şekil 4.14 N=7 için çoklu frekans yeniden kullanım örneği [55] 50
Şekil 4.15 Frekans yeniden kullanım için i ve j değerlerinin belirlenmesi için örnek yön belirleme [55] 51
Şekil 4.16 Yerleşim noktalarını bulabilmek için oluşturulmuş (u, v) eksenleri [55] 51
Şekil 4.17 N=7 değeri için küme içindeki her hücreye yerleştirilmesi gereken frekans indis değeri [55] 52
Şekil 4.18 7 Adet hücreden oluşan bir küme için örnek yerleşim [55] 52
Şekil 4.19 Farklı sayılarda kümelenmeler için olası yerleşimler [55] 52
Şekil 4.20 Dikdörtgen temelli bir QAM-256 için faz-genlik yerleşimi 53
Şekil 4.21 Frekans yeniden kullanım kurallarına göre oluşturulmuş dokuz kullanıcı için yerleşim 54
Şekil 4.22 Dikdörtgen QAM 256 faz-genlik yerleşimi üzerinde dokuz hücreden oluşan kümelenmelerde üç adet eşit uzaklıklı kod kitabı elemanları gösterimi 55
Şekil 5.1 Üç farklı OF $\lambda = \%150$, $\lambda = \%200$ ve $\lambda = \%250$ değeri için tek seviyeli yıldız faz-genlik yerleşimi I/Q diagramı 59
Şekil 5.2 Dokuz UE altı RE ve $\lambda = \%150$ için faz-genlik yerleşimi I/Q diagramları 59
Şekil 5.3 Altı RE, dokuz UE ve $\lambda = \%150$ için RE faz-genlik yerleşimi I/Q diagramları 60
Şekil 5.4 Yıldız temelli faz-genlik yerleşim için OL = %150 için performans. Tüm UE'lar aynı performansa sahiptir 61
Şekil 5.5 OL değeri %150, %200 ve %250 için AWGN etkisi ile eşit uzaklıklı yıldız temelli tek genlik seviyeli CB'lere göre performans karşılaştırması 61
Şekil 5.6 OL değeri %150, %200 ve %250 için Rayleigh sönümleme kanalı etkisi altında hem BER hem de LDPC kullanıldığı durumda BLER karşılaştırması 62
Şekil 5.7 Tüm CW'lerin arasının eşit olduğu iki seviyeli yıldız temelli ana faz-genlik yerleşimi I/Q diagramı 62
Şekil 5.8 İki seviyeli yıldız temelli ana CB'a göre UE'lerin faz-genlik yerleşimi I/Q diagramları, $J = 9$, $d_j = 2$ ve $\lambda = \%200$ 63
Şekil 5.9 Yıldız temelli iki seviye genlikli ana CB ile BER performansı ($\lambda = \%200$) 63
Şekil 5.10 Eşit uzaklıklı karesel faz-genlik yerleşimine göre oluşturulmuş ana CB 63

Şekil 5.11 Dikdörtgensel ana CB için tüm UE'ların faz-genlik yerleşimi I/Q diagramları, $J = 9$, $d_j = 2$, ve $\lambda = \%150$ 64
Şekil 5.12 Dikdörtgensel temelli eşit uzaklıklı CB'lerle BER performansı. $K = 6$, $d_R = 3$ ve $\lambda = \%150$ 65
Şekil 5.13 Enerji çeşitliliği ile oluşturulmuş ana CB'ler 65
Şekil 5.14 Enerji çeşitliliği olan ana CB ile CB dağılımı I/Q diagramları, $J = 9$, $d_j = 2$ ve $\lambda = 150\%$ 66
Şekil 5.15 Dikdörtgensel ve Enerji çeşitliliğine sahip ana CB ile elde edilmiş BER performansı 67
Şekil 6.1 Yukarı yönlü OFDM-IM modülasyon ve demodülasyon mimarileri . 71
Şekil 6.2 Önerilen yukarı yönlü SCMA-IM yapısı 72
Şekil 6.3 Farklı seyreklik değerleri için EPA ve AMP performans grafiği 75
Şekil 6.4 AWGN etkisi altında minimum öklid uzaklıklarına (d_{min}) göre teorik performans sınırları 78
Şekil 6.5 Farklı OL, M ve M_I değerlerine göre erişim tekniklerinin frame başına taşıdığı bit miktarı karşılaştırması 79
Şekil 6.6 $\lambda = \%150$ ve $d_R = 3$ için örnek CB^{IM}_{ana}. İndeksle ayrıştırılan çizgilerle birleştirilmiş c^1_1 ve c^2_1 örnek kod kitapları faz-genlik yerleşimi 81
Şekil 6.7 AWGN altında BER performans karşılaştırması 82
Şekil 6.8 Rayleigh sönümleyici kanal etkisi altında BER performans karşılaştırması 82
Şekil 6.9 Rayleigh sönümleme kanal etkisi altında LDPC ve QC-LDPC ile ortalama BLER performans karşılaştırması 83

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 4G, 4.5G ve 5G için pratik değerlerle birlikte verilmiş performans karşılaştırmaları [33] 12
Tablo 3.1 NOMA farklılıkları [6] 19
Tablo 3.2 NOMA türleri için avantaj ve dezavantajlar [42] 30
Tablo 4.1 Kaynak sayısı K ve kullanıcıların kullandığı kanal sayısı d_j'ye göre SCMA için maksimum yükleme oranları 47
Tablo 5.1 Farklı OL değerleri için SCMA benzetim parametreleri 57
Tablo 5.2 Tek Seviye yıldız faz-genlik yerleşimine göre parametreler 58
Tablo 5.3 Yıldız ve Dikdörtgensel ana faz-genlik yerleşim temelli OL = %150 için kullanılan enerji ve öklid uzaklıkları tablosu 66
Tablo 6.1 Veri hızı bakımından metodların karşılaştırılması 78
Tablo 6.2 Farklı OL oranları için benzetim parametreleri 79
Tablo 6.3 c_1^1 ve c_1^2 İçin Örnek Atama Tablosu 81

ÖZET

Yoğun Makine Tipi Haberleşmesinde Yenilikçi Çoklu Erişim Yöntemlerinin Tasarımı

Ferdi TEKÇE

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Umut Engin AYTEN
Eş-Danışman: Prof. Dr. Lütfiye Durak ATA

Tezde, 5G ve ötesi ile daha da önemli hale gelmiş makine türü haberleşme ve NOMA teknikleri incelenmiştir. Yüksek aşırı yüklenme oranı, spektral verimlilik, mevcut sistemlerde kullanılabilirlik ve BER performansı nedeniyle SCMA yöntemi, MTC için uygun bir aday olarak kabul edilmiş ve derinlemesine çalışılmıştır. SCMA yöntemi literatürde incelenmiş, matematiksel olarak türetilmiş, gerçeklemesi yapılmıştır. Yapılan gerçeklemeler ile SCMA tekniği için kritik olan kod kitabı tasarımının yapılmasında kullanılacak farklı yöntemler önerilmiştir. SCMA için karşılaştırmalar ve benzetimler yapılmıştır. Bu çalışmalar sonrasında indeks modülasyonu destekli SCMA (SCMA-IM) isimli yeni bir erişim tekniği önerilmiştir. Bu yöntem matematiksel olarak türetilmiş, alıcı verici yapıları gerçeklenmiş ve mevcut benzer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. SCMA-IM tekniğinin yeni ve güçlü yönleri gerçeklemeler ve benzetimlerle gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: mMTC, NOMA, SCMA, OFDM-IM, SCMA-IM

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABSTRACT

Design a Novel Multiple Access Scheme for Massive Machine Type Communication

Ferdi TEKÇE

Department of Electronic and Communication Engineering
Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Umut Engin AYTEN
Co-advisor: Prof. Dr. Lütfiye Durak ATA

In the thesis, machine type communication and NOMA techniques, which have become more important with 5G and beyond, are examined. Due to high overloading rate, spectral efficiency, usability on existing systems and BER performance, SCMA method has been considered as a suitable candidate for MTC and studied thoroughly. The SCMA method has been examined in the literature, mathematically derived and implemented. Different methods are proposed to be used in codebook design, which is critical for the SCMA technique with the implementations. Comparisons and simulations have been made for SCMA. After these studies, a novel access scheme named SCMA (SCMA-IM) with index modulation was proposed. This method is mathematically derived, transceiver structures implemented and compared with existing similar methods. The novel and strong aspects of the SCMA-IM technique have been demonstrated with implementations and simulations.

Keywords: mMTC, NOMA, SCMA, OFDM-IM, SCMA-IM

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Kullanıcı sayılarının artması ve kullanıcı gereksinimlerindeki değişiklikler sebebiyle, mevcut haberleşme sistemlerinde kullanılan tekniklerin gelecek nesil haberleşme sistemleri için yeterli olmayacağı görülmektedir. Özellikle mevcut telsiz haberleşme sistemlerinde kullanılan dalga şekilleri, kullanıcıların senkron olmadığı durumda iyi sonuçlar vermemektedir. Ayrıca kullanıcı sayısının artması ile mevcut kaynaklar yetersiz kalmakta ve yeni iletim modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

5G ve ötesi haberleşme sistemlerinde, insan haberleşmesi için öneriler dışında makine tipi haberleşme (Machine Type Communication, MTC) teknikleri için de başlıklar açılıp önerilerde bulunulmuştur. Uzun yıllardır makineden makineye (Machine-to-Machine, M2M), cihazdan cihaza (Device-to-Device, D2D) ve nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) olarak isimlendirilen haberleşme türlerinin yanında, bunların tamamını kapsayacak şekilde cihazlar arası haberleşme sistemleri MTC başlığı altında gruplanmıştır [1], [2], [3]. MTC ile, elektronik cihazların, ekipmanların ya da haberleşme alt yapısına sahip makinelerin haberleşmesi kapsanmaktadır. MTC sistemleri, endüstri, sağlık, lojistik, üretim, otomasyon, askeri uygulamalar, enerji, araçlar vb. gibi alanlarda kullanılmakta ve kullanılan cihaz sayısı her geçen gün artmaktadır [4].

Dikgen erişim tekniklerinde, frekans kanalı, zaman aralığı, uzaysal açı gibi fiziksel kaynaklar belli sürede yalnızca bir kullanıcıya tahsis edilir. Kullanıcı sayılarındaki artış nedeniyle kaynaklar da yetmemeye başlamıştır. Fiziksel kaynak azlığı ve birebir kullanıcılara tahsis edilmesi, yoğun kullanıcı sayısına sahip makine tipi haberleşmeler için mevcut sistemlerin yeterli olmamasına neden olur ve bu durum yeni erişim tekniklerini gerektirmektedir. Örneğin, 5G ve ötesi haberleşme sistemlerindeki yoğun makine tipi haberleşme (massive Machine Type Communication, mMTC) senaryolarında km^2'ye düşen kullanıcı sayısı hedefi $1000K$'dir ve dikgen çoklu erişim (Orthogonal Multiple Access, OMA) sistemleri ile bu hedefe ulaşmak olası değildir [2].

Yeni nesil haberleşme sistemleri için önerilecek erişim tekniklerinde bit hata oranları (Bit Error Rate, BER) veya blok hata oranları (Block Error Rate, BLER) performanslarının iyileştirilmesi ve yüksek veri iletim kabiliyetine erişim kritik ihtiyaçlardır. Yetenekleri ve güvenilirlikleri onaylanmış ve özellikle OFDM çalışan sistemlere uyarlanabilen yeni dikgen olmayan çoklu erişim (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) teknikleri mevcuttur [5]. NOMA temelli sistemler için bir fiziksel kaynağın birden fazla kullanıcıya paylaştırılması ana hedeftir. Dikgen olmama, fiziksel kaynakların aynı anda birden fazla kullanıcıya paylaştırılıyor olması diye tanımlanmaktadır. Dikgen olmama esasları için temel üç adet NOMA yaklaşımı bulunmaktadır [5]. Birinci önerilen yöntem güç bölgesi NOMA olarak tanımlanmıştır. Baz istasyonları ve kullanıcı ekipmanları (UE) veya makineler arası güç farklılıkları ile farklı ekipmanların aynı kaynakları veri iletimi için kullanabilmesi sağlanır. İkinci önerilen yöntem, kod bölgesi NOMA tekniklerdir. Kod bölmeli çoklu erişim (Code Division Multiple Access, CDMA) ve benzeri farklı kodlar kullanılan ve UE'leri bu şekilde birbirlerinden ayırmayı hedefleyen yöntemdir. Son yöntem ise çoğullanmış NOMA tekniklerdir. Bu NOMA teknikleri yaklaşımında ise diğer tekniklerin birleştirilmesi ile güç, kod ya da uzaysal olarak kaynakların birden fazla şekilde kullanıcılara kullandırılması sağlanmaktadır. Bu yöntemin birden fazla yöntemin özelliklerini barındırması sebebi ile avantajlara sahip olmasına rağmen gerçeklenmesi zordur ve oluşturulan sistemlerin maliyetleri diğer tekniklere göre daha yüksektir.

Kod bölgesi NOMA için mevcut önerilen OMA yöntemlerindeki gibi zaman ve frekans fiziksel kaynakları dikgen kullanılır. Kod bölgesinde yapılan farklılıklarla, fiziksel kaynaklar çok daha fazla kullanıcıyla kullanılır. Kod bölgesi NOMA, CDMA temelli olan düşük yoğunluklu yayılım (Low Density Signature, LDS) yöntemini esas alan, farklı yaklaşımlarla türetilmiş yöntemleri içerir. En önemli aşamaları genellikle kod kitapları üretimi ve bu kod kitaplarına göre alıcıda verilerin elde edilebilmesidir. Öne çıkan bazı kod temelli NOMA teknikleri çoklu kullanıcılı paylaşımlı erişim(Multi-User Shared Access, MUSA), seyrek kodlu çoklu erişim (Sparse Code Mutiple Access, SCMA) ve kaynak yayılımlı çoklu erişim (Resource Spread Multiple Access, RSMA)'dir [6]. Tez çalışmasında, bahsedilen yöntemler incelenmiş ve içlerinden SCMA seçilerek üzerinde detaylı çalışmalar yapılmıştır.

Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) teknolojisi, 4G sistemleri için standart erişim şeması olmuştur ve ayrıca Bluetooth ve Wi-Fi gibi birçok popüler kablosuz iletişim protokolünde de kullanılmaktadır. Veri iletimi için zaman ve frekans çoklamasına ek olarak, kullanıcılara birden çok alt taşıyıcı tonu atanarak yüksek veri aktarım hızları elde edilebilir. Dikgen frekans bölünmesine rağmen çoğullamanın, yüksek tepe / ortalama güç oranı (Peak to Average Power Ratio, PAPR) ve döngüsel ön ek (Cyclic Prefix, CP)

dahil edilmesi gibi dezavantajları vardır. Pratik uygulaması nedeniyle daha yüksek bant genişliği sağlayan 5G ve ötesi sistemlerde kullanılmaya devam edecektir. Yeni erişim şemaları, BER veya BLER iyileştirmenin yanı sıra, NOMA özelliğine sahip olması açısından yeni nesil iletişim sistemleri için kritiktir ve mevcut OFDM sistemlerinde kolaylıkla gerçekleştirilebilir [5].

İndis modülasyonlu OFDM (OFDM with Index Modulation, OFDM-IM), bilgiyi iletmek için alt taşıyıcı tonlarının indis numaralarını kullanmak için önerilmiştir [7]. Bu yöntem, verilerin seçilen antenler yerine, seçilen taşıyıcılar aracılığıyla iletildiği uzaysal modülasyona benzer bir ilkeye dayanmaktadır. Ancak OFDM-IM yönteminde bazı tonlar üzerinden veri aktarımı yapılmamaktadır. Bu nedenle, BER performansında bir gelişme olmasına rağmen, standart OFDM'den daha düşük sayıda iletilen bit ile sonuçlanır [8]. [9]'da, spektral verimliliği (Spectral Efficiency, SE) ve BER performansını iyileştirmek için özel bir faz-genlik yerleşimi eşleme tabanlı indis modülasyonu (Index Modulation, IM) önerilmiştir. Sonrasında, kullanılmayan taşıyıcıların iki farklı faz-genlik yerleşimi kullanarak, tüm tonlardan veri iletmeye elverişli yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemlerden biri, ikili Mod-OFDM (DM-OFDM) olarak adlandırılan, OFDM'den daha yüksek SE ve verim sağlamaktadır [8]. Farklı güç seviyeleri dahil edilerek, farklı performans iyileştirme yöntemleri de önerilen ve alıcıların basitliği açısından karşılaştırmalar yapılan çalışmalar mevcuttur [10]. Bu çalışmalara ek olarak literatürde, belirlenen faz-genlik yerleşimi düzenini standartlaştırmak için, temel bant işlemlerini farklı sembol oranlarıyla modelleyen indis modülasyonlu genelleştirilmiş çok modlu OFDM (Generalized Multiple-Mode OFDM with index modulation, GMM-OFDM-IM) şeması önerilmiştir [11].

Seyrek kodlu çoklu erişim (SCMA), mMTC için önerilen erişim yöntemleri arasında öne çıkmaktadır [12], [13]. Bu teknik, kod kitapları (codebook, CB) aracılığıyla temel bant modülasyonunu gerçekleştirir. SCMA'da her kullanıcı, verileri birden çok fiziksel kaynak üzerinden iletir. Aynı fiziksel kaynağı (resource element, RE) kullanan veri iletimi, farklı CB'ler tarafından sağlanır. Faz-genlik yerleşimi eşlemeleri, sıklık, zaman veya kod alanı kaynaklarına ek olarak kullanıcıları CB'lere göre ayırt etmek için kullanılır. SCMA, aşırı yüklemeye (overloading, OL) ve yetkisiz kullanımla kullanıcı tanıma yeteneğine izin verir. Ayrıca, CB'lerle ilgili farklı faz-genlik yerleşimlerinin kullanımına ve basit alıcılarla kod çözülmesine izin verir. SCMA şemasında, tüm CB'leri içeren optimum bir ana CB'ye sahip olmak çok önemlidir [14], [15].

SCMA, mevcut şeması ile OFDM tabanlı sistemlere kolayca uyarlanabilir [16], [17]. Bu çalışmada, IM şemalarında önerildiği gibi farklı faz-genlik yerleşimlerinin kullanımını destekleyen ve mevcut SCMA sistemlerine kolayca dahil edilebilen İndis Modülasyonlu Seyrek Kodlu Çoklu Erişim (Sparse Code Multiple Access based on

OFDM-IM, SCMA-IM) önerilmiştir. CB sayısına göre indisler üzerinden ek bitler gönderilir. SCMA tabanlı yapı sayesinde, OL ve düşük karmaşıklıktaki alıcı tasarımları aynı anda mümkündür. SCMA-IM'de SCMA gibi çoklu M (M-ary) semboller için haritalama işlemleri kullanılır ve faz-genlik yerleşim diyagramları indis bitlerine göre değiştirilir. Karesel genlik modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) faz-genlik yerleşim (constellation) noktalarının değiştirilmesi, döndürülmesi veya gruplandırılması önerilen CB oluşturma yöntemlerinden bazılarıdır [17, 18].

Düşük yoğunluklu eşlik denetimi (Low-Density Parity-Check, LDPC) kodları, tatmin edici hata performansları nedeniyle uzun süredir yaygın olarak kullanılmaktadır. Hata performansı, inanç yayılımı (belief propogation) yoluyla toplam çarpım algoritmasının (sum-product algorithm, SPA) kullanımından kaynaklanır, ancak yüksek karmaşıklık olumsuz bir durum olarak gözlenmektedir [19]. Bu sorunun üstesinden gelmek için yarı döngüsel LDPC (quasi-cyclic LDPC, QC-LDPC) geliştirilmiştir. QC-LDPC kodlarında, kodlama için basit kaydırmalı yazmaçlar kullanır. Bu kayıtların basitliği ve yinelemeli yapısı, QC-LDPC'nin karmaşıklığını doğrusal bir ölçeğe indirgemektedir. Ek olarak, QC-LDPC kod çözücü için neredeyse %50 daha az alan kullanımı gerekir, bu da onu küçük ölçekli entegrasyon için vazgeçilmez kılar [20]. LPDC kodlarının performans analizi, yoğunluk geliştirme (density evolution) yöntemi ile yapılır. Bu yöntem, verilen düğümlerin olasılık yoğunluklarını yinelemeli olarak hesaplamak için her düğümde log benzerlik oranı (Log-Likelihood Ratio, LLR) bilgilerini kullanır [21]. Özellikle, sınırlı mesafeli kod çözme gerçekleştirilir ve düğümler kod çözme sonucuna göre güncellenir [22]. LPDC kodunun BER performansını hesaplamak için olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılır. Olasılık yoğunluk fonksiyonlarının kullanımı, normal ve düzensiz LDPC kodları arasında farklılık gösterse de, yinelemeli yapısı, yapısal benzerlikten dolayı MPA gibi algoritmalar için kullanılabilir olmasını sağlar.

Literatürde SCMA ve IM yöntemlerinin birlikte kullanıldığı birkaç çalışma vardır. Bunların ortak özelliği, tonların veya zaman dilimi kaynaklarının indisler üzerinden bilgi taşımak için kullanılmasıdır, oysa kullanılmayan veya devre dışı bırakılmış kaynaklar da vardır [23–26]. Bu çalışmalarda SCMA CB'leri, yalnızca IM'nin aktif indislerinde kullanılır. OFDM-IM'de olduğu gibi, kullanılmayan indisler vardır ve aktif bir taşıyıcı veya indis vektörü gereklidir. IM tabanlı şemalardaki taşıyıcıların sayısını azaltarak, SE daha fazla geliştirilebilir. Kaynakça [24]'de, sadece zaman dilimleri kullanılır ve farklı kullanıcılar tarafından hangi kaynağın seçileceğine dair bir senkronizasyon yoktur. Bu, keyfi sayıda kullanıcının, belirli bir hata düzeyine kadar izin veren indisler aracılığıyla eş zamanlı olarak bit iletmesine izin veren kayıplı bir şemadır. Hesaplama karmaşıklığını azaltmak için bu şema, çarpışmayı analiz etmek için fazladan bir bloğa sahiptir ve her bir zaman diliminde alınan sinyalin

büyüklüğünü karşılaştırmak için bir eşik gerektirir. Kaynakça [26]'da kullanılan terminoloji ve yöntemler kaynakça [24]'deki yapıya benzer şekildedir. Bununla birlikte, kaynakça [26]'da, zaman aralıklarından ve kayıplı iletişimden bahsedilmez ve IM kullanılır. Kullanılmayan kaynaklar nedeniyle, bu yöntemin enerji verimli olduğu iddia edilmektedir. Kaynakça [23]'de önerilene benzer bir yapıya sahiptir ve daha fazla indis kullanmak için birden fazla bit-indis (bit to index, BTI) eşleştiricisi kullanır. Diğerlerinin aksine, algılama algoritması, hem kod sözcüklerini (CW'ler) hem de BTI'leri algılamak için bir modifikasyona sahip MPA'dır. Dizin alanının her kullanıcı için tekil olması zorunludur, bu da her kullanıcının CW'leri oluşturmak için aynı modeli paylaştığı anlamına gelir. SCMA-IM'de aynı modeli kullanma zorunluluğu yoktur ve her kullanıcının yalnızca bir ana CB'ye sahip olması gerekir. Bu yöntem, aktif olmayan indisi azaltmak ve kaynakça [25, Tablo II]'de verilenden daha fazla bit iletmek için daha fazla BTI kullanır, ancak kullanılmayan indisler de vardır. Diğer çalışmalarda önerilen yöntemlere göre daha iyi aktarım performansına sahiptir ancak SCMA-IM'in aksine tüm indisleri tam olarak kullanmamaktadır. Bu da spektral verimsizlik anlamına gelmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Tezin temel amacı, NOMA tekniklerinin incelenerek, mMTC uygulamaları için yenilikçi ve en uygun çoklu erişim yönteminin tasarlanıp, gerçeklenmesidir. Bu konu ile alakalı literatür incelenmiş, uygun çalışmalar seçilerek üzerlerinde çalışılmıştır. Çalışmalar sonrasında SCMA ve IM'nin yetenekleri birleştirilerek özgün bir NOMA tekniği önerilmiştir.

1.3 Orijinal Katkı

Tez, özellikle 5G ve ötesi ile daha fazla çalışılmaya başlanan makine tip haberleşme ve NOMA için erişim tekniklerinin incelenmesi ve özgün bir yöntem ortaya koyması bakımından katkılarda bulunmaktadır. Bu kapsamda SCMA yöntemi seçilmiştir. SCMA yöntemi matematiksel olarak türetilmiştir. Daha sonra MATLAB ortamında gerçeklemesi yapılıp farklı koşullar için performansı incelenmiştir. SCMA için aşırı yükleme oranı, sınırları, kod kitabı üretim yöntemleri incelenmiş ve öneriler verilmiştir. Performans ve önceliklendirme ile ilgili elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

SCMA sonrasında literatürde olmayan, incelenen yönteme ek olarak daha yüksek veri iletimi sağlayacak yenilikçi bir NOMA yöntemi önerilmiştir. Yönteme, temel olarak SCMA ve OFDM-IM prensipleri kullanılarak geliştirilip önerildiği için İndis Modülasyonlu Seyrek Kodlu Çoklu Erişim (Sparse Code Multiple Access based on

OFDM-IM, SCMA-IM) ismi verilmiştir. SCMA-IM yönteminin mimarisi detaylı şekilde verilmiş ve matematiksel olarak türetilmiştir. Mevcut SCMA ve IM yöntemleri performans, veri taşıma kabiliyeti ve sınır değerleri bakımından karşılaştırılıp sonuçlar incelenmiştir.

Tezde, SCMA ve IM birleştirilip matematiksel modeli oluşturularak yeni bir şema önerilmiştir. Bu tezin ana katkılarından biri, mMTC sistemleri için yukarı bağlantı SCMA-IM şemasının tanıtılmasıdır. Ayrıca, SCMA-IM'nin veri aktarım hızı mevcut sistemlerle karşılaştırılmıştır. SCMA-IM, literatürde açıklanan farklı IM tabanlı yöntemlere kıyasla aşağıdaki avantajları sağlar:

(i) OFDM-IM ve varyantları OMA sistemlerinde uygulanırken, SCMA-IM hem NOMA sistemleri için IM'yi eklemekte, hem de IM yöntemleri için OL'ye izin vermektedir.

(ii) SCMA-IM, hem CB'ler yardımıyla indislerle veri gönderimi yeteneğini hem de indislerle birden fazla bit gönderme yeteneğini kazandırmaktadır.

(iii) SCMA-IM'de CB'lerin ayrıştırılması ile indislerle yollanan bitlerin çözümü sağlanır. SCMA sistemleriyle aynı karmaşıklığa ve farklı veri boyutlarını iletme yeteneğine sahiptir. Bu sayede IM tabanlı sistemlere kıyasla daha basit bir şema olan verici yapısı elde edilmiştir. Alıcı kısmında indis matrisi elde etme işlemi ortadan kaldırılmıştır. Aynı zamanda, uygulaması kolay MPA ve LLR algoritmalarının kullanılması, basitleştirilmiş alıcılara sahip olunmasını sağlamıştır.

(iv) Hem OFDM hem de diğer IM şemalarına kıyasla verimlilik artmaktadır.

1.4 Tezin Kapsamı

Tezde kod tabanlı NOMA türlerinden, SCMA incelenmiştir ve çalışmalar yapılmıştır. Alıcı verici yapıları, düşük karmaşıklıklı ve mevcut sistemlere de kolayca uygulanabilirdir. En önemli yenilik temel bant modülasyonu ile CDMA veya LDS yöntemindeki kod yayma işlemini özgün olarak birleştirmiş olmasıdır. Her kullanıcıya özel tekil bir kaynak kullanım seçimi ve kod kitabı vardır [27]. Özellikle bir merkezi yönetici birim olmadan, izinsiz (grant-free) haberleşme ihtiyaçlarına göre de kullanılabilecek bir tekniktir [28]. Haberleşme sırasında alıcı verici için düşük senkronizasyon ve kimlik yükü (overhead), düşük gecikme gibi avantajları sayesinde yoğun bağlantı sayılarına izin verir. BLER performansı yüksektir [27]. SCMA için en önemli ve performansı etkileyen aşama, ana kod kitabı (mother codebook)

tasarımlarıdır. Ana kod kitabı tüm kod kitaplarını barındırır. Kod kitabının içindeki her sembole kod kelimesi adı verilir. Kullanıcının hangi kaynakları kullanacağı haritalama matrisi ile belirlenir. Ayrıca SCMA kolayca OFDMA sistemlerine uyarlanabilir yapıdadır. Bu sayede mevcut sistemler üzerinde uygulanabilir durumdadır [16]. NOMA tekniklerini OMA'dan ayıran önemli farklardan biri de bir UE'nin birden fazla kaynağı kullanabilmesidir. Örneğin SCMA için, bir UE'nin kullandığı kaynaklar kendine özgüdür ve böylece kaynak kullanımı sayesinde kullanıcılar ayırt edilebilir.

SCMA için, kod kitaplarının üretilmesi konusunda çok fazla sayıda çalışma bulunmaktadır. Faz-genlik yerleşimlerinin döndürülmesi, belli açılarla döndürülen düzlem üzerine yerleşim vb. gibi çok sayıda yöntem önerilmiştir ve yeni önerilere de açık durumdadır [29]. Fakat ortak kod kitapları ile çalışmaların yapılması ve sonuçların birbirleri ile karşılaştırılması uygulanan genel yaklaşımdır.

OFDM'de temel bant modüleli sembolleri taşıyan tonların indis numaralarının da veri taşımak için kullanılmasına imkan veren bir yöntem mevcuttur. Bu yenilikçi yönteme indis modülasyonlu dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM-IM) tekniği adı verilmiştir. Bu teknik uzaysal modülasyon çalışma prensibinde olduğu gibi seçilen antenlerle veri taşır gibi, hem belirlenen taşıyıcılar hem de taşıyıcı indisleriyle veri taşımaktadır [7]. Bu yöntemin temel alındığı indis temelli farklı çalışmalar da mevcuttur. Tezde önerilen yenilikçi yöntemde de OFDM-IM'nin çalışma prensibinden yararlanılmıştır.

Hem SCMA hem de IM teknikleri temel alınarak yeni ve özgün bir mimari önerilmiştir.

1.5 Tezin Akışı

Giriş kısmından sonra, özellikle bütünselliğin sağlanabilmesi açısından teknik altyapının verildiği bölüm olacaktır. Bu bölümde, makine tipi haberleşme, çoklu erişim teknikleri, genel yukarı yönlü erişim yapısı ve indis modülasyonu incelenecektir. Seçilen erişim tekniği olan SCMA yönteminin, matematiksel ifadesi, tasarım sınırları, kod kitabı tasarımı, performans değerlendirmeleri ve yapılan benzetimlerin sonuçları verilecektir. Ardından da önerilen SCMA-IM yöntemi detaylandırılacaktır. Son bölümde de tezde elde edilen sonuçlar değerlendirilecek ve tartışılacaktır. Bölümlerin içinde konu ile ilgili literatür araştırması da verilmiştir.

2
MAKİNE TİPİ HABERLEŞME

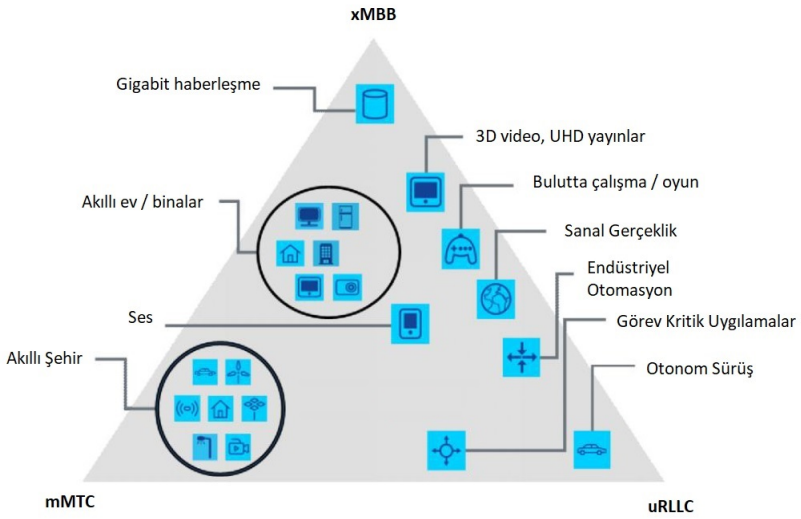
Hücresel haberleşme sistemleri 5G ve ötesi ile kullanıcı ve baz istasyonları için temel ses ve veri trafiği ihtiyaçları dışında güncel ihtiyaçları da karşılamak hedefindedir. Yapılan çalışmalar da kullanım senaryoları, sistemlerde makinelerin olması, internete ihtiyacın çok fazla olması ve çok sayıda uç nokta bulunması gibi nedenlerle, üç ana başlık altında incelenmektedir:

- Çok yüksek mobil geniş bant haberleşmesi (extreme Mobile BroadBand, xMBB): Çok yüksek bant genişliklerine ihtiyaç duyan terminal veya veri aktaran birimlerin sayısının az olduğu haberleşmeler,
- Yoğun makine tipi haberleşme (massive Machine-Type Communications, mMTC): Düşük bant genişliğine sahip olan çok sayıda makinenin haberleşmeler,
- Çok yüksek güvenilirlikli düşük gecikmeli haberleşme (ultra-Reliable Low-Latency Communication, uRLLC): Düşük gecikme ve yüksek doğruluk seviyelerine sahip olan makine haberleşmeler,

için kullanılmak üzere temel senaryolar tanımlanmaktadır. Uluslararası telekomünikasyon birliği (International Telecommunication Union, ITU) tarafından gelecek haberleşme sistemi için senaryolar Şekil 2.1'de verilmiştir. Farklı haberleşme ihtiyacı olan durumlara göre, bu senaryolar arası yakınlık ve gruplamalar yapılmıştır.

MTC sistemleri, bilindik insan-insan, insan-internet gibi haberleşme sistemlerinden daha farklı gereksinim ve problemlere sahiptir. MTC sistemlerine ait performans ölçütleri bile farklılık göstermektedir. MTC sistemlerine ait birtakım zorluklar aşağıdaki gibi sıralanabilir [2]:

- Çok sayıda cihaz ($1km^2$ için 1 milyon cihaz),
- Küçük paket boyları, düşük bant genişlikleri,



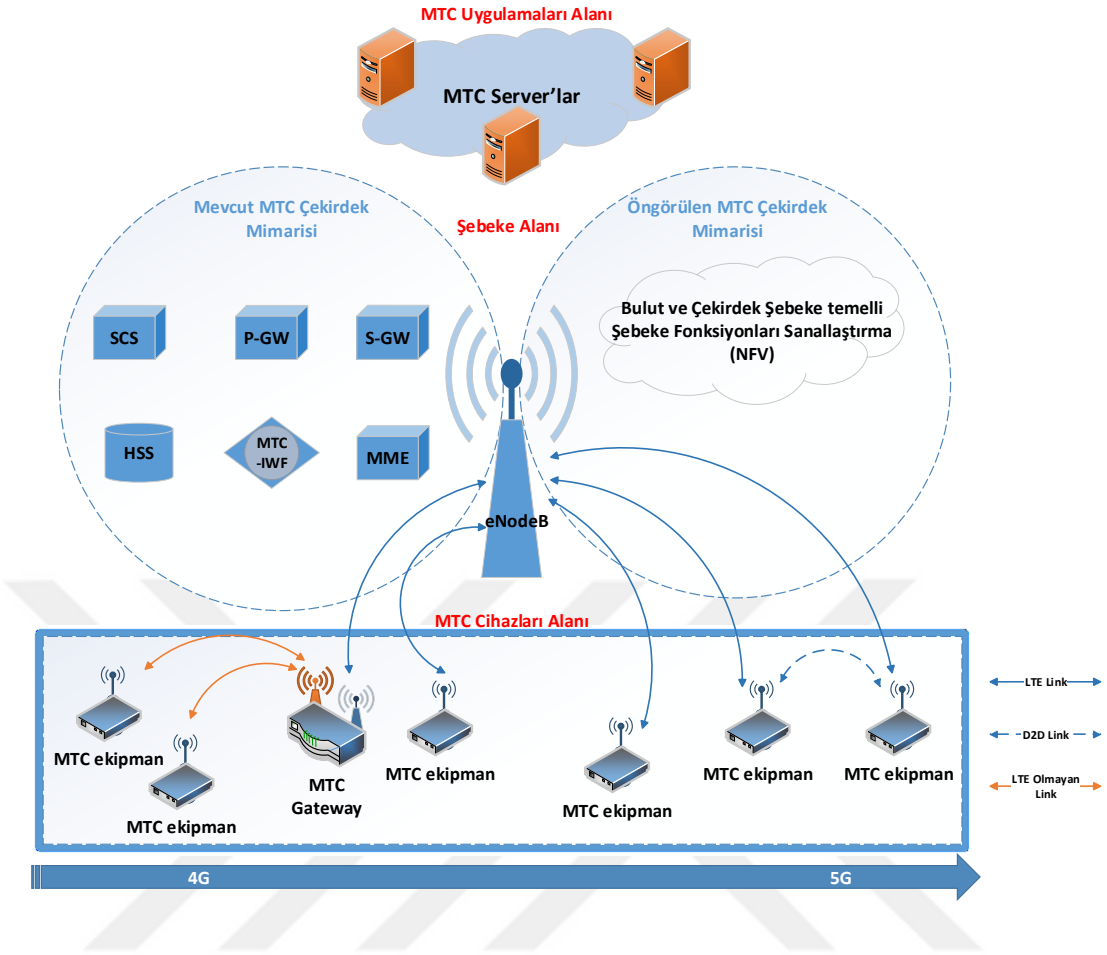
Şekil 2.1 MTC sistemlerinin 4G'den 5G'ye evrilmesi [30]

- Trafik yoğunluğu ağırlıklı olarak yukarı yönlü haberleşme de,
- Yüksek güvenlik ihtiyaçları ve düşük gecikme,
- Düşük güç tüketimi ihtiyacı,
- Düşük maliyet ihtiyaçları,
- Çok yüksek kapsama alanı.

Yeni nesil haberleşme sistemlerinde cihazlar bir ağ geçidi aracılığı ile değil Şekil 2.2'de gösterildiği gibi doğrudan baz istasyonları ile konuşabilir hale gelecektir. Bu nedenle MTC için yoğun cihaz sayıları ve bunların sisteme dahil edilmesi gibi yeni problemler baz istasyonları ve erişim tekniklerini ilgilendirir hale gelmiştir [2].

2.1 Yoğun Makine Tipi Haberleşme

mMTC Sistemleri için çok düşük veri hızları, çok yüksek sayıda bağlantı, geniş kapsama alanı, düşük maliyet ve düşük karmaşıklıklı altyapı gibi gereksinimlerin sağlanması gerekmektedir. Şekil 2.3'de verildiği gibi makine sayıları yıllar geçtikçe artmaktadır. Bu hızlı artış MTC haberleşme sistemleri için yeni haberleşme tekniklerine ihtiyacı beraberinde getirmektedir. MTC haberleşme sistemleri için karasal haberleşmenin uygun olmadığı durumlarda uydu haberleşmesi de kullanılabilir.

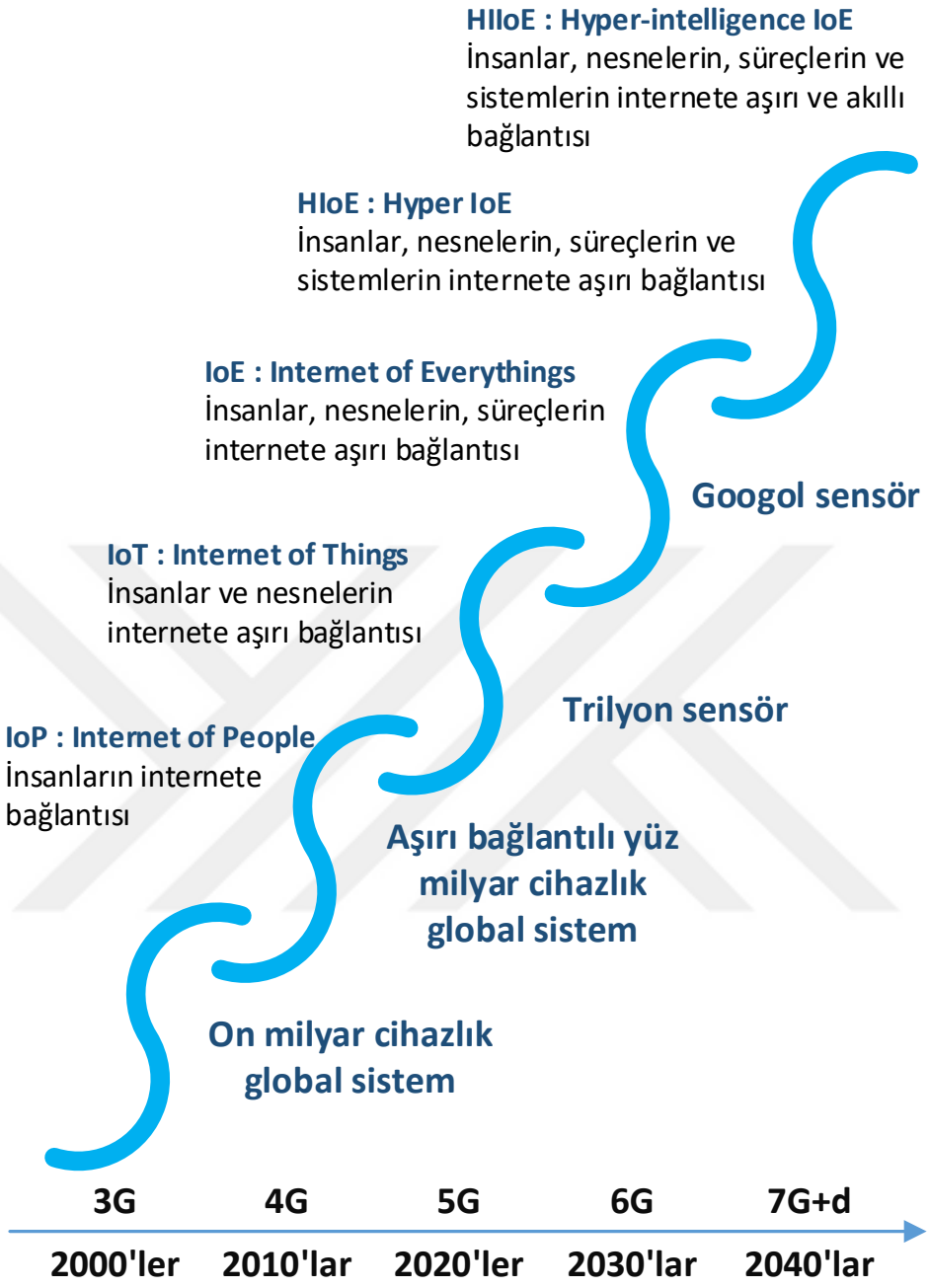


Şekil 2.2 MTC sistemlerinin 4G'den 5G'ye evrilmesi [2]

2.2 Makine Tipi Haberleşme Sistemleri için Performans Göstergeleri

3GPP tarafından MTC için öngörülen performans kriterleri dokümante edilmiş ve sistemlerin değerlendirilmesi için bir kılavuz görevi görmektedir. Bu göstergeler aşağıdaki gibi listelenmiştir [32]:

- En yüksek veri hızı (teorik hız, 20Gbps aşağı yönlü haberleşme (Down Link, DL), 10Gbps yukarı yönlü haberleşme (Up-Link, UL)),
- En yüksek spektrum verimliliği (30bps/Hz DL, 15bps/Hz),
- Bant genişliği,
- Kontrol düzlemi gecikmesi (belemeden aktif duruma geçiş süresi),
- Kullanıcı düzlemi gecikmesi (gelen paketlerin fiziksel seviyeden uygulamaya gelene kadar olan gecikme),



Şekil 2.3 Önümüzdeki yıllarda internet ekosistemi öngörüsü [31]

- Seyrek gelen küçük paket gecikmesi (uygulama bağımlı),
- Hareketli durumdaki paketlerin iletilmeme süresi,
- Sistemler arası hareketlilik,
- Güvenilirlik (gönderilen paketlerin başarılı iletilme ihtimali),
- Kapsama alanı ve maksimum kapsama alanı,

- Kullanıcı cihazı (UE) batarya ömrü (maksimum kapsama alanına günlük 200 byte yolladığı durumda 10-15 yıldan fazla),
- Kullanıcı cihazı enerji verimliliği (sürdürülebilir en yüksek veri hızındayken minimum enerji tüketimi),
- Hücre başına iletim noktaları için (TRxP) spektral verimlilik,
- Alan trafik kapasitesi (bulunulan coğrafyaya göre maksimum veri transferi),
- Kullanıcının elde ettiği veri hızı,
- Bağlantı yoğunluğu (km^2 başına bağlantı sayısı hedeflenen servis kalitesine (Quality of Service, QoS) göre hedef:1 Milyon cihaz/km^2),
- Hareketlilik (maksimum kullanıcı hızı hedeflenen QoS için),
- Ağ enerji verimliliği (radyo erişim ağının (radio access network, RAN) enerji tüketiminin minimum olduğu trafik kapasitesi).

Tablo 2.1 4G, 4.5G ve 5G için pratik değerlerle birlikte verilmiş performans karşılaştırmaları [33]

Performans Göstergeleri	4G	4.5G	5G	4.5G / 5G Önerilen Teknolojiler
Veri Hızı	0.01-1 Gbps	0.1-3 Gbps	0.1-20 Gbps	Massive MIMO
Spektral Verim	1.5	3	4.5	D2D, Full Duplex, Massive MIMO
Veri İşleme	0.1Mb/s/m^2	1Mb/s/m^2	10Mb/s/m^2	RAN sanallaştırma, small cells
Cihaz Yoğunluğu	100K/km^2	200K/km^2	1000K/km^2	D2D, small cells
Mobillik Maks.	350 km/h	450 km/h	500 km/h	Heterojen ağ yapısı
İletim Gecikmesi	10 ms	3 ms	1 ms	D2D, kullanıcıya yakın içerik tutma
Enerji Tüketim (100 bit)	0.1 mJ	10 μJ	1 μJ	Massive MIMO
Spektrum	4G spect.	5Ghz	MM dalga	Massive MIMO, MM-dalga spect.

Bu gereksinimlerin mevcut 4G haberleşme sistemindeki karşılığı ve gelecek nesil 5G haberleşme sistemlerinde olması beklenen değerleri ise Tablo 2.1'de verilmiştir. Burada kullanıcı sayısının artması ile sistem kapasitesinin artması gerekecektir. Aynı zamanda kullanıcıların veri hızı ihtiyaçları da artmaktadır. Medikal sensörler ve mobil uygulamalar gibi düşük iletim gecikmesine gerek duyan sistemlerde maliyet ve güvenlik de ön plandadır. Mevcut telsiz haberleşme sistemlerinde kullanıcılar arasındaki haberleşme baz istasyonları ile yapılmaktadır.

3
ÇOKLU ERİŞİM TEKNİKLERİ

Yeni nesil haberleşme sistemlerinde kullanılmaya aday olarak önerilmiş birçok dalga şekli vardır. Bu dalga şekillerini birbirinden ayıran en önemli özelliklerinden biri kaynakları kullanma şekilleridir. Buradaki kaynak frekans, zaman veya kod bilgisi olabilir. Kaynakların kullanımı bakımından çoklu erişim tekniklerini iki ana gruba ayırmak mümkündür.

- Dikgen çoklu erişim (OMA)
- Dikgen olmayan çoklu erişim (NOMA)

NOMA sistemler, frekans, zaman, kod, uzaysal alanlar gibi fiziksel kaynakları aynı anda birden çok kullanıcı kullanımına sunabilmektedir. Bu sebeple kaynak ve kullanıcı sayıları ile kaynakların kaç kullanıcıya tahsis edildiği önemli olmaktadır. NOMA tekniklerinin optimize etmeyi hedeflediği ve çözüm getirmeye çalıştığı problemlerden birisi de budur. Tezde dikgenlik durumunu bulmak için kullanılacak temel değişkenler **K** (Kaynak sayısı, Resource Elements) ve **J** (Kullanıcı sayısı, Users)'lerdir. Dikgen olma durumunu ya da sistemin ne kadar dikgenlikten uzak olduğunu belirtmek için aşırı yükleme oranı (overloading rate, λ) değeri kullanılmaktadır. Aşırı yükleme oranı (OL), sistemde mevcut kullanıcı veya ekipmanın sayısının fiziksel kaynaklara olan oranıyla tanımlanır. Bu oranın değeri dikgen sistemler için 0 ile 1 arasındadır. Fakat NOMA olan sistemlerde bu değer 1'den büyüktür. Aşırı yükleme,

$$\lambda = J/K \begin{cases} \leq 1 & ise \text{ OMA}, \\ > 1 & ise \text{ NOMA} \end{cases} \tag{3.1}$$

şeklinde ifade edilebilir. Sonuç olarak NOMA sistemler aşırı yüklenmiş yani OL değeri 1'den büyüktür. Bu iki teknikte bahsedilen dikgenlik, kaynakların (zaman, frekans veya kod) yalnızca bir kullanıcıya tahsis edilmesi ile tanımlanmaktadır. Dikgen olmayan çoklu erişimde ise kaynaklar yeni yaklaşımlarla birden fazla kullanıcıya

paylaştırılmaktadır. Yeni nesil dalga şekillerinde, mevcut OMA tekniklerinin eksiklikleri veya dezavantajlarını azaltmak için dikgen yöntemler önerilirken, aynı zamanda NOMA için de çok çeşitli yaklaşımlar ileri sürülmektedir. Şekil 3.1'de yeni dalga şekilleri konusunda literatürde önerilen güncel OMA ve NOMA teknikleri bakımından yapılan bir gruplandırma gösterilmektedir. OMA bakımından mevcut teknikler üç temel gruba ayrılmaktadır [5]:

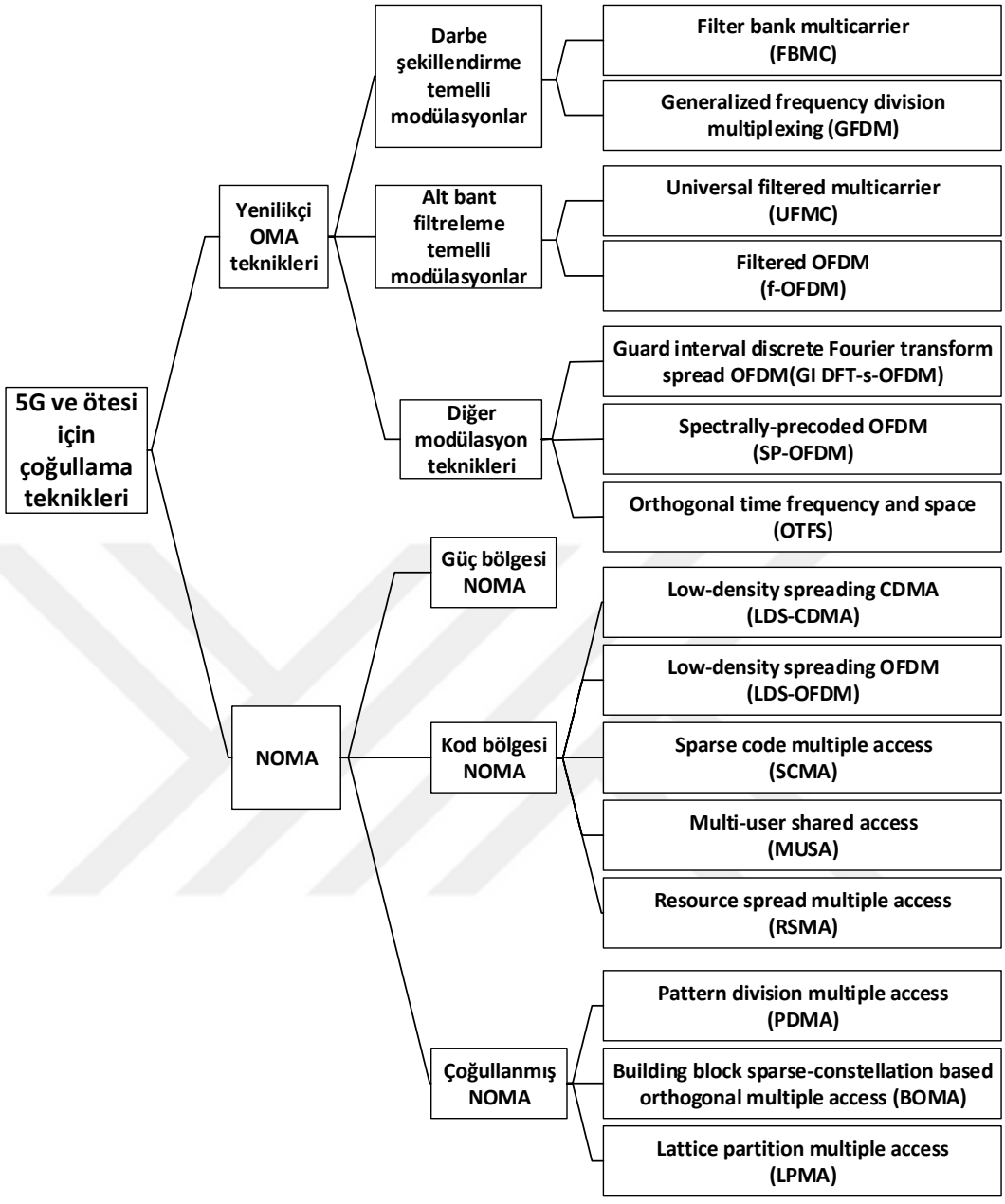
- Modülasyon temelli dalga şekillendirme yöntemleri,
- Modülasyon temelli alt bant filtreleme yöntemleri,
- Diğer modülasyon teknikleri.

NOMA tarafından bakıldığında ise yine mevcutta bulunan dalga şekillerini güç bölgesi, kod bölgesi ve çoğullanmış teknikler olmak üzere üç temel gruba ayırmak mümkündür.

Şekil 3.1'de verilen sınıflandırma temel bir sınıflandırmadır. Bu sınıflandırmada yer almayan ve hâlâ üzerinde çalışılan bir çok dalga şekli vardır. Önerilen tüm dalga şekilleri gelecek nesil haberleşme sistemlerinde kullanılmaya aday olup, hangi dalga şeklinin kullanılacağı henüz kesin değildir. Bunlarla ilgili standart çalışmaları devam etmektedir. Özellikle NOMA dalga şekilleri için farklı telekomünikasyon firmalarının farklı erişim teknikleri üzerinde yaptıkları çalışmalar vardır. Bu gruplama dışında kalan dikgen olmayan dalga şekilleri Bölüm 3.2'de incelenmiştir.

3.1 Mevcut Dikgen Çoklu Erişim Teknikleri

Dikgen olan erişim tekniklerinde bir kaynak, herhangi bir anda yalnızca tek kullanıcıya tahsis edilir. Zaman ve frekans gibi kaynaklar ele alınırsa, bu kaynaklar kullanıcılara bölümlenerek atanır. Zaman bölümlemeli iletim tekniklerinde aynı zaman dilimi içinde, tüm frekans bantları bir kullanıcıya atanır. Öte taraftan frekans bölümlemeli iletim modelinde frekans kaynağı kullanıcılar arasında paylaştırılır ve kullanıcılar zaman aralıklarında bu frekans bantlarını kullanırlar. Kod bölmeli iletim modellerinde ise zaman ve frekans kaynaklarına ek olarak işaretler kodlanarak iletilir. Mevcut haberleşme sistemlerinde dikgen dalga şekilleri kullanılmaktadır. Teknolojik gelişmeler ışığında, 3G haberleşme sistemlerinde kullanılan kod kaynaklı iletim modelleri yerini 4G haberleşme sistemlerinde dikgen bölmeli haberleşme tekniklerine bırakmıştır. Bundan sonraki alt bölümlerde, zaman, frekans ve kod bölmeli iletim modelleri dahil olmak üzere, dikgen dalga şekilleri ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmektedir.



Şekil 3.1 Yeni OMA ve NOMA dalga şekillerini gruplandırma [5]

3.1.1 Zaman Bölümlemeli ve Frekans Bölümlemeli Çoğullama Teknikleri

Literatürde çok iyi bilinen zaman bölmeli çoğullama (Time Division Multiple Access, TDMA) ve frekans bölmeli çoğullama (Frequency Division Multiple Access, FDMA) tekniklerinde, sırasıyla zamanın ve frekansın kullanıcılara tahsis edilmesi söz konusudur. Tek kaynak olan zaman ve frekans tek kullanıcıya tahsis edilmektedir. Aktif veri transferi olsun veya olmasın bu kaynak tahsis edilmiş olarak kalır ve tahsis edildiği sürede başka bir kullanıcının bu kaynağı kullanmasına izin verilmez. Kaynakların kullanıcılara tahsisi bakımından erişim süreci dikgen olarak adlandırılır. Aynı anda mevcut kaynak sayısı kadar kullanıcı haberleşebilir. Sınırlı kaynaklar nedeniyle sistemde sınırlı sayıda kullanıcı olmaktadır.

3.1.2 Kod Bölmeli Çoklu Erişim Teknikleri

Kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) tekniğinde, ayrılmış zaman frekans kaynaklarına ek olarak bir kod alanı tahsis edilmiştir. Her kullanıcı bir sözde kod (pseudo-code) ile mevcut kaynakları kullanmaktadır. Bu durumda, zaman ve frekans bakımından değil de kodlarla kaynakların kullanımı bakımından dikgenlik sağlanmaktadır. Zaman ve frekans kaynaklarının kullanımı ile çok yüksek veri iletim kapasitelerine ulaşılabilmesi nedeniyle, kodlarla kullanıcılar ayrılmış ve dikgenlik böyle sağlanmıştır. Bu yöntem, Bölüm 3.2.2'de irdelenen kod bölgesi NOMA teknikleri için bir temel oluşturmaktadır. Hem alıcıda hem de vericide senkron olan ve her kullanıcıya özel farklı kod taslağı kullanılmaktadır. Kod taslağı senkronizasyonu önemlidir ve sisteme ek işlem yükü getirmektedir. TDMA ve FDMA'ya göre aynı miktarda veri daha geniş bir zaman aralığı ve bantta taşınmaktadır. Kod taslağı öncesi tüm bitler zamanda çoklanmaktadır. Alıcılar, daha geniş bantlı alıcılar kullanarak, zamanda yayılmış işaretleri alırlar ve kod taslağı ile verileri ayırırlar. Böylece analog tarafta alıcılar basitleştirilmiş olur.

3.1.3 Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim Tekniği

Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim tekniği (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) ile hem zaman hem de frekans aynı anda çoklanmıştır ve kaynaklar oluşturulmuştur. Dikgen özelliğinin sebebi taşıyıcı frekanslarının dikgen (dikgen taşıyıcılar ile) seçilmesidir. Böylece hem daha düşük bant genişliklerine ihtiyaç duyulmaktadır, hem de alıcıların basitleştirilmesi sağlanmaktadır. Temel olarak OFDMA özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Zaman ve frekansta dikgendir, kaynaklar yalnız bir kullanıcıya tahsis edilir.
- Frekansta birbirine dikgen taşıyıcılar kullanılmaktadır.

- Frekans seçici sönümlemeli kanallara dayanıklıdır.
- Frekans spektrumunu etkin kullanır.
- Alıcı kısmında dengeleme işlemleri iyi tanımlanmıştır ve işlem karmaşıklığı düşüktür.
- Yüksek maksimum-ortalama güç oranı (PAPR) ve yüksek bant-dışı emisyon (Out Of Band, OOB) söz konusudur.

OFDM'in Avantajları: OFDM, dikgen çok taşıyıcılı iletişim şekli olup, LTE (Long-Term Evolution) uydu-yer arası haberleşme gibi farklı teknolojilerde kullanılmaktadır. OFDM,

- Frekans seçici sönümlemeli kanallara dayanıklı olması,
- Frekans spektrumunu etkin kullanabilmesi,
- Alıcı kısmında dengelenme işlemlerinin kolay olması ve işlem karmaşıklığının düşük olması

gibi özelliklerinden dolayı avantajlıdır. Her ne kadar OFDM sahip olduğu bu avantajlar ile LTE standartlarının gereksinimlerini karşılasa da, gelecek nesil 5G telsiz haberleşme sistem gereksinimleri için yetersiz olarak değerlendirilmektedir.

OFDM'in Dezavantajları: OFDM başta olmak üzere, dikgen olan dalga şekillerinde zaman ve frekans uzayındaki herhangi bir kayma, alıcı yapısında işaretin tekrar elde edilmesini zorlaştırmaktadır. İşaretin alıcı kısımda kolay bir şekilde elde edilmesi (kullanıcılara ait olan işaretlerin kolayca ayrıştırılması) için bu işaretlerin birbirinden ayrılabiliyor olması gerekir. Senkron olmayan kullanıcılar için OFDM'nin kullanılamaması önemli bir dezavantajdır. Yüksek PAPR sebebi ile alıcı verici yapıları daha karmaşıktır ve bu genellikle maksimum performans altında çalışmak zorundadırlar.

5G sistemleri için tasarlanan ve önerilen yeni dalga şekilleri OFDM dalga şeklinin dezavantajlarının üstesinden gelme yönündedir.

3.2 Dikgen Olmayan Dalga Şekilleri

Bu bölümde, gelecek nesil haberleşme sisteminde kullanılmaya aday önerilen dikgen olmayan dalga şekilleri ile literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar

verilmektedir. Temel hedef kaynakların (zaman aralığının, frekans kanalının, yayma kodunun, uzamsal açının) birden fazla kullanıcı tarafından, yani dikgen olmayan bir şekilde kullanılmasıdır. Çok sayıda ve farklı tipte cihaz için NOMA önerilmektedir.

NOMA iletim modeli güç ve kod bölgelerini kullanır ve üç temel NOMA türü vardır:

- Güç Bölgesi NOMA,
- Kod Bölgesi NOMA,
- Çoğullanmış NOMA (Birden fazla bölgede uygulama).

NOMA iletim modeli sayesinde, düşük bant genişlikli kaynaklarla çok fazla sayıda kullanıcıya hizmet verilebilir. Çünkü belirli kaynaklar sadece bir kullanıcıya tahsis edilmez. Bir kaynaktan birden fazla kullanıcı faydalanabilir.

Bitlerin serpiştirilmesinde, modülasyonda, kaynakların yerleştirilmesinde, kodlanmasında, güçte, alıcıda olmak üzere birçok yenilik bu çerçeve üzerinden önerilip çalışmalar yapılmaktadır. NOMA iletim modellerinde, OMA iletim modellerinin tersine birden fazla kullanıcı tek bir kaynağı kullanabilir. Bunun için alıcı yapıları geleneksel OMA sistemlerine göre farklıdır.

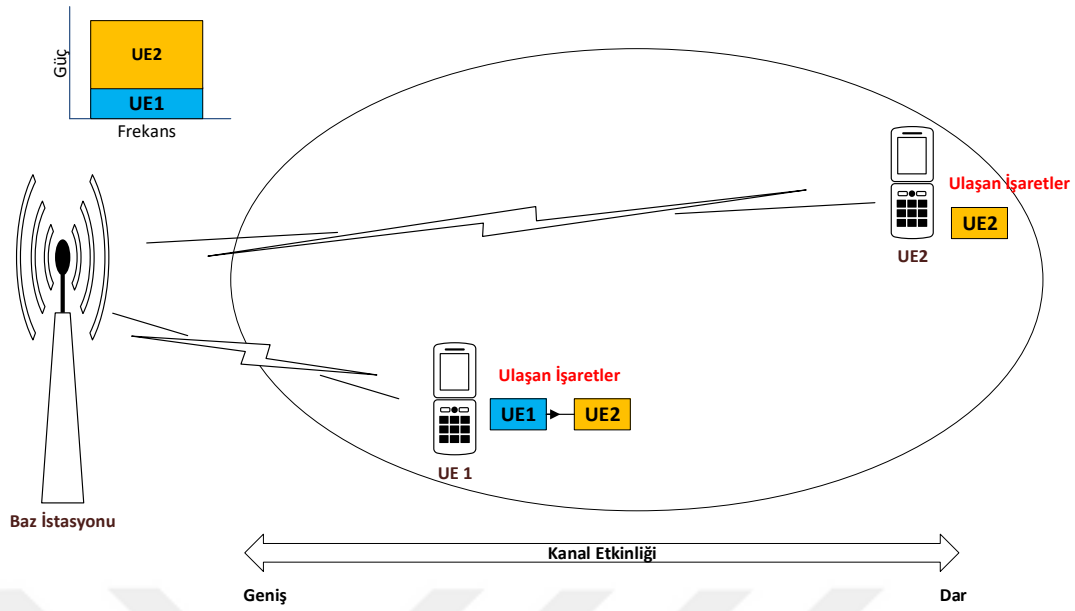
Genel çoklu erişim altyapısına göre önerilen NOMA tekniklerinin farkları Tablo 3.1'de gösterilmiştir [6]. NOMA türleri için önerilen alıcı yapıları Tablo 3.1'de görüleceği gibi mesaj aktarım algoritması (Message Passing Algorithm, MPA) veya ardışık girişim önleme (Successive Interference Cancellation, SIC) tabanlıdır.

3.2.1 Güç Bölgesi NOMA

Güç Bölgesi NOMA özellikle aşağı yönlü haberleşme için önerilir. 3GPP-LTE-A ağlar için de önerilmiştir. Şekil 3.2'de gösterildiği gibi farklı güçlere sahip olan kullanıcılar veya baz istasyonuna uzaklığından dolayı, baz istasyonuna düşük güçte işaret iletebilen kullanıcılar için kullanılması uygundur. Daha çok aşağı yönlü iletişim için kullanılabilirdir. Basit güç bölgesi, çoklu anten tabanlı ve iş birlikli haberleşme olmak üzere üç temel prensiple güç bölgesi NOMA yapılmaktadır. Basit güç bölgesi yerleşimi zaman, frekans ve kod uzayında aynı, sadece güç seviyesinde farklı olan kullanıcılar için yapılır. Bu kullanıcılara ait olan işaretler alıcı yapısında SIC algoritması kullanılarak elde edilir. Bu algoritmanın başarılı bir şekilde çalışması için iyi kanal durum bilgisine (Channel State Information, CSI) ihtiyaç vardır. Bu algoritmaya göre baz istasyonuna en yakın olan kullanıcı, yani işaret gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) değeri en yüksek olan kullanıcı baz alınır ve diğer

Tablo 3.1 NOMA farklılıkları [6]

		Bit Serpiştirici	Örüntü Matrisi	Kaynak Eşleme	Alıcı (Önerilen)
OMA		Birim Matris	Uygun Büyüklükteki Birim Matris	Zaman/Frekans /Kod/Uzay	MMSE
NOMA	PD-NOMA (Kategori 1)	Birim Matris	Birim Matris	Güç	MMSE-SIC
	PD-NOMA (Kategori 2)	Kısıtlı Permütasyon Matrisi	Birim Matris	Güç/Bit	MMSE-SIC
	PD-NOMA (Kategori 3)	Permütasyon Matrisi	Birim Matris	Bit	MMSE-SIC
	SCMA	Birim Matris		Kod/Güç	MPA
	PDMA	Birim Matris	Seyrek Matris	Kod/Güç/Uzay	MPA/SIC
	MUSA	Birim	Düşük İlişkili Seyrek Olmayan Matris	Kod/Güç	SIC
	RSMA	Birim	Düşük İlişkili Seyrek Olmayan Matris	Kod	MF/MF-SIC
	IGMA	Permütasyon Matrisi	Birim Matris	Kod (Sembol - Seviye Seripiştirici)	MPA
	NCMA	Birim Matris	Düşük İlişkili Seyrek Olmayan Matris	Kod	SIC



Şekil 3.2 Güç bölgesi NOMA, farklı uzaklıklarda bulunan kullanıcıların güçleri de birbirinden farklıdır [6]

kullanıcılara ait işaretler gürültü olarak algılanır. İkinci olarak, güç bölgesi NOMA sistemleri çoklu anten tabanlı sistemlerdir. Diğer bir güç bölgesi NOMA tekniği olan iş birlikli haberleşme yöntemlerinde röleler kullanılmaktadır.

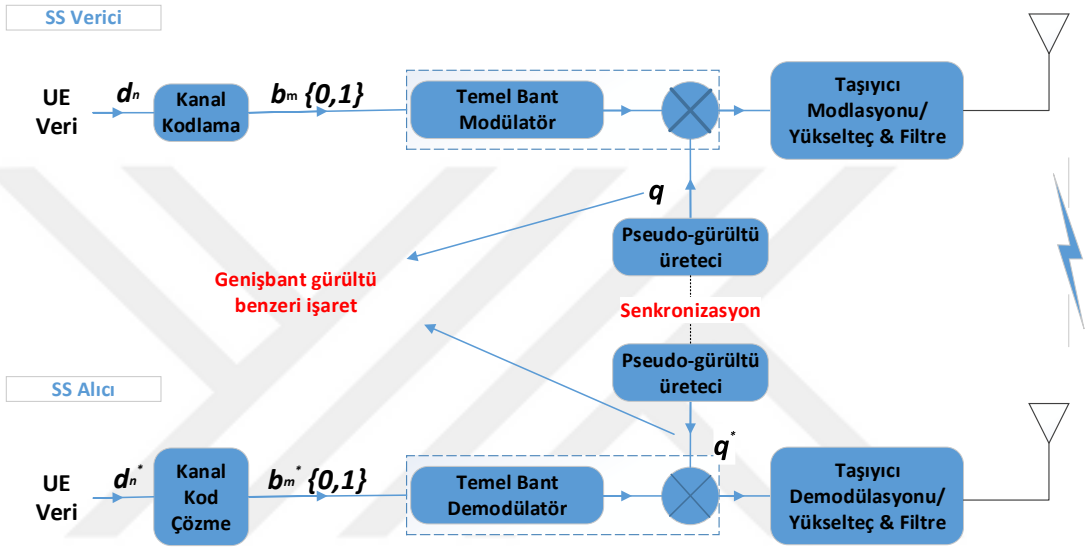
3.2.2 Kod Bölgesi NOMA

Zaman ve frekans bakımından dikgen kaynakların, kod ile de dikgen hale getirilmesi sonrasında oluşan yeni kaynakların, birden fazla kullanıcıya dikgen olmayan şekilde paylaştırılması ile kod bölgesi NOMA yapılmaktadır. Bir kaynağın birden fazla kullanıcı için kullanımı sağlanmaktadır. Kod ile, çok sayıda bitin hangi kısımlarının bir kullanıcıya ait olacağı, faz-genlik yerleşim kümesinden hangisine sahip olduğu, o anlık yollanan verilerin hangisinin ilgili kullanıcıya ait olduğu gibi bilgiler tarif edilmektedir. Farklı kod yaklaşımları ile literatürde önerilmiş erişim teknikleri mevcuttur. Bizim incelediklerimiz aşağıdaki gibi sıralanabilir. İncelendiğinde kullanıcıların tamamen izole olması ve dikgenliği kesin sağlaması bakımından SCMA tekniğinin avantajı görülmektedir.

3.2.2.1 Yayılı Spektrum Teknikleri, LDS-CDMA/OFDMA

Yayılı spektrum (Spread Spectrum, SS) tekniklerinde temel amaç kaynakların kullanıcılara optimum paylaştırılmasıdır. CDMA, iletim modeline göre daha seyrek kodlar kullanılan yöntemdir. Seyrek teriminin anlamı ortak kaynakları çok daha fazla

kullanıcıya paylaştırmaktır. Şekil 3.3'te yayılı spektrum tekniğine göre alıcı-verici yapısı verilmiştir. Buna göre işaretler alıcı ve verici tarafından senkron olan kodlarla çarpılarak iletilmektedir [34]. LDS-CDMA (Low density spreading code division multiple access) iletim modelinde ortak zaman ve kanal kullanırken, LDS-OFDMA iletim modelinde zaman ve frekans kaynakları üzerinden seyrek kodlarla da kullanıcılara erişilir. LDS temelli olduğu durumda her kullanıcının alıcısını daha basit yapmak mümkündür. MPA algoritması gibi basit alıcı yapıları kullanılır durumdadır. Her kullanıcıya ait işaretler farklı kod dizileri ile kodlanarak iletilir. Alıcı

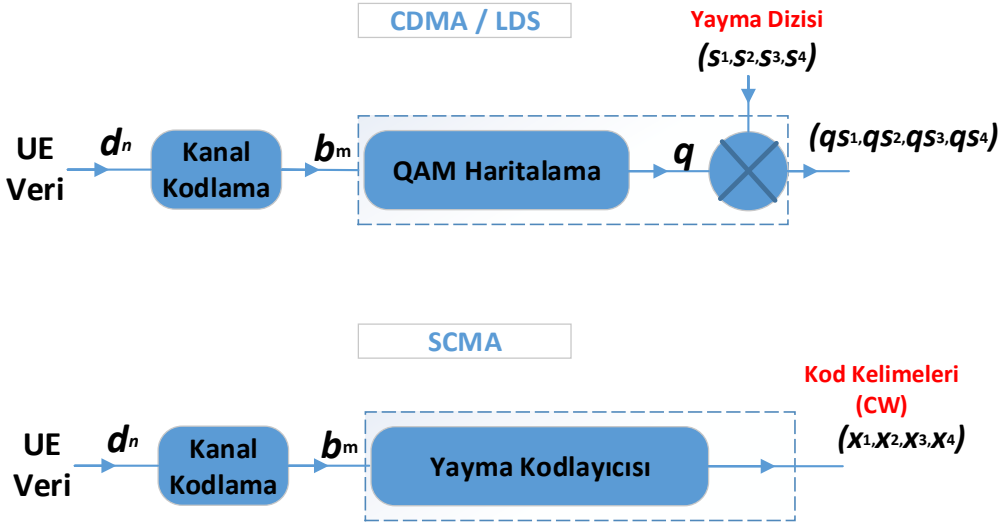


Şekil 3.3 Pseudo kod yayma dizisi alıcı-verici yapısı

kısmında ise bu kod dizileri kullanılarak işaretler tekrar elde edilir.

3.2.2.2 Seyrek Kodlu Çoklu Erişim

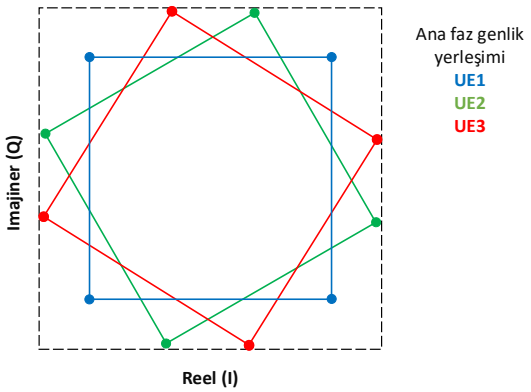
SCMA, çok boyutlu kod tabanlı dikgen olmayan bir tekniktir. Huawei firmasının gelecek nesil haberleşme sistemleri için ileri sürdüğü erişim tekniği olan SCMA, frekans bölgesinde dikgen olmayıp, kod bölgesini kullanır. Düşük karmaşıklıklı MTC/mMTC alıcı-verici yapılarını destekler. Bitlerin faz modülasyonu ve yayma işlemleri birleştirilmiştir. Her kullanıcıya özel bir kod kitabı mevcuttur [35]. İzinsiz (Grant-free) haberleşme için uygundur. Düşük ek yüklü (overhead), düşük gecikmeli, yoğun bağlantı sayılı haberleşme altyapı ihtiyaçlarına uygun bir erişim tekniğidir. BER ve BLER konusunda iyi ve düşük paket kaybı performansına sahiptir [36]. Şekil 3.4'de CDMA/LDS yönteminden SCMA'e geçiş için temel değişiklik gösterilmiştir. SCMA'da, temel bant modülasyon ile yayma işlemi birleştirilmiştir. QAM modülasyonu ve seyrek bir yayma dizisi ile yapılan çarpma işlemi birleştirilerek kod kelimeleri (codeword, CW) üretilmektedir. Bu işlem sırasında, tüm kod kelimelerini içeren kod kitapları



Şekil 3.4 CDMA/LDS'den SCMA'ya geçiş

kullanılır ve kaynak atamak için haritalama işlemleri yapılmaktadır. Her bir kullanıcı için, hangi kaynakları kullanacakları üretici matris ile ve bu kaynakta hangi faz-genlik yerleşimine sahip olacakları o kaynak için atanan kod kitapları ile belirlenir. Aynı kaynağı kullanan kullanıcıların kod kitapları tamamen ayrık olmak zorundadır [27].

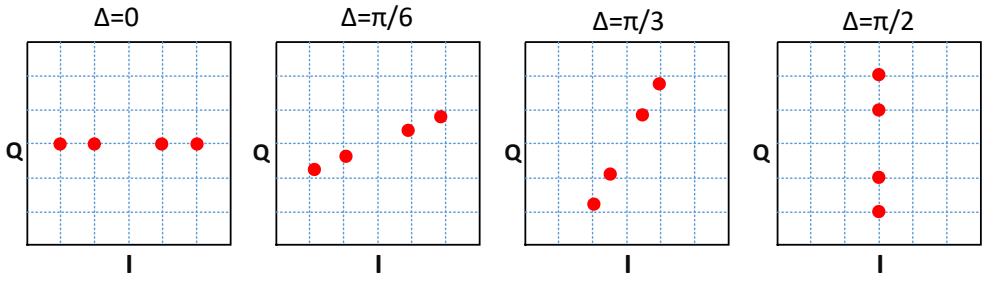
Şekil 3.5'de 3 adet kullanıcıya ait faz-genlik yerleşimi verilmiştir. Kaynaklara göre fazla sayıda kullanıcı ve faz-genlik yerleşimine bakıldığında çok karmaşık görülse de, alıcı yalnız kendi kod kitabına göre işlem yaptığından karmaşıklık azalır. Alıcı kısımda



Şekil 3.5 SCMA 3 kullanıcılı faz-genlik yerleşimi

kullanıcıların birbirleri ile ayrıştırılması için de ayrıca özel bir yöntem önerilmiştir ve bu sayede kullanıcılar alıcılarda kolayca ayırt edilebilmektedir. Her kullanıcının kullandığı kaynakların tümü ona özgüdür. Örneğin bir kullanıcı üretici matrisinden 1 ve 2 numaralı kaynağı kullanıyorsa hiçbir kullanıcı aynı anda 1 ve 2 numaralı kaynağı

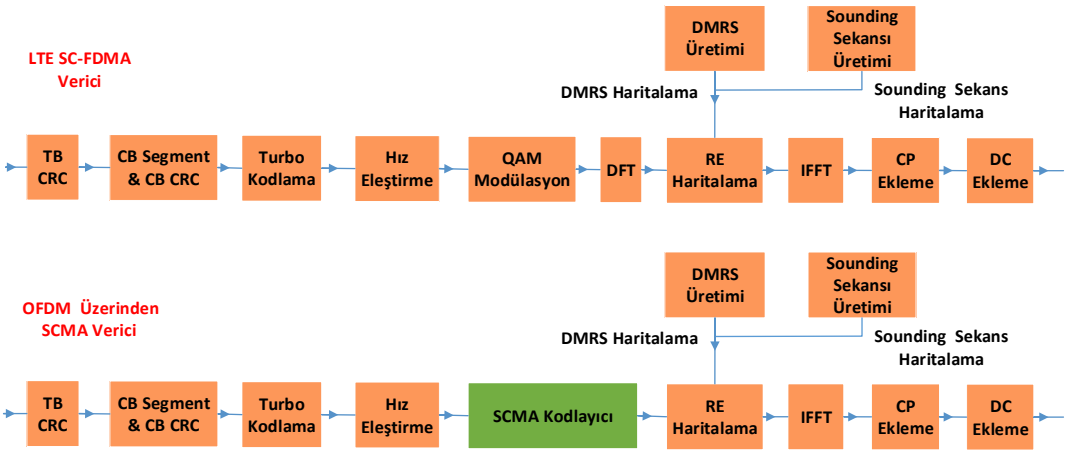
kullanamaz. SCMA, temel baz modülasyonunu da kullandığı için, her kullanıcı için farklı faz-genlik yerleşimi yapılır. Farklı faz farkları ile mevcut ikili faz kaydırmalı anahtarlama (Binary Phase Shift Keying, BPSK) yerleşimi döndürülerek üretilen kod kitapları yerleşimleri Şekil 3.6'da gösterildiği gibi üretilip kullanılabilmektedir [37]. SCMA alıcısında, maksimum olabilirlik (Maximum Likelihood, ML) temelli MPA



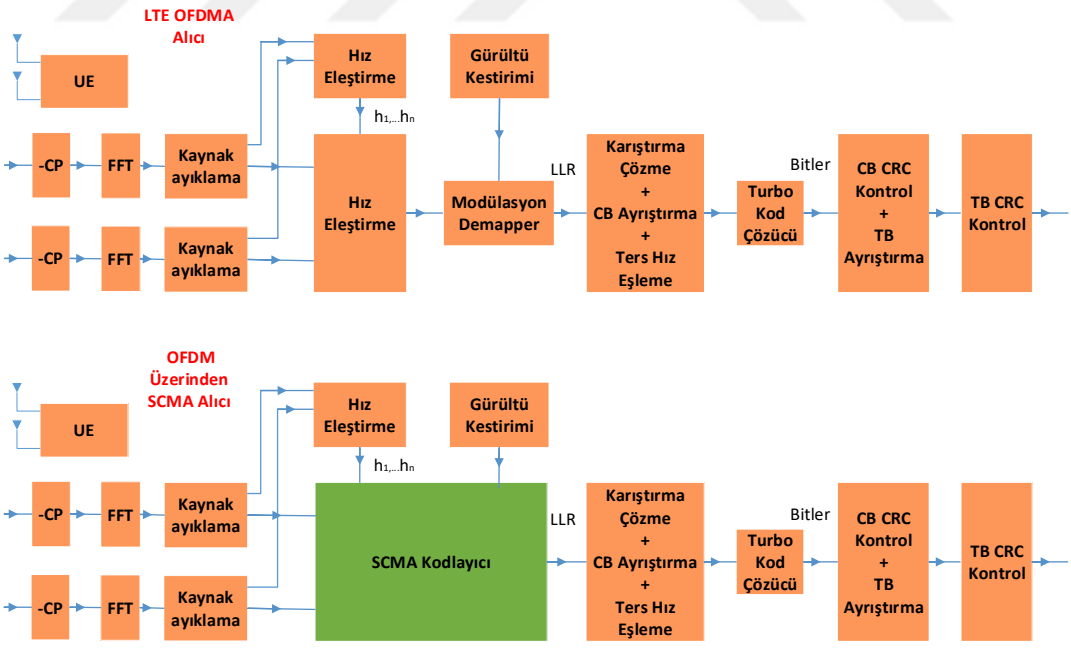
Şekil 3.6 Δ açısı ile döndürülerek üretilen BPSK için faz-genlik yerleşimi [37]

algoritması ile kod çözme yapılabilmektedir. Ana faz-genlik yerleşim kümesindeki tüm noktalar kullanılmadığı için (seyreklik), açı hassasiyeti artsa da olası çözümler azalır. Bir kullanıcının kullandığı kaynaklar sabittir ve diğerlerinden farklıdır. Bu sayede kullanıcılar kolayca belirlenir. Üç aşamalı kod çözme işlemi yapılır. Önce başlangıçtaki tüm olasılıklar hesaplanır. Fonksiyonel düğümler (Functional Node, FN) ve değişken düğümler (Variable Node, VN) arasında MPA algoritması yinelemeli bir şekilde belirlenen yineleme sayısı kadar çalıştırılır. Yinelemeler sonucu VN'lerde oluşan tahmini değerlere göre her kodlanmış bit için LLR hesaplanır. MPA yapısal olarak daha az karmaşık olsa da, işlem yükü üstel olarak arttığı için iyileştirmeye açıktır. MPA için literatürde daha az işlem yükü getiren ve ortak adımları azaltan öneriler mevcuttur [38].

SCMA yöntemini, mevcut OFDMA destekli sistemler (LTE, Bluetooth, Wi-Fi) üzerinde kullanmak için çok büyük olmayan değişiklikler yaparak kullanmak literatürde önerilmiştir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de görüldüğü gibi verici ve alıcı yapılarında güncellemeler önerilerek birlikte çalışılabilirlik gösterilmiştir [16]. SCMA vericisi üzerinde QAM modülatör yerine SCMA kodlayıcısının yerleştirilmesi yeterlidir. Alıcı kısmında ise yalnızca demodülatör kısmının güncellenmesi yeterlidir. Bu sayede mevcut 4G sistemlerde de kullanım olanağı verebileceği öngörülmektedir. Tez kapsamında Bölüm 5 içinde de mevcut OFDMA destekli sistemlerde çalışan cihazların SCMA'ya nasıl dahil edilebileceği konusu açıklanmıştır.



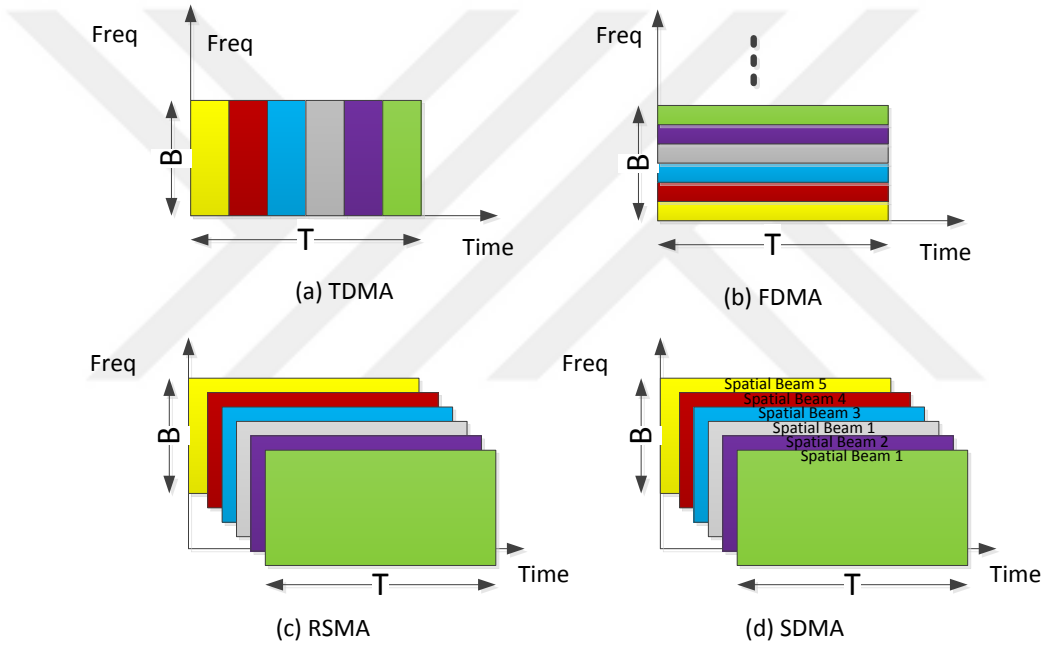
Şekil 3.7 LTE SC-FDMA ve OFDM üzerinden SCMA verici yapısı [16]



Şekil 3.8 LTE OFDMA ve OFDM üzerinden SCMA alıcı yapısı [16]

3.2.3 Kaynak Yayılımlı Çoklu Erişim

Qualcomm Inc. tarafından RSMA yönteminin fiziksel katmanda tasarım detayları ve kullanım senaryoları 3GPP TSG-RAN WG1 ♯85 (23-27 Mayıs 2016, Nanjing, Çin) toplantısı kapsamında hazırlanan R1-164688 dokümanında detaylandırılmıştır [39]. RSMA tekniğinde, farklı kullanıcıların işaretleri zaman-frekans bölgesinde birbirleri ile örtüştürerek iletilir. Her bir kullanıcının işareti, grup için atanmış zaman-frekans kaynağının tamamına yayılmış bir şekildedir. RSMA tekniği, TDMA ve FDMA gibi çoklu erişim yöntemlerine kıyasla Şekil 3.9'da basitçe gösterilmiştir. Öte yandan, uzaysal bölüşümlü çoklu erişim (Space-Division Multiple Access, SDMA) tekniğinde MIMO sistemde, kullanıcılara farklı yerel imzalar atanarak kullanıcıların ayrıştırılması sağlanmaktadır. Bu bakımdan SDMA tekniği de RSMA'in özel bir hali olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 3.9 Çoklu erişim teknikleri: (a) TDMA, (b) FDMA, (c) RSMA ve (d) SDMA [40]

Hali hazırda geçerli teknolojik kullanım içinde, en iyi spektral verimliliğin sağlanması OFDMA+SDMA+TDMA yöntemlerinin bir arada kullanılmasıyla mümkündür. Pratikte SDMA tamamen dikgen bir yöntem olmasa da bu üçlü yaklaşım teoride dikgenlik özelliğini sağlar. Öte yandan, çoklu erişim bakımından dikkate alınması gereken iki husus vardır. Bunlar,

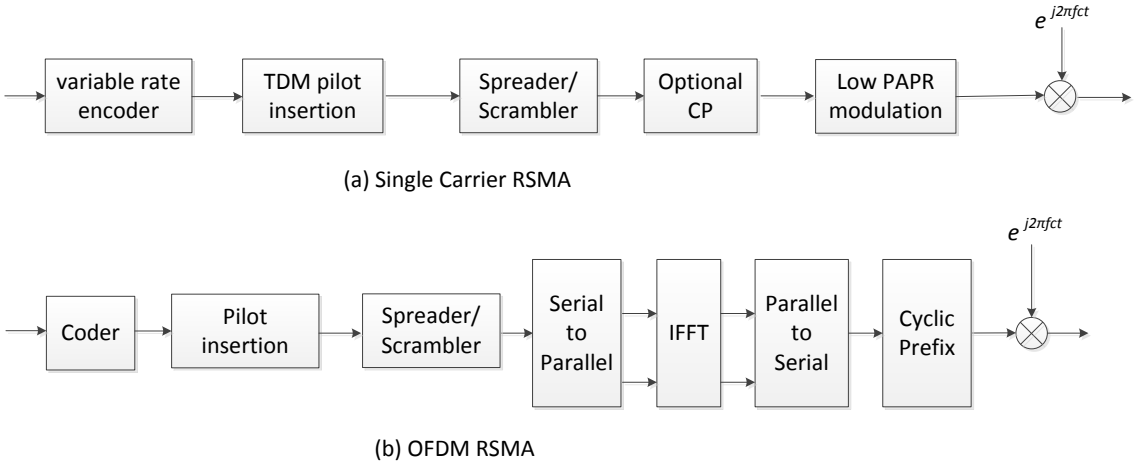
1- Aşağı bağlantıda dikgen olmayan çoklu erişimin, dikgen çoklu erişime göre kapasite sınırına ulaştırabildiği gösterilmiştir.

2- Her uygulama yüksek spektral verimlilik gerektirmez. mMTC için düşük spektral verimlilik, düşük cihaz karmaşıklığı ve düşük enerji kullanımı yeterlidir. Dikgen

çoklu erişimin gerçekleştirilebilmesi için sağlanması gereken sıkı eş zamanlama koşulları, mMTC için çok fazla işaretleşme yükünü ortaya çıkarmaktadır. Dolayısıyla yukarı bağlantıda bu yapı en iyi çözümü vermeyecektir.

şeklindedir. OFDMA yapısının avantajlarını korumayı amaçlayan ve 5G haberleşme sistemlerinde kullanılması için çoklu erişim yapılarında OFDMA'nın üstüne TDMA, SDMA ve RSMA gibi teknikler kullanılabilir. mMTC uygulaması için 5G ağlarında önerilen UL iletim yöntemi tek taşıyıcılı RSMA, DL için OFDMA olarak 3GPP toplantısında raporlanmıştır [40].

RSMA tekniğinde, grup içindeki farklı kullanıcıların işaretleri birbirleri ile dikgen olmak zorunda değillerdir ve bu durumda da kullanıcılar arası girişim oluşması olasıdır. Bitlerin tüm kaynak üzerinde yayılımı, işaretin arka plan gürültü veya girişim seviyelerinin altında dahi kod çözümü yapılmasına imkan tanır. Farklı kullanıcılara ait işaretlerin ayrıştırılabilmesi için, RSMA'da düşük oranlı kanal kodları ve karıştırıcı kodların (scrambling code) bir birleşimi kullanılır. Uygulama senaryolarına göre, tek taşıyıcılı veya çok taşıyıcılı RSMA yapıları kullanılabilir. Bu iki duruma ilişkin blok diyagramlar Şekil 3.10'da verilmektedir. Tek taşıyıcılı RSMA, küçük miktardaki veri boyutları ile izinsiz iletim ve asenkron erişim için uygun olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan çok taşıyıcılı RSMA, düşük gecikmeli erişim için iyileştirilmektedir.



Şekil 3.10 RSMA blok diyagramları [39]

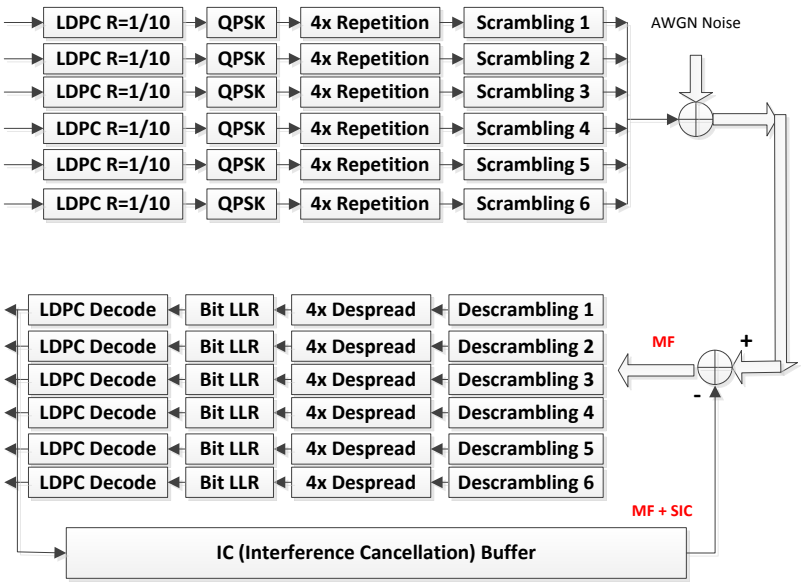
RSMA'in geleneksel DS-CDMA'den farkı ise;

- Belirli kullanım senaryoları için çok taşıyıcılı modu desteklemesi,
- Tek taşıyıcılı modun, TDM verisi ve kontrol kanalları için kesin olarak tek taşıyıcılı olması,

- Kullanıcıları ayırt etmek için farklı Walsh kodlarına veya yayılım faktörlerine bağlı olmaması, öte yandan düşük oranlı kanal kodlarıyla kodlama verimini artırmayı sağlaması,

şeklinde ortaya çıkmaktadır. Aynı toplantıda sunulan bir diğer dokümanda [41] ise mMTC servisler için UL seviyede RSMA-SCMA karşılaştırması ortaya konulmuştur. RSMA yapısı uzun/sözde-rastgele yayma imza tasarımıyla, kısa/sabit örüntülü yayma imza tasarımı taşıyan SCMA, PDMA, NCMA ve düşük kod oranlı yayma tekniklerinden ayrışmaktadır. Kısa/sabit örüntülü yayma imza tasarımının en önemli avantajı, alıcı yapısındaki çok-kullanıcı tespiti (multi-user detection, MUD) tekniğini, yöntemin avantajına çevirmesidir. Öte yandan, dezavantajları şu şekilde sıralanmıştır:

- Alıcı-verici optimizasyon faydasını elde edebilmek amacıyla, mükemmele yakın çalışabilme koşulunu sağlamak için, diğer sistem bileşenlerine bağımlılık bulunmaktadır.
- Her bir yayma faktörü, yük faktörü ve modülasyon derecesi bakımından tasarımın ölçeklenebilirliği ile sınırlıdır. Optimum performans için gerektiğinde yayma dizisinin yeniden tasarlanması gerekir.
- En iyi performansa erişebilmek için düşük PAPR oranına sebep olur.
- Alıcı daha karmaşık bir MUD alıcısına ihtiyaç duyar.



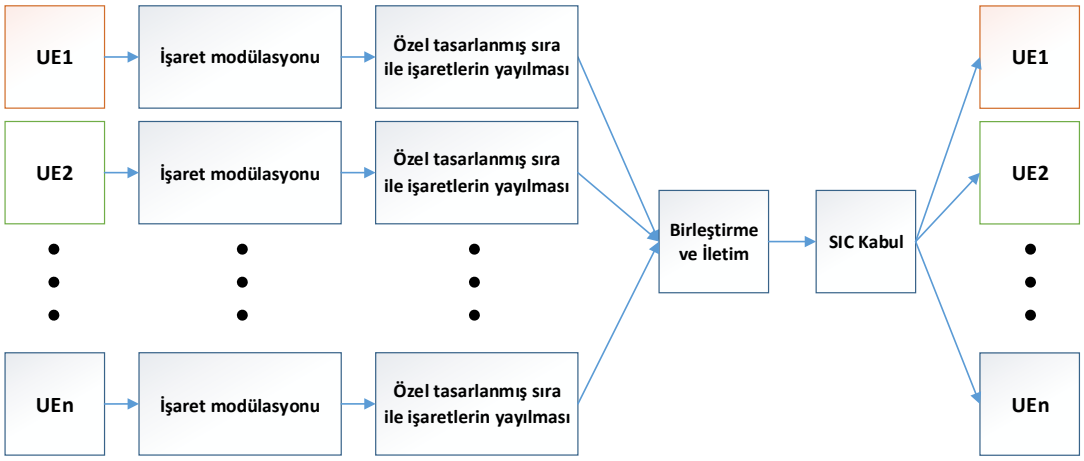
Şekil 3.11 RSMA alıcı-verici diyagramı [41]

Bu çalışma çerçevesinde, SCMA ve RSMA alıcı-verici diyagramları detaylandırılmış, aynı spektral verimliliğe sahip iki yapı kavramsal tasarımlar şeklinde karşılaştırmalı

sunulmuştur. Şekil 3.11'de RSMA alıcı-verici diyagramı verilmektedir. Alıcı yapısında eşleşmiş filtre (matched filter, MF) kullanılmaktadır. RSMA'da karıştırıcı dizi olarak WCDMA UL için tasarlanmış UL karıştırıcı dizisi yinelemeli olarak kullanılmaktadır.

3.2.3.1 Çoklu Kullanıcılı Paylaşımlı Erişim

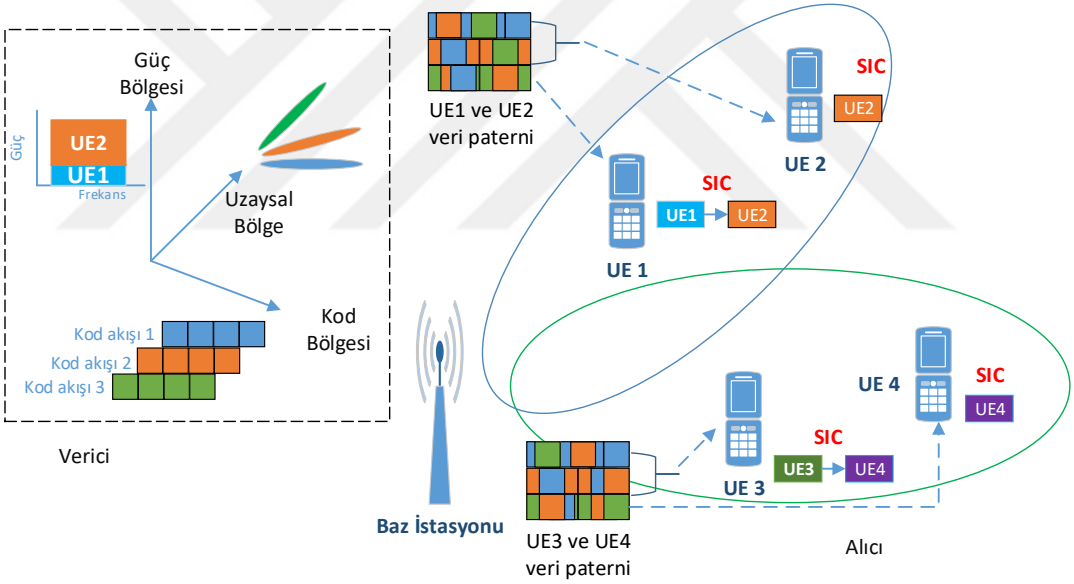
ZTE firmasının önerdiği bir erişim tekniği olan MUSA, gelişmiş CDMA gibi modellenmiştir. Güç ve kod bölgesinde düzenleme yapar. Kısa yayma kod dizileri kullanır. Her kullanıcı için sabit yayma kodu kullanılır. Korelasyonları düşük yayma dizileri tasarlanır. MUSA alıcısında SIC altyapısı kullanılmakla birlikte eğitim (training) ihtiyacı vardır. Kaynaklara bakış SCMA gibidir. Şekil 3.12'de MUSA için alıcı ve verici bloklar gösterilmiştir. MUSA için SIC alıcı yapısı kullanılması önerilmektedir [42]. MUSA tekniğinde, özel olarak tasarlanmış yayma dizileri kullanılır. Bu diziler, gönderildiklerinde alıcıda düşük korelasyonlu olarak alınacak şekilde tasarlanır. LDS (LDS-CDMA, LDS-OFDMA) yöntemlerine göre farklı yayma dizileridir ve yayma dizileri seyrek kodlardan oluşmamaktadır. Kullanıcılar, yayma dizileri kütüphanesinden rastgele bir şekilde bir yayma dizisi seçip haberleşme yaparlar. Fakat bu durum % 100 dikgen olmayı engeller. Dolayısı ile aynen RSMA'de olduğu gibi kullanıcı izolasyonu tam anlamıyla sağlanmış değildir. MUSA'nın, SCMA'dan önemli farklarından biri de, bir kullanıcının farklı yayma dizilerini kullanarak veri göndermesi ve almasıdır. Dolayısıyla yayma dizileri kullanıcıya özgü değil her kullanıcının kullanımındadır. MUSA bu özelliği sayesinde, kod kitabı ya da yayma dizisi için oluşacak ortalama girişimi azaltmaktadır [6].



Şekil 3.12 MUSA alıcı-verici blokları [42]

3.2.4 Çoğullanmış NOMA ve Örüntü Bölmeli Çoklu Erişim

Çoğullanmış NOMA ve Örüntü Bölmeli Çoklu Erişim (Pattern division multiple access, PDMA) birden fazlı bölgede dikgenliğin bozulduğu NOMA türüdür. Güç, kod ve uzaysal olası bölgelerin farklı kombinasyonları ile yapılır. Birden fazla yöntemi birleştirmeye çalıştığından, performans artış beklentileri yanında sistemlere karmaşıklık ve ek maliyet getirmektedir. PDMA yöntemi ile kod, güç, uzaysal ve bunların kombinasyonlarını kullanarak çoklu erişim yapılmaktadır. PDMA tekniği, karmaşık ve yüksek maliyetli sistemler gerektirmektedir [42]. Kod bölgesinde SCMA gibi olsa da, PDMA kodlarında, kullanıcı sadece tanımlı bir zaman frekans aralığını değil birden fazla taşıyıcıyı da aynı anda kullanabilir. Birden fazla bölgede çoğullama yapıldığı için demodülasyon tarafı diğer yöntemlere göre çok daha fazla karmaşıktır [43]. Şekil 3.13'de görüleceği gibi PDMA'da birden fazla bölgede çoğullama yapılarak UE'lere erişimler sağlanmaktadır.

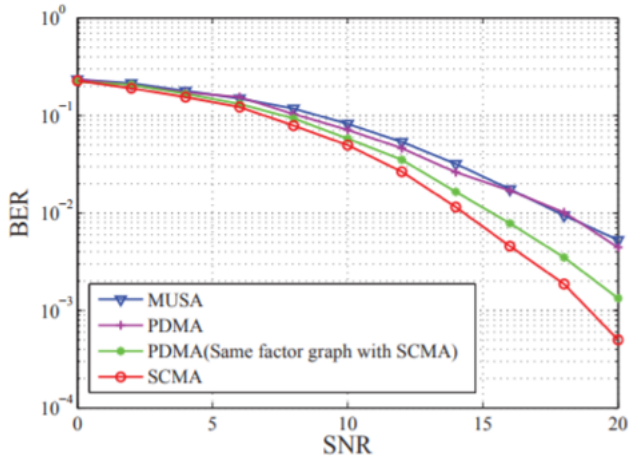


Şekil 3.13 PDMA alıcı-verici yapısı [43]

3.3 Yeni NOMA Türleri Bakımından Karşılaştırma

Yeni erişim teknikleri konusunda literatürde farklı çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda alıcı-verici yapıları, karmaşıklık, maliyet, kapasite gibi karşılaştırmalar yapılmıştır. SCMA, MUSA ve PDMA için yapılan bir çalışmada BER ve SNR'ye göre Rayleigh zayıflama kanal modelinde simulasyonlar yapılmıştır. Şekil 3.14'de görüleceği gibi BER bakımından en iyi sonuçları SCMA tekniği vermiştir. Hatta çok bölgeli çoklama

yapan PDMA'da SCMA ile aynı faktör grafiği kullanılmasına rağmen daha düşük performans elde edilmiştir [42].



Şekil 3.14 Rayleigh zayıflama kanalında BER performansı bakımından SCMA, MUSA ve PDMA karşılaştırma [42]

İlgili çalışmada, seçilen NOMA teknikleri için avantaj ve dezavantajları Tablo 3.2'de gösterilmiştir. SCMA özelinde bakıldığında bu çalışmada da performans yüksekliğinin öne çıktığı görülmektedir.

Tablo 3.2 NOMA türleri için avantaj ve dezavantajlar [42]

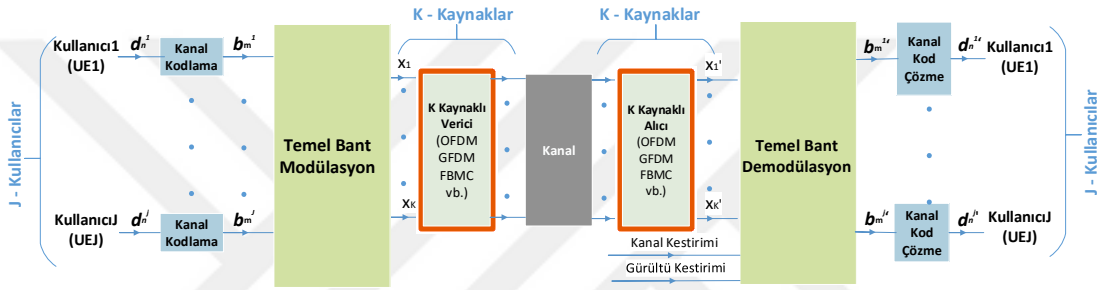
	Anahtar Teknolojiler	Avantajlar	Dezavantajlar
Güç Bölgesi NOMA	1. SIC 2. Güç bölgesi çoklama	1. Belirgin olmayan yakın uzak etkisi 2. Yaklaşık %20 oranında yukarı yönlü bağlantı spektral verimliliğini arttırması 3. Aşağı yönlü bağlantı verimliliğini %30 dan fazla arttırması	1. Alıcı daha karmaşık 2. Henüz araştırma aşamasında
SCMA	1. Düşük yoğunluklu yayılma 2. Yüksek boyutlu modülasyon tekniği 3. MPA ile uygulanabilir en uygun algılama	1. Spektral verimliliği 3 kat veya daha fazla arttırılması 2. Yukarı yönlü bağlantı kapasite gelişimi OFDM'in 2.8 katı civarında olması	1. Kod tasarımı ve optimizasyonun zor 2. Kullanıcılar arası karışımın artması
MUSA	1. Ardışık karışım önleme 2. Karmaşık bölgenin çoklu kodları 3. Süperpozisyon kodlama ve süperpozisyon sembol genişleme teknolojisi	1. Düşük engel hata oranı 2. Çok sayıda kullanıcı erişimi destekleme 3. Spektral verimliliği artırma	1. Kullanıcılar arası karışımın yükselmesi 2. Yayılma sembolünün tasarımının zorlaşması
PDMA	1. SIC uygun örüntünün ortak/bütünsel tasarımı 2. Düşük karmaşıklıklı yarı ML, SIC algılama	1. Yukarı yönlü sistemlerde 2-3 katın üzerinde kapasite artışı 2. Aşağı yönlü sistemlerde 1.5 katın üzerinde spektral verimlilik artışı	1. Örüntü tasarımı ve optimizasyonun zorlaşması 2.Kullanıcılar arası karışımın yükselmesi

3.4 Yukarı Yönlü NOMA Alıcı-Verici Mimarisi

3.4.1 Matematiksel Gösterimler

Tez boyunca, ikili sayılar kümesi ve kompleks sayılar sırasıyla $\mathbb{B}$, $\mathbb{C}$ olarak gösterilecektir. Büyük harflerle ($\mathscr{X}$) gösterimi, faz-genlik yerleşimlerini (constellation), $\log(\cdot)$ ise logaritmayı gösterir. Skaler sayılar, vektörler ve matrisler ise sırası ile x, $\mathbf{x}$ and $\mathbf{X}$ şeklinde gösterilmiştir. Kullanılan fiziksel kaynakların sayısı, kullanıcı sayısı, ikili sembol sayısı, aşırı yükleme katsayısı sırası ile K, J, M, ve λ ile gösterilir.

3.4.2 Genel NOMA Yukarı Yönlü Alıcı Verici Mimarisi



Şekil 3.15 Genel yukarı yönlü haberleşme sistem modeli

Genel yukarı yönlü MIMO haberleşme sistemi OL ile Şekil 3.15'de gösterilmiştir. Bu model sonraki bölümlerde de baz alınacak temel mimariyi göstermektedir. Burada K adet bağımsız kaynak vardır ve her kaynak bir adet antene sahiptir. SE % 100 olarak kullanılacak ve değerlendirilecektir. Değeri $j = 1, ..., J$'ye kadar olan her kullanıcı j, ikili $\{\mathrm{d}^j_{n_0} | n_0 = 1, 2, ..., n\}$ verisini üretmektedir. Eğer kanal kodlama yapılırsa (Channel Encoder), gelen ikili veri olan d_n, kanal kodlama sonrası ikili $\{\mathrm{b}^j_{m_0} | m_0 = 1, 2, ..., m\}$ verisine dönüşmektedir. Burada kodlama oranı her kullanıcı için $R_j = n/m$ şeklinde ifade edilir. Eğer kanal kodlama yoksa yani $n = m$ ise $\mathrm{d}^j_{n_0}$ ve $\mathrm{b}^j_{m_0}$ birbirine eşittir. İkili $\mathrm{b}^j_{m_0}$ verisi sembol oranı M'ye göre $\log_2 M$ şeklinde gruplanmaktadır. Modüle edilmiş x_j işareti, eğer bir CB mevcutsa CB içindeki bir sembol veya bir modülasyon sonucu çıkan sembol olarak, $x_j \in \mathbb{C}^K$ olarak tanımlanır. Üretilen modüle edilmiş işaretler $\mathbf{x} = [x_1, ..., x_K]^T$ vektörü olarak gösterilir. Eğer kullanıcı sayısı kaynak sayısından büyükse ($J > K$), bu erişim dalga şekli NOMA'dır ve OL değeri $\lambda = J/K$ 1'den büyüktür. Kaynak ve taşıyıcı alanı (Resources) aynen OFDM, GFDM, FBMC, veya diğer dalga şekilleri gibi düşünülebilir. Kompleks Gauss rastgele değişkenlerinin olasılık yoğunluk fonksiyonunun kısa halini, ortalama μ ve varyans σ^2 olarak kullandığımız durumda $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ şeklinde tanımlanır. Alıcıya ulaşan işaret $\mathbf{x}' = \{x'_1, ..., x'_K\}^T$'yi

K-boyutlu vektör olarak aşağıdaki gibi formülize edilebilir,

$$\mathbf{x}^{'} = \sum_{k=1}^{K} diag(\mathbf{h}_k) \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{3.2}$$

burada kanal kazanç vektörü $\mathbf{h}_k = \{h_1, ..., h_K\}$ şeklinde ifade edilmiştir. Rayleigh sönümle kanalı için h_{k1},h_{k2} iki bağımsız ve aynı dağılımlı (independent and identically distributed, i.i.d) Gauss rastgele değişkenidir ve $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$'ye göre dağılmıştır. Rayleigh rastgele değişkenleri, standart sapma σ olacak şekilde $\mathbf{h_k} = \sqrt{h_{k1}^2 + h_{k2}^2}$ ve $h_k \sim \mathcal{N}(\sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}}, \sigma^2)$ şeklinde ifade edilmiştir [44]. Toplamalı beyaz gauss gürültüsü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) $\mathbf{n} = \{n_1, ..., n_K\}^T$ şeklinde ifade edilmiştir. Burada $\mathbf{n}$, K-boyutlu vektördür ve $n_k \sim \mathcal{N}(0, N_o\mathbf{I})$ ifadesinde görüldüğü gibi gürültünün güç spektral yoğunluğunu N_o gösterirken, kanalın kazanç vektörü ise $h_k = 1$'dir. Tez çalışmasında yapılan benzetimlerde kanal kestiriminin ideal olduğu öngörülerek sonuçlar elde edilmiştir.

4
SEYREK KODLU ÇOKLU ERİŞİM

SCMA çok boyutlu, kod tabanlı, dikgen olmayan bir çoklu erişim tekniğidir. SCMA, CDMA'nın bir alt kümesi olan LDS'ye çok benzerdir. CDMA ve LDS arasındaki temel fark kodlama yoğunluklarıdır. Temel olarak vericinin göndereceği bitler öncelikle bir taban bant modülatöründen geçirilir. Ardından sözde-gürültü kod dizisi (pseudo-noise generator) ile çarpılarak (hem alıcıda hem de vericide birbiri ile senkron ve bilinen dizi) yüksek bant modülasyon aşamasına aktarılır [36], [27]. Ayrıca CDMA ve türevi işlemlerde BPSK, QAM ve benzeri temel bant modülasyonlarında faz-genlik yerleşimleri (constellation), hem alıcıda hem de vericide sabit ve tektir. İletilen verinin faz-genlik yerleşimindeki bulunabileceği konum sayısı yani semboller her kullanıcı için sabittir. Bununla birlikte SCMA vericisi, temel bant modülasyonunu yayma süreçleriyle birleştirerek ve aşırı yüklemeye izin vererek kendisini CDMA tekniklerinden ayırır [45], [12]. SCMA'da temel bant modülasyonu ve yayma işlemi Şekil 3.4'deki gibi birleştirilmiştir. Bu sayede, mesaj bitleri sayısal olarak elde edilen kanal kodlama işlemi sonrasında SCMA kodlayıcıda sembollere dönüştürülür. SCMA kodlayıcıda temel olarak, kullanıcıya özel haritalama matrisi ile hangi kaynakları kullanacağı belirlenmiştir. Ardından her kaynak için ilgili kullanıcının hangi sembolü aktaracağını belirleyen kod kitabı (CB) adı verilen sembol dizilerine atamalar ve iletim yapılır. CB içindeki karmaşık sayılardan oluşan her bir sembole atanan işarete ise, kod kelimesi (CW) adı verilmiştir. Bir kullanıcının herhangi bir anda göndermek istediği bit veya bitler, ilgili kaynak üzerinde tanımlı kullanıcının CB'sinden seçilerek gönderilen CW'dir [27].

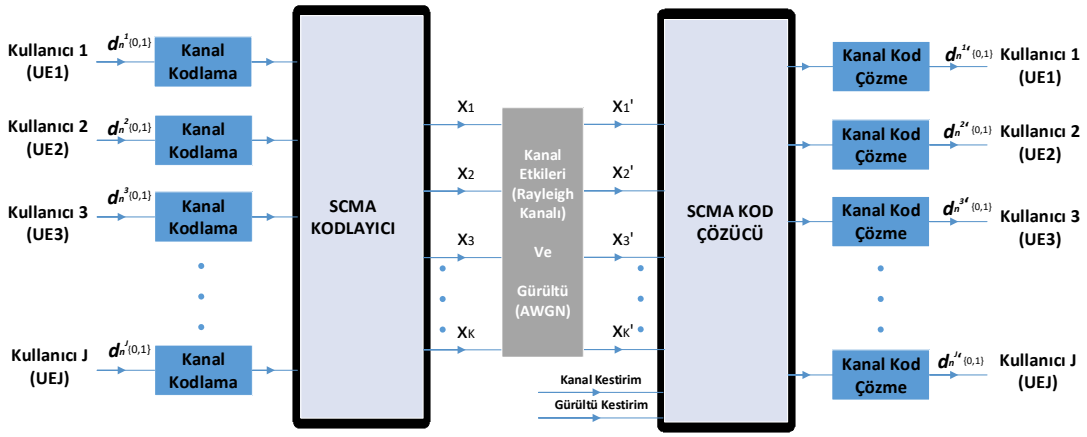
SCMA, her kullanıcıya tek bir kaynakta, faz-genlik yerleşimlerini çakışma yaratmadan kullandırdığı için kesinlikle izoledir [27]. Bununla birlikte, faz-genlik yerleşim alanı sınırlı olduğundan, alıcının duyarlılığının artırılması gerekir [46]. mMTC senaryolarına göre, tüm kullanıcıların aynı anda veri iletmemesi ciddi bir avantajdır. Bu gereksinimleri göz önünde bulunduran SCMA, mMTC için umut verici bir yöntemdir [5]. Bölüm 5-6'da yapılan benzetimlerde, tüm UE'lerin her zaman veri iletimi yaptığı durumlara göre sonuçlar elde edilmiştir.

SCMA CB tasarımına ilişkin literatürde, ana CB'nin faz rotasyonu ile oluşturulmasını içeren birkaç yöntem vardır. Ayrıca, eşleme matrisi, yalnızca sınırlı sayıda kullanıcı için önerilmiştir [29]. Karar sınırı denklemleri alıcıda CB tasarımı ve BER analizi için sabit genlik altında faz kaydırılarak elde edilir. Yıldız faz-genlik yerleşimi literatürdeki çalışmaların çoğunda sıklıkla kullanılır [47]. Yıldız faz-genlik yerleşiminde en uygun genlik seviyelerinin bulunduğu, ancak enerji çeşitliliğini sağlamayan maksimum öklid mesafelerinin bulunduğu çalışmalar vardır [48]. Özellikle, faz açısının kritik olduğu iddia edilen kümülatif dağılım fonksiyonu, teorik limitleri belirlemek ve benzetimlerin sonuçlarını vermek için kullanılmıştır [49]. Bazı yayınlarda sadece öklid mesafesinin yetersiz olduğu ve CB üzerindeki enerji çeşitliliği etkisinin çok önemli olduğu belirtilmiştir. Ancak bu çalışmalarda, enerji çeşitliliği dahil edilmeden sadece yıldız tabanlı faz-genlik yerleşimi kullanılmıştır [50], [14]. Çalışmalarda CB tasarımları, kullanıcı ekipmanlarında (UE'ler) enerji tüketimini azaltmak için önerilmiş ve benzetimler yapılmıştır [51].

SCMA yapısında, her kullanıcıya özgü CB ve CW'lerin olması, basit CDMA yayma işlemini çok boyutlu ve nispeten karmaşık bir işlem haline gelmiştir. Fakat faz-genlik yerleşimi üzerindeki işlem yapılabilirlik durumu, başta OL gibi yeni avantajlar ve yaklaşımlar getirmektedir.

4.1 SCMA Alıcı-Verici Sistemi

SCMA kodlayıcı ve kod çözücüler ile elde edilen tümleşik sistem gösterimi Şekil 4.1'de gösterilmiştir. SCMA için, J adet kullanıcıdan gelen veriler, kanal kodlaması sonrası



Şekil 4.1 SCMA sistemi

SCMA kodlayıcıya girip oradan K adet fiziksel kaynak (physical resource elements, RE) üzerinden gönderilmektedir. Burada $J > K$ ve $J, K \in \mathbb{N}$ olarak kabul edilmiştir.

K adet kadar ayrık fiziksel kaynak, bir zaman slotu, frekans, uzaysal bir bölge veya OFDMA tonu olabilir.

Kullanıcı bitleri, kanal kodlamasına SCMA ile fiziksel kaynaklara aktarıldıktan sonra mevcut kanal etkilerine maruz kalmakta ve her işarete gürültü eklenmektedir. Benzetimlerde Rayleigh sönümleme kanalı kullanılmıştır. İletilen işaretlere gürültü modeli olarak AWGN eklenmiştir. Kanal kestiriminin ideal şekilde yapıldığı varsayılmıştır.

MTC senaryolarına göre, tüm kaynakların aynı anda yayın yapması beklenen bir senaryo değildir. Ancak, çalışmalarımızda yer verilen benzetimlerin tümünde, tüm kaynakların aynı anda ve miktarda fakat rastgele içeren veriler yollanarak gerçekleştirilmiştir. Bu öngörülebilecek en zorlu senaryolardandır.

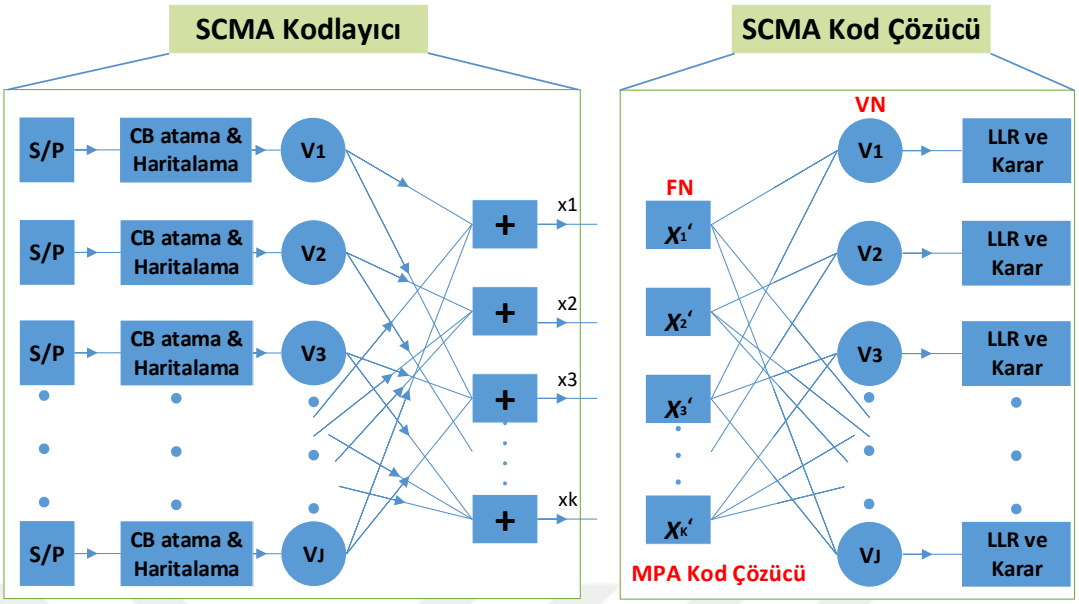
SCMA'nın kodlayıcı ve kod çözücü blokları Şekil 4.2'de verilmiştir. Görüldüğü gibi her kullanıcıdan (user equipment, UE) gelen b_n bit dizileri önce kanal kodlama bloklarına giriş yapmaktadır. Kanal kodlama olmadığı durumda birebir SCMA kodlayıcıya aktarılan veriler, kanal kodlama olduğu durumda R kodlama oranına göre artan bit sayısıyla bir sonraki bloğa iletilmektedir. R, çıkan bit sayısının giren bit sayısına oranı şeklinde ifade edilmektedir. Kanal kodlamadan gelen veriler, kodlayıcıda önce sembol oranı M'e ve kaç adet kaynaktan gönderileceğine göre önce paralel hale çevrilir, ardından kullanılacağı kanalları gösteren haritalama matrisine göre kullanılacak kod kitapları seçilir. Kod kitapları seçimi sonrası kod kelimelerine çevrilerek kaynaklara iletilir.

Alıcıya geldikten sonra öncelikle alıcıda yinelemeli olarak gelen veri elde edilip gelen sembollere karar verilip kanal çözücüye girerek ardından iletim tamamlanır.

4.2 SCMA Kodlayıcı

SCMA kodlayıcı (SCMA encoder) için temel iki aşama; üretici matris ve ardından da bu matrise göre faz-genlik yerleşimleri yapılarak kod kitabı üretmektir. İletilecek veri, SCMA kodlayıcı bloklarına gelindiğinde gönderilecek sembol oranına ve bir sonraki aşamada kullanılacak kaynak sayısına göre paralel hale getirilmektedir. Her kaynak için faz-genlik yerleşimine göre karmaşık sayı karşılıkları üretilmektedir. Sembol oranı 2'nin katı olmak zorundadır. Burada sembol oranına M dersek her kaynağa iletilecek bit miktarı $\log_2 M$ olarak ifade edilmektedir.

SCMA kodlayıcı için OL değerini de belirleyecek iki önemli değer bulunmaktadır. Bunlar; bir kaynağı kullanan maksimum kullanıcı sayısını gösteren d_R ve bir



Şekil 4.2 SCMA Alıcı Verici Yapısı

kullanıcının kullanacağı maksimum kaynak sayısını gösteren d_j değerleridir. Kullanıcı bitleri, kullanılan kaynağa ve ilgili sembollere göre faz-genlik yerleşim değerlerine dönüştürüldükten sonra üretici matris kullanılarak J adet kullanıcı verisi K adet kaynağa d_j değeri maksimum olmak kaydıyla aktarılır.

Kaynaklara gelen işaretler her bir kaynakta maksimum d_R kadar olacaktır. Aynı kaynağa aynı anda maksimum d_R kadar işaret gelmesine rağmen bu işaretler alıcıda ayırt edilebilir özelliktedir. Ayırt edilebilirlik, bir kaynağa gelen tüm kod kelimelerinin faz-genlik yerleşiminde üst üste olmayan noktalar kullanılması zorunluluğu ile sağlanmaktadır. Bu nedenle kullanılacak kod kitapları içindeki kod kelimeleri seçimi çok önemlidir. Aynı kaynak kullanılmaması koşuluyla bir kod kelimesi farklı kullanıcılar için kullanılabilir. Böylece kod kitabı sayısı azaltılmış olacaktır. Kod kitaplarının az olması faz-genlik yerleşiminde çok fazla nokta kullanılmasını azaltacaktır. Bu hem alıcıda hem de vericide karmaşıklığı azaltırken performans anlamında olumlu etki yaratacaktır.

SCMA için, bir fiziksel kaynağı (RE) kullanan kullanıcı sayısı d_R ve bir kullanıcının veri iletimi için kullandığı kaynak sayısını gösteren d_J iki önemli parametredir. Tüm CW ve CB'ları içeren ana kod kitabını (mother codebook, CB_{ana}) tasarlamak SCMA için en önemli aşamadır. CB_{ana}'un tasarımında minimum sayıda CB dolayısıyla CW kullanılması ana hedef olmalıdır [14]. İçinde kullanılacak minimum sayıda nokta $d_R \times M$ ile elde edilebilir. CB vektörü $\mathbf{c}_i$ ile ifade edilecektir. Alıcıda performans açısından ayırt edici özelliklerden biri, noktalar arası maksimum mesafedir. Buna öklid uzaklığı

(Euclidian Distance) ismi verilmektedir.

Bu nedenle, CB_{ana} içindeki minimum CB sayısı d_R'ye eşit veya büyük olmalıdır. M-li QAM'ya göre iletilen veriler $log_2 M$ olarak temsil edilir. CB'deki her kullanıcıya ait $\mathbf{c}_J$ içindeki öğeler, I/Q diyagramındaki karmaşık bir değere karşılık gelir. CW olan z, bir karmaşık sayıdır ve $z \in \mathbb{C}$ 'dır. CB_{ana}

$$\mathbf{CB}_{ana}[d_R, M] = \begin{bmatrix} \mathbf{c_1} \\ \vdots \\ \mathbf{c_{d_R}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1^1 & \cdots & z_M^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{d_R} & \cdots & z_M^{d_R} \end{bmatrix}, \tag{4.1}$$

burada $\mathbf{c}_i$, CB vektörüdür ve $i = 1, ..., d_R$'dir.

Her kullanıcıya b_m^j karşılık gelen anlık veri bitleri M 'e göre gruplanır ve SCMA kodlayıcıya gelir. SCMA kodlayıcı temelde sembolleri temel bant sinyallerine dönüştürür. Sembolleri CB'lere göre karmaşık sinyallere dönüştürmek için bir haritalama matrisi kullanır ve temel bant modülasyonu yerine kaynaklara atar. Bir kullanıcının ilgili kaynağını gösteren haritalama matrisi $\mathbf{F}$ matrisi ile temsil edilir. $\mathbf{F} = \{\mathbf{f}_1, ..., \mathbf{f}_J\}$, haritalama vektörlerinden üretilir. $\mathbf{F}$ boyutu $K \times J_{max}$ değeridir ve maksimum kullanıcı sayısı J_{max}, $\binom{K}{d_j}$ ile hesaplanır. SCMA'nın seyrek doğası nedeniyle, K boyutlu herhangi bir kullanıcının x_j sinyallerinin yalnızca N tanesi sıfır değildir. N her kullanıcı için farklı olabilir, ancak maksimum değer SCMA'nın seyrekliğini gösterir. Her kullanıcı için sabit N değeri, CB tasarımları [**1**] 'de açıklandığı gibi verimlilik açısından önemlidir.

Basit olması açısından, $J = 6$ ve $K = 4$ ile %150 OL sağlayacak örnek bir haritalama matrisi şu şekilde verilmiştir:

$$F[K, J] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \tag{4.2}$$

Haritalama matrisinin satırları kaynakları ve sütunlar kullanıcıları gösterir. SCMA durumunda, her sütun benzersiz olmalıdır. Verileri alıcıda doğru bir şekilde çözmek için, bir kaynak üzerinde kullanılacak CB'ler tamamen ayrı olmalı ve hiçbir eleman üst üste binmemelidir. CB_{ana} içindeki tüm CB'ler ayrı olarak seçilmiştir. Bir üretici matrisi

G şu şekilde tanımlanır:

$$G[K,J] = \begin{bmatrix} \mathbf{c_1} & \mathbf{c_2} & \mathbf{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{c_1} & 0 & 0 & \mathbf{c_2} & \mathbf{c_3} & 0 \\ 0 & \mathbf{c_1} & 0 & \mathbf{c_2} & 0 & \mathbf{c_3} \\ 0 & 0 & \mathbf{c_1} & 0 & \mathbf{c_2} & \mathbf{c_3} \end{bmatrix}, \tag{4.3}$$

$\mathbf{c}_i$ bir CB vektörüdür. Bu matris, ilgili f_{jk} 1'e eşitse CB atanarak üretilir. Ancak, karşılık gelen CB her satırda yalnızca bir kez kullanılır. $K.$ kaynağın $j.$ kullanıcıya göre aldığı CB aşağıdaki ifade ile elde edilir. Her bir matris öğesi $g_{kj}(i)$, kullanılarak G oluşturacak şekilde belirlenebilir.

$$g_{kj}(i) = \begin{cases} \mathbf{c}_i,\ i = i+1 & \text{eğer } f_{kj} = 1 \\ 0 & \text{eğer } f_{kj} = 0 \end{cases}. \tag{4.4}$$

Her G satırı için, başlangıç koşulları $i = 0$ şeklindedir, $f_{kj} = 1$ ise her atamadan sonra i değerinin artırılması gerekir. $x_k(i)$ temel bant sinyali şu şekilde ifade edilir:

$$x_k(i) = \sum_{j=1}^{J} g_{kj}(b_m^j(i)), \tag{4.5}$$

$b_m^j \in \{0,\ldots,M-1\}$ kodlanmış veriyi temsil ederken, i kanal kodlayıcısından gelen bitlerin veya sembollerin sırasını gösterir. Herhangi bir $x_K(i)$, faz-genlik yerleşim diyagramındaki d_R noktalarının toplamından oluşan karmaşık bir sayıdır. Tüm temel bant sinyalleri $\mathbf{x} = [x_1,\ldots,x_k]^T$ olarak ifade edilir. $\mathbf{x}$, kaynak ve taşıyıcı etki alanında OFDM veya benzer erişim tekniği ile dönüştürülebilir.

4.3 SCMA Kod Çözücü

SCMA kod çözücü (SCMA decoder), mesaj aktarım algoritması (MPA) kullanmaktadır. Ardından LLR karar vericisi ile, gelen bitlerin değeri elde edilir. Bu aşamada birden fazla kaynak veri iletimi için kullanıldığından kaynak sırasına göre veriler paralelden seriye dönüştürülmektedir. Bu aşamada alıcı ve vericide kullanıcıya özgü kod kitaplarına göre kod çözme işlemleri gerçekleştirilmektedir.

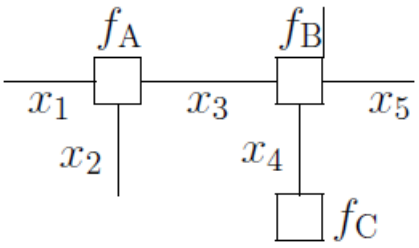
SCMA kod çözücü sonrası eğer kanal kodlama yapılmışsa, kullanılan kodlama yöntemine göre kod çözme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu aşamada elde edilen kullanıcı bit miktarı $1/R$ kodlama oranına göre elde edilmektedir.

4.3.1 MPA (Message Passing Algorithm)

MPA veya Toplam-Çarpım Algoritması (Sum-product Algorithm), birden fazla fonksiyonun ürettiği verilerin işlenmesi için kullanılan bir algoritmadır. Amaç, birbiri üzerinde etkisi bulunan Bayes ağı (Bayesian Network) veya Markov rastgele alanı (Markov Random Field) gibi yapıları modellemek ve mesaj aktarım aracılığı ile çözümlemektir. Yapısal olarak bir şekil (graph) üzerinde çalışan bu algoritmaların üzerinde çalıştığı şekillere çarpan şekli (factor graph) ismi de verilmektedir [52].

Çarpan Şekli:
Bir çarpan şekli (factor graph) birçok değişkenin fonksiyonlarının çarpımları olarak ifade edilmesidir. $f(.)$ fonksiyonu $f_a(.), f_b(.), f_c(.)$ cinsinden ifade edilebilir.

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = f_A(x_1, x_2, x_3) f_B(x_3, x_4, x_5) f_C(x_4) \tag{4.6}$$



Şekil 4.3 Faktör grafiği

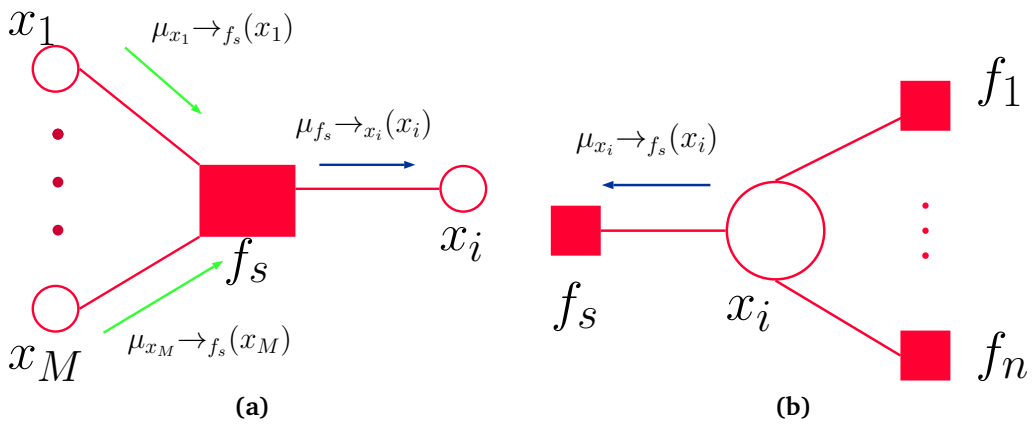
Çarpan şekilleri, özel bir şekil tipidir ve özellikle toplam çarpım algoritmalarının temelini oluşturur. Tanım itibariyle iki parçalı şekillerin (bipartite graph) bir hali olan çarpan şekillerinin göstermeye çalıştıkları esas unsur bir fonksiyonun çarpanlarıdır [52].

f bir fonksiyon olmak üzere, bu fonksiyonun x_1'e göre marjinal değerini aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz.

$$f(x_1) \cong \sum_{x_2, x_3, x_4, x_5, x_6} f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = \sum_{\sim x_1} f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \tag{4.7}$$

Burada $f(x_1)$ değeri, x_1 ifadesi dışındaki diğer değişkenlerin toplamı anlamına gelmektedir. Mesaj aktarım ve güncelleme işlemleri için kullanılan ifadedir.

MPA Kuralları: MPA için fonksiyonel düğüm (FN) ve değişken düğüm (VN) noktaları arasında taşınan mesajlar Şekil 4.4a ve 4.4b'de gösterilmiştir. İki yönde de mesajların taşınması sırasında alınan işaretler ve olasılıklar yardımıyla yinelemeli olarak toplam ve çarpım kuralları gerçekleştirilir.



Şekil 4.4 (a) MPA için FN'den VN'e güncelleme mesajları (b) MPA için VN'den FN'e güncelleme mesajları

Bahsedilen işlemler üç adımdan yinelemeli olarak gerçeklenmektedir. Yineleme sayısı sistemlere göre farklılık gösterebilir. Yineleme sayısı üstel iş yükü getirdiği için en uygun değer bulunması sistem performansı için de önemlidir. Bahsedilen MPA işlemleri sırası ile aşağıda anlatılmıştır.

1- MPA işlemine başlamadan önce çarpan şekli içindeki FN ve VN arasındaki mesajlara başlangıç değeri atanmalıdır. Bu aşamada FN noktaları mesajları başlangıç değerleri sıfırdır. VN noktaları başlangıç değerleri basit olasılık değerleridir. (örneğin olabilecek 4 değer varsa her biri $\frac{1}{4}$ değerini alır)

2- FN'den VN'ye aktarılan mesajların güncellenmesi için kullanılan işlem aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\mu_{f_s \to x_i}(x_i) = \sum_{Ne(fs)\setminus x_i} f_s(x_i, x_1, \cdots, x_M) \prod_{x_m \in Ne(f_s)\setminus x_i} \underbrace{\mu_{x_m \to f_s}(x_m)}_{Alinan\ Mesaj}. \tag{4.8}$$

Burada FN ve VN'ye giden mesajların sayısı, hedef değişken düğüme giden mesajlar dışında kalan ve bu fonksiyonel düğüme gelen mesajların/fonksiyonların çarpım ve toplamı ile bulunur. Her FN'den çıkan tüm VN mesajları için ayrı ayrı bu işlem yapılır. Tüm FN'lerden VN'lere giden mesajlar hesaplanmadan diğer yöndeki hesaplamaya geçilmez.

3- VN'den FN'e doğru aktarılan mesajlarda, çıkan mesaj dışındaki VN'ye gelen tüm mesajları çarpılır. Bu işlem bu yöndeki tüm VN'den FN'lere doğru yapılır.

$$\mu_{x_i \to f_s}(x_i) = \prod_{f_n \in Ne(x_i)\setminus f_s} \mu_{f_n \to x_i}(x_i). \tag{4.9}$$

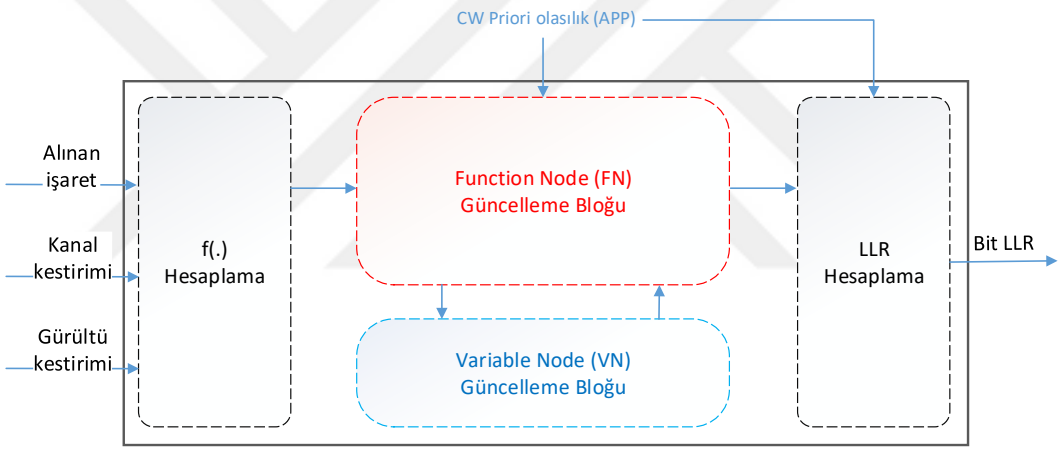
2 ve 3 numaralı aşamalar yineleme sayısı kadar sırasıyla tekrar edilir.

MPA algoritması ile belli bir yineleme sonrası gelen işaretlerden elde edilen olasılıkların değer ataması log-olabilirlik oranı (LLR) tarafından belirlenir. Temel bant çözücüsünden bir sembol geldikten sonra karar

$$LLR\left(r_i|m_i\right) = \log\left\{\frac{\sum_{i=1}^{M} P(r_i|m_i=0)}{\sum_{i=1}^{M} P(r_i|m_i=1)}\right\}, \tag{4.10}$$

eşitliğiyle alt taşıyıcıların sonsal olasılık (a posteriori probability) oranından elde edilir. Burada $P(r_i|m_i)$ ifadesi, $m_i \in \{0,1\}$ iken, i. bitin koşullu olasılık değerini gösterir [53].

SCMA altyapısı kullanılarak gönderilen veriler, alıcı tarafta MPA algoritması temelli kod çözücülerle işlenerek elde edilmektedir. Alıcıdaki MPA yapısı Şekil 4.5'de gösterilen temel bloklardan oluşmaktadır.

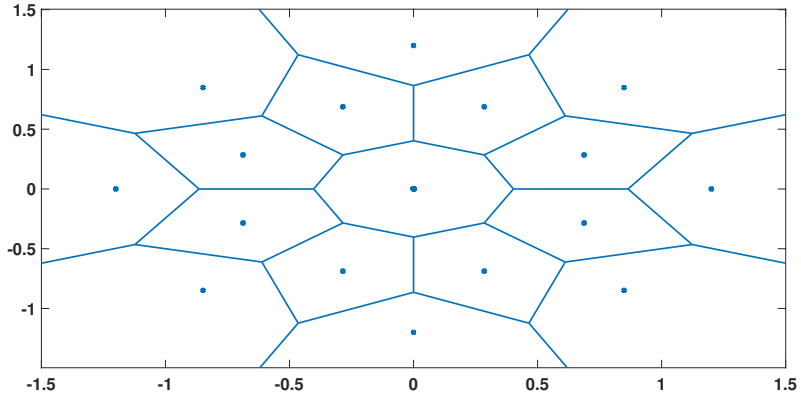


Şekil 4.5 MPA Temel Blok Diyagram [46]

4.3.2 Voronoi Diyagram

Voronoi diyagramları, esas olarak karar uzayını oluşturan verilerin "mozaiklere" bölünmesi olarak sunulan ve adını aldığı Georgy Voronoi tarafından 1903 yılında önerilmiş bir veri parçalama yöntemidir. Öklid uzayında bulunan ayrık S noktalar kümesi için, herhangi bir s noktasına en yakın noktalar kümesinden söz edilebilir [54]. Genel olarak, oluşan her bir kümedeki noktaların tamamı S kümesindeki bir s noktasına en yakın bulunan noktalar kümesi şeklinde tanımlanabilir. İşte bu noktalar kümelerinin aralarındaki sınırı belirleyen yapı Voronoi diyagramı ile elde edilir. Bu yöntem ile yıldız temelli QAM (star-QAM) ve/veya dikdörtgen temelli QAM (rectangular-QAM) ile oluşturulmuş faz-genlik yerleşimleri arasındaki karar sınırları

belirlenecektir. Alıcıda elde edilen işaretin reel ve imajiner kısımları Voronoi sınırları içinde ise doğru şekilde karar verilecektir. Bu sınırları belirlemek için MPA algoritması kullanılıp sonuç LLR ile tayin edilmektedir. Şekil 4.6'da yıldız temelli örnek bir faz-genlik yerleşimi için Voronoi diyagramı çizdirilerek eşik seviyeleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6 İki seviyeli yıldız temelli faz-genlik yerleşimi için Voronoi Diyagramı

4.4 Kanal Kodlamalı SCMA

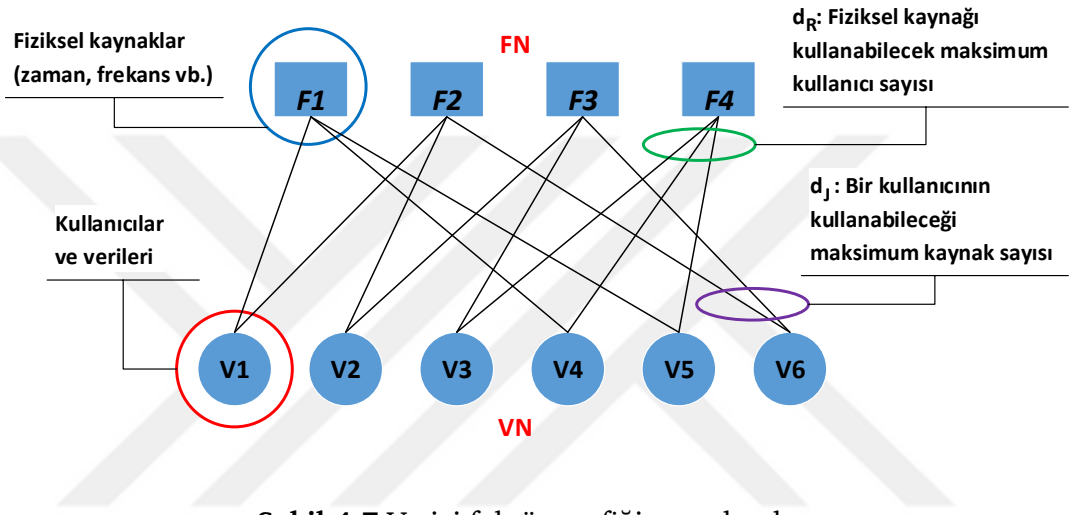
Kanal kodlama yöntemi olarak düşük yoğunluklu eşlik denetimi (LDPC) kullanılmıştır. LDPC, doğrusal kodlama tekniklerinden biridir. MPA, LDPC kod çözücü için de kullanılabilir. LDPC kod çözme işlemini hızlandırmak için gecikme ve performans sorunlarını azaltıcı çalışmalar vardır [7]. Benzetimlerde kanal kodlamanın bulunduğu ve bulunmadığı iki senaryo kullanılmıştır. Bu kodlama yöntemi için farklı kod oranları ile etkiler incelenmiştir.

Farklı kod oranları için, MATLAB içinde "dvbs2ldpc" komutu kullanılarak verilen oranlara göre DVB-S.2 standardında farklı eşlik kontrol matrisleri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu matrisler, yine MATLAB içinde comm.LDPCEncoder ve comm.LDPCDecoder komutları kullanılarak kanal kodlama ve kod çözme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

5G ve ötesi için LDPC'nin QC-LDPC versiyonu önerilmiş ve bu versiyon için standart kodlama oranları tanımlanmıştır. Özellikle SCMA-IM benzetimleri sırasında bahsedilen kodlama da kullanılarak performansa katkıları gösterilmiştir. MATLAB içinde "nrLDPCEncode" ve "nrLDPCDecode" komutları kullanılmıştır.

4.5 SCMA Kod Kitabı Tasarımı

SCMA performansı bakımından kodlayıcı tarafında en önemli kriter kod kitabı tasarımıdır. Kod kitabı için, öncelikle kullanıcıların hangi kaynakları kullanacağını gösteren haritalama matrisinin üretilmesi gerekmektedir. Ardından haritalama matrisinde kullanılacak tüm faz-genlik yerleşimlerin bulunduğu ana faz-genlik (mother constellation) yerleşimlerinin tasarlanması gerekmektedir. Ana faz-genlik yerleşimi ve kod kelimeleri belirlendikten sonra kullanıcıya özel kod kitapları tahsis edilmektedir. Bu bölümde her iki aşama da detayları ile incelenmiştir.



Şekil 4.7 Verici faktör grafiği ve anlamları

Şekil 4.7'de görüldüğü gibi kullanıcılar ile verileri V ile gösterilirken, fiziksel kaynaklar ise F ile gösterilmektedir [46]. Burada d_R ve d_j olarak gösterilen iki adet yeni değişken daha belirtilmiştir. Bu değişkenler özellikle kod kitabı tanımları bakımından önemlidir. Buna göre, d_R bir fiziksel kaynağı kullanan maksimum kullanıcı sayısı, d_j bir kullanıcının verisini göndereceği kaynak sayısı olarak tanımlanabilir. Ayrıca J, K ve N değişkenleri sırasıyla kullanıcı, kaynak ve bir kullanıcının kullandığı kaynak sayısıdır.

Maksimum kullanıcı sayısı genelde sistemler için öngörülecektir. Sistemde maksimum kullanıcı sayısının değerinin tespit edilmesi ile d_R ve d_j değerleri seçilmektedir. Bu aşamada d_R ve d_j değerlerinin yakın değerlerin seçilmesi önemlidir. Bir sistemde kullanıcı sayısı için maksimum değer j_{max} olarak belirtilirse, maksimum kullanıcı sayısı

$$j_{max} = d_R \times d_j. \tag{4.11}$$

gibi ifade edilebilir. SCMA yapısında kod kitabı tasarımı aşamasında tüm kullanıcıların hangi kaynakları kullandığını gösteren haritalama matrisi (Mapping Matrix, **F**) kullanılmaktadır. Bu matris k adet kaynak ve j adet kullanıcı için $k \times j$'lik ($\mathbf{F}_{(k,j)}$) bir matristir. Haritalama matrisinde satırlar kaynakları, sütunlar kullanıcıları

göstermektedir. Örneğin Şekil 4.8'de gösterildiği gibi farklı haritalama matrisleri üretilebilir.

$$\mathbf{F}_{(4,6)} = \begin{bmatrix} 0\,1\,1\,0\,1\,0 \\ 1\,0\,1\,0\,0\,1 \\ 0\,1\,0\,1\,0\,1 \\ 1\,0\,0\,1\,1\,0 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{F}_{(8,12)} = \begin{bmatrix} 1&0&0&0&1&0&0&0&1&0&0&0 \\ 1&0&0&0&0&1&0&0&0&1&0&0 \\ 0&1&0&0&0&1&0&0&0&0&1&0 \\ 0&1&0&0&0&0&1&0&0&1&0&0 \\ 0&0&1&0&1&0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&1&0&0&0&0&1&0&0&1&0 \\ 0&0&0&1&0&0&1&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&1&0&0&0&1&1&0&0&0 \end{bmatrix}$$

Şekil 4.8 Örnek 4 × 6 ve 8 × 12 boyutlu haritalama matrisleri

Haritalama matrisi **F** için en kritik detay, hiç bir sütunun diğer sütunlarla aynı olmamasıdır. Sütunlar kullanıcıları gösterdiğine göre, herhangi iki kullanıcı tamamıyla aynı kaynakları kullanamaz demektir. Bu sayede alıcı tarafta kod kitabına sahip alıcılar, hangi kullanıcıdan verilerin geldiğini anlayacaktır. Bir kullanıcı N adet kaynağı kullanacağına göre, **F** matrisinde her sütunda $K - N$ adet sıfır bulunmak zorundadır. Dolayısıyla $K - N$ adet kaynak başka kullanıcılar tarafından kullanılabilir durumdadır.

Kod kitabı tasarımı için, iki aşamayı aşağıdaki gibi özetleyebiliriz:

- **Haritalama Matris**: Üretici matrisinin de elde edilmesine yardımcı matristir. Sıranın olmadığı mevcut kaynak sayısı (K) ile bir kullanıcı için tahsis edilebilecek kaynak sayısı (d_j) kombinasyonu kadar farklı şekilde üretici matris oluşturulabilir. Yani maksimum üretici matris sayısı $\binom{K}{J}$ kombinasyonu kadardır. OL değeri için de sınırı belirlemektedir.
- **Ana Faz-genlik yerleşimi**: Kullanıcıya özel kod kelimelerinden bağımsız olarak, her bir kaynakta d_R değeri kadar farklı faz-genlik yerleşimini sağlayacak bir kod kitabı karşılığı bulunmalıdır. Her bir kaynakta kaç farklı nokta bulunacağı, temel modülasyon noktası ve kaynağı kullanan kullanıcı sayısının çarpımı ile bulunur. d_R değeri aynı zamanda ana kod kitabının minimum kaç adet kod kitabından oluşacağını göstermektedir.

4.5.1 Haritalama matrisi

Haritalama matrisi kullanıcıların hangi kaynakları kullanacağını gösteren matristir. $F_{(K,J)}$ şeklinde gösterilir, satırlar kaynakları, sütunlar ise kullanıcıları göstermektedir.

$\mathbf{f}_{k,j}$ değeri 1 ise bunun anlamı, j. kullanıcı, k. kaynağı kullanacaktır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken en önemli kısım, $F_{(K,J)}$ matrisinde herhangi iki sütun birbiri ile aynı olmamalıdır. Bu gereklilik, hem kullanıcıların ayrılabilmesi hem de performans açısından çok önemlidir. Performans açısından etkisinin önemi Bölüm 4.5.1.1'de detaylı şekilde gösterilmiştir. Haritalama matrisi, Bölüm 4.5.1.2'de gösterildiği gibi yükleme oranını da belirleyen etkendir. Şekil 4.9'da verilen haritalama matrisi üç farklı yükleme oranı için oluşturulmuştur. d_j sabit kalacak şekilde, kullanıcı sayısı ve d_R değiştirilerek elde edilmiş haritalama matrisi gösterilmiştir.

```
f_main_250 = {
    % j=9; K=6,dj=2,dr=3     J=12,dr=4    j=15,dr=6
    1,0,0,0,1,1,0,0,0,       0,1,0,       1,0,0,
    1,1,0,0,0,0,1,0,0,       1,0,0,       0,1,0,
    0,1,0,0,1,0,0,1,0,       0,0,1,       0,0,1,
    0,0,1,0,0,1,0,0,1,       0,0,1,       0,1,0,
    0,0,1,1,0,0,0,1,0,       1,0,0,       1,0,0,
    0,0,0,1,0,0,1,0,1,       0,1,0,       0,0,1,
};
```

Şekil 4.9 Üç farklı yükleme oranı için oluşturulmuş haritalama matrisi, d_R değişerek yükleme oranı değiştirilmektedir

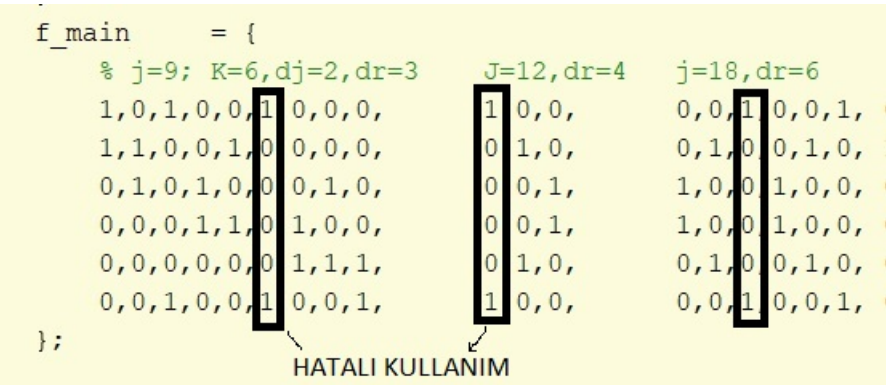
Haritalama matrisini K, J, d_j ve d_R değerleri belirlendikten sonra, bölüm 4.5.1.2'deki maksimum değerlere göre elde etmek mümkündür. Literatürde, SCMA haritalama matrisinin üretilmesi için, Latin üreteç matrisinin (herhangi bir elemanının kesişen bir satır ve sütunda yalnızca bir kez bulunduğu matrisler) kullanıldığı örnekler mevcuttur. Bu matris elde edilirken dikkat edilmesi gereken aşamalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Haritalama matrisi elde edilirken, J_{max} ile maksimum yükleme oranını sağlayacak kullanıcı sayısı elde edilmiş olur.
- Bu sayıya ulaşana kadar, kaynak sayısı K içine d_j sayısı kadar 1 koyarak daha öncekilerden farklı tüm olasılıklar bulunarak maksimum haritalama matrisi elde edilir.
- Bu aşamadan sonra kullanıcılara kaynak tahsisi yapılabilir.

4.5.1.1 Hatalı Üretici Matrisinin Performansa Etkileri

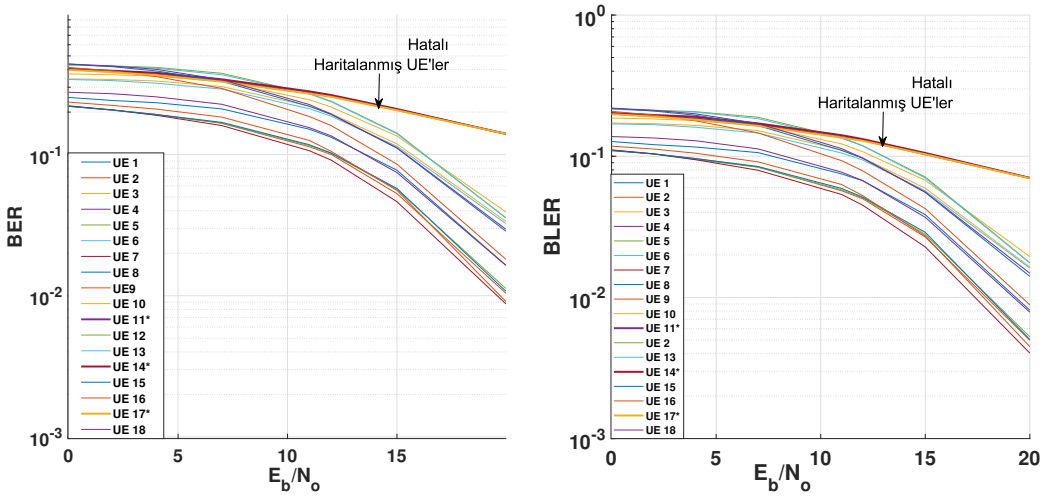
Bu aşamada, SCMA için kritik olan haritalama matrisi üretiminde hata olması durumunda sisteme olan etkileri benzetimlerle gösterilmiştir. SCMA üretici matrisinin en önemli gereksinimlerinin başında sütunların her birinin kesinlikle aynı olmaması

gelmektedir. Aynı sütunların kullanılması, özellikle alıcı tarafta MPA alıcılarının ciddi şekilde performans kaybına uğramasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda kullanıcıların hangi kaynakları kullandıkları veya haritalama matrisindeki tekillik, alıcıda gönderenin tespiti için de kullanılmaktadır. Bu, izinsiz haberleşme (grant-free) için de kullanılan bir özelliktir. Yani kullanıcılar sisteme her dahil olduklarında kayıtlanma mesajlaşmalarına ihtiyaç duymadan haberleşmeye başlayabilirler.



Şekil 4.10 Hatalı üretilmiş haritalama matrisi

Hatalı olarak üretilen üç adet aynı sütuna (yani kaynağa erişim şekline) sahip Şekil 4.10'daki üretici matris, yükleme oranı %300 olan kod kitabı ile yapılan benzetimler Şekil 4.11'deki gibidir. Performansı kötü olan ayrık üç kullanıcı, hatalı üretici matristen kaynaklanmaktadır. Ayrıca kaynak ve kullanıcının kullandığı kaynak değerlerine göre SCMA'nın izin verdiği maksimum yükleme oranı %250'dir.



Şekil 4.11 Hatalı haritalama ile OL=%300'e göre BER ve BLER performansı

Hatalı sonuçlar elde edildiğinde kullanılan SCMA parametreleri aşağıdaki gibidir. Kullanıcı Sayısı $(J) = 18$, Kaynak Sayısı $(K) = 6$, $d_j = 2$ $d_R = 6$, 10^{-3}'e kadar E_b/N_o elde edilmiştir.

4.5.1.2 SCMA Aşırı Yükleme Limitleri

SCMA için kaynak sayısı (K) ve bir kullanıcının kullandığı kaynak sayısına (d_j) göre OL değeri sınırı ortaya çıkmaktadır. Bu sınırın sebebi SCMA için her kullanıcının aynı anda kullandığı kaynakların tek olmasıdır. Farklı kullanıcıların kullandığı tüm kaynaklar aynı olamaz.

Bu duruma göre maksimum yükleme sınırı için önce Eşitlik 4.12'deki denklemdeki maksimum kullanıcı sayısı bulunduktan sonra Eşitlik 4.13'deki gibi bulunur. Elde edilen λ_{max} değeri maksimum yükleme oranını göstermektedir. Örnek olarak farklı d_j değerlerine göre, yükleme oranları ve maksimum kullanıcı sayıları Tablo 4.1'de verilmiştir.

$$J_{max} = \binom{K}{d_j} \tag{4.12}$$

$$\lambda_{max} = \frac{J_{max}}{K} \tag{4.13}$$

Tablo 4.1 Kaynak sayısı K ve kullanıcıların kullandığı kanal sayısı d_j'ye göre SCMA için maksimum yükleme oranları

d_j	Kaynak Sayısı (K)	Maks. Kullanıcı(J_{max})	Maks. yükleme Oranı(λ_{max})
2	4	6	%150
2	6	15	%250
2	9	36	%400
3	6	20	%333

4.5.2 Ana Faz-Genlik Yerleşim

SCMA için ana faz-genlik yerleşiminin minimum elemandan oluşması beklenmektedir. Bu, tüm sistem performansı açısından önemlidir. SCMA tarafından her j kullanıcısı için M'e göre üretilmiş, d_j sayıda farklı kod kitabı oluşturulması gerekli değildir. M noktadan oluşan kaç farklı faz-genlik yerleşimine ihtiyaç duyulduğu, bir fiziksel kaynağı kullanan birden fazla kaç kullanıcı olduğunu gösteren d_R sayısına bağlıdır. Bu şekilde ana faz-genlik yerleşimi, maksimum d_R sayısı temel alınarak elde edilmelidir. Bir kullanıcı, farklı kaynaklar için aynı yerleşimi kullandığı durumda performans kaybı yaşamayacaktır. Çünkü fiziksel kaynaklar (zaman slotu, ayrık frekanslar veya uzaysal kaynaklar), prensip olarak birbirlerini etkilemeyecek tamamen izole kaynaklardır. Dolayısı ile faz-genlik yerleşimindeki bir noktayı v_m ile ifade edersek, ana faz-genlik

yerleşimi için ihtiyaç duyacağımız minimum nokta sayısı V_{mMin} değeri Eşitlik 4.14'deki gibi bulunur.

$$V_{mMin} = M \times d_R \tag{4.14}$$

SCMA için her kullanıcının sabit M ve d_R'ye sahip olma zorunluluğu bulunmamaktadır. Bu nedenle ana faz-genlik yerleşimi Denklem 4.15'de verildiği şekilde bulunabilir.

$$\mathbf{V_{mMin}} = \sum_{j=1}^{J} \prod_{k=1}^{K} f_{k,j} M_j \times d_R^k \tag{4.15}$$

Denklem 4.15'de görüldüğü gibi SCMA için kullanıcılar faklı M_j sayılarında sembolle ifade edilip, farklı sayıda kaynak d_R^k kullanabilirler. Temel amacımız ihtiyaçlar doğrultusunda minimum faz-genlik nokta sayısını bulmaktır.

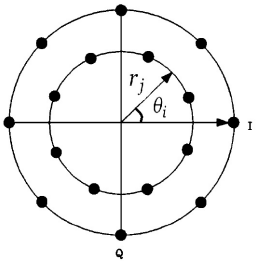
4.6 SCMA İçin Ana Faz-Genlik Yerleşimi Seçimi

Bu aşamada, Bölüm 4.5.2'de ana hatları çizilen ana faz-genlik yerleşimleri için uygulanan yöntemler ve mevcut sistemlerde kullanılan yerleşimler içinde en uygun alt kod kitapları elde edilmesi ile ilgili yöntem önerilecektir.

Mevcutta iki adet faz-genlik yerleşimi önerilmekte ve kullanılmaktadır. Bunlar yıldız temelli QAM yerleşimler ve dikdörtgen temelli QAM yerleşimlerdir. Her iki yerleşim için de kod kitabı tasarımı bakımından en iyi yöntemler ve alt kod kitapları çıkarma için bir yöntem önerilmemiştir. Bu bölümde, sırasıyla yıldız-QAM ve dikdörtgensel-QAM anlatılmakta, ardından her ikisi için de alt kod kitapları elde edilmektedir.

4.6.1 Yıldız Faz-Genlik Yerleşim Temelli Kod kitabı Tasarımı

Çoklu QAM (M-QAM) için kullanılan yıldız temelli faz-genlik yerleşiminde, farklı genlik seviyelerini gösteren yarıçaplara r_i sahip eksenler üzerinde, farklı fazlarda θ_i yerleşimleri yapılarak noktalar Şekil 4.12'de görüldüğü gibi belirlenmektedir. Faz-genlik yerleşimi üzerinde bir nokta Eşitlik 4.16'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 4.12 Örnek yıldız faz-genlik yerleşimi

$$s_j = r_j.e^{j\theta_i} \tag{4.16}$$

Burada r_i için t adet farklı yarıçap kullanılabilir, $r_i \in \{R_1, R_2, ..., R_t\}$ ve faz farklarını gösteren θ_i ise her yarıçaptaki nokta sayısı, ofset ve t'ye göre değer almaktadır.

Her bir yarıçapta kaç adet sembol olacağı belirlendikten sonra noktalar arasındaki faz farkı Eşitlik 4.17'deki gibi bulunur.

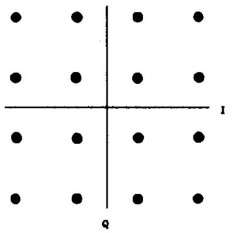
$$\theta_{max} = \frac{2 \times \pi}{d_R \times M} \tag{4.17}$$

SCMA kod kitabı tasarımında, yıldız faz-genlik yerleşim prensibine göre sembollerin yerleştirilmesiyle kod kitapları oluşturulmuştur. Benzetimlerde kullanılan yıldız faz-genlik yerleşimine göre oluşturulmuş kod kitabı aşağıdaki kriterlere göre hazırlanmıştır:

- Yerleşimler için sabit genlik kullanılmıştır.
- Maksimum faz farkı elde edilmeye çalışılmıştır.
- Az sayıda kod kelimesi kullanılmıştır. Bir fiziksel kaynağı kullanacak maksimum kullanıcı sayısına göre kod kelimeleri seçilip kod kitapları oluşturulmuştur.
- Faz döndürme yöntemi kullanılmıştır.
- Aynı kaynağı kullanan kullanıcılar için elde edilebilecek en yüksek faz farkı Eşitlik 4.17'deki gibi hesaplanmıştır.

4.6.2 Dikdörtgen-QAM Faz-Genlik Yerleşim Temelli Kod Kitabı Tasarımı

Bu bölümde dikdörtgen temelli QAM modülasyonlarında kullanılan yerleşim temel alınarak kod kitabı tasarımı yapılacaktır. Dikdörtgen temelli faz-genlik yerleşimi Şekil 4.13'de gösterildiği gibi farklı genlikli dikdörtgenlerin üzerine en yakın noktalar eşit uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilerek oluşturulmaktadır.



Şekil 4.13 Dikdörtgen faz-genlik yerleşimi

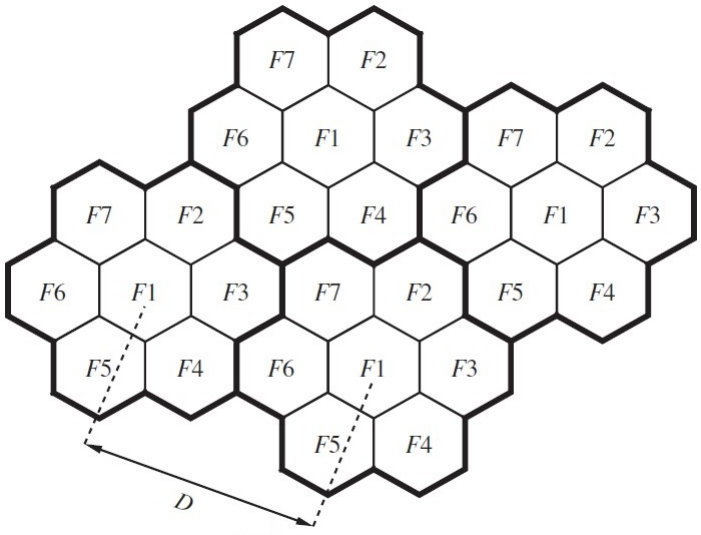
4.6.2.1 Dikdörtgen Faz-Genlik Yerleşimi için Yenilikçi Bir Yaklaşım

Dikdörtgen faz-genlik yerleşimi için kod kitapları oluşturulurken, hücresel ağ planlamada kullanılan frekansların yeniden kullanım prensipleri esas alınarak yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem mevcut dikdörtgen tabanlı faz-genlik yerleşimlerini ana kod kitabı olarak esas alıp eşit öncelikli kod kitabı tasarımı elde edebilmek için kullanılacaktır.

Buradaki temel amaç, sınırlı sayıdaki frekans kaynağının tekrar kullanımı sırasında mümkün olduğunca birbirinden uzak mesafede kullanılmasını sağlamaktır. SCMA kod kitabı tasarımı için, eşit alanlara bölünmüş bir faz-genlik yerleşiminin bu prensipler kullanılarak oluşturulması amacıyla kullanılacaktır.

Temel olarak frekansların tekrar kullanılması amacı için, öncelikle nasıl bir kümelenme olacağı ve içinde kaç adet farklı frekans kullanılacağı belirlenmelidir.

Bu aşamada kullanılan notasyonlarda D, iki hücre arası mesafeyi, R, her hücrenin çapını ve N, her kümedeki kullanılacak frekans sayısını gösterecektir. Şekil 4.14'de görüldüğü gibi altıgen bir hücre yapısı içinde toplam 7 adet frekans kaynağı kullanılmaktadır. Benzer frekans kaynakları arası en kısa mesafe de D ile gösterilmektedir [55]. Burada kullanılan parametreler arasındaki ilişki Eşitlik 4.18'de



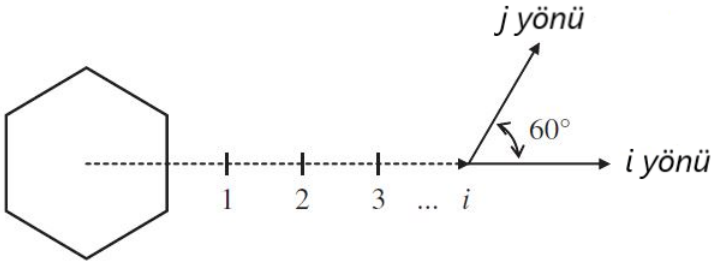
Şekil 4.14 N=7 için çoklu frekans yeniden kullanım örneği [55]

verildiği gibidir.

$$D = \sqrt{3N}R \tag{4.18}$$

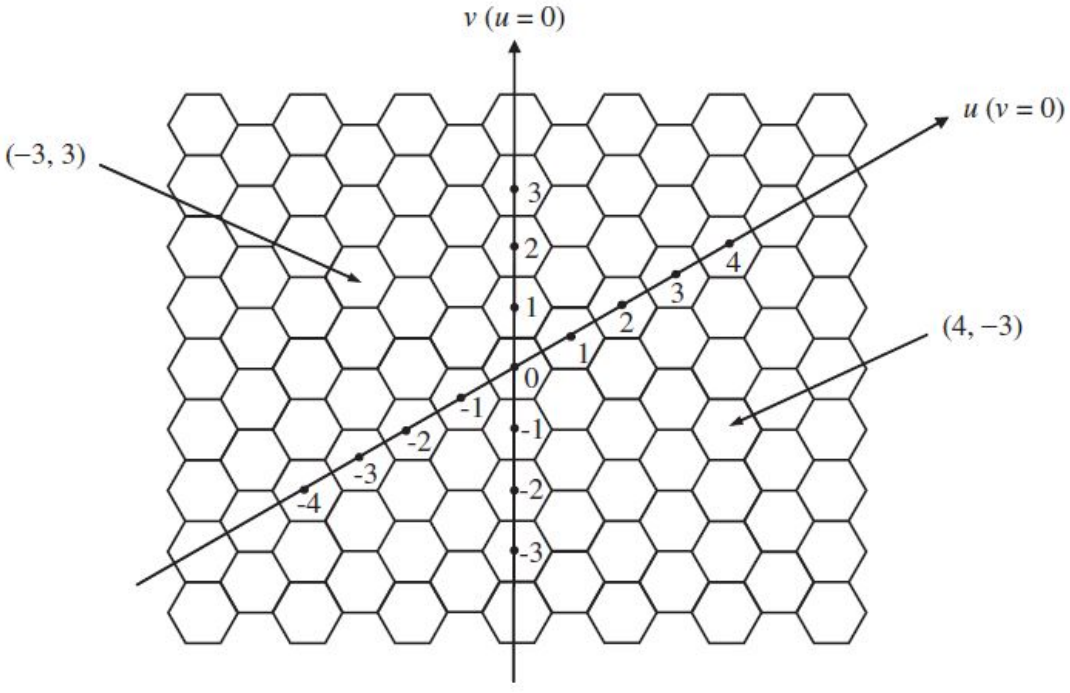
Kullanılacak hücre sayısı üzerinde belirli işlemler yapılarak, hangi hücrede hangi frekans kaynağının kullanılacağını belirlemek, Şekil 4.15'de gösterildiği gibi merkezdeki hücreden yatayda ve 60 derecede i ve j yönlerinde kaç adet küme içinde

hücre olduğu bulunmalıdır.



Şekil 4.15 Frekans yeniden kullanım için i ve j değerlerinin belirlenmesi için örnek yön belirleme [55]

Genelde bir küme içindeki hücre sayısı N, i ile j değerleri kullanılarak $N = j^2 + ij + j^2$ şeklinde ifade edilebilir. Merkezi hücreden çizilen i ve j yönlerindeki eksenlere u ve v eksenleri adı verilip eksenler üzerindeki her bir hücre Şekil 4.16'daki gibi numaralandırılırsa, buradan her hücrenin alması gereken konumu gösterecek L değerini $L = [(i+1)u + v] \text{mod } N$ şeklinde bulabiliriz. Bu değerler ışığında $N =$

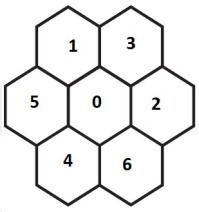


Şekil 4.16 Yerleşim noktalarını bulabilmek için oluşturulmuş (u, v) eksenleri [55]

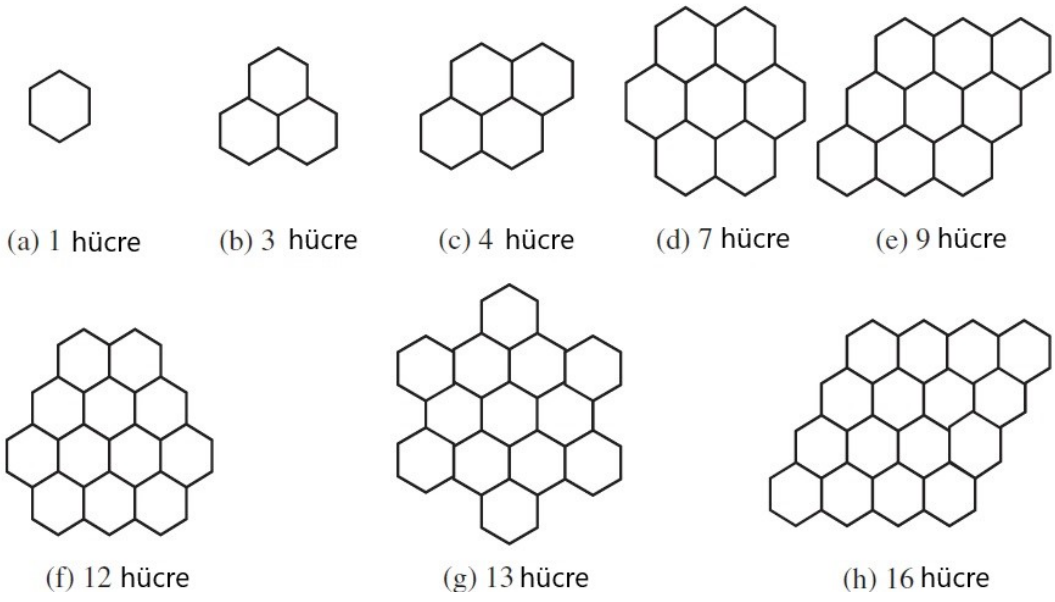
7 olduğu durumda, hücreler içinde frekans kaynaklarının yerleşimi Şekil 4.17'de gösterilen tablodaki değerleri alır. Tabloya göre frekans yerleşimi Şekil 4.18'de verilmiştir. Olası farklı hücre yerleşimleri için örnekler de Şekil 4.19'da verilmiştir.

u	0	1	−1	0	0	1	−1
v	0	0	0	1	−1	1	1
L	0	3	4	1	6	2	5

Şekil 4.17 N=7 değeri için küme içindeki her hücreye yerleştirilmesi gereken frekans indis değeri [55]

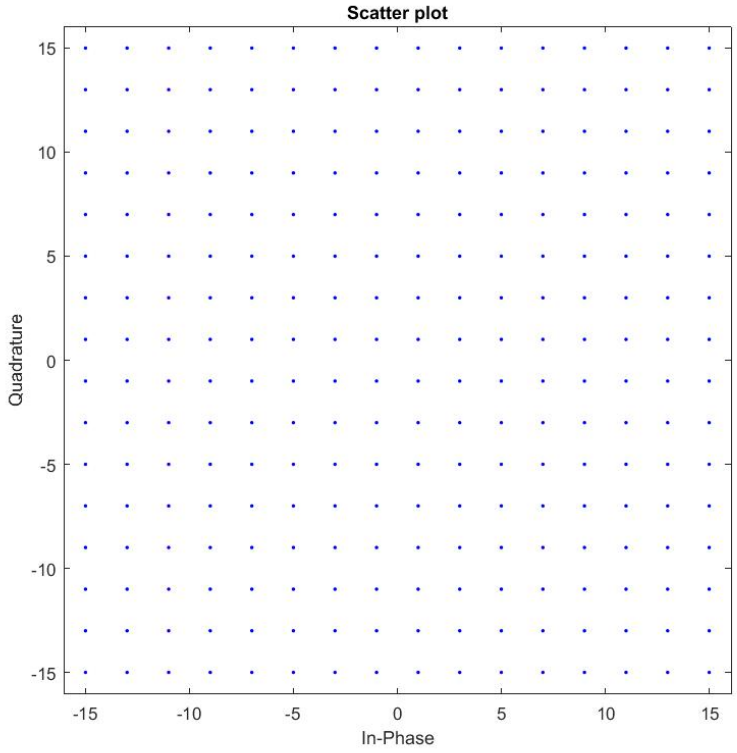


Şekil 4.18 7 Adet hücreden oluşan bir küme için örnek yerleşim [55]



Şekil 4.19 Farklı sayılarda kümelenmeler için olası yerleşimler [55]

Eşit ağırlıklı kod kitapları üretmek için frekans yeniden kullanım kuralları kullanılarak, dikdörtgen temelli bir QAM yerleşimi baz alınarak eşit uzaklıklı kod kitapları oluşturulmuştur. Bu işlem için Şekil 4.20 yerleşimi baz alınmıştır.

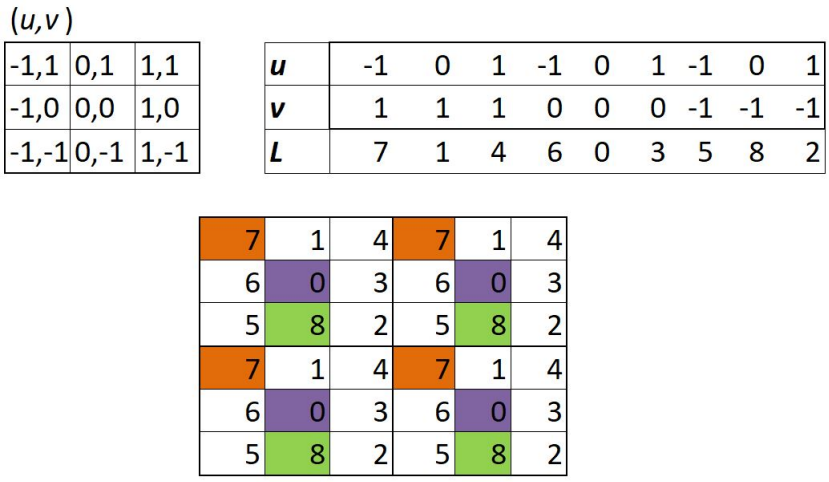


Şekil 4.20 Dikdörtgen temelli bir QAM-256 için faz-genlik yerleşimi

Şekil 4.21'de dokuz kullanıcı için seçilecek farklı kod kitapları için gruplardan hangi numaralı yerleşimlerin seçilmesi gerektiği numaralandırılarak gösterilmiştir. Bu işlemlerde $N = 9$, $i = 2$ ve $j = 2$ olmaktadır. Kümelenme içindeki 9 hücrede nasıl yerleşileceği ile alakalı (u, v)'ye göre yerleşim ve bu yerleşime göre yerleşim numaraları 4.21'de gösterilmiştir.

Burada frekanslarla SCMA içindeki kod kelimeleri arasında ilişki kurularak faz-genlik yerleşimlerinden, çıkarılan frekans yerleşim kuralına göre kod kitabı oluşturulacaktır. Sembol oranı M değerine göre 9'lu yerleşimin, temel alınan ana faz-genlik yerleşimi üzerine yerleştirilmesi gerekmektedir. Burada yapılan çalışmalarda örnek olarak 4 bölge seçilmiştir ve $M = 4$ olarak $\{00 - 01 - 10 - 11\}$ değerlerini gösterecektir. Yerleşimler I ve Q eksenlerine göre simetrik olarak yerleştirilecektir. 9 noktayı içerecek yerleşimler ne kadar uzak olursa, aktarılacak sembollerin uzaklıkları o kadar fazla olacaktır.

Şekil 4.22'de gösterildiği gibi, üç adet kod kelimesi oluşturulması için her bölgeden mevcut uzaklıkları eşit olacak şekilde, daireler içine alınan değerler kod kitabı



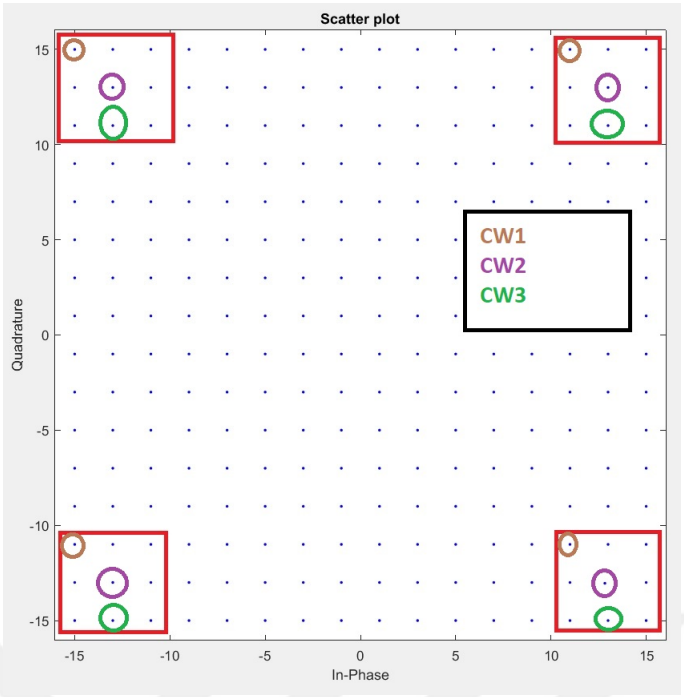
Şekil 4.21 Frekans yeniden kullanım kurallarına göre oluşturulmuş dokuz kullanıcı için yerleşim

elemanlarıdır. Buradaki, 9'lu gruplar halindeki noktalar CW'lerdir. Her biri dokuzlu içindeki aynı renkli, farklı karmaşık sayıya karşılık gelen CW'ler bir kod kitabını göstermektedir. Bu kod kitaplarının, her bir elemanının toplamda diğer elemanlara uzaklığı ve her bir kod kitabında, diğer kod kitaplarına göre mesafeler eşittir. Bu sayede eşit öklid uzaklıklı kod kitapları elde edilmiş olacaktır.

Elde edilen kod kitapları, bu bölümün benzetimler aşamasında dikdörtgen temelli faz-genlik yerleşimlerde kullanılmıştır. Performans etkileri tartışılıp karşılaştırmalar yapılmıştır. Dikdörtgen faz-genlik yerleşimi temelli, eşit uzaklıklı kod kitapları üretmek için aşağıdaki önceliklendirmeler yapılmalıdır:

- Sembolleri oluşturan bit sayılarına göre 4-8-16-32 farklı bölgeye benzer yerleşimler kullanılarak farklı uzunluklu kod kelimeleri elde edilebilir.
- Yerleşimleri 4-9-16-25-... (yatay veya dikey nokta sayısı karesi) veya daha fazla sayıda yaparak kod kelimeleri oluşturulabilir.
- Kod kelimeleri sayısı N_c, bir kaynağı kullanan maksimum kullanıcı sayısına d_R ve bir kullanıcının kullanabileceği kaynak sayısı d_j'ye bağlı olarak ne kadar yüksek olursa, elde edilecek kod kitabı sayısı da o kadar artacaktır.
- Dikdörtgen temelli faz-genlik yerleşimi için $d_R \times M$ değerinden büyük ilk QAM yerleşimi kullanılmalıdır. Böylece, mevcut QAM değerindeki maksimum faz ve genlik farklarına sahip ana faz-genlik yerleşimine sahip olunur. Örneğin $d_R \times M = 3 \times 4 = 12$ için QAM16 kullanılmalıdır.

Bu aşamada, özellikle dikdörtgensel yerleşim için önerilen ve yüksek performanslı olması beklenen yerleşimlerin, beklenenin aksine nasıl düşük performansa sahip



Şekil 4.22 Dikdörtgen QAM 256 faz-genlik yerleşimi üzerinde dokuz hücreden oluşan kümelenmelerde üç adet eşit uzaklıklı kod kitabı elemanları gösterimi

olduğu gösterilmiştir. Bu konu ile alakalı literatürde yaptığımız araştırma sonucunda, öklid uzaklığının tek başına SCMA için yeterli performansı sağlamadığı, sembollerin enerjilerinde çeşitlilik olması gerektiğini anlatan çalışmalarla karşılaşılmıştır [48]. Bu kapsamda kod kitabı üretimi için enerji çeşitliliğini sağlayacak kod kitapları tasarlanarak benzetimler yapılmıştır.

5
SCMA BENZETİM VE KARŞILAŞTIRMALAR

SCMA bölümünde anlatılan alıcı verici yapısı MATLAB ortamında gerçeklenmiştir. Gerçeklenen yapılarda, ilgili bölümde anlatıldığı gibi yıldız ve dikdörtgensel faz-genlik yerleşimleri kullanılarak CB'ler elde edilmiştir. Benzetimlerde kullanılmak üzere, %150, %200 ve %250 OL değerlerine sahip ana CB'ler (CB_{ana}) tasarlanmıştır. Elde edilen CB'lerin her bir UE ve her bir RE için faz-genlik yerleşimleri, kullanım durumları gösterilmiştir. Ayrıca her biri için performans karşılaştırmaları verilmiştir. Sonrasında mevcut kullanılan QAM temel bant modülasyonuna sahip OFDM sistemlerin SCMA ile kullanılabilirliği anlatılmıştır.

SCMA için yapılan tüm benzetimlerde, ideal kanal tahmini varsayımı yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Gürültü, tüm benzetim senaryolarında sıfır ortalamalı toplamalı Gauss gürültüsü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) ile modellenmiştir. Performans incelemesi için, BER veya BLER ile bit başına enerjinin (E_b) spektral gürültü yoğunluğuna N_o oranı incelenmiştir. Daha düşük hata oranları aynı zamanda daha yüksek spektral verimliliği ifade etmektedir. Mevcut sistemlerde, işaret gürültü oranı (SNR) ile bir biti ifade edemeyeceğimiz için E_b/N_o oranı kullanılmıştır. E_b/N_o oranı ile SNR arasındaki ilişki,

$$E_b/N_o = SNR - 10\log_{10}(\frac{J\log_2(M)}{K}), \tag{5.1}$$

ile ifade edilebilir. Benzetimlerde kullanılan tüm parametrelerin değerleri, yollanan toplam veri ve MPA yineleme sayısı da dahil olmak üzere Tablo 5.1'de verilmiştir. Faz-genlik yerleşimindeki minimum noktadan noktaya mesafe öklid mesafesi ile bulunur. Herhangi bir CB'de, $i.$ ve $j.$ CW'ler sırasıyla CW^i ve CW^j olarak gösterilir. Bu noktalar arasındaki minimum öklid mesafesi,

$$d_{min}^{ij} = \sqrt{((CW^i)^2 - (CW^j)^2)}. \tag{5.2}$$

Ayrıca her bir CW'deki noktalar arasındaki mesafelerin toplamı da benzetimlerde

Tablo 5.1 Farklı OL değerleri için SCMA benzetim parametreleri

Parametre	Değer		
OL (λ)	150%	200%	250%
CB sembol uzunluğu (M)	4	4	4
Fiziksel kaynak sayısı (K)	6	6	6
Kullanıcı sayısı (J)	9	12	15
d_j	2	2	2
d_R	3	4	5
Yollanan toplam veri	1.040.400	1.040.400	1.040.400
Kanal kodlama	LDPC	LDPC	LDPC
Kodlama oranı (R)	1/2	1/2	1/2
MPA yineleme sayısı (Ym)	5	5	5

gösterge olarak kullanılmaya çalışılmıştır. Kullanıcıya ait CB'lerdeki CW'lerin toplam öklid uzaklığı,

$$D_{cb_i} = \sum_{i=1}^{d_j} \mathrm{f}_j \sum_{m=1}^{M} {d_{min}}^{im}, \tag{5.3}$$

olarak hesaplanmıştır. Diğer faz-genlik yerleşimleri ile karşılaştırmak için her kullanıcının ortalama sembol enerjisi hesaplanmıştır. Her faz-genlik yerleşiminde, M 'ye göre bir sembolün gelmesi ve d_j kullanıcısı tarafından kullanılan kaynakların sayısı $M \cdot d_j$ olmaktadır. SCMA için uygun ortalama enerji ise,

$$\begin{aligned} \epsilon_x = E[\| x \|^2] &= \sum_{i=1}^{M} \| x \|^2 \, p_x(i) \\ &= \frac{1}{M \cdot d_j} \sum_{i=1}^{M} \| x \|^2, \end{aligned} \tag{5.4}$$

ile elde edilir. Kanal kodlama için LDPC kullanılmıştır ve kodlama oranı R ile gösterilmektedir. Sistem bloklarının gösterildiği Şekil 3.15'te görüldüğü gibi d_n ile b_m arasındaki ikili veri miktarının oranı kodlama oranını gösterir ve $R = \frac{n}{m}$ ile hesaplanır.

5.1 Yıldız Faz-Genlik Yerleşimli Ana Kod Kitabı Benzetimleri

Bu aşamada yıldız faz-genlik yerleşimi ile ürettiğimiz kod kitapları ve onların benzetim sonuçları verilmiş ve incelenmiştir. Üretilen kod kitapları hem genlik seviyesi sayılarına hem de OL oranlarına göre farklılık göstermektedir. Ana kod kitabı üretimi sonrası, her bir UE ve RE'ye göre atamaların nasıl yapıldığı, BER ve BLER performans karşılaştırmaları verilmiştir.

5.1.1 Tek Seviye Yıldız Faz-Genlik Yerleşimli Ana Kod Kitabı

Bu aşamada, tek seviyeli ve eşit mesafeli yıldız faz-genlik yerleşiminden üretilmiş kod kitaplarına sahip sistem performansı incelenmiştir.

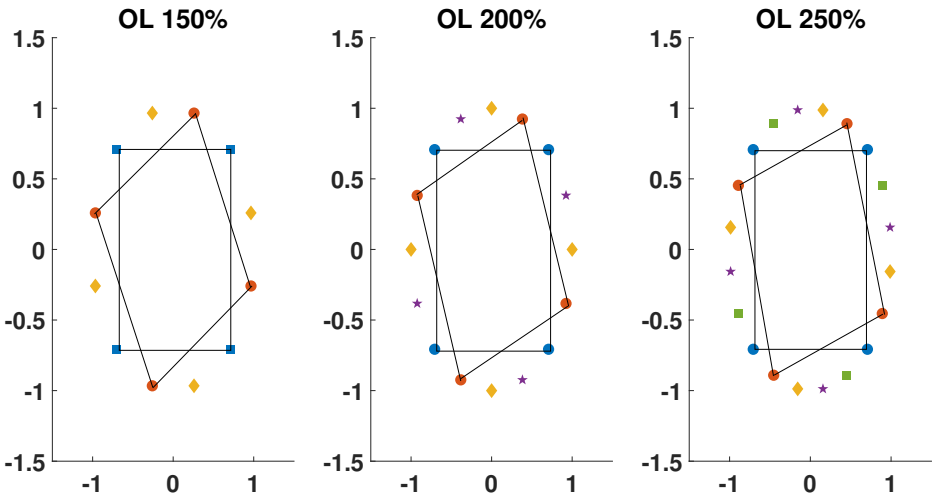
Tablo 5.2 Tek Seviye yıldız faz-genlik yerleşimine göre parametreler

d_j	d_R	Kaynak Sayısı (K)	Maks. UE (J_{max})	Faz Farkı	Maks. OL (λ_{max})
2	3	6	9	$\pi/6$	150%
2	4	6	12	$\pi/8$	200%
2	5	6	15	$\pi/10$	250%

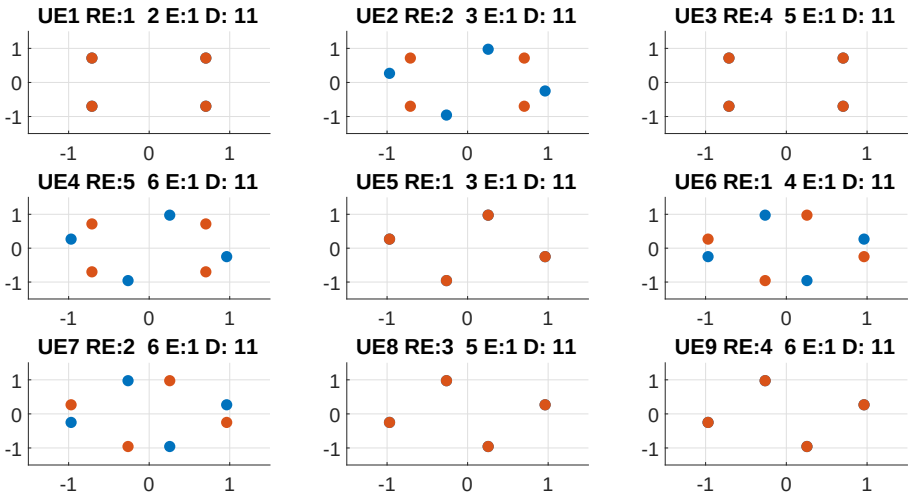
Yıldız faz-genlik yerleşimi kullanılarak üç farklı OL değeri olan %150, %200 ve %250 için gerekli kod kitabı tasarımı yapılmıştır. Kod kitapları için ilgili SCMA parametreleri Tablo 5.2 'de verilmiştir. Bölüm 4'de anlatıldığı gibi d_j ile OL değeri sınırlanmaktadır. Benzetimlerde $d_j = 2$ aldığımız için maksimum OL değeri %250 olmaktadır. d_R değeri, bir kaynağı kullanan UE sayısını göstermektedir. SCMA'in tüm kullanıcılar için ayrık veya dikgen olması için en az bu sayı kadar farklı CB bulunmalıdır. Dolayısı ile CB_{ana} içinde, her bir OL değerine göre kaç adet CB olacağı bu sayıya eşittir. Sembol sayısı $M = 4$ olduğu için de toplam $d_R \times M$ kadar CW olan CB_{ana}'lar elde edilmelidir. Bu değere göre tek seviyeli yıldız faz-genlik yerleşimi bir daireye eşitlik (4.17) faz farkı ile yerleştirilmiş sembollerden oluşacaktır. Oluşan bu farklı ana kod kitapları Şekil 5.1'de verilmiştir. Faz-genlik yerleşimindeki noktalar veya CW'ler, $M = 4$ olduğu için $00, 01, 10, 11$ ikili değerlerini temsil etmektedir. CB'lerin ayrımının görünmesi için bazı CB'ler ilgili şekil üzerinde çizgilerle birleştirilmiştir ve bir CB'ye ait tüm CW'lerin renkleri aynıdır.

Her bir kullanıcı, bir kaynağı kullanırken ana kod kitabındaki CB'lerden birini kullanır. Kullanılan CB'ler farklı RE'lerde aynı ya da farklı olabilir. Bu aşamanın tam anlaşılması bakımından, Şekil 5.2'de gösterildiği gibi OL değeri %150'ye göre, her UE için hangi RE'lerin kullanıldığı, ortalama enerjisi (E) ve toplam öklid uzaklıkları (D) verilmiştir. Bu faz-genlik yerleşimleri incelendiğinde, UE1, UE3 kendi arasında, UE5, UE8 ve UE9, da kendi arasında SCMA yapısına sadece bir yerleşim veya CB ile dahil edilebilir. Bu, özellikle UE tarafında mevcut alıcı-vericilerin kullanılmasını mümkün kılar. Her kullanıcının ortalama güç ve faz-genlik yerleşimi için, bunların içindeki toplam minimum öklid mesafeleri hesaplanmıştır.

Her bir RE'e göre UE'lerin dağılımı ve RE'lerin faz-genlik yerleşimleri, OL=%150 için şekil 5.3'te verilmiştir. İncelendiğinde ilk kaynak (RE1), 1,5 ve 6 numaralı UE tarafından, diğer RE'lerde benzer şekilde diğer UE'ler tarafından kullanılmaktadır.



Şekil 5.1 Üç farklı OF $\lambda = \%150$, $\lambda = \%200$ ve $\lambda = \%250$ değeri için tek seviyeli yıldız faz-genlik yerleşimi I/Q diagramı



Şekil 5.2 Dokuz UE altı RE ve $\lambda = \%150$ için faz-genlik yerleşimi I/Q diagramları

Burada yerleşimin ana CB'deki ile aynı olduğu görülmektedir. İletim esnasında her kullanıcıdan bir CW yollanacağı düşünüldüğünde, her RE'de maksimum d_R adet CW yollanacak ya da alınacaktır. Özellikle mMTC için sürekli UE'lerin veri yollamayacağı da göz önüne alındığında, benzetimler en kötü durumu göstermektedir. Diğer OL değerleri için kaynak yerleşimi de ana CB gibi olacağından diğer kaynak yerleşimleri gösterilmemiştir. Her kaynaktaki bu ortak CB yapısı, özellikle donanım ve yazılım karmaşıklığını azaltacaktır. Ortak RE yerleşimleri, hem UE hem de baz istasyonu tarafında benzer avantajlarla SCMA CB'lerinin kullanımını kolaylaştırmaktadır.

Tüm OL değerleri için hesaplanan ortalama enerji ve toplam minimum öklid mesafeleri eşittir. Şekil 5.4 'de görülebileceği gibi OL=%150 için, dokuz kullanıcının tümü benzer

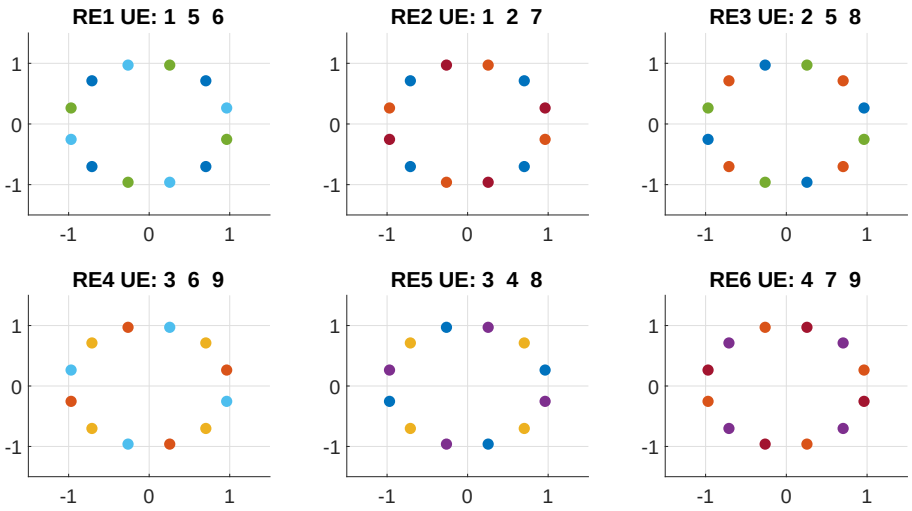
E_b/N_o oranlarında, benzer ve yüksek performansa sahip olduğu bir BER grafiğine sahiptir. Aynı sonuç, üç farklı OL değeri için de geçerlidir. Tek seviyeli yıldız faz-genlik yerleşimi kullanırken ortalama gücü ve toplam minimum öklid mesafelerini eşit tutmak kolaydır.

Şekil 5.5'de, üç farklı yükleme oranıyla, yıldız faz-genlik yerleşimi ana yerleşim olarak kullanılarak elde edilen BER ve E_b/N_o AWGN etkisi altında sonuçlar gösterilmektedir. Tüm yükleme oranlarında UE'lerin ortalama performansı hesaplanmıştır. OL değeri arttığında performansta bir miktar düşüşe rağmen, farklı erişim tekniklerine göre genel performansın yüksek olduğu görülmektedir.

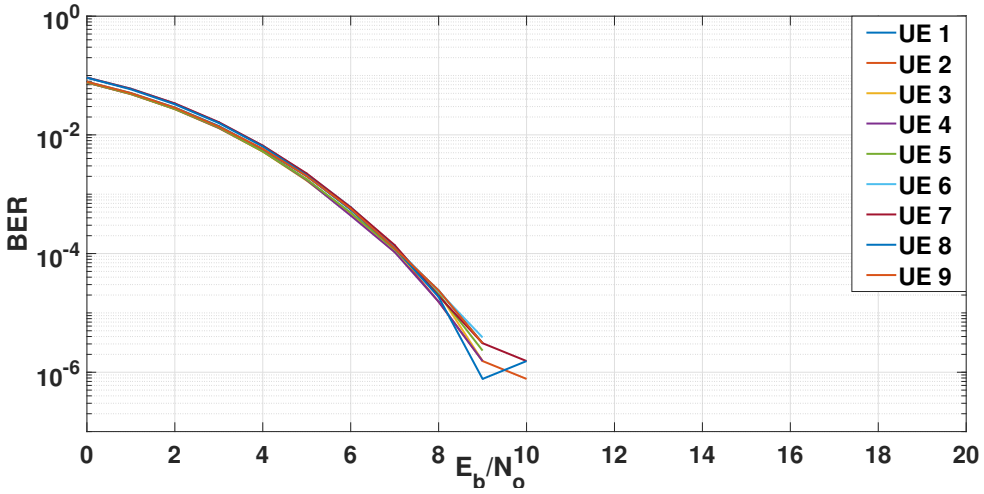
Şekil 5.6'da, üç farklı yükleme oranıyla, bu kez Rayleigh sönümleme kanal etkisi ve AWGN'e maruz kalmış işaretler için benzer benzetimlerin performans sonuçları verilmiştir. Bu etkiler altında, hem kanal kodlamasız hem de LDPC kanal kodlamalı performans sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca OL oranı yüksek olan benzetimlerdeki performansın, kanal kodlaması dahil edilmediğinde 10^{-5} civarında olduğu, LDPC kanal kodlamasından sonra 10^{-6}'a ulaştığı görülmektedir.

5.1.2 İki Seviye Yıldız Faz-Genlik Yerleşimli Ana Kod Kitabı

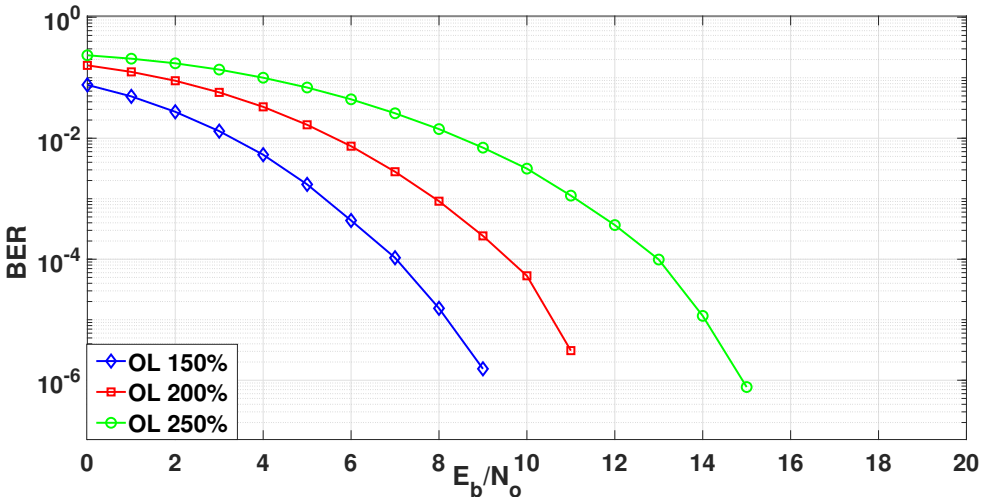
Bu aşamada, iki seviyeli ve eşit mesafeli yıldız faz-genlik yerleşiminden üretilmiş kod kitaplarına sahip sistem performansı incelenmiştir. CB'lerde, dramatik sorunlar olup olmadığını araştırmak için eşit mesafeli ve ortalama güçle benzetim yapılmıştır. Elde edilen ana faz-genlik yerleşimi Şekil 5.7'de verilmiştir. İki genlik seviyesinde $M = 4$ olan örnek iki adet CB çizgilerle ve tüm CB'ler ayrık renklerle gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Altı RE, dokuz UE ve $\lambda = \%150$ için RE faz-genlik yerleşimi I/Q diagramları



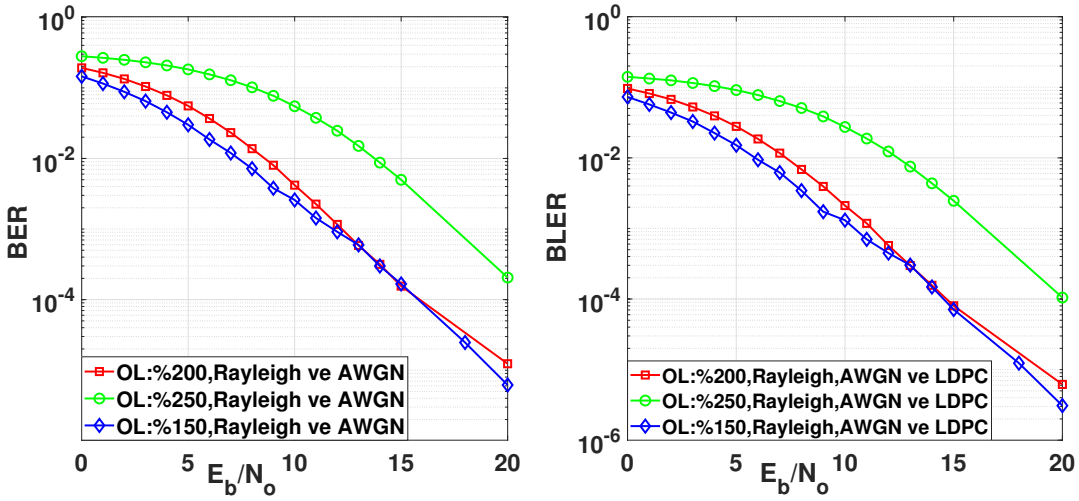
Şekil 5.4 Yıldız temelli faz-genlik yerleşim için OL = %150 için performans. Tüm UE'lar aynı performansa sahiptir



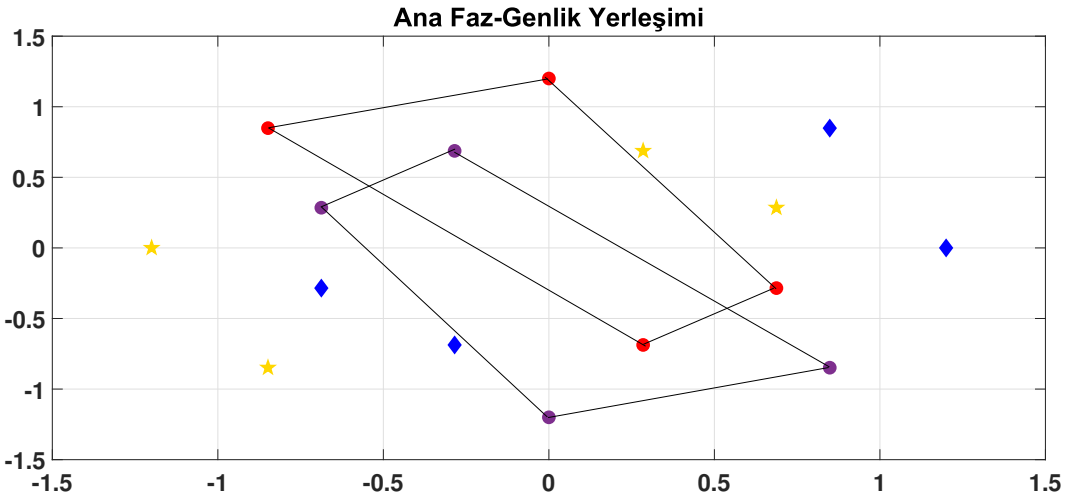
Şekil 5.5 OL değeri %150, %200 ve %250 için AWGN etkisi ile eşit uzaklıklı yıldız temelli tek genlik seviyeli CB'lere göre performans karşılaştırması

İki seviyeli ana faz-genlik yerleşimi, %200 yükleme oranı ile kullanıcının CB'lerini yerleşimi Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Tüm RE'lerin faz-genlik yerleşim noktaları Şekil 5.7'de gösterilmiştir ve ana faz-genlik yerleşimi ile aynıdır.

Şekil 5.9'da, eşit öklid mesafesine dayalı olarak yıldız faz-genlik yerleşimi ile üretilen CB'lerin performansı gösterilmiştir. Şekil 5.5'teki %200 yükleme oranına göre kıyaslandığında, performans önemli ölçüde azalır ve bir hata tabanı vardır. Sonuç olarak, faz-genlik yerleşimi öklid mesafeleri ve güç parametrelerinin yanı sıra kodların da enerji çeşitliliğine sahip olması çok önemlidir.



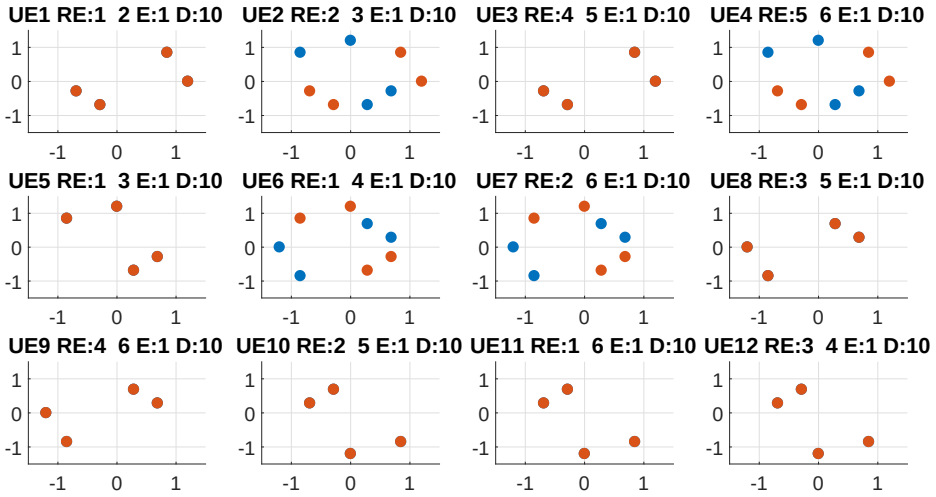
Şekil 5.6 OL değeri %150, %200 ve %250 için Rayleigh sönümleme kanalı etkisi altında hem BER hem de LDPC kullanıldığı durumda BLER karşılaştırması



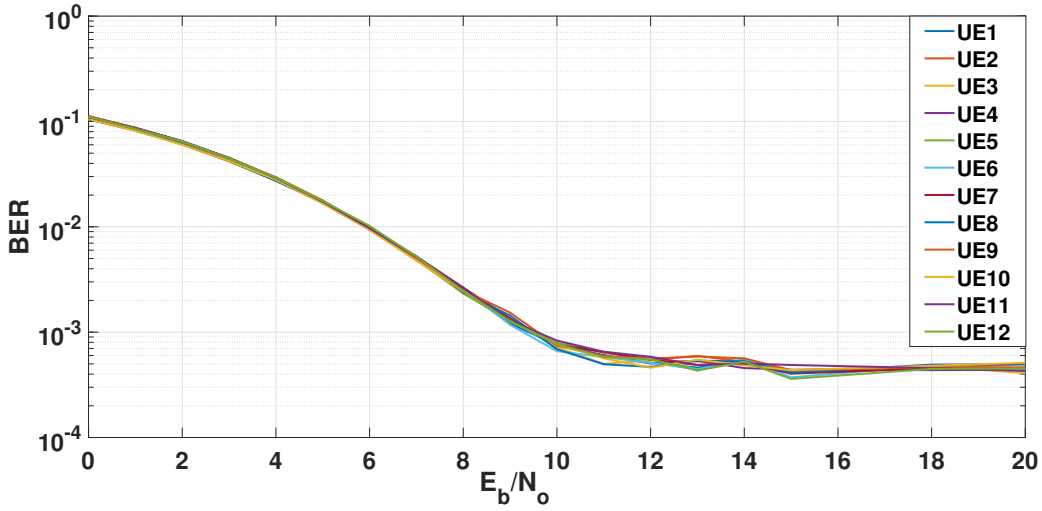
Şekil 5.7 Tüm CW'lerin arasının eşit olduğu iki seviyeli yıldız temelli ana faz-genlik yerleşimi I/Q diagramı

5.2 Dikdörtgensel Faz-Genlik Yerleşimi Kullanılarak Ana Kod Kitabı Üretme

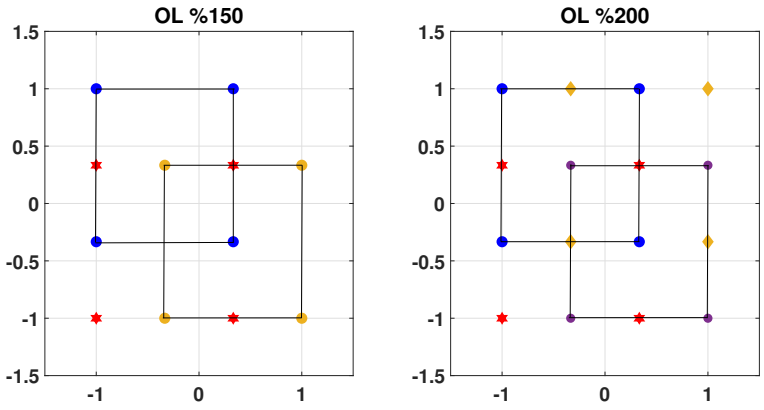
Bu bölümde, dikdörtgen faz-genlik yerleşimi ana yerleşim olarak kullanılıp tek genlik seviyeli CB'lerle benzetimler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ana yerleşimden farklı özelliklerde kod kitapları üretilerek benzetimler yapılmıştır. İlk yerleşim için eşit uzaklıklı ve enerji çeşitliliği olmayacak şekilde CB'ler oluşturulmuştur. Oluşturulan ana CB yerleşimi 5.10'da verilmiştir. Bu yerleşimde görüleceği gibi OL değeri %150 ve %200 olacak şekilde ana kod kitabı bulunmaktadır. OL değeri farkı nedeniyle ilk ana CB'de üç diğerinde dört farklı CB bulunmaktadır.



Şekil 5.8 İki seviyeli yıldız temelli ana CB'a göre UE'lerin faz-genlik yerleşimi I/Q diagramları, $J = 9$, $d_j = 2$ ve $\lambda = \%200$

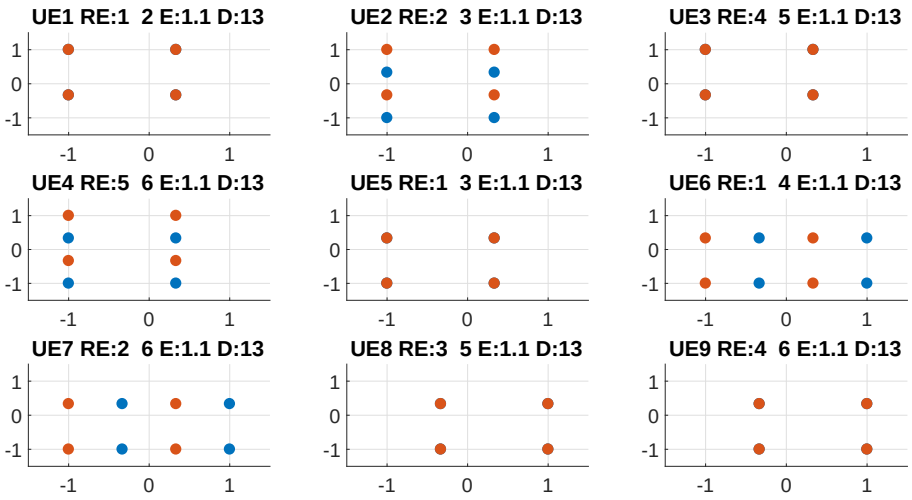


Şekil 5.9 Yıldız temelli iki seviye genlikli ana CB ile BER performansı ($\lambda = \%200$)



Şekil 5.10 Eşit uzaklıklı karesel faz-genlik yerleşimine göre oluşturulmuş ana CB

Bu aşamadaki benzetimler OL değeri %150 için yapılmıştır. İlgili OL değeri için kullanıcılara özgü her bir faz-genlik yerleşimi Şekil 5.11'de verilmiştir. Görüleceği gibi tüm CW'ler eşit uzunluklu dikdörtgenler üzerinde yerleşmiştir. Tüm kullanıcılar birden fazla kaynak kullanmalarına rağmen, UE1,UE3, UE5, UE8 ve UE9 her kaynakta aynı CB'yi kullanmaktadır.

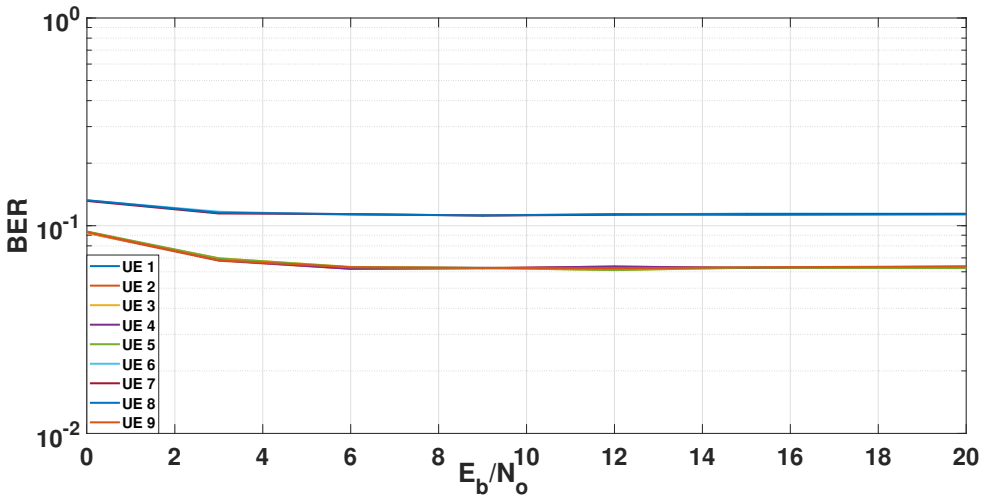


Şekil 5.11 Dikdörtgensel ana CB için tüm UE'ların faz-genlik yerleşimi I/Q diagramları, $J = 9$, $d_j = 2$, ve $\lambda = \%150$

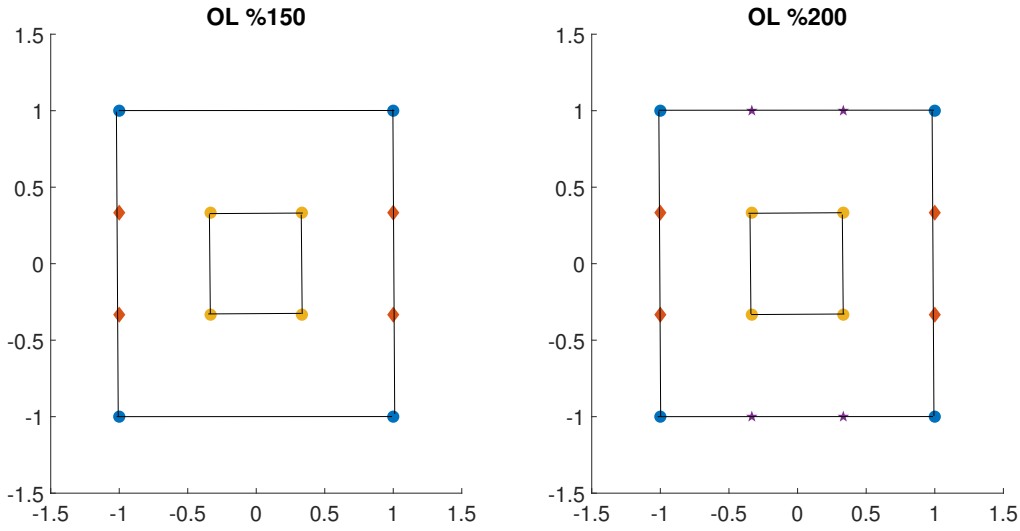
BER ve BLER performansı, Şekil 5.12'de gösterildiği gibi bu yerleşimlerle elde edilmiştir. CB'ler eşit mesafeli ve minimum öklid mesafesine sahipken çok kötü bir performansa sahip olmuştur ve hata tabanı olduğu görülmektedir. Bu yerleşim ile elde edilen sonuç, eşit mesafeli güçlere sahip olma ve enerji çeşitliliğinin olmamasından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen bu kötü performansı iyileştirmek için, aynı ana faz-genlik yerleşimini kullanarak farklı öklid uzaklıklarda oluşan CB'ler elde edilmiştir. Bu amaçla oluşturulan ana CB, Şekil 5.13'de iki farklı OL değerine göre oluşturulmuştur. Ana CB tasarımında farklı yarıçaplara sahip ancak $(0,0)$ noktasına eşit uzaklıkta CB'ler elde edilerek benzetimleri tekrarlanmıştır. Görüleceği gibi dikdörtgensel yerleşim üzerindeki tüm CW'ler aynı fakat CB olarak seçilen gruplar farklıdır.

Yıldız temelli eşit uzaklıklı faz-genlik yerleşimi ile ilişkiyi görebilmek için Tablo 5.3 hazırlanmıştır. İki faz-genlik yerleşimi için de öklid uzaklıkları ve enerji çeşitliliğini her kullanıcı için gösterilmektedir. Görüldüğü gibi hem enerji hem de öklid uzaklık bakımından farklı dikdörtgen temelli yerleşimde iki kata yakın, iyi değerlerde yarıya yakın kullanıcı olmasına rağmen, beşte bir ortalama enerjili ve yarı öklid uzaklıklı kullanıcılar da diğer yarıyı oluşturmaktadır.



Şekil 5.12 Dikdörtgensel temelli eşit uzaklıklı CB'lerle BER performansı. $K = 6$, $d_R = 3$ ve $\lambda = \%150$

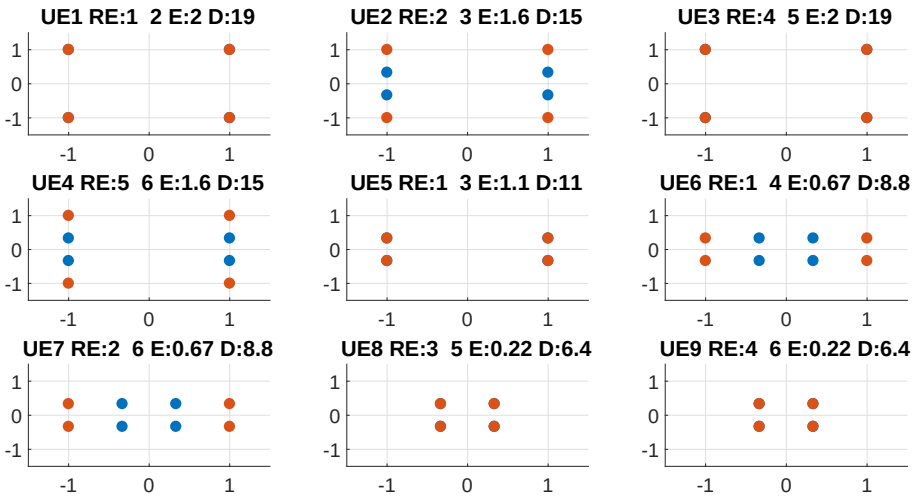


Şekil 5.13 Enerji çeşitliliği ile oluşturulmuş ana CB'ler

Tablo 5.3 Yıldız ve Dikdörtgensel ana faz-genlik yerleşim temelli OL = %150 için kullanılan enerji ve öklid uzaklıkları tablosu

Kullanıcı (UE)	Kaynak (RE)	Eşit Yıldız T. CB_{ana}		Farklı Dik. T. CB_{ana}	
		Ortalama Enerji(E)	Öklid Uzaklık (D)	Ortalama Enerji(E)	Öklid Uzaklık (D)
UE 1	1,2	1	11.31	2.00	19.31
UE 2	2,3	1	11.31	1.55	15.20
UE 3	4,5	1	11.31	2.00	19.31
UE 4	5,6	1	11.31	1.55	15.20
UE 5	1,3	1	11.31	1.11	11.09
UE 6	1,4	1	11.31	0.67	8.77
UE 7	2,6	1	11.31	0.67	8.77
UE 8	3,5	1	11.31	0.22	6.44
UE 9	4,6	1	11.31	0.22	6.44

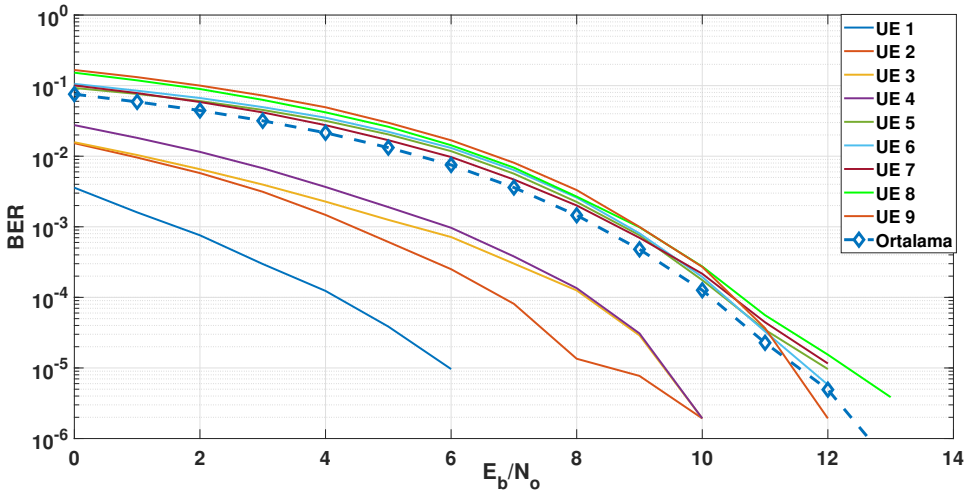
Her bir UE için faz-genlik yerleşimi Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Kullanıcılara atanan CB'ler ve haritalama matrisine göre kullandıkları kaynaklar görülmektedir. Şekil 5.14 ve Tablo 5.3'den görüleceği gibi özellikle UE1 ve UE3 ortalama enerji ve maksimum öklid uzaklığına sahip en iyi değerlere sahipken, UE8 ve UE9 benzer parametrelere göre en kötü değerlere sahiptir. Bu durumda diğer kullanıcılar ile aralarında belirgin bir fark olacağı beklenebilir. Aynı zamanda tüm kullanıcıların ortalama performansına göre çok kötü durumda olacak kullanıcılar beklenebilir. Fakat SCMA bu kod kitapları ile yapılan performans benzetimleri bunların dışında sonuçlar vermiştir.



Şekil 5.14 Enerji çeşitliliği olan ana CB ile CB dağılımı I/Q diagramları, $J = 9$, $d_j = 2$ ve $\lambda = 150\%$

Şekil 5.15'te eşit uzaklıklı olmayan enerji çeşitliliği sağlanan dikdörtgen temelli CB'ler ile yapılan benzetim sonuçları verilmiştir. Ana CB olarak Şekil 5.10 yerine Şekil 5.13 yerleşimi kullanıldığındaki dramatik performans artışı görülmektedir. Yapılan öngörülerin aksine ortalama performanstan olumsuz yönde çok uzakta kullanıcılar bulunmamaktadır. Aksine çok daha yüksek performansta kullanıcılar bulunmaktadır. UE1 kullanıcısı Şekil 5.5'te %150 deki kullanıcı ortalamalarından bile çok daha yüksek performansa sahiptir. 3 UE'de benzer şekilde çok iyi performans göstermiştir. UE1 ve UE3 kullanıcıları aynı enerji çeşitliliği ve öklid uzaklığına sahip olmasına rağmen UE1 pozitif yönde ayrışmıştır. Bunun sebebi ortak kaynakları kullandıkları UE'ler ile alakalı gibi görünmektedir. Dikkat edilirse UE1, en kötü performansa sahip UE8 ve UE9 kullanıcıları ile ortak hiçbir kaynağı kullanmamaktadır. Oysa UE3, RE4 ve RE5'de bu iki kullanıcı ile aynı kaynağı kullanmaktadır. MPA yapısı gereği yinelemeli bir kod çözücü olduğu için yineleme sayısı arttırılarak bu dezavantaj daha azaltılabilir fakat bu da işlem yükü getirecektir. Yine de tam anlamı ile birebir aynı olmayacağı öngörülmektedir. Buradan görüleceği gibi kullanıcıya özel performans hem kullandığı CB'ler ile değiştirilebilirken aynı zamanda kaynakları kullandığı diğer kullanıcıların performansını da etkilemektedir.

Benzer şekilde UE8 ve UE9 kullanıcılarının performansının, açık şekilde diğer kullanıcılara göre ciddi kötü olması beklenmekteydi. Fakat bu kullanıcılar da CB ve SCMA yapısı sayesinde ortalamaya yakın performans göstermişlerdir.



Şekil 5.15 Dikdörtgensel ve Enerji çeşitliliğine sahip ana CB ile elde edilmiş BER performansı

5.3 Mevcut OFDMA temelli sistemlerde SCMA'in Kullanılabilirliği

SCMA için mevcut sistemlerde kullanılan, yıldız veya dikdörtgensel faz-genlik yerleşimleri ile kod kitapları üretilebileceği ve bunların yüksek performanslara

erişebileceği benzetimlerle gösterilmiştir. UE özelinde, aynı kod kitabının birden fazla RE'de kullanılabileceği gösterilmiştir. Şekil 5.14 incelendiğinde UE1 ve UE3 veya UE8 ve UE9 hem birbiri ile aynı yerleşime hem de kullandıkları RE'lerde de aynı faz-genlik yerleşimine sahip olmaktadır. Buradan hareketle mevcut sistemlerde kullanılan, örnek olarak QAM-4 alt yapıda bir UE'yi SCMA çalışan sisteme kolayca dahil edebileceğimizi söyleyebiliriz. Bu durumda elbette SCMA'ya dahil olan OMA çalışan UE'nin diğer NOMA cihazlar gibi aynı anda birden fazla kaynak kullanması beklenemez. Fakat kendi çalışma koşullarını değiştirmeden yeni sistemlere adapte edilmiş olur. Bu bakımdan da SCMA özellikle OFDMA temelli UE'lerle de çalışabilme kabiliyetine sahiptir.

6
SCMA-IM

SCMA, 5G ve ötesi iletişim sistemlerinde büyük makine tipi iletişimler için umut verici bir NOMA şemasıdır. OFDM-IM'nin yenilikçi kullanımı, veri iletiminde ton indislerinin kullanılmasından yararlanır. Tezde, İndis Modülasyonlu Seyrek Kodlu Çoklu Erişim (Sparse Code Multiple Access based on OFDM-IM, SCMA-IM) adını verdiğimiz yeni bir çoklama ve çoklu erişim şeması önerilmiştir. SCMA-IM yöntemi, yukarı yönlü bağlantı NOMA sistemlerinde SCMA ile benzer hesaplama karmaşıklığı ile verimli bir şekilde uygulanabilir. Bu yöntemde, faz-genlik yerleşimi farklılıkları ve çeşitlilik, SCMA, CB'ler aracılığıyla elde edilir ve CB'lerin kullanımı, IM'ye aktarılır. CB'ler aracılığıyla performans iyileştirmesi sağlanır. İndeksler tarafından taşınan veri bitlerinin sayısı, farklı sayıda CB kullanılarak birden fazla bitin taşınmasına olanak sağlamaktadır. IM'de indisleri belirlemek için kullanılan yapı, SCMA alıcısı olan MPA ve LLR kullanılarak ortadan kaldırılmış ve alıcı yapısı basitleştirilmiştir. Böylece, IM ile kodlanarak yeni bir NOMA şeması elde edilmiştir. Sistemin BER performansı %150 ve %200 olarak aşırı yükleme faktörleri için benzetimlerle incelenmiştir.

Tezde, SCMA ve IM'yi birleştirerek ve matematiksel modelini oluşturarak yeni bir şema önerilmiştir. Bu tezin ana katkılarından biri, mMTC sistemleri için yukarı bağlantı SCMA-IM şemasının tanıtılmasıdır; ayrıca, SCMA-IM'nin veri aktarım hızı mevcut sistemlerle karşılaştırılmıştır. SCMA-IM, literatürde açıklanan farklı IM tabanlı yöntemlere kıyasla aşağıdaki avantajları sağlar:

(i) OFDM-IM ve varyantları OMA sistemlerinde uygulanırken, SCMA-IM hem NOMA sistemleri için IM'yi eklemekte, hem de IM yöntemleri için OL'ye izin vermektedir.

(ii) SCMA-IM, hem CB'ler yardımıyla indisleri kullanarak veri göndermekte hem de indislerle birden fazla bit gönderme yeteneğini kazandırmaktadır.

(iii) SCMA-IM'de CB'lerin ayrıştırılması ile indislerle yollanan bitlerin çözümü sağlanır. SCMA sistemleriyle aynı karmaşıklığa ve farklı veri boyutlarını iletme

yeteneğine sahiptir. Bu sayede, IM tabanlı sistemlere kıyasla daha basit bir şema olan bir verici yapısı elde edilmiştir. Alıcı kısmında, indis matrisi elde etme işlemi ortadan kaldırılmıştır. Aynı zamanda, uygulaması kolay MPA ve LLR algoritmalarının kullanılması, basitleştirilmiş alıcılara sahip olunmasını sağlamıştır.

(iv) Hem OFDM hem de diğer IM şemalarına kıyasla verimlilik artmaktadır.

Bu bölümün devamında, SCMA-IM şemasının alıcı-vericisi tasarlanıp, BER'i farklı CB'lerle karşılaştırmak için bütünleşik sınırları ifade edilecektir. Rayleigh sönümleme kanal etkileri altında farklı OL faktörleri ile BER ve BLER analizleri için benzetimler yapılacak ve sonuçları SCMA, DM-OFDM ve OFDM-IM ile karşılaştırılacaktır.

6.1 OFDM-IM Temelli Erişim Tekniği

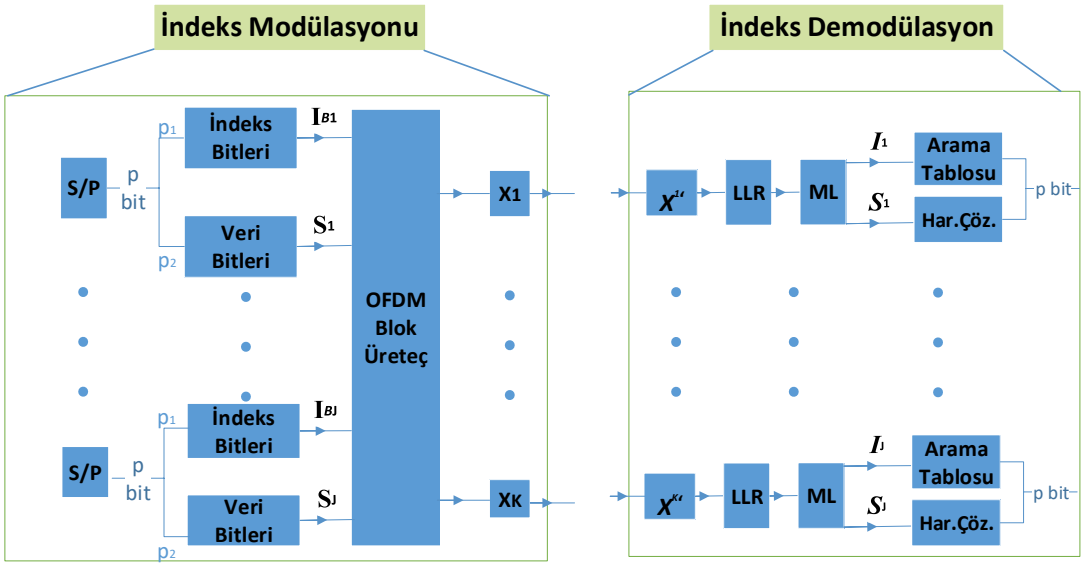
Veri aktarımı için ek kaynaklar olarak indisler, OFDM-IM [7] ile kullanılmaktadır. OFDM-IM alıcı ve verici yapılarının blokları dahil olmak üzere, temel bantta IM için gerçekleştirilen işlemler, karşılaştırma için Şekil 6.1'da gösterilmiştir. Her kullanıcıdan üretilen verilerin p bitleri, indis bitlerinin ve veri bitlerinin toplamıdır, yani sırasıyla p_1 ve p_2.

IM'ye göre, veri bitleri, p_1 bit ile indislenen taşıyıcılar üzerinden transfer edilir. Toplam indis sayısı, veri taşımak için kullanılan indis sayısı ve kullanılmayan indisler sırasıyla n, t, l ile gösterilir. p_2 parametresi, M-ary QAM ile temel bant indisleme yöntemi tarafından taşınacak bit sayısını temsil eder. p_2 değeri, $p_2 = t \cdot \log_2 M$ olarak hesaplanabilir. OFDM-IM yönteminde veri, seçilmemiş indislerin taşıyıcıları üzerinden aktarılmaz. Bu nedenle, indislenmiş veri bitlerini temsil eden indis, bir indis seçici vektörü $\mathbf{I}_\beta$ tarafından gösterilir. Çünkü temel şema OMA'ya dayalıdır. J, K 'a eşittir veya ondan küçüktür ve bir kullanıcı için dizin vektörü $\mathbf{I}_\beta = \{I_1, ..., I_t\}$ şeklindedir.

Genel sistem için, indis matrisini $\mathbf{I} = \{\mathbf{I}_{\beta 1}, ..., \mathbf{I}_{\beta J}\}$ olarak gösterebiliriz . $\mathbf{s}$ vektörü, temel bant modülasyonu için verileri temsil eder, $\mathbf{s} = \{s_1, ..., s_j\}$. OFDM için, bir kullanıcıya atanabilecek maksimum taşıyıcı sayısı, $n = t + l$, $p_1 = \lfloor \log_2 \binom{n}{t} \rfloor$ olarak hesaplanır [1]. Burada p_1 ikili veri olarak indislenir. Kullanıcı başına gönderilecek veri biti sayısı OFDM'de p_O'dır. $i.$ kullanıcı için bu değer $p_O^i = n \cdot \log_2 M$ 'a eşittir. OFDM-IM yöntemi, BER performansı açısından avantajlı olsa da kullanılmayan indisler nedeniyle verimi düşürür.

DM-OFDM ve onun genelleştirilmiş versiyonu olan GMM-OFDM-IM yöntemleri,

[1] İfadede, $\lfloor * \rfloor$ ve $\binom{n}{t}$ sırasıyla floor işlevini ve kombinasyon işlemini belirtir.



Şekil 6.1 Yukarı yönlü OFDM-IM modülasyon ve demodülasyon mimarileri

kullanılmayan indislerle veri iletimini destekler [8], [11]. Temel yaklaşım, kullanılmayan tonları göndermek yerine verileri farklı bir faz-genlik yerleşiminden göndermektir. Bu durumda, her kullanıcı için iki farklı faz-genlik yerleşimi kullanılır. İki farklı yerleşim indisi kullanılarak gönderilen p_1 ve p_2 sayılarının bitleri şu şekilde verilir:

$$p_1 = \lfloor \log_2(\frac{n!}{(n-t)!(t)!}) \rfloor, \tag{6.1}$$

$$p_2 = t \log_2(M_A) + (n-t) \log_2(M_B), \tag{6.2}$$

burada n, OFDM şemasında kullanılan alt blokların toplam sayısını temsil ederken, t değeri $\mathscr{M}_{\mathscr{A}}$ faz-genlik yerleşimini kullanan bit sayısını ve $n-t$ ise $\mathscr{M}_{\mathscr{B}}$ faz-genlik yerleşiminde kullanılan bit sayısını temsil eder. Temel bant sembollerinin sayısı M_A ve M_B ile temsil edilir. Gönderilecek toplam bit sayısı, $p_{DM} = p_1 + p_2$ kombinasyonuyla gösterilir. Sonuç olarak, DM-OFDM şeması, OFDM şemasından daha fazla bilgi biti iletir, yani, $p_{DM} > p_O$. Önerilen IM yöntemlerinde, alıcıda ML ve LLR dedektörleri kullanılır [9].

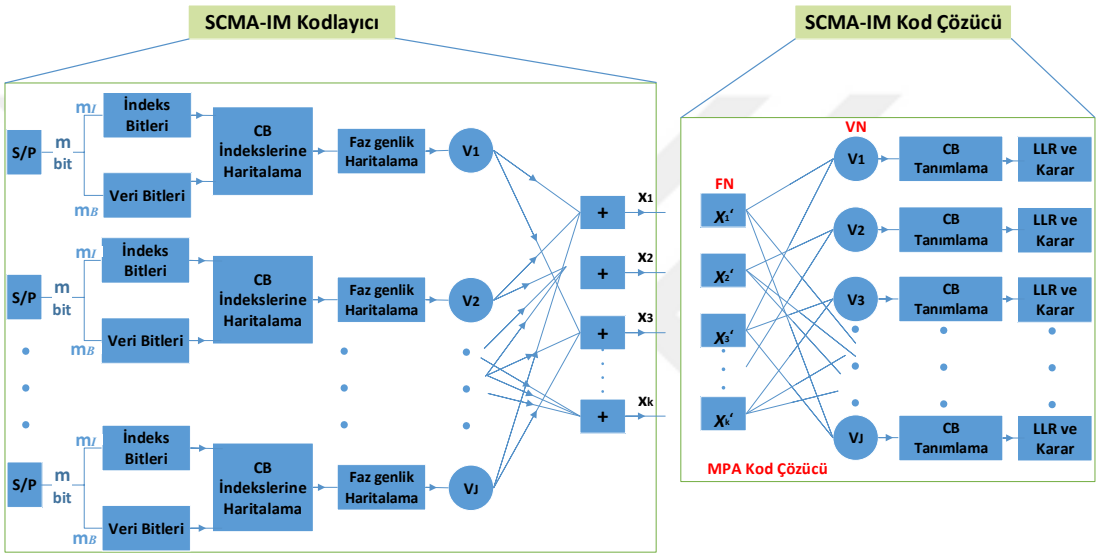
6.2 SCMA-IM'in Sistem Modeli

Bu bölümde, daha önce Bölüm 4.1'de anlatılan SCMA sistem modeli esas alınarak SCMA-IM yöntemi sunulmakta ve veri hızları diğer OFDM ve IM tabanlı şemalarla

karşılaştırılmaktadır. Daha sonra performans değerlendirmesi için sınırlar elde edilecektir.

6.2.1 SCMA-IM Kodlayıcı

SCMA, faz-genlik yerleşim çeşitliliğini kullanarak, temel bant modülasyonları için çok önemli bir esneklik sağlamıştır. Öte yandan OFDM-IM, veri bitlerini indislerle taşıma konusunda önemli bir yetenek sağlar. Bu çalışmada, SCMA ve IM'yi birleştirerek SCMA-IM olarak adlandırılan yeni bir yöntem önerilmiştir. SCMA-IM şemasının temel blokları Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 Önerilen yukarı yönlü SCMA-IM yapısı

SCMA-IM yönteminde, her kullanıcının b_m^j veri bitleri, kanal kodlamasından sonra SCMA-IM'nin temel bant kısmına ulaşır. b_m^j veri dizisi, M-ary sembollerine dönüştürülmek üzere m_b uzunluklu $b_{m_B}^j$ bitlerine ve indislerle iletilecek m_I uzunluklu $b_{m_I}^j$ bitlerine ayrılır. m_I değeri, önerilen yöntemle OFDM tonlarını indislemek için kullanılacak CB sayısını gösterir. Değer 2'nin katı olmalıdır, aksi takdirde ekstra performans kaybına neden olur, çünkü $m_I = \log_2 M_I$ bir tam sayı olmayacaktır. Bu aşamada CB'ler tonları indislemek için kullanılır. SCMA yapısında olduğu gibi, tasarım ana CB'un, $\mathbf{CB}_{ana}^{IM}$ 'un inşasıyla başlar. Ana CB'deki farklı CB'lerin sayısı d_R yerine $M_I \cdot d_R$'dır. İndekslerle taşınan bit sayısı $\log_2 M_I$ 'ya eşittir. $\mathbf{CB}_{ana}^{IM}$ tensör olarak ifade

edilir:

$$\mathbf{CB}_{ana}^{IM}[d_R, M_I, M_B] = \begin{bmatrix} [z_1^{1,1}, \ldots, z_{M_B}^{1,1}] & \cdots & \\ \vdots & \ddots & \\ [z_1^{d_R,1}, \ldots, z_{M_B}^{d_R,1}] & \cdots & \\ & [z_1^{1,M_I}, \ldots, z_{M_B}^{1,M_I}] & \\ & \vdots & \\ & [z_1^{d_R,M_I}, \ldots, z_{M_B}^{d_R,M_I}] & \end{bmatrix}. \tag{6.3}$$

Benzer şekilde, jeneratör matrisinin bir elemanı artık bir vektör değil, bir matristir. Her $i, j,\ j = 1, \ldots, J$ ve $i = 1, \ldots, d_R$ ve $l = 1, \ldots, M_I$ aralıklarında, ve her bir matris öğesi (üretici alt matrisi) $\mathbf{g}_{K,M_I}$, $\mathbf{G}[K, J, M_I]^{IM}$'i üretmek için aşağıdaki eşitliği kullanır:

$$\mathbf{g}_{K,M_I} = \begin{cases} \mathbf{c}_i^l,\ i = i + 1 & \text{if } f_{kj} = 1, \\ 0 & \text{if } f_{kj} = 0. \end{cases} \tag{6.4}$$

Her $\mathbf{G}[K, J, M_I]^{IM}$ tensör satırı için, başlangıç koşulları $i = 0$ şeklindedir ve eğer $f_{kj} = 1$ ise i değerinin arttırılması gerekir . Eğer her $\mathbf{g}_{k,j}(i)$ alt üretici vektörünü $\mathbf{g}_{K,M_I}$ üretici alt matrisinden oluşturursak, indisler aracılığıyla veriler iletilebilir. $\mathbf{g}_{k,j}(i)$ ve $\mathbf{x} = [x_1, \ldots, x_k]^T$ temel bant simge vektörünün öğeleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir :

$$\mathbf{g}_{k,j}(i) = \mathbf{G}_{K,M_I}(b_{M_I}^j(i)), \tag{6.5}$$

ve

$$x_k = \sum\nolimits_{j=1}^{J} \mathbf{g}_{kj}(b_{M_B}^j(i)). \tag{6.6}$$

Gelen bitler paralel hale getirilip m_b ve m_i uzunluklarına ayrıştırıldıktan sonra, CB bu iki değere göre seçilir ve ardından CW belirlenir. Bu aşamada elde edilen semboller hem indis hem de kod kitabına göre elde edilmiş verileri içerir. Sonraki işlemler temel SCMA kodlayıcı ve OFDM işlemleridir. SCMA-IM blok yapısından görüldüğü gibi, kullanıcı sayısı kaynak sayısından fazladır. Bu nedenle OL faktörü 1'den büyüktür, bu nedenle SCMA-IM yöntemi OL yeteneğini korur.

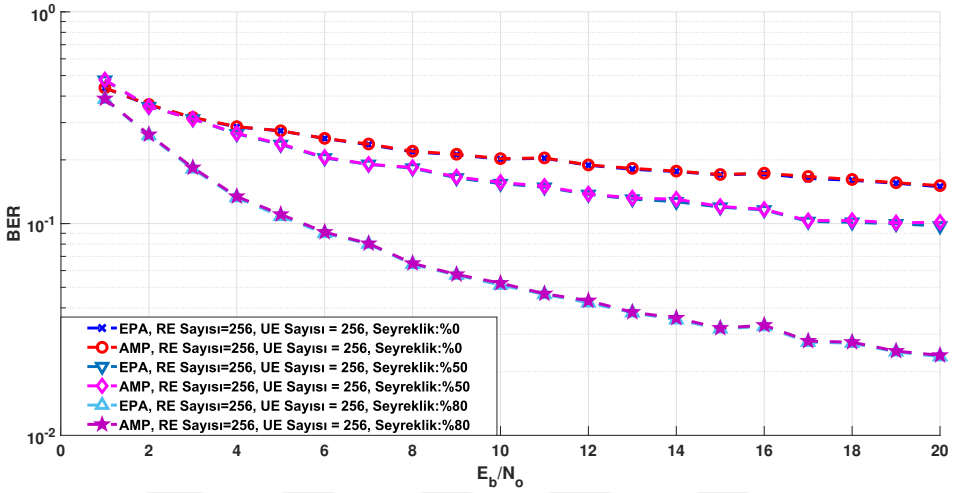
6.2.2 SCMA-IM Alıcı

SCMA alıcı yapısı, MPA kullanmaktadır. MPA yapısal olarak basit olmasına rağmen, hesaplama karmaşıklığı ($\mathcal{O}_{MPA}$) yüksektir ve d_R arttıkça üstel olarak artmaktadır. MPA'nın yüksek hesaplama karmaşıklığı nedeniyle, alternatif olarak AMP ve EPA araştırılmıştır.

Yaklaşık mesaj geçişi (Approximate Message Passing, AMP), gürültülü bir ortamda, bir vektörün elde edilmesi ile ilgili temel soruna dayanır. Gürültüyü en aza indirmek için, yinelemeli olarak gürültü azaltma işlevlerini kullanır. Literatürde, Lipschitz gürültü gidericiler gibi karmaşık gürültü azaltıcı işlevler, AMP algoritmaları için sıklıkla kullanılmaktadır [56]. AMP'nin durum evrimi(state evolution), $L \times K$ boyutlarına sahip H kanal matrisine dayalıdır ve karmaşıklığı, klasik yöntemlerde $\mathcal{O}_{AMP}(LKR_r)$, son zamanlarda $\mathcal{O}_{AMP}(LK\log(R_r))$ olarak geliştirilmiştir. Burada, $R_r = rank(H) \leq min(L,K)$ olarak verilmiştir [57]. AMP'yi yüksek boyutlu doğrusal regresyondan, yinelemeli gürültüden arındırma problemine dönüştürmek için, bir i.i.d. Gauss dağılımlı matrisine ihtiyaç vardır ve dağılımdaki küçük sapmalar performansı düşürmektedir [57]. Yakınsamayı zorunlu kılmak için, sönümleme [58] ve ortalama kaldırma [59] gibi teknikler literatürde önerilmiştir. Sıkıştırılmış algılama (Compresses Sensing, CS) dahil birçok uygulamada, $\mathbf{x}$'in daha yüksek performans için seyrek olması beklenir. Ancak istenen seyreklik ve SE, i.i.d Gauss olmayan kanallar (H) için elde edilememiştir. AMP'nin bu durumuna iyileştirme olarak önerilen vektör AMP (vector AMP, VAMP), daha geniş bir yakınsama aralığı sağlamak için geliştirilmiştir ve herhangi bir ön şart olmadan her matris için uygulanabilirliği vardır [57], [60].

SCMA için önerilen bir diğer iyileştirme, hesaplama açısından karmaşık olan, olasılık fonksiyonları için izlenebilir yaklaşımlar oluşturmayı amaçlayan beklenti yayma algoritması (Expectation Propagation Algorithm, EPA)'dır. Bu yaklaşım, Kullback-Leibler uzaksanması (Kullback-Leibler divergence, KLD) yardımıyla oluşturulur. Burada, örneklerdeki bir olasılık dağılımından diğerine kodlamak için gereken bit sayılarındaki fark belirlenmektedir. Özellikle amaç, en iyi yaklaşımı bulmak için KLD'yi en aza indirmektir. EPA'nın SCMA'da uygulanması faktör grafik gösterimi dikkate alınarak yapılır [61]. FN'ler ve VN'ler arasındaki mesajlar denklemlere dönüştürülür [61, Eqn. 5] ve [61, Eqn.6]. MPA ve EPA'nın karmaşıklıkları sırasıyla $\mathcal{O}_{MPA}(N_{iter}NM_p^{d_R})$ ve $\mathcal{O}_{EPA}(N_{iter}NM_pd_R)$'dir. Burada toplam yineleme sayısı, bir yayılma bloğunun yayılma uzunluğu ve faz-genlik yerleşimi üzerindeki projeksiyon noktalarının sayısı sırasıyla N_{iter}, N ve M_p ile gösterilir [61]. Azalan karmaşıklık, yukarıda bahsedilen yöntemlerin SCMA'da kolaylıkla daha büyük CB'leri kullanmasını sağlar. Doğrusal karmaşıklık, SCMA için bir gelişmedir, ancak SE'deki performans düşüşü sınırlayıcı bir konudur. SE gözlemleri, yalnızca %10'dan %40'a SE için

gösterilmiştir [61]. EPA ve AMP'nin performansı, Şekil 6.3'te farklı seyreklik oran (sparsity ratio, SR) değerleri için gösterilmektedir. %20, %50 ve %0 SR'ler sırasıyla %80, %50 ve %100 SE'lerine karşılık gelir. AMP ve EPA'nın SE'si Şekil 6.3'te gösterildiği gibi benzer olsa da, VAMP, daha sonraki çalışmalarda i.i.d olmayan ve Gauss olmayan matrislere uygulanabilirliği nedeniyle alternatif bir algoritma olarak düşünülebilir.



Şekil 6.3 Farklı seyreklik değerleri için EPA ve AMP performans grafiği

Literatürde, sabit sayıda yineleme yerine, algoritmanın, işleme yükünü azaltmak için hedefe uyarlamalı olarak yaklaşan bir eşik düzeyi kullanabileceği ve ardından sonraki yinelemeleri azaltmak için bir ön işlem gerçekleştirdiği öne sürülmüştür [62], [63]. Kaynakça [64]'da, yazarlar karmaşıklığı azaltmak ve algoritmayı hızlandırmak için bir arama tablosu ve özel bir zamanlama yöntemi kullanmayı önermişlerdir. [65]'de ise, karmaşıklık sırasını MPA ile neredeyse aynı performansla üstelden doğrusala düşüren alıcı önerilmiştir. MPA, alıcıdaki SNR farkına duyarlı olmayan olgun bir algoritmadır ve kullanıcılar arasındaki kanal korelasyonlarına karşı daha güçlüdür [64]. Yapılan çalışmada SCMA ile karşılaştırılabilirlik ve genel kullanımdan özel kullanıma gitmemek adına alıcı yapısı MPA kullanılmaya devam edilmiştir.

Şekil 4.2'de gösterilen standart SCMA alıcısında, FN'ler ve VN'ler MPA'nın temel bileşenlerini oluşturur. MPA kurallarında verilen temel toplam ve çarpım işlemleri gerçekleştirilir ve belirli veya uyarlanabilir sayıda yinelemeden sonra, LLR'ler hesaplanan değerler VN'lere gönderilerek belirlenir. Alıcıda, FN'ler fiziksel RE'leri temsil ederken, VN'ler UE'leri temsil eder. LLR, kodları çözmek için çok basit ve verimli bir yöntem sağlar. Pratik bir kablosuz zayıflama kanalı için mükemmel kanal durum bilgisinin olmaması nedeniyle, LLR [66] ile yinelemeli kod çözme için güçlü hata düzeltme kodlamaları kullanılır. MPA tamamlandıktan sonra, bitlerin değerleri bir

LLR detektörü tarafından belirlenir. Ana bant kod çözücüden bir sembol alındığında $LLR\ (r_i|m_i)$, alt taşıyıcıların sonsal (a posteriori) olasılıkları arasındaki oranı ifade eden eşitlik 4.10 ile elde edilir.

SCMA-IM şemasında, CB tanımlama kısmı dışında standart SCMA alıcısı kullanılacaktır. Yinelemesiz CB kimliği, MPA kod çözücü ile LLR detektörü arasına yerleştirilir. MPA ve değiştirilmiş MPA arasındaki performans farkı önemsizdir. Önerilen SCMA-IM'deki dizin seçimleri farklı CB'lerle yapıldığından, CB kimliği yalnızca CB'yi CW'den ayırır ve m_I uzunluk verisi oluşturur. CB tanımlamasının eklediği ekstra karmaşıklık, MPA'da gerekli hesaplamalara kıyasla önemsizdir. Alınan semboller açısından, SCMA'nın SCMA-IM'den farkı temelde daha fazla CB'ye sahip olmasıdır, dolayısıyla MPA, SCMA-IM alıcısı için yeterlidir. IM'yi dahil etmek için CB'lerin sayısını artırarak, MPA alıcısı I/Q düzleminde daha fazla faz değeri tespit eder ve böylece daha fazla bitin kodunu çözer.

6.3 Performans Analizleri

SCMA ve SCMA-IM için MPA alıcısına gelen karmaşık girişlerin sayısı, sırasıyla $M \cdot d_R$ ve $(M_I + M_B) \cdot d_R$'a göre değişir. MPA için BER sınırının belirlenmesi hesaplama açısından yoğun olduğundan, alıcıda gerçekleştirilecek prosedürleri basitleştirmek ve MPA'nınkine benzer bir performans sağlamak için ortak ML saptaması uygulanır [67] - [68]. CB'lerin minimum öklid mesafeleri farklı olduğundan, CB'lerin eşit olasılıkları garanti edilmez [69]. Bununla birlikte, MPA alıcılarının performansı için kullanılabilir bir yaklaşıma sahip olmak için ML simülasyon sonuçlarını kullanılmıştır.

Sınır değer eşitlikleri için, kod kitapları içindeki tüm CW'ler arasındaki mesafe hesaplandıktan sonra en küçük uzaklık olan (öklid uzaklık) d_{min} , performans kriteri olarak kullanılmıştır.

Algılama sürecindeki en önemli parametre, ML dedektörü için faz-genlik yerleşimi diyagramında alınan semboller arasındaki mesafedir. Her faz-genlik yerleşimindeki minimum noktadan noktaya mesafe öklid uzaklığı aracılığıyla belirlenir. Her bir CW için noktalar arasındaki mesafeler hesaplanır ve simülasyonlarda performans göstergesi olarak kullanılır. d^{ij} noktaları arasındaki minimum öklid uzaklığı, $d^{ij} = \sqrt{|\,(z^i)^2 - (z^j)^2\,|}$ olarak ifade edilir. CB'ler, $i.$ ve $j.$ CW'ler sırasıyla z^i ve z^j olarak temsil edilir. Fiziksel bir RE'de kullanılan tüm CW'ler arasındaki tüm mesafeler hesaplandıktan sonra, sınır denklemlerinde d_{min} mesafesinin en düşük değeri kullanılır.

Simülasyon sonuçları, BER ve BLER ile bit başına enerji oranının gürültü enerjisine

bölünmesini (E_b/N_o) verir. E_b/N_o oranının SNR ile ilişkisi:

$$E_b/N_o = E_s/N_o - 10\log_{10}(\frac{J\log_2 M}{K}), \tag{6.7}$$

E_s/N_o, SNR'ı temsil eder. SCMA-IM için, AWGN etkisi altında kullanılacak ortalama bir sınır olan birleşim sınırı (union bound, UB), [68] içinde belirtilen koşulla bir yaklaşım olarak tanımlanır:

$$P_b \approx \frac{n_{min}}{M^{d_R}} \cdot Q\left(\sqrt{\frac{d_{\min}^2}{2\sigma_s^2}\frac{E_s}{N_0}}\right), \tag{6.8}$$

n_{min}, d_{min}'e göre minimum mesafelerin sayısıdır. Simülasyonlarda, σ_s^2 gürültü varyansının 1'e eşit olduğunu varsayılmıştır. [68]'de önerilen yaklaşık hesaplamayı göz önünde bulundurarak, burada $n_{min} = d_R^{d_R}$'dır. DM-OFDM ve OFDM-IM için teorik hesaplamalar, $d_R = 1$ için yapılır. 6.8 içinde kullanılan Gauss Q-fonksiyonu

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right)dt. \tag{6.9}$$

Bununla birlikte, MPA alıcısının kullanılması nedeniyle, öklid uzaklığına göre performans hesaplaması limitleri belirlemek için yeterli değildir. [18]'de belirtildiği gibi, SCMA'nın performansı hem mesafe hem de enerji çeşitliliği ile ilgilidir. SCMA-IM ve SCMA alıcıları MPA'ya dayandığından, çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmektedir. Hem SCMA-IM hem de [8]'da karşılaştırılan yöntemler için, öklid uzaklığı ve teorik limitler Şekil 6.4' de gösterilmektedir. Çalışmanın odak noktası SCMA-IM'nin tasarımı ve uygulaması olduğundan, MPA alıcısının sınırları gelecek çalışmalar için bırakılmıştır.

SCMA-IM'nin veri hızı ve OL kapasitesi açısından diğer yöntemlerle karşılaştırılması Tablo 6.1'de verilmiştir. Tablo 6.1'den görülebileceği gibi, M_I değerinin OL yeteneğinin yanı sıra 1 veya daha fazla bit almasına izin verildiğinden, SCMA-IM tarafından diğer yöntemlere göre daha fazla veri biti iletilebilir. Adil karşılaştırma yapabilmek için tüm erişim şemalarında M sembollerinin veri hızının aynı ve $B = \log_2 M$ 'a eşit olduğu varsayılmaktadır.

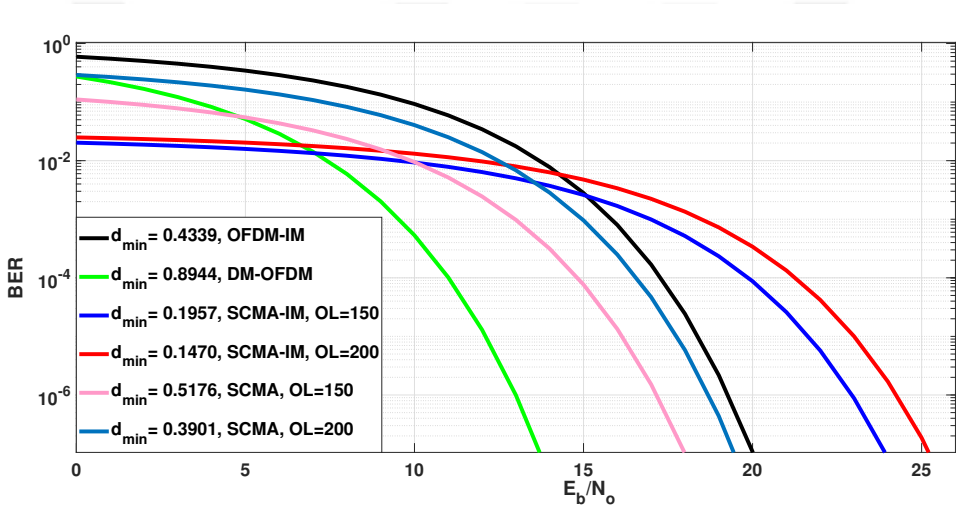
6.4 Benzetimler ve Sayısal Sonuçlar

Benzetimlerde, AWGN gürültüsü ve Rayleigh sönümleme kanal etkileri olarak kullanılmıştır. LDPC, kanal kodlama etkilerini gözlemlemek için, LDPC'nin yanında 5G

ve ötesi sistemler için bir standart olan QC-LDPC de kullanılmıştır [70]. Benzetimlerde kullanıcı sayısı, kaynak sayısı K aynı kalırken artmıştır. Bu durumda, faz-genlik yerleşiminde d_{min} değeri azalır, çünkü d_R artar. d_R 'nin etkileri benzetimler boyunca gösterilmektedir.

Şekil 6.4,% 150 ve % 200 OL faktörleri ile OFDM-IM, DM-OFDM, SCMA ve SCMA-IM durumunda BER için UB'leri göstermektedir. Altı şema farklı d_{min} değerlerine sahiptir. Simülasyonlarda hem %150 hem de %200 OL faktörleri için kullanılan parametrelerin değerleri Tablo 6.2 'de verilmiştir.

Benzetimlerde d_{min} değerleri %150 ve %200 OL faktörlü SCMA-IM için sırası ile 0.1957 ve 0.1470, SCMA için 0.5176 ve 0.3901'dir. OFDM-IM ve DM-OFDM şemaları için d_{min} değerleri sırasıyla 0,4339 ve 0,8944 olarak belirlenmiştir.



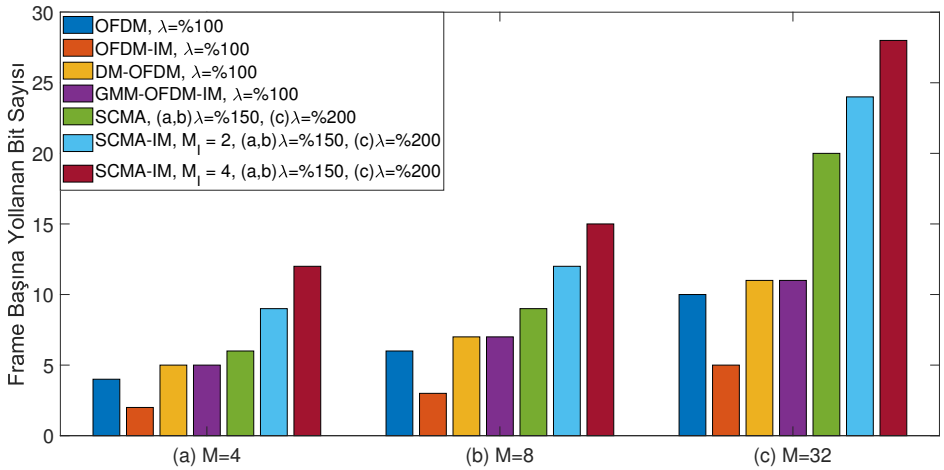
Şekil 6.4 AWGN etkisi altında minimum öklid uzaklıklarına (d_{min}) göre teorik performans sınırları

Tablo 6.1'de listelenen çeşitli M, λ ve M_I değerlerini kullanarak, önerilen SCMA-IM

Tablo 6.1 Veri hızı bakımından metodların karşılaştırılması

Erişim Tekniği	UE-RE	λ	Ton Sayısı	Frame Başına Bit
OFDM	$J = K$	1	$n = t + l$	$B \cdot n$
OFDM-IM	$J = K$	1	t	$B \cdot t$
DM-OFDM	$J = K$	1	$n = t + l$	$B \cdot n + t$
GMM-OFDM-IM	$J = K$	1	$n = t + l$	$B \cdot n + t$
SCMA	$J > K$	>1	$n = t + l$	$\lambda(B \cdot n)$
SCMA-IM	$J > K$	>1	$n = t + l$	$\lambda \cdot n(B + \log_2 M_I)$

şemasının çerçeve başına bitlerini $l = 1$, $t = 1$ ve $n = 2$ alarak Şekil 6.5'te karşılaştırdık. Görüldüğü gibi SCMA ve SCMA-IM, OL yetenekleri nedeniyle önemli avantajlara sahiptir. SCMA-IM, indisler kullanarak veri taşıma kabiliyeti sayesinde, diğer yöntemlere göre çok daha yüksek veri taşıma kapasitesine sahiptir.



Şekil 6.5 Farklı OL, M ve M_I değerlerine göre erişim tekniklerinin frame başına taşıdığı bit miktarı karşılaştırması

SCMA-IM'de kullanılan ana CB yapısı hem % 150 hem de % 200 OL faktörleri için aynı şekilde elde edilir. Genel bir örnek olarak, ana CB yapısı %150 için elde edilecektir. Simülasyonlarda $J = 9$ ve $K = 6$ ile %150 OL faktörünü sağlayacak olan eşleştirme

Tablo 6.2 Farklı OL oranları için benzetim parametreleri

Parametreler	**Değerler**	
OL (λ)	150%	200%
CB Sembol Uzunluğu(M)	4	4
RE Sayısı (K) - UE Sayısı (J)	6 - 9	6 - 12
UE'nin Kull. RE Sayısı (d_j)	2	2
RE'yi Kull. UE Sayısı (d_R)	3	4
Yollanan Toplam Veri	1,056,000	1,056,000
Kanal Kodlama	LDPC / QC-LDPC	LDPC / QC-LDPC
Kodlama Oranı (R)	1/2 - 1/3	1/2 - 1/3

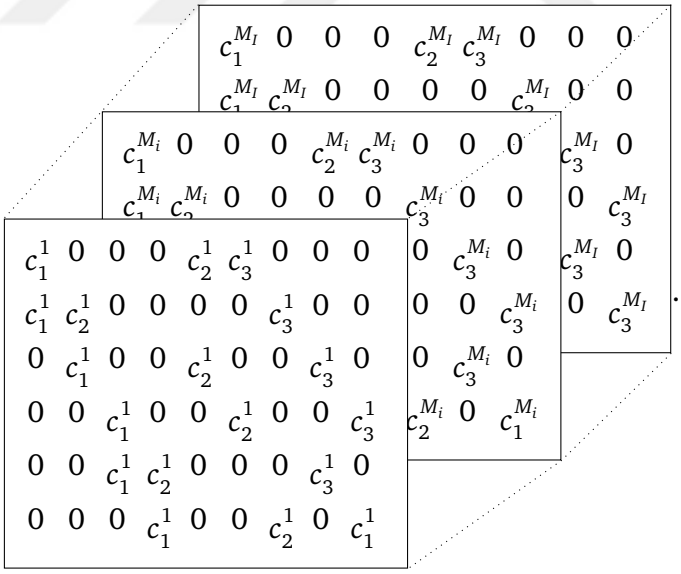
matrisi şu şekilde verilmiştir:

$$\mathbf{F}[K,J] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{6.10}$$

ve % 150 OL faktörü için üretici matrisi bu durumda,

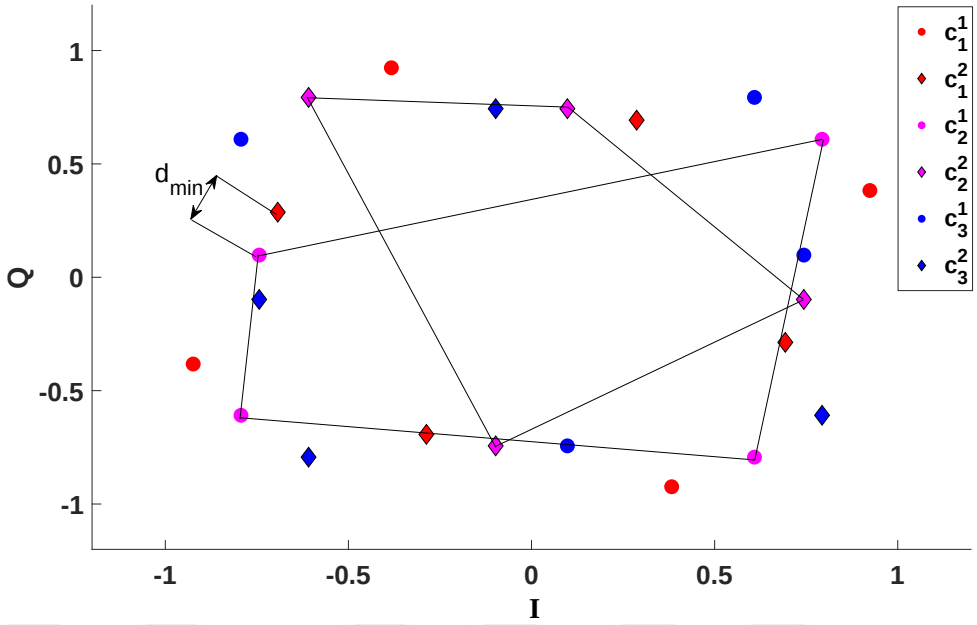
$$\mathbf{G}[K,J] = \begin{bmatrix} \mathbf{c_1} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{c_2} & \mathbf{c_3} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{c_1} & \mathbf{c_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{c_3} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{c_1} & 0 & 0 & \mathbf{c_2} & 0 & 0 & \mathbf{c_3} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{c_1} & 0 & 0 & \mathbf{c_2} & 0 & 0 & \mathbf{c_3} \\ 0 & 0 & \mathbf{c_1} & \mathbf{c_2} & 0 & 0 & 0 & \mathbf{c_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{c_1} & 0 & 0 & \mathbf{c_2} & 0 & \mathbf{c_3} \end{bmatrix}. \tag{6.11}$$

Jeneratör matrisinin her elemanı güncellenir, aynı zamanda $\mathbf{G}[K,J,M_I]^{IM}$ oluşturucu matrisi 3 boyutlu bir diziye dönüştürülür ve şu şekilde verilir:



(6.12)

Benzer şekilde, simülasyonlarda % 200 OL faktörü için haritalama ve üreteç matrisleri de üretilir. SCMA-IM için $d_R = 3$ durumunda, iki ayrı faz-genlik yerleşimi içeren ana CB Şekil 6.6'da gösterilmektedir. Bu ana CB, sırasıyla 1 ve 0,75 birim iki seviyeli genliğe ve $d_{min} = 0,1957$ 'a sahiptir. SCMA-IM'nin diğer ana CB'si aynı genlik seviyesine sahiptir ve $d_{min} = 0.1470$'dir. Ana CB, c_2^{IM} ile gösterilen üzerinde çizilen



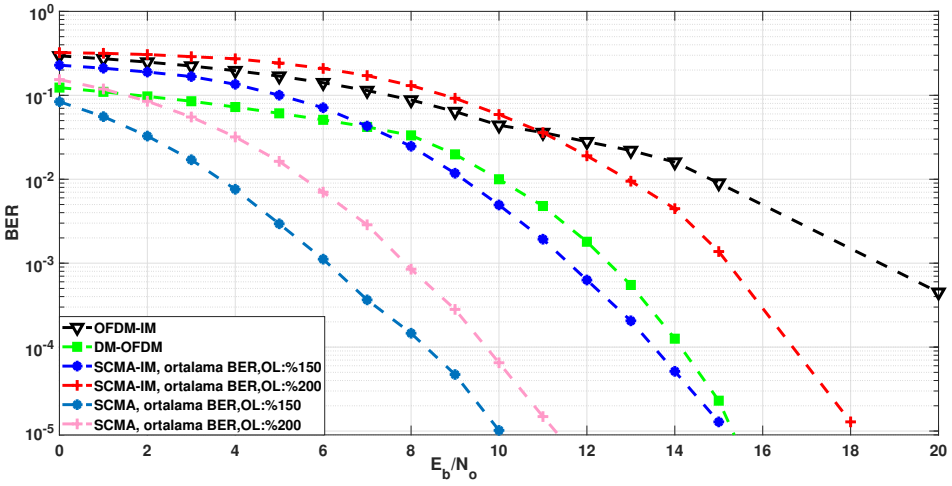
Şekil 6.6 $\lambda = \%150$ ve $d_R = 3$ için örnek CB_{ana}^{IM}. İndeksle ayrıştırılan çizgilerle birleştirilmiş c_1^1 ve c_1^2 örnek kod kitapları faz-genlik yerleşimi

farklı mesafe ve enerji çeşitliliğine sahip CB'lerle SCMA-IM için tasarlanmıştır. Farklı indislerin ana CB'leri $\mathbf{CB}_{ana}^{IM}[1,1,M_B] = \{c_1^1, c_2^1, c_3^1\}$ ve $\mathbf{CB}_{ana}^{IM}[1,2,M_B] = \{c_1^2, c_2^2, c_3^2\}$'dır. Ana CB'de kullanılan altı farklı CB'deki sembollere göre atanan CB ve CW'lerin örnek bir atama tablosu Tablo 6.3'te gösterilmektedir. Burada iki bit temel bant modülasyonu ve bir bitte indisler ile gönderilir.

Tablo 6.3 c_1^1 ve c_1^2 İçin Örnek Atama Tablosu

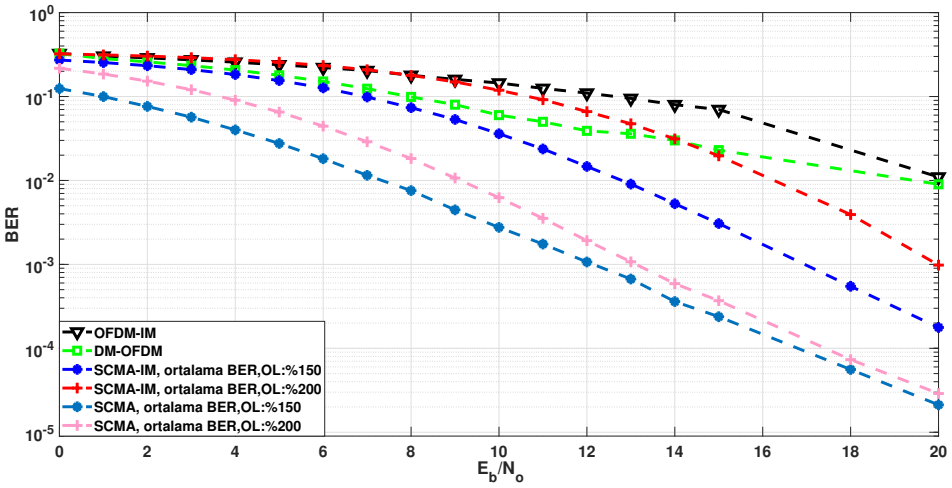
m_I	0	0	0	0	1	1	1	1
m_B	[00]	[01]	[10]	[11]	[00]	[01]	[10]	[11]
CB	c_1^1	c_1^1	c_1^1	c_1^1	c_1^2	c_1^2	c_1^2	c_1^2
CW	z_1^1	z_1^2	z_1^3	z_1^4	$z_1^{1,1}$	$z_1^{1,2}$	$z_1^{1,3}$	$z_1^{1,4}$

Yalnızca AWGN kanalı dikkate alınarak simülasyon sonuçları Şekil 6.7'de gösterilmektedir. DM-OFDM, OFDM-IM için BER ve Eb/No, iki farklı OL faktörünü içeren kullanılmış CB'lerin minimum öklid uzaklıkları için SCMA ve SCMA-IM'nin teorik sınırları gözlenmiştir. Simülasyon sonuçları UB'ler açısından SCMA-IM ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar kaynakça [8, p.57] içinde örnek 2 ile de karşılaştırılmıştır. Bu örnekte, temel bant modülasyonu hem DM-OFDM hem de OFDM-IM için 16-QAM'dir. Bir ton için ortalama veri hızı, DM-OFDM için $\log_2 16 + \log_2 2 = 5$ bit ve OFDM-IM için 4 bitten azdır. Önerilen faz-genlik yerleşimlerinde kullanılan d_{min} mesafesi DM-OFDM ve OFDM-IM için sırasıyla 0.8944



Şekil 6.7 AWGN altında BER performans karşılaştırması

ve 0.4339'dur. Karşılaştırılan yöntemler OMA olduğu için, kaynak sayısı kullanıcı sayısına eşittir. Bir ton için ortalama veri hızı sırasıyla SCMA-IM ve SCMA için, eğer OL değeri $\lambda = \%150$ ise $1.5(\log_2 4 + \log_2 2) = 4.5$ ve $1.5(\log_2 4) = 3$ bit, OL değeri $\lambda = \%200$ ise $2(\log_2 4 + \log_2 2) = 6$ ve $2(\log_2 4) = 4$ bittir. Her iki OL faktörü için kullanılan d_{min} uzunluğu, SCMA-IM'de 0.1957 ve 0.1470'tir.

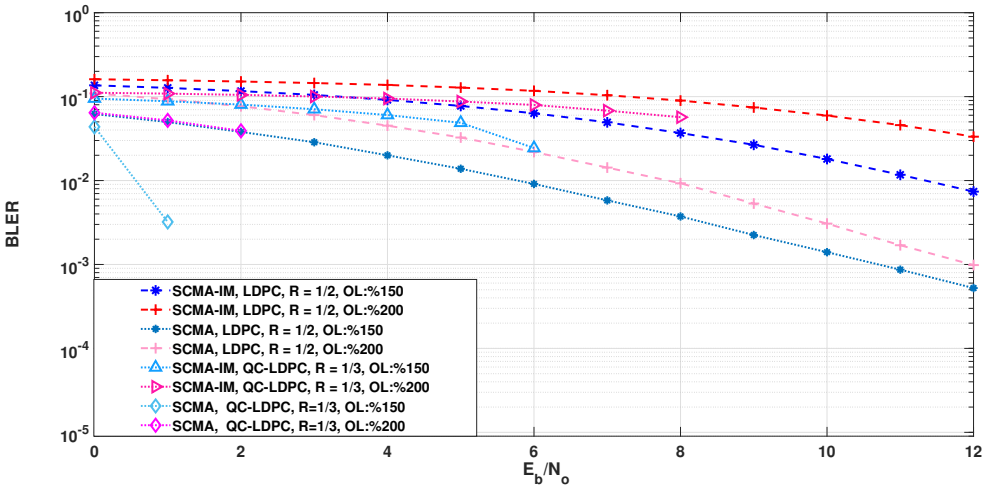


Şekil 6.8 Rayleigh sönümleyici kanal etkisi altında BER performans karşılaştırması

Burada d_{min} değeri arttıkça, performansın ve veri aktarım kapasitesinin daha da artması beklenir. Ancak, çok daha küçük d_{min} değerlerinde, önerilen SCMA-IM yöntemiyle çok daha yüksek sayıda veri biti gönderilebilmiştir. Önerilen yöntemin performansının daha iyi olduğu ve veri hızının diğer IM yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde yüksek olduğu açıktır. SCMA-IM veri taşıma kapasitesi açısından en iyisi olmasına rağmen, BER performansı açısından SCMA'dan daha iyi görünmemektedir.

SCMA ve SCMA-IM'nin adil bir karşılaştırması için M değeri, 4 yerine 8 olmalıdır. Bu durumda, SCMA, Tablo 6.1 ve Şekil 6.5'te görülebileceği gibi aynı miktarda veriyi taşıyabilmektedir. Bununla birlikte, benzer öklid uzaklığına sahip bir ana CB kullanılırsa, SCMA-IM'nin BER performansı daha iyi olacaktır. SCMA benzer bir bit hızıyla karşılaştırıldığında her CB'nin sekiz CW'si olmalıdır. Alıcıda daha fazla CW kodunun çözülmesi gerekir. Yine de, SCMA-IM'nin dört CW'nin kodunu çözmesi yeterlidir. CB'ler de iyi bir CW gruplamasıyla performans daha da artırılabilir.

Rayleigh sönümleme kanalı altında, altı farklı erişim şeması için simülasyon sonuçları Şekil 6.8'de gösterilmektedir. DM-OFDM, OFDM-IM, SCMA ve SCMA-IM performansları karşılaştırılır. Faz-genlik yerleşimindeki d_{min} değeri performansı etkilemektedir. CW'ler d_{min} arasındaki mesafe küçük olsa da, her CB için seçilen CW'ler arasındaki mesafe değişkendir ve bu da performansın artmasına neden olur. Diğer IM şemalarıyla karşılaştırıldığında, önerilen SCMA-IM yöntemi, Rayleigh sönümleme kanal etkisi altında $E_b/N_o = 20$dB için yaklaşık 10^{-2} daha düşük BER değerine sahiptir. SCMA ve SCMA-IM için aynı M değeri seçildiğinden, SCMA'nın BER performansı, Şekil 6.7'de görülebileceği gibi SCMA-IM'den daha iyidir. Aynı zamanda,% 200 OL faktörü durumunda, $d_{min} = 0.1470$, yani diğerlerinden daha az ve DM-OFDM'den % 20 daha fazla verim elde edildiği görülmektedir. Farklı CB yapıları ile performansı artırmak mümkündür.



Şekil 6.9 Rayleigh sönümleme kanal etkisi altında LDPC ve QC-LDPC ile ortalama BLER performans karşılaştırması

Ayrıca, SCMA ve SCMA-IM'deki hata düzeltme kodlarının farklı OL faktörleri ile etkisini ortaya çıkarmak için, LDPC kullanıldığında $R = 1/2$ ve QC-LDPC kullanıldığında $R = 1/3$ oranları ile kanal kodlaması yapılarak performans karşılaştırmaları Şekil 6.9'da verilmiştir. Kanal kodlama için LDPC kullanıldığında,

BLER performansı SCMA ve SCMA-IM için yaklaşık % 10 oranında iyileştiği görülmüştür. 5G ve ötesi için standartta olduğu gibi önerilen 1/3 oranı ile QC-LDPC kodladığımızda, üstün bir BLER performansı elde edilmiştir [70].

7
SONUÇ VE ÖNERİLER

Tezin amacı, MTC'ye yönelik olarak yeni nesil haberleşme tekniklerinin irdelenmesi, 5G ve ötesinde yapılan çalışmalar kapsamında uygun ve verimli bir çoklu erişim mimarisinin oluşturulmasıdır. 5G ve ötesinde yapılan çalışmalarda, isterler için farklı başlıklar altında çözüm üretilmeye çalışıldığı görülmüştür. Üç temel kullanım durumuna göre ihtiyaçlar gruplanmıştır. Bu gruplar; çok yüksek bant genişliği, çok sayıda ve asenkron haberleşme, son olarak da düşük bant genişliğiyle minimum gecikmeli kayıpsız haberleşme ihtiyaçları olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle çağımızdaki makinelerin artışı ve makine tipi haberleşme ihtiyaçları üzerine olan gereklilikler incelenmiştir. Bu çalışmalar sırasında mMTC için gereklilikler üzerine yoğunlaşılmıştır. mMTC için yapılan gelecek yıllardaki cihaz sayılarının milyar adetlerden trilyon adetlere çıkacağını gösteren çalışmalar mevcuttur. Bu nedenle, özellikle hücresel haberleşme için kullanıcı sayısı kısıtını azaltacak yöntemler araştırılmıştır.

Haberleşme ihtiyacının üstel artışına karşın, mevcut erişim tekniklerinin kabiliyetleri ve fiziksel kaynakların azlığı tüm ihtiyaçları karşılamaya yetmeyecektir. Bir kaynağı yalnız bir kullanıcıya tahsis ederek kullanan, TDMA, FDMA, CDMA ve OFDMA gibi OMA teknikleri ihtiyaçları karşılamayacaktır. Fiziksel kaynakların kısıtlı olması nedeniyle, kaynak sayısı kullanıcı sayısı artışına paralel artamamaktadır. Literatürde çözüm için önerilen çalışmalar incelenmiştir. Bir kaynağı birden fazla kullanıcıya tahsis edecek, aşırı yükleme kabiliyetine sahip teknikler öne çıkmaktadır. Kaynak azlığına rağmen, hem performansı hem de kullanıcı sayısını arttıracak teknikler gerekmektedir. Bu gereksinimler için, kaynakların aynı anda birden fazla kullanıcıya kullandıran yani aşırı yükleme kabiliyeti olan NOMA teknikleri önerilmiştir.

NOMA teknikleri güç, kod ya da hibrit çözümler olarak ayrılmaktadır. Kullanıcı sayısı ve performans bakımından umut vadeden öneriler mevcuttur. Güç bölgesi NOMA çözümlerinin, daha çok aşağı yönlü erişimlere uygun olduğu ve performans kısıtlarının bulunduğu görülmüştür. Kod bölgesi NOMA tekniklerinden de MUSA, SCMA ve RSMA incelenmiştir. MUSA ve RSMA tekniklerinde %100 dikgenlik

sağlanamadığı, kullanıcılara tahsis edilen kod kitaplarında çakışma olabileceği, literatürdeki çalışmalarda gösterilmiştir. Yüksek performans sağlamalarına rağmen hibrit NOMA çeşitlerinin, kompleks yapıları ve mevcut sistemlerle çalışmadaki zorlukları önemli dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

Tezde, mMTC için kod bölgesi NOMA tekniklerinden SCMA, incelemek ve gerçeklemek için seçilmiştir. SCMA'nın seçilmesindeki temel motivasyon, literatürde gösterilen yüksek performansı, %100 dikgenliği ve OL kabiliyetidir. SCMA tekniği, zaman slotu, frekans veya uzaysal fiziksel kaynaklar gibi, faz-genlik yerleşimini de bir kaynak olarak kullanabilmektedir. SCMA tekniğinin mevcut sistemler ile çalışabilir ve OFDMA sistemler üzerine uygulanabilir olduğu hem literatürdeki çalışmalarda hem de bu tez çalışmasında yapılan benzetimlerde gösterilmiştir. SCMA kodlayıcı da temel olarak, CDMA ve LDS'deki QAM ile yayma işlemini birleştirmiştir. Kullanıcıya, birden fazla kaynağı aynı anda kullanma kabiliyeti sağlanmaktadır. Bir kullanıcı/ekipman/makine için hangi kaynakları kullanacağı, bu kaynakları kullanırken hangi sembolleri göndereceği haritalama matrisi ve kod kitapları ile tarif edilmiştir. Kod kitaplarının tasarımı, OL sınırları ve alıcı yapıları detaylı şekilde çalışmada gösterilmiştir.

Tezde, SCMA tekniğinin alıcı ve verici yapıları (kodlayıcı ve kod çözücü olarak da bahsedilmektedir) incelenip gerçeklenmiştir. Matematiksel olarak SCMA kodlayıcısı türetilmiştir. Gerçeklemeler için özellikle mevcut literatürde önerilen kod kitapları kullanılırken, daha sonra tez çalışmasında tasarlanan kod kitapları kullanılmıştır. Kod kitapları ile performansın nasıl etkilendiği, hata tabanına girebildiği durumlar, yıldız ve dikdörtgensel faz-genlik yerleşimlerinden nasıl kod kitapları üretilebildiği gösterilmiştir. Kod kitabı üretim yöntemleri, OL sınırları, dikkat edilmesi gereken durumlar benzetimlerle de gösterilmiştir. Benzetimlerde, AWGN gürültüsü, Rayleigh sönümleme kanalı ve LDPC kanal kodlamasının etkileri incelenmiştir. Benzetimlerde bu etkiler yanında, farklı OL değerlerine göre de kod kitapları ve performanslar kıyaslanmıştır. Özellikle kod kitabı tasarımında öklid uzaklıkların yanında, enerji çeşitliliğinin de ne kadar önemli olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda, kullanıcıya özel performans elde edilebilecek şekilde kod kitaplarının kullanılabileceği gösterilmiştir.

SCMA çalışmaları sonrası indis modülasyonu incelenmiş ve bu iki tekniğin de avantajlarından faydalanılan, özgün bir erişim tekniği önerilmiştir. Önerilen yeni yönteme SCMA-IM ismi verilmiştir. Ortaya çıkan erişim tekniği, hem kodlayıcı hem de kod çözücü aşamalarında esneklikler, basitleştirmeler ve performans artışları getirmektedir. SCMA için indislerle de veri aktarımı yapılması sağlanarak, bu sayede bit gönderme kabiliyeti artmaktadır. İndeks modülasyonları için de alıcıyı basitleştirmekte, OL yeteneği sağlamakta ve indislerle ana kod kitaplarını adresleyerek aynı anda çok daha fazla bit yollanması sağlamaktadır. SCMA-IM yöntemi

matematiksel olarak türetilmiş, alıcı verici yapıları oluşturulmuş, sınır değerleri ve performansı incelenmiştir. Yapılan performans incelemelerinde SCMA yanında OFDM-IM ve DF-OFDM yöntemleri ile farklı OL değerleri ile karşılaştırmalar ve benzetimler yapılmıştır. Kanal kodlama olarak, LDPC yanında, 5G için standart olarak önerilen QC-LDPC kullanılarak kanal kodlamaları yapılmıştır. Bu yöntem ile elde edilen performans artışları detayları ile gösterilmiştir.

KAYNAKÇA

[1] M. R. Palattella, M. Dohler, A. Grieco, G. Rizzo, J. Torsner, T. Engel, L. Ladid, "Internet of things in the 5g era: Enablers, architecture, and business models," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 510–527, 2016. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2525418.

[2] H. Shariatmadari, R. Ratasuk, S. Iraji, A. Laya, T. Taleb, R. Jäntti, A. Ghosh, "Machine-type communications: Current status and future perspectives toward 5g systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 10–17, 2015. DOI: 10.1109/MCOM.2015.7263367.

[3] A. Kunz, A. Prasad, K. Samdanis, S. Husain, J. Song, "Enhanced 3gpp system for machine type communications and internet of things," in *2015 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 2015, pp. 48–53. DOI: 10.1109/CSCN.2015.7390419.

[4] M. Hasan, E. Hossain, D. Niyato, "Random access for machine-to-machine communication in lte-advanced networks: Issues and approaches," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 6, pp. 86–93, 2013. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6525600.

[5] Y. Cai, Z. Qin, F. Cui, G. Y. Li, J. A. McCann, "Modulation and multiple access for 5g networks," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 629–646, 2018. DOI: 10.1109/COMST.2017.2766698.

[6] Y. Wang, B. Ren, S. Sun, S. Kang, X. Yue, "Analysis of non-orthogonal multiple access for 5g," *China Communications*, vol. 13, no. Supplement2, pp. 52–66, 2016. DOI: 10.1109/CC.2016.7833460.

[7] E. Başar, Ü. Aygölü, E. Panayırcı, H. V. Poor, "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 22, pp. 5536–5549, 2013. DOI: 10.1109/TSP.2013.2279771.

[8] T. Mao, Z. Wang, Q. Wang, S. Chen, L. Hanzo, "Dual-mode index modulation aided ofdm," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 50–60, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2601648.

[9] Xiaoxiang Yang, Zhaoyang Zhang, Panyu Fu, Jing Zhang, "Spectrum-efficient index modulation with improved constellation mapping," in *2015 International Workshop on High Mobility Wireless Communications (HMWC)*, 2015, pp. 91–95. DOI: 10.1109/HMWC.2015.7354342.

[10] X. Zhang, H. Bie, Q. Ye, C. Lei, X. Tang, "Dual-mode index modulation aided ofdm with constellation power allocation and low-complexity detector design," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23 871–23 880, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2756679.

[11] M. Wen, Q. Li, E. Basar, W. Zhang, "Generalized multiple-mode ofdm with index modulation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 10, pp. 6531–6543, 2018. DOI: 10.1109/TWC.2018.2860954.

[12] H. Nikopour, M. Baligh, *System and method for sparse code multiple access*, U.S. Patent Application 2014/0140360, May 22, 2014.

[13] M. Vameghestahbanati, I. D. Marsland, R. H. Gohary, H. Yanikomeroglu, "Multidimensional constellations for uplink scma systems—a comparative study," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2169–2194, 2019. DOI: 10.1109/COMST.2019.2910569.

[14] M. Alam, Q. Zhang, "Designing optimum mother constellation and codebooks for scma," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2017.7996539.

[15] Z. Mheich, L. Wen, P. Xiao, A. Maaref, "Design of scma codebooks based on golden angle modulation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 1501–1509, 2019. DOI: 10.1109/TVT.2018.2886953.

[16] Y. Chen, A. Bayesteh, Y. Wu, S. Han, M. Taherzadeh, D. Chen, J. Ma, "Scma: A promising non-orthogonal multiple access technology for 5g networks," in *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/VTCFall.2016.7881213.

[17] L. Yu, P. Fan, D. Cai, Z. Ma, "Design and analysis of scma codebook based on star-qam signaling constellations," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 10 543–10 553, 2018. DOI: 10.1109/TVT.2018.2865920.

[18] C. Yan, G. Kang, N. Zhang, "A dimension distance-based scma codebook design," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5471–5479, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2685618.

[19] M. P. C. Fossorier, "Quasicyclic low-density parity-check codes from circulant permutation matrices," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 8, pp. 1788–1793, 2004. DOI: 10.1109/TIT.2004.831841.

[20] Zongwang Li, Lei Chen, Lingqi Zeng, S. Lin, W. H. Fong, "Efficient encoding of quasi-cyclic low-density parity-check codes," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 54, no. 1, pp. 71–81, 2006. DOI: 10.1109/TCOMM.2005.861667.

[21] Y. Hao, K. Xiao, Z. Chen, B. Xia, "Density evolution analysis of ldpc-coded scma systems," in *2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/WCSP.2017.8171149.

[22] C. Häger, H. D. Pfister, A. G. Amat, F. Brännström, "Density evolution and error floor analysis for staircase and braided codes," in *2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2016, pp. 1–3.

[23] K. Lai, L. Wen, J. Lei, G. Chen, P. Xiao, A. Maaref, "Codeword position index based sparse code multiple access system," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 737–740, 2019. DOI: 10.1109/LWC.2018.2890031.

[24] S. Althunibat, R. Mesleh, T. F. Rahman, "A novel uplink multiple access technique based on index-modulation concept," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 7, pp. 4848–4855, 2019. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2909211.

[25] K. Lai, J. Lei, L. Wen, G. Chen, P. Xiao, A. Maaref, *Hybrid codeword position index modulation for sparse code multiple access system*, 2019. arXiv: 1812.10316 [eess.SP].

[26] Y. Lai, Y. Ciou, J. Wu, "Index modulation multiple access," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PIMRC.2018.8580958.

[27] M. Taherzadeh, H. Nikopour, A. Bayesteh, H. Baligh, "Scma codebook design," in *2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall)*, 2014, pp. 1–5. DOI: 10.1109/VTCFall.2014.6966170.

[28] A. Bayesteh, H. Nikopour, M. Taherzadeh, H. Baligh, J. Ma, "Low complexity techniques for scma detection," in *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7414184.

[29] Y. Zhou, Q. Yu, W. Meng, C. Li, "Scma codebook design based on constellation rotation," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2017.7996395.

[30] "Imt vision–framework and overall objectives of the future development of imt for 2020 and beyond," in ITU-R, 2015.

[31] N. WAVE. "Towards future societies in the 2020s." (2015), [Online]. Available: http://kani.or.kr/5g/whitepaper/2015%205G_Forum_White_Paper_Service.pdf (visited on 2017).

[32] "Study on scenarios and requirements for next generation access technologies;(release 14)," in Valbonne: 3GPP 3. T. 3. V14.3.0, 2017.

[33] S. K. Routray, K. P. Sharmila, "4.5g: A milestone along the road to 5g," in *2016 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)*, 2016, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICICES.2016.7518869.

[34] L. Liu, H. Ding, Q. Liu, W. Zhang, Z. Liu, "Design of ds/fh hybrid spread spectrum system based on fpga," in *Advances in Swarm Intelligence*, Y. Tan, Y. Shi, L. Li, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 573–580, ISBN: 978-3-319-41009-8.

[35] A. Bayesteh, H. Nikopour, M. Taherzadeh, H. Baligh, J. Ma, "Low complexity techniques for SCMA detection," in *2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Dec. 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2015.7414184.

[36] H. Nikopour, H. Baligh, "Sparse code multiple access," in *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2013, pp. 332–336. DOI: 10.1109/PIMRC.2013.6666156.

[37] Y. Zhou, Q. Yu, W. Meng, C. Li, "SCMA codebook design based on constellation rotation," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICC.2017.7996395.

[38] K. Xiao, B. Xiao, S. Zhang, Z. Chen, B. Xia, "Simplified multiuser detection for SCMA with sum-product algorithm," in *2015 International Conference on Wireless Communications Signal Processing (WCSP)*, Oct. 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/WCSP.2015.7341328.

[39] 3GPP R1-164688, *Resource Spread Spectrum Access*. Qualcomm, 2016.

[40] 3GPP R1-163510, *Candidate NR Multiple Access Schemes*. Qualcomm, 2016.

[41] 3GPP R1-164689 Çin, *RSMA and SCMA Comparison*. Qualcomm, 2016.

[42] Y. Tao, L. Liu, S. Liu, Z. Zhang, "A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5g," *China Communications*, vol. 12, no. 10, pp. 1–15, 2015. DOI: 10.1109/CC.2015.7315054.

[43] B. Wang, K. Wang, Z. Lu, T. Xie, J. Quan, "Comparison study of non-orthogonal multiple access schemes for 5g," in *2015 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/BMSB.2015.7177186.

[44] J. G. Proakis, M. Salehi, *Digital Communications, 5th ed.* 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2007.

[45] R. Hoshyar, F. P. Wathan, R. Tafazolli, "Novel low-density signature for synchronous cdma systems over awgn channel," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 4, pp. 1616–1626, 2008. DOI: 10.1109/TSP.2007.909320.

[46] Altera. "SCMA." (2016), [Online]. Available: http://www.innovateasia.com/5g/images/pdf/InnovateAsia%20-%201st%205G%20Algorithm%20Competition%20-%20SCMA.pdf (visited on 2017).

[47] L. Yu, P. Fan, X. Lei, P. T. Mathiopoulos, "Ber analysis of scma systems with codebooks based on star-qam signaling constellations," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 9, pp. 1925–1928, 2017. DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2704090.

[48] L. Yu, X. Lei, P. Fan, D. Chen, "An optimized design of scma codebook based on star-qam signaling constellations," in *2015 International Conference on Wireless Communications Signal Processing (WCSP)*, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/WCSP.2015.7341311.

[49] L. Yu, P. Fan, X. Lei, P. T. Mathiopoulos, "Ber analysis of scma systems with codebooks based on star-qam signaling constellations," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 9, pp. 1925–1928, 2017. DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2704090.

[50] C. Yan, G. Kang, N. Zhang, "A dimension distance-based scma codebook design," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5471–5479, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2685618.

[51] D. Zhai, "Adaptive codebook design and assignment for energy saving in scma networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23 550–23 562, 2017. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2764120.

[52] B. J. Frey, F. R. Kschischang, H.-A. Loeliger, N. Wiberg, "Factor graphs and algorithms," Citeseer.

[53] S. H. Choi, C. I. Oh, D. G. Oh, D. I. Chang, "The mapping and demmaping algorithms for high order modulation of dvb-s2 systems," in *2006 Asia-Pacific Conference on Communications*, 2006, pp. 1–5. DOI: 10.1109/APCC.2006.255815.

[54] G. D. Forney, "Multidimensional constellations. ii. voronoi constellations," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 7, no. 6, pp. 941–958, 1989. DOI: 10.1109/49.29616.

[55] D. Agrawal, Q. Zeng, "Introduction to wireless and mobile systems," Jan. 2002.

[56] M. Bayati, A. Montanari, "The dynamics of message passing on dense graphs, with applications to compressed sensing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 57, no. 2, pp. 764–785, 2011. DOI: 10.1109/TIT.2010.2094817.

[57] S. Rangan, P. Schniter, A. K. Fletcher, "Vector approximate message passing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 65, no. 10, pp. 6664–6684, 2019. DOI: 10.1109/TIT.2019.2916359.

[58] S. Rangan, P. Schniter, A. Fletcher, "On the convergence of approximate message passing with arbitrary matrices," in *2014 IEEE International Symposium on Information Theory*, 2014, pp. 236–240. DOI: 10.1109/ISIT.2014.6874830.

[59] J. Vila, P. Schniter, S. Rangan, F. Krzakala, L. Zdeborová, "Adaptive damping and mean removal for the generalized approximate message passing algorithm," in *2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2015, pp. 2021–2025. DOI: 10.1109/ICASSP.2015.7178325.

[60] Z. Bu, J. M. Klusowski, C. Rush, W. J. Su, "Algorithmic analysis and statistical estimation of slope via approximate message passing," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 67, no. 1, pp. 506–537, 2021. DOI: 10.1109/TIT.2020.3025272.

[61] X. Meng, Y. Wu, Y. Chen, M. Cheng, "Low complexity receiver for uplink scma system via expectation propagation," in *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/WCNC.2017.7925590.

[62] L. Yang, Y. Liu, Y. Siu, "Low complexity message passing algorithm for scma system," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 2466–2469, 2016. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2609382.

[63] P. Gao, Y. Du, B. Dong, W. Zhu, Z. Chen, X. Wang, "Low-complexity cs-aided mpa detector for scma systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 784–787, 2018. DOI: 10.1109/LCOMM.2017.2779859.

[64] J. Dai, K. Niu, C. Dong, J. Lin, "Improved message passing algorithms for sparse code multiple access," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 9986–9999, 2017. DOI: 10.1109/TVT.2017.2741525.

[65] X. Meng, Y. Wu, Y. Chen, M. Cheng, "Low complexity receiver for uplink scma system via expectation propagation," in *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2017, pp. 1–5. DOI: 10.1109/WCNC.2017.7925590.

[66] S. H. Choi, C. I. Oh, D. G. Oh, D. I. Chang, "The mapping and demmaping algorithms for high order modulation of dvb-s2 systems," in *2006 Asia-Pacific Conference on Communications*, 2006, pp. 1–5. DOI: 10.1109/APCC.2006.255815.

[67] D. Cai, P. Fan, P. T. Mathiopoulos, “A tight lower bound for the symbol error performance of the uplink sparse code multiple access,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 190–193, 2017. DOI: 10.1109/LWC.2017.2653781.

[68] V. P. Klimentyev, A. B. Sergienko, “Error probability bounds for scma signals,” in *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2017, pp. 164–168. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910519.

[69] J. Bao, Z. Ma, G. K. Karagiannidis, M. Xiao, Z. Zhu, “Joint multiuser detection of multidimensional constellations over fading channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 1, pp. 161–172, 2017. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2622706.

[70] “Nr; multiplexing and channel coding,”3rd gener-ation partnership project; technical specification group radio accessnetwork,” in 3GPP TS 38.212, 2019.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. F. Tekçe, U. E. Ayten and L. Durak-Ata, "SCMA System Design With Index Modulation via Codebook Assignment," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 70, no. 2, pp. 1699-1708, Feb. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3055849.

Konferans Bildirisi

1. F. Tekçe, E. Çatak, U. E. Ayten and L. Durak-Ata, "The effect of codebook design on the BER performance of MTC systems employing SCMA," 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Izmir, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU.2018.8404779.