



**4G (LTE) HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL
MODELLENMESİNİN MATLAB SİMÜLASYONU VE PERFORMANS
ANALİZLERİ**

Ahmet őrak YILDIZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

şUBAT 2015

AHMET ŞAFKAT YILDIZ tarafından hazırlanan “4G (LTE) HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİNİN MATLAB SİMÜLASYONU VE PERFORMANS ANALİZLERİ ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Nursel AKÇAM

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA

Gazi Üniversitesi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Hasan Şakir BİLGE

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/02/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Şafak YILDIZ

27/02/2015

4G (LTE) HABERLEŞME SİSTEMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİNİN MATLAB SİMÜLASYONU VE PERFORMANS ANALİZLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ahmet Şafak YILDIZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2015

ÖZET

Bu tez çalışmasının amacı, Uzun Vadeli Evrim (LTE-Long Term Evolution) radyo erişim teknolojisi ve özellikle onun fiziksel katmanını (PHY-Physical Layer). PHY'nin ana bölümlerini meydana getiren Dikey Frekans Bölmeli Çoklu Erişimin (OFDMA-Orthogonal Division Multiple Access), modülasyonun, turbo kodlamanın ve bağlantı adaptasyonunun gözden geçirilmesi, LTE standardına ait PHY modelinin tam olarak kavranmasına yardımcı olur. PHY'na daha yüksek tabakalardan aşağı iletilen veri bitleri üzerinde gerçekleştirilen tüm işlemler fiziksel katman modellemesini en güzel şekilde tanımlar. Çalışmada LTE PHY radyo ara yüzü tasarımlarındaki teknoloji seçeneklerinin anlaşılması ve karar verilmesi tartışılarak, çeşitli taşıma kanallarının fiziksel kanallara eşlenmesi, kanalların her birinin üzerindeki sinyal işleme ve verilerin yayın için antene en yüksek seviyede taşınması incelenmiştir. Ayrıca PHY veri iletişimi ve LTE standartlarının iletim protokolleri ile ilgili ana ayrıntılar açıklanmaktadır. Uplink (mobil cihazdan baz istasyonuna) ve downlink (baz istasyonundan mobile cihaza) için veri iletişim protokolleri LTE standartları tarafından belirlenir. Frekans Bölmeli Çiftleme (FDD-Frequency Division Dupleks), Zaman Bölmeli Çiftleme (TDD-Time Division Dupleks), çiftleme metodolojileri, esnek bant genişliği tahsisi, zaman çerçeveleme ve LTE standardının zaman-frekans kaynak gösterimini içeren frekans bantları gözden geçirilmiş, çoklu taşıyıcı iletim şemalarını, tek anten protokollerini, adaptif modülasyonu, kodlama şemalarını ve kanal bağımlı bağlantı uyarlamalarını içeren downlink ve uplink işleme yığınları detaylı olarak ele alınmıştır. Her bir durum için iletişim yığınlarının farklı katmanlarını birleştiren çeşitli kanallara ve uplink/downlink fiziksel kanallarının her birine uygulanan PHY'da mevcut sinyal işleme faaliyetlerine ilişkin detaylı tanımlar sunulmuştur. Bu detaylı bilgiler downlink PHY işleminin MATLAB programında modellenmesine yardım edip, daha sonra Dikey Frekans Bölmeli Çoklama (OFDM-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) teknolojisinin temeli, OFDM çerçeve yapısı ve LTE standardı uygulaması detaylı olarak tartışılmıştır. MATLAB fonksiyonları, çeşitli modülasyon şemalarının etkilerini, Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültülü (AWGN-Additive White Gaussian Noise) kanal modeli ile birlikte Bit Hata Oranı (BER-Bit Error Rate) performansındaki farklı kanal kodlama oranlarını simüle etmek için kullanılmıştır. Daha sonra, açıklanan teknoloji esas alınarak tasarımı yapılan LTE PHY bileşenlerini yinelemeli ve aşamalı olarak oluşturan MATLAB modelleri meydana getirilip, BER performans grafiklerinin sonuçları analiz edilmiştir.

Bilim Kodu : 905.1.053

Anahtar Kelimeler : LTE, 4G, MIMO, OFDM, SC-FDM, Modülasyon, Turbo kodlama

Sayfa Adedi : 89

Danışman : Doç. Dr. Nursel AKÇAM

PERFORMANCE ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODEL WITH MATLAB
SIMULATION OF 4G (LTE) COMMUNICATION SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Ahmet Şafak YILDIZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2015

ABSTRACT

The main discussion of this subject is the Long Term Evolution (LTE) radio access technology and especially its Physical Layer (PHY). The PHY model of LTE can be best understood by studying PHY's most useful four sections, which are Orthogonal Division Multiple Access (OFDMA), modulation, Turbo coding and link adaptation. Reviewing OFDMA, modulation, Turbo coding and link adaptation, that are main leading parts of PHY, helps the PHY of LTE to be fully realized. The whole process performed on data bits that are transferred down from the higher layers to the PHY best defines physical layer model. How to realize and decide the technology choices with in designing LTE PHY radio interface are the main topics to be discussed in this thesis. Mapping various transport channels to physical channels, signal processing on each of these channels and the ultimate data transport to the antenna for transmission is examined. Protocols of data communications needed for the uplink (mobile to base station) and downlink (base station to mobile) communications are defined by LTE standards. Some main details for PHY data communication and the transmission protocols of the LTE standards are to be studied. Frequency bands containing Frequency Division Duplex (FDD), Time Division Duplex (TDD), duplex methodologies, flexible bandwidth allocation, time framing, and the time-frequency resource representation of the LTE standard are summarized at the beginning. Mult-carrier transmission schemes, single-antenna protocols, adaptive modulation, and coding schemes and channel-dependent link adaptations is examined in detail with in processing stacks of downlink and uplink. For every situation, a complete description is given to the various channels joining different layers of the communication stacks and signal processing in the PHY used in each of the downlink and uplink physical channels. This detailed information helps the downlink PHY processing to be modelled in the programs of MATLAB. After that the fundamental of the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) technology, OFDM frame structure and application in the LTE standard are discussed in detail. The MATLAB function is applied to be able to simulate the effects of different modulation schemes and different coding rates on the Bit Error Rate (BER) performance with an Additive White Gaussian Noise (AWGN) channel model. At the end models in MATLAB that iteratively and progressively forming the components of the LTE PHY designed due to these techniques are composed and graphics of the BER performance are cleared up.

Science Code : 905.1.053

Key Words : LTE, 4G, MIMO, OFDM, SC-FDM, Modulation, Turbo coding

Page Number : 89

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Nursel AKÇAM

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Nursel AKÇAM'a, desteği, yardımı ve motivasyonu için arkadaşım Elektronik ve Haberleşme Mühendisi Fatih GENÇ'e, yardımı ve fedakârlığı için ağabeyim Dnz. Yb. Mevlüt YILDIZ'a, beni bugünlerime getiren ve yaşamı boyunca bana destek olan babam merhum Abdi YILDIZ ile annem Emine YILDIZ'a, eşim Bengü YILDIZ'a, oğlum Doğanay YILDIZ'a, ailem ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. UZUN VADELİ EVRİM (LTE-LONG TERM EVOLUTION).....	5
2.1. Kablosuz Standartlar.....	5
2.2. Tarihsel Veri Hızları Profili.....	8
2.3. Gelişmiş IMT Gereksinimleri.....	9
2.4. 3GPP ve LTE Standardizasyonu.....	9
2.5. LTE Gereksinimleri.....	10
2.6. Teorik Stratejiler.....	12
2.7. LTE Etkinleştirme Teknolojileri.....	14
2.7.1. OFDM.....	14
2.7.2. SC-FDM.....	15
2.7.3. MIMO.....	15
2.7.4. Turbo kanal kodlama.....	16
2.7.5. Bağlantı adaptasyonu.....	16
2.8. LTE Fiziksel Katmanı Modellemesi.....	16
2.9. LTE (Release 8 ve 9).....	18

	Sayfa
2.10. Gelişmiş (Advanced) LTE (Release 10).....	18
3. LTE FİZİKSEL KATMANI.....	19
3.1. Hava Arayüzü.....	19
3.2. Frekans Bandı.....	19
3.3. Tek Nokta (Unicast) ve Çok Nokta (Multicast) Yayın Hizmetleri.....	22
3.4. Bant Genişliği Tahsisi.....	22
3.5. Zaman Çerçevelemesi.....	23
3.6. Zaman-Frekans Gösterimi.....	24
3.7. OFDM Çoklu Taşıyıcılı İletimi.....	27
3.7.1. Döngüsel önek.....	31
3.7.2. Alt taşıyıcıların üretimi ve alt taşıyıcı aralığı.....	34
3.7.3. Kaynak blok ve frekans alanı planlama.....	35
3.7.4. Tipik alıcı işlemleri.....	38
3.7.5. OFDM kullanımının avantajları.....	39
3.7.6. OFDM kullanımının dezavantajları.....	39
3.8. OFDMA Teknolojisi.....	40
3.9. Tek-Taşıyıcı Frekans Bölmeli Çoğullama (SC-FDM).....	42
3.10. Modülasyon ve Kodlama.....	45
3.10.1. Modülasyon.....	45
3.10.2. Turbo kodlama.....	47
3.11. LTE’de Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) Yapısı.....	54
3.12. Fiziksel Kanallar.....	57
3.12.1. Downlink fiziksel kanalı.....	58
3.12.2. Downlink kanalının işlevleri.....	60

	Sayfa
3.12.3. Uplink fiziksel kanalı.....	63
3.12.4. Uplink kanalının işlevleri.....	64
3.13. Fiziksel Sinyaller.....	65
3.13.1. Referans sinyalleri.....	65
3.13.2. Eşzamanlama sinyali.....	68
3.14. Downlink Çerçeve Yapıları.....	69
3.15. Uplink Çerçeve Yapıları.....	70
4. LTE FİZİKSEL KATMANIN MODELLENMESİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ.....	71
4.1. Modülasyon (Kipleme) ve Kodlama.....	71
4.2. LTE Sistemlerinde Kipleme Yapıları.....	71
4.3. Bit-Seviye Karıştırması (Bit-Level Scrambling).....	73
4.4. Kanal Kodlama.....	74
4.5. Erken-Geç Mekanizması (Early-Late Mechanism).....	75
4.6. Oran Eşleme (Rate Matching).....	76
4.7. SISO Durumu.....	80
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Geçtiğimiz yirmi yılda uygulamaya geçen çeşitli kablosuz standartlar tepe veri hızları.....	8
Çizelge 3.1. E-UTRA için tanımlanan eşli frekans bantları.....	21
Çizelge 3.2. E-UTRA için tanımlanmış çiftlenmemiş frekans bantları.....	21
Çizelge 3.3. LTE için belirtilen kanal bant genişlikleri.....	23
Çizelge 3.4. Normal ve genişletilmiş döngüsel önek özellikleri.....	33
Çizelge 3.5. Bant genişliklerine karşılık kaynak bloğu sayısı.....	36
Çizelge 3.6. Döngüsel önek uzunlukları.....	37
Çizelge 3.7. Her LTE bant genişliği için kaynak blokları, FFT ve döngüsel önek boyutları.....	38
Çizelge 3.8. Yeni nesil haberleşme sistemlerinde OFDMA.....	42
Çizelge 3.9. LTE aşağı link CQI tablosu.....	46
Çizelge 3.10. LTE downlink fiziksel kanalları.....	59
Çizelge 3.11. LTE DCI biçimleri ve bunların kullanım durumları.....	61
Çizelge 3.12. DCI formatı 1'in içeriği.....	62
Çizelge 3.13. LTE uplink fiziksel kanalları.....	63

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kablosuz standartların son yirmi yıl içindeki evrimi.....	5
Şekil 2.2. LTE ve diğer teknolojiler için gecikme değerlerinin kıyaslanması.....	11
Şekil 2.3. LTE ve HSPA teknolojilerinin veri hızlarının 5 Mhz için kıyaslaması.....	12
Şekil 2.4. LTE'nin fiziksel katman özellikleri.....	17
Şekil 3.1. Kanal bant genişliği ve kaynak blok sayısı arasında ilişkisi.....	23
Şekil 3.2. LTE zaman bölge alanı yapısı.....	24
Şekil 3.3. Kaynak öge, blok ve ızgara.....	25
Şekil 3.4. Uplink iletim hattı frekansının kaynak blokları ve DC bileşenleri.....	26
Şekil 3.5. Downlink iletim hattı frekansının kaynak blokları ve DC bileşenleri.....	26
Şekil 3.6. FDM ile OFDM'nin karşılaştırılması.....	28
Şekil 3.7. OFDM sistemine ait blok diyagram.....	28
Şekil 3.8. Semboller arası etkileşim ve döngüsel öneki kullanımı (a) Döngüsel önekinin kullanılmadığı (b) Kullanıldığı durumlar.....	32
Şekil 3.9. Döngüsel öneki.....	32
Şekil 3.10. (a) OFDM alt kanalının spektrumu, (b) OFDM sinyalinin spektrumu, (c) Alt taşıyıcılı bir OFDM işaret spektrumu.....	34
Şekil 3.11. OFDM sinyali.....	35
Şekil 3.12. Zaman-frekans düzleminde OFDM sembollerinin yerleşimi.....	36
Şekil 3.13. OFDMA'da alt kanal oluşturma.....	40
Şekil 3.14. OFDM frekans spektrumu.....	41
Şekil 3.15 OFDM ve OFDMA'nın zaman-frekans eksenini gösterimi.....	41
Şekil 3.16. FDMA yapısı.....	43
Şekil 3.17. SC-FDMA çerçevesi.....	44
Şekil 3.18. OFDMA ile SC-FDMA'nın karşılaştırılması.....	44

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. Turbo kodlayıcının blok diyagramı.....	47
Şekil 3.20. RSCC kodlayıcı.....	48
Şekil 3.21. Turbo kod için özyinelemeli kod çözme.....	49
Şekil 3.22. BCJR algoritması için kafes.....	50
Şekil 3.23. Çoklu anten olasılıkları.....	55
Şekil 3.24. SU-MIMO ve MU-MIMO yapısı.....	56
Şekil 3.25. MIMO çalışma yapısı.....	57
Şekil 3.26. LTE radyo erişim şebekesindeki katman mimarisi.....	57
Şekil 3.27. LTE downlink mantıksal, nakil ve fiziksel kanal eşleşmesi.....	59
Şekil 3.28. LTE uplink mantık, nakil ve fiziksel kanal eşleşmesi.....	64
Şekil 3.29. Downlink FDD alt çerçeve yapısı.....	69
Şekil 3.30. Uplink çerçeve yapısı.....	70
Şekil 4.1. LTE standardında kullanılan kipleme yöntemlerinin teorik ve simülasyon BER eğrileri.....	72
Şekil 4.2. Kipleme yöntemlerinde karıştırma grafiği.....	74
Şekil 4.3. Aynı kod oranındaki Konvolüsyon kodlamada kullanılan Soft Decision Viterbi algoritması ile Turbo kodlamanın karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.4. CRC-tabanlı Early Termination olmayan ve Turbo kodlu olan durumlarda BER sonuçlarının karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.5. Turbo kodlama ile oran eşleme kullanarak yapılmış olan BER performans grafiği.....	77
Şekil 4.6. Nakil-kanal işleme yapısı.....	78
Şekil 4.7. 6 yinelemeli, QPSK modülasyonu ile 1/2 oranlı DLSCH'nin BER performansı.....	79
Şekil 4.8. Her bir SNR değerinde 8 yineleme, 16-QAM kipleme, 1/3 oranında Turbo kodlama altında BER grafiği.....	80

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

dB	Desibel
Gbps	Gigabits per second
Mbps	Megabits per second
Kpbs	Kilobits per second
GHz	Gigahertz
MHz	Mega hertz
kHz	Kilo hertz
Hz	Hertz
Sn	Saniye
ms	Milisaniye
µs	Mikrosaniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
BCH	Broadcast Channel
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CP	Cyclic Prefix
CQI	Channel Quality Indicator
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel State Information
CSI-RS	Channel State Information Reference Signal
CSR	Cell-Specific Reference
CUDA	Compute Unified Device Architecture
DM-RS	Demodulation Reference Signal

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DSP	Digital Signal Processor
eNodeB	enhanced Node Base station
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
FDD	Frequency Division Duplex
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HDL	Hardware Description Language
LTE	Long Term Evolution
MAC	Medium Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast and Multicast Service
MBSFN	Multicast/Broadcast over Single Frequency Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MMSE	Minimum Mean Square Error
MRC	Maximum Ratio Combining
MU-MIMO	Multi-User Multiple Input Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PCM	Pulse Code Modulation
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PHY	Physical Layer
PMCH	Physical Multicast Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PSS	Primary Synchronization Signal
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPP	Quadratic Permutation Polynomial
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RLC	Radio Link Control
RMS	Root Mean Square

Kısaltmalar**Açıklamalar****RRC**

Radio Resource Control

RTL

Register Transfer Level

SC-FDM

Single-Carrier Frequency Division Multiplexing

SD

Sphere Decoder

SFBC

Space-Frequency Block Coding

SINR

Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio

SNR

Signal-to-Noise Ratio

SSD

Soft-Sphere Decoder

SSS

Secondary Synchronization Signal

STBC

Space-Time Block Coding

SFBC

Space-Frequency Block Coding

SU-MIMO

Single-User MIMO

TDD

Time-Division Duplex

UE

User Equipment

1. GİRİŞ

Günümüzde akıllı telefon, tablet ve diz üstü bilgisayar kullanıcılarının talep ettiği hizmetler ve uygulamalar kitlesel piyasa genişlemesiyle mobil iletişimin sadece ses ve telefondan çok ötesine gitmiştir. İnternette gezinme, sosyal ağlar, müzik ve videolar gibi mobil servis ve uygulamalardaki yoğun veri akışı yeni nesil kablosuz standartların gelişimi için itici bir güç haline gelmiştir. Sonuç olarak zengin multimedya uygulamalarındaki uygulamaların yüksek hız ve gerekli ağ kapasitesini karşılamak için yeni standartların geliştirilmesi gerekecektir.

LTE bu dönemin gereksinimlerini karşılamak ve küresel geniş bant iletişiminin sağlanması amacı için geliştirilmektedir. LTE sistemi evrimi ve amaçları, radyo erişim sistem arasında daha yüksek veri hızları, geliştirilmiş sistem kapasite ve kapsama, esnek bant genişliği, önemli ölçüde geliştirilmiş spektral verimlilik, düşük gecikme süresi, daha düşük işletme maliyetleri, çoklu-anten destek ve sorunsuz internet ve mevcut mobil iletişim sistemleri entegrasyonunu içerir.

Bazı açılardan dördüncü nesil olarak bilinen LTE, 3. nesil (3G-3rd Generation)'in organik evrimi olarak kabul edilebilir ancak LTE iletim teknolojisi açısından da geçmişten gelen bir yıkıcı dönüşü ve geleceğe bir şafak temsil eder. Bu bağlam içinde kablosuz sistemlerin gelişiminde LTE ve standartları önemli olup LTE teknolojilerinin kökeni, gereksinimleri, önceki teknolojilere bağlı olarak gelişimleri incelenecektir.

Bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin Mustafa Serdar Osmana yüksek lisans tez çalışmasında LTE ve WİMAX teknolojilerine genel bir bakış yapmış ve 1. nesil (1G-1st Generation)'den LTE ve WİMAX'e kadar olan sistemler incelenmiştir. Ayrıca tezde LTE ve mikrodalga erişim için dünya çapında birlikte çalışabilirlik (WİMAX-Worldwide Interoperability for Microwave Access) teknolojilerinin iletişime kazandıracağı yenilikler incelenmiş olup, bu teknolojilerin alt jenerasyonlarından farkları ve kullandığı iletişim protokolleri ile topolojiler detaylı olarak ele alınıp incelenmiştir [1].

Younus Ameen Muhammed tarafından yazılan yüksek lisans tezinde LTE and LTE-Gelişmiş kablosuz haberleşme mimarilerinin gereksinimleri araştırılmıştır. LTE'de hangi

kodlama tekniğinin kullanıldığı, bu kodlama tekniğinin seçilme nedeni ve LTE performansının kanal kodlamasıyla nasıl artırılabilirliği sorularına cevap verilmiştir. Ayrıca bu çalışmada Turbo kodlama performansının artırılması için kod blok boyutu maksimum seçilerek farklı bir yaklaşımda bulunulmuş ve MATLAB yazılımı kullanılarak simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlar, önerilen yöntemle performansın daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu tezde IEEE 802.16e WiMAX'e paralel birleştirilmiş Konvolüsyon kodlama ile sistematik Konvolüsyon kodlama uygulanarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçları paralel birleştirilmiş Konvolüsyon kodlamanın rekürsif sistematik kodlamaya göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur [2].

Erkan İşler yüksek lisans tez çalışmasında evrensel mobil iletişim sistemi (UMTS-Universal Mobile Telecommunications System) ve LTE sistemlerinin analizini ve bu sistemlerde kullanılan radyo erişim tekniklerinin karşılaştırılması ve analizi yapılmıştır [3].

Yüksek lisans tez çalışmasında Volkan Çınar, LTE teknolojisinin şu anda telekomünikasyon servis sağlayıcılarının da kullandığı TS36.942'de yer alan parametreler kullanılarak MATLAB programında benzetimi gerçekleştirilmiştir. LTE ve LTE Advanced temel olarak aynı yapıyı içerdiğinden LTE sisteminin analizinin LTE Advanced hakkında da fikir sağlayacağı düşünülmüştür. Benzetimde bant genişliği, anten sayısı ve kanal yapısı gibi değişkenler kullanılıp bit hata oranı ve veri hızı grafikleri çıkartılmıştır. Sonuç olarak kanal yapısının AWGN ve bant genişliğinin 20 MHz seçildiği durumlarda en yüksek veri hızı değerlerine kabul edilebilir bit hata oranlarında (%10) ulaşılmıştır. Ulaşılan veri hızı değerleri Shannon'un sistem kapasite formülü ile hesaplanıp (yaklaşık olarak 70 Mbps) karşılaştırma yapılmıştır. Böylece benzetimde bulunan throughput (veri) değerlerinin teorik olarak da yeterli yakınsaklığı sağladığı gözlenmiştir. Diğer kanal yapılarında kullanıcıların hareketli olduğu (Pedestrian) veya kanalın Rayleigh sönümlenmesine uğradığı durumlarda AWGN kanal yapısı kadar yüksek throughput değerleri elde edilememiştir. Bunun nedeni bu kanal tiplerinde çoklu kullanıcı yer alması ve kanal karakteristiklerinin veri hızını azaltması olarak düşünülmüştür [4].

İskender Karslı çalışmasında çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO-Multiple Input Multiple Output) tekniğinin kapsama ve throughput üzerine olan etkisi araştırılmıştır. MIMO tekniğinin LTE sistemler için önemi test edilip ve başka bir test setup vasıtası ile şu anda

en iyi throughput'lerden birini sunan yüksek hızlı paket erişimi (HSPA- High Speed Packet Access) Dual Carrier teknolojisi ile kıyaslamalar yapılmıştır [5].

İlyas Selli'nin çalışmasında LTE performans analizi simülasyonları sunulmuştur. Farklı parametrelerin ve diğer faktörlerin etkisi araştırılmış, performans analizi sonuçları, BER ve veri ye karşı sinyal-gürültü (SNR-Signal to Noise Ratio) oranına göre gösterilmiştir [6].

Murat Akın tarafından yazılan yüksek lisans tezinde 4. nesil (4G-4th Generation) için yalnız Ethernet kullanılarak taşıyıcı ağ kurulmuştur. Ancak uçtan uca bütün ağları taşıyabilmek için çok protokollü etiket anahtarlama (MPLS-Multi Protocol Label Switching) ile Ethernet teknolojisine beraber kullanılmasının gerekli olduğu gösterilmiştir. Testlerde paket kayıpları açısından MPLS ve Ethernet birleştirilmiş metodun diğer metodlar olan sade Ethernet ve MPLS'e göre daha kullanılabilir olduğu kanıtlanmaya çalışılmıştır. Paket kayıpları açısından MPLS ve Ethernet metodu daha iyi sonuçlar vermiştir. Sonuçlarda MPLS Ethernet networkleri <50 ms altında koruma sağlamıştır [7].

Hüseyin Türker tarafından yazılan yüksek lisans tezinde hücresel teknolojilerin geniş bant mobil erişim için evrimi anlatılmıştır. 4. nesil gelecek nesil mobil teknolojisi olan ve 3. Nesil Ortaklık Projesi (3GPP-3rd Generation Partnership Project) tarafından geliştirilmiş LTE standartlarına radyo erişim gelişim açısından ve 3G'den 4G'ye mimari gelişim açısından odaklanmıştır [8].

Ömer Tura tarafından yüksek lisans tez çalışmasında 3GPP LTE 8. versiyonunun performans analizi sunulmuştur [9].

Melih Ahmet KARAMAN yüksek lisans tez çalışmasında LTE'nin bazı temellerini incelenmiş sonra kendi kendine iyileşme ve düzenlenme yeteneğinin LTE küçük hücrelerin performansı üzerindeki etkisi tartışılmıştır [10].

Necmi Taşpınar ve Gökçen Özdemir tarafından yazılan makalede dikey frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA-Orthogonal Division Multiple Access) yapısına yer verilmiş, 4G haberleşme sistemlerinde OFDMA' nın yeri incelenmiştir [11].

Barış Yavuz ve Hlyla Soydaş akır tarafından yazılan makalede 4G mobil geniş bant sistemine geçişte en güçlü aday olan LTE standardı ve onun sağlayacağı yenilikleri ele alınmıştır [12].

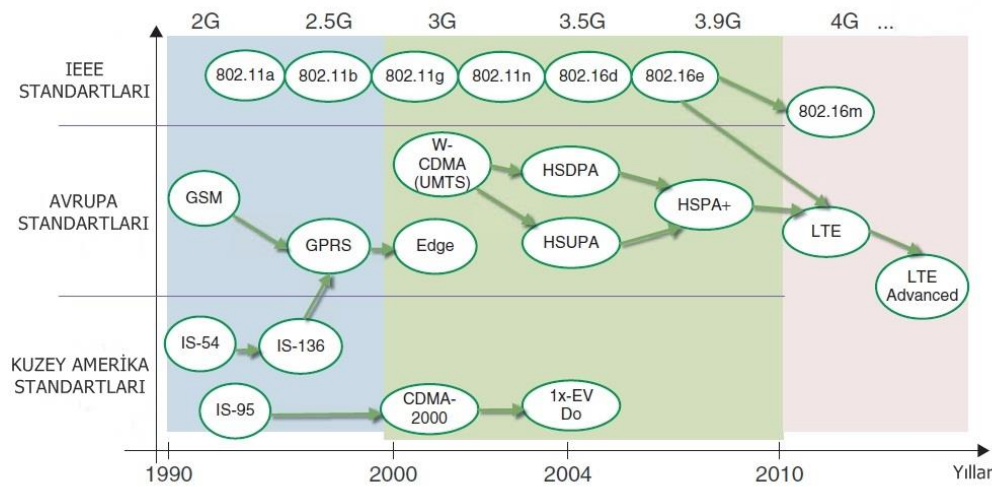
Erkan İşler, Seyhun Barbaros Yabacı ve Turgut İıkız tarafından yazılan makalede UMTS ve LTE şebekelerinde kullanılan radyo erişim tekniklerinin tanımı ve karşılaştırması yapılmıştır [13].

Bu tez çalışmasında OFDMA, MIMO, Turbo kodlama ve bağlantı adaptasyonu açıklanıp LTE'nin fiziksel katmanında kullanılan OFDM, modülasyon ve kodlama teknolojileriyle MATLAB kullanarak simule edilmiş ve sonuçlar (grafikler) analiz edilmiştir. Bölüm 1'de konu hakkında kısa bir giriş yapılmış ve konuyla ilgili yapılan çalışmalar anlatılmıştır. Bölüm 2'de kablosuz standartların ve LTE standardının tarihçesi, gelişimi anlatılmıştır. Bölüm 3'te ise LTE'nin fiziksel katmanının teknik özellikleri ele alınmıştır. Bölüm 4'te ise MATLAB ile LTE modülasyon, kodlama ve OFDM teknikleriyle LTE'nin fiziksel katmanının modellenmesini gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları açıklanmıştır. Bölüm 5'te ise yapılan çalışma için sonuç ve öneriler mevcuttur.

2. UZUN VADELİ EVRİM (LTE-LONG TERM EVOLUTION)

2.1. Kablosuz Standartlar

Geçtiğimiz 20 yılda 2. nesil (2G-2nd Generation)'den 3G'ye, 3G'den 4G'ye geçişte çeşitli standartlar geliştirilmiştir. 4G'de de bu standartların geliştirilmesine devam edecektir (Şekil 2.1). 2G standartlarının birincil görevi mobil telefon ve ses uygulamaları desteğidir.



Şekil 2.1. Kablosuz standartların son 20 yıl içindeki evrimi

3G standartları, paket tabanlı veri devrimin başlangıcını ve e-posta, Web tarama, metin mesajlaşması ve diğer istemci-sunucu hizmetleri gibi internet uygulamalarında damgasını vurmuştur. 4G standartlarında tüm internet protokol adresi (IP-Internet Protocol Address) paket tabanlı ağlar özelliği olacak ve bu mobil video-on-demand hizmetleri gibi bant genişliği gerektiren uygulamaları destekleyecektir. Tarihsel olarak, mobil iletişim standartları, ayrı ayrı Kuzey Amerika, Avrupa ve dünyanın diğer bölgelerindeki, ağ sağlayıcı ve operatör konsorsiyumları tarafından geliştirilmiştir. 2G sayısal mobil iletişim sistemleri 1990'ların başlarında tanıtılmıştır. Bu 2G sistemleri destekleyen teknolojiye devre anahtarlamalı veri iletişimi vardı. Avrupa'da mobil iletişim için küresel sistem (GSM-Global System for Mobile Communications) ve IS-54 (Geçici Standart 54) Kuzey Amerika'da ilk 2G standartlarının arasındaydı. Her ikisi de zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA-Time Division Multiple Access) teknolojisine dayandırılmıştır. TDMA'da her bir veri terminaline, zaman içinde değişen isteklere göre zaman dilimleri atayarak çoklu erişim

gerçekleşir. Veri oranları açısından, örneğin, GSM sistemleri ses hizmetlerini 13 kbps'ye ve veri hizmetlerini 9,6 kbps'ye kadar destekler.

GSM standardı daha sonra 171,2 kbps en yüksek veri hızını destekleyen geliştirilmiş paket radyo servisine (GPRS-General Packet Radio Service) dönüşmüştür. GPRS, paket tabanlı anahtarlama teknolojisi veri iletimini ve devre-anahtarlama teknoloji ise ses iletimini destekler. GPRS teknolojisi, yüksek oranlı modülasyon şeması 8 faz kaydırmalı anahtarlama (8-PSK-Phase Shift Keying) kullanılıp veri hızını 384 kbps'ye kadar artırarak GSM gelişimi için artırılmış veri hızları (EDGE-Enhanced Data Rates for GSM Evolution) dönüştürülmüştür.

Kuzey Amerika'da, IS-95 giriş bir kod bölmeli çoklu erişim (CDMA-Code Division Multiple Access) teknolojisinin ilk ticari dağıtımı gerçekleşir. IS-95'te CDMA doğrudan yayılma spektrum teknolojisine dayanmakta, birden fazla kullanıcı ortogonal yayılma kodlarını kullanarak daha geniş bir bant genişliğini paylaşır. IS-95, bant genişliği 1,2284 MHz'i kullanır ve temel olarak kanal başına 14,4 kbps'lik veri hızı ile hücre başına maksimum 64 ses kanalı için sağlar. IS-95-B revizyon standardı yüksek hızlı paket tabanlı veri iletimini desteklemek için geliştirilmiştir. Yüksek hızlı paket veri destekleyen yeni ek kod kanalın tanıtımı ile IS-95-B 115,2 kbps bir tepe veri hızı desteklenir. Kuzey Amerika'da, 3. Nesil Ortaklık Projesi 2 (3GPP2), 3G mobil sistemleri için teknik özellikleri ve standartları oluşturulup bu standardizasyon vücut olmuştur. Ayrıca CDMA teknolojisinin evrimine dayanır. 1997'den 2003'e kadar, 3GPP2 orijinal IS-95 standardına dahil 1xRTT, 1x-EV-DO (Evolved Voice Data Only) ve EV-DV (Evolved Data and Voice) dayalı standartlar ailesini geliştirilmiştir. 1xRTT 307 kbps'lik bir maksimum veri hızı elde etmek için 64 daha fazla trafik kanallarını ekleyerek IS-95 kapasitesi iki katına çıkmıştır. 1x-EV-DO ve 1x-EV-DV standartları, adaptif modülasyon ve kodlama, hibrit otomatik tekrar isteği (HARQ-Hybrid Automatic Repeat Request), Turbo kodlama ve daha hızlı gibi özellikleri bir dizi tanıtarak 2,4-3,1 Mbps aralığında tepe veri hızları elde etmeyi başarmıştır.

Başlangıçta 3GPP Avrupa mobil standardı üzerinde yönetilmiş daha sonra bir küresel standartlaşma organizasyonuna dönüşmüştür. Bu organizasyon 3G mobil sistemlere teknik özellikler kurmaya sorumludur. 1997'de, 3GPP, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (İTÜ IMT-2000-International Telecommunication

Union International Mobile Telecommunications projesi tarafından belirlenen hedeflerine ulaşmak için bir standardizasyon çabası üzerinde çalışmaya başlamıştır. Bu projenin amacı 2G TDMA tabanlı GSM projesinden 3G geniş bant CDMA tabanlı GSM projesine geçmektir ve bu UMTS olarak adlandırılmıştır. UMTS mobil iletişimde önemli bir değişikliği temsil etmiştir. 2001 yılında standardize edilmiş ve 3GPP standartları Release (Sürüm) 4 ismi verilmiştir. UMTS sistemi ile bir uydu-yer hattı (downlink) 1,92 Mbps'lik yüksek veri hızı elde edilebilir. UMTS sistemine yükseltme olarak, yüksek hızda veri paketi indirme bağlantısı (HSDPA-High Speed Downlink Packet Access) 3GPP Release 5 olarak 2002 yılında standardize edilmiştir. Bu standart tarafından sunulan 14,4 Mbps bir tepe veri hızları daha hızlı daha kısa alt çerçeve ile zamanlama ve 16 dörtlü genlik modülasyonu (16-QAM-16-Quadrature Amplitude Modulation) modülasyon şeması kullanımını tanıtarak mümkün olmuştur. Yüksek hızlı veri paketi yükleme imkanı (HSUPA-High Speed Uplink Packet Access) 5,76 Mbps maksimum hızı ile Release 6 olarak 2004 yılında standardize edilmiştir. Birlikte HSPA olarak bilinen bu standartların her ikisi de, daha sonra HSPA+ veya MIMO HSDPA olarak bilinen 3GPP standart 7 Release yükseltilmiştir. HSPA+ standardı 84 Mbps hızlarına kadar ulaşmak için 2x2 MIMO tekniğini ve daha da yüksek modülasyon 64-QAM kullanımını ile ilk mobil standardı olarak tanıtmıştır. Bu başlangıçta Kuzey Amerika 3G standartlarının bir parçası olarak tanıtıldı ve gelişmiş özelliklerde HSPA ve HSPA+ dahil edildi. Bu özellikler adaptif modülasyon ve kodlama, HARQ, Turbo kodlama ve daha hızlı zamanlama içerir.

Yüksek veri hızları ve spektrum verimliliği için diğer önemli olan kablosuz uygulama kablosuz yerel ağıdır. WLAN standartlarının temel amacı, binalar ile durağan kullanıcılara güvenilir ve yüksek hızlı ağ bağlantıları sağlamaktır. Küresel mobil iletişim ağları evrim geçirirken, Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE-Institute of Electrical and Electronics Engineers) kablosuz yerel alan ağı (WLAN-Wireless Local Area Network) ve kablosuz metropolitan alan ağları (WMANs-Wireless Metropolitan Area Networks) için uluslararası standartlar geliştiriyordu. Kablosuz bağlantı alanı (WiFi-Wireless Fidelity) standartları (802.11a/b/g/n) ve WiMAX standartlarının (802.16d/e/m) bir ailesinin tanıtımıyla ile IEEE OFDM'yi umut verici ve yenilikçi hava arabirim teknolojisi olarak kurdu. Örneğin, IEEE 802.11a WLAN standardı en fazla 54 Mb/s veri hızı ile OFDM sinyallerinin iletimi için 5 GHz frekans bandını kullanır. 2006 yılında IEEE, bir paket tabanlı kablosuz geniş bant sistemi olan yeni WiMAX standardını (IEEE 802.16m) tanıttı. WiMAX özellikleri arasında 20 MHz'ye kadar ölçeklenebilir bant genişlikleri, yüksek tepe

veri hızları ve UMTS ve HSPA sistemleri tarafından daha özel etkinlik profilleri sunuluyordu. Bunun sonucunda 3GPP ile WiMAX teknolojisi ile rekabet edebilecek yeni bir kablosuz mobil standardı tanıtmak için bir çalışma başladı. Bu çalışma sonucu LTE standardizasyonun oluşmasını sağladı.

2.2. Tarihsel Veri Hızları Profili

Çizelge 2.1 çeşitli kablosuz teknolojilerin tepe veri hızlarını özetlemektedir. Bu standartlar tarafından sunulan maksimum veri oranlarına bakıldığında, LTE standardı (3GPP Release 8) 300 Mbps maksimum veri hızı ve LTE-Advanced (3GPP Release 10) ise 1 Gbps bir tepe veri hızı sunuyor. Bu rakamlar GSM/EDGE teknolojisi tarafından sunulan yaklaşık 2000 kat ve geniş bant kod bölmeli çoklu erişim (W-CDMA-Wideband Code Division Multiple Access)/UMTS sistemleri tarafından sunulan 50-500 kat veri oranlarında artış temsil eder.

Çizelge 2.1. Geçtiğimiz yirmi yılda uygulamaya geçen çeşitli kablosuz standartlar tepe veri hızları

Teknoloji	Teorik zirve veri hızı
GSM	9,6 kbps
IS-95	14,4 kbps
GPRS	171,2 kbps
EDGE	473 kbps
CDMA-2000 (1xRTT)	307 kbps
WCDMA (UMTS)	1,92 Mbps
HSDPA (Release 5)	14 Mbps
CDMA-2000 (1x-EV-DO)	3,1 Mbps
HSPA+ (Release 6)	84 Mbps
WiMAX (802.16e)	26 Mbps
LTE (Release 8)	300 Mbps
WiMAX (802.16m)	303 Mbps
LTE-Advanced (Release 10)	1Gbps

2.3. Gelişmiş IMT Gereksinimleri

İTÜ mobil sistemler tasarımı için bir dizi gereksinimleri yayınladı. 1997 yılında piyasaya ilk öneriler sunulup IMT-2000 olarak adlandırıldı [14]. Bu öneriler radyo ara yüz özelliklerinin hedefleri ve gereksinimlerini içerdi. 3G mobil iletişim sistemleri bu önerilere ile uyumlu olacak şekilde geliştirilmiştir. 3G sistemlerinin gelişiminin gerektirdiği için, son 10 yılda IMT-2000, gereksinimleri birçok güncelleme geçirdi [15].

2007 yılında, İTÜ Gelişmiş IMT sistemleri için sağlanan gereksinimleri ve çok daha yüksek önerileri içeren yeni bir dizi yayınladı [16]. Gelişmiş IMT gerçekten küresel geniş bant mobil iletişim sistemlerinin yapı gereksinimlerini temsil eder. Bu tür sistemler, paket tabanlı gelişmiş geniş bir mobil hizmet yelpazesine erişim sağlamak, düşük-yüksek mobilite uygulamaları ve çeşitli veri oranlarında destek ve yüksek kaliteli multimedya uygulama yetenekleri sağlayabilir. Yeni gereksinimler, mevcut 3G sistemleri üzerinde performans ve hizmet kalitesinde önemli bir iyileşme getirmek amacıyla araştırma ve geliştirme faaliyetlerini teşvik için yayınlanmıştır.

Gelişmiş IMT'nin belirgin özelliklerinden biri gelişmiş hizmetler ve uygulamalar (düşük hareketlilik için 100 Mbps ve yüksek hareketlilik için 1 Gbps) için geliştirilmiş zirve veridir. Bu gereksinimler, araştırma için hedef olarak belirlenmiştir. 3GPP tarafından geliştirilen gelişmiş LTE standart ve IEEE tarafından geliştirilen mobil WiMAX standardı en önemli standartlar arasında gelişmiş IMT özelliklerin gereksinimlerini karşılamak için vardır.

2.4. 3GPP ve LTE Standardizasyonu

LTE ve LTE-Advanced 3GPP tarafından geliştirilmiştir. Bu teknolojiler önceki 3GPP standartlarından (UMTS ve HSPA) çok şeyi miras almıştır bu anlamda bu teknolojilerin bir evrimi olarak kabul edilir. Ancak IMT-Advanced gereksinimlerini karşılamak ve WiMAX standardı ile rekabet içinde tutmak, daha önceki standartlarda kullanılan W-CDMA transmisyon teknolojisinde radikal bir çıkış yapmak LTE standardı için gereklidir. LTE standardizasyon çalışmaları 2004 yılında başlamış ve sonuçta iddialı büyük ölçekli mobil ağların yeniden mimarisi ile sonuçlanmıştır. Çalışmalar 4 yıl sonra ve tüm dünyada telekomünikasyon şirketleri ve internet standardizasyon organları katkılarıyla

tamamlanmış LTE'nin (3GPP Release 8) standardizasyon süreci 2008 yılında bitmiştir. Release 8 LTE standardı daha sonra küçük değişikliklerle birlikte Release 9 LTE olarak gelişmiş ve daha sonra da Gelişmiş LTE standardı olarak bilinen Release 10'na dönüşmüştür. Gelişmiş LTE iyileştirme özellikleri, spektral verimlilik, tepe veri hızları ve LTE kullanıcı deneyimi göreceli olarak iyileştirmeler sunuyor. 1 Gbps maksimum tepe veri hızına sahip gelişmiş LTE, gelişmiş IMT teknolojisi olarak ITU tarafından onaylanmıştır.

2.5. LTE Gereksinimleri

LTE gereksinimleri gelişen UMTS sistem mimarisinin iki temel bileşeni olan gelişmiş universal karasal radyo erişim ağı (E-UTRAN) ve evrimleşmiş paket çekirdek (EPC) kapsar. Sistemin genel hedefleri:

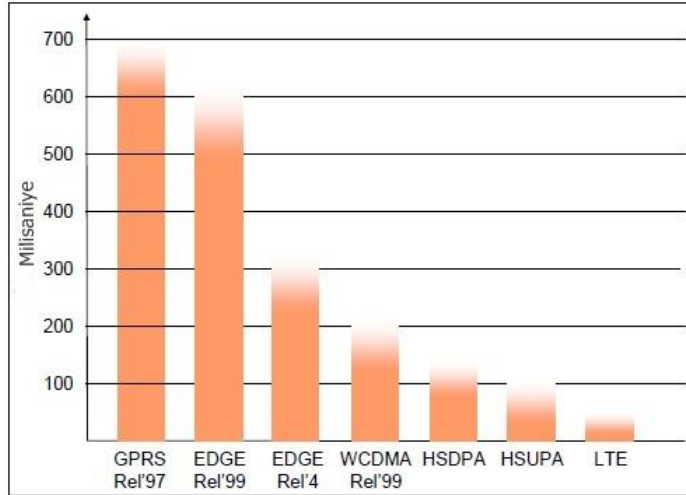
- Geliştirilmiş sistem kapasitesi ve kapsama alanı sağlanması,
- Kullanıcıya yüksek tepe veri hızlarında iletişim sunulması,
- Düşük gecikme (hem kullanıcı-düzlemi ve kontrol düzlemi) süresinin sağlanması,
- İşletme maliyetlerinin düşürülmesi,
- Çoklu anten desteğinin sağlanması,
- Esnek bant genişliği işlemlerinin gerçekleştirilmesi,
- Mevcut sistemlere (UMTS, WiFi, vs.) sorunsuz entegrasyonun gerçekleştirilmesi, olarak sıralanabilir.

LTE sistemleri esnek yapıya sahiptir. Bundan dolayı tüm dünya pazarlarında kolaylıkla kullanılabilir. Bu sebepten dolayı 1,25 MHz ve 20 MHz arasında bant genişliklerinin LTE'de kullanılabilmesi sağlanmıştır. CDMA temelli 3G şebekelerinde sadece 1,25 MHz ve 5 MHz spektrumlar kullanılabiliyordu. 4G ile bu bant genişliği artacak, farklı bant genişliklerinin kullanılması ile değişken veri hızları da kullanıcılara sunulabilecektir [12]. Sonuç olarak bant genişliği ile anten sayısını arttırdıkça veri hızı da doğru orantılı olarak yükselir. LTE ile ilgili bazı performans hedefleri aşağıda özetlenmiştir [17]:

a) Haberleşmede düşük gecikme sürelerine ulaşılması:

- Kullanıcı düzleminde RTT: <10 ms hedefine ulaşılacak.
- Kanal kurulumu: <100 ms altında gerçekleştirilecek.

Şekil 2.2’de diğer mobil teknolojiler ile karşılaştırmalı biçimde gecikme değerleri verilmektedir.



Şekil 2.2. LTE ve diğer teknolojiler için gecikme değerlerinin kıyaslanması [18]

b) Yüksek veri hızlarının sağlanması:

- DL: 100 Mbit/sn SISO; 173 Mbit/sn 2x2 MIMO; 326 Mbit/sn 4x4 MIMO (Bu değerler 20 MHz bant genişliği için hesaplanmıştır.)
- UL: 58 Mbit/sn 16-QAM;
86 Mbit/sn 64-QAM
- Hücre sınırı veri hızları 2-3 x HSPA Release 6 (14,4 Mbit/sn)

c) Kapasite artışının sağlanması:

- 5 MHz’de 200 kullanıcı, daha geniş spektrumda 400 kullanıcının hedeflenecek.

d) Esnek Spektrum kullanımının sağlanması:

- 1,4; 3, 5, 10, 15, 20 MHz değerlerinde iletişim sağlanacak,
- IMT-2000 tüm frekansları: 450 MHz’den 2,5 GHz’e kadar frekans aralığının kullanılabilirliğinin gerçekleştirilecek,

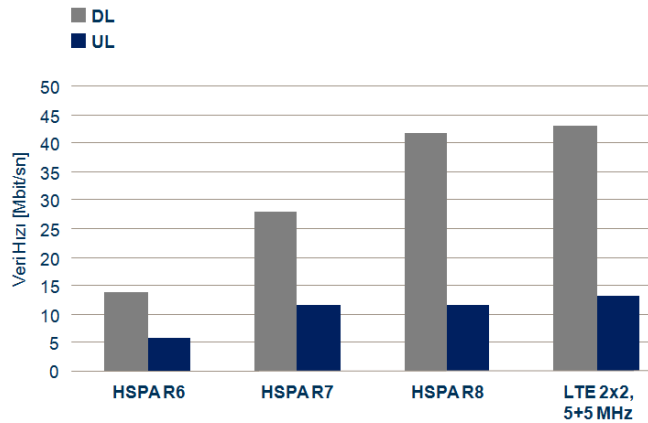
e) Yüksek performanslı broadcast servislerin sunulması:

- Multimedya yayın çoklu yayın hizmetleri (MBMS-Multimedia Broadcast Multicast System): Bu sistem 300 kbit/sn, 5 MHz’de 15 kanal sunacak,

f) Sermaye Yatırımları/Operasyonel Harcamalar (CAPEX/OPEX-Capital Expenditures/Operational Expenditures) avantajlarının etkin bir biçimde sağlanması:

- Şebeke uyarlamasında maliyet avantajı sağlayıp, CAPEX/OPEX maliyetlerini düşürecek,
 - Devre anahtarlama (CS-Circuit Switching) yapısı kullanılmaksızın bunun yerine paket anahtarlama (PS-Packet Switching) kullanılacak,
- g) Kullanıcılara 350 km/saat hızlarında mobilite desteği sağlanacak, olarak özetlenir [12].

Veri hızı ile ilgili olarak LTE'nin mevcut HSPA teknolojisine üstünlük sağlayamadığı 5 MHz bant genişliğindeki kullanımı için Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Bu nedenle LTE kullanımını en az 10 MHz bant genişliği için kullanmayı düşünmek zorundadırlar. Bu durumda yüksek bant genişliklerine sahip mobil operatörler LTE yarışında avantaj sağlar [19].



Şekil 2.3. LTE ve HSPA teknolojilerinin veri hızlarının 5 Mhz için kıyaslaması [30]

2.6. Teorik Stratejiler

Kanal kapasitesi Shannon temel çalışması, kullanılabilir veri hızları her zaman alınan sinyal gücü veya alınan sinyal-gürültü-güç oranı ile sınırlı olduğunu bildirir [20]. Ayrıca iletim veri hızları bant genişliği ile ilgilidir. Düşük bant genişliği kullanımı durumunda veri oranı, mevcut bant genişliği önemli ölçüde daha düşük olduğu, veri hızının herhangi bir artışına orantılı olarak, alınan sinyal gücünde bir artış gerektirir. Yüksek bant genişliği kullanımı durumunda, veri hızları kullanılabilir bant genişliğinden daha büyük veya eşit olduğu bant genişliği durumunda veri hızındaki artışa orantılı olarak arttığı takdirde, veri oranındaki bir artış, alınan sinyal gücünün çok daha büyük bir nispi bir artışı gerektirir.

Alıcıda genel gücü artırmak için çoklu anten kullanılır. Bu alım çeşitliliği (receive diversity) olarak bilinir. Çoklu anten gönderim çeşitliliği (transmit diversity) olarak bilinen verici tarafından da kullanılabilir. Çoklu anten olarak tabir edilen MIMO antenlerle gönderilen ve alınan sinyal gücünü de arttırabiliriz. Alınan sinyal gücünün yanı sıra, bir mobil iletişim sisteminde veri hızlarını doğrudan etkileyen bir başka faktör de iletim bant genişliğidir. Daha yüksek veri hızları genellikle daha geniş bir iletim bant genişliğini içerir. Geniş bant iletimi ile ilgili en önemli zorluk radyo kanalında çok-yollu sönümlenme (multipath fading) etikisidir. Çok-yollu sönümlenme alıcıya gelmeden önce farklı yollarla iletilen çoklu sinyal versiyon yayılımlarının sonucudur. Bu sonuçlar arasında sinyal gücü değişen versiyon profilleri, zaman gecikmeleri ya da faz kaymaları vardır. Sonuç olarak alınan sinyal iletilen sinyalin filtre edilmesi ile modellenenebilir. İletilen sinyal, radyo kanalının darbe tepkisi ile filtre edilir. Frekans alanında, çok-yollu sönümlenme, zamanla değişen bir kanal frekans yanıtını göstermektedir. Kanal frekans yanıtı, kaçınılmaz olarak elde edilebilen veri hızlarının üzerinde ters bir etkiyle, nakledilen sinyalin, orijinal frekans alan içeriğini bozar. Bu durum da kanal frekans seçicilik etkilerini ayarlamak ve makul bir performans elde etmek, iletim gücünü artırmak, veri hızlarına ilişkin kötü beklentileri azaltmak veya denkleştirme ile frekans alanı bozulmalarını telafi etmek gerekir.

Birçok kanal denkleştirme teknikleri çok-yollu sönümlenme etkilerine karşı ileri sürülmüştür. Basit zaman-etki alanı dengeleme yöntemleri 5 MHz'lik iletim bant genişliklerine kadar üzerinden iletimi için yeterli performansını temin etmek üzere gösterilmiştir. Ancak LTE standartları ve diğer mobil sistemler için 10, 15 veya 20 MHz veya daha yüksek geniş bant genişliklerinde, zaman bölgesi karmaşıklığı dengelemesinde büyük engelleyici hale gelir. Zaman bölge dengelemesi etkisi ile ortaya çıkan problemlerin üstesinden gelmek için geniş bant iletimi için iki yaklaşım önerilir:

- Çoklu taşıyıcı iletim şemalarının kullanımı, daha geniş bir bant sinyali çok daha fazladır dikey sinyallerinin toplamı olarak ifade edilir. LTE standardında kullanılan çoklu iletiminin özel bir durumu OFDM aktarımıdır.
- Tek bir taşıyıcı iletim şemasının kullanımı, yüksek iletim gücü dalgalanmaları tanıtan olmadan OFDM tarafından sunulan düşük karmaşıklık frekans alanı denkleştirmeye faydalar sağlar. Bu iletim tipinin adı tek-taşıyıcılı frekans bölmeli çoğullamadır (SC-FDM-Single-Carrier Frequency Division Multiplexing). Bu LTE standardında uplinkte kullanılır.

Bundan başka belirli bir iletim bant genişliği içinde daha yüksek veri hızlarının temin edilmesi için birçok basit bir şekilde yüksek dereceden modülasyon şemalarının kullanımı gerekir. Yüksek mertebeden modülasyonu kullanarak bize tek bir modüle sembolü ile daha fazla bit gösterimi sağlar ve doğrudan bant genişliği kullanımını artırır. Ancak daha yüksek bant genişliği kullanımı bir maliyetle gelir ve buna bağlı olarak modüle edilmiş semboller arasında düşürülmüş bir minimum mesafe ortaya çıkar ve bir bileşke gürültü ve girişime duyarlılık artar. Sonuç olarak adaptif modülasyon, kodlama ve diğer bağlantı adaptasyon stratejileri mantıklı küçük veya daha yüksek mertebeden modülasyonda karar verilip kullanılır. Bu uyarlanır yöntemleri uygulayarak bir iletişim bağlantısında verimi ve ulaşılabilir veri hızlarını artırabilir.

2.7. LTE Etkinleştirme Teknolojileri

LTE'yi ve gelişimini sağlayan teknolojiler, OFDM, SC-FDMA, MIMO, Turbo kodlama ve dinamik bağlantı adaptasyon tekniklerini içerir.

2.7.1. OFDM

LTE'de OFDM ve onun tek taşıyıcılı SC-FDM'nin seçilmesinin ana nedenleri şunlardır: Çok-yollu sönmülenmede sağlamlık, yüksek spektral verimlilik, düşük karmaşıklık uygulanması, esnek transmisyon bant genişliklerini sağlamak, frekans-seçici zamanlama gibi gelişmiş özellikleri desteklemek, MIMO iletim ve girişim koordinasyonunu sağlamaktır [21].

Çok sayıda kiplenmiş alt taşıyıcı kullanarak veri iletiminin paralel olarak yapıldığı tekniğe OFDM denir. Bu alt taşıyıcılar (alt kanallar), mevcut bant genişliğini böler daha sonra her bir taşıyıcı için yeterli bir biçimde frekans ayrılarak bu alt taşıyıcıların dikgen olması sağlanır. Taşıyıcılar arasındaki dikgenliğin olmasının amacı; her bir taşıyıcının bir sembol periyodu üzerinde tam sayı periyotlara sahip olmasını sağlayıp bu sayede her bir taşıyıcının spektrumu, sistemdeki diğer taşıyıcıların her birinin merkez frekansında bir sıfıra sahip olur. Bunun sonucunda taşıyıcılar arasında spektral olarak üst üste binme olmasına rağmen herhangi bir girişim meydana gelmez. Taşıyıcılar arasındaki bu ayrıklık teorik olarak minimum seviyede olup çok iyi bir şekilde spektral verimlilik sağlanır [44].

2.7.2. SC-FDM

SC-FDMA OFDMA'ya benzer ve aralarındaki fark şudur: OFDMA'da alt kanallar aynı anda iletilir, SC-FDMA'da ise zaman alanında art arda iletilir. Bunun faydası; OFDMA'da alt kanallarda iletilen 1'ler 0'lar için harcanan tepe toplam gücün ortalama toplam güce oranı (peak to average power ratio) çok fazla olmasıdır. Bu nedenle güçlendiricilerin düzgün çalışabilmesi için az ortalama güç kullanmaları gerekir ve bu yüzden verimsizlik oluşur. SC-FDMA'da ise herhangi bir anda bir alt kanal iletildiği için bu problem oluşmaz, yalnız art arda alt kanalları iletmek için çok hızlı iletim yapmak gerekir ve bunun sonucunda semboller arası girişim (intersymbol interference) oluşur. Bu nedenle alıcıda denkleştirme (equalization) (frekans alanında) yapılması gerekir yani alıcının daha karmaşık olması gerekir. SC-FDMA LTE teknolojisinde uplinkte (mobil cihazdan baz istasyonuna) kullanılır. SC-FDMA'nın kullanılmasının sebebi:

- Göndericide (mobil cihaz) tepe ortalama güç oranı problemi olmadığı için güç verimli şekilde kullanılır ve pil ya da batarya çalışan mobil cihaz için çok önemli olup pil seviyesini etkiler.
- Alıcıda denkleştirme (equalization) gereklidir fakat alıcı baz istasyonu olduğu için bu durum daha fazla maliyetli olmasından dolayı SC-FDMA'da 3GPP LTE uplinkte tercih edilmektedir.

2.7.3. MIMO

MIMO yöntemleri mobil iletişimi, genel veri hızlarını ve iletişim bağlantısının güvenilirliğini artırarak iki farklı şekilde artırılır. LTE standardının kullanılan MIMO algoritmaları; alıcı çeşitliliği, gönderim çeşitliliği, hüzme (beamforming) ve uzamsal çoğullama (spatial multiplexing) olmak üzere dört kategoriye ayrılır. Bu yöntemler, bu yolla elde edilebilen veri hızlarında farklı bir artış yapmak yerine iletişimi daha sağlam bağlantı yaparak sağlar. Uzamsal çoğullamada, sistem farklı antenler üzerinde bağımsız (yedeksiz) bilgi aktarır. Burada MIMO esas olarak belirli bir bağlantıda veri hızını artırabilir. Veri hızları geliştirilebilir ölçüde verici anten sayısı ile doğrusal olarak orantılıdır. Bu uyumu sağlamak amacıyla, LTE standardı downlinkte 4 verici antene kadar birden fazla verici konfigürasyonları içerir. Gelişmiş LTE downlink için, en çok 8 verici antenin kullanımını sağlar.

2.7.4. Turbo kanal kodlama

Turbo kodlama önceki tüm standartlarda kullanılan helezon şifreleme teknolojisinin yakın kanal kapasitesi performansı ile etkileyici bir evrimidir [22]. Turbo kodlama ilk defa 1993 yılında tanıtılmış; 3G, UMTS ve HSPA sistemlerinde kullanılmıştır. Ancak bu standartlarda, bu kodlama sistemin performansını artırma isteğe bağlı olarak kullanılır. LTE standardında ise Turbo kodlama kullanıcı verilerini işlemek için kullanılan tek kanal kodlama mekanizmasıdır. Turbo kodlama tekniği, yapısal olarak ardışık kodlama tekniğinin geliştirilmiş bir versiyonu ile kod çözme için kullanılan bir kod çözme algoritmasından ibarettir. Turbo kodlamanın temel unsurlarından biri olan ardışık kodlama, ilk olarak Forney tarafından tasarlanmış bir tekniktir. Bu teknik, iki ya da daha fazla basit kodlayıcının, yüksek kod kazancına ulaşabilmek için paralel ya da seri birleştirilmesinden oluşur. Neticede ortaya çıkan bu konular, çok uzun kodların hata düzeltme kabiliyetlerine sahip olmakla birlikte onlara göre daha makul sayılabilecek karmaşıklıkta bir kod çözme yapısına sahiptirler.

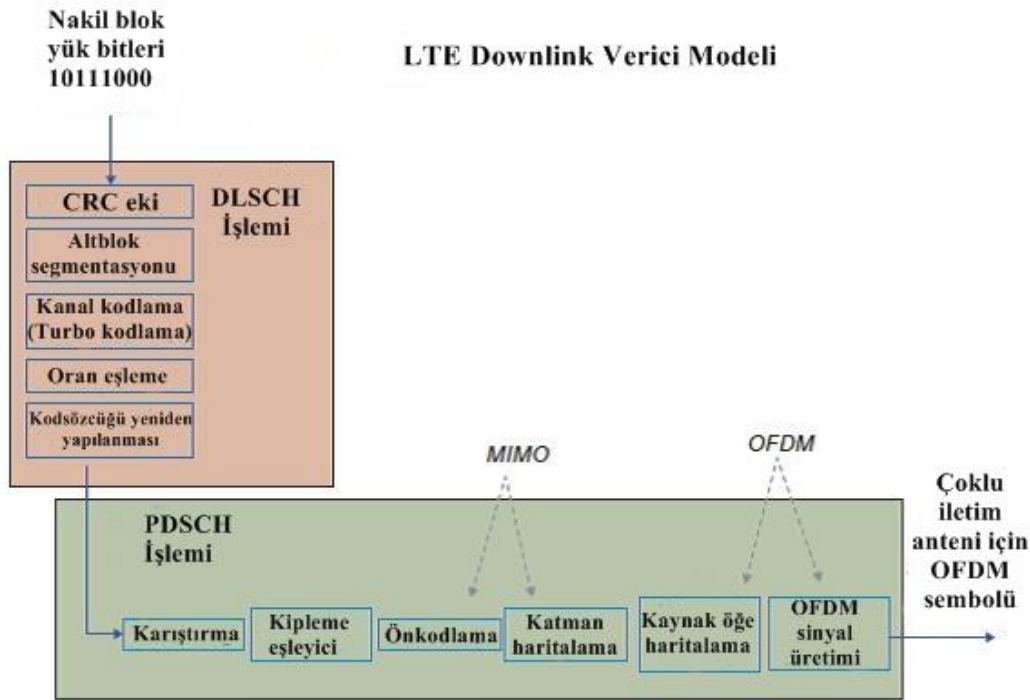
2.7.5. Bağlantı adaptasyonu

Bağlantı adaptasyonu, bir mobil iletişim sisteminin aktarım parametrelerinin uyarlanması için değişen tekniklerin daha iyi bir iletişim kanalının dinamik yapısına yanıtı olarak tanımlanır. Kanal kalitesine bağlı olarak, farklı modülasyon ve kodlama teknikleri kullanılabilir. Adaptif MIMO ile alım ve gönderim anten sayıları hatta iletim bant genişliği (adaptif bant genişliği) değiştirilebilir. Link adaptasyonu, mobil iletişim sisteminde kanala bağımlı planlama ile ilgilidir. Bu planlama farklı kullanıcılar arasındaki radyo kaynaklarını nasıl paylaşılacağını ve kaynakları daha etkin kullanmayı içerir. Tipik olarak kullanıcılar için ayrılan kaynakları en aza indirmek ya da kaynak tiplerini ve öncelikli kullanıcı verileri eşleştirmeyi sağlar. Kanal-bağımlı planlamada anlık kanal durumuna dayanarak var olabilir en iyi hizmet kalitesi gereksinimlerini karşılarken, mümkün olduğunca tatmin edici sürede çok sayıda kullanıcıya ulaşmayı amaçlar.

2.8. LTE Fiziksel Katmanı Modellemesi

Fiziksel katman modellemede yüksek katmanlardan aşağıya doğru olan veri bitleri üzerinde yapılan tüm işlemleri içerir. Bu işlemler çeşitli ulaşım kanalları, fiziksel

kanallarla eşleştirilip, sinyal işlemenin bu kanalların her birinin üzerindeki nasıl gerçekleştirildiğini ve verilerin iletimi için antene kadar nasıl taşındığını gösterir. Örnek olması açısından Şekil 2.4 LTE downlink için PHY modelini göstermektedir.



Şekil 2.4. LTE'nin fiziksel katman özellikleri

İlk olarak veri çoklamasına aşağı yönlü bağlantı paylaşımlı kanal işleme (DLSCH-Downlink Shared Channel) olarak bilinen bir aşamada kodlanarak başlanır. DLSCH işlem zinciri, hata tespiti için bir döngüsel artıklık denetimi (CRC-Cyclic Redundancy Check) kodu ekleyerek karıştırır, çerçeveler olarak bilinen küçük parçalar halinde veri segmentlere gelir. Kullanıcı verileri için Turbo kodlama dayalı kanal-kodlama işlemlerini üstlenen istenen kodlama oranını yansıtacak şekilde çıkış bit sayısını seçer, oran eşleştirme işlemi yürüten codewords son olarak codeblocks içine yeniden gelir. İşlemenin bir sonraki aşaması fiziksel downlink paylaşılan hattı olarak bilinir. Bu aşamada codewords önce bir karıştırıcı işlemine tabi olur ve daha sonra bir modüle edilmiş sembol akımına neden olan bir modülasyon eşlemesine tabi tutulur. Bir sonraki adım, modüle edilmiş semboller tek bir akış içinde çok sayıda anten yoluyla iletim için tahsis edilmiş çok sayıda akım bölümüne bölünmüş LTE MIMO veya çok antenli işlem içerisine girer. MIMO işlemleri iki adımın bir kombinasyonu olarak kabul edilebilir: ön kodlama ve

katman haritalama. Ön kodlama, ölçekler ve tahsis sembolleri her alt akış için düzenlenir ve katman haritalama seçer ve her alt akış içine verileri uygulamak için belirtilen dokuz farklı MIMO modları ile downlinkte yönlendirir. Downlinkte uygulanan mevcut MIMO teknikleri arasında iletim çeşitliliği, uzamsal çoğullama ve hüzme oluşturma vardır. İşleme zincirinin son adımı, çoklu taşıyıcı iletimi ile ilgilidir. Downlinkte, çoklu-işlem OFDM iletim şemasına dayanır. OFDM iletimi iki adımdan oluşur. İlk olarak kaynak eleman eşleme, bir zaman-frekans kaynağı, ızgara içinde her katmanın modüle edilmiş sembolleri düzenler. Izgaranın frekans eksenini üzerinde, veriler frekans alanında bir alt taşıyıcı ile hizalanır. OFDM, sinyal oluşturma aşamasında, OFDM simgeleri bir dizi ters Fourier uygulanarak nakledilen verileri hesaplamak için dönüştürülür ve gönderilen veri için her bir antende taşınır.

2.9. LTE (Release 8 ve 9)

LTE'nin ilk sürümü 2005 yılında 3GPP ile çalışmalara başlanmış ve 4 yıl sonra LTE Release 8 olarak sonuçlanmıştır. LTE'nin bu yeni standardında hava ara yüzü iletim teknolojisinde uplinkte SC-FDM'ye ve downlinkte OFDM'ye karar verilmiştir. Buna tam özellikli çeşitli MIMO modları dahil edildi. LTE standardının (3GPP Release 8) ilk versiyonu Aralık 2008'de piyasaya sürülmüştür. Release 9 Aralık 2009'da geliştirilmiştir; birden çok standartlarını destekleyen baz istasyonları MBMS desteği, yer hizmetleri ve tahsil gibi yeni geliştirmeler dahil edilmiştir [23].

2.10. Gelişmiş (Advanced) LTE (Release 10)

LTE-Advanced Aralık 2010 yılında piyasaya sürülmüştür. LTE-Advanced, LTE teknolojisinin bir evrimidir ve yeni bir teknoloji olarak ifade edilmez. Gelişmiş LTE'ye taşıyıcı toplama (carrier aggregation), gelişmiş downlink MIMO, uplink MIMO ve röleler dahil edilmiştir [23].

3. LTE FİZİKSEL KATMANI

LTE bu katmanında uplink ve downlink veri iletişim protokollerini içerir. 3GPP terminolojisi, baz istasyonu Gelişmiş Düğüm Baz İstasyonu (eNodeB-enhanced Node Base station) olarak adlandırılır ve seyyar ünite Kullanıcı Ekipmanı (UE-User Equipment) olarak ifade edilir.

3.1. Hava Arayüzü

LTE hava ara yüzü downlinkte OFDM çoklu erişim teknolojisine ve uplinkte SC-FDM olarak bilinen iletişim teknolojisine dayanmaktadır. OFDM kullanımı alternatif çoklu erişim teknolojileri üzerinde önemli avantajlar sağlar. Avantajları arasında geniş bant veri aktarımı için yüksek spektral verimlilik ve adaptasyon, çok yollu sönmelenme nedeniyle semboller arası girişim için direnç, MIMO düzenleri için doğal destek ile frekans-seçici zamanlama olarak frekans alanı teknikleri için destek sağlar. OFDM zaman-frekans gösterimi, spektrumları ve zaman çerçevelerini iletim için yüksek düzeyde esnekliğini sağlayarak tahsis etmek için tasarlanır. LTE spektrum esnekliği frekans bantlarında çeşitliliği değil aynı zamanda bant genişliklerinin ölçeklenebilmesini de sağlar. LTE’de gecikmeyi en aza indirmek için 10 ms kısa bir kare boyutu kullanılır. Kısa çerçeve boyutlarını belirleyerek, LTE baz istasyonuna sağlanacak bağlantı uyarlamaları için zamanında gerekli geri bildirimler sağlayan, daha iyi bir mobil kanal kestirimi yapılmasına izin verir.

3.2. Frekans Bandı

LTE standartları farklı frekans bantlarında kullanılabilir radyo tayfında belirlenebilir. LTE standartlarının amaçlarından biri önceki mobil sistemlerle sorunsuz entegrasyonu sağlamaktır. Bu nedenle daha önceki 3GPP standartları için tanımlanan frekans bantları LTE dağıtımı için de kullanılabilir. Bu ortak bantlara ek olarak, bir kaç yeni frekans bantları da LTE standartlarına ilk kez eklenir. Bu frekans bantları yöneten düzenlemeler ülkeden ülkeye farklılık gösterir. Bu nedenle bu frekans bantlarını daha kolay küresel dolaşım mekanizması yapmak için herhangi bir servis sağlayıcı tarafından dağıtılıp yönetilebilmesi gereklidir.

Önceki 3GPP standartlarında olduğu gibi, LTE sırasıyla, eşleşmiş ve eşleşmemiş spektrumlar olarak belirtilen frekans bantları ile hem FDD ve TDD modlarını da destekler. FDD frekans bantları, iki frekansta eşzamanlı iletim sağlayan, downlink ve uplink için eşleştirilir. Eşleştirilmiş bantlar da gelişmiş alıcı performansı için yeterli ayrımlar ile belirtilir. Uplink ve downlinkte aynı kanal ve taşıyıcı frekansı paylaşan TDD frekans bantları, eşleşmemiş olarak bulunur. Uplink ve downlink yönlerinde zaman çoğullama bulunur.

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği Uluslararası Mobil Telekomünikasyon tarafından belirlenen Çizelge 3.1’de LTE için 3GPP’nin Release 11 özellikleri olan frekans bantlarının kapsamlı bir listesi görülmektedir [23]. 25 adet frekans bandı FDD modunda ve 11 tane frekans bandı ise TDD modundadır. Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi FDD dubleks modunda kullanılan eşleştirilmiş bantlar 1-25 arası numaralandırılmıştır. Çizelge 3.2’de ise TDD modunda kullanıldığında eşleşmemiş bantlar 33-43 arası numaralandırılmıştır. 6 numaralı bant LTE için geçerli değildir. 15 ve 16 numaralı İTÜ bölgesi 1’de rezerve edilmiştir.

Çizelge 3.1. E-UTRA için tanımlanan eşli frekans bantları

Çalışma bant indeksi	Uplink (UL) çalışma bandı frekans aralığı (MHz)	Downlink (DL) çalışma bandı frekans aralığı (MHz)	Çift yönlü mod
1	1920–1980	2110–2170	FDD
2	1850–1910	1930–1990	FDD
3	1710–1785	1805–1880	FDD
4	1710–1755	2110–2155	FDD
5	824–849	869–894	FDD
6	830–840	875–885	FDD
7	2500–2570	2620–2690	FDD
8	880–915	925–960	FDD
9	1749,9–1784,9	1844,9–1879,9	FDD
10	1710–1770	2110–2170	FDD
11	1427,9–1447,9	1475,9–1495,9	FDD
12	699–716	729–746	FDD
13	777–787	746–756	FDD
14	788–798	758–768	FDD
15	Rezerve edilmiş	Rezerve edilmiş	FDD
16	Rezerve edilmiş	Rezerve edilmiş	FDD
17	704–716	734–746	FDD
18	815–830	860–875	FDD
19	830–845	875–890	FDD
20	832–862	791–821	FDD
21	1447,9–1462,9	1495,9–1510,9	FDD
22	3410–3490	3510–3590	FDD
23	2000–2020	2180–2200	FDD
24	1626,5–1660,5	1525–1559	FDD
25	1850–1915	1930–1995	FDD

Çizelge 3.2. E-UTRA için tanımlanmış çiftlenmemiş frekans bantları

Çalışma bant indeksi	Uplink (UL) ve Downlink (DL) çalışma bandı frekans aralığı (MHz)	Çift yönlü mod
33	1900–1920	TDD
34	2010–2025	TDD
35	1850–1910	TDD
36	1930–1990	TDD
37	1910–1930	TDD
38	2570–2620	TDD
39	1880–1920	TDD
40	2300–2400	TDD
41	2496–2690	TDD
42	3400–3600	TDD
43	3600–3800	TDD

3.3. Tek Nokta (Unicast) ve Çok Nokta (Multicast) Yayın Hizmetleri

Mobil iletişimde, normal mod iletimi bir tek noktaya yayın iletimi olarak bilinir ve iletilen veriler, tek bir kullanıcı için tasarlanır. Tek noktaya hizmetlerinin yanı sıra LTE standartları MBMS olarak bilinen bir iletim modunu destekler ve MBMS TV, radyo yayıncılığı ve ses ve video akışı gibi yüksek veri hızında multimedya hizmetlerini sunar [21]. MBMS'nin kendine has trafik ve kontrol kanalları vardır ve multimedya yayın tek frekans ağı (MBSFN-Multicast/Broadcast over Single Frequency Network) hizmet alanını oluşturan birçok hücreli iletim şemasına dayanır. Bir multimedya sinyal belirli bir MBSFN hizmet alanına ait birden fazla bitişik hücrelerden iletilir. Çok yöne yayın kanalının (MCH-Multicast Channel) içeriği farklı hücrelerden iletildiğinde, aynı alt taşıyıcısı üzerine sinyallerin tutarlı bir UE ile bir araya getirilir. Bu SNR önemli bir gelişme ile sonuçlanır ve önemli ölçüde, multimedya iletimi için izin verilen en yüksek veri hızını artırır ve bir tek noktaya veya birçok noktaya yayın modunda birçok parametre ve sistem çalışması bileşenlerini etkiler.

3.4. Bant Genişliği Tahsisi

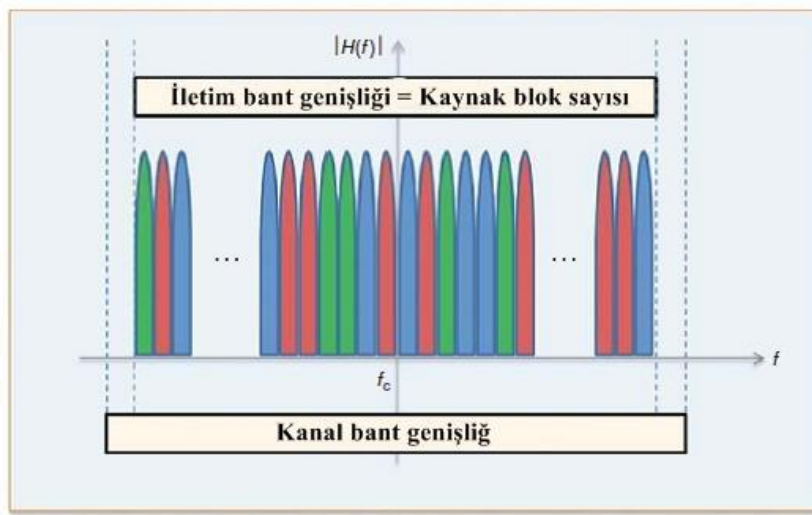
IMT-Advanced ana hatları LTE standartlarında spektrum esnekliği gerektirir. Bu frekans alanında 1,4 MHz'den, 20 MHz'ye kadar spektrum tahsislerinin ölçeklenebilmesine izin verir. LTE frekans spektrumları 12 alt taşıyıcıların oluşturduğu kaynak blokları birbirine bağlanarak oluşturulur. Alt taşıyıcıların 15 kHz ile ayrılması nedeniyle, bir kaynak bloğunun toplam bant genişliği 180 kHz'dir. Bu, tek bir frekans taşıyıcı üzerinde 6-110 arası kaynak blokları iletim bant genişliği yapılandırmaları sağlar. Bundan dolayı LTE standardı çoklu-iletim yapısından dolayı gerekli spektrum esnekliği sağlamak için 180 kHz'lik adımlarla 1,4 Mhz ile 20 MHz'ye kadar kanal bant genişlikleri için izin verir.

Çizelge 3.3 kanal bant genişliği ve LTE RF taşıyıcı üzerinden iletilen kaynak blok sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 3-20 MHz bant genişliği için, iletim bant genişliği kaynak bloklarının toplamı kanal bant genişliği yaklaşık % 90 kaplar. 1,4 MHz durumunda, yüzde yaklaşık % 77 düşer.

Çizelge 3.3. LTE için belirtilen kanal bant genişlikleri

Kanal bant genişliği (MHz)	Kaynak blok sayısı
1,4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

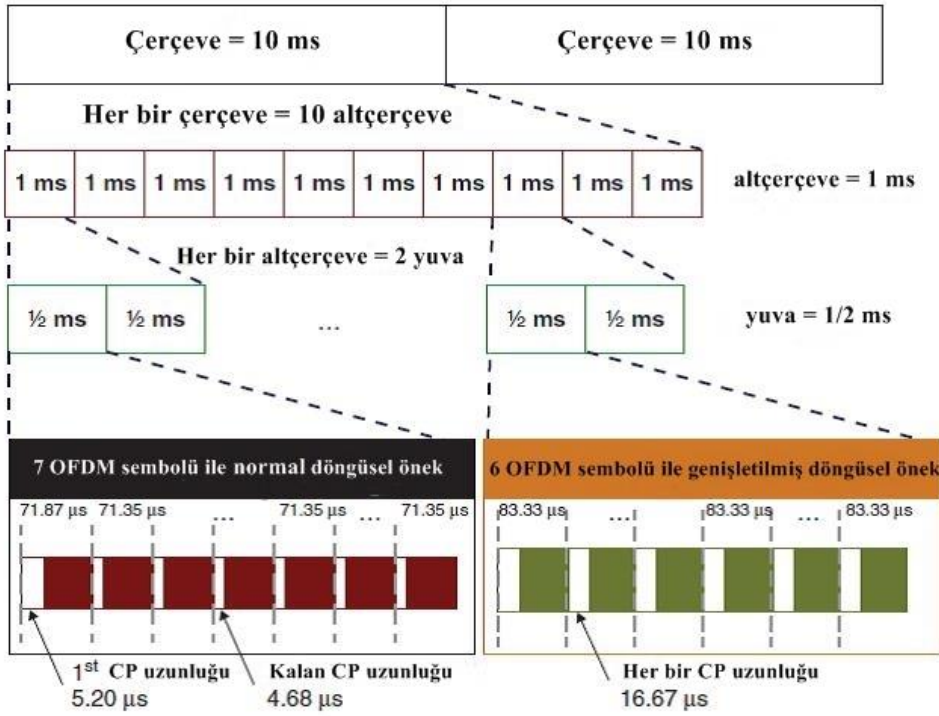
Bu, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi, bant genişliği dışında istenmeyen emisyonları azaltmaya yardımcı olur. Şekilde spektrumun, kaynak ızgara ve blokların zaman-frekans gösterimi ifade edilmektedir.



Şekil 3.1. Kanal bant genişliği ve kaynak blok sayısı arasında ilişkisi

3.5. Zaman Çerçevelemesi

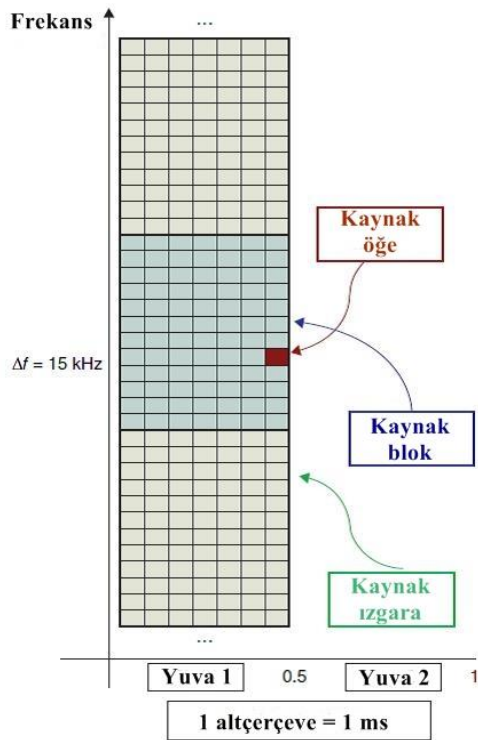
LTE zaman bölgesi yapısı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. LTE iletim anlayışı verilerin zaman-frekans gösterimine dayanır. Bu kaynak ızgara olarak bilinen haritalar kaynak ızgara nihayet iletimi için OFDM sembolleri haline dönüştürülür. Zaman alanında, LTE, uzunluğu 10 ms radyo çerçevesinin bir dizi olarak iletimi düzenler. Her çerçeve daha sonra uzunluğu 1 ms için 10 alt çerçevelere bölünmüş olup her bir alt-çerçeve uzunluğunun iki yuvasının her biri 0,5 ms’den oluşur. Son olarak her bir yuva OFDM simgeleri bir dizi içerir. Bağlı olarak 6 ya da 7 normal veya uzatılmış bir döngüsel önek kullanılır.



Şekil 3.2. LTE zaman bölge alanı yapısı

3.6. Zaman-Frekans Gösterimi

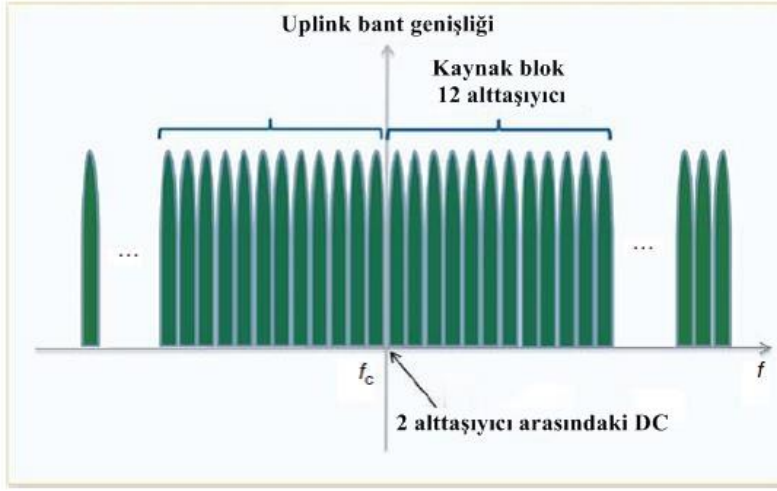
OFDM'nin en dikkat çekici özelliklerinden biri iletilen sinyal için bir zaman-frekans gösteriminde açıkça eşler olduğudur. Kodlama ve modülasyondan sonra karmaşık değerli değiştirilmiş sinyalin bir dönüştürülmüş versiyonu fiziksel kaynak elemanı, kaynak ızgara zaman frekans koordinat sistemi üzerine eşleştirilip kaynak ızgara y-ekseni üzerinde frekans, x-ekseni üzerinde zaman olarak yerini alır. Kaynak öge x koordinatını zamanında ait OFDM simgesi gösterir. y-koordinatı o frekansta ait olduğu OFDMA alt taşıyıcısını belirtir. Şekil 3.3'te döngüsel önek kullanıldığında LTE downlink kaynak ızgarasını göstermektedir.



Şekil 3.3. Kaynak öge, blok ve ızgara

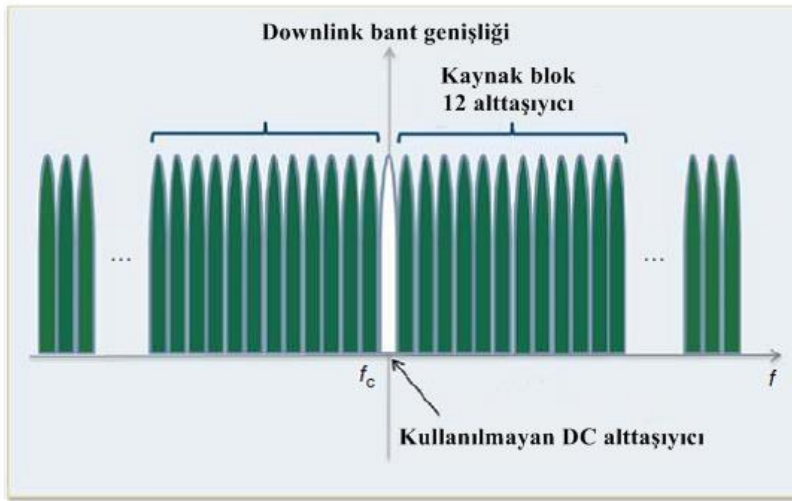
Bir kaynak elemanı, bir OFDM simgesi ve alt taşıyıcısının kesişme noktasında yer alır. Alt taşıyıcı aralığı 15 kHz ve normal döngüsel önek halinde, alt çerçeve başına 14 OFDM sembolü veya yuva başına 7 sembol vardır. Bir kaynak bloğun tanımı, 12 alt taşıyıcıya tekabül eden kaynak elemanının bir grup olarak veya frekans alanında 180 kHz ve zaman alanında bir yuva 0,5 ms olarak yapılır. Yuva başına 7 OFDM simgesi ile normal döngüsel önek durumunda, her bir kaynak bloğu 84 kaynak elemanından oluşur. Yuva başına 6 OFDM simgesi genişletilmiş bir döngüsel önek durumunda, kaynak bloğu 72 kaynak öge içerir. Bir kaynak blok tanımı önemlidir, çünkü iletimin küçük birimini temsil ettiği bu frekans alanı planlamasına tabidir. Daha önce ele alındığı gibi, LTE PHY özellikleri, bir RF taşıyıcı frekans alanında kaynak blokları herhangi bir sayıda oluşmasını sağlar ve kaynak blokları en az 6 ile en fazla 110 kaynak blokları arasında değişir. Bu 1,4 MHz ile 20 MHz arası iletim bant genişliğine karşılık gelir, 15 kHz boyu ile LTE bant genişliği esnekliği çok yüksek bir değişebilirlik derecesine olanak sağlar. Kaynak bloğu tanımı hem downlink hem de uplink iletimi içinde aynı şekilde geçerlidir. Alt taşıyıcılar ile ilgili taşıyıcı merkez frekansı konumu göre downlink ve uplink arasında küçük bir fark vardır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi uplink hattı olarak, herhangi bir kullanılmamış doğru akım

(DC-Direct Current) alt taşıyıcısı tanımlanır ve bir uplink hattı taşıyıcısının merkez frekansı iki uplink hattı alt taşıyıcılar arasında yer alır.



Şekil 3.4. Uplink iletim hattı frekansının kaynak blokları ve DC bileşenleri

Downlinkte, taşıyıcı merkez frekansı ile alt taşıyıcı çakışır, kullanılmayan DC alt taşıyıcı bırakılır. Bu Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Downlink iletim hattı frekansının kaynak blokları ve DC bileşenleri

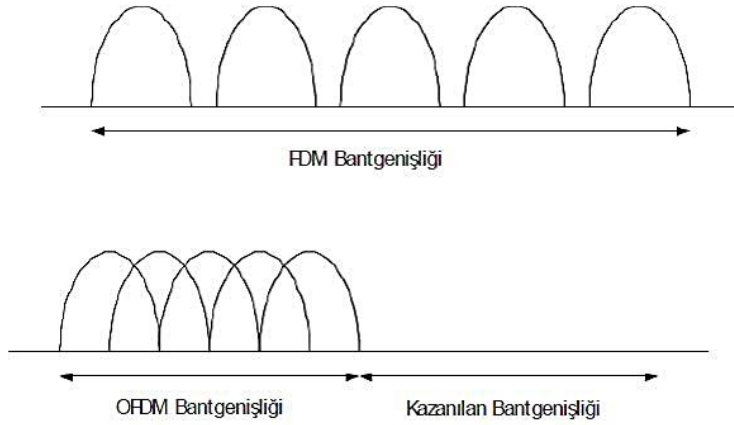
DC alt taşıyıcı downlink için kullanılmaz; nedeni orantısız ölçüde yüksek girişim (high interference) mevcut olma olasılığıdır. Alt taşıyıcı aralığı olarak 15 kHz seçimi OFDM ile mükemmel bir uyum sağlar. Bu frekans-seçici kanal verimli çözünürlükle frekans-düz alt kanala döner. Bu dönüşte, düşük-karmaşıklık denkleştirici bir banka ile frekans-seçici

sönümlenmesinde OFDM verimli olarak yardımcı olur. Bu, frekans alanında her düz sönümlü alt kanala uygulanır.

3.7. OFDM Çoklu Taşıyıcılı İletimi

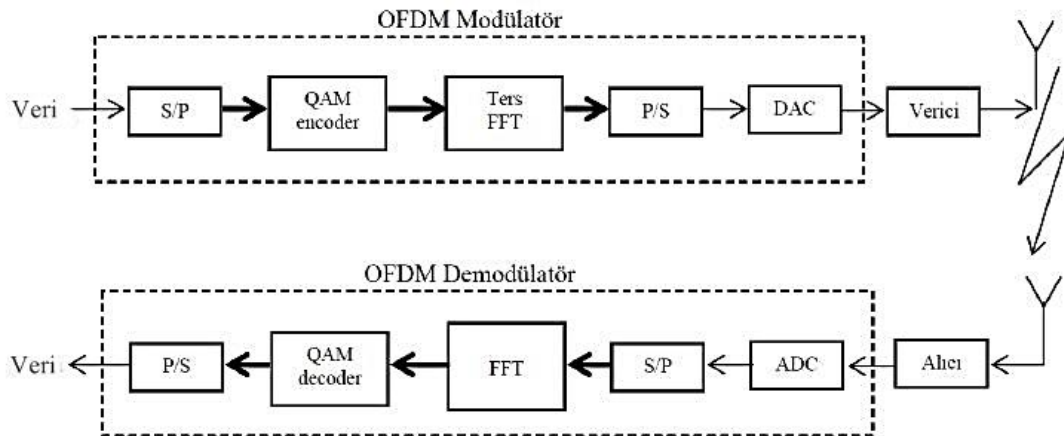
Frekans seçimli kanallarda sinyal iletimi için yaygın olarak kullanılan bir teknikte frekans bölmeli çoğullama (FDM-Frequency Division Multiplexing) tekniğidir. Bu tekniğin temelinde, kanal bant genişliği bölünmesi her bir taşıyıcı için tahsis edilmiş frekanslarda düşük hızlardaki taşıyıcıların çoğullanması var olup alıcıda sinyalleri birbirinden ayırmak için taşıyıcı frekans boşluklarının birbiri üzerine binmemesi gerekmekte olduğu için bu elzem gereklilik, frekans spektrumundan tam olarak verim alınmasını engeller. OFDM bant genişliğinden daha fazla yararlanmak için bu teknik icat edilmiştir [44]. Teknik ilk defa 1971 senesinde yüksek frekanslı askeri uygulamalarda kullanılmıştır. Bu uygulamalara Weinstein ve Ebert tarafından önerilmiştir. En anlaşılır şekilde OFDM, her taşıyıcı diğer taşıyıcıya dik olacak şekilde taşıyıcı aralığı tanımlanmış, çok taşıyıcılı bir modülasyon türü olarak tanımlanır. OFDMA, dikgen frekans bölmeli çoğullama erişimidir.

Şekil 3.6'da klasik bir FDM sisteminde ve OFDM sisteminde kanalların yerleşimi ile kazanılan bant genişliği gösterilmektedir. OFDM ile FDM arasındaki en temel fark; FDM'de çok taşıyıcı bulunmasına karşın bunlar birbirine dik değildir, fakat OFDM sisteminde taşıyıcı spektrumları birbiri üzerine binip ve bu taşıyıcıların birbirlerine dikgen olması sayesinde spektral verimlilik sağlanır. Genel olarak veri akışını düşük hızlı alt taşıyıcılara bölerek paralel kanallarda ileten bir modülasyon ve çoğullama tekniği olan OFDM'de, bu alt taşıyıcılar sayesinde mevcut bant genişliği bölünüp, her bir taşıyıcı için yeterli bir şekilde frekans ayrılarak bu alt taşıyıcıların dikgen olması sağlanır. Her bir taşıyıcının bir sembol periyodu üzerinde tam sayı periyotlara sahip olması taşıyıcılar arasındaki dikgenliğin anlamını belirtir. Bu sayede her bir taşıyıcının spektrumu, sistemdeki diğer taşıyıcıların her birinin merkez frekansında bir sifıra sahip olur ve sonuçta taşıyıcılar arasında spektral olarak üst üste binme olmasına rağmen herhangi bir girişim meydana gelmez. Taşıyıcılar arasındaki bu ayrıklık teorik olarak minimum seviyede olmasından dolayı çok iyi bir şekilde spektral verimlilik sağlanır [26,44].



Şekil 3.6. FDM ile OFDM'nin karşılaştırılması

Her bir alt taşıyıcı düşük veri hızlarında çalışmasına rağmen, fazla miktarda alt taşıyıcı kullanılarak toplamda yüksek veri hızları elde edilebilir. Semboller arası girişim etkisi, çok küçük ya da OFDM sisteminin çalışmasını etkilemeyecek yapıda olmalı ve bu sayede alıcı tarafta bir dengeleyiciye gerek duyulmaması gerekir [44]. Bir OFDM sisteminin temel olarak blok diyagramı Şekil 3.7'deki gibidir.



Şekil 3.7. OFDM sistemine ait blok diyagram [25]

Kısaca OFDM modülasyonu, sistemin girişine gelen analog veriler önce paralele çevrilir. Paralel hat sayısını belirleyen etken, kullanılacak olan bant genişliğidir. Eğer bant genişliği çok büyükse alt taşıyıcı sayısı arttırılabilir. Alt taşıyıcılar, blok periyodu T olmak üzere $1/T$, $2/T$, $3/T$, ... olarak alınıp QAM encoder vasıtasıyla veriler sayısala çevrilir. Daha sonra ters hızlı fourier dönüşümü (IFFT-Inverse Fast Fourier Transform) işlemi yapılır.

OFDM, giriş verisine ve kullanılan modülasyon işlemine bağlı olarak gereken spektrum seçilerek meydana getirilir ve kanalda meydana gelebilecek bozulmalara karşı kanal kodlaması ve serpiştirme yapılır. Üretilecek her bir taşıyıcı, iletim için tahsis edilir. Gerekli olan taşıyıcı ve genlik fazı modülasyon işlemine (tipik olarak ikili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK-Binary Phase Shift Keying, QPSK veya QAM) bağlı olarak hesaplanır. Daha sonrasında IFFT bu spektrumunu zaman alanı sinyaline çevirir. Hızlı fourier dönüşümü (FFT-Fast Fourier Transform), periyodik zaman alanı sinyalini kendisinin karşılığı olan frekans spektrumu sinyaline dönüştürür. Karşılık dalga şeklini bularak dikgen sinozoidal parçaların toplamı bulunur. Sinozoidal parçaların genlik ve fazı, zaman alanı sinyalinin frekans spektrumunu gösterir. OFDM’de ters ayrık Fourier dönüşümü kullanılmakta ve bu sayısal işaret işleme tekniği sayesinde sistemdeki alt taşıyıcıların bir birlerine dikgen olması sağlanır [44].

OFDM sistemlerinde ters hızlı Fourier dönüşümü ya da hızlı Fourier dönüşüm algoritmaları, sinyalin modülasyonu ve demodülasyonunda kullanılır. IFFT/FFT vektörünün boyutu, çoklu yol kanalı tarafından ortaya çıkarılan hatalara karşı sistemin direncini belirler. Bu vektörün zaman aralığı, alınan çoklu yol sinyalindeki yankılanmaların maksimum gecikmesinden daha büyük olarak seçilmelidir [44]. Çünkü çoklu yol bozulmalarına karşı dayanıklı, kanal içi, simgeler arası girişimi engelleyici bir teknik olan OFDM, tek taşıyıcılı sistemlere göre daha basit kanal eşitleyiciye ihtiyacı vardır. OFDM hata düzeltme kodu kullanıp güvenli daha verimli bir iletişim sağlar. Anlık gürültü ve çoklu yol bozulmalarından kaçınarak izin verilen bant genişliğinin tamamını kullanan OFDM radyo sinyalini çok daha küçük alt sinyallere bölüp aynı anda farklı frekanslardan alıcıya gönderme prensibiyle çalışmakta ve bu sayede spektrum verimliliğini maksimum düzeyde tutmaktadır. OFDM, zamanla hızlı değişen çok yollu sönmölmelere ve semboller arası girişimlere dayanıklı olmaları yönüyle yeni nesil geniş bantlı telsiz iletişim sistemleri için literatürde verimli bir yöntem olarak kabul edilir.

OFDM tekniğinde yüksek bit hızına sahip olan veri, çok daha düşük hızlı paralel alt bantlara ayrılıp birbirine dik taşıyıcılarla modüle edilip sonrasında dikgen alt taşıyıcılar arasında, frekans spektrumunda her taşıyıcının tepe noktasında diğer tüm taşıyıcılar 0 değerini alır. Her alt taşıyıcının T periyodundaki kendi döngüsü tam sayıdır. Komşu iki alt taşıyıcı arasındaki döngü sayısı farkı 1’dir.

Bir seri veri iletişimde her bir işaret frekans spektrumu kullanılabilir bant genişliğinin tümünü kaplamasına izin verilecek şekilde sıralı olarak gönderilir. Paralel bir veri iletişimde, seri iletişimde görülen birçok sorunun sistem üzerindeki etkisinin azaltılmasına olanak sağlar. Paralel bir sistem bir anda birden fazla sıralı veri dizilerinin aynı anda iletildiği ve buna bağlı olarak birden fazla verinin iletilebildiği bir sistemdir. Sistemde her bir veri işaretin frekans spektrumu kullanılabilir bant genişliğinin sadece bir bölümünü kaplar. Paralel sistem yaklaşımı, frekansa bağlı zayıflamanın simgeler üzerinde dağıtılması avantajına sahiptir. Bu zayıflama ve darbe girişimi sebebiyle birde ortaya çıkan hataların etkili bir şekilde, rastgele dağılmasını önler ve bu sayede ardışık verilerin tamamen zarar görmesi yerine çoğu simge az miktarda zarar görür. Bu durum ileri yönde hata düzeltme (FEC-Forward Error Correction) olmaksızın bile simgelerin büyük bir kısmının başarılı bir şekilde elde edilmesini sağlar. Kanal bant genişliğinin tamamının dar alt bantlara bölünmesinden dolayı, her bir alt bantın frekans yanıtı göreceli olarak düzdür. Her alt kanal asıl kanal genişliğinin belirli bir bölümünü kapladığı için kanal eşitleme işlemi seri sistemlere oranla daha başarılıdır.

OFDM sinyal üretimi dahil birden çok adım vardır. İlk olarak modüle edilmiş veriler kaynak ızgara üzerine eşlenir, daha sonra onlar frekans alanında organize edilir ve hizalanır. Her bir modüle edilmiş sembol a_k , frekans ekseninde tek bir alt taşıyıcıya atanır. Bant genişliği ve alt taşıyıcı aralığı arasındaki ilişki:

$$BW = N_{rb}\Delta f \quad (3.1)$$

formülü ile ifade edilir. N alt taşıyıcılardır. Her alt taşıyıcı f_k birçok alt taşıyıcı aralığı bir tamsayı olarak kabul edilebilir:

$$f_k = k\Delta f \quad (3.2)$$

OFDM modülatörü tek bir alt taşıyıcı karşılık gelen N karmaşık modülatörlerinin bir bankasından oluşur. OFDM, modüle edilmiş çıktısı $x(t)$ bu şekilde ifade edilir:

$$x(t) = \sum_{k=1}^N a_k e^{j2\pi f_k t} = \sum_{k=1}^N a_k e^{j2\pi k \Delta f t} \quad (3.3)$$

Kanal örnek oranı F_s ve kanal örnek süresi $T_s = 1/F_s$ olduğunu varsayarsak, OFDM kipleycisine ayrık zamanlı gösterim olarak ifade edilebilir:

$$x(n) = \sum_{k=1}^N a_k e^{j2\pi k \Delta f n / N} \quad (3.4)$$

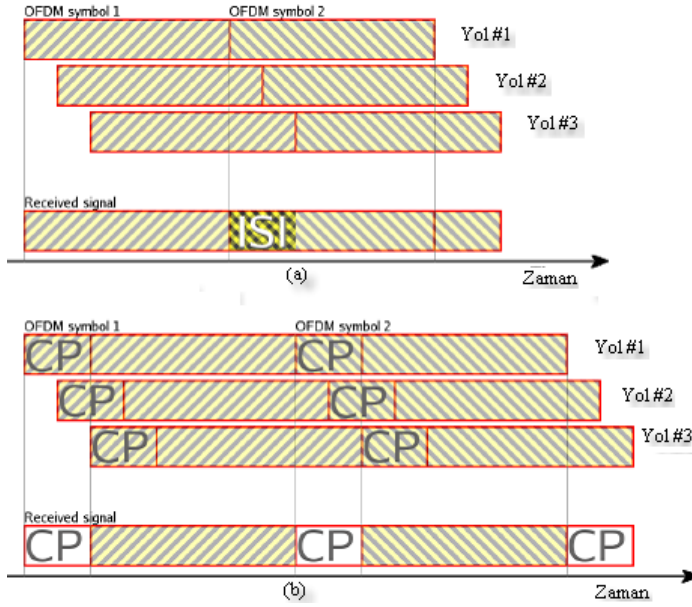
OFDM modülasyon kendisini doğal olarak IFFT tabanlı etkin dönüşüme uyarlar. OFDM modülasyonundan sonra bir OFDM simge üretilir ve bir döngüsel önek ile modüle edilmiş bir sinyal eklenir. Bir döngüsel önekin eklenmesi esasen başına OFDM sembolünün son bölümünün başlangıcına kopyalanmasıdır.

3.7.1. Döngüsel önek

Şekil 3.8’de gösterilen döngüsel önek uzunluğu bir çoklu taşıyıcı iletim sistemi için önemli bir tasarım parametresidir. Bir yandan döngüsel önek uzunluğu hücresel ortamlarda karşılaşılan tipik yayılma gecikme süresi için yeterli olmalıdır. Öte yandan, periyodik önek gereksiz veri ve gerekli yükü temsil eder. “Öneki” adın da anlaşılacağı gibi, alınan OFDM sinyalinin ilk kısmında alıcıda atılır. Bu nedenle LTE yükünü en aza indirmek ve spektral verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için, mümkün olduğu kadar küçük bir döngüsel önek belirtmek gerekir. Bu dengede çözmek için, LTE yayılım kanalı beklenen gecikme yayılması gibi döngüsel önek uzunluğunu belirtir ve hatalı kusurlu zamanlama için bir hesap marjı sağlar.

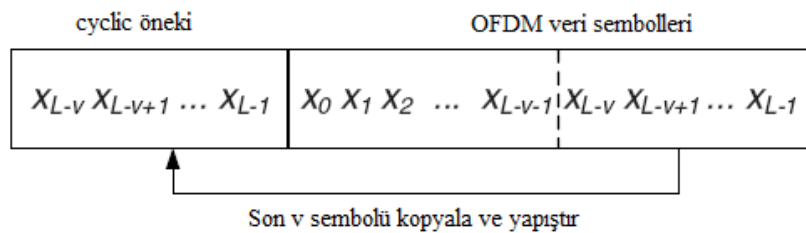
Alt taşıyıcılar zaman dağıtıcı (ayırıcı, dispersive) kanal içerisinden geçerken taşıyıcılar arası etkileşimden (ICI-Inter Carrier Interference) ve semboller arası etkileşimden ötürü dikgenliklerini OFDM iletiminde kaybeder. Genellikle frekans seçimli çoklu yol tarafından oluşturulan semboller arası girişim (ISI-Inter Symbol Interference) problemine karşı da kullanılan bir tekniktir [44]. Bu yolla ISI azaltılabilir. Bunun için en uygun yöntem, art arda gelen OFDM çerçeveleri arasına koruma aralığı döngüsel önek (CP-Cyclic Prefix) kanal gecikmesinden büyük olacak şekilde seçilerek- eklenerek ISI etkisi tamamen ortadan kaldırılır. Bu koruma aralığı her biri farklı sembollerle modüle edilmiş alt taşıyıcıları birbirinden ayırarak iletimin sorunsuz gerçekleşmesini sağlar, ancak bant genişliğinin verimli kullanılmamasına neden olur.

İletilen OFDM sembollerinin bölünmüş parçaları çoklu-yol nedeniyle üst üste biner bu da yapıcı veya bozucu etkileşime neden olur. Bu nedenle alınan sembolün spektral içeriği değişir (ISI, olası ICI'nin nedenlerinden birisidir). Sistem performansı etkileşim nedeniyle azalır. Şekil 3.8 (b)'de ise önekin kullanılmasıyla ISI nedeniyle oluşan katlanmanın giderildiği gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Semboller arası etkileşim ve döngüsel önekin kullanımı [24]. (a) Döngüsel önekinin kullanılmadığı (b) kullanıldığı durumlar

Döngüsel önekinin yararı iki tanedir. Birincisi, semboller arasında güvenlik boşluğu gibi davranarak ISI'yı önler. İkincisi, döngüsel önekin birim kanal cevabı ve iletilen işaret arasındaki doğrusal konvolüsyonu döngüsel konvolüsyonuna da çevirmektedir. Zaman alanında döngüsel konvolüsyonu frekans alanında matematiksel çarpıma karşılık gelir, bu nedenle alt taşıyıcılar dikgen kalmakta ve ICI olmamaktadır. BER performansı muhafaza edilmesine rağmen, tayf verimliliği genişletilmiş sembol zamanı nedeniyle azalır.



Şekil 3.9. Döngüsel önekin

Şekil 3.9'dan da görüleceği gibi döngüsel öneki veri sembollerinin son örneklerinin kopyalanıp işaretin başına eklenmesiyle elde edilir. Eğer en büyük kanal gecikmesi $v+1$ örnek süresi kadar olursa, OFDM sembolleri arasına en azından v örneklik güvenlik bandı eklenerek, OFDM sembolünün önce veya sonra gelmesinden bağımsız olur. Bu nedenle sadece tek bir OFDM sembolü düşünülür. L uzunluklu OFDM sembolü zaman alanında aşağıdaki gibi verilir.

$$x=[x_1 x_2 \dots x_L] \quad (3.5)$$

Döngüsel öneki eklendikten sonra iletilen işaret,

$$x_{cp}=[x_{L-v} x_{L-v+1} \dots x_{L-1} x_0 x_1 \dots x_{L-1}] \quad (3.6)$$

biçiminde verilir.

Çizelge 3.4. Normal ve genişletilmiş döngüsel önek özellikleri

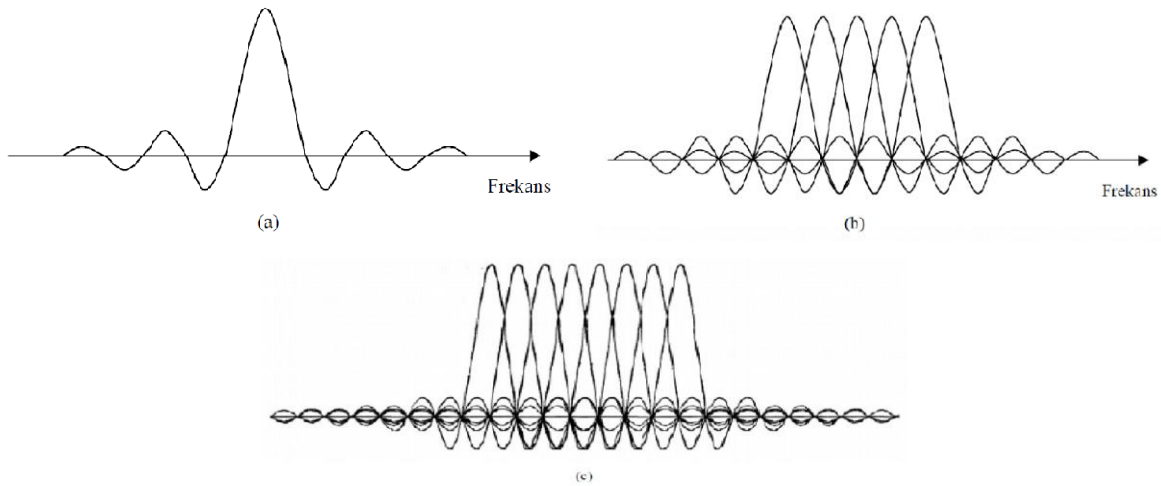
	Alt taşıyıcı aralığı (Δf) (kHz)	Kaynak blok başına alt taşıyıcıların sayısı	Kaynak bloğu başına OFDM sembollerinin sayısı
Normal döngüsel önek	15	12	7
Genişletilmiş periyodik önek	15	12	6
	7,5	24	3

Çizelge 3.4'te görüldüğü gibi, LTE standardı üç farklı döngüsel önek değerlerini belirtir: normal (4,7 μs) , genişletilmiş (16,6 μs) alt taşıyıcı aralığı 15 kHz ve genişletilmiş (33 μs) alt taşıyıcı aralığı 7,5 kHz'dir. 7,5 kHz alt taşıyıcı aralığı sadece çok noktaya yayın bağlamda kullanılır. 4,7 μs normal döngüsel önek uzunluğu çoğu kentsel ve banliyö ortamlar üzerinden yapılan yayın için uygun olup bu ortamlar için tipik gecikme yayılma değerlerini yansıtır. Her OFDM modüle sembol tarafından işgal süresi yaklaşık 66,7 μs olduğu göz önüne alındığında, normal modda, döngüsel önek yaklaşık % 7 arasında bir yük oluşur. Uzunluğu 16,7 μs bir döngüsel önek ile % 25 yük ile ilişkilidir. Bu oldukça

aşırı yükü uzun gecikme yayılması ve yayın hizmetleri için kırsal ortamlar üzerinden yapılan yayın için gereklidir.

3.7.2. Alt taşıyıcıların üretimi ve alt taşıyıcı aralığı

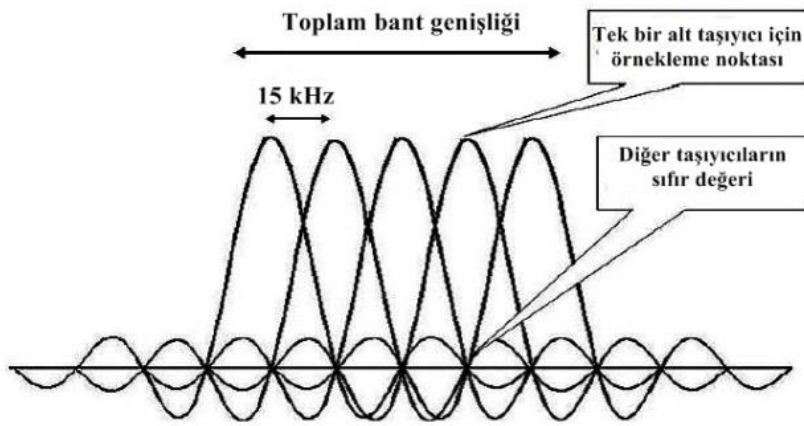
OFDM tekniğinde alt taşıyıcıların birbirine dik olacak şekilde üst üste bindirilmesi işlemi ayrık fourier dönüşümü (DFT-Discrete Fourier Transform) kullanarak gerçekleştirir. 1971 yılında Weinstein ve Ebert modülasyon ve demodülasyon işleminin bir parçası olarak paralel bilgi iletim sistemlerine ayrık fourier dönüşümünü uygulamıştır. (a) alt taşıyıcıya ait bilginin spektrumunu (b) ise her alt taşıyıcının iletim hızına eşit frekans aralıklı müstakil spektrum içindeki OFDM işaretini gösterir. Şekil 3.10 her bir alt taşıyıcının frekans merkezinde başka kanallardan çapraz girişim olmadığını göstermektedir. Bu nedenle alıcıda DFT kullanırsa ve her bir alt taşıyıcının merkez frekansında ilintisini hesaplanırsa çapraz girişim olmadan iletilen bilgi tekrar elde edilebilir. Buna ek olarak DFT tabanlı çok taşıyıcı tekniğini kullanarak frekans bölmeli çoğullama sadece bant geçiren süzme ile değil, aynı zamanda temel bant işlemi ile elde edilir.



Şekil 3.10. (a) OFDM alt kanalının spektrumu, (b) OFDM sinyalinin spektrumu, (c) Alt taşıyıcılı bir OFDM işaret spektrumu [25]

LTE standardında baz istasyonu-mobil cihaz iletimi bir OFDM ve mobil cihaz-baz istasyonu iletimi SC-FDM olarak bilinen yakın ilişkili metodolojiye dayanır. OFDM, bir çoklu-iletim yöntemi olup, bir çok dar alt kanal koleksiyonu olarak geniş bant iletim bant genişliğini temsil eder. OFDM erişim tekniğine göre, veriler büyük bant genişlikli tek

taşıyıcı yerine merkez frekansı etrafında daha küçük alt taşıyıcılara ayrılarak gönderilir ve her bir alt taşıyıcının istenen örnekleme anında komşu alt taşıyıcının sıfır değeri olması sağlanır. Böylelikle taşıyıcılar arasında dikgenlik sağlanır. LTE’de alt taşıyıcılar arasında frekans farkı 15 kHz olarak belirlenmiş olup, Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

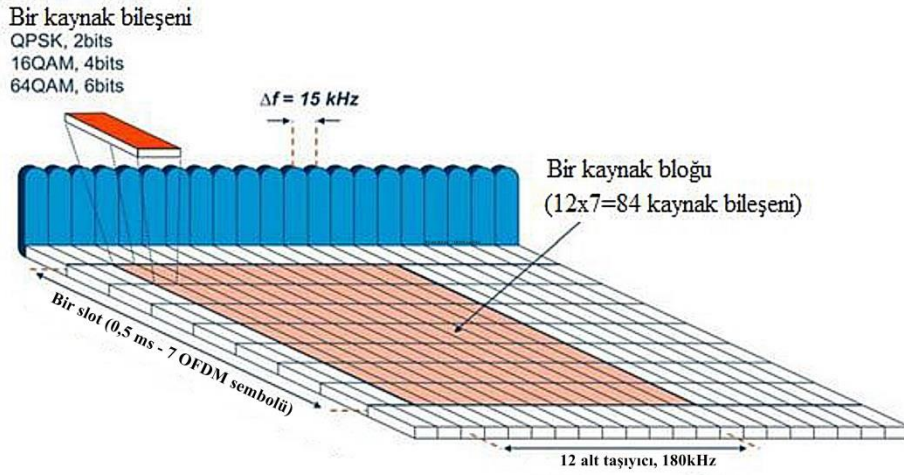


Şekil 3.11. OFDM sinyali

LTE downlinki daha ayrıntılı inceleyecek olursak, frekans alanında tüm alt taşıyıcılar arasında 15 kHz fark bulunurken her bir OFDM sembolünde koruma zamanı olarak periyodik önek eklenmiştir. OFDM sembolünün devam süresi ise $1/\Delta f$ + periyodik önek olur. Bir kaynak bileşeni QPSK, 16-QAM, 64-QAM ile farklı sayıda bit taşır.

3.7.3. Kaynak blok ve frekans alanı planlama

OFDM sembolleri kaynak blokları şeklinde gruplanır. Bir kaynak bloğu baz istasyonu programında tanımlanan en küçük bant genişlikli birimdir. Bir kaynak bloğu frekans alanında 12 alt taşıyıcı toplam 180 kHz, zaman alanında ise 0,5 ms 7 OFDM sembolünden oluşur (normal periyodik önek kullanıldığı durumda). Şekil 3.12’de gösterildiği gibi her 1 ms iletim zaman aralığı (TTI-Transmission Time Interval) iki slottan (yuvadandan) oluşur. Her kullanıcı zaman-frekans alanında birkaç kaynak bloğuna yerleşmiştir. Kullanıcı ne kadar çok kaynak bloğuna yerleşirse, kaynak bileşenlerinde o derece yüksek modülasyon olur. Bununla birlikte daha yüksek bit hızlarına ulaşılır.



Şekil 3.12. Zaman-frekans düzleminde OFDM sembollerinin yerleşimi [27]

Hangi bant genişliği seçilirse seçilsin kaynak bloklarının büyüklüğü sabittir. Fakat kaynak bloklarının sayısı değişebilir. Çizelge 3.5'te farklı bant genişliklerinde kaynak blokları sayısı görülmektedir.

Çizelge 3.5. Bant genişliklerine karşılık kaynak bloğu sayısı [28]

Kanal bant genişliği (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Kaynak bloğu sayısı	6	15	25	50	75	100

Bir aşağı yönlü slot 6 veya 7 tane OFDM sembolü içerebilir. Bu sayı periyodik önekin normal periyodik önek veya genişletilmiş periyodik önek seçilmesi durumuna göre değişir. Genişletilmiş periyodik önek radyo kanalının yayılım gecikmesi ile daha geniş hücreleri kapsar. Periyodik önek uzunlukları Çizelge 3.6'da görülmektedir.

Çizelge 3.6. Periyodik önek uzunlukları [29]

	Kaynak blok genişliği	Sembol sayısı	Örnekler içinde periyodik önek uzunluğu	μs cinsinden periyodik önek uzunluğu
Normal periyodik önek	12	7	İlk sembol için 160 diğer semboller için 144	İlk sembol için 5,2 μs diğer semboller için 4,7 μs
Genişletilmiş periyodik önek	12	6	512	16,7 μs

LTE farklı sistem bant genişliklerini destekler. OFDM ve SC-FDM bir IFFT operasyonu ile iletilen sinyali üretir. Böylece farklı FFT uzunlukları seçerek, farklı bant genişlikleri sağlanır. Ne olursa olsun kullanılan bant genişliği, LTE 66,7 μs sabit bir değerde, OFDM sembol süresini sabit tutar. Bu tüm bant genişliği için alt taşıyıcının 15 kHz olarak kullanılmasını sağlar. Bu tasarım seçenekleri aynı frekans alanı eşitleme teknikleri, çoklu bant genişliği boyunca uygulanabilir olmasını sağlar. Sabit sembol süreleri olması da farklı bant genişliklerinde aynı alt çerçeve uzunluğuna sahip olması demektir. Bu büyük ölçüde iletim modelinin zaman çerçevelemesini kolaylaştıran bir özelliktir. Her bir bant genişliği kullanılan gerçek FFT boyut standardı olarak belirtilmemiş olsa da 2048 FFT boyutu genellikle 20 MHz ile ilişkilidir. Çizelge 3.7’de diğer bant genişlikleri için FFT boyutları, genellikle bu değer ölçekli aşağı sürümleri görüldüğü gibidir.

Çizelge 3.7. Her LTE bant genişliği için kaynak blokları, FFT ve döngüsel önek boyutları

Downlink iletim alt çerçeve süresi (1 μ s) alt taşıyıcısı aralığı (15 kHz) için OFDM parametreleri						
Bant genişliği (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Örnekleme frekansı (MHz)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
FFT boyutu	128	256	512	1024	1536	2048
Kaynak blokları sayısı	6	15	25	50	75	100
Yuva başına OFDM sembolleri	(Normal/genişletilmiş) 14/12					
CP uzunluğu	(Normal/genişletilmiş) 4,7/5,6					

3.7.4. Tipik alıcı işlemleri

Alıcı kısmında, verici işlemlerinin tersine dönüştürme işlemleri gerçekleştirilir. OFDM alıcı, OFDM sinyal üretim ve iletim faaliyetlerini tersine çevirir. Öncelikle aldığımız OFDM sembolünün başından itibaren döngüsel önek örnekleri silinir. Ardından, FFT işlemi gerçekleştirilerek, belirli bir alınan OFDM sembolünün kaynak ızgara elemanları hesaplanır. Bu aşamada iletilen kaynak elemanlarının en iyi tahminle kurtarmak için kanala, semboller arası girişim etkilerini geri almak için alınan kaynak elemanları üzerinde bir eşitleme işlemi gerçekleştirmek gerekir.

Denkleştirme gerçekleştirmek için, öncelikle tüm bant genişliği için kanal frekans tepkisini tahmin etmek gerekir ve bu tüm kaynak elemanları için gereklidir. Bu pilotlar ya da belirli-hücre referans sinyallerinin (CSR-Cell Specific Reference) önemini ortaya çıkarır. Kaynak ızgarada çeşitli bilinen noktalarda pilot olarak bilinen sinyal değerleri ileterek, kolayca alt taşıyıcılar karşılık gelen gerçek kanal yanıtını tahmin edilir. Bu kanal yanıtları, iletilen sinyalin alınan sinyal olarak basit bir orantı kurulmak üzere, birçok yolla hesaplanabilir.

Kaynak ızgara içindeki bazı düzenli noktalarda kanal yanıtlarını, tüm kaynak ızgara için kanal yanıtı çeşitli ortalama ve interpolasyon işlemleri istihdam edip tahmin edilir. Izgara kanal yanıtı tahmininden sonra tahmin kanal yanıtları karşılıklı değerleri ile alınan kaynak elemanlarının çarpımı aracılığıyla iletilen kaynak elemanlarının en iyi tahminleri bulunur.

3.7.5. OFDM kullanımının avantajları

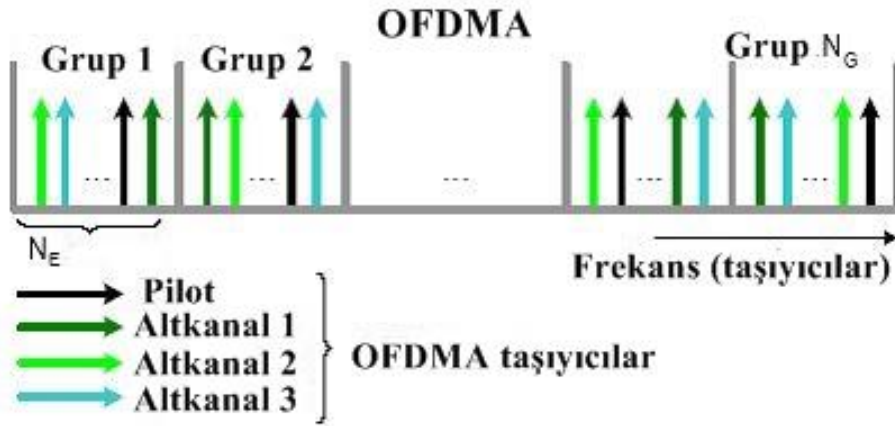
- Alt taşıyıcıların üst üste binmesine izin vererek spektrumun daha verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar.
- Kanalı, dar bantlı, düz, sönümlü alt kanallara bölerek tek taşıyıcılı sistemlere göre frekans seçimli sönümlemeye karşı daha fazla dirençli hale getirir.
- Periyodik örnek kullanılarak semboller arası girişimi yok edilir.
- Uygun bir kanal kodlama ve serpiştirme kullanılarak kanalın frekans seçiciliği yüzünden kaybolan semboller yeniden elde edilebilir.
- Kullanılan kanal dengelemesi, tek taşıyıcılı bir sistemde kullanılan adaptif kanal dengeleme işleminden daha basit hale gelir.
- Modülasyon ve demodülasyon fonksiyonlarını sağlamak için FFT teknikleri kullanılarak dikkate değer bir az karmaşıklıkta maksimum olasılıklı kod çözmeye olanak tanır.
- Zamanlama kaymalarına karşı tek taşıyıcılı sistemlere göre daha az hassastır.
- Yardımcı kanal girişimlerine ve parazit gürültüye karşı daha az duyarlıdır.

3.7.6. OFDM kullanımının dezavantajları

- OFDM taşıyıcı frekans ofset ve faz gürültüsüne duyarlıdır.
- Vericide çok yüksek Tepe Gücü/Ortalama Güç oranı (PAPR-Peak-to-Average Power Ratio) oluşmasından dolayı yüksek güç yükselteçlerinin dinamik aralıklarının yüksek olması gerekir.
- Koruma aralığı kullanımı, bant genişliği verimliliğinin ve SNR'nin düşmesine sebep olur.
- Alıcıda eşzamanlamanın sağlanması zordur.

3.8. OFDMA Teknolojisi

OFDMA, OFDM sayısal modülasyon tekniğinin çok kullanıcılı uyarlaması halidir. OFDMA, FDMA, TDMA ve CDMA'yı avantajlarıyla beraber kullanır. Esas olarak, OFDM bant genişliğini N tane dik alt kanala böler ve veriyi bu alt kanallarla gönderir. OFDM tekniği ile FDM tekniği ile birbirine benzerdir. OFDM tekniği FDM tekniği ile aynı kuralı kullanır, bu kural çeşitli mesajları tek radyo kanalından transfer eder [1].

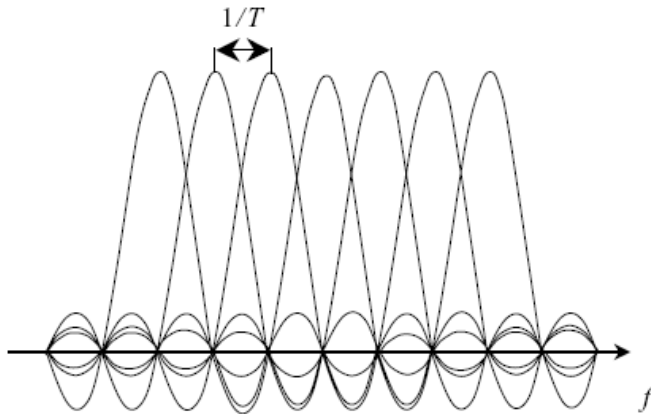


Şekil 3.13. OFDMA’da alt kanal oluşturma

FDM her frekans modülasyonu için çeşitli frekansları kullanabilir. Her frekansın diğer frekans alanındaki frekanslarla üst üste binmemesi için yeterli boşluklara sahiptir. Her sinyal, alıcı tarafındaki baz istasyonun aradığı sinyal haricindeki diğer sinyalleri bastırabilmek için bağımsız olarak bant geçiren filtre ile filtrelendir. Alınan sinyal orijinal sinyalin tersidir. OFDM haberleşme sistemlerinde yüksek veri hızı için çok taşıyıcılı nakil teknolojisi. Taşıyıcılar birbirine diktir ve aralarındaki frekans aralığı FFT kullanılarak oluşturulur [1].

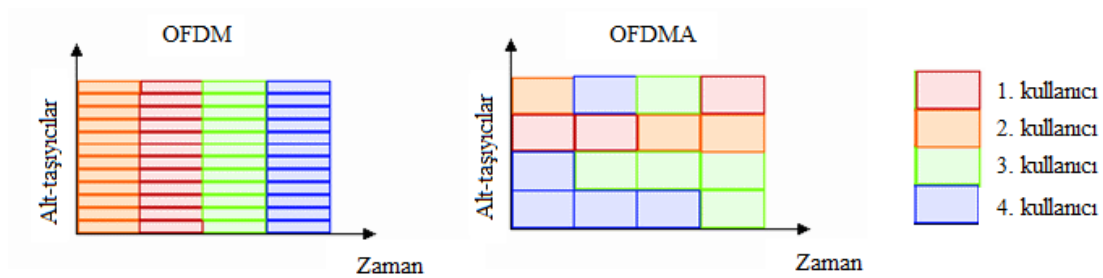
Tüm bant genişliğini kullanan tek taşıyıcılı sistemlerin aksine, OFDM’de mevcut tek taşıyıcılı sistemde karşılaşılan frekans seçici sönmelenmenin önüne geçilmiştir. OFDM’nin temel prensibi paralizasyondur: mevcut bant genişliği alt taşıyıcı olarak adlandırılan daha küçük bantlara bölünür ve her bir alt taşıyıcı üzerinden iletilen verinin düz sönmelenmeye maruz kalması sağlanır [31]. Bu sayede düz sönmelenmeye maruz kalan dar bantlı alt kanallarda verimlilik artar.

Şekil 3.14’de OFDM’ye ait frekans spektrumu görülmektedir [32].



Şekil 3.14. OFDM frekans spektrumu

OFDMA, doğrudan OFDM’ye dayanan bir çoklu erişim tekniğidir. Tek kullanıcılı olan OFDM yapısı, mevcut alt-taşıyıcı kümeleri farklı kullanıcılara çeşitli yöntemlerle tahsis edilerek çok kullanıcılı OFDMA erişim tekniği elde edilmiştir. OFDMA’da mevcut olan alt-taşıyıcılar, OFDMA’da farklı tahsis yöntemleriyle gruplandırılarak alt-kanallar oluşturulur, oluşturulan alt-kanallar farklı kullanıcılara tahsis edilerek çok kullanıcılı yapı elde edilir [11]. OFDM ve OFDMA’nın alt-taşıyıcı zaman eksenindeki farkı örnek bir tahsis üzerinden Şekil 3.15’te gösterilmiştir:



Şekil 3.15. OFDM ve OFDMA’nın zaman-frekans eksenini gösterimi [11]

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği’nin 4. nesil haberleşme sistemi şartnamesine uyan iki farklı teknoloji mevcuttur: WiMAX 2 (802.16m) ve LTE-Advanced (Release 10). Bu teknolojilerin her ikisinde de fiziksel katman teknolojisi olarak yer alan OFDMA kullanımı Çizelge 3.8’deki gibidir:

Çizelge 3.8.Yeni nesil haberleşme sistemlerinde OFDMA

	WiMAX 2	LTE-Advanced
Downlink (DL)	OFDMA	OFDMA
Uplink (UL)	OFDMA	SC-FDMA

Çizelge 3.8’den görüldüğü gibi WiMAX 2 downlink ve uplinkte çoğullama yöntemi olarak OFDMA kullanılır [33]. LTE-A’da downlink için OFDMA, uplink için de Tek Taşıyıcılı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim tercih edilir [34]. LTE-A teknolojisinin uplink için SC-FDMA tercih etmiş olmasının temel sebebi, SC-FDMA’nın OFDMA’ya göre daha düşük tepe gücü-ortalama güç sahip olmasıdır [35].

OFDMA dikgen alt-taşıyıcıları sayesinde oldukça yüksek izgesel verimliliğe sahiptir. Yine dikgenlik sayesinde hücre içi girişim (intra-cell interference) sıfırdır [36]. Dar alt-kanalları sayesinde frekans seçici sönmülenmenin önüne geçilir. Farklı alt-taşıyıcı tahsis dizilimleri sayesinde aynı anda birden fazla kullanıcıya izin vererek çok kullanıcı yapı sağlanır.

OFDMA tekniğinde adaptif modülasyon ve kodlama tekniklerinin uygulanabilirliği sayesinde farklı kanal şartlarına sahip olan farklı kullanıcıların, modülasyon ve kodlama teknikleri kullanımı çeşitliliği mümkün olup bu sayede mevcut bant genişliği verimliliğini arttıran daha esnek bir yapı elde edilir. Örneğin WiMAX 2’de adaptif modülasyon için tercih edilen modülasyon türleri QPSK, 16-QAM ve 64-QAM olarak belirlenmiş olup kanal durum bilgisine göre kanala uygun modülasyon türü ile iletim yapılır. Tüm bu sebeplerden dolayı 4. nesil teknolojilerinde tercih edilen OFDMA tekniği, avantajları ile diğer çoğullama tekniklerinden öne çıkarak geniş kullanım alanı bulmuştur [11].

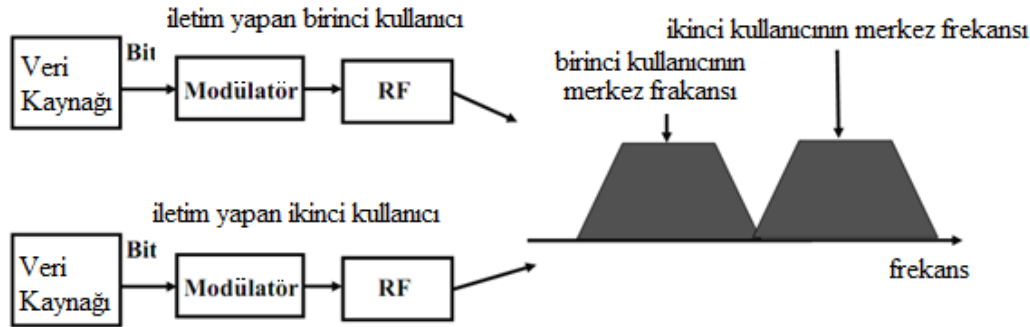
3.9. Tek-Taşıyıcılı Frekans Bölmeli Çoğullama (SC-FDM)

LTE uplink iletim hattı için kullanılan SC-FDM olarak bilinen teknik OFDM iletim şemasının bir varyantına dayanır. SC-FDM, OFDM iletiminde gözlenen ani güç dalgalanmalarını azaltır. Bu nedenle, SC-FDM kullanıcı terminalleri için uygun düşük-güç amplifikatörleri tasarımı için daha iyi bir seçimdir. Tek bir taşıyıcı iletiminin ayırt edici özelliği, her bir veri sembolünün, esas olarak bütün ayrılan bant genişliği yayılmış olmasıdır. Bu, her bir veri simgesinin bir alt taşıyıcıya atanan OFDM için tam tersidir. Bant genişliği üzerinden veri gücünü yayarak, SC-FDM ortalama iletim gücünü azaltır ve

iletilen sinyalin dinamik aralık güç amplifikatörü doğrusal bölgede kalmasını garanti eder. SC-FDM tekniği, aslında Ayırık Fourier Dönüşümü ön şifreleyicisi ile önceki OFDM modülatörü tarafından LTE standardında uygulanır. Bu teknik Ayırık Fourier Dönüşümü-Yayılı Dikgen Frekans Bölmeli Çoğullama (DFTS-OFDM-Discrete Fourier Transform-Spread Orthogonal Frequency Division Multiplexing) olarak bilinir.

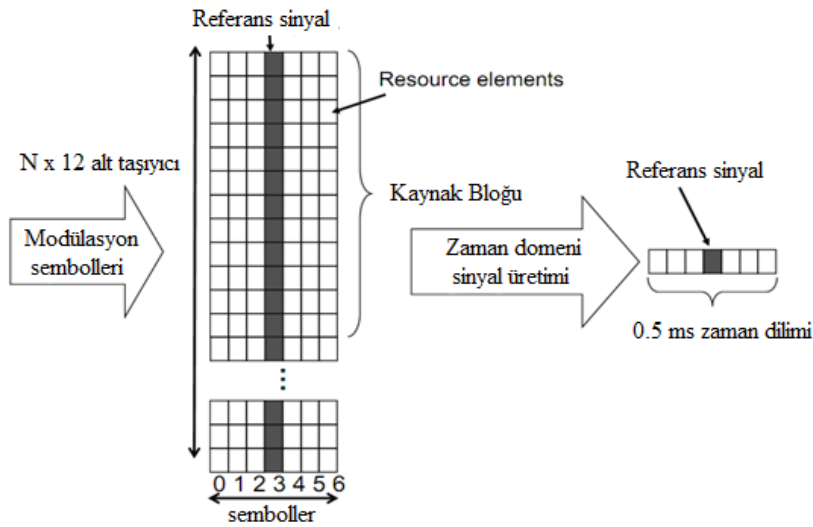
SC-FDM, OFDM tarafından sunulan aynı avantajları dahil olmak üzere, bir frekans alanı eşitleme ile veri geri kazanılması uplink hattı çok kullanıcı arasında dikliğini muhafaza etme ve çok-yollu sönümlenme ile mücadele sağlama yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, aynı alıcı kullanıldığında SC-FDM iletim performansı genellikle OFDM'ye karşı düşüktür.

SC-FDM, tek taşıyıcılı iletimde verinin sadece tek bir taşıyıcı ile modüle edildiği anlamına gelir. Taşıyıcının fazının veya genliğinin ya da her ikisinin değiştirilmesi ile ayarlanır. Frekans bölmeli çoklu erişim tekniğine göre farklı kullanıcılar Şekil 3.16'daki gibi farklı taşıyıcılar ya da alt taşıyıcılar kullanır.



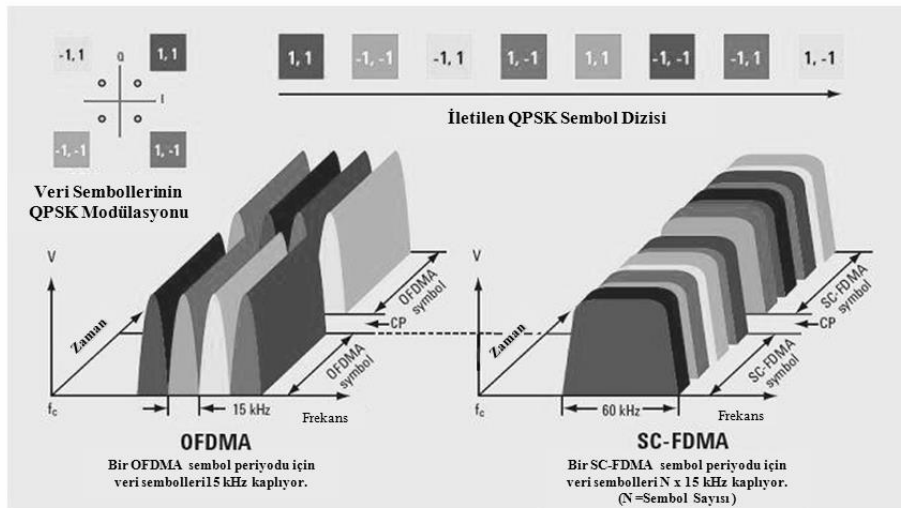
Şekil 3.16. FDMA yapısı [37]

Yukarı linkte tek taşıyıcılı frekans bölmeli çoklu erişim hem FDD, hem de TDD modlarında çalışabilmektedir. SC-FDMA'nın temel formu QAM modülasyonuna benzerdir. Pratikte işaretleşme 180 kHz'lik kaynak blokları üzerinden yapılır. Çalışma mantığı downlinktekine benzerdir.



Şekil 3.17. SC-FDMA çerçevesi [37]

SC-FDMA için baz istasyonu alıcısı, kullanıcı cihazlarındaki OFDM vericisine göre çok daha karmaşık olup sebebi ise alıcının karşı sembol girişimini sembol bloklarından sonra dağıtmasıdır, Şekil 3.18’de gösterildiği üzere OFDM’deki gibi her uzun sembolden sonra dağıtması gibi değildir. Bu da işlem gücüne ihtiyacı artırır bununla birlikte SC-FDMA ile yukarı link mesafesi ve cihaz batarya ömründen kazanç sağlar [38].



Şekil 3.18. OFDMA ile SC-FDMA’nın karşılaştırılması [13]

Sekil 3.18’de görüldüğü gibi:

- OFDMA her alt taşıyıcıda, dört QPSK veri sembollerini paralel olarak iletir.

- SC-FDMA dört defada, dört QPSK veri sembollerini seri olarak iletir.
- Şekilden de gözüktüğü gibi, OFDMA sinyalleri çok taşıyıcılı ve SC-FDMA sinyalleri tek taşıyıcılıdır [13].

3.10. Modülasyon ve Turbo Kodlama

3.10.1. Modülasyon

LTE teknolojisinde kullanılan modülasyon türleri QPSK, 16-QAM ve 64-QAM olarak tanımlanır. QPSK ve 16-QAM'i tüm LTE uyumlu cihazlar desteklerken, 64-QAM modülasyonunu sadece uyumlu cihazlar desteklemektedir.

Hücrel haberleşme sistemlerinde, kullanıcı cihazlarına gelen sinyal kalitesi, hücre içi servis veren baz istasyonu kanal kalitesine, diğer hücrelerden gelen girişim seviyesine ve ortamdaki gürültü seviyesine bağlıdır. Kullanılan iletim gücünü, sistem kapasitesi ve kapsamayı, en uygun şekilde tutmak için verici, alınan sinyaldeki bilgi veri hızını her kullanıcı için karşılaştırır. Bu işlem Uyarlanabilir Modülasyon ve Kodlama (AMC-Adaptive Modulation and Coding) tekniğine dayanan link uyarlamadır. Bu uyarlama modülasyon planı ve kod hızından oluşmuştur:

- Modülasyon planı: Düşük seviyeli modülasyonlar (QPSK gibi sembol başına birkaç bitten oluşan modülasyonlar) girişim etkilerine daha dayanıklı ve iyi bir iletim sağlarken düşük hızlı iletme sebep olur. Yüksek seviyeli modülasyonlar (64-QAM gibi sembol başına daha çok bitten oluşan modülasyonlar) yüksek hızlı iletim sağlarken girişim etkilerine dayanıksızdır. Bu nedenle sadece sinyal girişim ve gürültü oranının (SINR-Signal to Interference and Noise Ratio) belirli bir seviyede olduğu durumlarda kullanılabilir.
- Kod hızı: Kullanılan modülasyonda veri hızı radyo link koşullarına göre seçilebilir. Kötü kanal koşullarında düşük veri hızları kullanılırken SINR'nın yeterli seviyede olduğu durumlarda daha yüksek veri hızları kullanılır.

LTE downlink için, baz istasyonu modülasyon ve kodlama planını (MCS-Modulation and Coding Scheme) kullanıcı cihazı tarafından yukarı linke gönderilen kanal kalite göstergesi

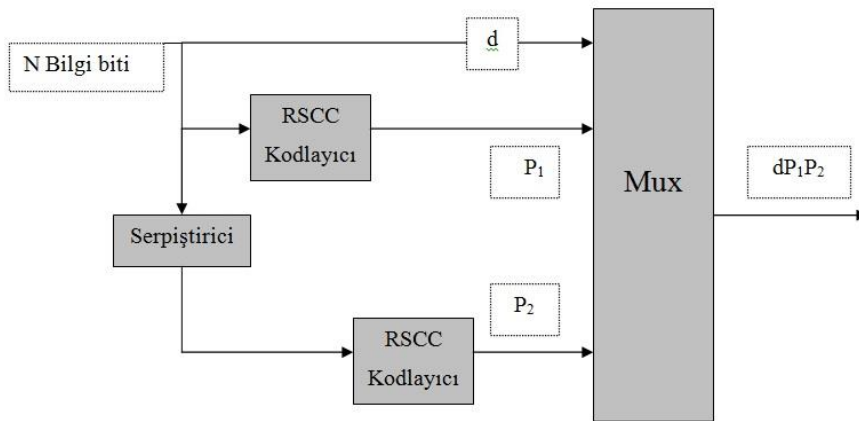
(CQI-Channel Quality Indicator) geri beslemesine göre seçer. Kanal kalite göstergesi geri beslemesi, kullanıcı cihazı tarafındaki kanal tarafından sağlanabilecek veri hızlarını seçmek için bir belirteçtir. Bu belirteç sayesinde baz istasyonu QPSK, 16-QAM ve 64-QAM şeması arasından kod hızına göre seçim yapar [38]. LTE uplink için, link uyum işlemi aşağı linktekine benzerdir. MCS seçimi baz istasyonu kontrolü altındadır. Fakat baz istasyonu direkt olarak da kanal uplink veri hızlarını kanal seslendirmesi ile hesaplayabilir [38]. 3GPP standartları tarafından desteklenen CQI değerleri ile birlikte modülasyon şeması ve kod hızları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. LTE downlink CQI tablosu [39]

	Modülasyon	Kod Hızı (k/n)
1	QPSK	1/8
2	QPSK	1/5
3	QPSK	1/4
4	QPSK	1/3
5	QPSK	1/2
6	QPSK	2/3
7	QPSK	4/5
8	16-QAM	1/2
9	16-QAM	2/3
10	16-QAM	4/5
11	64-QAM	2/3
12	64-QAM	3/4
13	64-QAM	4/5

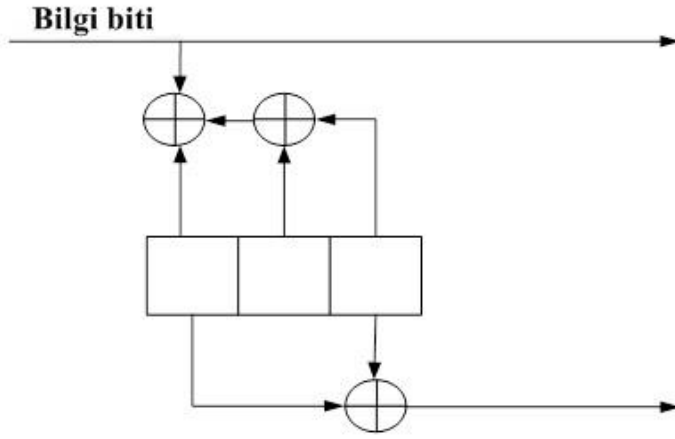
3.10.2. Turbo kodlama

Turbo kodlar, iki paralel ve seri kodlayıcı arasında bir serpiştirici (interleaver) içeren, sıralı kodların (concatenated codes) özel bir sınıfıdır. Serpiştiricinin varlığı, düşük SNR değerlerinde mükemmel performansa sahip çok büyük kod kelimeleri ile sonuçlanır. Bu kodları kullanarak, düşük SNR’larda dahi Shannon limitine, 1 dB’den az olacak kadar yaklaşmak mümkündür. Bir Turbo kodlayıcının yapısı Şekil 3.19’da gösterilmiştir [40].



Şekil 3.19. Turbo kodlayıcının blok diyagramı

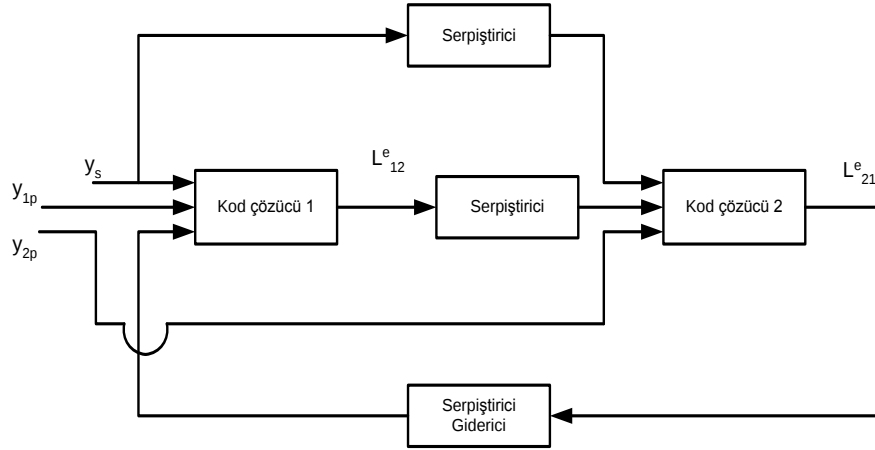
Turbo kodlayıcı N uzunluğundaki bir serpiştirici ile ayrıştırılmış iki yapıyı oluşturan koddan oluşur. Yapıyı oluşturan kodlar genellikle $1/2$ oranında özyinelemeli sistematik evrişimsel kodlardır (RSCC-Recursive Systematic Convolutional Codes) ve aynı kod genellikle yapıyı oluşturan iki yapıcı kod olarak kullanılır. Şekil 3.20’de bir RSCC kodlayıcı gösterilmiştir. Şekil 3.20’de gösterilen kodlayıcının yapısında, N bilgi biti ilk kodlayıcıya girip aynı bilgi bitleri boşluk bırakılarak ikinci kodlayıcıya uygulanır. Kodlayıcılar sistematik olduğundan, her bir kodlayıcı girişine uygulanan N bilgi bitini ve bunu takip eden N eşlik sınaması bitini üretir. Kodlamadan sonra, N bilgi biti ve iki kodlayıcının $2N$ eşlik sınaması biti yani toplam $3N$ bit kanal üzerinden iletilir. Bundan dolayı toplam oran $R = N / 3N = 1/3$ olur. Eğer daha yüksek oranlar istenir ise, eşlik sınaması bitleri boşa çıkartılır, yani sadece bazı eşlik bitleri, bir düzenli örüntüye bağlı olarak iletilir.



Şekil 3.20. RSCC kodlayıcı

Turbo kodlarda serpiştiriciler genellikle, binlerce bit gibi oldukça büyük uzunluktadır. Yarı rastgele serpiştiriciler yeteri kadar iyidir, ancak serpiştiricinin akıllıca seçimi ile kod performansında bazı iyileştirmeler elde edilebilir. Ayrıca, kodlayıcının tüm-sıfır durumuna dönmesini garanti edecek şekilde bilgi dizisine sıfırların eklendiği özyinelemeli olmayan evrişimsel kodların aksine, bileşen kodlardan birini tüm-sıfır durumuna döndürmek, sıfırdan farklı belirli bir dizinin bilgi dizisine eklenmesini gerekli kılar. Bir tek serpiştiricinin varlığından dolayı birçok durumda, her iki kodu tüm-sıfır konumuna döndürmek imkansızdır. Turbo kodlar iki temel-yapıcı kod bileşenine sahip olduğu için, bunların kod çözümüne Şekil 3.21’de gösterilen Özyinelemeli Algoritma (Iterative decoding algorithm) uygundur. Bitlerin olabilirliğini bir çıkış olarak üreten herhangi bir kod çözme yöntemi, özyinelemeli kod çözümünde kullanılabilir. Böyle bir yöntem Bahl, Cocke, Jelinek ve Raviv (BCJR), tarafından Bahl ve diğerleri (1974) isimli kaynakta önerilen ardıl olasılığın maksimumu (MAP-Maximum a Posteriori Probabilty) kod çözme yöntemidir. Düşük karmaşıklığa ve zayıflamış performansa sahip başka bir yöntem ise Hagenauer ve Hoher (1989) tarafından önerilen esnek-çıkışlı Viterbi algoritmasıdır (SOVA-Soft-Output Viterbi Algorithm). Her iki yöntemde de, farklı bitlerin olabilirliği hesaplanır ve bunları birinci kod çözücüy e iletir. İkinci kod çözücü de olabilirlik oranlarını hesaplar ve bunları birinci kod çözücüy e iletir, bu süreç olabilirliklerin, her bir bit için doğru kod çözümünün yüksek olasılığını işaret etmesine kadar tekrarlanır. Bu noktada, son karara varılır. Şekil 3.21’de gösterilen özyinelemeli kod çözüm prosedüründe y_s, y_{1p}, y_{2p} sırası ile sistematik bitlere, kodlayıcı 1 için eşlik sınaması bitlerine (Parity bit) ve kodlayıcı

2 için eşlik sınaması kodlarına işaret eder. L_{12}^e ve L_{21}^e iki kod çözücü arasında alış veriş yapılan bilgiyi temsil eder.



Şekil 3.21. Turbo kod için özyinelemeli kod çözme

BCJR algoritması

BCJR (Bahl, Jelinek, Cocke ve Raviv) algoritması, bir evrişimsel koddaki her bilgi bitini MAP kriterine göre kod çözen kafes-temelli (trellis) bir kod çözme algoritmasıdır. Bu algoritma, maksimum olabilirlik kriterine bağlı olarak bilgi bitlerinin dizisi hakkında maksimum olabilirlik kararı oluşturan Viterbi algoritmasından farklıdır. Yan bir ürün olarak, BCJR algoritması, turbo kodlarının özyinelemeli kod çözümünde kullanılabilecek, iletilen bitler için olasılık veya olabilirlik üretir.

Varsayalım ki kod Şekil 3.22’de gösterilen kafes ile tanımlanmış olsun. Burada alınan dizi için kafes derinliğinin N katman olduğunu ve $i-1$. ile i . katmanları arasındaki geç işi ele aldığımızı varsayıyoruz. Durumların sayısı M ile gösterilsin ve toplam alınan dizi $y_{[1,N]}$ olsun. Şekil 3.22 $M = 25$ için çizilmiştir ve sadece $i-1$. ile i . Katmanları arasındaki iki geçiş gösterilmiştir. $1 \leq i \leq N$ için, alınan diziyi i anına kadar $y_{[1,i]}$ ile ve $i+1$ ’den N ’e kadar $y_{[1,N]}$ ile gösterilsin. Diğer bir deyiş ile $y_{[1,i]} = (y_1, y_2, \dots, y_i)$ ve $y_{[1,N]} = (y_i, y_{i+1}, \dots, y_N)$ olsun. Rastgele değişken $S(i)$, i anındaki kafesi temsil etsin. Toplam M olası durum olduğundan, $S(i)$ ’nin değerini 0 ile $M-1$ tamsayı setinden aldığını varsayalım. Burada 0 kafesin tüm-sıfır durumuna karşılık gelmektedir.

$0 \leq s, s' \leq M-1$ ve $1 \leq i \leq N-1$ için

$$\bullet \quad \alpha_i(s) = P(S(i) = s, y_{[1,i]}) \quad (3.7)$$

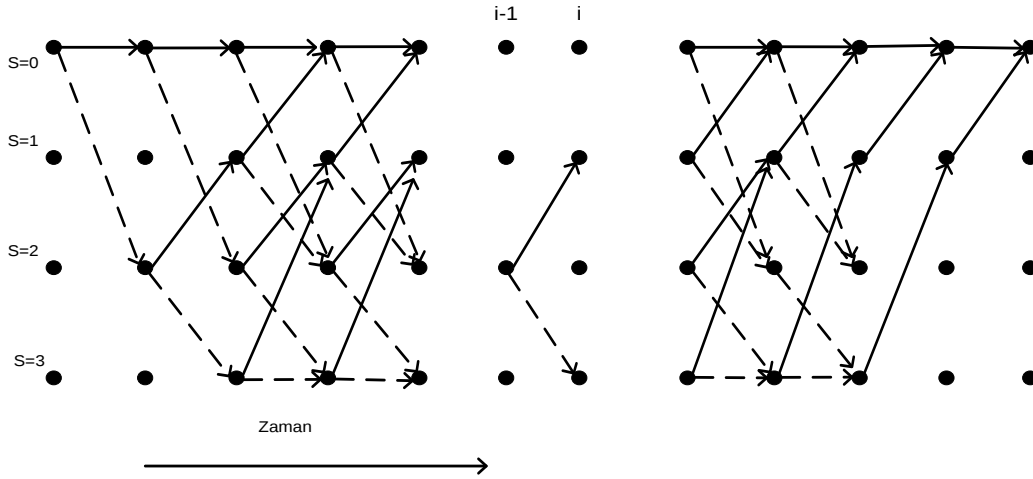
$$\bullet \quad \beta_i(s) = P(y_{[i+1,N]} | S(i) = s) \quad (3.8)$$

$$\bullet \quad \gamma_i(s, s') = P(S(i) = s', y_i | S(i-1) = s) \quad (3.9)$$

olasılıklarını sınırlama koşulları ile tanımlayalım.

$$\alpha_0(s) = \begin{cases} 0, & s = 0 \\ 1, & s = 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\beta_{N(s)}(s) = \begin{cases} 1, & s = 0 \\ 0, & s = 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (3.11)$$



Şekil 3.22. BCJR algoritması için kafes

$y_{[1,N]}$ alındıktan sonra MAP algılayıcı, eğer alabilirlik $\Lambda(u_i)$,

$$\Lambda(u_i) = \frac{P(u_i = 1 | y_{[1,N]})}{P(u_i = 1 | y_{[1,N]})} = \frac{P(u_i = 1 | y_{[1,N]})}{P(u_i = 1 | y_{[1,N]})} > 1 \quad (3.12)$$

ifadesini sağlar ise $\hat{u}_i = 1$ olduğuna hükmeder.

Ancak,

$$P(u_i = 1 | y_{[1,N]}) = \sum_{(s,s')} P(S(i-1) = s, S(i) = s', y_{[1,N]}) \quad (3.13)$$

$$P(u_i = 0 | y_{[1,N]}) = \sum_{(s,s') \in \sum^0} P(S(i-1) = s, S(i) = s', y_{[1,N]}) \quad (3.14)$$

Burada $\sum^0$ tüm (s, s') durum çiftleri kümesini gösterir öyle ki, $u_i = 1$ olması $S(i-1) = s$ durumundan $S(i-1) = s'$ durumuna geçişe neden olur. Benzer bir şekilde $\sum^0$ tüm-durum çiftleri (s, s') 'i gösterir olsun, bu durumda $S(i) = s'$ 'den $S(i-1) = s'$ 'e geçiş bir $u_i = 0$ girişine karşılık gelir. Örneğin Şekil 3.22'de $(2,1) \in \sum^0$ ve $(2,3) \in \sum^1$ olur. Eş. 3.13 ve Eş. 3.14'ü Eş. 3.12'de yerine konulursa ve

$$\pi_i(s, s', y) = P(S(i-1) = s, S(i-1) = s', y_{[1,N]}) \quad (3.15)$$

tanımını yapıldığında $\Lambda(u_i)$ olabilirlik oranı

$$\Lambda(u_i) = \frac{\sum_{(s,s') \in \sum^1} \pi_1(s, s', y)}{\sum_{(s,s') \in \sum^0} \pi_1(s, s', y)} \quad (3.16)$$

İfadesine indirgenir.

Sonra,

$$\begin{aligned}
\pi_i(s, s', y) &= P(S(i-1) = s, S(i) = s', y_{[1,i-1]}, y_{[i+1,N]}) \\
&= P(S(i-1) = s, S(i) = s', y_{[1,i-1]}, y_i) \\
&\quad * (y_{[i+1,N]} | S(i-1) = s, S(i) = s', y_{[1,i-1]}, y_i) \\
&= P(S(i-1) = s, y_{[1,i-1]} * P(S(i) = s', y_i | S(i-1) = s, y_{[1,i-1]})) \\
&\quad * P(y_{[i+1,N]} | S(i-1) = s, S(i) = s', y_{[1,i-1]}, y_i) \\
&\stackrel{(a)}{=} P(S(i-1) = s, y_{[1,i-1]}) P(S(i) = s', y_i | S(i-1) = s) \\
&\quad * P(y_{[i+1,N]} | S(i) = s') \\
&= \alpha_{i-1}(s) \gamma_i(s, s') \beta_i(s') \\
(3.17)
\end{aligned}$$

ifadesine sahip olur. Burada (a) eşitliği belleksiz kanaldan kaynaklanır.

$$\alpha_i(s) = \sum_{s'} \alpha_{i-1}(s') \gamma_i(s', s) \quad (3.18)$$

$$\beta_i(s) = \sum_{s'} \beta_i(s') \gamma_i(s', s) \quad (3.19)$$

Eş. 3.18 ve Eş. 3.19 sırası ile ileri doğru özyineleme (forward recursive) ve geriye doğru özyineleme (backward recursive) olarak adlandırılır. $\gamma_i(s', s)$ 'in bildiğimizi varsayarsak, tüm $1 \leq i \leq N-1$ ve $0 \leq s, s' \leq M-1$ için $\alpha_i(s)$ ve $\beta_i(s')$ değerlerini bulmak amacı ile Eş. 3.10 ve Eş. 3.11'de verilen başlangıç ve bitiş koşulları, ileriye doğru özyinelemede ve geriye doğru özyinelemede kullanılabilir. Sonra, bu değerler Eş. 3.17'de $\pi_i(s, s', y)$ değerini bulmak için yerine konur ki, bu değer daha sonra olabilirlik oranlarını bulmak için Eş. 3.16'da kullanılır. Olabilirlik oranları (Likelihood Ratio-LR) bulunduktan sonra u_i 'ler seziilebilir. Bu aşamada $\gamma_i(s', s)$ değerlerinin nasıl hesaplanabileceğini gösterilmesi gerekir. Bu değerler kanalın karakteristiğine bağlıdır. Bir belleksiz kanal için,

$$\begin{aligned}
\gamma_i(s', s) &= P(S(i) = s, y_i | S(i-1) = s') \\
&= P(S(i) = s, s | S(i-1) = s') P(y_i | S(i) = s, S(i-1) = s') \\
&= P(u_i) P(y_i | u_i)
\end{aligned} \tag{3.20}$$

ifadelerine sahibiz. Örneğin BPSK modülasyonun kullanıldığı bir AWGN kanalda, iletilen işaret $(2u_i, -1)\sqrt{\varepsilon}$ şeklindedir. Dolayısıyla,

$$P(y_i | u_i) = \frac{1}{\sqrt{\pi N_0}} e^{-\frac{(y_i - (2u_i - 1)\sqrt{\varepsilon})^2}{N_0}} \tag{3.21}$$

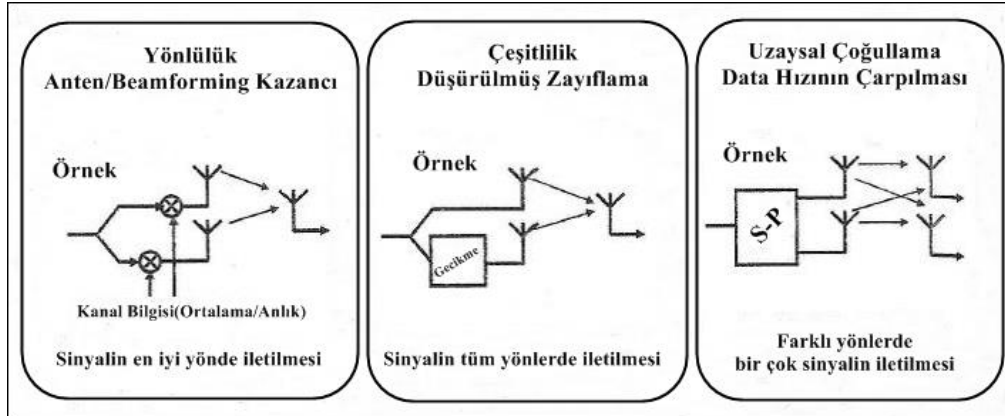
olur. Bundan dolayı, $P(u_i)$ öncül olasılıkları (a-piriori) ile başlayarak, α ve β değerlerini bulmada kullanılabilecek olan $\gamma_i(s, s')$ değerlerini belirlemek için Eş. 3.10 ve Eş. 3.21 kullanılır. Özet olarak, BCJR algoritması şu şekilde uygulanır [41]:

- Eş. 3.10 ve Eş. 3.11’de verilen başlangıç koşulları ile algoritmayı başlatın (kafes sonlanma koşulu).
- Verilen u_i öncül olasılıkları (genellikle 0 veya 1 olması eşit olasılıklı kabul edilir), kanal karakteristiği ve alınan dizi ile Eş. 3.20 ve Eş. 3.21’i kullanılarak γ ’ları hesaplayın.
- α ’ları hesaplamak için Eş. 3.18’de verilen ileri yönde özyinelemeyi kullanın.
- β ’ları hesaplamak için Eş. 3.19’da verilen geri yönde özyinelemeyi kullanın.
- $\pi_i(s, s', y)$ değerlerini hesaplamak için Eş. 3.17’yi kullanın.
- Eş. 3.16 kullanarak u_i olabilirlik oranlarını hesaplayın ve kararı oluşturun.

BCJR algoritmasında (α ’ları bulmak için) bir kez kafesi ileri yönde ve (β ’ları hesaplamak için) bir kez kafesi geri yönde geçmek zorunda olduğumuza dikkat edin. Bundan dolayı, bu algoritmanın karmaşıklığı Viterbi algoritmasının iki katıdır. Ayrıca ileri yönde geçişte, değeri saklanmalıdır, dolayısı ile algoritmanın kayıt gereksinimi de oldukça yüksektir.

3.11. LTE’de Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) Yapısı

LTE, hem alıcı hem de vericide çoklu anten tekniğini destekler. MIMO, anten konfigürasyonunu kullanır. Verici kısmında çoklu, alıcı kısmında ise tek anten olma durumu çoklu giriş tekli çıkış (MISO-Multi Input Single Output) olarak isimlendirilir. Bu yöntemle hüzmeye (beamforming) elde etmek mümkündür. Bu metot ile transmisyon sinyali yararlı bir yöne (tipik olarak UE’ye doğru) doğru seyreder. Sinyalin, karmaşık ağırlıklarla çarpılması yoluyla, farklı anten elemanlarının fazının (bazen genlik) ayarlanması sayesinde yukarıda anlatılan metot gerçekleştirilebilir. Bu metot SNR’yi, dolayısıyla da kapasiteyi artırır. Bu konfigürasyon ile aynı zamanda iletim çeşitliliğinin de elde edilmesi mümkündür. Bu, sinyalin zamanda kaydırılmış kopyalarının iletilmeleri sayesinde gerçekleştirilmiş olur ve böylece çeşitlilik zaman bölgesinde elde edilmiş olur. Bu metot da SNR’yi yükseltmektedir. Alıcıda çoklu antenler ile (SIMO veya MIMO) alım çeşitliliğinin kullanılması mümkün olmaktadır. Alınan sinyalin SNR’sini yükseltmek için bir birleştirme metodu olan Maksimum Oran Birleştirmesi (MRC-Maximum Ratio Combining) uygulanır. Alıcı ve vericinin her ikisinde de çoklu anten olması durumunda yukarıda anlatılan metotların hepsinin kullanımı mümkün olur. Alıcı ve vericinin her ikisinde de çoklu anten olması, aynı zamanda uzamsal çoğullamanın da sağlanmasını mümkün kılar. Bu konfigürasyon MIMO olarak da isimlendirilir. Bu metot, radyo ara yüzünde çok sayıda katman veya veri yolu (data pipe) yaratır. Yaratılabilecek katman sayısının maksimum değeri radyo kanal karakteristiklerine ve Tx (Verici), Rx (Alıcı) anten sayılarına bağlıdır. Radyo kanalının destekleyebileceği katmanların maksimum değeri ise kanal derecesine eşittir. Etkin bir şekilde kullanılabilecek katman sayısının maksimum değeri, Tx veya Rx tarafındaki anten eleman sayısının minimum değerine veya kanal derecesine eşit veya küçüktür. Veri hızı, optimal koşullar altında katman sayısı tarafından katlanabilmektedir. LTE’nin teknik özellikleri Tx tarafında 4’e, Rx tarafında ise yine 4’e kadar anten konfigürasyonu (4x4 MIMO konfigürasyonu) destekler [1].



Şekil 3.23. Çoklu anten olasılıkları [42]

- Farklı teknikler, Rx ve Tx’te kanal bilgisi üzerinde farklı varsayımlara yol açar.
- Birçok teknik çok sayıda faydayı da beraberinde getirmektedir.
- Tespit edilen faydalar, kanal (anten dâhil) ve girişim özelliklerine göre değişkenlik gösterir.

LTE’nin birinci sürümünde UE, 2 Rx anteni kullansa dahi yalnızca bir tane Tx antene sahip olması olasıdır. Tekil kullanıcı MIMO (SU-MIMO-Single User-MIMO) olarak isimlendirilen bu yöntem yalnızca downlinkte desteklenmektedir (maksimum 2x2 konfigürasyon). SU-MIMO, kullanıcısı için birçok katman yaratarak o tekil kullanıcı için veri hızını artırmaktadır. Uplinkte ise Çoklu Kullanıcı MIMO (MU-MIMO-Multi User MIMO) uygulanabilmektedir. Farklı UE transmisionlarını uzamsal olarak ayırmak için MU-MIMO’yu kullanmaktadır. Bu durum, aynı anda aynı kaynak bloğunda (aynı frekansta ve aynı anda) çok sayıda UE’nin planlanabilmesine yol açar. Bu durum da hücre içerisinde kapasite artısını sağlar. Diğer taraftan düşük SNR değerlerinde, maksimum veri hızı neredeyse lineer olarak artar. Bu yüzden yalnızca yüksek SNR elde etmeyi amaçlamak verimli bir yöntem değildir. Daha verimli olan yol, düşük SNR değerleri ile çok sayıda veri yolu yaratmaya çalışır [1]. Aşağıda çoklu antenlerin avantajları verilmiştir:

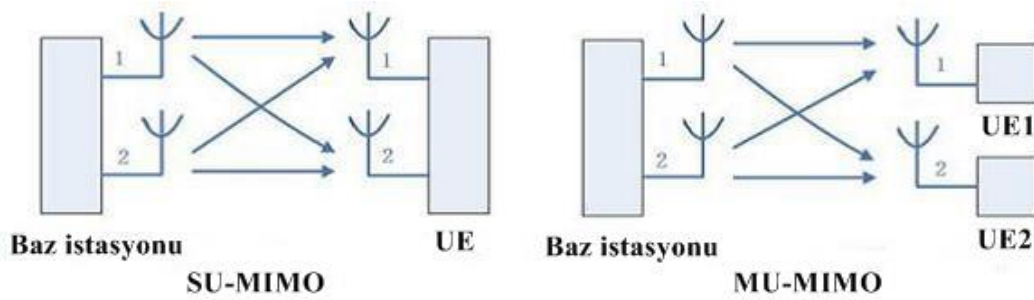
- Daha iyi veri hız kapsamı ve kapasitesi,
- Daha yüksek veri hızları için potansiyel,
- Daha yüksek spektral verim.

Çoklu giriş çoklu çıkış sistem formu uzun vadeli evrimin throughputu ve spektral verimliliği arttıran önemli yeniliklerinden biridir. Bu sayede alıcı ve verici tarafında birden çok anten

kullanmak mümkün olur. LTE aşağı linki için 2x2 MIMO (Alıcı tarafında iki anten, verici tarafında iki anten) sistemi temel alınarak tasarlanmıştır [38].

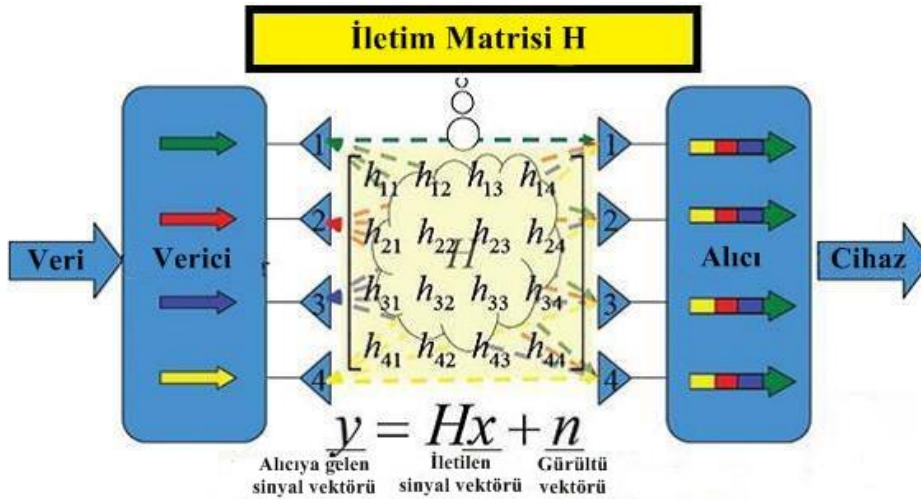
MIMO'nun iki fonksiyonel modu bulunur. Kullanılan moda göre farklı kazançlar elde edilmektedir. Uzamsal çoğullama (Spatial Multiplexing) modu farklı veri katarının farklı uzamsal boyutlardan aynı kaynak blokları üzerinden gönderilmesi şeklinde yapılır. Bu durum veri hızını ve kapasiteyi artırır. Diğeri ise iletim çeşitliliği modudur. Gönderilen sinyaldeki sönümlemenin ve çok-yolluluğun etkilerini gidermek için aynı işaretin farklı antenlerden iletilmesi şeklinde yapılır [38].

Uzamsal çoğullama modunda veri katarları tek kullanıcıya ya da birden çok farklı kullanıcıya gönderilebilir. Şekil 3.24'de görüldüğü gibi eğer tek kullanıcıya gönderiliyorsa SU-MIMO, çok kullanıcıya gönderiliyorsa MU-MIMO, olarak adlandırılır. SU-MIMO tek kullanıcının veri hızını artırır, MU-MIMO ise sistemin toplam kapasitesini artırır [38].



Şekil 3.24. SU-MIMO ve MU-MIMO yapısı [43]

MIMO sisteminde iletim ilişkisini iletim kanal matrisi $[H]$ ile tanımlanır. Şekil 3.25'de görüldüğü gibi katsayılar ise h_{ij} ile verici anten için j , alıcı anten için i alınır, alıcı ile verici arasındaki tüm mümkün olan yollar tanımlanmış olur.



Şekil 3.25. MIMO çalışma yapısı [43]

Alınan sinyal vektörü $\underline{y}$, iletilen sinyal vektörü $\underline{x}$, gürültü vektörü de $\underline{n}$ olarak alınırsa MIMO sisteminin iletim yapısı Şekil 3.25'deki gibi formülize edilir.

3.12. Fiziksel Kanallar

LTE standardının hedefleri arasında daha etkin ve akıcı protokol yığını ile mimari yapı oluşturmak vardır. Paylaşılan kanallar bir önceki 3GPP standartlarına belirtilen birçok özel kanalların yerini almış ve fiziksel kanalların toplam sayısı azalmıştır. Şekil 3.26 radyo erişim ağı protokol yığını ve katman mimarisi göstermektedir.



Şekil 3.26. LTE radyo erişim şebekesindeki katman mimarisi

Mantıksal kanallar radyo bağı kontrol (RLC-Radio Link Control) tabaka ile orta erişim kontrolü (MAC-Medium Access Control) tabakası arasındaki veri transferi ve bağlantılarını temsil eder. LTE iki tür mantıksal kanalı tanımlar: Bunlar bir trafik kanalı ve bir kontrol kanalıdır. Trafik mantıksal kanalı kullanıcı-düzlem verilerini transfer ederken, kontrol mantıksal kanallar kontrol düzlemi bilgilerini aktarır.

Ulaştırma kanalları MAC katmanını PHY'ye bağlar ve fiziksel kanallar PHY'deki alıcı-verici tarafından işlenir. Her fiziksel kanal hava ara yüzündeki nihai iletim için protokol yığınının üst katmanlardan bilgi taşıyan bir dizi kaynak elemanları tarafından belirtilir. Downlink ve uplink arasındaki veri iletimi sırasıyla downlink paylaşımlı kanal (DL-SCH-Downlink Shared Channel) ve uplink paylaşımlı kanal (UL-SCH-Uplink Shared Channel) taşıma kanalı türlerini kullanır. Bir fiziksel kanal, belirli bir nakil kanalı iletimi için kullanılan zaman-frekans bilgisini taşır. Her bir nakil kanalı, karşılıklı gelen bir fiziksel kanal ile eşleştirilir. Karşılıklı gelen nakil kanalları ile bağlantılı fiziksel kanallara ek olarak, karşılıklı nakil kanalları olmayan fiziksel kanallar da vardır. L1/L2 kontrol kanal olarak bilinen bu kanallar, terminale uygun alım için bilgiyi tedarik eden, downlink veri iletimini çözen downlink kontrol bilgilerini (DCI-Downlink Control Information) ve uplink kontrol bilgisi (UCI-Uplink Control Information) içinde terminaldeki durum bilgisini içeren HARQ protokolünü ve iş düzenleyiciyi kullanılır. LTE içindeki mantıksal, nakil ve fiziksel kanallar arasındaki ilişki downlinkte uplink iletimine göre farklıdır.

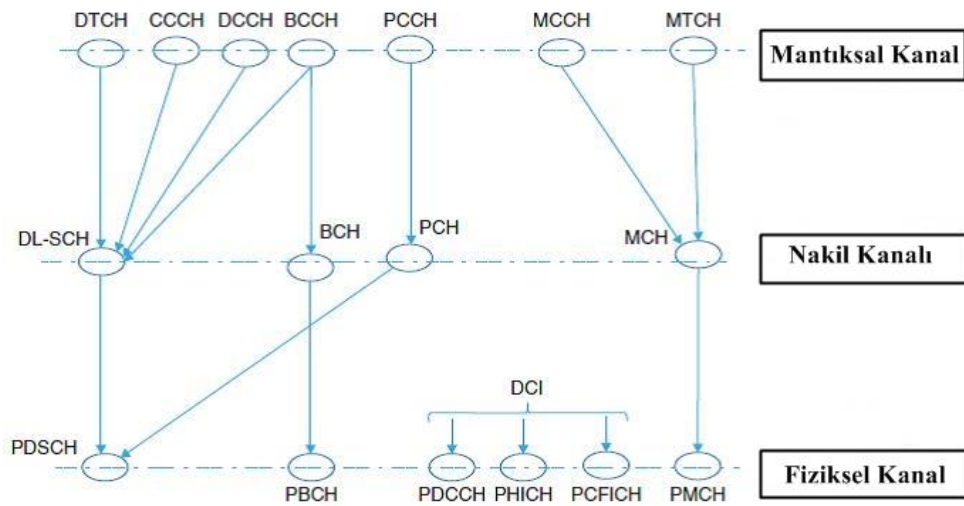
3.12.1. Downlink fiziksel kanalı

Çizelge 3.10 LTE downlink fiziksel kanallarını özetlemektedir. Fiziksel çoklu yayın kanalı (PMCH-Physical Multicast Channel) MBMS amacıyla kullanılır. Geriye kalan fiziksel kanallar geleneksel tekli iletim yayın modunda kullanılır.

Çizelge 3.10. LTE downlink fiziksel kanalları

Downlink fiziksel kanalı	İşlevleri
Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)	Tek noktaya yayın kullanıcı veri trafiği ve çağrı bilgileri
Physical Downlink Control Channel (PDCCH)	Downlink Kontrol Bilgisi (DCI)
Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel (PHICH)	Uplink paketleri için HARQ Göstergesi (HI) ve ACK/NACKs
Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)	PDCCH bilgileri çözmek için gerekli bilgileri içeren Kontrol Format Bilgi (CFI)
Physical Multicast Channel (PMCH)	Multimedya Yayın Tek Frekans Ağı (MBSFN) işlemi
Physical Broadcast Channel (PBCH)	Hücre arama sırasında ağa erişmek için terminal tarafından gerekli sistem bilgileri

Şekil 3.27 LTE’de downlink mimari yapısında mevcut çeşitli mantıksal, iletim ve fiziksel kanallar arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 3.27. LTE downlink mantıksal, nakil ve fiziksel kanal eşleşmesi

Tek noktalı yayın modunda, tek bir tip trafik mantıksal kanalı bulunur. Bu da özel trafik kanalıdır (DTCH-Dedicated Traffic Channel). Ayrıca dört çeşit de kontrol mantıksal kanalı bulunur. Bunlar: Yayın kontrol kanalı (BCCH-Broadcast Control Channel), numaralandırma kontrol kanalı (PCCH-Paging Control Channel), ortak kontrol kanalı (CCCH-Common Control Channel) ve özel kontrol kanalı (DCCH-Dedicated Control Channel). Özel mantıksal trafik kanalı ve PCCH hariç tüm mantıksal kontrol kanalları, Downlink Paylaşım Kanalı olarak bilinen bir nakil kanalı oluşturmak için çoklanır. PCCH, numaralandırma kanalına (PCH-Paging Channel) eşlenir ve fiziksel downlink paylaşımlı

kanal (PDSCH-Physical Downlink Control Channel) oluşturmak üzere DLSCCH ile birleştirilir. PDSCH ve dört diğer fiziksel kanal (Fiziksel Downlink Kontrol Kanalı (PDCCH-Physical Downlink Control Channel), fiziksel hibrit otomatik tekrar talebi gösterge kanalı (PHICH-Physical Hybrid Automatic Repeat Request Indicator Channel), fiziksel kontrol format gösterge kanalı (PCFICH-Physical Control Format Indicator Channel) ve fiziksel yayın kanalı (PBCH-Physical Broadcast Channel) daha yüksek katmanlardan sağlanan ve tekli yayın modunda ihtiyaç duyulan tüm kullanıcı verilerini, kontrol ve sistem bilgilerini sağlar.

Çok noktaya yayın/yayın modunda, Çok noktalı yayın trafik kanalı (MTCH-Multicast Traffic Channel) olarak bilinen trafik mantık kanalı ve çok noktalı yayın kontrol kanalı (MCCH-Multicast Control Channel) olarak bilinen kontrol mantık kanalı mevcuttur. Bunlar çok noktalı yayın kanalı (MCH-Multicast Channel) olarak bilinen nakil kanalı oluşturmak için bir araya getirilmektedir. Son olarak, PMCH, MBMS modu için fiziksel kanal olarak oluşturulur.

3.12.2. Downlink kanalının işlevleri

PDSCH, downlink kullanıcı verilerini MAC katmanından PHY'ye ulaştırılan nakil blokları gibi taşır. Genellikle, MIMO'nun uzamsal çoklaması olarak bilinen belirli durumları haricinde, bir ya da iki taşıma bloğunun verilen alt çerçeve başına iletilebildiği yerde nakil blokları bir anda iletilir. Uyarlanabilir modülasyon ve kodlama ardından, modüle semboller iletim için birden fazla verici antene eşleştirilmiş çoklu zaman-frekans kaynak ızgaraları üzerine eşleştirilir. Her bir alt çerçevede kullanılan çoklu anten tekniği türü kanal koşullarına oturtulmuş uyarlamalara tabidir. LTE standardındaki uyarlanabilir modülasyon, kodlama ve MIMO kullanımı her bir alt çerçevede, mobil terminalde gözlenen kanal kalitesine bağlı olarak, baz istasyonunun modülasyon şema tipi, kodlama oranı ve MIMO hakkında kararlar vermesi gerektiğini gösterir. Mobil terminalde oluşturulan ölçümler baz istasyonunun iletim sağlaması için orada oluşturulmuş planlı kararlara yardımcı olmasını sağlamalıdır. Her alt çerçevede mobil terminalin, iletilen her kaynak bloğu için baz istasyonundan gelen planlama hakkında bilgilendirilme ihtiyacı bulunur. İletilmesi gereken bilgiler arasında gereken bilgiler arasında, bir kullanıcıya tahsis edilmiş kaynak bloklarının sayısı, taşıma bloğu ebadı, modülasyon tipi, kodlama oranı ve her bir alt çerçeve için kullanılan MIMO modunun türü bulunur. Baz istasyon ve mobile terminali arasında

iletişimi sağlamak için, bir PDCCH her PDSCH kanalı için tanımlanır. PDCCH öncelikle her bir terminalin başarıyla veri almak, eşitlemek, kipini ve veri paketlerinin kodunu çözmek için ihtiyaç duyduğu zamanlama kararları içerir. PDCCH'nin kod çözümü başlamadan önce PDSCH bilgilerinin okunması ve çözülmesi gerekir, bir downlink içerisinde PDSCH, her bir alt çerçevedeki ilk birkaç OFDM sembolünü içerir. PDCCH (tipik olarak 1, 2, 3 ya da 4) tarafından işgal edilmiş her bir alt-çerçevenin başındaki OFDM sembollerinin tam sayısı bant genişliği, alt çerçeve indeksi ve çoklu yayına göre tek noktaya yayın kullanımı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. PDCCH taşınan kontrol bilgileri DCI olarak bilinir. DCI formatına bağlı olarak, kaynak eleman sayısı (yani, onları taşımak için gerekli OFDM sembolleri sayısı) değişir. LTE standardı tarafından belirlenen 10 farklı olası DCI biçimleri vardır. Mevcut DCI biçimleri ve bunların tipik kullanım durumları Çizelge 3.11'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.11. LTE DCI biçimleri ve bunların kullanım durumları

DCI formatı	Kullanım durumu
0	Uplink zamanlama atama
1	SISO ve SIMO modlarında bir PDSCH şifre için downlink zamanlama
1A	Bir PDSCH şifrenin 1 zamanlama biçiminin kompakt versiyonu veya başlangıç rastgele erişime eş zamanlı atama tahsisi
1B	MIMO modu numara 6'da şifre olarak kullanılan bir PDSCH için çok kompakt downlink zamanlama
1C	Çağrı veya sistem bilgisi için çok kompakt downlink zamanlama
1D	Önceden kodlanmış MIMO ile bir PDSCH şifre için kompakt downlink zamanlama ve çok kullanıcı MIMO için gerekli güç ofset bilgileri
2	Kapalı-döngü uzamsal çoklama ile MIMO için downlink zamanlama atama
2A	Açık-döngü uzamsal çoklama ile MIMO için downlink zamanlama atama
3	2 bitlik güç ayarı ile PUCCH ve PUSCH için İletim Gücü Kontrolü (TPC) bilgileri
3A	1 bitlik güç ayarı ile PUCCH ve PUSCH için İletim Gücü Kontrolü (TPC) bilgileri

Her DCI formatı aşağıdaki kontrol bilgi türlerini içerir: kaynak tahsis bilgileri, örneğin kaynak blok boyutu ve kaynak atama süresi; nakil bilgileri, örneğin çoklu anten konfigürasyonu, modülasyon türü, kodlama oranı ve taşıma bloğu yük boyutu ve son olarak HARQ ile ilgili bilgiler, örneğin onun süreç numarası, artıklık sürümü ve yeni verilerin gösterge sinyalizasyon kullanılabilirliği. DCI formatı 1'in içerik alanları Çizelge 3.12'de özetlenmiştir.

Çizelge 3.12. DCI formatı 1'in içeriği

Alan	PDCCH üzerindeki bit sayısı	Tanımı
Resource allocation header	1	Her iki 0 veya 1 çeşidinin seçilen kaynak tahsisini gösterir.
Resource block assignment	Depends on resource allocation type	PDSCH üzerindeki terminale tahsis edilecek kaynak blokları gösterir.
Modulation and Coding Scheme (MCS)	5	Nakil bloğu ebatlarını ve tahsis edilen kaynak blokları sayısını kullanılan kodlama ve modülasyon ile birlikte gösterir.
HARQ process number	3 (FDD) 4 (TDD)	Asenkron dur ve bekle protokolünde kullanılan HARQ ID'yi gösterir gösterir.
New data indicator	1	Mevcut paketin yeni bir iletim veya yeniden iletim olup olmadığını gösterir.
Redundancy version	2	HARQ sürecinin artan fazlalık durumunu gösterir.
PUCCH TPC command	2	PUCCH üzerindeki iletim gücünün uyarlanması için iletim güç kontrol komutunu gösterir.
Downlink assignment index	2	(Sadece TDD modu için) Uplink ACK/NACK yığılması için kullanılan downlink alt çerçeve sayısını gösterir.

PCFICH DCI'nın bir alt çerçevede kapladığı OFDM sembolleri sayısını tanımlamak için kullanılır. PCFICH bilgileri her bir alt çerçevedeki ilk OFDM sembolüne ait özel kaynak elemanları ile eşleştirilir. PCFICH (bir, iki, üç ya da dört) için olası değerler bant genişliği, çerçeve yapısı ve alt-çerçeve indeksine bağlıdır. 1,4 MHz daha büyük bant genişliği için, PCFICH kodu üç OFDM sembolü kadar yer tutar. 1,4 MHz bant genişliği için, kaynak blok sayısı oldukça küçük olduğundan, PCFICH kontrol sinyali için dörde kadar OFDM sembolüne ihtiyaç duyabilir. PDCCH ve PCFICH kontrol kanalları yanı sıra, LTE Fiziksel HARQ Gösterge Kanalı (PHICH) olarak bilinen başka bir kontrol kanalını tanımlar. PHICH uplinkte alınan paketler için yanıt onaylarını tanıyan bilgileri içerir. Bir uplink paketi iletiminin ardından UE, önceden belirlenmiş bir zaman gecikmesinden sonra bir

PHICH kaynağındaki paket onayını alır. PHICH süresi daha yüksek katman tarafından belirlenir. Normal bir süre durumunda PHICH sadece bir alt çerçevenin birinci OFDM simgesinde bulunur; uzun süreliyse ilk üç alt çerçevede bulunur. PBCH, hücre araştırması esnasında temel PHY sistem ve hücre-özellik bilgilerini içeren usta bilgi bloğunu (MIB-Master Information Block) taşır. MIB'i doğru bir şekilde elde ettikten sonra, Mobil terminal downlink kontrol ve veri kanallarını okuyabilir ve sisteme erişmek için gerekli işlemleri gerçekleştirebilir. MIB, her çerçevenin birinci alt çerçeve içinde iletilen bölümleri ile dört radyo çerçevesine karşılık gelen 40 ms süre boyunca PBCH üzerinde iletilir. MIB bilginin dört alanını içerir. İlk iki alan downlink sistem bant genişliği ve PHICH yapılandırması ile ilgili bilgileri tutar. Downlink sistemi bant genişliği, downlinkteki kaynak blok sayısı için altı değerden biri olarak (6, 15, 25, 50, 75 ya da 100) bildirilir. Daha önce ele alındığı gibi, kaynak bloklarının toplamı için bu değerler sırasıyla 1,4; 3, 5, 10, 15 ve 20 MHz bant genişlikleriyle eşleşir. Daha önce açıklandığı gibi MIB'in PHICH yapılandırma alanı, PHICH süresini ve miktarını belirtir. PBCH zaman her radyo çerçevesinin ilk alt çerçevesindeki ilk yuvalarda bulunan ilk dört OFDM sembolü ile sınırlıdır. Frekansta, PBCH, DC alt taşıyıcı üzerinde merkezlenmiş 72 alt taşıyıcı işgal eder.

3.12.3. Uplink fiziksel kanalı

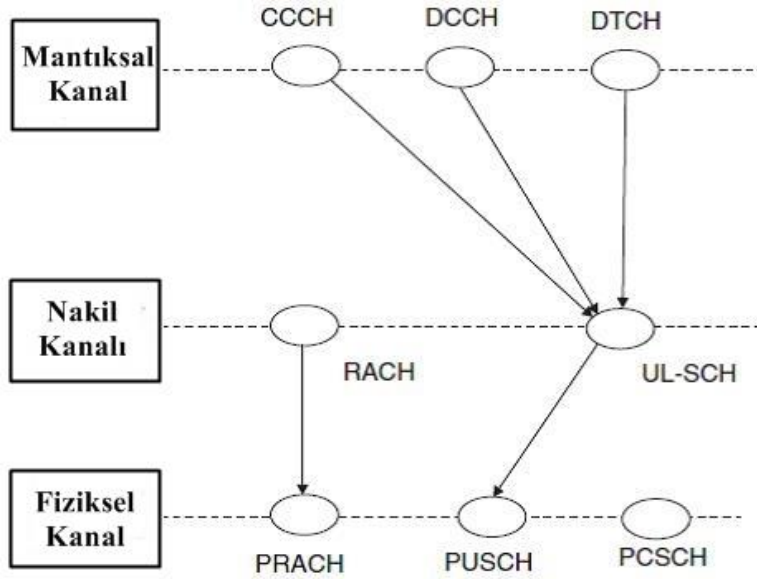
Çizelge 3.13 LTE uplink fiziksel kanallarını özetlemektedir.

Çizelge 3.13. LTE uplink fiziksel kanalları

Uplink fiziksel kanalı	İşlevleri
Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)	Uplink kullanıcı veri trafiği
Physical Uplink Control Channel (PUCCH)	Uplink Kontrol Bilgisi (UCI)
Physical Random Access Channel (PRACH)	Rasgele erişim başlangıç eklerine üzerinden ağa ilk erişim

Fiziksel uplink paylaşılan kanalı (PUSCH-Physical Uplink Shared Channel) kullanıcı terminalinden iletilen kullanıcı verilerini taşır. Fiziksel rasgele erişim kanalı (PRACH-Physical Random Access Channel) rasgele erişim başlangıçlarının iletimleri boyunca oluşturulan ağa UE'nin ilk erişimi için kullanılır. Fiziksel uplink kontrol kanalı (PUCCH-Physical Uplink Control Channel), zamanlama isteklerini (SRs-Scheduling Requests), iletim başarı onaylarını (ACKs/NACKs-acknowledgments of transmission

success or failure) ya da hatalarını, CQI, downlink kanalı ölçümleri raporlarını, önkodlama matrix bilgisini (PMI-Precoding Matrix Information) ve sıra göstergesini (RI-Rank Indication) içeren UCI taşır. Şekil 3.28 LTE uplink mimarisindeki mantık, nakil ve fiziksel kanallar arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 3.28. LTE uplink mantık, nakil ve fiziksel kanal eşleşmesi

Mantıksal kanallar ile başladığımızda elimizde bir DTCH, iki mantıksal kontrol kanalı, bir CCCH ve bir DCCH mevcuttur. Bu üç kanal, UL-SCH olarak bilinen nakil kanalını oluşturmak için bir araya getirilmektedir. Son olarak, PUSCH ve PUCCH fiziksel kanallar olarak yapılandırılır. Rasgele erişim kanalı (RACH-Random Access Channel) olarak bilinen nakil kanalı da PRACH'ye eşleştirilir.

3.12.4. Uplink kanalının işlevleri

PUCCH kontrolü sinyalizasyon bilgilerinin üç tipini taşır: Downlink için ACK/NACK sinyalleri, zamanlama istek (SR-Scheduling Request) göstergeleri, CQI, PMI ve RI içeren downlink kanalı bilgilerinden gelen geri bildirimler. Downlink kanal bilgisi geri bildirimleri downlinkteki MIMO modları ile ilgilidir. MIMO iletim düzenleri downlinkte doğru çalıştığından emin olmak için, her bir terminal radyo bağlantısının kalitesi üzerinde ölçümler gerçekleştirmek ve kanal karakteristiklerini baz istasyonuna bildirmek zorundadır. Bu, temelde PUCCH'da içerilen UCI kanal kalite işlevlerini tanımlar. CQI, UE

tarafından alınan downlink mobil radyo kanal kalite ölçümlerinin bir göstergesidir ve baz istasyonuna sonraki zamanlama kullanılmak üzere iletilir. Bu UE'nin baz istasyonuna uygun bir dizi modülasyon şemalarını önermesine izin verir ve kodlama oranları mevcut radyo link kalitesine eşlenir. CQI bilgisi olarak iletilen 16 adet modülasyon şema ve kodlama oran kombinasyonu vardır. Yüksek CQI değerleri yüksek modülasyon emir ve yüksek kodlama oranlarının yerine geçer. Ya geniş bantları oluşturan yapı bloklarına uygulanan geniş bant CQI'yı ya da başka bir alt bant CQI'yı kullanılır ki bu belirli sayıdaki kaynak bloklarına atanmış CQI değeridir. Daha yüksek tabaka yapılandırmaları terminaldeki CQI ölçümlerinin oran, periyot veya frekansını belirler.

PMI, belirli bir radyo bağlantısı için bir baz istasyonunda kullanılmak üzere tercih edilen bir ön kodlama matrisinin göstergesidir. PMI değerleri iki, dört veya sekiz verici anten yapılandırması için ön kodlama tablo endekslerini temsil eder. RI, komşu alıcı antenler arasında gözlenen ilintilerdeki etkisi ve kanal kalitesi üzerindeki etkiye dayalı yararlı verici anten sayısını işaret eder.

3.13. Fiziksel Sinyaller

Referans ve senkronizasyon sinyalleri dahil olmak üzere bir dizi fiziksel sinyal, paylaşılmış fiziksel kanal içinde iletilir. Fiziksel sinyaller PHY tarafından kullanılan özel bir kaynak elemanına eşleşir ancak daha yüksek katmanlardan kaynaklanan bilgi taşımaz.

3.13.1. Referans sinyalleri

Frekans alanındaki kanal-bağımlı zamanlama LTE standardının en çekici özelliklerinden biridir. Örneğin, kanal kalitesini etkileyen downlink zamanlamasını gerçekleştirmek için, mobil terminal baz istasyonuna CSI temin edilmelidir. CSI, downlinkte iletilen referans sinyallerin ölçülmesiyle elde edilebilir. Referans sinyalleri alıcı ve vericide senkronize dizi jeneratörleri ile üretilen yayınlanmış sinyallerdir. Bu sinyaller zaman-frekans ızgarasında bulunan belirli kaynak elemanları içerisine yerleştirilir.

Downlink referans sinyalleri

Downlink referans sinyalleri, kontrol ve veri bilgilerini eşitlemek ve kipini çözmek için gerekli kanal tahmin işlevselliği destekler. Onlar aynı zamanda CSI'da (örneğin RI, CQI, PMI ve gibi) kanal kalite geribildirimini için gerekli ölçüm aracıdır. LTE downlink iletimi için beş referans sinyal türünü belirtir: CSR, demodülasyon referans sinyali (DM-RS-Demodulation Reference Signal, UE belirli referans sinyali), kanal-durum bilgi referans sinyali (CSI-RS-Channel-State Information Reference Signal), MBSFN referans sinyalleri ve konumlandırma referans sinyalleri.

CSR'ler bir hücredeki bütün kullanıcılar için ortaktır ve tüm downlink alt çerçevede iletilir. DM-RS'ler downlinkte 7, 8 ya da 9 no'lu çok kullanıcı iletim modunda kullanılır. Adından da anlaşılacağı gibi, bir hücre içinde, her bir mobil terminal tarafından gerçekleştirilen kanal kestirimi için tasarlanmıştır. CSI-RS'ler ilk kez LTE Release 10'da tanıtıldı. Onların ana işlevi, sekizden fazla anten kullanılırken CSI ölçümlerinde kullanılan CSR'lerle ilişkili yoğunluk sorununu hafifletmektir. Bu nedenle, CSI-RS'lerin kullanımı 9 modunda çok kullanıcı iletiminde sınırlıdır. MBSFN referans sinyalleri çoklu yayın/yayın hizmetlerinde uyumlu kip çözme amacıyla kullanılır. Son olarak, ilk LTE Release 9'da tanıtılan konumlandırma referans sinyalleri, belirli bir terminalin konumunu tahmin etmek için çoklu hücreler üzerindeki ölçümleri yapmaya yardımcı olur.

Hücre-belirli referans sinyalleri

CRS'ler, her bir downlink alt çerçevesinde ve frekans alanındaki her kaynak bloğunda iletilir, böylece tüm hücre bant genişliğini kapsar. CRS'ler herhangi bir downlink fiziksel kanalın tutarlı kanal tahmininde uyumlu kip çözümü için terminal tarafından kullanılabilir ancak PMCH ve PDSCH'nin 7, 8 ya da 9 no'lu kod kitabı olmayan ön şifrelemeye karşılık gelen iletim durumu hariç. CRS'ler aynı zamanda da CSI gerektiren terminal tarafından kullanılabilir. Son olarak, CRS'lerde gerçekleştirilen CQI, RI ve PMI gibi terminal ölçümleri hücre seçimi ve teslim kararları için temel olarak kullanılır.

UE-belirli referans sinyalleri

CSR'ler sadece kanal kestirimi için kullanılmazken, DM-RS'ler veya UE-belirli referans işaretleri sadece downlink iletim modu 7, 8 ya da 9, kullanılır. DM-RS'ler ilk olarak tek bir katmanı desteklemek amacıyla LTE Release 8'de tanıtıldı. LTE Release 9'da iki kata kadar destekleme sağlanmıştır. Release 10 tanıtılan genişletilmiş özellikler sekiz eş zamanlı referans sinyalini destek amacıyla oluşturuldu. Sadece tek bir DM-SC kullanıldığı durumda, bir çift içinde kaynak bloğunun için 12 referans sembolü bulunur. Kısaca tartışılacağı üzere, bir kaynak elemanı bir antende bir referans sinyali yayınladığı durumda, CSR'ler diğer bütün anten portlarında spektral boş değerler ya da kullanılmayan kaynak elemanları gerektirir. Bu CSR ve DM-RS arasındaki büyük bir farktır. İki DM-RS iki anten üzerinde kullanıldığında, 12 referans sembolünün tümü her iki anten bağlantı noktalarında yayınlanır. Referans sinyalleri arasındaki parazit, her bir çift ardışık referans sembolleri için karşılıklı dikey desenlerin üretilmesi sayesinde azaltılır.

CSI referans sinyalleri

CSI-RS'ler 4 ile 8 anten bulunması durumu için tasarlanmıştır. CSI-RS'ler ilk olarak LTE Release 10'da tanıtıldı. CSI-RS'ler, LTE iletim modu 9'da bulunan DM-RS'ye tamamlayıcı bir işlev gerçekleştirmek üzere tasarlanmıştır. DM-RS kanal tahmin işlevselliğini desteklemesine karşın, bir CSI-RS, CSI'ya ihtiyaç duyar. Kaynak ızgarası içinde iki tür referans sinyali bulunmasından kaynaklanan yükü azaltmak için, CSI-RS'lerin zamansal çözünürlüğü azaltılır.

Uplink referans sinyalleri

LTE standardında iki tür uplink referans sinyali vardır: DM-RS ve Sondaj Referans Sinyali (SRS): Her iki uplink referans sinyali Zadoff-Chu dizilerine dayanır. Zadoff-Chu diziler, downlink birincil eşzamanlama sinyalleri ve uplink önsözleri (preambles) üretiminde de kullanılır. Farklı UE'ler için referans sinyalleri, temel dizinin farklı çevrimsel kaydırma parametrelerinden elde edilir.

Demodülasyon referans sinyalleri

DM-RS'ler uplink kaynak ızgarasının parçası olarak UE tarafından iletilir. Bunlar, PUCCH ve veri PUSCH bilgilerini demodüle etmek ve eşitlemek için baz istasyonu alıcısı tarafından kullanılmaktadır. PUSCH durumunda, normal bir döngüsel örnek kullanılırsa, DSR sinyalleri her 0,5 ms slotundaki OFDM dördüncü simgesi üzerinde yer alır ve kaynak blokları arasında genişler. PUCCH durumunda, DSR konumu kontrol kanalının yapısına bağlı olur.

Sounding referans sinyali

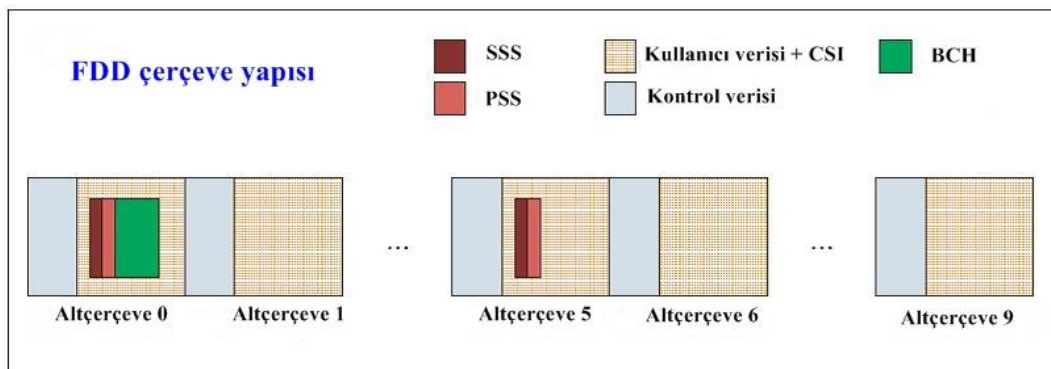
SRS'ler, baz istasyonunun farklı frekanslarda uplink kanal tepkisi tahmin etmesini sağlamak üzere uplink üzerinden iletilir. Bu kanal durumu tahminleri uplink kanal bağımlı programlama için kullanılabilir. Bu kanal yanıtları elverişli olduğunda, zamanlayıcının uplink bant genişliği bölümlerine kullanıcı verilerini tahsis edebileceği anlamına gelir. TDD modundakine benzer şekilde, SRS iletimlerinin downlink kanal durum zamanlama tahmini ve kontrolü gibi diğer uygulamaları vardır

3.13.2. Eşzamanlama sinyali

Sinyaller referans ek olarak, LTE eşzamanlama sinyallerini de belirler. Downlink eşzamanlama sinyalleri, çerçeve sınırlarının tespiti, anten sayısının belirlenmesi, ilk hücre araştırması, komşu hücre araştırması ve teslim belirlenmesi de dahil olmak üzere çeşitli prosedürlerde kullanılır. İki eşzamanlama sinyali LTE içerisinde mevcuttur: Birincil Eşzamanlama Sinyali (PSS-Primary Synchronization Signal) ve İkincil Eşzamanlama Sinyali (SSS-Secondary Synchronization Signal). Hem PSS hem de SSS, DC alt taşıyıcı etrafında bulunan 72 alt taşıyıcı olarak iletilir. Bununla beraber, FDD modundaki yerleştirilmeleri TDD modundakinden farklıdır. TDD çerçevesinde birbirlerine yakın olarak yerleştirilemezler. SSS, 0 ve 5 alt çerçevelerinin son sembollerine yerleştirilir ve PSS takip eden belirli alt çerçevenin ilk OFDM sembolleri olarak yerleştirilir. Eşzamanlama sinyali PHY hücre türü ile bağlantılıdır. LTE'de, her biri üç benzersiz kimlikli 168 gruba ayrılmış 504 tanımlı hücre kimliği vardır. SSS 0-167 arası değerlere sahip grubu taşıırken, PSS benzersiz kimlikli 0, 1 ya da 2'yi taşır.

3.14. Downlink Çerçeve Yapıları

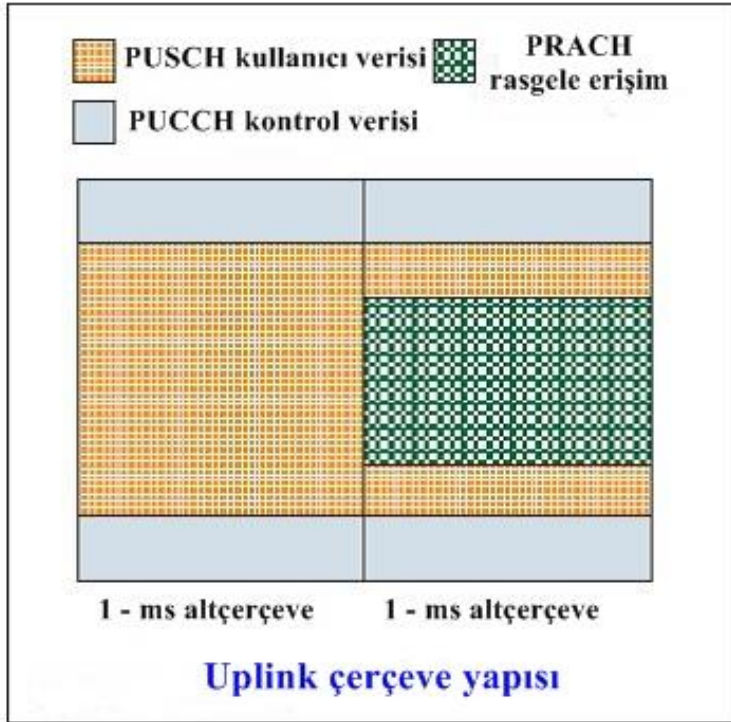
LTE iki downlink çerçeve yapısını belirtir. Çerçeve Tipi 1, FDD dağıtımı için ve çerçeve tip 2, TDD dağıtımı için kullanılır. Her çerçeve 10 alt çerçeveden oluşur ve her bir alt çerçeve zaman-frekans kaynak ızgara tarafından karakterize edilir. Kullanıcı verileri, kontrol kanalları, referans ve eşzamanlama sinyalleri olmak üzere üç kaynak ızgara bileşeni tanımlanır. OFDM sembolleri üretilmeden ve iletilmeden önce LTE kaynak ızgarası alt çerçevelerce doldurulurken, bu bileşenlerin her birinin nasıl ve nereye yerleştirildiği önemlidir. Şekil 3.29 tip 1 radyo çerçeve yapısını gösterir. Her çerçevenin süresi 10 ms'dir ki bu da 0-9 arasında değişken endeksler tarafından belirtilen 1 ms'lik alt çerçevelerden oluşur. Her bir alt-çerçeve 0,5 ms'lik iki yuvaya bölünür. Normal veya uzatılmış bir sıklık önekinden hangisinin kullanıldığına bağlı olarak, her bir yuva yedi ya da altı OFDM'den oluşur. DCI her bir alt çerçevenin ilk yuvasına yerleştirilir. DCI; PDCCH, PCFICH ve PHICH içeriğini taşır ve birlikte her bir alt çerçevedeki ilk üç OFDM sembolünü işgal eder. Bu bölge tabaka 1'den (PHY) tabaka 2'ye (MAC tabakası) aktarılan bilgileri içerdiği için L1/L2 kontrol bölgesi olarak da bilinir. MIB içeren PBCH 0 no'lu alt çerçeve, PSS ve SSS'ler ise 0 ve 5 no'lu alt çerçeveler içinde yer alır. PBCH kanalı, PSS ve SSS sinyalleri DC alt taşıyıcı merkezli 6 kaynak bloğu içine yerleştirilir. Buna ek olarak, CSR'ler zaman ve frekans ayırmalı belirli bir desene sahip her bir alt çerçevedeki her bir kaynak bloğu boyunca yerleştirilir. Kısaca ele alınacağı gibi, CSR sinyalleri için yerleştirme yöntemleri MIMO modu ve kullanımda antenlerin sayısına bağlıdır. Her bir alt çerçevedeki kaynak elemanlarının kalanı kullanıcı trafik verilerine tahsis edilir.



Şekil 3.29. Downlink FDD alt çerçeve yapısı

3.15. Uplink Çerçeve Yapıları

Uplink çerçeve yapısı downlink için olanla bazı açılardan benzerdir. İki adet 0,5 ms'lik yuvaya bölünmüş 1ms'lik alt çerçevelerden oluşmaktadır. Normal veya uzatılmış bir sıklık önekinden hangisinin kullanıldığına bağlı olarak, her bir yuva yedi ya da altı SC-FDM sembolünden oluşmaktadır. İç bant kaynak blokları, bant dışı emisyonların azaltılması amacıyla veri kaynak elemanları PUSCH için ayrılmıştır. Farklı kullanıcılar, aynı hücre içindeki kullanıcılar arasındaki dikliği sağlayan farklı kaynak blokları olarak atanır. Veri iletimi, frekansı çeşitliliği sağlamak için yuva sınırında atlama yapabilir. Kontrol kaynakları PUCCH frekans çeşitliliği sağlayan atlamalı iç yuva ile taşıyıcı bant kenarına yerleştirilir. Veri demodülasyon için gerekli referans sinyalleri veri ve kontrol kanalları boyunca serpiştirilir. Şekil 3.30 bir uplink çerçeve yapısını göstermektedir.



Şekil 3.30. Uplink çerçeve yapısı

4. LTE FİZİKSEL KATMANIN MODELLENMESİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

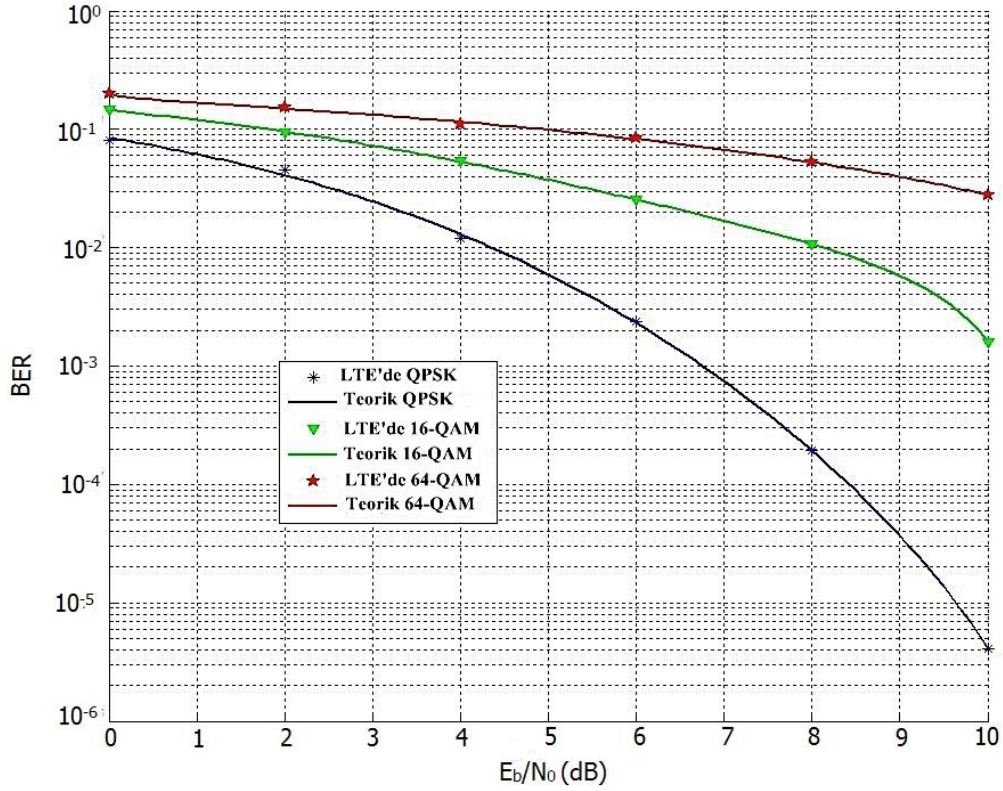
4.1. Modülasyon (Kipleme) ve Kodlama

LTE sistemlerinin fiziksel katmanı DLSCH ve PDSCH yapılarının birleşiminden oluşmaktadır. DLSCH aynı zamanda downlink iletim kanalı (TrCH-Downlink Transport Channel) işlemi olarak da bilinmektedir. Bu işlem sırasıyla CRC kod tutucusu, veri alt blok işlemcisi, kanal kodlama (Turbo kod), hız eşleştirme, Hibrit Otomatik Tekrar Talebi ve kodsözcüğü oluşturma işlemlerinden oluşur. Bu kod cümleleri PDSCH için girdi teşkil eder. Bu veriler yine sırasıyla karıştırıcı (scrambler), kipleme, MIMO işlemi, OFDM çoklama gibi işlemlerden geçer.

Bu bölümde LTE standardında kullanılan kipleme ve kodlama yapıları ele alınmıştır. MATLAB programı kullanılarak farklı kipleme ve kodlama yöntemlerinin AWGN kanal altında yapmış oldukları BER performansları incelenmiştir.

4.2. LTE Sistemlerinde Kipleme Yapıları

LTE standardı QPSK, 16-QAM ve 64-QAM kipleme yapılarını içerir. QPSK kipleme yönteminde her bir sembol yıldız diyagramında 4 farklı değer alır. QPSK kipleme yöntemi oluşturacağı farklı semboller için 2'şer adet bit verilerini işler. Aynı şekilde 16-QAM kipleme yöntemi 16 farklı sembol için 4 adet veri biti, 64-QAM kipleme yöntemi ise 6 adet veri bitini bir sembolde ifade edebilir. Çoklu kipleme yapısı kanalın yapısına göre uyarlanabilir kipleme (Adaptive Modulation) yöntemi ile uygulanabilir. Eğer kanalın yapısı göreceli olarak iletişim için uygun ise ki bu durumda SNR yani sinyalin gürültüye oranı yüksek olduğu anlaşılır. Bu nedenle 64-QAM kipleme yöntemi tercih edilir. Ayrıca kanalın daha gürültülü olduğu, yani sinyalin gürültüye oranının düşük olduğu durumlarda semboller arası uzaklığın çok olduğu QPSK kipleme yöntemi kullanılır. Bu durumda iletişimde birim semboldeki bit sayısı azaltılır iken hata yapma olasılığı azaltılmış olunur.



Şekil 4.1. LTE standardında kullanılan kipleme yöntemlerinin teorik ve simülasyon BER eğrileri

İletim sırasında kesin bir kalite elde etmek için yüksek E_b/N_0 değerlerinde iletişim yapmak uygundur Şekil 4.1'den de görüldüğü üzere düşük E_b/N_0 değerlerinde düşük seviyeli kipleme yöntemleri daha düşük bit hata oranına sahip iken yüksek seviyeli kipleme yöntemlerinin bit hata oranı yüksektir. Şekil 4.1'de LTE standardında kullanılan kipleme yöntemlerinin teorik ve simülasyon BER eğrileri gözlenmektedir.

Şu ana kadar kodlama ve karıştırma işlemleri iletişim boyunca uygulanmamıştır. Sonraki bölümde karıştırıcıların etkisi ele alınacaktır.

4.3. Bit-Seviye Karıştırması (Bit-Level Scrambling)

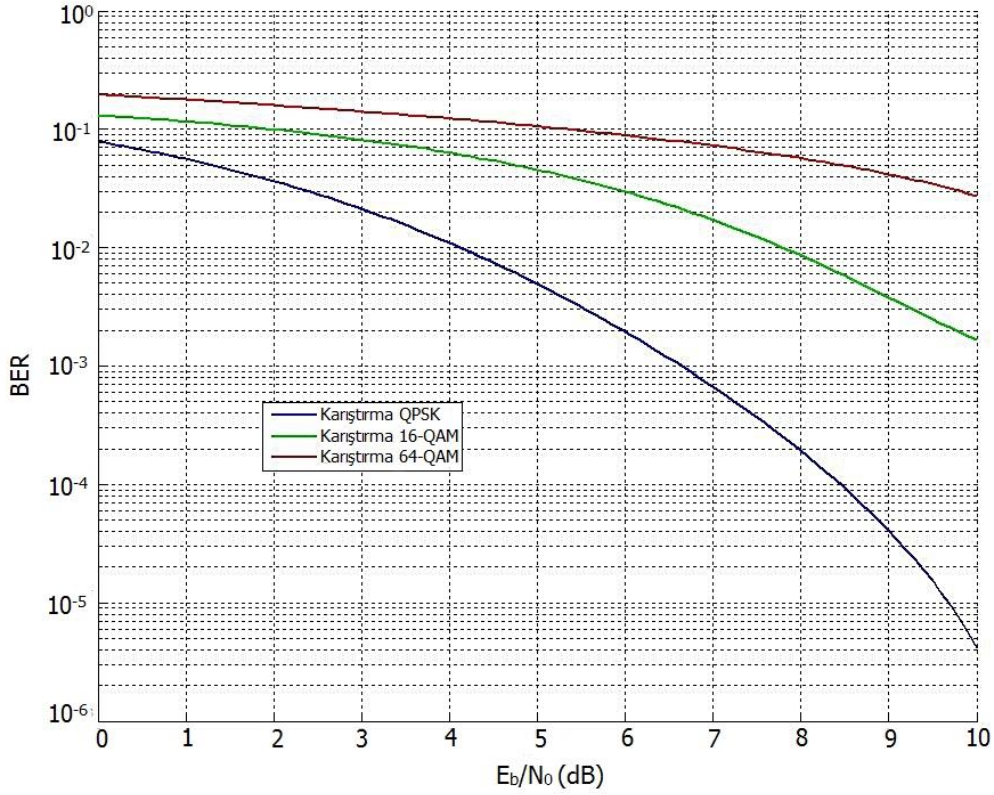
LTE sistemlerinde downlink işlemi sırasında karıştırma işlemi, farklı hücrelerden kaynaklanan verilerin girişimini önlemek için kullanılır. Karıştırma işlemini gerçekleştirirken her bir hücre için farklı dizi yapıları kullanılır. Bit-seviyesinde karıştırma işlemi bütün LTE sistemlerindeki downlink yapılarında kullanılmaktadır. Karıştırma işlemi

pseudo-random dizi oluşturma ve bit-seviyesinde çarpma olmak üzere iki kısımdan oluşur. Rastgele diziler Gold dizileri ile üretilir. Gold kod dizilerinin uzunluğu 31 olarak standardize edilir. ıkış bitleri ise XOR (exclusive-or operation) operatörünün sonucu olarak elde edilir. Gold dizilerini oluşturmak için kullanılan polinom yapıları aşağıda belirtilmiştir.

$$p_1(x) = x^{31} + x^3 + 1 \quad (4.1)$$

$$p_2(x) = x^{31} + x^3 + x^2 + x + 1 \quad (4.2)$$

Alıcı kısmında yine aynı dizi vektörü kullanılarak karıştırma çözme işlemi gerçekleştirilir. Fakat karıştırıcı ve karıştırıcı çözme katmanlarında bazı farklılıklar vardır. Örneğin eğer alıcı kısmında katı-kip zme (Hard-decision Demodulation) yöntemi uygulanmış ise vericide karıştırma işlemi bit seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Bu durumda gelen bitler ile Gold dizisinin XOR işlemi ile karıştırma çözüm işlemi gerçekleştirilir. Diğer taraftan eğer yumuşak-kip çözme işlemi gerçekleştirilecek ise, bit seviyesinde XOR operatörü kullanılamaz. Bunun yerine LLR (Log-Likelihood Ratio) işlemi uygulanır. Bu durumda karıştırma çözüm işlemi LLR değerleri ile Gold dizisi çarpma operatörü olarak işleme tabi tutulur. 0 değerini almış Gold seri değerleri 1 olarak ve 1 değerini almış olanlar ise -1 değerlerine dnştrlrlr.

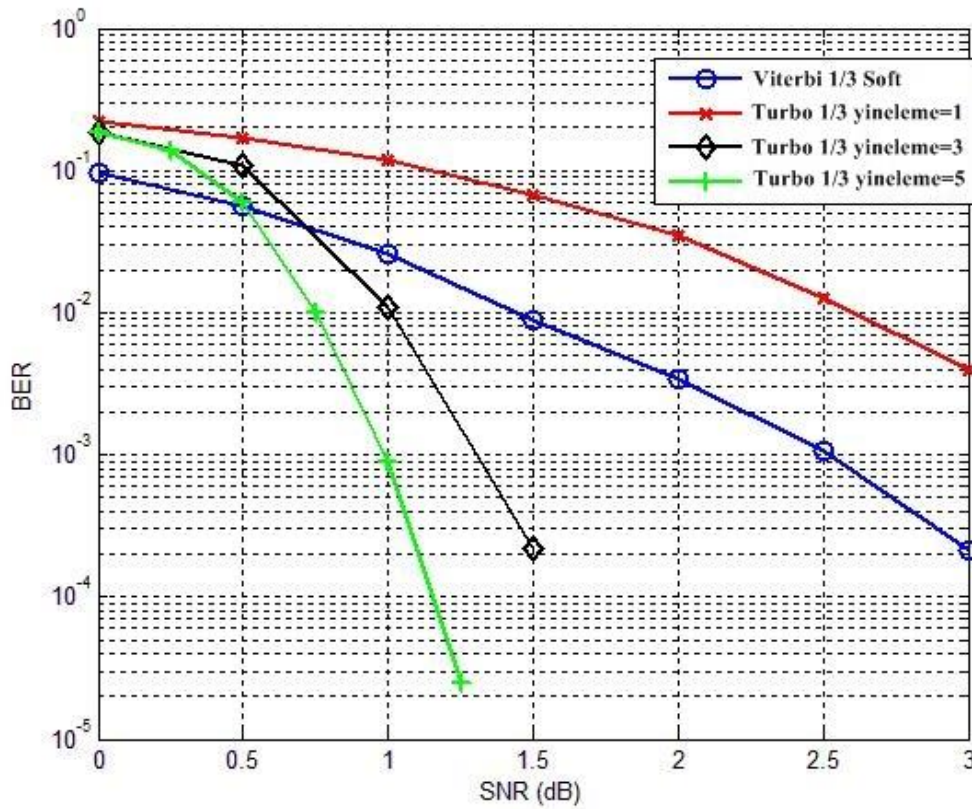


Şekil 4.2. Kipleme yöntemlerinde karıştırma sonuçlarının grafiği

Görüldüğü üzere karıştırma işlemin etkisi önceki kipleme yöntemlerinden sonra fazla olmamaktadır. Fakat sonraki bölümde Kanal kodlamanın etkisi ele alındığında ciddi BER performansı sağlandığı görülebilmektedir.

4.4. Kanal Kodlama

Bu kısımda hata düzeltme kodlarından olan Turbo kodlar ele alınacaktır. Şekil 4.3'den görüldüğü üzere aynı kod oranındaki Konvolüsyon kodlamada kullanılan Soft Decision Viterbi algoritması ile Turbo kodlama karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi yineleme (iteration) sayısı 3 ile 5 olan Turbo kodlama daha iyi BER performansı sergilemektedir. Bu yüzden Turbo kodlama LTE standardında tercih edilen bir kodlama şekli olarak söylenebilir. Turbo kodlamada yineleme sayısının artması, görüldüğü üzere BER performansında olumlu etki göstermektedir.



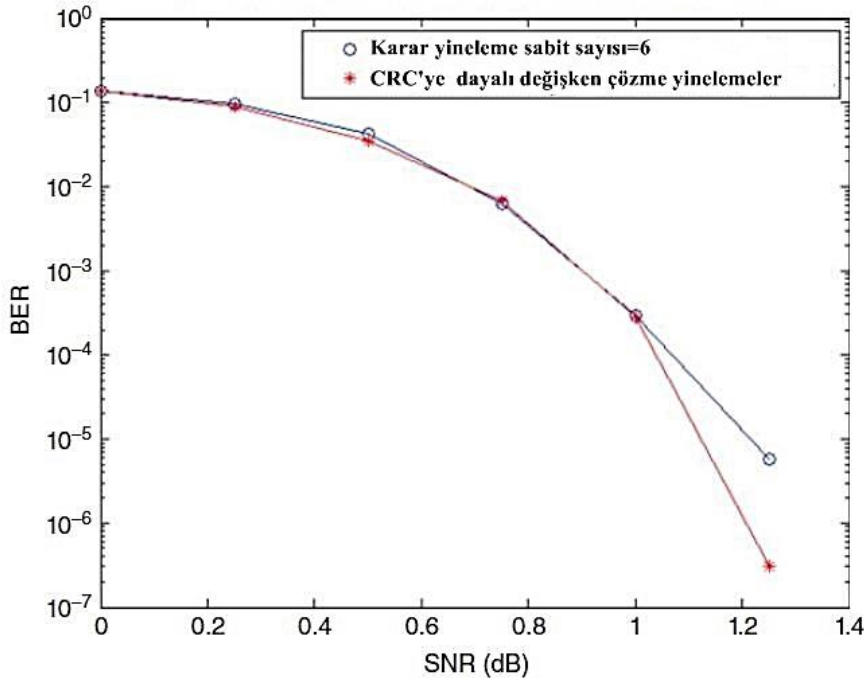
Şekil 4.3. Aynı kod oranındaki Konvolüsyon kodlamada kullanılan Soft Decision Viterbi algoritması ile Turbo kodlamanın karşılaştırılması

Fakat yineleme sayısının çokluğu kod çözme işlemini uzatmaktadır. Bu da bottleneck (darboğaz)'den kaynaklanan gecikmelere sebebiyet vermektedir. İletişim sırasında gereğinden fazla yinelemelere sebebiyet vermemek için Early-Late Mechanism adı verilen bir sistem geliştirilmiştir. Bir sonraki simülasyon sonuçlarında bu konuya değinilecektir.

4.5. Erken-Geç Mekanizması (Early-Late Mechanism)

Kanal kodlama yöntemleri başlığı altında Turbo kodlarda yineleme sonuçları ele alınmış olup BER performansına etkisi grafik sonuçları ile belirtilmiştir. Kanalın durumuna göre kod çözme işlemini ciddi anlamda geciktirmemek adına Early-Late Mechanism kullanılarak optimum kod-çözme işlemi hedeflenmektedir. Bu yüzden Turbo kodlayıcının girişine CRC mekanizması eklenmiştir. Bu sayede Turbo kod çözme işleminin sonunda hatalı bit olup olmadığı kontrol edilerek yeni bir yinelemeye ihtiyaç olup olmadığı tespit edilmektedir. Eğer hatasız bir iletişim varsa Turbo kod çözücü yineleme işlemini

durdurmaktadır. Hatalı bir iletişimin olması durumunda ise, yineleme işlemini Turbo kod çözücüyle gerçekleştirmektedir.



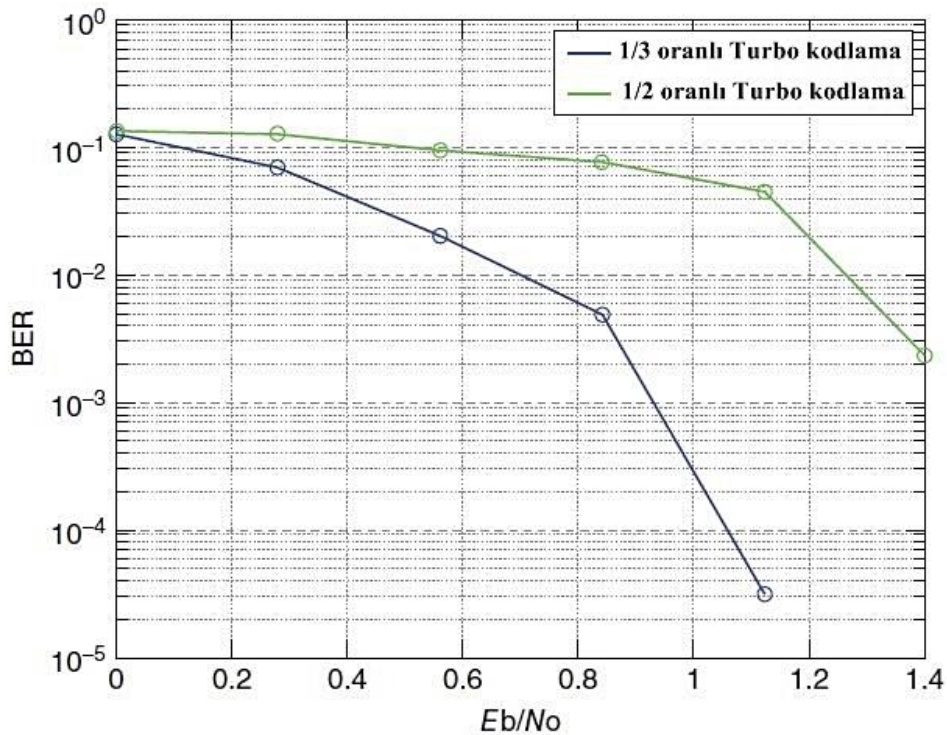
Şekil 4.4. CRC tabanlı Early Termination (Erken sonlandırma) olmayan ve Turbo kodlu olan durumlarda BER sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.4'te Early Termination işleminin varlığında ve yokluğundaki iki durum için BER performans analizi yapılmıştır. Önceki simülasyonlardaki kipleme, karıştırma, kanal kodlama yöntemlerini üzerine Early Termination mekanizması uygulanmaktadır. Görüldüğü üzere her iki durum içinde yakın bir BER performansı elde edilmektedir. Fakat 1 dB değerinde 10 milyon bit için yapılan MATLAB kodlarının sürülme süreleri ölçüldüğünde Early Termination kodları ile yapılan simülasyon süresi 131,27 saniye sürerken, Early Termination kodlarsız yapılan simülasyon süresi 178,77 saniye sürmektedir. Böylelikle yineleme sayısındaki bu düzenleme ile kod çözme süreleri performansta kayıp olmadan optimize edilmiştir.

4.6. Oran Eşleme (Rate Matching)

Şu ana kadarki çalışmada Turbo kanal kodlama ve kod çözme işlemlerinde kod oranını 1/3 olarak sabit tutuldu. Oran eşleme, uyarlamalı kodlama enstrümanlarından biri olarak

modern haberleşmede önemli bir yere sahiptir. Bu yapı verimliliği artırmada yardımcı olur. Bozulmanın az olduğu durumlarda birim kod oranına sahip kanal kodlama kullanılır. Bu sayede daha az fazlalık bitler üretilmiş olunur. Bunun yanında bozulmanın çok olduğu kanallarda daha küçük kod oranlarında örneğin 1/3 gibi kanal yöntemleri kullanılarak hata düzeltmek fazlalık bitleri artırılır. Oran eşleme ile birlikte yapılan kanal kodlama sırasında ilk önce 1/3 oranında kanal kodlama yapılır. Oran eşleme ise istenilen kod oranında iletişimin sağlanabilmesi için tekrarlama ve kırpma (punching) işlemlerini gerçekleştirilir. Eğer kod oranı 1/3 den düşük olması gerektiğinde Turbo kodlayıcısının çıktısı tekrarlanır iken kod oranının 1/3 den yüksek olması durumunda ise kırma ya da silme işlemleri gerçekleştirilir. Şekil 4.5'te oran eşleme kullanarak yapılmış olan BER performans grafiği gösterilmiştir. 6 yinelemede Turbo kodlama sabit tutulmuştur ve şu ana kadar kullandığımız karıştırma, kipleme yöntemleri aynen uygulanmaktadır. Görüldüğü üzere beklendiği gibi düşük kod oranında Turbo kod daha iyi performans göstermektedir. Kanalin durumu göz önünde bulundurulduğunda en uygun kod oranında en uygun kod oranının kullanılması sistemde gözle görülür bit etkisi göstermektedir.

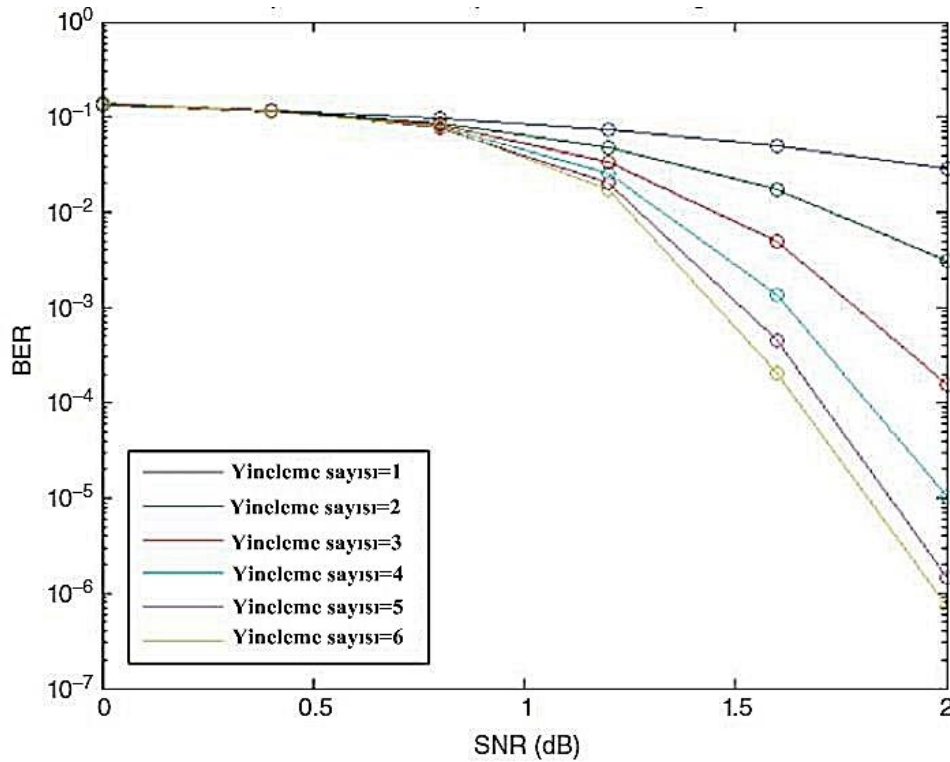


Şekil 4.5. Turbo kodlama ile oran eşleme kullanarak yapılmış olan BER performans grafiği



Şekil 4.6. Nakil-kanal işleme yapısı

Şekil 4.6’da belirtilen DLSCH işleminin olası maksimum yineleme değerine kadar BER performansı AWGN kanal altında Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Bu BER performansı kodlama oranı = 1/2, QPSK ve 6 yineleme ile gerçekleştirilmiştir.



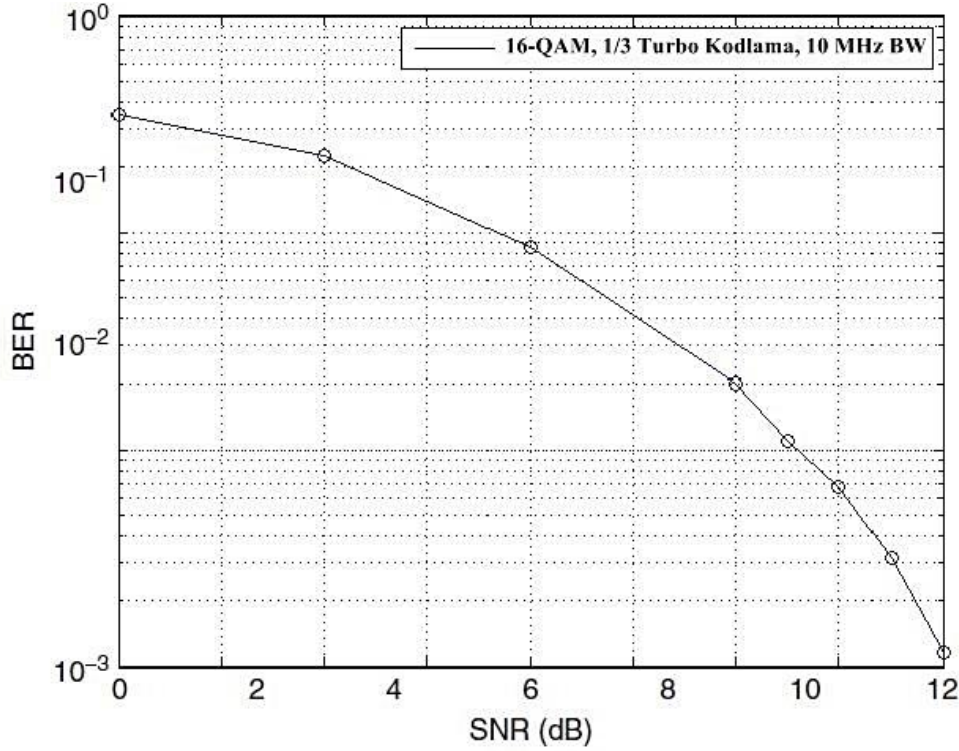
Şekil 4.7. 6 yinelemeli, QPSK modülasyonu ile 1/2 oranlı DLSCH'nin BER grafiği

Beklendiği gibi yineleme sayısındaki artış BER performansını olumlu etkilemekte ve Early Termination işleminin önemi ortaya çıkar. Çünkü bu durum LTE standardına göre yineleme sayısının artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere DLSCH kanalındaki bütün fiziksel katman algoritmalarının BER performansları denenmiştir. Sonraki kısımda OFDM yapısının eklenmesi ile oluşan BER performans analizleri gerçekleştirilecektir. OFDM yapısının eklenmesi ile oluşacak iletişim kanalımızın adı PDSCH olmaktadır. Bundan sonra gözlemlenecek olan BER performans analizlerinde şu ana kadar kullandığımız AWGN kanalın yerine, standartta belirtilen Rayleigh dağılımlı kanal üzerinden LTE kanal oluşturulup, BER performansı gösterilecektir. OFDM yapısı daha önceki kısımlarda anlatılmıştır.

4.7. SISO Durumu

Bu kısımda tek-girişli tek-çıkışlı durum altında DLSCH ve PDSCH alıcı-verici devreleri ele alınacaktır. DLSCH kanalının çıktısı PDSCH kanalının girdisi olarak tanımlandıktan sonra OFDM sinyal şekline göre BER performans analizleri yapılacaktır.



Şekil 4.8. Her bir SNR değerinde 8 yineleme, 16-QAM kipleme, 1/3 oranında Turbo kodlama altında BER grafiği

Şekil 4.8’de 50 milyon bit işleme alındığında SNR a karşı BER performans analizi yapılmış olup, her bir SNR değerinde 8 yineleme, 16-QAM kipleme, 1/3 oranında Turbo kodlama altında BER grafiği görülmektedir. Bant genişliği standartlarda yer alan 10 MHz’lik bant genişliği değerine ulaşılmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında LTE PHY'nin matematiksel modellemesinin matlab ile simülasyonu ve BER performans analizleri yapılmıştır. Çalışmada, LTE çoklu taşıyıcılı yayın şemalarının yanı sıra (yani downlinkte OFDM ve onun uplinkte tek taşıyıcılı eşleniği olan SC-FDM), çok antenli SIMO ve MIMO yayın şemaları da anlatılmıştır. LTE standardında SISO ve OFDM'nin nasıl birleştirildiği gösterilmiş ve teknolojinin yüksek maksimum veri oranları ve yüksek sabit haberleşme çıktıları sağlama amacındaki başarısı açıklanmıştır. Aynı zamanda LTE standardının bütün performansına katkı sağlayan, adaptif modülasyon boyunca elde edilen link adaptasyonları, kodlama ve verimli Turbo kodlaması gibi, daha önceki standartlarda mevcut en iyi teknolojilerle nasıl işbirliği yapılacağı tartışılmıştır. Hem downlink paylaşılan kanal işlemine (DL-SCH) hem de fiziksel downlink paylaşılan kanal işlemine (PDSCH) ait açıklamalar yapılmıştır. OFDM ve SC-FDM yayın şemalarında kullanılan zaman frekans kaynak ızgara oluşumu detaylı olarak incelenmiştir. Kaynak ızgara yapısının anlaşılması, LTE standardının kullanıcı verisini, kontrol bilgisini, referans ve diğer sinyalleri nasıl organize ettiğine, alıcıda veriyi açığa çıkarmak için gerekli eşitleme işlemlerini ve kanal tahminini nasıl gerçekleştirdiği anlatılmıştır. LTE standardının frekans bantları, bant genişlikleri, zaman çerçevesi ve zaman frekans yapısı detaylandırılarak anlatılmıştır. Downlink yayın için OFDM ve uplink yayın için SC-FDM'yi kapsayan LTE standardının çoklu taşıyıcı şemaları üzerinde özenle durulmuş, PHY modelinin anlaşılmasına temel teşkil eden OFDM kaynak ızgara bileşenleri tanımlanmıştır. Uplink ve downlink içerisindeki çerçeve yapıları da anlatılmış, LTE standardında kullanılan çeşitli yayınlarından olan SIMO ve MIMO şemalarına kısa bir giriş yapılmıştır. LTE standardında kullanılan çeşitli kanal ve sinyaller gözden geçirilmiştir.

Ayrıca bu tez çalışmasında AWGN basit kanal modeli, temel LTE standardında kullanılan ileri hata düzeltme şemaları üzerinde çalışılmıştır. Statik performans ölçümlerinde LTE standardı tarafından AWGN çevre yayılımı kullanılmıştır. AWGN kanalındaki performansın gerçek kanal modellerine ve çoklu yol sönmülemelerine bağlı olmadığı yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. OFDM ve frekans alan eşitleyici SC-FDM kullanılarak çok yollu sönmülemelere karşı nasıl mücadele edileceği gösterilmiştir. LTE standardında kullanılan çoklu taşıyıcılı yayın şemaları çalışılmış, MATLAB'da OFDM yayın tabanlı downlink alıcısının geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Başlangıçta daha gerçekçi bir

mobil iletişim kanal sunumu incelenmiş ve çok yollu sönümleme kanal modelleri tanıtılmıştır. Sonra çok yollu sönümleme etkilerine karşı mücadele etmek için tasarlanmış bir OFDM yayın şemasının işlevsel elemanları sunulmuştur.

LTE standardında kullanılan fiziksel katmanı kapsamında kullanılan yapılar tek tek, önce AWGN kanal altında BER performansları elde edilmiş sonrasında girişimin ve kanalın sönümlemesinin de LTE standardına uygun bir şekilde BER performansı elde edilmiştir. LTE standardında gözlemlenen kanal yapıları kanalın yol sayısına, her bir yolun sönümleme kat sayısına ve yollara göre gecikme sürelerine göre 5 farklı sınıfta oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla düşük hareketlilik anında oluşan kanal yapısından yüksek hareketlilikten dolayı oluşan kanal yapısına kadar farklı özellikler göstermektedir. Elde edilen BER sonuçlarında, en yüksek hareketliliğin olduğunda oluşan frekans seçmeli bir kanal yapısı kullanılmıştır. Bütün bu etkilerin altında PDSCH'nin BER performansı gözlenmiştir.

LTE standardındaki çok taşıyıcılı yapılar ele alınmış, ilgili modülasyon, kanal kodlama yöntemleri MATLAB ortamında oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere farklı modülasyonlarda BER analizleri yapılmış ve spektral verimlilikleri karşılaştırılmıştır. 1000 de bir hata yapma olasılığında QPSK modülasyon yöntemi ile ona en yakın 16 QPSK modülasyon yöntemi arasında 4 dB'lik bir güç farkının olduğu gözlemlenmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere düşük SNR değerlerinde düşük kat sayılı modülasyon yöntemlerinin kullanımı daha az hata olasılığına sahip olduğu gözlemlenebilmektedir. Bununla beraber düşük kat sayılı modülasyon yöntemlerinde birim sembolün taşıdığı bit sayısı düşmekte iletişim daha düşük hata olasılığı ile sağlansa dahi veri hızında düşme gözlemlenmektedir. Yaklaşık 1.3 dB değerlerinde yüz binde bir hata yapma olasılığına ulaşmaktadır. Şekil 4.3'te yine görüldüğü üzere Turbo kanal kodlama yönteminin etkisi ele alınmış ve 1/3 kod oranında yani bir bitin 3 bit olarak genişletildiği durumda farklı yinleme değerlerindeki BER performansı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere yinlemenin artması iken Turbo kodda ciddi olarak BER performansında düzelme söz konusu olmaktadır. Turbo kodlama için diğer önemli bir parametre olan kod oranının etkisi Şekil 4.5'de gösterilmektedir. Görüldüğü üzere fazlalık bitinin fazla oluşu yani 1 bit yerine 2 bit fazlalık bitinin oluşu veri hızında bir miktar olumsuz etki yaratsa da 1000 de bir hata yapma durumunda yaklaşık 0.6 dB'lik spektral verimlilik elde edilmekte aynı hata olasılığı için daha az enerji harcanmaktadır. En son olarak tüm bu özelliklerin birleşiminden oluşan

ve LTE standardında model olarak adlandırılan yapının BER sonuçları gösterilmiştir (Şekil 4.8). AWGN kanal altında 12 dB değerinde 1000 de bir hata yapma olasılığına erişildiği gözlemlenmiştir.

LTE standardının, OFDM çoklu taşıyıcı şemasını çeşitli SISO anten tekniği ile nasıl kolayca birleştirdiği gösterilmiştir. Farklı yayın modlarının, farklı tarifeli (scheduling) durumları, farklı hareket profillerini ve kanal kalitesini nasıl sağladığı da anlatılmıştır. Modülasyon, kodlama ve temel karıştırıcıyı karakterize eden MATLAB ile BER performans grafikleri, OFDM çok taşıyıcılı yayın ve iletim çeşitlerini ve uzamsal çoklamayı içeren çeşitli SISO grafiği çizdirilmiştir. Simülasyonlarla hem kaliteli değerlendirmeler hem de BER performans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar vericinin, çoklu yol sönmülmesinden kaynaklanan iç sembol parazit etkileriyle etkin mücadele ettiğini göstermektedir.

Şekil 4.1’de LTE standardında kanalın SNR durumuna göre farklı modülasyon yöntemleri kullanılmaktadır. En verimli olacak olan modülasyon yöntemi kanalın durumuna göre adaptif olarak kullanılmaktadır. Bu modülasyon yöntemleri faz ve genlik değerleri baz alınarak uygulanmaktadır. Örneğin QPSK, QAM modülasyon yöntemleri söylenebilir. Fakat günümüzde akademik olarak performans verimleri ortaya konulan ve daha iyi sonuçların elde edildiği başka (TCM, TTCM veya CPM gibi) kodlama ve modülasyon yapılarının bütünleşik bir şekilde kullanıldığı yapılar mevcuttur. Bu modülasyon yöntemlerinin LTE standardında daha iyi performans sağlaması için kullanılması önerilebilir.

Yine kanal kodlama yöntemlerinden birisi olan Polar kodlama yöntemi gerek daha az karmaşık yapısı ile gerekse Turbo koda göre hızlı çözücü özelliği oluşu nedeniyle Shannon kanal kapasitesine yakınlığı göz önünde bulundurularak Turbo kanal kodlamaya alternatif bir kodlama yöntemi olarak kullanılabilir. Bunun dışında bu tezde öncelikli olarak ele alınmayan MIMO yapılarının geliştirilmesi ile LTE’nin iletim performansı arttırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Osmanca, M.S. (2012). *4G Teknolojisinde kullanılmakta olan Wimax ve 3GPP LTE sistemlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
2. Muhammed, Y.A. (2013). *Coding techniques in Long Term Evolution (LTE) wireless systems*, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
3. İşler, E. (2010). *Umts ve LTE analizi ve radyo erişim tekniklerinin karşılaştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
4. Çınar, V. (2010). *LTE teknolojisindeki parametrelerin analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
5. Karşlı, İ. (2013). *MIMO tekniğinin HSPA ve LTE şebekeleri için önemi ve tanımlı bir rota için deneysel olarak kıyaslanması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
6. Selli, İ. (2012). *Uzun vadeli evrimde performans analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
7. Akın, M. (2010). *LTE (4G) Taşımak için kullanılacak teknolojiler*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
8. Türker, H. (2010). *Yeni nesil mobil networkler; 3G'den 4G (LTE)'ye geçerken mimari değişim gereksinimleri ve uyumluluk*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
9. Tura, Ö. (2012). *LTE sistemlerinin benzetim tabanlı performans analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
10. Karaman, M.A. (2012). *Dikey frekans bölmeli çoklu erişim kullanan/uzun dönem evrimli heterojen ağlarda tayf farkındalığıyla kendi kendini organize eden ağlar oluşturma*, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
11. Taşpınar, N. ve Özdemir G. (2014). 4. nesil haberleşme teknolojilerinde OFDMA. *Ursi-Türkiye'2014 VII. Bilimsel Kongresi*, Elazığ.
12. Yavuz, B. ve Çakır, H. S. (2010). Mobil genişbandın gelişimi ve 4. nesil (4G) mobil haberleşme sistemi LTE'nin değerlendirilmesi. *Akademik Bilişim 2010*, Muğla Üniversitesi.
13. İşler, E., Barbaros, S. Y. ve İkiz, T. (2009). UMTS ve LTE şebekelerinde radyo erişim tekniklerinin kıyaslanması. *V. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu*, Adana
14. ITU-R (1997). International Mobile Telecommunications-2000. Recommendation ITU-R M. 687-2.

15. ITU-R (2010). Detailed specifications of the radio interfaces of international mobile telecommunications-2000. Recommendation ITU-R M.1457-9.
16. ITU-R (2007). Principles for the process of development of IMT-Advanced. Resolution ITU-R 57.
17. Dr. Kurt, G., Yavuz B. ve Akan A. (2009). 4. nesil sistem adayları: LTE ve WiMAX. *Akademi Güncel Dergisi, Turkcell*.
18. İnternet: EDGE, HSPA, LTE: Mobile broadband advantage. Rysavy Research. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.rysavy.com%2FArticles%2F2007_09_Rysavy_3GAmericas.pdf++&date=2015-03-26, Son Erişim Tarihi: 26.03.2015.
19. Sauter, M. (2009). Beyond 3G-bringing networks, terminals and the web together: LTE, WiMAX, IMS, 4G devices and the mobile web 2.0. *John Wiley & Sons, Ltd*.
20. Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 379–423, 623–656.
21. Ghosh, A. and Ratasuk, R. (2011). Essentials of LTE and LTE-A. *Cambridge University Press*, Cambridge.
22. Proakis, J. G. (2001). Digital communications. *McGraw-Hill*, New York
23. Dahlman, E., Parkvall, S. and Sköld, J. (2011). 4G LTE/LTE-Advanced for mobile broadband. *Elsevier*.
24. Veiverys, A. and Goluguri, V. P. (2005). Hardware/software co-design of a multipath jakes' channel simulator for an OFDM System. *Aalborg University*.
25. Sunar, E. (2010). LTE/SAE teknolojilerinin incelenmesi.
26. Ergen, M., Bahai, A. R. S., and Saltzberg B. R. (2004). Multi carrier digital communications theory and applications of OFDM. *Springer, USA*, S. 300-360
27. İnternet: Long Term Evolution (LTE): an introduction. Ericsson. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ericsson.com%2Fres%2Fdocs%2F2011%2Flte_an_introduction.pdf&date=2015-03-26, Son Erişim Tarihi: 26.03.2015.
28. 3GPP TS 36.101. (2009). Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); user equipment (UE) radio transmission and reception. *Version 8.7.0 Release 8*.
29. 3GPP TS 36.211. (2009). Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channels and modulation. *Version 8.8.0 Release 8*.
30. İnternet: Yavuz, Barış; Çakır, Hülya Soydaş. Mobil Genişbantın Gelişimi ve 4. Nesil (4G) Mobil Haberleşme Sistemi LTE'nin değerlendirilmesi. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fab.org.tr%2Fab10%2Fbildiri%2F83.doc++&date=2015-03-26>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2015

31. Biagioni, A., Fantacci, R., Marabissi, D., and Tarchi D. (February 2009). Adaptive subcarrier allocation schemes for wireless OFDMA systems in WiMAX networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal*, vol.27, no.2, s.217,225.
32. Prasad, R. (2004). OFDM for wireless communications systems. *Artech House*.
33. Khurshid, K. and Khokhar IA. (Ağustos 2013). Comparison survey of 4G competitors (OFDMA, MC CDMA, UWB, IDMA). *Aerospace Science & Engineering (ICASE), 2013 Uluslararası Konferansı*, vol., no., s.1,7, 21-23.
34. Bhandare, T. (2008). LTE and WiMAX Comparison. *Santa Clara University*.
35. Narasimhan, B., Al-Dhahir, N., and Minn, H. (March 2010). SFBC design tradeoffs for mobile SC-FDMA with application to LTE-advanced”, *Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), 2010 IEEE Uluslararası Konferansı*, 3458,3461, 14-19.
36. Doufexi, A. and Armour, S. (2005). Design considerations and physical layer performance results for a 4G OFDMA system employing dynamic subcarrier allocation. *IEEE `16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol.1, no., pp.357-361.
37. Baker, M., Toufik, I., and Sesia, S. (2010). LTE, the UMTS Long Term Evolution from theory to practice. *John Wiley & Sons*.
38. Çalışkan, A. (Mayıs 2011). *Mobil haberleşme gelişimi ve LTE teknik özellikleri*, Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektronik Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
39. 3GPP TS 36.211. (2009). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation. *Version 8.8.0 Release 8*.
40. Berrou, C. (Mayıs 1993). Near-shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes. *IEEE International Conference on Communications, Geneva, Switzerland*, 1064- 1070.
41. Proakis, J. G., and Salehi, M. (2004). Fundamentals of communication systems, 2nd edition. *Prentice Hall*.
42. Ramseier, S. (2003). Shuffling bits in time and frequency-an optimum interleaver for OFDM. in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '03)*, 3418–3422.
43. Hanzo, L. and Akthman, Y. (2011). MIMO-OFDM for LTE, Wi-Fi and WiMAX. *John Wiley & Sons*.
44. İnternet: Çiftçi, Ü. Modülasyon. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.hasanbalik.com%2Fdersler%2Ftrakya%2F10-11Guz%2F&date=2015-03-26>, Son Erişim Tarihi: 26.03.2015

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILDIZ, Ahmet Şafak
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 21.02.1985, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (553) 609 84 80
 e-mail : ahmetsafakyildiz@hotmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh.	2015
Lisans	Çankaya Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Müh.	2009
Lise	Başkent Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012 - Halen	Et ve Süt Kurumu Genel Müdürlüğü	Elektronik ve Haberleşme Mühendisi
2011-2012	Udea Elektronik Ltd. Şti.	Ar-Ge Mühendisi ODTÜ Teknokent

Yabancı Dil

İngilizce, Almanca

Hobiler

Yüzme, bağlama çalmak, masa tenisi, bowling



GAZİ GELECEKTİR..