



**SİNYAL KARIŞTIRICILARIN LTE/LTE-A AŞAĞI HAT FİZİKSEL
KANALINA ETKİLERİ**

Gizay KISA

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2018

Gizay KISA tarafından hazırlanan “SİNYAL KARIŞTIRICILARIN LTE/LTE-A AŞAĞI HAT FİZİKSEL KANALINA ETKİLERİ” 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. Özgür ERTUĞ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. Erkan AFACAN

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Üye: Doç. Dr. Orhan GAZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 16/03/2018

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

.....

Prof. Dr. SENA YAŞYERLİ

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.

Gizay KISA

16/03/2018

SİNYAL KARIŞTIRICILARIN LTE/LTE-A AŞAĞI HAT FİZİKSEL KANALINA ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Gizay KISA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2018

ÖZET

Mobil teknolojilerdeki hızlı gelişmeler, kullanıcıların her geçen gün daha fazla veri kullanmasını sağladı. Böylece daha geniş kapsama alanına, bant genişliğine, yüksek veri hızı ve kalitesi gibi gereksinimlere sahip mobil ağ standartları gelişti. Mobil ağ haberleşmesinin son sürümü olan LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) bu standartları karşılamak üzere ortaya çıkarılmıştır. Ülkemizde 4.5G olarak da adlandırılan bu hizmet akıllı telefonlarımız aracılığıyla haberleşmenin yanı sıra doğal afetlerde, acil durum mesajı yayınlarında ve askeri amaçlı haberleşme sistemlerinde kullanılabilir. Fakat pek çok kablosuz iletişimde olduğu gibi LTE (Long Term Evolution) sinyallerinin de karıştırılması ve engellenmesi mümkündür. Bu çalışmada sivil uygulamalar için tasarlanan bu standardın aşağı hat fiziksel kanalına, Baraj, Kısmi Bant, Tek Tonlu ve Çok Tonlu sinyal karıştırıcıların etkileri incelenerek, LTE ve LTE-A sisteminin sinyal karıştırıcılara karşı, Bit Hata Oranı (BER)-Sinyal Gürültü Oranı (SNR) enerji verimliliği hesaplanmıştır.

Bilim Kodu : 90523
Anahtar Kelimeler : Aşağı Hat Bağlantı, Fiziksel Katman, LTE, OFDM, Sinyal Karıştırıcı
Sayfa Adedi : 61
Danışman : Doç. Dr. Özgür ERTUĞ

THE EFFECTS OF JAMMERS ON LTE/LTE-A DOWNLINK PHYSICAL LAYER

(M. Sc. Thesis)

Gizay KISA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2018

ABSTRACT

Swift advances in mobile technology have lately made it possible for users to utilize more and more data. As a result, mobile network standards with requirements such as wider coverage and band width, high data rate and quality have developed. LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) as the final version of mobile network communication has been introduced with a view to come up to the standards. This service named as “4.5G” in our country can be utilized in state-of-emergency message broadcasts and military communication systems as well as communications via smart phones. However, LTE signals can be intercepted or jammed, which is the case for all wireless communication systems as well. In this study, energy efficiency of LTE/LTE-A concerning Bit Error Rate (BER) and Signal-to-Noise Ratio (SNR) against signal jammers will be figured out by examining beforehand the signal jamming effects of this standard designed for civil practices on downlink channel, namely Barrage, Partial Band, Single Tone and Multitone Jammer.

Science Code : 90523

Key Words : Downlink, Physical Layer, LTE, OFDM, Jammer

Page Number : 61

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Özgür ERTUĞ

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bilgisini ve bilimsel desteğini esirgemeyerek, çalışmamın tamamlanmasında fikirleriyle aydınlanmamı sağlayan, öğrencisi olduğum için kendimi her zaman şanslı hissettiğim değerli hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Özgür ERTUĞ'a değerli düşüncelerinden ve ilgisinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin bu denli bilgisi ve doğru yönlendirmesi olmasa; böyle bir çalışma ve bu çalışmamın çıktısı olabilecek yayınlar olmazdı.

Lisans eğitimimden beri bana her zaman yol gösteren, tecrübesini benden esirgemeyen, mesleğime rol model oluşturan ve bu tez çalışmamın tamamlanmasında büyük katkıları olan M.Sc. Fatih GENÇ'e akademik yaşantıma yapmış olduğu değerli katkılarından dolayı çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim sırasında kendilerinden ders aldığım, bana öğrettikleriyle bu çalışmamın tamamlanmasına katkıda bulunan Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nın kıymetli hocalarına ve bu özverili süreçteki anlayışları için TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'nde görev yapan değerli çalışma arkadaşlarım ve yöneticilerime de ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmamın tamamlanmasında desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her şeyden kaçmak istediğim zamanlarda kendimi yanında bulduğum, varlığı ile hayatıma anlam katan Erman IŞIK'a, yüksek lisans eğitimimi bitirmemem konusunda beni daima motive eden büyükbabam Ahmet KISA'ya, varlığı ve öğrettikleriyle daha güçlü olmamı sağlayan ağabeyim Gökay Güran KISA'ya ve bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, hayatım boyunca beni yürekten destekleyen ve cesaretlendiren sınırsız sevgi kaynaklarım annem Gönül KISA ve babam Türkay KISA'ya en kalbi duygularıyla teşekkür ederim. İyi ki varsınız.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE.....	3
2.1. Mobil Ağların Gelişimi	3
2.1.1. Birinci nesil hücresel şebekeler.....	4
2.1.2. İkinci nesil hücresel şebekeler	4
2.1.3. Üçüncü nesil hücresel şebekeler	5
2.1.4. Dördüncü nesil hücresel şebekeler.....	6
2.1.5. 3GPP standardizasyonu.....	9
2.1.6. LTE ve mevcut acil durum sistemlerinin karşılaştırılması	11
2.1.7. Literatür çalışmaları	13
2.2. LTE Fiziksel Katmanı	17
2.2.1. Aşağı hat iletim modları.....	19
2.2.2. Aşağı hat için fiziksel katman	21
2.3. Sinyal Karıştırıcılar	38
2.3.1. Baraj sinyal karıştırıcı	38
2.3.2. Kısmi bant sinyal karıştırıcı	39

	Sayfa
2.3.3. Tek tonlu sinyal karıştırıcı	40
2.3.4. Çok tonlu sinyal karıştırıcı	41
3. LTE FİZİKSEL KATMANIN MODELİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ	43
3.1. Simülasyon Parametreleri	43
3.2. Bant Genişliği Karşılaştırması.....	44
3.2.1. Baraj sinyal karıştırıcı altında bant genişliğinin performans analizi	44
3.2.2. Kısmi bant sinyal karıştırıcı altında bant genişliğinin performans analizi	46
3.2.3. Tek tonlu sinyal karıştırıcı altında bant genişliğinin performans analizi .	47
3.2.4. Çok tonlu sinyal karıştırıcı altında bant genişliğinin performans analizi.	48
3.2.5. Sinyal karıştırıcıların bant genişliği performanslarının karşılaştırması....	49
3.3. Modülasyon Karşılaştırması	50
3.3.1. Baraj sinyal karıştırıcı altında modülasyonların performans analizi	50
3.3.2. Kısmi bant sinyal karıştırıcı altında modülasyonların performans analizi	51
3.3.3. Tek tonlu sinyal karıştırıcı altında modülasyonların performans analizi .	51
3.3.4. Çok tonlu sinyal karıştırıcı altında modülasyonların performans analizi.	52
3.3.5. Farklı sinyal karıştırıcı altında LTE/LTE-A modülasyonlarının performanslarının karşılaştırılması	53
4. SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kablosuz mobil iletişim teknolojileri	7
Çizelge 2.2. 3GPP LTE sürümlerdeki gelişmeler ve yapılan iyileştirmeler	9
Çizelge 2.3. Mevcut kritik haberleşme sistemleri ve LTE'nin karşılaştırılması.....	12
Çizelge 2.4. Sürüm 12'deki aşağı hat iletim modları, kontrol bilgisi ve anten ilişkisi...	20
Çizelge 2.5. 16 QAM modülasyon haritası.....	29
Çizelge 2.6. Mekansal çoğullama için kodlu kelimenin katman haritası	30
Çizelge 2.7. Normal ve genişletilmiş önek özellikleri	35
Çizelge 2.8. 1 ms alt çerçeve genişliği ve 15 kHz alt taşıyıcı aralığında aşağı hat OFDM parametreleri.....	35
Çizelge 2.6. Mekansal çoğullama için kodlu kelimenin katman haritası	35
Çizelge 3.1. Aşağı-hat fiziksel katman simülasyon parametreleri.....	43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Mobil ağların gelişimi.....	3
Şekil 2.2. Fiziksel katmanın etrafındaki radyo arabirimi protokol mimarisi.....	18
Şekil 2.3. LTE aşağı hat ve yukarı hat bağlantı yönleri.....	19
Şekil 2.4. LTE fiziksel katmanında aşağı hat için alıcı ve verici yapısı	22
Şekil 2.5. Kod bloğu segmentasyonu, kod bloğu ve aktarım bloğuna (AB) CRC eki....	24
Şekil 2.6. Turbo kodlayıcının blok gösterimi	25
Şekil 2.7. Bit düzeyi karıştırma.....	28
Şekil 2.8. QAM modülasyonun blok gösterimi	29
Şekil 2.9. 16 ve 64 QAM modülasyon için yıldız kümesi diyagramı.....	29
Şekil 2.10. OFDMA akışının blok diyagramda gösterimi	32
Şekil 2.11. OFDM'nin frekans bölgesi gösterimi	33
Şekil 2.12. Zaman bölgesinde OFDM sembolünün gösterimi.....	34
Şekil 2.13. Kaynak elemanları, blokları ve kaynak şebekesi.....	37
Şekil 2.14. LTE kanal modelinin blok gösterimi	38
Şekil 2.15. Baraj sinyal karıştırıcı gösterimi.....	38
Şekil 2.16. Kısmi bant sinyal karıştırıcı gösterimi.....	39
Şekil 2.17. Tek tonlu sinyal karıştırıcı gösterimi	40
Şekil 2.18. Çok tonlu sinyal karıştırıcı gösterimi	41
Şekil 3.1. Baraj sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı.....	45
Şekil 3.2. Kısmi bant sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı.....	46
Şekil 3.3. Tek tonlu sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 3.4. Çok tonlu sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı.....	48
Şekil 3.5. Sinyal karıştırıcılar altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı.....	49
Şekil 3.6. Baraj sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonları için BER-SJNR performansı.....	50
Şekil 3.7. Kısmi bant sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonları için BER-SJNR performansı.....	51
Şekil 3.8. Tek tonlu sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonları için BER-SJNR performansı.....	52
Şekil 3.9. Çok tonlu sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonları için BER-SJNR performansı.....	53
Şekil 3.10. Sinyal karıştırıcılar altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonlarında BER-SJNR performansı	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

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

Kısaltmalar

Açıklamalar

AMPS	Advanced Mobile Phone Service
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
BSC	Base Station Controller
BSK	Baraj Sinyal Karıştırıcı
BTS	Base Transceiver Station
CDMA2000	Code Division Multiple Access 2000
CDD	Cyclic Delay Diversity
CP	Cycle Prefix
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel State Information
CQI	Channel Quality Indicator
ÇTSK	Çok Tonlu Sinyal Karıştırıcı
DLSCH	Downlink Shared Channel

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DoS	Denial of Service
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EPC	Evolved Packet Core
ESN	Emergency Service Network
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
GPRS	Genel Paket Radyo Servisi
3GPP	The 3rd Generation Partnership Project
HSPA	High Speed Packet Access
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
ITU	International Telecommunication Union
KBSK	Kısmi Bant Sinyal Karıştırıcı
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MAC	Medium Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
PCFICH	The Physical Control Format Indicator Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PHY	Physical Layer
PSMB	Public Safety Mobile Broadband
PUCCH	Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
RAN	Radio Access Network
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
SAP	Service Access Point
SNR	Signal Noise Ratio
SMS	Short Message Service
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access

Kısaltmalar**Açıklamalar****TTSK**

Tek tonlu sinyal karıştırıcı

UMTS

Universal Mobile Telecommunications System

W-CDMA

Wideband Code Division Multiple Access



1. GİRİŞ

Mobil operatörlerimiz aracılığıyla yaygın olarak kullandığımız Uzun Vadeli Evrim (LTE-Long Term Evolution) yani 4G ve 4.5G olarak bildiğimiz Gelişmiş Uzun Vadeli Evrim (LTE-A-Long Term Evolution Advanced) standartları sayesinde görüntülü konuşabilir, büyük boyutlu verileri hızlı bir şekilde paylaşabilir, internette gezinebilir ve konuma dayalı hizmetleri kullanabiliriz. Ancak kamu güvenliği, askeri ortamlar gibi kritik alanlarda kullanılan haberleşme sistemlerinin bu özelliklerin büyük bir çoğunluğundan yoksun olması oldukça üzücüdür. Oysa bu özelliklerin mevcut acil durum iletişim yöntemlerinde de olması, örneğin acil müdahale görevlilerinin mevcut olay ile ilgili daha iyi durum değerlendirmesi yapmalarına yardımcı olacaktır.

Günümüzde pek çok ülke mevcut kamu güvenlik ağlarını iyileştirmeyi planlamaktadır. Ancak mevcut acil durum haberleşme sistemleri dar bantlı haberleşme kanalı için uygundur. Bu ağların geniş bantlı haberleşme kanalına dönüştürülmesi ya da yeni geniş bantlı haberleşme kanalına sahip yeni sistemlerin kurulması, ülke çapında ciddi bir yatırım gerektirmektedir. İşte bu noktada acil durum haberleşme sistemlerinin kritik uygulama ve hizmetlerinin sağlanması için yaygın olarak kullanılan ve alt yapısı hazır LTE gibi ticari geniş bant ağların kullanılması önerilmektedir.

LTE hücresel şebekesinin kritik uygulamalarda kullanılması hem devletler hem de operatörler tarafından genel olarak desteklenmektedir. Avustralya hükümeti tarafından hazırlanmış olan Kamu Güvenliği Mobil Geniş Bant (PSMB-Public Safety Mobile Broadband) araştırma raporuna göre, Avustralya'da sadece kritik alanlarda kullanılmak üzere kurulacak özel bir haberleşme ağının, ticari ağların kullanımını uyarlamaktan yaklaşık 2,8 kat fazla maliyetli olduğu belirtilmiştir [1].

LTE'yi kritik alanlarda kullanmaya başlayan ilk ülkelerden biri İngiltere'dir. 2020 yılına kadar polis, itfaiye, kurtarma, ambulans ve diğer kamu güvenliği kullanıcıları için LTE tabanlı Acil Servis Ağı'na (ESN-Emergency Service Network) kademeli olarak geçmeyi hedeflemektedir. Bu sistemde mevcut frekans bandı hem ilk müdahale görevlileri tarafında hem de tüketiciler tarafından paylaşılacaktır. Kore hükümeti ise 2014 yılında PS LTE projesini başlatmıştır. Bant 28 (APT700) üzerinden özel LTE ağı kurmayı ve ülke çapında

kritik önem taşıyan iletişimi sağlamayı hedeflemektedir. ABD, Belçika, Meksika, Fransa, Avustralya, Belarus gibi ülkeler de yakın zamanda LTE ağı üzerinde ulusal kamu güvenliği ağı da kurmayı planlamaktadır [10].

LTE'nin diğer bir kullanım alanı da askeri amaçlıdır. ABD ordusu muharebe ortamındaki iletişimi sağlamak, video, ses ve veri de dâhil olmak üzere gerekli görev parametrelerini anlık olarak aktarmak, uçak gemileriyle uçaklar arasındaki haberleşmeyi sağlamak için LTE kullanmaktadır [2]. Böylece mevcut durumun daha iyi anlaşılabilmesi ve değerlendirilmesi sağlanarak daha hızlı ve daha doğru tepkiler verilebilmesi planlanmaktadır.

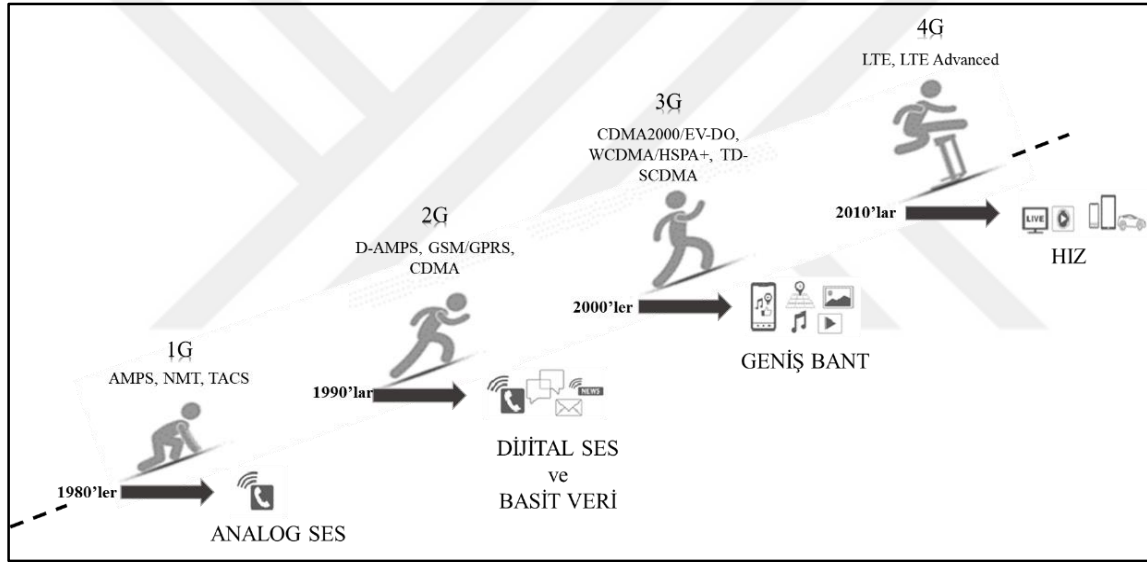
Bu tez kapsamında günümüzde kritik alanlarda da kullanılması planlanan LTE ve LTE-A'nın aşağı hat fiziksel katmanına yönelik sinyal karıştırıcılar çalışılmıştır. Bu çalışmadaki temel amaç, ticari olarak kullanım için geliştirilen mevcut LTE ve LTE-A'nın muhtemel kritik alanlarda, şu anki haliyle kullanılması durumunda sinyal karıştırıcıların etkisi altındaki performansını göstermektir. Bu sayede de ileride bir çanta boyutundaki sinyal karıştırıcılar ile acil durum müdahale ekiplerinin, askeri personelin veya doğal afet durumunda o bölgede bulunan vatandaşların iletişiminin kesilmemesinin ve daha büyük kaos ortamlarının oluşmasının önüne geçilebilir. Bu amaçla, LTE-A aşağı hat fiziksel kanalına baraj, kısmi bant, tek tonlu ve çok tonlu sinyal karıştırıcıların etkileri incelenerek, LTE-A sisteminin sinyal karıştırıcılar altında Bit Hata Oranı (BER-Bit Error Rate)- Sinyal Gürültü Oranı (SNR-Signal Noise Ratio) enerji verimliği hesaplanacaktır.

Bölüm 1'de konu hakkında kısa bir giriş yapılmıştır. Bölüm 2'de LTE-A aşağı hat bağlantı fiziksel katmanında gerçekleştirilen sinyal işleme işlemleri ve bu katmana uygulanan sinyal karıştırıcılar açıklanmıştır. Bölüm 3'te tasarlanan LTE aşağı hat fiziksel kanal modeline eklenen sinyal karıştırıcıların farklı modülasyon ve farklı bant genişlikleri için performans analizleri yapılmıştır. Bölüm 4'de ise yapılan çalışmanın sonuçları ve öneriler mevcuttur.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Mobil Ağların Gelişimi

Mobil iletişim, günümüzde dünya nüfusunun çoğunluğu tarafından oldukça kolay erişilebilen ve günlük yaşantıda hemen hemen her yerde rahatlıkla kullanılabilen bir sisteme dönüşmüştür. Ancak bu sistem Guglielmo Marconi'nin 1890 yılında evinde yaptığı çalışmalardan başlayarak, birçok evreden geçerek günümüze ulaşmıştır [39]. Mevcut kullandığımız mobil iletişim teknolojisini anlayabilmek için de geçmiş olduğu evrelerin analizini yapmak büyük önem arz etmektedir.



Şekil 2.1. Mobil ağların gelişimi

Mobil iletişim sistemleri iletişim ve hareketlilik kavramlarını bir araya getirerek iletişimde 30 yıl gibi kısa bir sürede devrim yaratmıştır (Şekil 2.1). Günümüzde LTE, dördüncü nesil (4G) mobil ağ teknolojisi ve gelişmiş dördüncü nesil (4.5G) teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır. Kablosuz ağ teknolojilerinin gelişimine baktığımızda ise birleştirilmiş bir hedefe yönelik farklı gelişim yolları izlediğini söylemek mümkündür. Birinci nesil (1G) temel olarak ses iletimini sağlarken, ikinci nesil (2G) ile mobil ağların kapasite ve kapsamı artmıştır. Bunu, yüksek hızda veri akışı sağlayan üçüncü nesil (3G) izlemiş olup, böylece geniş bant genişliğine sahip dördüncü nesil (4G) için alt yapı hazırlanmıştır. Dördüncü nesil (4G), paket tabanlı, mobil ve sabit ağlar tarafından desteklenen yeni mobil hizmetler de dahil olmak üzere yüksek mobiliteye sahip uygulamaları ve geniş bant genişliği sayesinde

gelişmiş telekomünikasyon hizmetlerine olanak sağlamıştır. Çizelge 2.1. kablosuz mobil iletişim teknolojilerindeki önemli gelişmeleri göstermektedir. Bu çalışmada ana odak noktası 4G ve 4.5G mobil kablosuz iletişim teknolojileridir.

2.1.1. Birinci nesil hücresel şebekeler

Analog radyo iletişim tekniklerine dayalı olan Birinci Nesil (1G) mobil sistemleri, ilk olarak 1979 yılında ABD’de 1300 kullanıcıya sahip olan Gelişmiş Cep Telefonu Servisi (AMPS-Advanced Mobile Phone Service) sisteminde kullanılmıştır. Mobil teknolojinin başlangıcı olarak kabul edilen bu sistemler çok kısa bir süre içerisinde yaygınlaşarak 1990’lı yıllarda 20 milyon kullanıcıya ulaşmıştır. Bu yıllar içerisinde kullanışlı bir iletişim sistemi olan 1G teknolojileri, hücresel bir ağ sistemi kullanmaktadır. Ayrıca radyo kanallarının kullanımında doğal sınırlamalara sahip olan ve şebeke çekirdeğinde devre anahtarlı teknolojiler kullanılan Frekans Bölmeli Çoklu Erişimi (FDMA-Frequency Division Multiple Access) kullanmıştır.

Tüm bunlar ile birlikte sahip olduğu birçok da dezavantaj bulunmaktadır. Analog veri bağlantısı kullanan 1G mobil sistemler yapı bakımından birçok güvenlik problemi içermektedir. Ayrıca dış etmenlere karşı direnç gösterememesi bağlantının çok çabuk ve kısa bir süre içerisinde kopmasına sebebiyet vermektedir. Bununla birlikte 1G mobil sistemler veri aktarımına da olanak sağlamamaktadır.

2.1.2. İkinci nesil hücresel şebekeler

Abone sayısında görülen artış, servis gereksinimi ve yüksek servis kalitesi İkinci Nesil (2G) mobil teknolojinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. 90’lı yılların başında belirli bir güvenlik desteği sağlayarak sesin iletilmesi amacıyla kullanımına başlanılan 2G mobil teknolojiler, sonrasında veri aktarımı ve Kısa Mesaj Servisi (SMS-Short Message Service) gibi hizmetleri de kullanıcılara sunmuştur.

1G teknolojilerde olduğu gibi hücresel ağ sistemi kullanan 2G teknolojiler, 1G’den farklı olarak analog veri yerine sayısal veri kullanmaktadır. Bu sayede kullanıcılara daha kaliteli ses ve daha fazla kapasite sunabilme imkânı ortaya çıkmaktadır. Bunun sebebi ise çoklu erişim tekniği olarak FDMA ve Zaman Bölmeli Çoklu Erişim’i (TDMA-Time Division

Multiple Access) birlikte kullanan Mobil İletişimler için Küresel Sistem (GSM-Global System for Mobile Communications) standardının kullanılmaya başlanmış olmasıdır.

2.1.3. Üçüncü nesil hücresel şebekeler

GSM Ortamında Geliştirilmiş Veri Hızları (EDGE-Enhanced Data rates for GSM Evolution) sayesinde, verilerin yüksek hacimli hareketi mümkün hale gelmiştir. Ancak hava arabirimindeki paket aktarımı, bir devre anahtarı çağrısı gibi davranmaktadır. Dolayısıyla, devre anahtar ortamında bu paket bağlantı verimliliğinin bir kısmı kaybolmaktadır. Bununla birlikte dünyanın her yerinde ağların geliştirilmesi için kullanılan standartlar farklıdır. Bu nedenlerle de teknoloji platformundan bağımsız hizmet sunan ve ağ tasarımı standartları dünyada aynı olan bir ağa sahip olma ihtiyacı doğmuştur. Bu sayede de Üçüncü Nesil (3G) teknoloji ortaya çıkmıştır. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU-International Telecommunication Union), 3G mobil ağlarının gerekliliğini IMT-2000 (International Mobile Telecommunications-2000) standardı ile açıklamıştır. Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi (3GPP-The 3rd Generation Partnership Project) adı verilen bir organizasyon, bu çalışmayı IMT-2000 standardını karşılayacak bir mobil sistem ile açıklamak suretiyle devam etmiştir. Bu gereksinimleri karşılayan sistemi Avrupa Telekomünikasyon Standartlar Komitesi (ETSI-European Telecommunications Standard Institute), Evrensel Karasal Mobil Sistem (UMTS-Universal Mobile Telecommunications System) olarak adlandırır. IMT-2000, 3G sistem için ITU-T isimli iken, Amerikan 3G varyasyonu için CDMA2000 (Code Division Multiple Access 2000)'dir. Geniş bant kod bölmeli çoklu erişim (W-CDMA-Wideband Code Division Multiple Access) ise UMTS için bir arayüz teknolojisidir [3].

3G şebekeleri, spektral verimlilikleri sayesinde şebeke operatörlerine daha fazla şebeke kapasitesi sunarken, kullanıcılara ise daha geniş kapsama alanı hizmeti sunmaktadır. 3G ile daha geniş bir alanda sesli telefon görüşmesi, video görüşmeleri ve geniş bantlı kablosuz haberleşme teknolojilerine sahip olunmuştur. Ayrıca aşağı-hat bağlantıda 14,4 Mbps ve yukarı-hat bağlantıda 5,8 Mbps'e kadar hızları verebilen Yüksek Hızlı Paket Erişimi (HSPA-High Speed Packet Access) veri iletimi özellikleri de hayatımıza girmiş bulunmaktadır.

2.1.4. Dördüncü nesil hücresel şebekeler

Mobil iletişim sistemlerinde yeni teknolojilerin ortaya çıkması ve kullanıcı taleplerinin giderek artması, dördüncü nesil (4G) mobil iletişim sistemlerine olan gereksinimi ortaya çıkarmıştır. 3G'nin aksine, kurulan yeni 4G sistemleri ile yeni seviyelerde kullanıcı deneyimi ve GSM, GPRS (Genel Paket Radyo Servisi), IMT-2000, kablosuz ağ, Bluetooth gibi mevcut tüm mobil teknolojiler de bütünleştirilerek çoklu servis kapasitesi gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir [4].

4G'ye geçişin temel nedeni şimdiye kadar geliştirilen tüm teknolojiler için ortak bir platform oluşturmak ve sağlanacak birçok hizmetin kullanıcı beklentileri ile uyumlu hale getirmektir. GSM / 3G ve All-IP arasındaki temel fark radyo ağ kontrolörü (RNC-Radio Network Controller) ve baz istasyon kontrolörü (BSC-Base Station Controller) işlevinin, baz alıcı-verici sisteminin (BTS-Base Transceiver Station), bir dizi sunucuya ve ağ geçidine dağıtılmasıdır. Bu, bu ağın daha ucuz olacağı ve veri aktarımının daha hızlı olacağı anlamına gelmektedir [5]. Böylece 4G ile kullanıcı istediği hizmeti seçme özgürlüğüne, makul bir ağ iletişimi hizmet kalitesine uygun bir fiyatla sahip olmaktadır. 4G'nin başlıca özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Geliştirilmiş kapasite,
- Hücredeki artan kullanıcı sayısı,
- Düşük iletim maliyetleri,
- Mevcut sistemler ile bağlantı,
- Düşük gecikme süresi,
- IPv6 protokolüne dayalı, paket anahtarlama,
- Tüm kablosuz bağlantılar için tek arayüz,
- Artan hareketlilik,
- Medya uygulamaları için destek,
- Geliştirilmiş güvenlik,
- Geliştirilmiş ve garantili hizmet kalitesi,
- Küresel dolaşım ağları,
- Standartlaştırılmış açık arabirim,
- Kendi kendini organize eden ağlar,
- Hızlı cevaptır.

4.5G kavramı, Aralık 2010'da 3GPP tarafından yayınlanan sürüm 10 ile kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu kavram, orijinal LTE standardının yerine yeni bir teknolojiyi temsil etmekten çok gelişmiş LTE'ye dönüşmek için LTE standardına eklenen teknolojiler içermektedir. Bu teknolojiler taşıyıcı agregasyon, gelişmiş aşağı ve yukarı-hat MIMO ve rölelerinden oluşmaktadır [6].

LTE GSM mimarilerinden farklı olarak IP tabanlı bir mimariye sahiptir. Bu mimari 75 Mbps'lik bir yukarı hat tepe hızı, 300 Mbps'lik bir aşağı hat tepe hızı ve 20 MHz'lik bir bant genişliği sağlayabilen Gelişmiş Paket Çekirdeği (EPC-Evolved Packet Core) olarak adlandırılır. LTE-A ise 500 Mbps'lik bir yukarı bağlantı tepe hızı, 3,3 Gbps'lik bir aşağı bağlantı tepe hızı ve 100 MHz'lik bir bant genişliğine sahiptir. LTE-A'daki yüksek veri hızı, bant genişliğini ve veri hızını arttırmak için kullanıcı ekipmanında farklı bileşen taşıyıcılarını birleştiren bir işlem olan taşıyıcı agregasyon olarak bilinen bir teknik kullanılarak elde edilmektedir. Toplanan taşıyıcıların sayısı, 100 MHz'lik bir bant genişliği elde etmek için en fazla beş adettir. LTE sistemlerinde tahsis edilen bant genişliği 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ve 20 MHz şeklinde bölünebilir.

Çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO-Multiple Input Multiple Output), genel veri hızlarını artırmak için LTE-A sistemlerinin karakteristik bir özelliğidir. Verici veya alıcı antenlerin sayısı, desteklenen veri akışlarının sayısını belirler. MIMO, çok yollu iletişim koşullarında en iyi performansı sağlamak için kullanılmaktadır. Çünkü kablosuz ağlarda sinyalde hem parazit hem de çok yollu bağlantı olduğundan iletişim performansı ciddi ölçüde düşmektedir. Örneğin 3G şebekeleri, LTE sistemlerinin sunduğu 20 Mbps'lik garantili bit hızı ile karşılaştırıldığında, oldukça düşük olan 1 Mbps'lik bit veri hızı sağlarlar. Bu nedenle, MIMO teknikleri, kablosuz kanalın çok yollu bağlantı ile yüksek veri hızlarına erişebilmesini sağlamak için kullanılan önemli bir uygulamadır [7].

Çizelge 2.1. Kablosuz mobil iletişim teknolojileri [8]

Sıra	Nesil	Özellikler
0.	0G Teknolojisi (Klasik Mobil Sistemler)	• PTT (Bas konuş) • MTS (Mobil Telefon Sistemi) • IMTS (Geliştirilmiş Mobil Telefon Sistemi) • AMTS (Gelişmiş Mobil Telefon Sistemi)

Çizelge 2.1. (devam) Kablosuz mobil iletişim teknolojileri [8]

1.	1G Teknolojisi (Cep telefonları, analog kablosuz)	• AMPS (Analog Cep Telefonu Sistemi) • FDMA (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
2.	2G Teknolojileri: (Dijital kablosuz, GPRS, EDGE) Temel 2G 2.5G GPRS (Genel Paket Radyo Servisi) 2.75G EDGE (GSM Evrimi İçin Geliştirilmiş Veri Hızları)	• GSM standardı (Devre anahtarlama etki alanı): TDMA (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim) CDMA (Kod Bölmeli Çoklu Erişim) ➤ Paket anahtarlama etki alanı: WAP (Kablosuz Uygulama Protokolü) MMS (Multimedya Mesaj) SMS (Kısa Mesaj Hizmeti) GSM'in genişletilmiş versiyonu
3.	3G Teknolojileri: (Geniş Bant, IP Teknolojisi) Temel 3G 3.5G HSDPA (Yüksek Hızlı Aşağı-hat Paket Erişimi), W-CDMA 3.75G-HSUPA (Yüksek Hızlı Yukarı-hat Paket Erişimi), UMTS/WCDMA Yukarı-hat gelişimi	• 2.5G üzerinde iyileştirmeler: Ses ve video akışı geliştirme Daha hızlı yüksek veri hızı Video konferans desteği Yüksek hızlarda Web ve WAP tarama IPTV (İnternet üzerinden TV desteği) ➤ Sürümler: W-CDMA, GSM-EDGE, UMTS, DECT, WiMAX and CDMA 2000 ➤ Daha yüksek veri aktarım hızı için uygulamalar: AMC MIMO (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış) HARQ (Melez Otomatik Tekrar Gönderim) • Donanımlar: P2P veri uygulamaları (Mobil e-posta, gerçek zamanlı P2P oyunları, internet servisini daha hızlı indirme vb.)
4.	4G Teknolojileri: Temel 4G (LTE, WiMAX, WiFi) 4.5G (LTE-A)	• Daha fazla bant genişliği ve hizmetler • Teknolojiler: BDMA (Bant Bölmeli Çoklu Erişim) CDMA (Kod Bölmeli Çoklu Erişim) • Hizmetler: MMS, eğlence servisleri, Yüksek netlikte dijital TV vb. 1800 MHz 2100 MHz frekans bant genişliği, 100 Mbit/sn internet hızı

2.1.5. 3GPP standardizasyonu

3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) tarafından uzun yıllar süren standartlaşma çalışmalarından sonra ilk LTE kavramı hayatımıza Sürüm 8 adıyla 2008 yılında girmiştir. Bu sürüm daha önceki sistemlere kıyasla önemli ölçüde gelişmiş veri performansı sağlayan tamamen yeni bir radyo ara yüzü ve çekirdek ağı içermektedir. Bir yıl sonra, Sürüm 9 adıyla yeni bir standart yayınlanmıştır. Sürüm 9, Sürüm 8'de sunulan özelliklerin yanı sıra yeni bir ağ mimarisi ve servis özellikleri sağlamaktadır. 2011 yılında ise LTE-A yani 4.5G'nin başlangıcı olduğu düşünülen Sürüm 10 ile veri aktarımı geliştirilmiş ve hücre kapsama alanı önemli ölçüde genişletilmiştir.

Sürümlerdeki gelişmeler ve yapılan iyileştirmeler Çizelge 2.2.'de sunulmuştur. Günümüzde aktif olarak Sürüm 15'in çalışmaları devam etmektedir. Sürüm 15'in 2018 Eylül ayında dondurularak Sürüm 14 ile temelleri atılan 5G teknolojisinin yani LTE-Advanced Pro'nun standartlarını sunulması beklenmektedir.

Çizelge 2.2. 3GPP LTE sürümlerdeki gelişmeler ve yapılan iyileştirmeler

3 GPP Sürümü / Dondurulma Tarihi	Önemli Özellikleri ve İyileştirmeler
Sürüm 8 / Aralık 2008	➤ Yüksek veri hızları: 4x4 MIMO ve 20 MHz bant Genişliği kullanıldığında, aşağı hat bağlantıda 300 Mbps ve yukarı hat bağlantıda 75 Mbps ➤ Yüksek spektral verimlilik ➤ Esnek bant genişlikleri: 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz ve 20 MHz ➤ Kısa gidiş-dönüş süresi: İdeal radyo koşulları IP paketleri için 5 ms gecikme ➤ Basitleştirilmiş mimari ➤ Aşağı-Hat bağlantıda OFDMA ve Yukarı-Hat bağlantıda SC-FDMA ➤ Tüm IP ağı ➤ Eşleştirilmiş (FDD) ve Eşlenmeyen Spektrum (TDD)

Çizelge 2.2. (devam) 3GPP LTE sürümlerindeki gelişmeler ve yapılan iyileştirmeler

Sürüm 9 / Mart 2010	➤ Kamu Uyarı Sistemi (PWS) ➤ Femtocell Konseptinin (Ev eNodeB) tam entegrasyonu ➤ Evrimleşmiş Çoklu Yayın ve Çoklu Yayın Servisi (eMBMS) ➤ Kendi Kendini Organize Eden Şebekeler (SON) ➤ Multimedya Yayını Multicast Servisleri (MBMS) ➤ LTE konumlandırma ➤ Yeni spektrum bantları (örneğin: 800 MHz ve 1500 MHz)
Sürüm 10 / Eylül 2011	➤ 1 Gbps Aşağı-hat / 500 Mbps Yukarı-hat bağlantı ➤ Yüksek spektral verimlilik ➤ Dünya çapında dolaşım ➤ Geliştirilmiş yukarı hat çoklu erişim bağlantısı ➤ Geliştirilmiş MIMO ➤ Geliştirilmiş SON ➤ Geliştirilmiş Hücreler Arası Eşgüdüm Koordinasyonu (eICIC) ➤ Role düğümleri ➤ Taşıyıcı Toplama (CA)
Sürüm 11 / Mart 2013	➤ Geliştirilmiş CA ➤ Eşgüdümlü Çoklu İletim ve Alım (CoMP) ➤ Geliştirilmiş Fiziksel Aşağı Hat Kontrol Kanalı (ePDCCH) ➤ Ağa dayalı konumlandırma ➤ Sürüş Testinin Minimizasyonu (MDT) ➤ Makine tipi iletişim için aşırı yük kontrolü ➤ Akıllı telefon batarya tasarrufu tekniği
Sürüm 12 / Mart 2015	➤ Küçük hücre geliştirilmeleri ➤ CA geliştirilmeleri ➤ Makine Tipi İletimi (MTC) ➤ LTE ile Wi-Fi Entegrasyonu
Sürüm 13 / Aralık 2015	➤ Taşıyıcı Toplama Geliştirmeleri ➤ MTC için geliştirmeler ➤ Lisanssız spektrum geliştirmelerindeki LTE

Çizelge 2.2. (devam) 3GPP LTE sürümlerindeki gelişmeler ve yapılan iyileştirmeler

	➤ İç mekân konumlandırması ➤ Geliştirilmiş MIMO teknikleri
Sürüm 14 / Haziran 2017	➤ 5G gereksinimleri (SMARTER, NexGen) ➤ Kamu uyarı sistemi için multimedya yayın eki ➤ Sahte aramalar üzerinde kullanıcı kontrolü ➤ Konum hizmetleri ➤ LTE üzerinden görev kritik video, MC verileri, V2X hizmetleri için LTE desteği ➤ eFMSS ➤ S8 Ev yönlendirme mimari ➤ WLAN üzerinden Ph2 acil servisler ➤ EPC düğümlerinin kontrolü ve kullanıcı düzlemi ayırımı ➤ Çaplı şarj uygulamaları için aşırı yük kontrolü ➤ LTE için gecikme azaltma teknikleri ➤ Band 41 için Yüksek Güçlü LTE kullanıcı ekipmanı, 6 GHz'in üstünde kanal modeli ➤ SRVCC geliştirmeleri ➤ Servis Alanı Merkezi ➤ LTE'de VoLTE abonesi için sağlam çağrı kurulumu ➤ OAM (AAS tabanlı dağıtımlarda enerji verimliliği ve SON) ➤ MTC için UICC güç optimizasyonu ➤ Yeni nesil erişim teknolojileri için gereklilikler ➤ UMTS için çoklu taşıyıcı donanımlar

2.1.6. LTE ve mevcut acil durum sistemlerinin karşılaştırılması

Kriz ve acil durumlarda polis, itfaiye, arama kurtarma ekipleri ve acil sağlık görevlileri zor bir görev olan ilk müdahaleden sorumludurlar. Operasyonları sırasında koordineli ve hızlı bir şekilde çalışabilmeleri için, güvenli ve kesintisiz iletişim sistemlerine ihtiyaçları vardır. Bu amaçla geliştirilmiş olan Terrestrial Trunked Radio (TETRA), Project 25 (P25), Tetrapol ve iDen dünyanın birçok bölgesinde kamu güvenliği alanında kullanılan yaygın iletişim sistemleridir. Bu sistemler uzun yıllardır kullanılmakta olup güvenilirlikleri

kanıtlanmış sistemlerdir. Ancak dar bantlı haberleşme için geliştirilmiş oldukları için sadece ses ve düşük veri iletimine olanak sağlamaktadırlar.

Mevcut sistemler, LTE ile karşılaştırıldığında farklar açıkça ortaya çıkmaktadır. Mevcut acil durum haberleşme sistemleri yalnızca 2G ticari hücresel şebekelere benzer olan GSM, GPRS gibi veri hızlarını desteklemektedir. TETRA, P25 ve iDEN yıllardır kullanılmasına rağmen, ses odaklı geliştirilmiş olması ve sınırlı kapasiteleri olması gibi kusurları bulunmaktadır. Ayrıca bu sistemler farklı standartlara dayanan bağımsız sistemler olduğu için de son kullanıcı cihazları bir arada çalışmamaktadır. Ancak LTE uluslararası bir teknolojiyi içermektedir. Mevcut mobil operatörler ve cihaz üreticilerinin büyük bir çoğunluğu tarafından yaygın olarak desteklenmektedir. Küresel Mobil Tedarikçiler Birliği (Global Mobile Suppliers Association) tarafından Temmuz 2017 yılındaki verilere göre LTE/LTE-A şimdiden 200 ülkeden 782 operatör ile ticari olarak kullanılmaktadır [9]. Öte yandan LTE, 3GPP standardı ve uluslararası bir teknolojidir. Mobil operatörler, ağ donanım sunucuları ve aygıt üreticilerinin çoğunluğu tarafından yaygın olarak desteklenmektedir. LTE aynı zamanda düşük bantlardan (örneğin 450 MHz, 700 MHz, 800 MHz) yüksek bantlara (örneğin 1,8 GHz, 2,6 GHz) 40'dan fazla farklı standart frekans bandı desteklemektedir. Bu da büyük ölçekli dağıtım, gelişmiş ekosistem, kanıtlanmış ve eksiksiz birlikte çalışabilirlik demektir. Sonuç olarak, LTE kritik hızlı ve düşük maliyetli geniş bant iletişim için ideal bir seçenektir. Mevcut sistem ve LTE'nin karşılaştırılması Çizelge 2.3.'de yapılmıştır [10].

Çizelge 2.3. Mevcut kritik haberleşme sistemleri ve LTE'nin karşılaştırılması

	LTE	PMR
Standart	3GPP Standardı	TETRA, P25, iDEN
Frekans Bandı	3GPP tarafından tanımlanan tüm bantlar ör. band28, band14, band20	3GPP olmayan standart bantlar Ör. 400 MHz, 800 MHz, 1400 MHz
Birlikte Çalışabilirlik	Kanıtlanmış	Zayıf
Güvenilirlik	- Standardizasyon donduruldu. - Gelecekteki pratik uygulamada kanıtlanmalı	Kanıtlanmış

Çizelge 2.3. (devam) Mevcut kritik haberleşme sistemleri ve LTE'nin karşılaştırılması

Güvenlik	- Hava Arayüzü Şifreleme - Geçiş Şifrelemesi ör. IPSec	Uçtan uca şifreleme
Veri Hızı	> 100 Mbps	Düşük Hız (Ör. TETRA 28 kbps)
Son Kullanıcı Cihazı	Tüm LTE cihazlarıyla uyumludur	Farklı standartlara göre uyarlanmış özel cihaz
Dağıtım Seçeneği	Operatörün LTE ağını tekrar kullanması ve yeni baz istasyonu	Yeni baz istasyonu

2.1.7. Literatür çalışmaları

Kablosuz haberleşme teknolojisinin bant genişliği, bağlantı hızı, veri kapasitesi, kapsama alanı ve güvenliği gibi birçok özelliği, yıllar içinde gelişerek günümüzde yaygın olarak kullandığımız LTE ve LTE-A seviyesine ulaşmıştır. Ancak yıllar içinde gelişen kablosuz ağların belki de en büyük ortak noktası hepsinin sinyal karıştırıcılar tarafından zayıf ya da şiddetli olarak etkileniyor olmasıdır.

Literatürde radar ve telsiz sinyali için karıştırıcı saldırılar geniş bir biçimde incelenmiş olmasına rağmen ticari amaçla kullanılan mobil ağlara yönelik sinyal karıştırma saldırılarıyla ilgili daha az çalışma yapılmıştır. Bu çalışmayla ilgili mevcut literatür araştırması kablosuz ağlardaki sinyal karıştırıcı çalışmaları, OFDM sistemlerine yönelik sinyal karıştırıcılar ve LTE'ye yönelik sinyal karıştırıcı saldırıları olmak üzere sınıflandırılabilir.

Lichtman ve diğerleri (2016), hızlı bir şekilde gelişen kablosuz haberleşmenin güvenliğini açıklayabilmek için, sinyal karıştırıcıları teorik davranışlarına ve özelliklerine göre sınıflandıran yeni bir yaklaşım önermektedir. Buna göre daha önceleri yapıldığı gibi karıştırıcıları sinyal çeşitlerine göre kategorize etmek yerine, karıştırıcıların sahip oldukları bilgilere ve bunların üzerinde hareket etme kapasitelerine göre sınıflandırmıştır. İlk sınıflandırma sinyal karıştırıcının zamanla ilişkilendirilmiş olup olmadığı, haberdar protokol olması, aldatma kullanması ve öğrenebilme kabiliyetine göre yapılmıştır. Daha sonra, ikinci

seviye karakteristikleri ise bant genişliği, görev döngüsü, modülasyon, anten modeli ve antenin yönlendirilebilir olması gibi parametreleri göz önüne alınmıştır.

Ahsan, Zahir, Mohsin ve Hussain (2011) kablosuz ağlar için farklı sıkışma saldırıları ve bu saldırılara yönelik kullanılan hafifletme teknikleri üzerine araştırmaları içermektedir. Bir karıştırma saldırısının etkilerini en aza indirmek için geliştirilmesi gereken potansiyel alanlar ve sinyal karıştırmanın olduğu bir bölgede ağın hayatta kalması için önerilen yaklaşımlar değerlendirilmektedir.

Mukherjee, Fakoorian, Huang, ve Swindlehurst (2014) çok kullanıcı kablosuz ağlardaki fiziksel katmanın güvenliği incelenmiştir. Fiziksel katman mekanizmalarına dayanan gizli anahtar üretimi ve kurulum protokolleri ele alınarak kanal kodlama tasarımına dayalı gizlilik yaklaşımları, oyun teorisine ve rastlantısal geometriye dayalı disiplinler arası yaklaşımların bir tanımlamasıyla birlikte incelenmiştir.

Liu, Li, Kong, ve Zhao (2015) MIMO kablosuz iletişim bağlantısına yönelik akıllı sinyal karıştırıcı tasarımlarını ve özelliklerini incelemiştir. Çalışmaya göre en iyi akıllı sinyal karıştırıcı tasarımları, karıştırıcıdaki Kanal Durum Bilgisine (CSI-Channel State Information) uygun olarak farklı durumlar için tasarlanmış sinyal karıştırıcılardır.

Chan, Liu, Noubir ve Thapa (2007) kablosuz iletişim sistemlerindeki kontrol kanalını hedef alan sinyal karıştırma saldırılarını incelemiştir. Bu sinyal karıştırıcılara karşı koyabilecek kodlama yöntemleri önerilmiştir.

Jun, Andrian ve Zhou (2007) Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM) sistemler için çeşitli sinyal karıştırıcıların performansını incelemiştir. Bunun için Rayleigh sönümleme kanalına eklenen Beyaz Gauss Gürültüsü (AWGN-Additive White Gaussian Noise) ve sinyal karıştırıcılar ile sistemdeki Bit Hata Oranı (BER) analizi yapılmıştır. Sonuçlar hem teorik hem de simülasyon çıktıları şeklinde gösterilmiştir.

Shahriar ve diğerleri (2017) fiziksel katmanın güvenlik açıklarını ve OFDM iletişimlerinin dayanıklılığını ele almaktadır. Bu amaçla OFDM dalga formunun gürültüye, çok yollu sönümlemeye ve girişimlere dayanıklılığı incelenmiştir. OFDM'nin sağlamlığı önce AWGN

gürültüsü, bazı sinyal karıştırıcılar ve modüle edilmiş kaynaklardan doğan, ancak birbiriyle ilişkili olmayan durumlar altında incelenmiştir.

Shahriar, Clancy ve Mcgwier (2015) OFDM'e karşı güç tasarruflu sinyal karıştırma saldırıları ve olası önlemleri tartışılmıştır. Özellikle pilot ton olarak bilinen ve OFDM'de kanal tahmini ve eşitleme için kullanılan sinyallere yönelik olan gürültüye dayalı pilot ton saldırı ve pilot boşa alma saldırısı incelenmiştir. Ayrıca bazı sinyal karıştırıcılar için kullanılabilecek hafifletme yönteminden bahsedilmiştir.

Chao, Ping ve Guozhong (2012) ise hem teorik hem de simülasyonlar ile rasgele faz çok tonlu sıkışma varlığında OFDM'nin performansını incelemiştir. OFDM sinyalinin BER-SNR ile ters orantılı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca frekans çeşitliliği ve konvolüsyonel kodlamanın performans kaybını büyük ölçüde etkilediği gösterilmiştir.

Shahriar, Sodagari, Mcgwier ve Clancy (2013) OFDM alıcısındaki sinyalin, frekans kayması sebebiyle bant genişliğinden daha fazla spektrumu etkileyerek girişime sebep olabileceğini belirtilmiştir. Bu amaçla OFDM kanalına harmonik olmayan ton sıkışma saldırıları uygulayarak hem teorik hem simülasyon sonuçları ile bu durumun analizi yapılmıştır.

Clancy (2011) OFDM ve OFDMA sinyallerine karşı pilot ton temelli saldırıları temel almaktadır. Bu amaçla, eşitleme algoritması tarafından kullanılan bilgileri bozarak önemli sayıda sembolde hata olmasına sebep olan pilot ton saldırıları ile baraj sinyal karıştırıcı verimlilik açısından karşılaştırılmıştır.

Takpot ve Idachaba (2014) LTE fiziksel katmanı aşağı ve yukarı hat bağlantı iletimleri analiz etmiştir. Bunun için Fiziksel Aşağı-hat Paylaşılan Kanal (PDSCH-Physical Downlink Shared Channel) ve Fiziksel Yukarı Hat Kontrol Kanalı (PUSCH-Physical Uplink Shared Channel) LTE alıcı ve vericilerinin performansını göstermek için simülasyon sonuçları sunulmuştur. Ayrıca farklı simülasyon yapılandırmaları için verim ve Bit Hata Oranı (BER) ölçümleri de gösterilmiştir.

Lichtman, Reed, Clancy ve Norton (2013), 'te, LTE'nin aşağı-hat ve yukarı-hat sinyalleri sinyal karıştırıcılar altında analiz edilmiştir. Baraj sinyal karıştırıcıdan yola çıkarak LTE sinyallerine yönelik geliştirilen sinyal karıştırıcılar kullanılarak, aşağı hat ve yukarı hat için

zayıf sinyaller tespit edilmiştir. Çalışmaya göre aşağı hat Fiziksel Kontrol Biçimi Göstergesi Kanalı (PCFICH-The Physical Control Format Indicator Channel) ve Yukarı Hat Kontrol Kanalı (PUCCH-Uplink Control Channel) kanallarının en zayıf sinyaller olduğu belirlenmiştir.

Gonçalves (2011) LTE ve LTE-A mobil ağların verimliliğini incelemek ve sonuçların teorik değerlerle tutarlı olup olmadığını kontrol etmek için iki farklı simülatör kullanarak bant genişliği, Kanal Kalitesi Göstergesi (CQI-Channel Quality Indicator) değeri ve MIMO aracılığıyla anten konfigürasyonunun maksimum verimlilik üzerindeki etkisini göstermiştir.

Jover (2013) LTE mobil ağlarının mevcut kullanılabilirliğine genel bir bakış sunulmasının yanı sıra Radyo Erişim Ağı'na (RAN-Radio Access Network) karşı yerel Hizmet Reddi (DoS-Denial of Service) saldırıları ve Gelişmiş Paket Çekirdeğini (EPC- Evolved Packet Core) doyurmayı amaçlayan DDoS (Distributed Denial of Service attack) saldırıları incelenmiştir.

Aziz, Shamma ve Stuber (2014) LTE ağlarına yönelik DoS ve şebekeyi ya da kullanıcının iletişimini kesmek zorunda kalmadan sızma saldırı yapmak için kullanılan akıllı sinyal karıştırıcılar çalışılmıştır. Sinyal karıştırıcılar ve ağ tarafından karışma ve anti-karışma durumları tek atışlı ve tekrarlanan Bayes oyunları çatısı altında modellenmiştir.

Bhattacharai ve diğerleri (2015) sinyal karıştırıcı aygıtlarının sayısının, konumunun ve koordinasyonunun LTE ağlarının performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için üç boyutlu bir test alanı kurularak saldırı senaryoları gerçekleştirilmiştir. Buna göre de saldırıların LTE ağlarında belirgin bir performans düşüşü yaratabileceğini gösteren simülasyon sonuçları sunulmuştur.

Philippe ve diğerleri (2013) LTE temelli bir mobil geniş bant iletişim sisteminin askeri kullanımı sırasında maruz kalabileceği geniş bant, darbeli ve kısmi bant sinyal karıştırıcılar incelenmiştir. Bu amaçla sinyalin iletim gücü, anten kazancı ve anten yüksekliği parametreleri göz önünde bulundurarak performans analizleri yapılmıştır.

Jover, Lackey ve Raghavan (2014) LTE şebekelerinde hücre seçim prosedürü olan aşağı hat yayın kanallarını ve korunmayan yayınlanmış ağ yapılandırma mesajlarını dinlemeye yönelik üç saldırı yöntemi ve bu saldırıların etkilerini azaltmak için öneriler sunulmuştur.

Xiao, Wang, Guo, Long ve Jin (2013) LTE sisteminde enterferans sinyal karıştırıcı olarak adlandırılan bir girişim yöntemi sunulmaktadır. Bu sinyal karıştırıcı kablosuz ağlarda ortamın doğasından istifade eder. LTE sistemindeki bağlantı bütçesini kullanarak, enterferans sinyal karıştırıcının etkisi nicel olarak analiz edilmiştir.

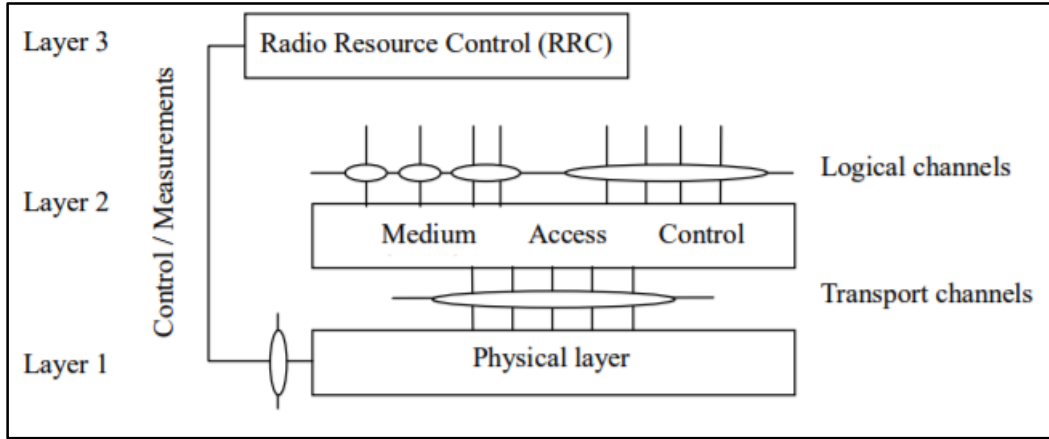
Grover, Lim ve Yang (2014) kablosuz ağlardaki sinyal karıştırma ve anti-sinyal karıştırma tekniklerinin daha iyi anlaşılması amacıyla kablosuz ağlardaki sinyal karıştırıcıların performansını etkileyen karıştırma çeşitleri ve yerleştirilmeleri incelenerek, karşı önlem mekanizmaları çalışılmıştır.

Lichtman, Czauski, Ha, David ve Reed (2014) Fiziksel Yukarı-hat Kontrol Kanalı (PUCCH) üzerindeki girişimin tespiti için kullanılacak çeşitli stratejiler ve protokolden haberdar müdahalenin kısıtlayıcı etkisinin azaltılmasına yönelik stratejiler önerilmiştir.

Literatürde radar ve telsiz sinyali için karıştırıcı saldırılar geniş bir biçimde incelenmiş olmasına rağmen ticari haberleşmedeki sinyal karıştırma saldırılarıyla ilgili daha az çalışma yapılmıştır. Yapmış olduğumuz çalışmanın yukarıda belirtilen mevcut çalışmalardan en önemli farkları; spesifik olarak LTE ve LTE-A'ya yönelik olması, sadece Aşağı hat haberleşme çalışılması, sadece fiziksel katmanın incelenmiş olması ve dinleme ya da akıllı sinyal karıştırıcılar yerine, baraj, kısmi bant, tek ton ve çok tonlu sinyal karıştırıcı gibi hizmet reddi saldırılarının çalışılmış olmasıdır.

2.2. LTE Fiziksel Katmanı

LTE, hiyerarşik bir kanal yapısı benimsemiştir. Mantıksal kanallar, aktarım kanalları ve fiziksel kanallar olmak üzere üç farklı kanal türü bulunmaktadır. Bu kanalların her biri sırasıyla Radyo Kaynak Kontrol (RRC-Radio Resource Control), Ortam Erişim Kontrol (MAC-Medium Access Control) ve Fiziksel Katman (PHY-Physical Layer) arasında bir Servis Erişim Noktası (SAP-Service Access Point) ile ilişkilidir.

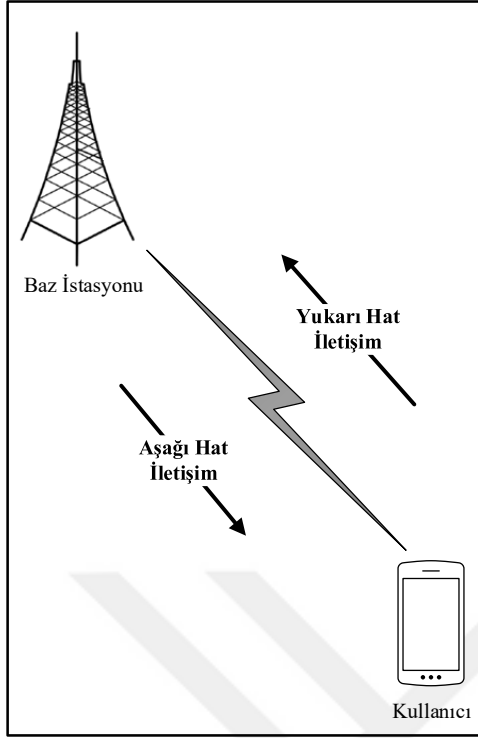


Şekil 2.2. Fiziksel katmanın etrafındaki radyo arabirimi protokol mimarisi [33].

Şekil 2.2 Katman 1’de ki fiziksel katmanın etrafındaki E-UTRA radyo arabirimi protokol mimarisini göstermektedir. Fiziksel katman, Katman 2’nin MAC alt katmanı ile Katman 3’ün RRC Katmanı arasında arabirim oluşturur. Farklı katman ve alt katmanlar arasındaki SAP’ları daireler ile gösterilmiştir. Fiziksel katman MAC’e bir aktarım kanalı sunmaktadır. Aktarım kanalı, bilginin radyo arabirimi üzerinden nasıl aktarıldığı ile karakterize edilir. MAC, Katman 2’nin Radyo Link Kontrol (RLC) alt katmanı için farklı mantıksal kanallar sunar. Mantıksal kanal, aktarılan bilgi türüne göre belirlenir [33].

LTE fiziksel katman modellemesi, üst katlardan fiziksel katmana aktarılan veri bitleri üzerinde yapılan tüm işlemleri içerir. LTE standardında geçen frekans bantları, frekans bölmeli (FDD-Frequency Division Duplex) ve zaman bölmeli (TDD-Time Division Duplex) çift yönlü aktarım yöntemleri, esnek bant genişliği tahsisi, zaman çerçeveleme ve zaman frekans kaynağı gösterimi, çok taşıyıcı iletim şemaları, çoklu anten protokolleri, uyarlamalı modülasyon ve kodlama şemaları bu katman kapsamında ele alınmaktadır. Yani model çeşitli aktarım kanallarının fiziksel kanallara nasıl eşlendiğini, bu kanallarda sinyal işlemenin nasıl gerçekleştirildiğini ve işlenen verilerin nihai aktarımı için antenin içine nasıl taşınacağını tanımlamaktadır.

3GPP tarafından, yukarı hat olarak tanımlanan mobil cihazdan baz istasyonuna ve aşağı hat olarak tanımlanan baz istasyonundan mobil cihaza haberleşme için standartlaştırılmış ayrı veri iletişim protokolleri kullanılmaktadır. Yukarı hat ve aşağı hat iletim yönlerinin gösterimi şekil 2.3’te yapılmıştır.



Şekil 2.3. LTE aşağı hat ve yukarı hat bağlantı yönleri

2.2.1. Aşağı hat iletim modları

3GPP standartlarında Sürüm 12’de aşağı-hat iletişimi için on tane iletim modu belirtilmiştir. Bu modlar, kullanıcıların Fiziksel Aşağı-Hat bağlantı Paylaşılan Kanalı (PDSCH-Physical Downlink Shared Channel) üzerinden veri iletiminin ne şekilde yapılacağını belirlemesini sağlamaktadır.

Çizelge 2.4 sürüm 12’deki aşağı hat iletim modları, kontrol bilgisi ve anten ilişkisini özetlemektedir. Mod 1, alıcı çeşitliliğine, mod 2 ise verici çeşitliliğine dayanır. Mod 3 ve mod 4 ise sırasıyla açık ve kapalı döngü ön kodlamaya dayalı mekânsal çoğullamanın tek kullanıcı uygulamalarıdır. Mod 3’te ayrıca Döngüsel Gecikme Çeşitliliği (CDD-Cyclic Delay Diversity) kullanılır. LTE mod 5 ise, mod 4 ‘ün MIMO hali ve maksimum katman sayısı bir taneye ayarlanan uygulamayı belirtir. Mod 6, hüzmeleme oluşturma ve mod 4’ün katman sayısının ikiye ayarlanabildiği durumdur. Mod 7, 8 ve 9, kod bloklarını kullanmadan 1, 2 ve 4 ile 8 katmana mekânsal çoğullamanın sürümlerini uygularlar. Gelişmiş LTE-A ile beraber mod 8 ve 9’da aşağı hat çok kullanıcı, çoklu giriş, çoklu çıkış (MU-MIMO) iletim için önemli geliştirmeler yapılmıştır. Son iletim modu olan mod 10 ile de hücre arası koordinasyonu (CoMP-Coordinated Multi Point) desteklemek için mod 9’a ilaveler

yapılmıştır. Tabloda gösterilen bir diğer parametre olan aşağı hat bağlantı kontrol bilgisi (DCI-Downlink Control Information)'de kullanıcıya PDSCH'de iletilen veriyi aynı alt çerçevede nasıl alacağını belirtir. Bu tez çalışmasında en temel iletim modu olan vericide ve alıcıda tek bir antenin kullanıldığı mod 1 kullanılmıştır.

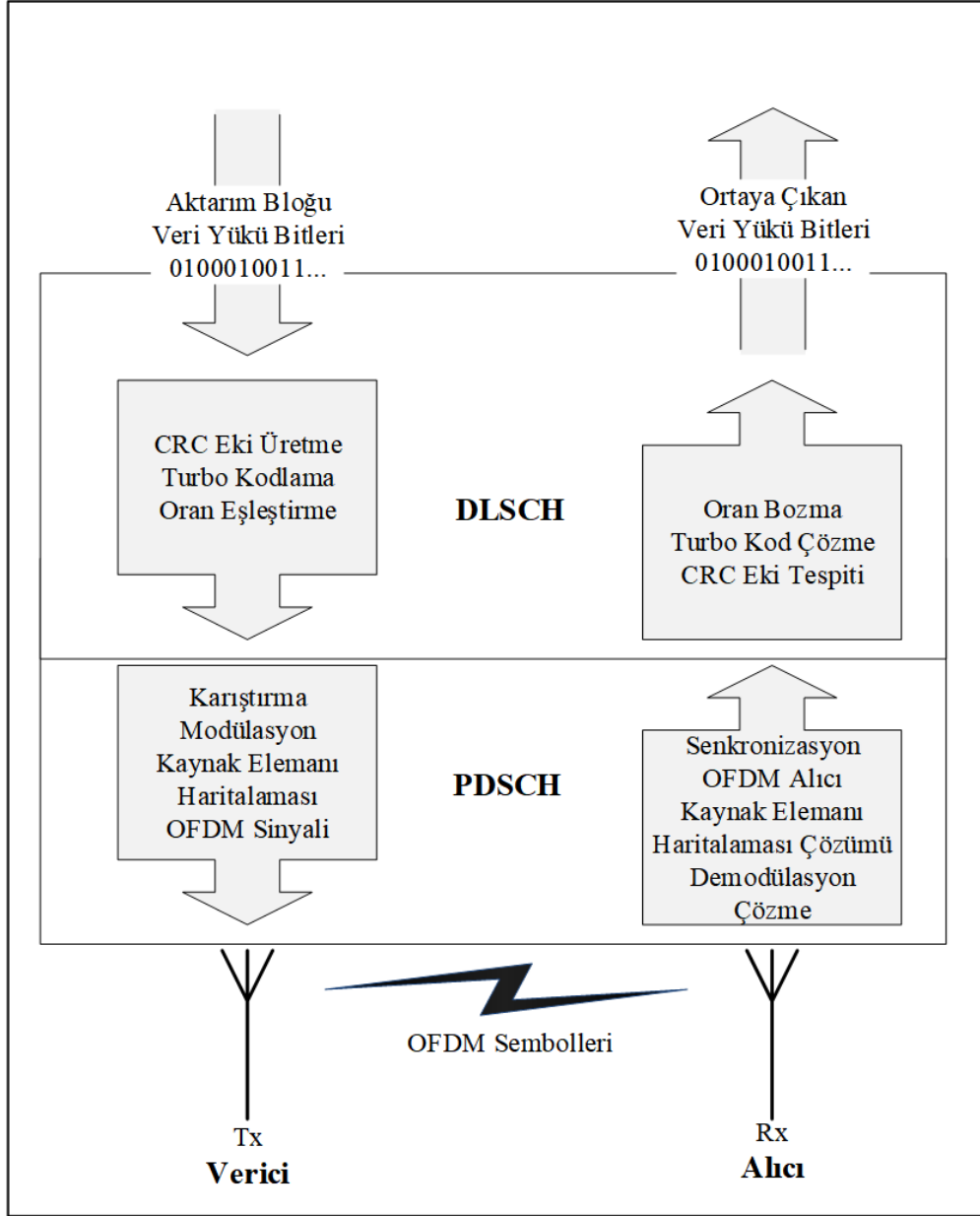
Çizelge 2.4. Sürüm 12'deki aşağı hat iletim modları, kontrol bilgisi ve anten ilişkisi

İletim Modu	Tanım	DCI (Ana)	Açıklama
1	Tek anten bağlantısı	1/1A	Tek anten bağlantı noktası: port 0
2	İletim çeşitliliği	1/1A	2 veya 4 anten bağlantı noktası: port 0,1 (...3)
3	Açık döngü kod defteri temelli ön kodlama (büyük gecikme CDD) ya da iletim çeşitliliği	2A	2 veya 4 anten bağlantı noktası: port 0,1 (...3)
4	Kapalı döngü kod defteri temelli ön kodlama	2	2 veya 4 anten bağlantı noktası: port 0,1 (...3)
5	TM4 çok kullanıcı MIMO versiyonu	1D	2 veya 4 anten bağlantı noktası: port 0,1 (...3)
6	Tek kat için kapalı döngü kod defteri tabanlı ön kodlama	1B	1 katman (derece 1), 2 veya 4 anten bağlantı noktası: port 0,1 (...3)
7	Hüzmeleme	1	Tek anten bağlantı noktası: port 5 (sanal anten bağlantı noktası)
8	İki katman hüzmeleme	2B	Çift katmanlı iletim, anten bağlantı noktaları: Port 7 ve 8
9	Sekiz katman iletimi	2C	8 katmana kadar, anten bağlantı noktaları: port 7- 14
10	Sekiz katman iletimi	2D	8 katmana kadar, anten bağlantı noktaları: port 7- 14

2.2.2. Aşağı hat için fiziksel katman

LTE aşağı hat PHY katman zinciri Aşağı-hat Bağlantı Paylaşımlı Kanal (DL-SCH-Downlink Shared Channel) ve Fiziksel Aşağı hat Paylaşımlı Kanal (PDSCH-Physical Downlink Shared Channel) işlem basamaklarından oluşmaktadır. Bu işlem basamaklarından, çoklayıcı ve kanal kodlama işlemleri, fiziksel kanalları ve modülasyonu 3GPP belgelerinde belirtilmiştir [34,35].

Şekil 2.4 aşağı hat bağlantı için gerekli alıcı ve verici işlem basamaklarını 1. iletim modu için göstermektedir. Buna göre her bir işlem basamağı MAC katmanında gönderilen verinin OFDM sinyali olarak antenlere aktırılincaya kadar fiziksel katmanda gerçekleşen sinyal işlemlerini tanımlamaktadır. İlk aşama olan DL-SCH aşamasında, veri çoklanır ve kodlanır. Hata tespiti için Döngüsel Artıklık Denetimi (CRC-Cyclic Redundancy Check) kodu üretilerek eklenir. Veriler, alt bloklar olarak bilinen daha küçük parçalara bölünür. Kullanıcı verileri turbo kanal kodlama yöntemiyle kodlanır. Oran eşleştirme ile de istenilen kodlama oranını yansıtmak için çıkış bitlerinin sayısı belirlenir. Son olarak kod blokları kod sözcüklerine yeniden dönüştürülür. Daha sonraki aşamalar ise PDSCH olarak tanımlanır. Kod sözcükleri önce bir şifreleme işlemine tabi tutulur ve daha sonra modüle edilmiş bir sembol akışı ile sonuçlanan bir modülasyon ile haritalanır. Alıcıda verici işlemlerinin tersi gerçekleştirilir. Verici blok yapılarına ilaveten senkronizasyon ve kanal kestirimi aşamaları yer almaktadır. OFDM alıcısı, OFDM sinyali üretme ve iletim işlemlerini tersine çevirir. Önce, alınan OFDM sembolünün başlangıcından döngüsel örnekleri siler. Ardından, bir FFT işlemi gerçekleştirilerek, belirli bir OFDM sembolünün alınan kaynak şebeke elemanı hesaplanır. Bu aşamada, alınan kaynak elemanlarındaki kanal ve simgeler arası girişimin etkilerini ortadan kaldırmak için senkronizasyon işlemi gerçekleştirilir. Bunun için öncelikle tüm bant genişliği yani tüm kaynak ögeleri için, kanal frekansı tepkisi hesaplanır.



Şekil 2.4. LTE aşağı-hat alıcı ve verici yapısı

Aşağı hat bağlantı paylaşımlı kanal (DLSCH)

Aşağı Hat Bağlantı Paylaşımlı Kanal (DLSCH) işlemleri, Alt Bağlantı Aktarım Kanalı (TrCH-Transport Channel) işlemleri olarak da bilinmektedir. DLSCH verici işlemleri, aşağıda sıralanan işlemleri içermektedir:

- Kod bloğu segmentasyonu,
- Döngüsel Artıklık Denetimi (CRC) eki,
- Turbo kodlama,

- Oran eşleştirmesi,
- PDSCH'ye bir kod sözcüğü girişi üretmek için kod bloğunu yeniden birleştirmektir.

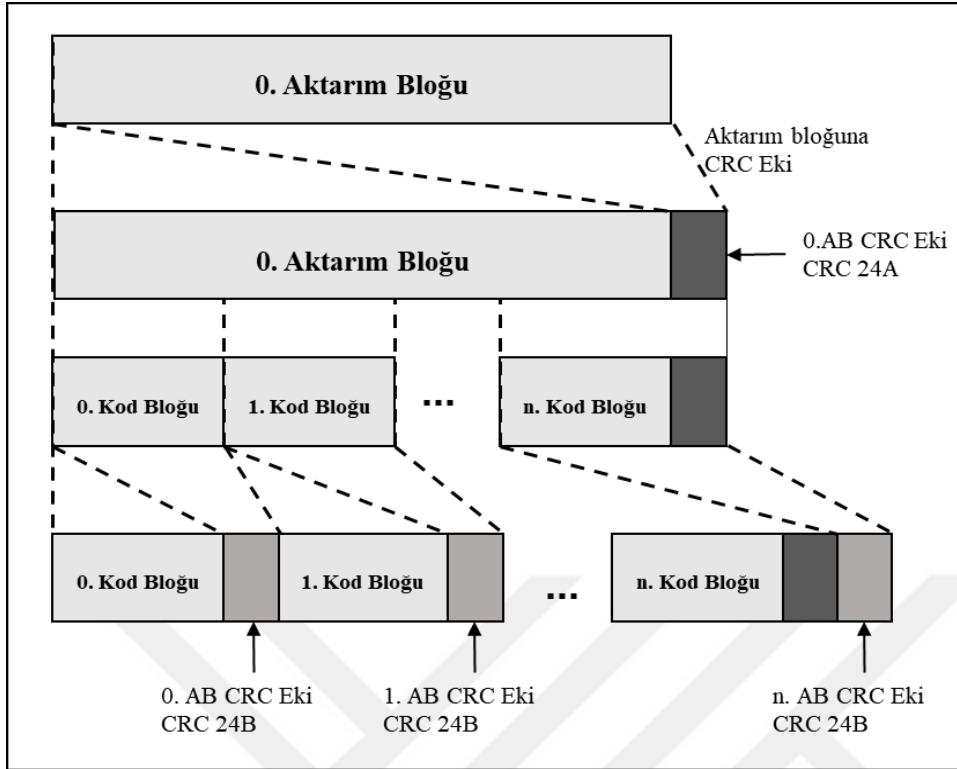
DLSCCH alıcıda, verici işlemlerinin ters işlemleri gerçekleştirilir. Bunlar:

- Kod bloğu segmentasyonu,
- Oran eşlemenin bozulması,
- CRC algılama dayalı erken durdurma seçeneği ile turbo kod çözmedir.

Kod bloğu segmentasyonu ve CRC eki

Döngüsel Artıklık Denetimi (CRC), LTE turbo kodlayıcılarının daha verimli olması için kullanılmaktadır. Turbo kodlayıcı girişine CRC eki eklenmiş bir kodun kalitesi kabul edilebilir sayıldığında yani CRC denetimi sırasında herhangi bir hata algılanmadığında, LTE turbo kod çözücü erken sonlandırma mekanizmasından faydalanabilir. Böylece sabit sayıdaki kod çözme yinelenmeleri yerine, kod çözme işlemi erken durdurulur. Bu, LTE turbo dekodeleyicilerinin hesaplama karmaşıklığının, performansından ödün vermeden kolaylaştırılmasına olanak tanır.

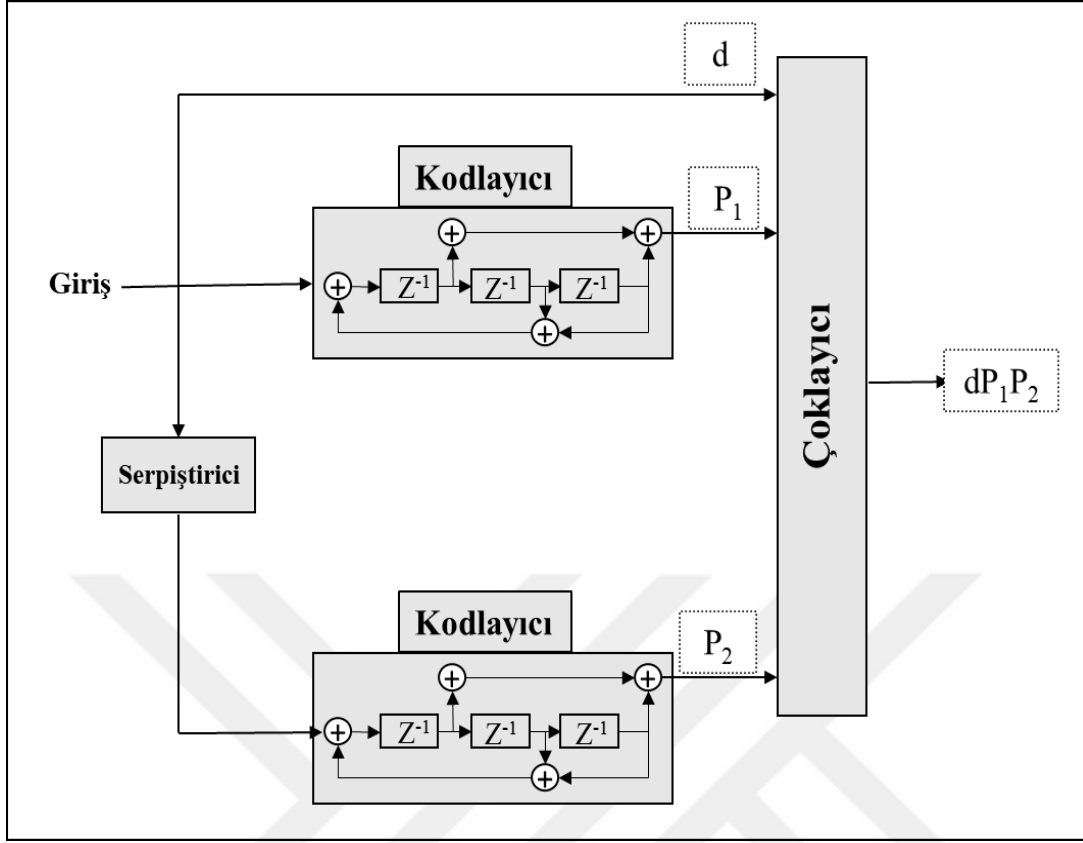
Taşıma kanalı işleminin ilk aşamasında, her aktarım bloğu için bir CRC eki hesaplanır ve bloğa eklenir. Ancak kod bloğu giriş bit dizisi, 6144 bitlik maksimum kod bloğu boyutundan büyükse, giriş bit dizisinin segmentasyonu gerçekleştirilir. Buna göre her kod bloğuna 24 bitlik ek bir CRC dizisi eklenir. Kod bloğunun giriş bit dizisinin 40 bitten küçük olduğu durumlarda da doldurma bitleri eklenir. Aktarım bloğu segmentasyonu ve CRC eki ekleme işlemi şekil 2.5.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Kod bloğu segmentasyonu, kod bloğu ve aktarım bloğuna (AB) CRC eki

Turbo kodlama

Turbo kodlama LTE standardında belirtilen kanal kodlamanın temelini oluşturmaktadır. LTE, kanal kodlama şemasının temel taşı olarak 1/3 taban oranı ile turbo kodlamayı kullanmaktadır. LTE turbo kodlayıcı, serpiştirici ile ayrılmış iki adet 8-durumlu kurucu kodlayıcının paralel bir birleşimine dayanır. Turbo kodlayıcı çıkışı üç akıştan oluşur. İlk akışın bitleri genellikle sistematik bitler olarak adlandırılır. İkinci ve üçüncü akışların bitleri, yani iki kurucu kodlayıcıların çıktıları ise 2 bitlik 1. Parite ve 2. Parite akışları olarak adlandırılır. Her kurucu kodlayıcı bağımsız olarak kuyruk bitleri ile sonlandırılır. Bu, K bitlik bir girdi bloğu boyutu için, bir turbo kodlayıcı çıktısı, çapraz sonlandırma nedeniyle $K + 4$ bit uzunluğunda 3 akıştan oluşur. Bu da turbo kodlayıcının kodlama oranını 1/3'ten biraz daha düşük yapar. Kuyruk bitleri, her akışın sonunda çoğaltılmış olduğu için sistematik, 1. parite ve 2. parite bit akışlarının tümü $K + 4$ boyutundadır [36].



Şekil 2.6. Turbo kodlayıcının blok gösterimi

LTE serpiştirici, basit bir İkinci Dereceden Polinomial Permütasyon (QPP) şemasına dayanmaktadır ve giriş bitlerinin indekslerini değiştirmektedir. Çıktı dizisi olan $p(i)$ ile girdi dizisi i arasındaki ilişki aşağıdaki “Kuadratik Polinom” ifadesi ile denklem 2.1’de açıklanmaktadır:

$$p(i) = (f_1 \cdot i + f_2 \cdot i^2) \mod(k) \quad (2.1)$$

Burada k , giriş bloğunun büyüklüğüdür ve f_1 ve f_2 , k değerine bağlı sabitlerdir. LTE, giriş bloğu boyutu k için 188 farklı değeri sağlar. En küçük blok boyutu 40 ve en büyük blok boyutu 6144 bittir. Bu blok boyutları ve karşılık gelen f_1 ve f_2 sabitleri Referans [35]’te özetlenmiştir.

Oran eşleme

Kodlama oranı, giriş bitlerinin çıkış bitlerine oranı olarak tanımlanır. Oran eşleme işlemi, kanal koşullarına bağlı olarak veri hacmini arttırmak için kullanılır. Düşük bozulmanın olduğu iletişim kanallarında veriyi bire yakın bir kodlama oranıyla kodlamak mümkündür. Bu sayede ileri hata kodlaması için iletilen bitlerin sayısı azaltır. Bozulmanın olduğu kanallarda ise daha küçük kodlama hızları kullanılarak, hata düzeltme bitlerinin sayısı artırılır. Kanal kodlamada, oran eşleşme sabit olarak $1/3$ turbo kodlayıcıyla başlar ve istenilen hıza göre değişir. Buna göre, $1/3$ 'ten daha düşük bir hız talep edilirse, turbo kodlayıcı çıktı bitleri tekrarlanır. $1/3$ 'ten yüksek oranlar için ise turbo kodlayıcı çıkış bitlerinden bazıları serpiştirici yöntemine göre azaltılır veya kaldırılır [37].

Oran eşleme, alt blokları serpiştirme, geçmeli parite bit, bit azaltma, hıza dayalı bit seçimi ve iletiminden oluşur. İlk işlem, basit bir dikdörtgen serpiştiriciye dayanan alt blokları serpiştirme işlemidir. Daha sonra oranı istenen seviyeye yükseltmek veya azaltmak için gerekli olan oran eşlemesi için bit azaltma ve tekrarlama işlemleri gerçekleştirilir. Son olarak kod blokları birleştirilerek kodlanmış bitler PDSCH'ye aktarılmaya hazır hale getirilir.

Fiziksel aşağı hat paylaşılmış kanal (PDSCH)

Kullanıcı verileri, aşağı-hat bağlantıda Fiziksel Aşağı Hat Paylaşılmış Kanal (PDSCH) olarak adlandırılan zaman ve frekans kaynağı ile iletilmektedir. PDSCH, baz istasyonu tarafından kullanıcılar için planlanan LTE'deki ana veri taşıyıcı kanalıdır. PDSCH verici işlemleri şunlardır:

- Kod sözcük bitlerinin karıştırılması,
- Karıştırılmış bitlerin modülasyonu,
- Tek bir anten portunda, kaynak tablosunu oluşturan kaynak elemanlarına karmaşık değerli modülasyon sembollerinin haritalandırılması,
- İletim için OFDM sinyalinin üretilmesidir.

PDSCH işlemlerini tersine çeviren alıcı işlemi aşağıdakileri içerir:

- Kaynak tablosunu üreten OFDM sinyal alıcısı,

- CSR sinyali kullanıcı verilerinden ayırmak için kaynak elemanı haritalandırılmasının çözülmesi,
- Kanal tahmini,
- CSR sinyali ve yumuşak karar temelli frekans-alan denkleştirme,
- Demodülasyon,
- Karıştırılmış bitlerin çözülmesidir.

Bit düzeyi karıştırma

LTE aşağı hat işlemi sırasında, kanal kodlama işleminin çıktıları olarak üretilen kod sözcük bitleri, bit seviyesinde karıştırma dizisi ile karıştırılır. Karıştırmanın rasgele seçildiğinden ve farklı hücrelerden gelen yayınların, kod çözücünden önce ayrılmasını sağlamak amacıyla, yan yana hücrelerde, farklı karıştırma dizisi kullanılmaktadır. Yani veri bitleri, her biri benzersiz olan bir dizi ile karıştırılır. Bit seviyesinde şifreleme, tüm LTE aktarım kanalına ve aşağı hat kontrol kanallarına uygulanır.

Karıştırma işlemi sözde rasgele sıralama dizisi ve bit seviyesinde çarpma olarak iki şekilde yapılmaktadır. Sözde rasgele sıralama dizisi, uzunluğu 31'e ayarlanmış altın dizisi tarafından üretilir. Toplam 2^{31} sözde rasgele sıralama dizisi üretilir. Bu dizinin çıktısı şu şekildedir:

$$P_1(x) = x^{31} + x^3 + 1 \quad (2.2)$$

$$P_2(x) = x^{31} + x^3 + x^2 + x + 1 \quad (2.3)$$

Birinci rastgele dizinin başlama değeri uzunluğu 31 olan bir birim darbe fonksiyonu ile belirtilmiştir. İkinci rasgele dizinin başlama değeri, hücre kimliği, kod sözcüklerinin sayısı ve alt çerçeve dizini gibi parametrelere bağlıdır. Son işlem bit seviyesinde çarpma girdi bitleri ve altın sıra bitleri arasında dışlayan veya (XOR-Exclusive or) işlemidir. Karıştırıcının çıktısı, giriş kod sözcüğü ile aynı boyuttaki bir vektörden oluşmaktadır [36].

Şekil 2.7'de girilen q kod sözcüğündeki bit düzeyi karıştırması gösterilmiştir. M^{qbit} , kod sözcüğündeki bitlerin sayısıdır.

Girilen kod kelimesi:

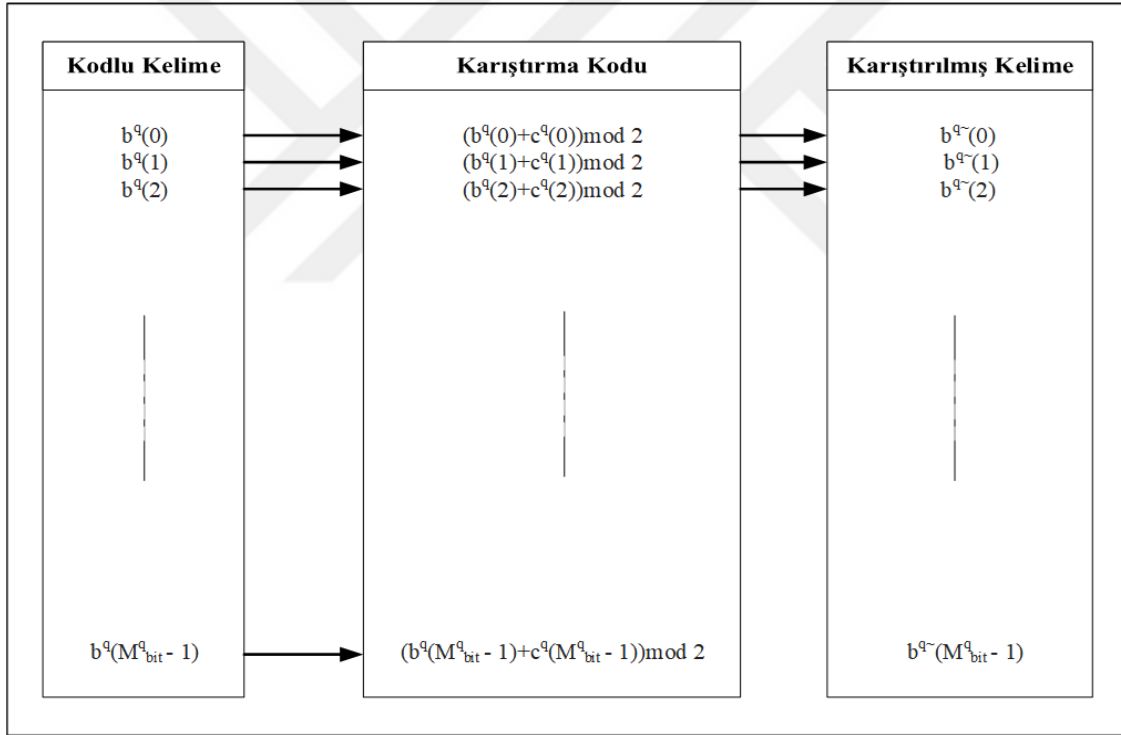
$$b^q(0), b^q(1), b^q(2) \dots b^q(M^{qbit} - 1)$$

Karıştırma kodu:

$$c^q(0), c^q(1), c^q(2) \dots c^q(M^{qbit} - 1)$$

Karıştırılmış sinyal:

$$b^{\tilde{q}}(0), b^{\tilde{q}}(1), b^{\tilde{q}}(2) \dots b^{\tilde{q}}(M^{qbit} - 1)$$

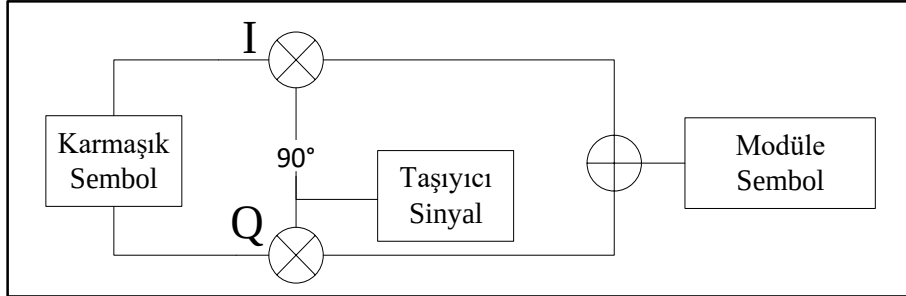


Şekil 2.7. Bit düzeyi karıştırma

Modülasyon

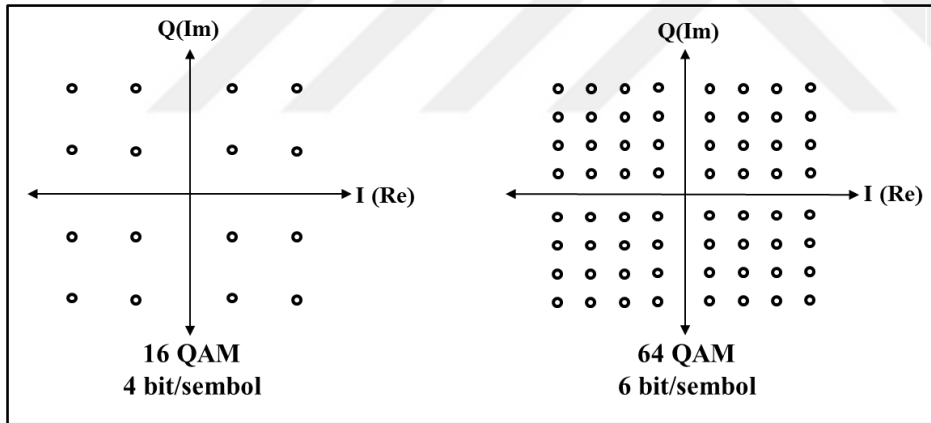
Modülasyon, karıştırılmış kelimedeki bitleri, karmaşık değerli sembollere dönüştürür. Bunun için sinyal, 90 derece kaydırılmış taşıyıcı sinyali ile çarpılarak gerçel ve sanal kısımlarına ayrılır. Daha sonra da karmaşık değerli modülasyon sembolünü oluşturmak üzere toplanır (Bkz. Şekil 2.8). Bu semboldeki bit sayısı kullanılan modülasyon tipine bağlı

olarak değişmektedir. Buna göre LTE-A standardında kullanılan QPSK modülasyon için 2 bit, 16 QAM için 4 bit ve 64 QAM için ise 6 bittir. Bu durum, kanal koşullarına bağlı olarak değişen iletişim kalitesi için esneklik sağlamaktadır.



Şekil 2.8. QAM modülasyonun blok gösterimi

16 QAM ve 64 QAM için yıldız kümesi diyagramı Şekil 2.9’da gösterilmiştir. 16 QAM modülasyonunun modülasyon haritası ise Çizelge 2.5.’te verilmiştir.



Şekil 2.9. 16 QAM ve 64 QAM modülasyon için yıldız kümesi diyagramı

Modülasyon sembolü = $I + jQ$ şeklinde ifade edilir. Buna göre modülasyon sinyali, faz içi (I) ve karesel (Q) bileşenlerin vektör toplamıyla gösterilebilir.

Çizelge 2.5. 16 QAM modülasyon haritası

$b_1b_2b_3b_4$	I	Q
0000	$1\sqrt{10}$	$1\sqrt{10}$
0001	$1\sqrt{10}$	$3\sqrt{10}$
0010	$3\sqrt{10}$	$1\sqrt{10}$

Çizelge 2.5. (devam) 16 QAM modülasyon haritası

0011	$3\sqrt{10}$	$3\sqrt{10}$
0100	$1\sqrt{10}$	$-1\sqrt{10}$
0101	$1\sqrt{10}$	$-3\sqrt{10}$
0110	$3\sqrt{10}$	$-1\sqrt{10}$
0111	$3\sqrt{10}$	$-3\sqrt{10}$
1000	$-1\sqrt{10}$	$1\sqrt{10}$
1001	$-1\sqrt{10}$	$3\sqrt{10}$
1010	$-3\sqrt{10}$	$1\sqrt{10}$
1011	$-3\sqrt{10}$	$3\sqrt{10}$
1100	$-1\sqrt{10}$	$-1\sqrt{10}$
1101	$-1\sqrt{10}$	$-3\sqrt{10}$
1110	$-3\sqrt{10}$	$-1\sqrt{10}$
1111	$-3\sqrt{10}$	$-3\sqrt{10}$

Katman haritalanması

İletilecek her kod kelimesi için karmaşık değerli modülasyon sembolleri, kullanılan verici antenlerinin sayısına bağlı olarak bir, iki veya dört katmana eşlenir. Çizelge 2.6 karmaşık değerli giriş sembolleri $d^q(0)$, $d^q(1)$, $d^q(2)$..., $d^q(M^{\text{qbit}} - 1)$, n katmana haritalandığında, uzaysal çoğullama için farklı iletim katmanlarına nasıl eşlendiğini göstermektedir. $M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}}$ Katman başına düşen modülasyon sembollerinin sayısını göstermektedir [35].

Çizelge 2.6. Mekansal çoğullama için kodlu kelimenin katman haritası

Anten Katman Sayısı/ Anten Port Sayısı	Kodlu Kelime Sayısı	Kodlu Kelimenin Katmana Haritalanması $i = 0, 1, \dots (M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}} - 1)$
1	1	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(i)$ $M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}} = M_{\text{sempol}}^{(0)}$
2	2	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(i)$ $x^{(1)}(i) = d^{(1)}(i)$ $M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}} = M_{\text{sempol}}^{(0)} = M_{\text{sempol}}^{(1)}$

Çizelge 2.6. (devam) Mekansal çoğullama için kodlu kelimenin katman haritası

2	1	$x^{(0)}(i)=d^{(0)}(2i)$ $x^{(1)}(i)=d^{(1)}(2i+1)$ $M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}} = M_{\text{sembol}/2}^{(0)}$
3	2	$x^{(0)}(i)=d^{(0)}(i)$ $x^{(1)}(i)=d^{(1)}(2i)$ $x^{(2)}(i)=d^{(1)}(2i+1)$ $M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}} = M_{\text{sembol}}^{(0)} = M_{\text{sembol}/2}^{(1)}$
4	2	$x^{(0)}(i)=d^{(0)}(2i)$ $x^{(1)}(i)=d^{(0)}(2i+1)$ $x^{(2)}(i)=d^{(1)}(2i)$ $x^{(3)}(i)=d^{(1)}(2i+1)$ $M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}} = M_{\text{sembol}/2}^{(0)} = M_{\text{sembol}/2}^{(1)}$

Çizelge 2.6'ya göre; 1 katman ve 1 kod sözcüğü için (tek anten portu ve tek veri akışı) tek bir katman kullanılır. Kod sözcük 0'daki ($M_{\text{sembol}}^{(0)}$) sembollerin sayısı, katmanın alabileceği sembollerin sayısına ($M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}}$) eşittir.

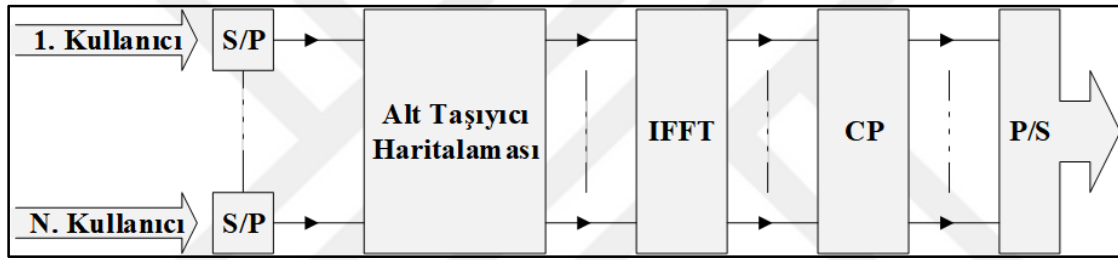
2 katmanlı ve 2 kodlu kelimede (iki anten portu ve ikili veri akışı) bir veri akışı bir anten portuna, diğer veri akışı diğer anten portuna eşlenir. Kod sözcük 0'daki ($M_{\text{sembol}}^{(0)}$) veya 1'deki ($M_{\text{sembol}}^{(1)}$) sembollerin sayısı, her katmanın alabileceği sembol sayısına ($M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}}$) eşittir.

2 katmanlı ve 1 kodlu kelime için (iki anten portu ve tek veri akışı) bir veri akışı iki katman üzerinde dağıtılır. Kod sözcük 0'daki ($M_{\text{sembol}}^{(0)}$) sembollerin sayısı, katmanın alabileceği sembol sayısının iki katıdır ($M_{\text{Sembol}}^{\text{Katman}}$).

Dikgen frekans bölmeli çoğullama

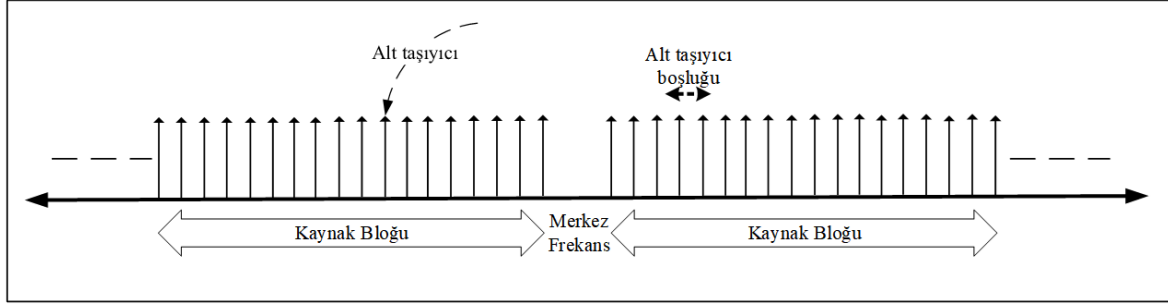
Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama (OFDM-Orthogonal Frequency Division Multiplexing), LTE aşağı bağlantı için seçilen modülasyon şemasıdır. Verileri ve kontrol bilgilerini taşımak için çok sayıda birbirine yakın aralıklı alt taşıyıcı kullanan dijital bir

iletim şeklidir. Her bir alt taşıyıcı, Karesel Genlik Modülasyonu (QAM-Quadrature amplitude modulation) gibi geleneksel bir modülasyon formatıyla düşük bir sembol hızında modüle edilir. Birçok düşük oranlı alt taşıyıcının kombinasyonu, aynı bant genişliğini kullanan geleneksel tek taşıyıcı modülasyon şemalarına benzer genel veri hızlarını sağlar. LTE, aşağı bağlantı için OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) adı verilen bir çeşit OFDM kullanmaktadır. OFDMA’da frekans kaynağı paralel frekans alt taşıyıcılara bölünmüştür. Her alt taşıyıcı bir modülasyon sembolü taşıyabilir. Farklı alt taşıyıcılar, veri aktarımının temel birimi olarak işlev gören bir alt kanal oluşturmak üzere gruplandırılır. LTE’de temel iletim şeması olarak OFDMA’nın seçilmesinin ana nedenleri: yüksek spektral verimlilik, uygulama kolaylığı ve frekans seçimli zamanlama, MIMO iletim gibi gelişmiş özellikleri desteklemesidir [38].



Şekil 2.10. OFDMA akışının blok diyagramda gösterimi

Şekil 2.10’da bir OFDM sembolü için OFDMA sinyal üretimini gösteren temel bir blok diyagram gösterilmektedir. Farklı kullanıcılardan gelen veri simgeleri, bu kullanıcılara verilen frekans bantlarına bağlı olarak farklı alt taşıyıcılara eşlenir. Bu, frekans bölgesinde yapılır. Daha sonra, frekans bölgesi alt taşıyıcılarını zaman bölgesi sinyallerine dönüştürmek için Ters Hızlı Fourier Dönüşüm (IFFT-Inverse Fast Fourier Transform) uygulanır. Daha sonra döngüsel önek eklenerek sinyal iletim için son halini alır. Veri iletimi, birden fazla OFDM sembolünü kapsayan bir alt çerçevedir. Alıcıda ters işlem gerçekleştirilir. Çevrimsel önek kaldırılır. Her bir alt taşıyıcı üzerindeki modülasyon sembollerinin çıkartılabilmesi için zaman alan sinyale Hızlı Fourier Dönüşüm (FFT-Fast Fourier Transform) uygulanır. Daha sonra her kullanıcı atanmış alt taşıyıcılarına karşılık gelen frekans kaynak birimlerini çıkarır. Verilere denkleştirme yapılır ve şifre çözme işlemi için iletilirler.



Şekil 2.11. OFDM'nin frekans bölgesi gösterimi

OFDM iletiminin frekans bölgesi çizimi Şekil 2.11 'de gösterilmektedir. Bu gösterimde her veri sembolü alt taşıyıcılardan birine modüle edilmiştir. LTE sistem gereksinimlerini karşılamak için kullanılan alt taşıyıcı aralığı, kaynak bloğu boyutu ve döngüsel ön ek uzunluğu oldukça önemlidir. LTE’de merkez frekanstaki alt taşıyıcının performansı bazı verici ve alıcı tasarımları için çok düşük olabileceğinden, bu doğru akım (DC) alt taşıyıcıda kullanılmaz. Kullanılan alt taşıyıcılar Şekil 2.11’de gösterildiği gibi bu merkez frekansın etrafında bulunurlar.

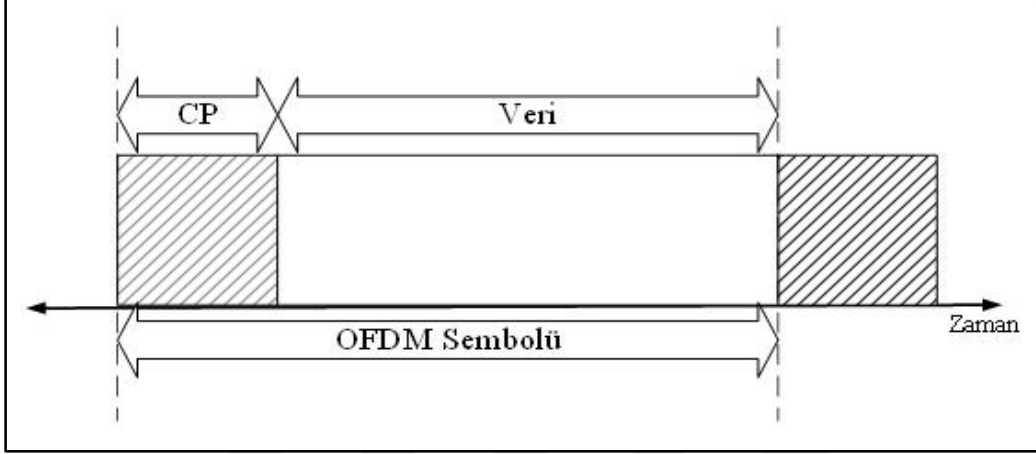
Alt taşıyıcı aralığı

Alt taşıyıcı aralığı, iki bitişik alt taşıyıcı arasındaki frekans aralığıdır. Bu aralığın az olması belirli bir bant genişliği miktarı için daha fazla alt taşıyıcı bulunduğunu ve belirli bir bant genişliği miktarı için daha fazla veri simgesi bulunduğundan, spektral verimliliğin arttığı anlamına gelmektedir. Ayrıca küçük alt taşıyıcı aralığı her bir alt taşıyıcıdaki sönmülenmenin frekans seçici olmamasını sağlamaktadır. Ancak, alt taşıyıcı aralığı azaldığında ise Doppler kayması ve faz gürültüsü nedeniyle performans düşmektedir.

Kaynak bloğu

LTE’de, frekans kaynağı kaynak blok üniteleri şeklinde düzenlenmiştir. Frekanstaki kaynak bloğu büyüklüğü seçiminde birçok faktör göz önünde bulundurulur. Öncelikle, frekans-seçici zamanlama kazancının büyük olması için kaynak bloğu yeterince küçük olmalıdır. Kaynak bloğunun küçüklüğü, her bir kaynak bloğundaki frekans cevabının benzer olmasını ve böylece zamanlayıcının sadece iyi kaynak bloklarını düzenlemesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, baz istasyonu hangi kaynak bloklarının iyi kanal koşullarını gördüğünü

bilmediği için, kullanıcı ekipmanı bu bilgiyi baz istasyonuna aktarmaktadır. Böylece, geribildirim yükünün çok yüksek olmaması ve de kullanıcı ekipmanına kaynak tahsisi için bilgilendirmek üzere kullanılması gereken aşağı hat kontrol sinyallerini en aza indirmek için kaynak blok boyutunun yeterince geniş olması gerekir.



Şekil 2.12. Zaman bölgesinde OFDM sembolünün gösterimi

Döngüsel önek

Döngüsel önek (CP-Cycle Prefix), OFDMA iletiminde ardı ardına gönderilen OFDM sembolleri arasındaki paraziti önlemek için kullanılır. CP ve veriyi içeren, zaman bölgesindeki OFDM sembolü Şekil 2.12.'de gösterilmiştir. Döngüsel ön ekin uzunluğu, çok taşıyıcılı bir iletim sistemi için önemli bir tasarım parametresidir. CP'nin uzunluğu, hücresel bir ortamdaki tipik gecikme yayılımlarını karşılamak için yeterli olmalıdır. "Önek" isminin de işaret ettiği gibi, alınan OFDM sinyalinin ilk kısmı alıcıda atılır. Bu nedenle, LTE, yükü en aza indirmek ve spektral etkinliği en üst düzeye çıkarmak için mümkün olduğunca küçük bir döngüsel önek belirtmelidir. Çizelge 2.4'de LTE standardında belirtilen üç farklı CP değeri için alt taşıyıcı boşluğu, kaynak bloğundaki alt taşıyıcı sayısı ve OFDM sembollerinin sayısı belirtilmiştir. 7.5 kHz alt taşıyıcı aralığının yalnızca yayın için kullanılmaktadır.

Çizelge 2.7. Normal ve genişletilmiş önek özellikleri

	Alt Taşıyıcı Boşluğu (Δf) (kHz)	Kaynak Bloğundaki Alt Taşıyıcıların Sayısı	Kaynak Bloğundaki OFDM Sembollerinin Sayısı
Normal Döngüsel Önek	15	12	7
Genişletilmiş Döngüsel Önek	15	12	6
	7,5	24	3

LTE, farklı bant genişliklerini destekleyebilmek için, OFDM sembol süresini sabit tutan farklı FFT boyutları kullanır. Yani, bant genişliğine bakılmaksızın, her OFDM sembolü 66,7 μs 'dir. Bu sayede aynı frekans bölgesi tekniğinin birden çok bant genişliği arasında, 15 kHz'lik aynı alt taşıyıcı ayırımının uygulanmasını sağlar. Ayrıca bant genişlikleri için aynı alt çerçeve uzunluğu olmasını sağlar. Bu da yayın modelinin zaman çerçevelemesini büyük ölçüde kolaylaştıran bir özelliktir. Her bir bant genişliğinde kullanılan gerçek FFT boyutu standart tarafından belirtilmemekle birlikte, 2048'lik FFT boyutu genellikle 20 MHz ile ilişkilendirilir. Çizelge 2.8'de gösterildiği gibi, diğer bant genişlikleri için FFT boyutları genellikle bu değerin küçültülmüş halidir.

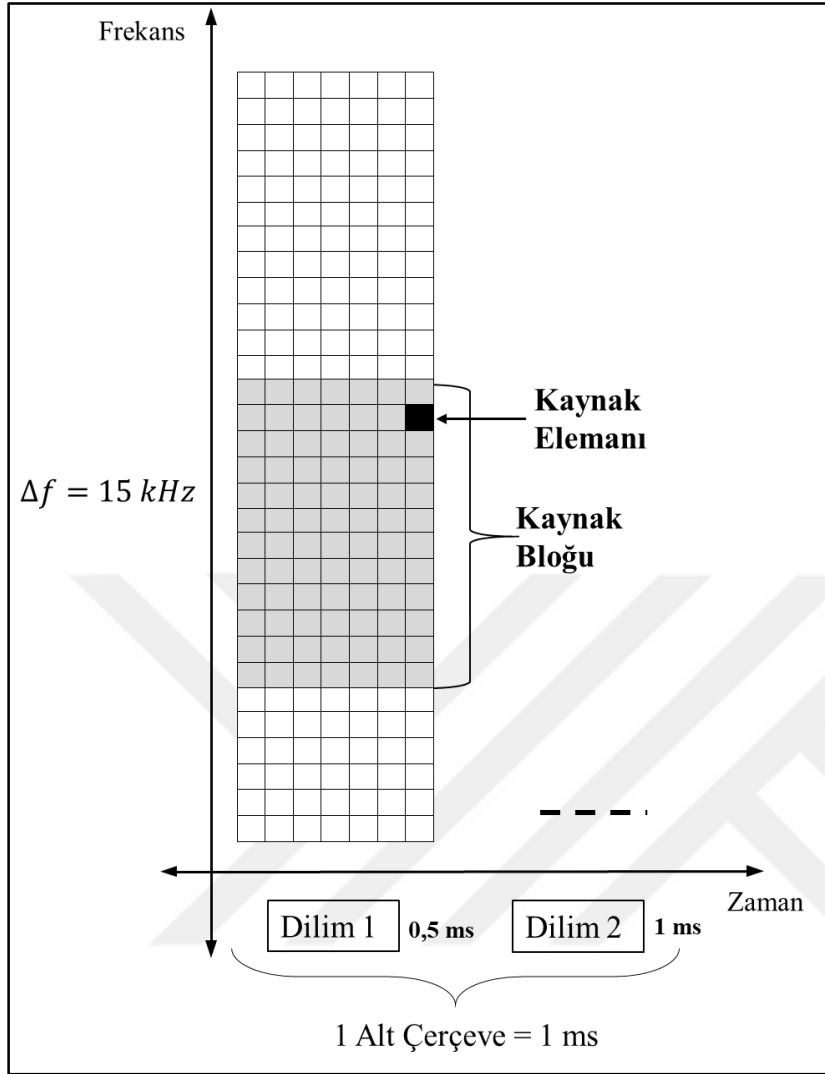
Çizelge 2.8. 1 ms alt çerçeve genişliği ve 15 kHz alt taşıyıcı aralığında aşağı hat OFDM parametreleri

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 Bloğu Sayısı	6	15	25	50	75	100
Dilimdeki OFDM Sembol Sayısı	14 (Normal) / 12 (Genişletilmiş)					
CP Uzunluğu	4,7 (Normal) / 5,6 (Genişletilmiş)					

Kaynak ögesi haritalanması

OFDM'nin en cazip özelliklerinden biri iletilen modüle edilmiş sinyalin zaman frekans gösterimi ile haritalandırılmasıdır. Kodlama ve modülasyondan sonra, fiziksel kaynak ögesi olan karmaşık değerli modüle edilmiş sinyalin dönüştürülmüş bir versiyonu, bir zaman frekans koordinat sistemine, kaynak şebekesine eşlenir. Kaynak şebekesinin x ekseninde zaman ve y ekseninde frekansı vardır. Bir kaynak ögesinin x ekseninde zamana ait olduğu OFDM sembolünü, y ekseninde ise ait olduğu frekanstaki OFDM alt taşıyıcısını belirtir [35]. Bu yapı üç parametreye bağlıdır; alt taşıyıcı (y ekseninde) indeksi, OFDM (x ekseninde) indeksi ve 10 ms'lik bir çerçeve içindeki 1 ms'lik alt çerçevenin indeksidir. Bir çerçeve içerisindeki tüm alt çerçeveler üç tür veri içermektedir. Bu veriler; kullanıcı verileri (PDSCH), pilot sinyaller (CSR-Cell Specific Reference Symbol) ve aşağı bağlantı kontrol verileridir (PDCCH). Şekil 2.13, normal bir çevrimsel örnek kullanıldığında LTE aşağı hat kaynak tablosunu göstermektedir.

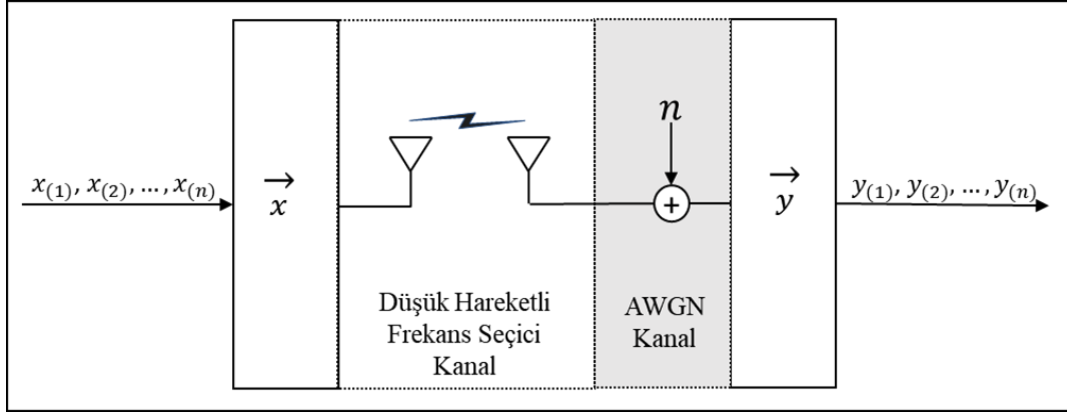
Kaynak tablosunda veri yerleştirilmesi oldukça önemlidir. Bunun için LTE standardında bazı tasarım parametreleri belirtilmiştir. Örneğin, iki eksen boyunca pilot sinyallerinin yerleştirilmesi ve çözülmesi hem zaman hem de frekansta kanal tepki tahmininin doğruluğunun belirlenmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.13. Kaynak elemanları, blokları ve kaynak şebekesi

LTE kanal yapısı

Kanal yapısı, kanal performansını etkileyen önemli bir parametredir. Bu çalışmada sinyal karıştırıcıların etkisi düşük hareket kabiliyetine sahip olan frekans seçici kanal yapısı kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra da oluşturulan bu kanalla AWGN gürültü kanalı eklenmiştir (Bkz. Şekil 2.14). Son olarak da tasarlanan sinyal karıştırıcılarda bu kanala eklenerek performans analizleri yapılmıştır.

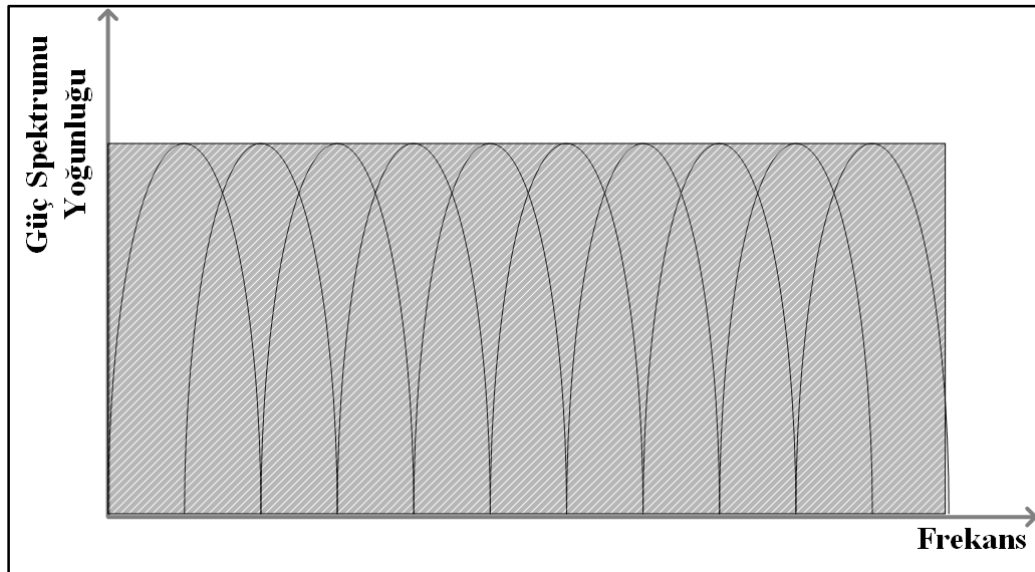


Şekil 2.14. LTE kanal modelinin blok gösterimi

2.3. Sinyal Karıştırıcılar

Kablosuz ağlarda sinyal karıştırma, alıcı taraflarındaki sinyal gürültü oranını, sinyal karıştırıcı sinyallerinin iletimi yoluyla azaltarak, mevcut kablosuz iletişimin bozulması olarak tanımlanmaktadır. Bu bölümde LTE/LTE-A aşağı hat fiziksel kanalına etkisi incelenen baraj sinyal karıştırıcı, kısmi bant sinyal karıştırıcı, tek tonlu sinyal karıştırıcı ve çok tonlu sinyal karıştırıcı açıklanacaktır.

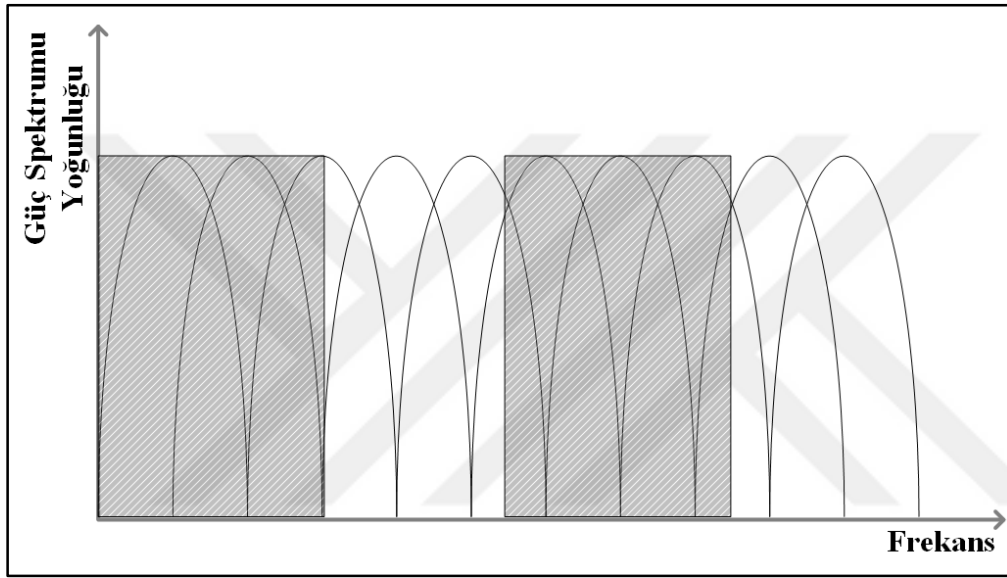
2.3.1. Baraj sinyal karıştırıcı



Şekil 2.15. Baraj sinyal karıştırıcı gösterimi

Baraj sinyal karıştırıcı (BSK) hedef sinyal hakkında ek bilgi gerektirmediği için en basit saldırı yöntemi olarak kabul edilmektedir. Bu metotta tüm banda Toplanır Beyaz Gauss Gürültü (AWGN) bindirilerek gürültü seviyesi artırılır. Böylece hedefin aldığı Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) düşer. Baraj sinyal karıştırıcı çok etkili bir yöntem olmasına karşın çok fazla güç gerektirmektedir [16].

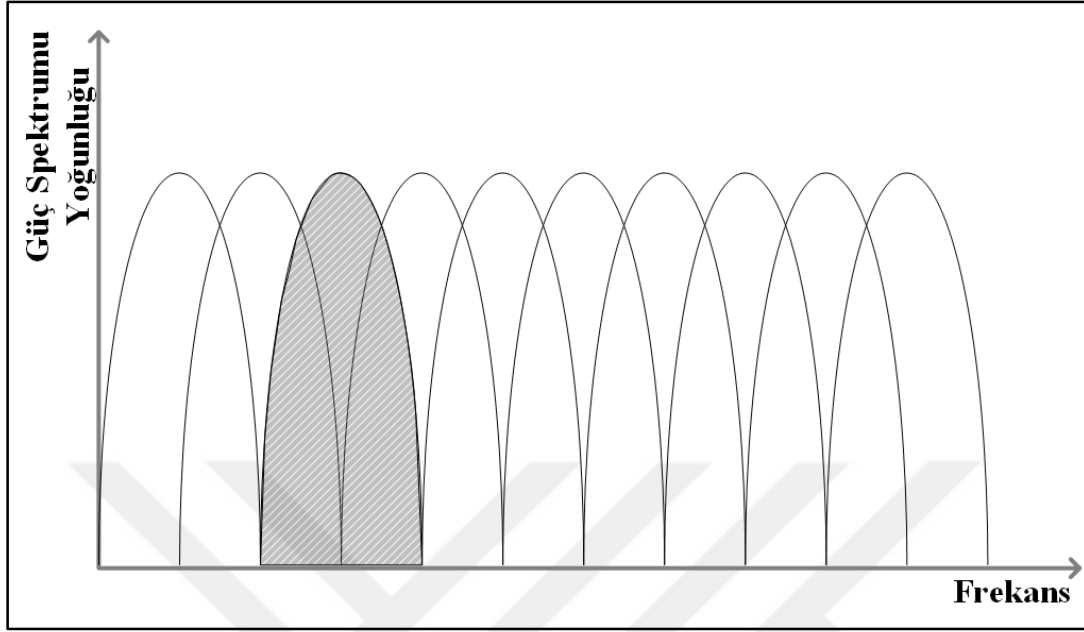
2.3.2. Kısmi bant sinyal karıştırıcı



Şekil 2.16. Kısmi bant sinyal karıştırıcı gösterimi

Kısmi bant sinyal karıştırıcı (KBSK), baraj sinyal karıştırıcıdan farklı olarak LTE sisteminin bant genişliğinin sadece belirli bir bölümü hedeflenir. Hedeflenen bant genişliğine yine sabit bir AWGN bindirilerek gürültü seviyesi artırılır. Özellikle LTE’de senkronizasyon sinyallerini karıştırmak için kısmi bant sinyal karıştırıcı kullanılabilir [20].

2.3.3. Tek tonlu sinyal karıştırıcı



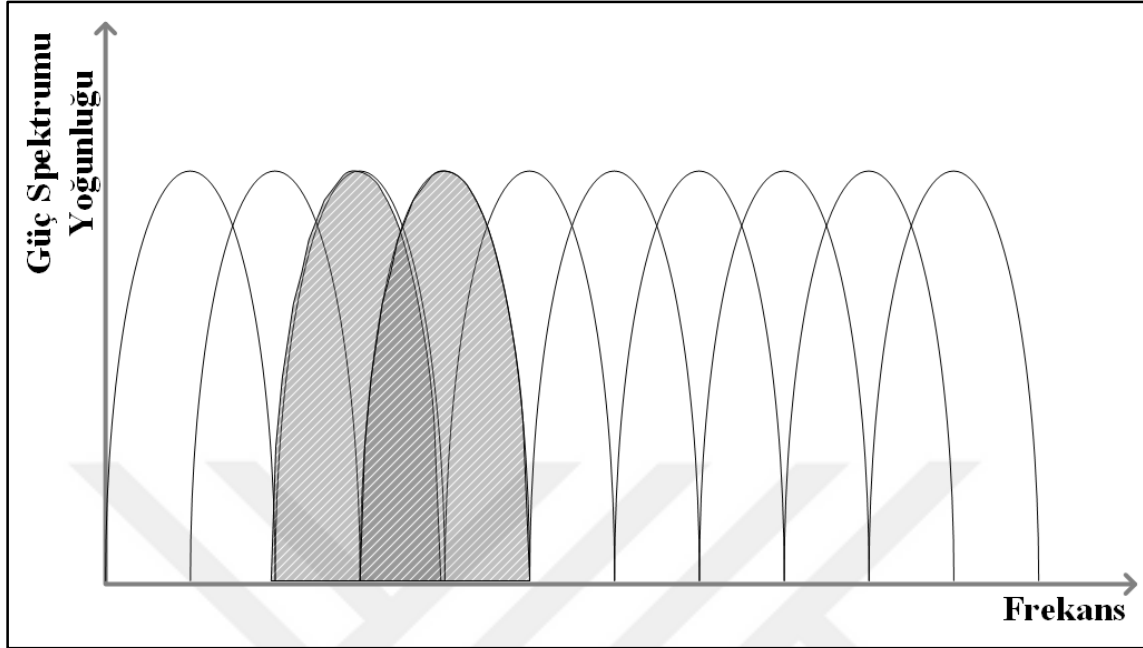
Şekil 2.17. Tek tonlu sinyal karıştırıcı gösterimi

Tek tonlu sinyal karıştırıcı (TTSK), kısmi bant karıştırıcısının bir çeşidi olarak sınıflandırılabilir. Her tek ton, LTE standardındaki tek bir alt taşıyıcıyı karıştırmak için kullanılır. Bu ton genellikle darbe, dikdörtgen ve AWGN şeklinde olabilmektedir. Tek tonlu sinyal karıştırıcı alt taşıyıcıyı karıştırabilmek için tek bir tonu yüksek güçte iletir. Tek tonlu sinyal karıştırıcı 2.4’te gösterilmektedir.

$$J(t) = A_j \cos(2\pi f_j t) = \sqrt{2J} \cos(2\pi f_j t) \quad (2.4)$$

A_j sinyal karıştırıcısının genliği, J gücü ve f_j tonun merkez frekansıdır. Tek tonlu sinyal karıştırıcı için hedef sistemin taşıyıcı frekans bilgisi gerekmektedir. Genellikle hedefin Otomatik Kazanç Kontrol mekanizmasını bozmak için kullanılır ve bu sayede dolaylı olarak alt taşıyıcıları karıştırmaktadır [17].

2.3.4. Çok tonlu sinyal karıştırıcı



Şekil 2.18. Çok tonlu sinyal karıştırıcı gösterimi

Çok tonlu sinyal karıştırıcı (ÇTSK), tek tonlu sinyal karıştırıcıdan farklı olarak birden çok alt-taşıyıcıyı karıştırmak için eşit güçte ve çok sayıda ton üretir. Özellikle iletilen sinyal karıştırıcının gücü sınırlı olduğunda, iletilen tonların sayısı artırılarak sinyal karıştırıcının gücü düşürülür. Her bir ton, Denklem 2'.5'te ifade edilmiştir.

$$J(t) = A_j \sum_{k=1}^{N_T} \cos(2\pi f_k J_T) = \sqrt{\frac{2J_t}{N_T}} \sum_{k=1}^{N_T} \cos(2\pi f_k J_T) \quad (2.5)$$

Burada A_j sinyal karıştırıcının genliğini, J_T gücü ve f_k ise k 'nci alt tonun merkez frekansını ifade etmektedir [19].



3. LTE FİZİKSEL KATMANIN MODELİNİN PERFORMANS ANALİZLERİ

Bu kısımda, oluşturulan LTE-A aşağı hat fiziksel katmana Baraj Sinyal Karıştırıcı, Kısmi Bant Sinyal Karıştırıcı, Tek Tonlu Sinyal Karıştırıcı ve Çok Tonlu Sinyal Karıştırıcılar ayrı ayrı eklenerek, sinyal bozucu etkileri karşısında, bant genişliği ve modülasyon seviyelerine göre BER (Bit Hata oranı)- SJNR (İletişim sinyalinin hattaki gürültü artı karıştırıcı oranı) performansı gösterilecektir.

3.1. Simülasyon Parametreleri

Kanal yapısı olarak düşük hareketli frekans seçici kanal tercih edilmiştir. Simülasyon parametreleri sırasıyla: Alıcı anten sayısı 1, verici anten sayısı 1, kanal bant genişliği 1,4 MHz ve 20 MHz, modülasyon tipi 16 QAM ve 64 QAM, OFDM için 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişliği sırasında FFT genişliği 128 ve 2048, kodlama oranı 1/3, Turbo şifre çözme döngü sayısı 6, taşıyıcı frekans $2,5 \times 10^9$ olarak seçilmiştir. Tüm simülasyonlarda Monte Carlo simülasyon metodu kullanılmıştır. Monte Carlo simülasyonu maksimum hata sayısı ve maksimum bit sayısı değerlerine göre gerçekleştirilmiştir. BER analizleri bu iki kritik değere ulaştığında sonuçlanmakta ve bir sonraki iterasyona geçilmektedir. BER performansları çıkartılırken maksimum hata sayısı ve maksimum bit sayısı bir milyondur.

Çizelge 3.1. Aşağı-hat fiziksel katman simülasyon parametreleri

	1. Simülasyon Bant Genişliğinin Performansa Etkisi	2. Simülasyon Modülasyonun Tipinin Performansa Etkisi
Kanal Tipi	Düşük Hareketli Frekans Seçici Kanal	Düşük Hareketli Frekans Seçici Kanal
AWGN Kanal	10 dB	10 dB
Kullanılan Bant Genişlikleri	1,4 MHz, 20 MHz	1,4 MHz

Çizelge 3.1. (devam) Aşağı-hat fiziksel katman simülasyon parametreleri

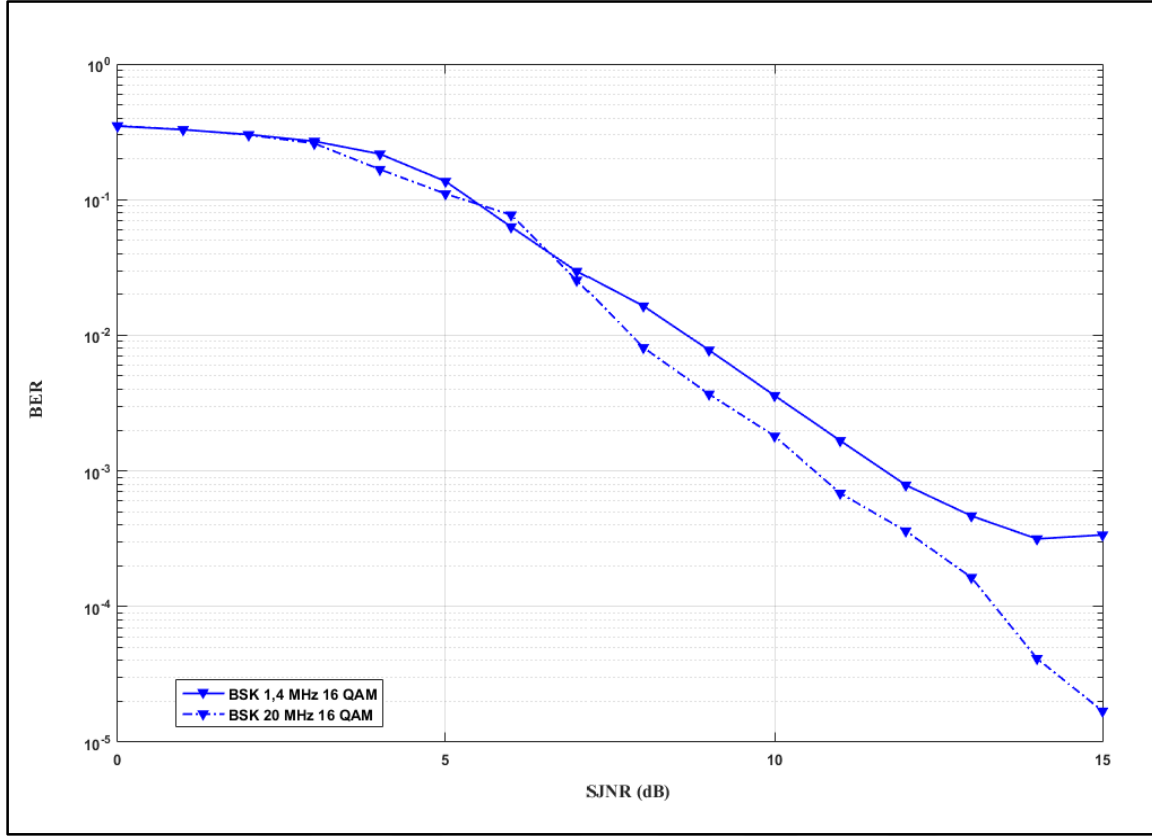
Kullanılan Modülasyon Çeşidi	16 QAM	16 QAM, 64 QAM
Alıcı Anten Sayısı	1	1
Verici Anten Sayısı	1	1
Kodlama Oranı	1/3	1/3
Maksimum turbo şifre çözme sayısı	6	6
Taşıyıcı Frekans (Hz)	$2,5 \times 10^9$	$2,5 \times 10^9$

3.2. Bant Genişliği Karşılaştırması

Bu bölüm de 3GPP standardında belirtilen, LTE-A'nın en küçük bant genişliği olan 1,4 MHz ve en büyük bant genişliği olan 20 MHz için sinyal karıştırıcıların performansı incelenmiştir. Modülasyon türü sabit tutularak bütün sinyal karıştırıcılarda 16 QAM kullanılmıştır.

3.2.1. Baraj sinyal karıştırıcı altında bant genişliğinin performans analizi

LTE-A aşağı hat kanalına baraj sinyal karıştırıcı eklenerek 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişliklileri için BER- SJNR performansı Şekil 3.1'te gösterilmiştir. 10 dB SJNR değerine bakıldığında 20 MHz bant genişliği için 0,001806, 1,4 MHz bant genişliği için ise 0,0359 bit hata oranı sahip olduğu görülmüştür.

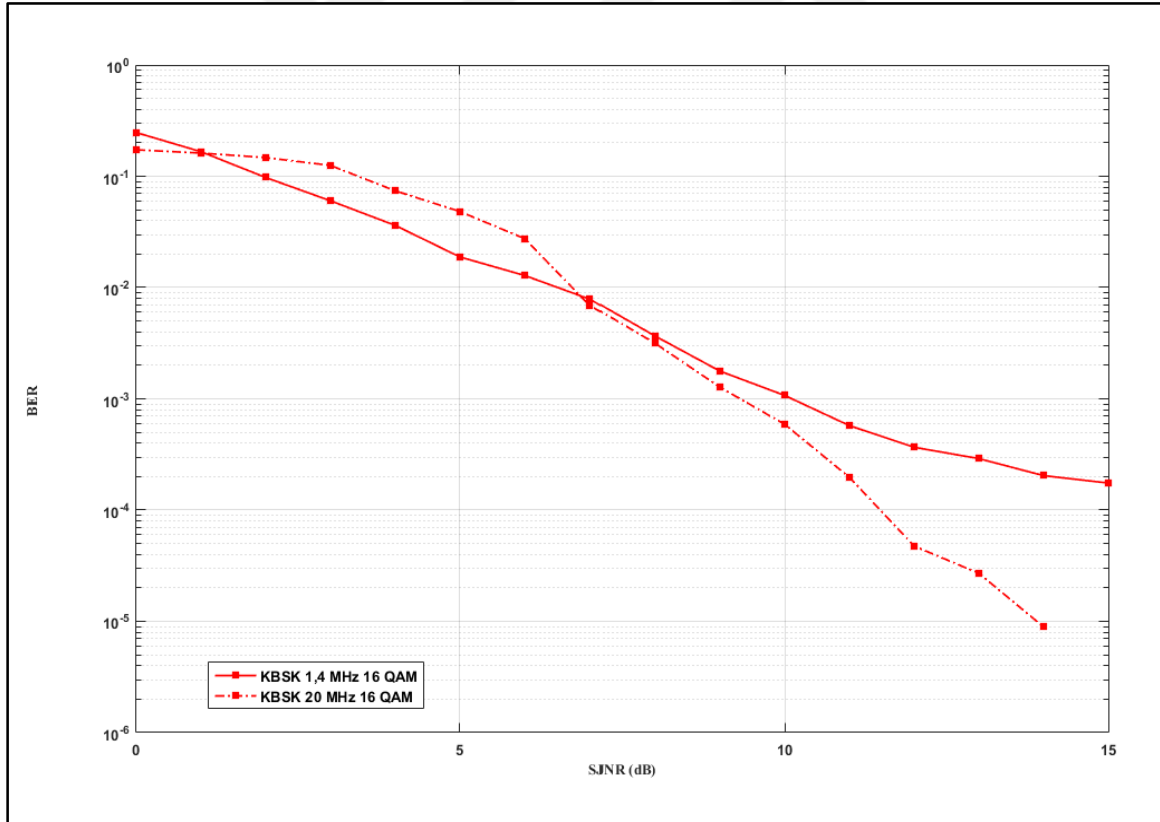


Şekil 3.1. Baraj sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı

20 MHz ile 1,4 MHz bant genişliklerinin BER değerlerini oranladığımızda 20 MHz'lik bant genişliğinde 20 kat verim artışı görülmektedir. Bu verim artışı ile sistemin hatalı veri gönderme olasılığı düşmekte, böylelikle de OSI'nin (Open Systems Interconnection) üst katmanlarında hatalı verilerin tekrar gönderilmesi için işlem gereksinimi oluşmamaktadır. Benzer şekilde yaklaşık 10^{-2} bit hata oranında ise 1,4 MHz ve 20 MHz sırasıyla 9 dB ve 8 dB SJNR değerine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuç ile 20 MHz'lik iletişim hattında 1 dB daha az enerji gereksinime sahip olduğu söylenebilmektedir. Bu oranın yüksek SJNR değerlerinde daha fazla olduğu gözlenmiştir. 1,4 MHz bant genişliği sonucuna baktığımızda ise yaklaşık 15 dB değerlerinde doyum noktasına ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden 15 dB değerinde bit hata oranı 10^{-3} değerinde kalmaktadır. Bu değerden sonra 1,4 MHz bant genişliğine sahip iletişimde bit hata oranında bir performans artışı söz konusu olmadığı görülmektedir.

3.2.2. Kısmi bant sinyal karıştırıcı altında bant genişliğinin performans analizi

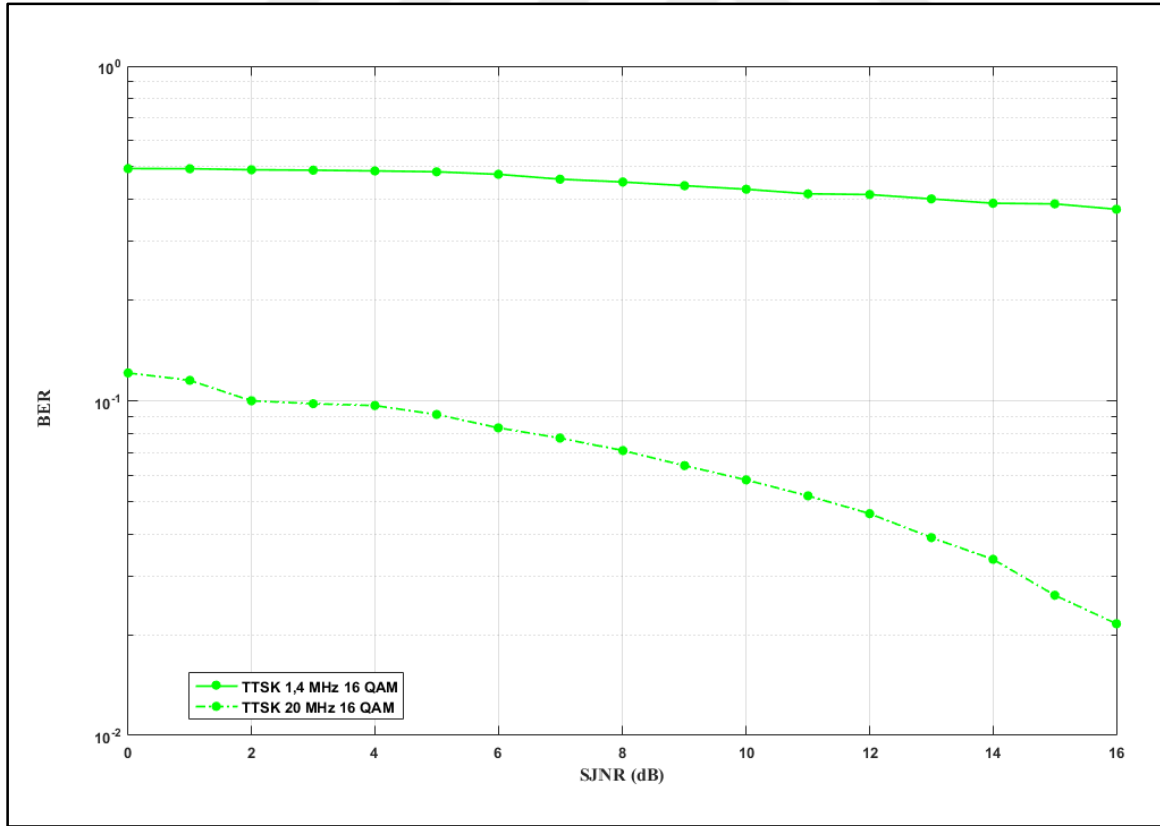
LTE-A aşağı hat kanalına kısmi bant sinyal karıştırıcı eklenerek 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişliklileri için BER- SJNR performansı Şekil 3.2’de gösterilmiştir. 10 dB SJNR değerine bakıldığında 20 MHz bant genişliği için 0,0005889, 1,4 MHz bant genişliği için ise 0,001072 bit hata oranı sahip olduğu ve benzer şekilde yaklaşık 10^{-4} bit hata oranında ise 1,4 MHz ve 20 MHz sırasıyla 10 dB ve 9,5 dB SJNR değerine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Performans oranlarına baktığımızda aralarında 7 kat hata oranı görülmektedir. KBSK karıştırıcının etkisi altında 20 MHz bant genişliğine sahip sistemin düşük SJNR değerlerinde 1,4 MHz’lik sisteme göre daha az spektral verimliliğe sahip olmasına karşın, yaklaşık 7 dB değerinden sonra daha belirgin bir spektral verimliliğe sahip olduğu görülmektedir. 1,4 MHz bant genişliğine sahip sistemde yine 15 dB değerinde doyumluluğa ulaştığı ve bit hata oranında düşüşün durduğu görülebilmektedir.



Şekil 3.2. Kısmi bant sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı

3.2.3. Tek tonlu sinyal karıştırıcı altında bant genişliğinin performans analizi

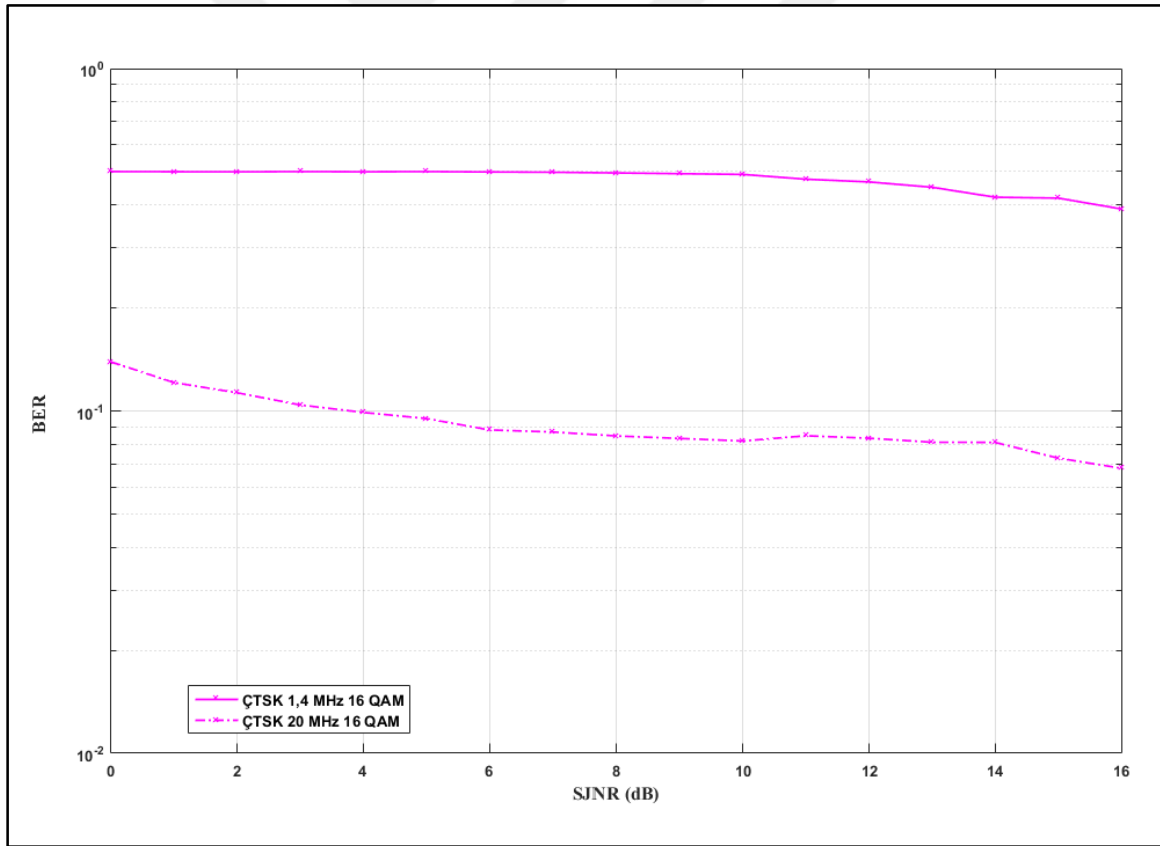
LTE-A aşağı hat kanalına tek tonlu sinyal karıştırıcı eklenerek 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişliklileri için BER- SJNR performansı Şekil 3.3'te gösterilmiştir. 10 dB SJNR değerine bakıldığında 20 MHz bant genişliği için 0,058, 1,4 MHz bant genişliği için ise 0,4287 bit hata oranına sahip olduğu gözlemlenmektedir. BER değerlerinin oranına baktığımızda yaklaşık 6 katlık bir performans farkı görülmektedir. TTSK karıştırıcının varlığında her iki bant genişliğinin tüm SJNR değerlerinde 20 MHz'lik sistemin her zaman daha iyi performans gösterdiği görülebilmektedir. 1,4 MHz'lik sistemin herhangi bir SJNR değerinde bile 0,5 BER değerinde olduğu sinyalin gücünün 15 dB değerine kadar artırılrsa bile belirgin bir değişikliğin olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durumda tek tonlu karıştırıcının varlığında 1,4 MHz'lik sistemin iletişimi her zaman aynı olasılıkla gerçekleşeceği söylenebilir. Bunun yanında 20 MHz'lik bant genişliğine sahip olan sistemde ise SJNR artışında performans ve hatalı bit iletiminde düşüş gözlemlenmektedir.



Şekil 3.3. Tek tonlu sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı

3.2.4. Çok tonlu sinyal karıştırıcı altında bant genişliğinin performans analizi

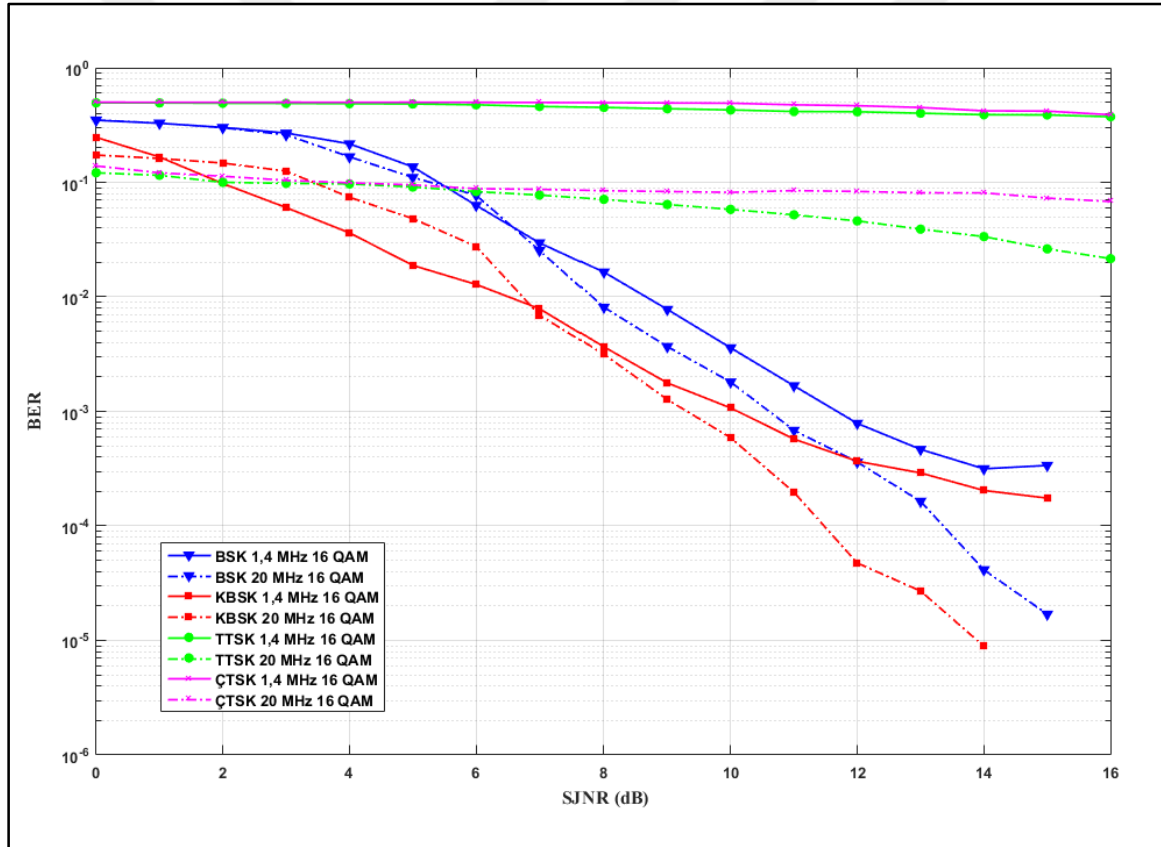
LTE-A aşağı hat kanalına çok tonlu sinyal karıştırıcı eklenerek 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişliklileri için BER- SJNR performansı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. 10 dB SJNR değerine bakıldığında 20 MHz bant genişliği için 0,0817, 1,4 MHz bant genişliği için ise 0,4907 bit hata oranı sahip olduğu gözlemlenmektedir. ÇTSK karıştırıcının varlığında 20 MHz'lik sistem 1,4 MHz bant genişliğine sahip sisteme göre 6 kat daha spektral verimliliğe sahiptir. TTSK karıştırıcının varlığında elde edilen performansa benzer bir şekilde bu sefer her iki bant genişliğinin kullanıldığı iletişim kanalına BER değerlerinde SJNR değeri artırılrsa bile kayda değer bir verimlilik gözlemlenmemiştir. 1,4 MHz bant genişliğinde 0 ile 16 dB arasında yaklaşık 0,5 BER değerinde olur iken 20 MHz'lik bant genişliğine sahip sistemde 0 ile 16 dB değerleri 0,13 ile 0,07 değerlerinde olmaktadır.



Şekil 3.4. Çok tonlu sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı

3.2.5. Sinyal karıştırıcıların bant genişliği performanslarının karşılaştırması

Şekil 3.5 de bu çalışmada incelenen BSK, KBSK, TTSK ve ÇTSK'nin LTE-A 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişliklerinde ve 16 QAM modülasyon tekniği altında bozucu etkileri bir arada gösterilmiştir. Şekle göre, her iki bant genişliğinde de ÇTSK'nin bozucu etkisinin en fazla olduğu sırasıyla TTSK, BSK ve KBSK'nin geldiği gözlemlenmektedir. Aynı zamanda 10^{-3} bit hata oranında 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri arasında BSK'nin 1,1 dB, KBSK'nin ise 0,8 dB'lik bir enerji farkının olduğu gözlemlenmiştir. Bu verilerden yola çıkarak 20 MHz'lik bant genişliğinde daha az enerjiyle 1,4 MHz'lik bir sistemdeki bit hata oranına sahip olunabildiği görülmektedir.



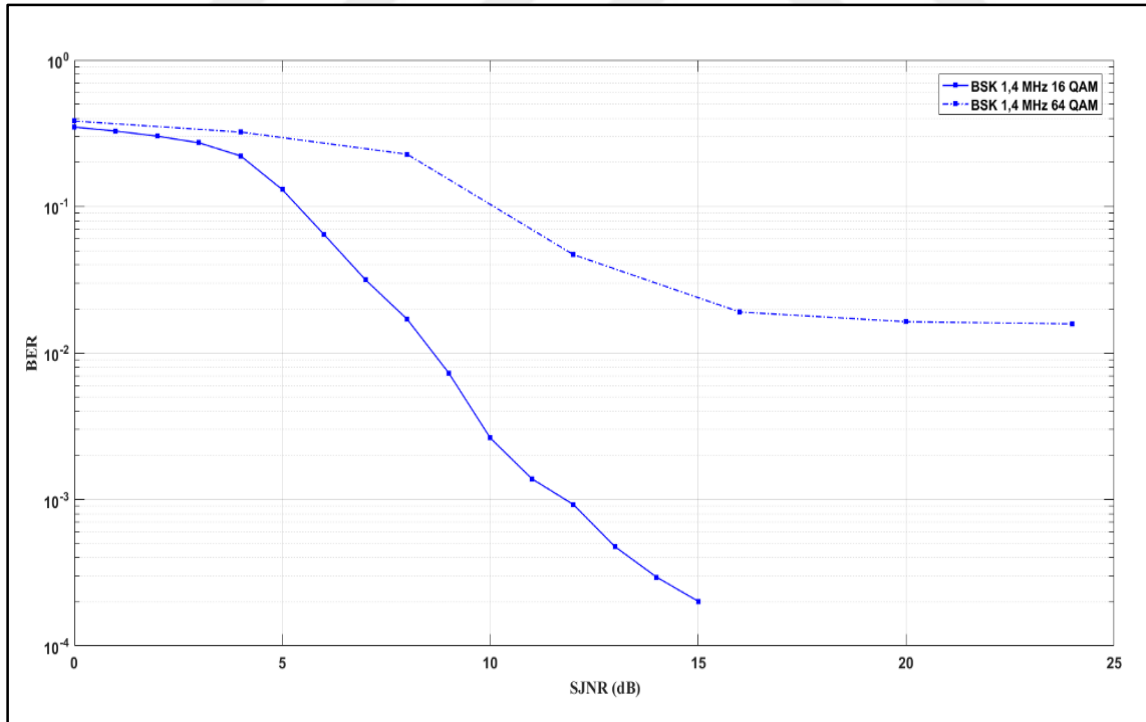
Şekil 3.5. Sinyal karıştırıcılar altında LTE-A'nın 1,4 MHz ve 20 MHz bant genişlikleri için BER-SJNR performansı

3.3. Modülasyon Karşılaştırması

Bu bölümde LTE-A aşağı hat iletimi esnasında kullanılan 16 QAM ve 64 QAM modülasyon türleri sırası ile BSK, KBSK, TTSK, ÇTSK sinyal karıştırıcılar ile karıştırılarak performansları incelenmiştir. Bu amaçla bant genişliği 1,4 MHz bant genişliği bütün simülasyonlarda sabit tutulmuştur.

3.3.1. Baraj sinyal karıştırıcı altında modülasyonların performans analizi

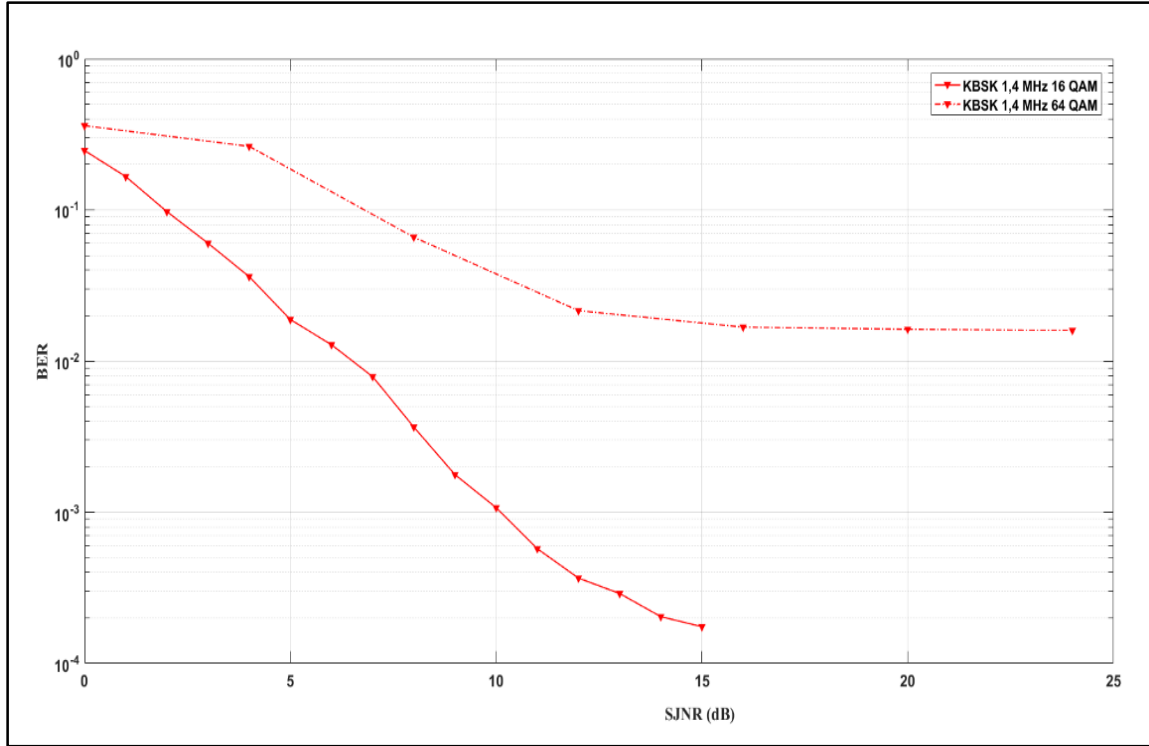
Şekil 3.6’da 10 dB SJNR değerinde baraj sinyal karıştırıcının LTE-A aşağı hat kanalında 16 QAM için 0.00263 ve 64 QAM için ise 0,01 bit hatasına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde 10^{-1} bit hata oranı için bakıldığında ise 16 QAM için 6 dB, 64 QAM için 10 dB’lik bir enerji gözlemlenmiştir. 64 QAM modülasyon kullanıldığında sistemin 15 dB değerinde doyum noktasına erişmekte iken 16 QAM modülasyon kullanıldığında ise iletişimin BER performansında düşüş devam etmektedir.



Şekil 3.6. Baraj sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonları için BER-SJNR performansı

3.3.2. Kısmi bant sinyal karıştırıcı altında modülasyonların performans analizi

Şekil 3.7’de 10 dB SJNR değerinde kısmi bant sinyal karıştırıcının LTE-A aşağı hat kanalında 16 QAM için 0,001072 ve 64 QAM için ise yaklaşık olarak 0,0475 bit hatasına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aynı şekilde 10^{-1} bit hata oranı için bakıldığında ise 16 QAM 2 dB’lik, 64 QAM için yaklaşık olarak 7 dB’lik enerji gözlemlenmiştir. Benzer şekilde KBSK’ da 64 QAM modülasyon kullanıldığında yaklaşık 13 dB de doyum noktasına ulaştığı gözlenmektedir. Fakat 16 QAM modülasyon kullanıldığında ise yine BER performansındaki düşüşün devam ettiği ve spektral verimliliğin daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.

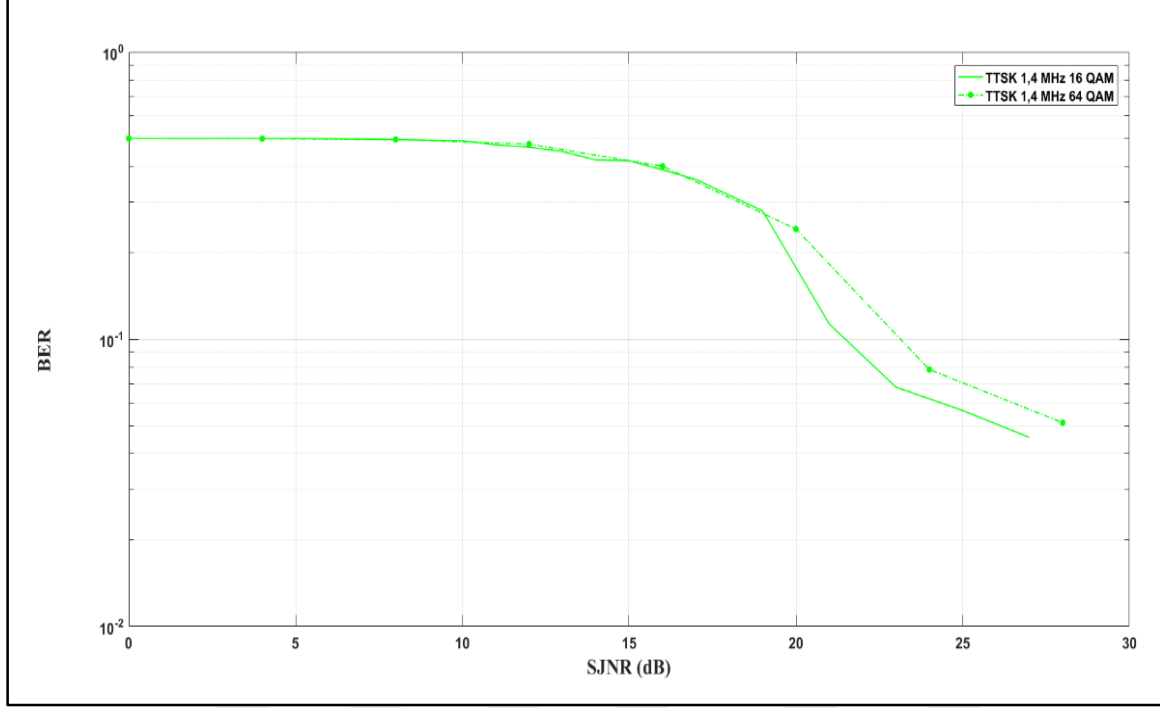


Şekil 3.7. Kısmi bant sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonları için BER-SJNR performansı

3.3.3. Tek tonlu sinyal karıştırıcı altında modülasyonların performans analizi

Şekil 3.8’de 20 dB SJNR değerinde tek tonlu sinyal karıştırıcının LTE-A aşağı hat kanalında 16 QAM için 0,4907 ve 64 QAM için ise 0,47 bit hatasına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Önceki simülasyondan farklı olarak TTSK karıştırıcının varlığında 16 ve 64 QAM modülasyon kullanıldığında 21 dB değerine kadar yakın BER değerlerine sahip olduğu

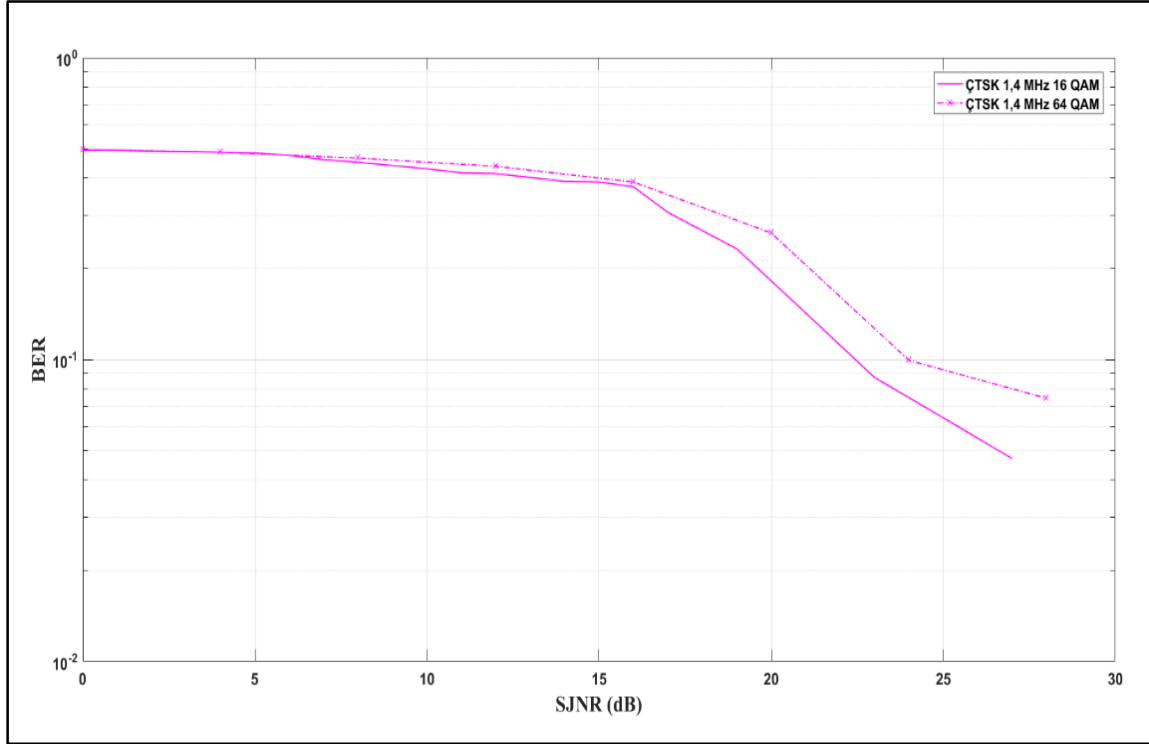
görülmektedir. TTSK karıştırıcının varlığında 64 QAM modülasyon yaklaşık 30 değerinde doyum noktasına ulaştığı görülebilmektedir.



Şekil 3.8. Tek tonlu sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonları için BER-SJNR performansı

3.3.4. Çok tonlu sinyal karıştırıcı altında modülasyonların performans analizi

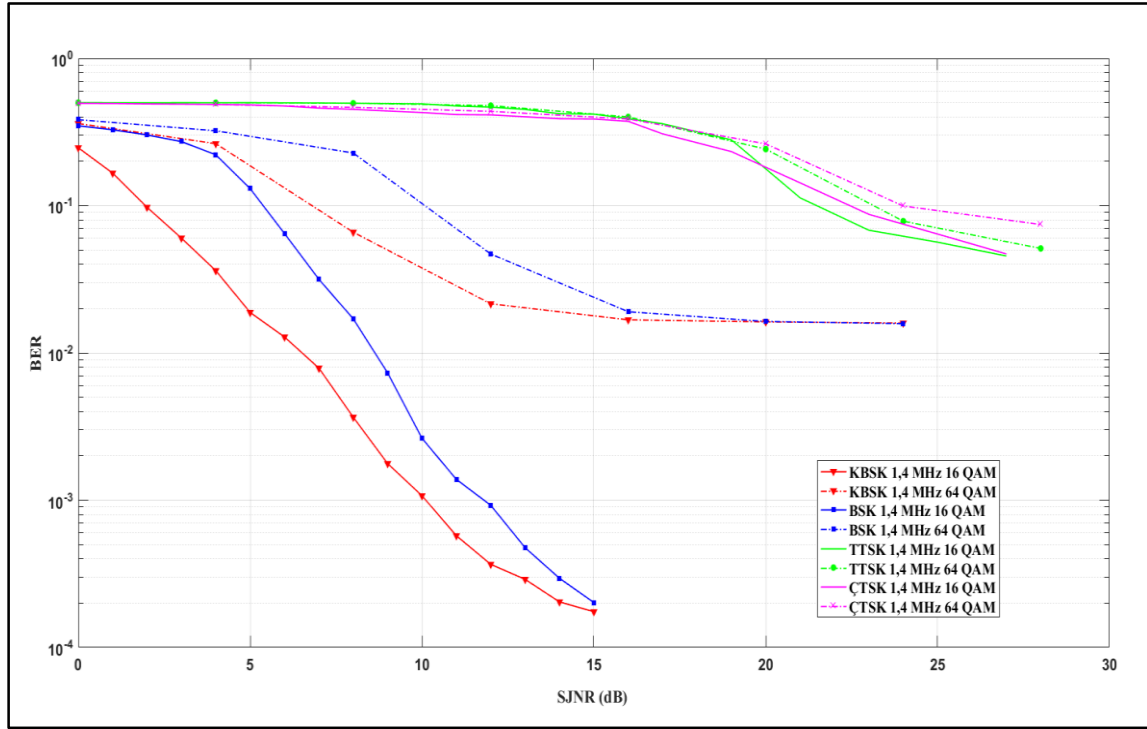
Şekil 3.9'da 10 dB SJNR değerinde çok tonlu sinyal karıştırıcının LTE-A aşağı hat kanalında 16 QAM için 0,4287 ve 64 QAM için ise 0,49 bit hatasına sahip olduğu gözlemlenmiştir. ÇTSK karıştırıcının varlığında 16 ve 64 QAM modülasyonun TTSK karıştırıcının varlığında olduğu gibi modülasyon katsayısının etkisi olduğu görülmüştür. Sistem benzer bir şekilde 30 dB değerinde doyum noktasına ulaşacak şekilde eğime sahip olmaktadır.



Şekil 3.9. Çok tonlu sinyal karıştırıcı altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonları için BER-SJNR performansı

3.3.5. Farklı sinyal karıştırıcı altında LTE/LTE-A modülasyonlarının performanslarının karşılaştırılması

Şekil 3.10, 1,4 MHz bant genişliğinde 16 QAM ve 64 QAM modülasyon uygulandığında BSK, KBSK, TTSK ve ÇTSK'nin bozucu etkilerini göstermektedir. Buna göre 10 dB SJNR değerinde 16 ve 64 modülasyon teknikleri karşılaştırıldığında, 16 QAM modülasyonunda BSK $1,072 \times 10^{-3}$, KBSK $2,63 \times 10^{-3}$, TTSK 0,4907 ve ÇTSK ise 0,4287 BER değerlerine sahip iken, 64 QAM modülasyonda BSK $3,162 \times 10^{-2}$, KBSK $1,13 \times 10^{-1}$, TTSK 0,47 ve ÇTSK 0,49 BER değerlerine sahiptir. Yani 16 QAM modülasyon tekniğinde tüm kanal bozucuların etkisinin en az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni ise 16 QAM modülasyon tekniğinde yıldız kümesi diyagramında her bir semboller arası mesafenin 64 QAM modülasyona göre daha geniş olmasıdır. Ayrıca 15 dB SJNR ve 20 dB SJNR değerinden sonra BSK ve KBSK uygulandığında 64 ve 16 QAM modülasyon BER performansları yakınsamaktadır. Yani bu değerlerden sonra sinyal gücü arttırılsa bile verimlilik değişmemektedir. Doyum noktasına ulaştığı görülmektedir. TTSK ve ÇTSK kanal bozucu teknikleri arasında ise 21 dB SJNR değerinden sonra 16 QAM ve 64 QAM modülasyon teknikleri için 10^{-1} BER değerinde yaklaşık 1 dB'lik enerji farkı oluşmaktadır.



Şekil 3.10. Sinyal karıştırıcılar altında LTE-A'nın 16 QAM ve 64 QAM modülasyonlarında BER-SJNR performansı

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada BSK, KBSK, TTSK ve ÇTSK sinyal karıştırıcılarının LTE-A aşağı-hat fiziksel kanalına etkileri incelenmiştir. Öncelikle LTE-A fiziksel katman tasarımı gerçekleştirilmiş ve yine standartta belirtilen şehir içi kanal yapıları MATLAB yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Ardından bu çalışmanın amacı olan farklı karıştırıcıların varlığında LTE-A standardının aşağı hattındaki etkileri incelenmiştir.

Dört farklı sinyal karıştırıcı yapısı tasarlanarak farklı SJNR değerlerinde BER analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla sinyal karıştırıcıların standartta kullanılan QAM modülasyonun farklı katsayılarında ve farklı bant genişliği değerlerinde ki etkileri incelenmiştir.

İlk olarak sabit 1,4 MHz bant genişliğinde modülasyon katsayıları değiştirildiğinde 16 QAM modülasyonun BSK ve KBSK karıştırıcılar altında 64 QAM modülasyona göre daha iyi BER performansı gösterdiği görülmüştür. Buna karşın TTSK ve ÇTSK karıştırıcılarının varlığında yüksek dB’de dahi BER performanslarının yakınlık gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak ÇTSK’nin sırasıyla TTSK, BSK ve KBSK’ye göre sinyali daha bozucu etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

İkinci olarak her bir kanal bozucunun farklı bant genişliklerindeki bozucu özellikleri gözlemlenmiştir. Bu amaçla 16 QAM modülasyon’da LTE-A sistemlerinde kullanılan en düşük yani 1,4 MHz ve en yüksek yani 20 MHz bant genişlikleri kullanılmıştır. Benzer şekilde ÇTSK karıştırıcının sinyal bozucu etkisinin en yüksek olduğu, ardında sırasıyla TTSK, BSK ve KBSK olduğu gözlemlenmiştir. Fakat 1,4 MHz’lik iletişim bant genişliğinde ÇTSK ve TTSK karıştırıcılarının etkilerinin yakın olduğu BER performanslarının 0,5 değerine çok yakınsadığı tüm SJNR değerlerinde gözlenmiştir. Bu da 1,4 MHz bant genişliğinde TTSK ve ÇTSK’nin iletişime ciddi bir şekilde olumsuz etkisi olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda her iki karıştırıcı 20 MHz’lik iletişim bant genişliğinde ise 10^{-1} altında BER değerlerine sahip olarak iletişimin her halükârda gerçekleştirilebileceğini göstermiş. Yani 20 MHz’lik bant genişliği kullanımında tüm sinyal karıştırıcıların etkisinin daha az olduğu görülmüştür.

LTE-A ticari kullanım amacıyla geliştirilmiş bir standart olmasına karşın kritik alanlardaki haberleşme sistemlerinde de kullanılması planlanmaktadır. Bu çalışmada temel amaç, LTE-A'nın sinyal karıştırıcılar altında performanslarını inceleyerek, ticari olarak geliştirilmiş olan bu standardın güvenilirliğine dikkat çekmektir. Bu amaçla yapılan analizler neticesinde LTE-A'nın fiziksel kanalında ÇTSK ve TTSK düşük bant genişliği ve yüksek modülasyon katsayılarında benzer özellikler göstermesine karşın ÇTSK'nin diğer durumlarda sırası ile TTSK, BSK ve KBSK karıştırıcılarından daha fazla sinyal karıştırıcı etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak LTE-A sahip olduğu birçok teknik avantajına rağmen, sinyal karıştırıcılardan etkilenebilmektedir. Bu sebeple kullanım amacının giderek çeşitlendiğini göz önünde bulundurularak gelecekteki sürümlerinde sinyal karıştırıcılara karşı bağışıklığının daha da artırılması gerektiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Avustralya hükümeti verimlilik komisyonu raporu. (2015). Public safety mobile broadband research report. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.pc.gov.au%2Finquiries%2Fcompleted%2Fpublic-safety-mobile-broadband%2Freport%2Fpublic-safety-mobile-broadband.pdf&date=2018-04-01>. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
2. İnternet: Thompson, E. (2012). Army examines feasibility of integrating 4G LTE with tactical network. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.army.mil%2Farticle%2F87875%2Farmy_examines_feasibility_of_integrating_4g_lte_with_tactical_network&date=2018-04-01. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
3. Mshvidobadze, T. (2012, October). *Evolution mobile wireless communication and LTE networks*. 2012 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT), Tbilisi, Georgia.
4. İnternet: Pereira, V., and Sousa, T. (2004). Evolution of Mobile Communications: from 1G to 4G. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Feden.dei.uc.pt%2F%7Evasco%2FPublications_files%2FMobile_evolution_v1.5.1.pdf&date=2018-04-01. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
5. İnternet: From Rysavy research and 3G Americas. (2010). Transition to 4G: 3GPP Broadband Evolution to IMT-Advanced. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.ic.gc.ca%2Feic%2Fsite%2Fsmt-gst.nsf%2Fwapj%2Fdgo-001-10-3GAmericas-attachment.pdf%2F%24FILE%2Fdgo-001-10-3GAmericas-attachment.pdf&date=2018-04-01>. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
6. Dahlman, E., Parkvall, S., and Sköld, J. (2014). *4G: LTE/LTE-Advanced for mobile broadband*. Kidlington, Oxford: Academic Press is an imprint of Elsevier.
7. George, S. V., Mathews, L., and Pillai, S. S. (2015, December). *Performance analysis of transmission modes in 4G LTE/LTE-A downlink systems*. 2015 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), Kumaracoil.
8. İnternet: Levin, M. Sh. (2017). Towards combinatorial modeling of wireless technology generations. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Farxiv.org%2Fabs%2F1708.08996&date=2018-03-28>. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
9. İnternet: Global mobile Suppliers Association. (2017). Evolution from LTE to 5G. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fgsacom.com%2Fpaper%2Fevolution-lte-5g-july-2017-update%2F&date=2018-03-28>. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.

10. İnternet: Mission critical application enabled by LTE network. (2016). Huawei Technologies Co., LTD. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww-file.huawei.com%2F%2Fmedia%2FCORPORATE%2FPDF%2Fmbb%2Fmission_critical_application_enabled_by_lte_network.pdf%3Fla%3Den&date=2018-03-28. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
11. Lichtman, M., Poston, J., Amuru, S., Shahriar, C., Clancy, T., Buehrer, R., and Reed, J. (2016). A communications jamming taxonomy. *IEEE Security & Privacy*, 14(1), 47-54.
12. Ahsan, F., Zahir, A., Mohsin, A., and Hussain, K. (2011). Survey on survial approaches in wireless network against jamming attack. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 30(1), 55-67.
13. Mukherjee, A., Fakoorian, S. A., Huang, J., and Swindlehurst A. L. (2014). Principles of pyhsical layer security in multiuser wireless networks: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 1550-1573.
14. Liu, Q., Li, M., Kong, X., and Zhao, N. (2015). Disrupting MIMO communications with optimal jamming signal desing. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(10), 5313-5325.
15. Chan, A., Liu, X., Noubir, G., and Thapa, B. (2007, June). *Broadcast Control Channel Jamming: Resilience and Identification of Traitors*. 2007 IEEE International Symposium on Information Theory, Nice.
16. Jun, L., Andrian, J. H., and Zhou, C. (2007, April). *Bit error rate analysis of jamming for OFDM systems*. 2007 Wireless Telecommunications Symposium, Pomona.
17. Shahriar, C., Pan, M. L., Lichtman, M., Clancy, T. C., Mcgwier, R., Tandon, R., Sodagari, S., and Reed, J. H. (2015). PHY-layer resiliency in OFDM communications: A tutorial. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 292-314.
18. Shahriar, C., Clancy, T. C., and Mcgwier, R. W. (2015). Equalization attacks against OFDM: Analysis and countermeasures. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 16(13), 1809-1825.
19. Chao, S., Ping, W., and Guozhong, S. (2012, June). *Performance of OFDM in the presence of multitene jamming*. 2012 IEEE Symposium on Robotics and Applications (ISRA), Kuala Lumpur.
20. Shahriar, C., Sodagari, S., Mcgwier, R., and Clancy, T. C. (2013, June). *Performance impact of asynchronous off-tone jamming attacks against OFDM*. 2013 IEEE International Conference on Communications (ICC), Budapest.
21. Clancy, T. C. (2011, June). *Efficient OFDM denial: Pilot jamming and pilot nulling*. 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto.
22. Takpor, T. O., Idachaba, F. E. (2014, July). *Analysis and simulation of LTE downlink and uplink transciever*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2014, London.

23. Lichtman, M., Reed, J. H., Clancy, T. C., and Norton, M. (2013, December). *Vulnerability of LTE to hostile interference*. 2013 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, Austin.
24. İnternet: Gonçalves, J. (2011). Simulation-base performance evaluation in LTE and LTE-advanced. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.semanticscholar.org%2Fpaper%2FSimulation-Base-Performance-Evaluation-in-LTE-and-Gon%25C3%25A7alves%2F594a07550ef2232ddf32a6bd83621c045c57ea67%3Ftab%3Dabstract&date=2018-03-28>. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
25. Jover, R. P. (2013, June). *Security attacks against the availability of LTE mobility networks: overview and research directions*. 16th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Atlantic City.
26. Aziz, F. M., Shamma, J. S., and Stuber, G. L. (2014, December). *Resilience of LTE networks against smart jamming attacks*. 2014 IEEE Global Communications Conference, Austin.
27. Bhattarai, S., Wei, S., Rook, S., Yu, W., Erbacher, R. F., and Cam, H. (2015, February). *On simulation studies of jamming threats against LTE networks*. 2015 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC), Garden Grove.
28. Philippe, G., Montaigne, F., Schiel, J., Georgeaux, E., Gruet, C., Roy, P.Y., Force, P., and Mège, P. (2013, October). *LTE resistance to jamming capability: To which extend a standard LTE system is able to resist to intentional jammers*. 2013 Military Communications and Information Systems Conference, St.-Malo.
29. Jover, R. P., Lackey, J., and Raghavan, A. (2014). Enhancing the security of LTE networks against jamming attacks. *EURASIP Journal on Information Security*, 2014(1), 7.
30. Xiao, J., Wang, X., Guo, Q., Long, H., and Jin, S. (2013, December). *Analysis and evaluation of jammer interference in LTE*. Proceedings of the Second International Conference on Innovative Computing and Cloud Computing (ICCC 13), Wuhan.
31. Grover, K., Lim, A., and Yang, Q. (2014). Jamming and anti-jamming techniques in wireless networks: A survey. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 17(4), 197.
32. Lichtman, M., Czauski, T., Ha, S., David, P., and Reed, J. H. (2014). *Detection and mitigation of uplink control channel jamming in LTE*. 2014 IEEE Military Communications Conference, Baltimore.
33. İnternet: LTE; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); LTE physical layer; general description. (2016). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.etsi.org%2Fdeliver%2Fetsi_ts%2F136200_136299%2F136201%2F13.00.00_60%2Fts_136201v130000p.pdf&date=2018-03-28. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.

34. İnternet: Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA), multiplexing and channel coding. (2017). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.etsi.org%2Fdeliver%2Fetsi_ts%2F136200_136299%2F136212%2F14.02.00_60%2Fts_136212v140200p.pdf&date=2018-03-28. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
35. İnternet: Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA), Physical Channels and Modulation Version. (2011). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.etsi.org%2Fdeliver%2Fetsi_ts%2F136200_136299%2F136211%2F10.00.00_60%2Fts_136211v100000p.pdf&date=2018-03-28. Son Erişim Tarihi: 28.03.2018.
36. Zarrinkoub, H. (2014). *Understanding LTE with MATLAB: From mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons.
37. Proakis, J. G., and Salehi, M. (2007). *Digital communications*. Boston: McGraw-Hill.
38. Sari, H., Karam, G., and Jeanclaude, I. (1991, June) *An analysis of orthogonal frequency-division multiplexing for mobile radio applications*. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Stockholm.
39. Ghosh, A., Zhang, J., Andrews, J. G., and Muhamed, R. (2011). *Fundamentals of LTE*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KISA, Gizay
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 14.05.1991, Lüleburgaz
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 284 12 16
 e-mail : gizay.kisa@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	2018
Lisans	Çankaya Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği	2014
Lise	Ayrancı Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü	Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Kısa, G., Ertuğ, Ö. (2017, Kasım). *Sinyal Karıştırıcıların LTE/LTE-A Aşağı-Hat Fiziksel Kanalına Etkileri*. Elektrik Elektronik Mühendisliği Kongresi, İstanbul.

Hobiler

Doğa sporları



GAZİ GELECEKTİR..